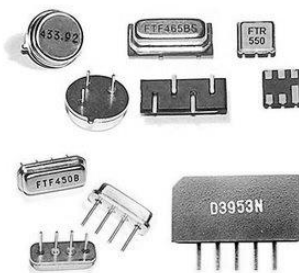


Т.В. Свистова

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Учебное пособие



Воронеж 2014

ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный
технический университет»

Т.В. Свистова

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Утверждено Редакционно-издательским советом
университета в качестве учебного пособия

Воронеж 2014

Свистова Т.В. Функциональная электроника: учеб. пособие [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые и граф. данные (3,2 Мб) / Т.В. Свистова. - Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2014. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM) : цв. – Систем. требования: ПК 500 и выше; 256 Мб ОЗУ; Windows XP; SVGA с разрешением 1024x768; MS Word 2007 или более поздняя версия; CD-ROM дисковод; мышь. – Загл. с экрана. – Диск и сопровод. материал помещены в контейнер 12x14 см.

В учебном пособии рассматриваются физические и микросистемные основы построения элементной базы приборов и устройств направлений развития функциональной электроники (акустоэлектроники, диэлектрической электроники, полупроводниковой электроники, магнетоэлектроники, молекулярной электроники, криоэлектроники, хемоэлектроники).

Издание соответствует требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по направлению 210100.62 «Электроника и наноэлектроника» (профиль «Микроэлектроника и твердотельная электроника»), дисциплине «Функциональная электроника».

Ил. 114. Библиогр.: 8 назв.

Научный редактор д-р физ.-мат. наук, проф. С.И. Рембеза

Рецензенты: кафедра физики полупроводников и микроэлектроники Воронежского государственного университета (зав. кафедрой д-р физ.-мат. наук, проф. Е.Н. Бормонтов);
канд. физ.-мат. наук, доц. Е.В. Бордаков

© Свистова Т.В., 2014

© Оформление. ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2014

ВВЕДЕНИЕ

Микроэлектроника - область электроники, связанная с исследованиями поведения заряженных частиц в твердом теле под воздействием электрических, магнитных, электромагнитных, тепловых полей, а также с созданием приборов и устройств в микроминиатюрном исполнении с использованием групповой технологии изготовления.

Современная микроэлектроника базируется на интеграции дискретных элементов электронной техники (резисторов, конденсаторов, диодов, транзисторов), при которой каждый элемент схемы формируется отдельно в полупроводниковом кристалле. В основе создания ИМС лежит принцип элементной (технологической) интеграции, сопровождающейся микроминиатюризацией элементов (активных и пассивных) микросхемы. Поэтому синонимом микроэлектроники является понятие «интегральная электроника». Говоря о микроэлектронике, имеют в виду микроэлектронные размеры элементов, говоря об интегральной электронике - интеграцию этих элементов на кристалле микросхемы. В микроэлектронике сохраняется главный принцип дискретной электроники, основанной на разработке электрической схемы по законам теории цепей. Этот принцип неизбежно связан с ростом числа элементов микросхемы и межэлементных соединений по мере усложнения выполняемых ею функций.

Дальнейшее развитие микроэлектронных приборов связано с уменьшением размеров элементарных приборов до субмикронных размеров и переход в нанометровый масштаб измерений. Таким образом, микроэлектронные приборы превращаются в наноэлектронные. При этом утрачивается групповая технология их изготовления. При этом произойдёт переход на пластины большого диаметра. С ростом диаметра обрабатываемых пластин резко возрастут издержки при производстве сверхбольших интегральных схем. Сложными становятся про-

блемы топологии и теплоотвода. Проблема межсоединений, характерная для схмотехнической микроэлектроники, ограничит скорость внешнего обмена информацией. В схмотехнической электронике с ростом степени интеграции и уменьшением топологической нормы возникает проблема **«тирании межсоединений»**. Она связана с резким увеличением площади, занимаемой на кристалле межсоединениями (более 60 %), деградацией электрических параметров линий межсоединений, ростом энергии на перезарядку линий межсоединений, влиянием погонной ёмкости линий межсоединений и волнового сопротивления на частотные характеристики схемы, с необходимостью многоуровневой разводки при большом числе линий межсоединений.

Предельные показатели достижений микроэлектроники уже не смогут соответствовать набирающему силу научно-техническому прогрессу. Поэтому в отдаленной перспективе интегральная микроэлектроника уже не будет полностью удовлетворять разработчиков сложной радиоэлектронной аппаратуры.

Даже достигнув предельных значений быстродействия и степени интеграции в изделиях схмотехнической микроэлектроники, нельзя будет на их основе создать устройства, способные решать перспективные задачи обработки больших информационных массивов.

В этом случае возникает альтернатива: или искать пути сохранения тенденции экспоненциального роста степени интеграции интегральных схем и тем самым расширить возможности схмотехнической микроэлектроники, или искать принципиально новый подход при создании систем обработки больших информационных массивов.

Разработчики ИС активно ищут способы преодоления «тирании межсоединений», пути обхода технологических и физических барьеров. С этой целью разрабатываются **вертикальные структуры**, в которых стараются разместить максимум

элементов в минимальном пространстве. Активные и пассивные элементы схемы размещаются в объёме, и интегральная схема становится *трёхмерной*.

Технология «кремний на диэлектрике» открывает определённые перспективы вертикальной интеграции и позволяет получать многоярусные транзисторные структуры. Предполагается, что трёхмерные ИС будут иметь высокие быстродействие и плотность упаковки элементов, обладать возможностью параллельной обработки информации и станут многофункциональными. Переход в трёхмерную электронику отнюдь не решит проблемы межсоединений, напротив, резко усложнит конструкции межуровневых соединений. Надёжность таких схем вызывает сомнение, а доказательств обратного пока нет. Переход в трёхмерную электронику сулит увеличение степени интеграции лишь вдвое, а не экспоненциальный рост в соответствии с законом Мура.

Могут ли «спасти» схемотехническую электронику *метод интеграции на пластине* или *создание «суперкристаллов»*? Проблема межсоединений в этих случаях тоже принципиально не решается, а значит и достижение успеха сомнительно. По этой же причине сомнительны перспективы использования в схемотехнической электронике различных эффективных и сверхминиатюрных транзисторных структур.

Значительный интерес представляют *круглые полупроводниковые интегральные схемы*. В них используется 95 % объёма кремния против 5 % в обычных ИС. Выводы располагаются по всей сфере, что позволяет обеспечить простоту компоновки сферических ИС. В производстве таких «маковых» схем осуществлен принципиальный переход от групповой технологии обработки пластин к гибкой штучной производственной системе с предполагаемой производительностью до 2500 сферических интегральных схем в секунду. В этом технологическом процессе среди слабых мест следует отметить трудоёмкую сферическую литографию, высокую индуктивность полу-

чаемых схем, ненадёжность процесса наматывания линий межсоединений на поверхность сферы, последующая их коммутация и т. п.

Чтобы уйти от проблемы «тирании межсоединений» нужно уйти от традиционного принципа обработки информации, отказаться от схмотехнической ячейки как основного преобразователя и хранителя информации.

Традиционная схмотехническая ячейка, будь это логическая ячейка или ячейка памяти, состоит из большого количества статических неоднородностей. Под **статической неоднородностью** понимается локальная область на поверхности или в объёме среды с отличными от её окружения свойствами, создаваемая в результате строго определённых технологических процессов. Свойства таких статических неоднородностей позволяют генерировать, управлять или хранить информацию. Это и есть схмотехническая микроэлектроника, или электроника статических неоднородностей. В этом случае устройства обработки и хранения информации реализуются на определённых схмотехнических решениях.

В конце семидесятых годов XX века возникла идея использовать динамические неоднородности в процессах обработки и хранения информации, а также физические принципы интеграции не только числа элементов, но и числа функций, выполняемых микроэлектронным прибором.

При интеграции на одном кристалле не только элементов, но и физических явлений и эффектов увеличиваются функциональные возможности приборов и устройств интегральной электроники. При этом используется уже не только схмотехнические решения для обработки и хранения информации, но и физические носители информационного сигнала - динамические неоднородности различной физической природы. Это направление в развитии электроники называют **функциональной электроникой**. Следует при этом еще раз подчеркнуть, что если с переходом в субмикронный диапазон размеров в

нанoeлектронике утрачивается принцип групповой технологии производства элементарных электронных приборов, то в функциональной электронике по-прежнему сохраняется принцип групповой технологии.

Функциональная электроника оформилась как научное направление в электронике в последней четверти XX столетия. Формированию этого направления способствовала лавина открытий в физике и электронике. Пионерские работы в этой области принадлежат Гуляеву Ю.В., Валиеву К.А., Стафееву В.И., Федотову Я.А., Сретенскому В.Н., Пустовойту В.И., Борисову Б.С., Лаврищеву В.П., Носову Ю.Р., Попкову А.Ф., Ракитину В.В., Новикову В.В., Ерофееву А.А., Васенкову А.А. и другим отечественным ученым и их школам.

Например, 1964 г. - Гуляев Юрий Васильевич, Пустовойт Владислав Иванович, сотрудники Института радиоэлектроники АН СССР, предсказали явление взаимодействия акустических поверхностных волн и электронов в твердом теле, тем самым открыли новое направление в *электронике - акустоэлектронике*;

1968 г. - в ИРЭ АН СССР и США открыт эффект чисто сдвиговых поверхностных акустических волн, которые не обладают дисперсией - волны Гуляева - Блюкштейна; открытие Гуляевым Ю.В. акустомагнитоэлектрического эффекта, открытие поперечного акустоэлектрического эффекта. Все эти работы в России и за рубежом позволили сформировать новое научное направление - акустоэлектронику и промышленное производство акустоэлектронных изделий;

1963 г. американский физик Дж. Б. Ганн обнаружил токовые неустойчивости в виде электрических доменов в образцах арсенида галлия (GaAs) и антимонида индия (InSb) с электронной проводимостью. 1966 г. коммерческие диоды Ганна (фирма *International Semiconductor Inc.*) – первые СВЧ полупроводниковые приборы;

1969 г. исследователи фирмы *Bell Laboratories* обнаружили в магнитной пленке цилиндрические магнитные домены (новая электронная память);

1970 г. - фирма *Bell Laboratories* Бойл В.С., Смит Дж. Е разработали приборы с зарядовой связью.

Исследователям стало ясно, что помимо традиционных носителей информационного сигнала, таких, как свободные электроны в вакууме, твердом теле, ионы в плазме, связанные электроны в средах различного агрегатного состояния, существуют и другие, неявно связанные с электронами. К таким носителям можно отнести различного типа волны в различных средах, домены, квазичастицы, зарядовые пакеты электронов и т. п. Эти носители получили название ***динамические неоднородности***.

Целями преподавания дисциплины «Функциональная электроника» являются изучение студентами физических основ функциональной электроники; основных физических процессов, лежащих в основе действия приборов функциональной электроники; конструкции, параметров, характеристики и области применения приборов и устройств функциональной электроники.

Данное учебное пособие написано на основе курса лекций по дисциплине «Функциональная электроника», читаемого студентам Воронежского государственного технического университета, и полностью соответствует требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по направлению подготовки бакалавров 210100 «Электроника и наноэлектроника» (профиль «Микроэлектроника и твердотельная электроника»), дисциплине «Функциональная электроника».

1. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

1.1. Особенности функциональной электроники

Функциональная микроэлектроника охватывает вопросы получения специальных сред с наперед заданными свойствами и создания различных электронных устройств методом физической интеграции, т. е. использования таких физических принципов и явлений, реализация которых позволяет получить приборы со сложным схемотехническим или системотехническим функциональным назначением.

Функциональная микроэлектроника предполагает принципиально иной подход, позволяющий реализовать определенную функцию аппаратуры без применения стандартных базовых элементов, *основывается непосредственно на физических явлениях в твердом теле*. Локальному объему твердого тела придаются такие свойства, которые требуются для выполнения данной функции, и промежуточный этап представления желаемой функции в виде эквивалентной электрической схемы не требуется. Функциональные микросхемы могут выполняться не только на основе полупроводников, но и на основе таких материалов, как сверхпроводники, сегнетоэлектрики, материалы с фотопроводящими свойствами и др. Для переработки информации можно использовать явления, не связанные с электропроводностью (например, оптические и магнитные явления в диэлектриках, закономерности распространения ультразвука и т.д.).

Функциональная электроника представляет собой область интегральной электроники, в которой изучается возникновение и взаимодействие динамических неоднородностей в континуальных (непрерывных) средах в совокупности с физическими полями, а также создаются приборы и устройства на

основе динамических неоднородностей для целей обработки, генерации и хранения информации.

В функциональной электронике пока не существует принципиальных ограничений, связанных с размерами статических или динамических неоднородностей. Сравним изделия традиционной схемотехнической и функциональной электроники.

В изделиях схемотехнической электроники перенос информационного сигнала происходит побитово по линиям межсоединений, что снижает помехоустойчивость и надёжность изделий. В изделиях функциональной электроники массив информационных сигналов может быть обработан одномоментно весь, целиком, не обязательно в виде отдельных битов информации. Важно отметить, что обработка информации в такого типа процессорах происходит в аналоговом виде, без перевода аналогового сигнала в цифровой и обратно. При такой обработке передача информации может осуществляться без проводников или линий межсоединений. Возможно создание устройства, позволяющего производить обработку информации в аналоговом и цифровом видах одновременно, поэтому в устройствах обработки информации на принципах функциональной электроники достигается производительность более 1015 операций в секунду.

В изделиях функциональной электроники перенос информации, как правило, осуществляется в континуальной среде, а не в линиях межсоединений. Они выполняют функции вспомогательных связей и проблема «тирании межсоединений» в этом случае не является ключевой.

Замечательным свойством приборов функциональной электроники является использование в процессах обработки информации функций высшего порядка в качестве элементарных, например, Фурье-преобразования; интегрального преобразования Лапласа, операции свертки; операции корреляции; автокорреляции; управляемой задержки информационного сигнала; хранения информации, в том числе в виде многобитовых

носителей; фильтрации информационного сигнала; когерентного сложения сигналов; ответвления информационных сигналов; комбинированной обработки информационных сигналов и т. д. В то же время в изделиях функциональной электроники могут быть реализованы и традиционные элементарные функции типа И, ИЛИ, НЕ и их различные комбинации.

В активной среде прибора функциональной электроники может храниться и одновременно обрабатываться большой объём информации. Поэтому изделие функциональной электроники может рассматриваться как процессор, выполняющий элементарные функции высшего порядка.

Устройства памяти реализуются путём упорядоченного сохранения в континуальной среде динамических неоднородностей, каждая из которых несёт бит информации. Возможно создание запоминающих устройств и на основе многобитовых динамических неоднородностей.

Если в процессорах используется один вид динамических неоднородностей в одной континуальной среде, то это изделия функциональной электроники первого поколения. Если используются два или более вида динамических неоднородностей в разных средах, то такие изделия относятся ко второму поколению.

Анализируя устройства функциональной электроники, можно выделить некоторые элементы, характерные для всех конструкций.

Во всех приборах и изделиях функциональной электроники используются ***динамические неоднородности различного вида и различной физической природы***. Это первый элемент в предложенной модели прибора функциональной электроники. Так, в акустоэлектронных устройствах используются динамические неоднородности в виде поверхностной акустической волны (ПАВ); в полупроводниковых приборах с зарядовой связью — зарядовые пакеты электронов или дырок; в приборах магнитозлектроники — магнитостатические волны (МСВ) и т. д.

Все виды динамических неоднородностей генерируют, обрабатывают или хранят информацию в континуальных средах, как правило, в твёрдом теле. **Континуальная среда** является вторым элементом модели. Вообще говоря, она может иметь любое агрегатное состояние. Наши интересы в области микроэлектроники сосредоточены на использовании твёрдого тела. По своим физико-химическим свойствам среда должна быть достаточно однородной на всём тракте распространения информационного сигнала. Статические неоднородности, имеющиеся на поверхности или внутри континуальной среды, служат только для управления динамическими неоднородностями и не используются для обработки и хранения информации. Динамические неоднородности, обрабатывая информационный сигнал в континуальных средах, не меняют их физико-химических свойств в условиях термодинамического равновесия. В противном случае, динамическая неоднородность может образовать статическую неоднородность, представляющую собой «замороженный» бит информации.

Третьим элементом модели является **генератор динамических неоднородностей**, предназначенный для их ввода в канал распространения, расположенный в континуальной среде. Динамическая неоднородность может быть введена в информационный канал в континуальной среде и из-за её пределов или сгенерирована в этом канале.

Устройство управления динамическими неоднородностями в тракте переноса информационного сигнала или в области его хранения является четвёртым элементом в модели прибора.

Вывод или считывание информации осуществляется с помощью детектора. Это устройство позволяет преобразовать информационный массив, созданный динамическими неоднородностями, в массив двоичной информации. В этом случае можно использовать хорошо развитые устройства и методы цифровой

обработки информации. *Детектор* является пятым элементом типовой модели.

Предложенная модель прибора функциональной электроники позволяет развить:

- системный подход к анализу известных конструктивных решений-прототипов приборов;
- раскрыть физическую сущность явлений, лежащих в основе работы приборов;
- оптимизировать известные конструкции по технико-экономическим параметрам;
- разработать прогнотип - новое, ранее неизвестное конструктивное решение с заданными технико-экономическими показателями.

Итак, общепризнанно, что электронные устройства на дискретных элементах относили к устройствам первого поколения, первые интегральные схемы в электронике сформировали приборы и устройства второго поколения, а нынешнее третье поколение микроэлектронных средств вычислительной техники и обработки информации базируется на больших и сверхбольших интегральных схемах.

Вполне корректно отнести приборы и устройства, использующие динамические неоднородности в качестве носителей информационного сигнала, к электронике четвёртого поколения.

1.2. Динамическая неоднородность. Типы динамических неоднородностей

Динамическая неоднородность представляет собой локальный объем на поверхности или внутри среды с отличными от его окружения свойствами, который не имеет внутри себя статических неоднородностей и генерируется в результате определенных физико-химических процессов. Динамическая неоднородность может быть локализована или перемещаться

по рабочему объему континуальной (непрерывной) среды в результате взаимодействия с различными физическими полями или динамическими неоднородностями такой же или другой физической природы.

В процессе перемещения динамической неоднородности может происходить, например, перенос информации. Деградация динамической неоднородности не приводит, как правило, к потерям и сбоям в процессах обработки информации.

В функциональной микроэлектронике начинают использовать:

1. **Оптические явления** (когерентная и некогерентная оптика, нелинейная оптика, электрооптика, магнетооптика). Их свойства, связанные со свойствами светового потока, следующие:

зарядовая нейтральность, однонаправленность, отсутствие гальванических связей и электрических контактов;

двухмерность светового потока, а, следовательно, возможность многоканальной обработки информации;

высокая несущая частота и, следовательно, большая полоса пропускания каналов обработки информации.

Эти особенности стали основой интенсивно развивающегося направления функциональной микроэлектроники - оптоэлектроники.

2. **Физические явления, связанные с взаимодействием потока электронов с акустическими волнами в твердом теле.** Такие явления, как генерация и усиление акустических волн потоком электронов, движущихся со сверхзвуковыми скоростями, обусловили появление нового направления функциональной микроэлектроники - акустоэлектроники. Особенность этих явлений заключается в малой скорости распространения акустических волн ($1 \cdot 10^5$ см/с) в отличие от электромагнитных волн ($3 \cdot 10^{10}$ см/с), что позволяет реализовать миниатюрные линии задержки, фильтры с заданными частотными свойствами, усилители СВЧ и др.

Преимущество этого направления состоит в том, что реализация заданной функции обеспечивается лишь выбором конфигурации устройства.

3. Новые магнитные материалы (слабые ферромагнетики и магнитные полупроводники), появление которых привело к созданию нового направления - магнетоэлектроники. Отличительной особенностью слабых ферромагнетиков является малая по сравнению с классическими магнитными материалами намагниченность насыщения. Это дает возможность управлять движением магнитных доменов, называемых пузырями, в двух и трех измерениях слабыми магнитными полями и осуществлять тем самым функции хранения, перемещения и обработки больших объемов информации.

Характерные размеры «пузырей», составляющих примерно 1 мкм, позволяют достичь высокой плотности записи информации ($1 \cdot 10^8$ бит/см²). Большое преимущество таких систем состоит в том, что хранение информации осуществляется без питания, а перемещение «пузырей» — малым рассеянием мощности. Ряд новых материалов — магнитных полупроводников, обладающих свойствами магнетиков и полупроводников, — позволяет создавать приборы с большой функциональной гибкостью.

4. Покоящиеся и движущиеся электрические неоднородности (домены и шнуры) в однородных полупроводниках. Их исследование стимулировало создание функциональных интегральных микросхем.

Так как в данном случае используется однородный материал, то реализация заданной функции может быть достигнута выбором соответствующей конфигурации устройства. Высокие скорости движения неоднородностей электрического поля ($1 \cdot 10^7$ см/с), обуславливают высокое быстродействие (меньше $1 \cdot 10^9$ с), а также генерацию и усиление в диапазоне СВЧ.

Микроэлектронные устройства с использованием доменов обладают высокими функциональными возможностями.

5. Явления, связанные с изменением структуры конденсированных тел на молекулярном уровне. Они привели к возникновению нового направления - квантовой или молекулярной микроэлектроники. К этому направлению относятся фазовые переходы в твердых телах и жидких кристаллах, сопровождающихся резкими изменениями электрических, оптических и магнитных свойств. Обусловленная этим высокая чувствительность к внешним воздействиям позволяет легко осуществлять ряд операций по управлению и преобразованию потоков информации в различных функциональных системах.

Интересными материалами с еще не вполне раскрытыми перспективами использования их в микроэлектронике являются органические полупроводники.

6. Элементы на основе эффекта Ганна. Эффект Ганна – явление генерации ВЧ-колебаний электрического тока в случае приложения к образцу *n*-типа арсенида галлия или антимонида индия постоянного напряжения, превышающего некоторое критическое значение. Помимо генераторов и усилителей СВЧ они позволяют создавать такие функциональные устройства, как импульсно-кодовые модуляторы, компараторы, аналого-цифровые преобразователи, нейристорные линии задержки, полный ряд логических элементов, генераторы колебаний сложной формы, регистры сдвига и запоминающие устройства (ЗУ). На основе этих элементов могут быть созданы сверхбыстродействующие микросхемы (теоретически до 10^{-12} с), превосходящие по быстродействию лучшие кремниевые микросхемы, по крайней мере, на порядок при том же уровне рассеиваемой мощности.

Малогабаритные СВЧ-генераторы на диодах Ганна уже миновали стадию лабораторных разработок. Они обладают низким уровнем шумов (сравнимым с клистродами) и мощностью излучения, достаточной для использования в радиолокационных устройствах в диапазоне частот 1 - 80 ГГц. Такие диоды в пролетном режиме генерации обеспечивают выходную мощ-

ность 20 - 350 мВт - в непрерывном режиме и 1 - 400 Вт - в импульсном режиме. В режиме ограниченного накопления объемного заряда диоды Ганна позволяют получать импульсную мощность 3 - 6 кВт на частоте 1,5 - 2 ГГц при КПД 10 - 20 %.

7. Явления холодной эмиссии, которые позволили создать электровакуумные приборы в микроэлектронном исполнении с применением пленок. Обладая всеми преимуществами вакуумных приборов (высокие входные сопротивления, малые шумы), они характеризуются очень высокой радиационной стойкостью, весьма малыми размерами, высокими рабочими частотами.

8. Явления живой природы, в частности на молекулярном уровне, позволяющие использовать принципы хранения и обработки информации в живых системах для создания сверхсложных систем обработки информации, приближающихся по своим функциональным возможностям к человеческому мозгу (искусственный интеллект), а также решать проблему эффективной связи «человек - машина». Эти явления открывают новое направление - биоэлектронику. Развитие этого направления может привести к научно-технической революции в электронике, последствия которой трудно предвидеть.

9. Функциональные микросхемы, в которых используется эффект накопления и переноса зарядов, что позволяет реализовать плотность размещения элементов $3 \cdot 10^4$ элемент/см². Такие приборы по существу представляют собой МДП-структуры, они весьма технологичны (число технологических операций в два раза меньше по сравнению с обычной МДП-технологией). Приборы с переносом заряда (ППЗ), или приборы с зарядовой связью (ПЗС), могут стать основой построения логических схем, линий задержки, схем памяти и систем для получения изображений. Сравнительная простота технологии изготовления ПЗС по сравнению с системами на обычных МДП-транзисторах и почти десятикратное уменьшение площади схемы (порядка 0,0016 мм² на 1 бит информации) должны привести к существенному снижению стоимости си-

стем на ПЗС. Использование полевых транзисторов с нитридом кремния в качестве диэлектрика затвора позволяет преодолеть один из основных недостатков полупроводниковых ЗУ — потерю информации при отключении питания. Такие ЗУ дают возможность реализовать плотность размещения элементов до 10^8 элемент/см² при времени записи 10^{-6} с.

Другой тип управления электрическими неоднородностями в однородном материале состоит в помещении зарядов в потенциальные ямы в приэлектродной области. И здесь выполнение заданных функций достигается топологией контактов. Очень перспективно объединение методов, сочетающих заряд в потенциальных ямах с захватом и хранением заряда в поверхностном слое (электретный эффект), что позволяет совместить длительное хранение больших объемов информации и ее обработку (электроника переноса заряда).

10. Интересные возможности для реализации быстродействующих ЗУ большого объема представляют переключатели на основе *аморфных материалов* (не имеющие кристаллического строения), обладающие симметричной S-образной вольт-амперной характеристикой. Время переключения прибора составляет $1,5 \cdot 10^{-10}$ с. На основе элементов из халькогенидных стекол создано постоянное ЗУ на 256 бит с возможностью электрической перезаписи и высокой плотностью упаковки структуры, сравнимой с достигнутой плотностью в биполярной и МДП-технологии. Емкость ЗУ может возрасти до 10^6 бит. Эти приборы обеспечивают хранение информации без расхода энергии и считывание без разрушения, обладают симметричностью вольт-амперных характеристик и высокой радиационной стойкостью.

Наиболее перспективными из аморфных полупроводников (пленки толщиной не более 1 мкм) является Si, Ge, As, Te, In, Sb, Se или их сплавы, а также диэлектрики на основе оксидов этих полупроводников или оксидов тугоплавких металлов переходной группы, например Gr, Ti, Ta, Mo, Nb.

Аморфные материалы классифицируют следующим образом:

- материалы с резко изменяющимся значением удельного сопротивления (рис. 1.1, а);
- материалы с отрицательным дифференциальным сопротивлением до 10^6 Ом (рис. 1.1, б);
- материалы с двумя управляемыми состояниями электропроводности (рис. 1.1, в); сопротивления этих материалов могут различаться на семь порядков, а время переключения составляет 10^{-9} с;
- материалы с двумя устойчивыми состояниями переключения (рис. 1.1, г);
- функциональные материалы, объединяющие свойства перечисленных материалов (рис. 1.1, д).

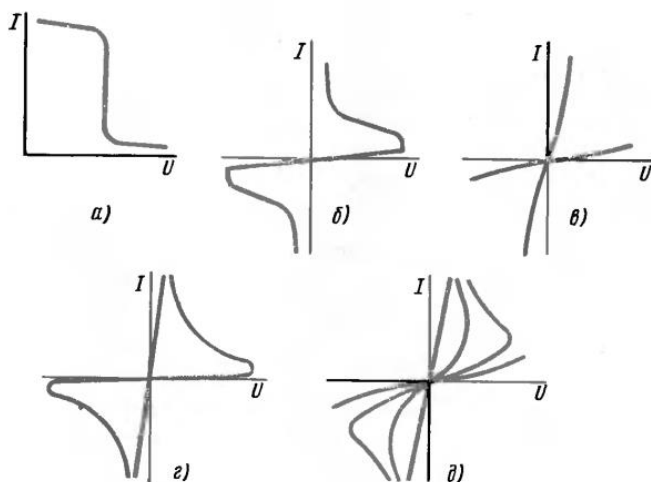


Рис. 1.1. Общий вид вольт-амперных характеристик различных аморфных материалов

Анализ вольт-амперных характеристик аморфных материалов показывает, что их проводимость в ряде случаев скачком изменяется на несколько порядков и сохраняется в таком состоянии неограниченно долго. Эти свойства аморфных материалов уже дали возможность построить пороговые переключатели, ячейки памяти, перестраиваемые ключи памяти с двумя устойчивыми состояниями. Отметим, что интервал рабочих температур аморфных переключателей и ячеек памяти составляет от -180 до +180 °C.

Представляют большой интерес функциональные элементы с управляемым отрицательным сопротивлением на основе аморфных материалов. Эти приборы можно подразделить на две категории: 1) приборы, управляемые током и обладающие отрицательным дифференциальным сопротивлением (приборы с S-образной характеристикой); 2) приборы, управляемые напряжением и обладающие эффектом памяти (приборы с N-образной характеристикой). Первый тип приборов реализуется на пленках окислов Ta, Ti, Nb, второй - на пленках диэлектриков, содержащих окислы, сульфиды и флюориды.

На основе аморфных полупроводников развиваются перспективные приборы - туннельные пленочные эмиттеры (рис. 1.2). По внешнему виду эти приборы почти не отличаются от конденсаторных структур типа «металл - диэлектрик - металл», однако принцип их работы иной. Пленка диэлектрика очень тонкая, способная пропускать токи до 0,01 А, верхний электрод также достаточно тонкий (не более 50 нм). Принцип работы пленочных эмиттеров следующий. Электроны из катода (толщиной порядка 0,5 мкм) попадают в диэлектрик и в зависимости от толщины аморфной пленки диэлектрика разгоняются в нем до больших скоростей либо рассеиваются со значительными потерями энергии. Толщину диэлектрика выбирают минимальной, однако такой, чтобы сохранялась сплошная структура пленки и не было частичных микропробоев диэлектрика. Рабочая толщина диэлектрика обычно не превышает 40 нм. Так

называемые «горячие электроны» просачиваются через потенциальный барьер и мигрируют через наружный электрод в вакуум. Пленочная структура металл - диэлектрик - металл выполняет фактически функцию холодного катода, который в отличие от обычных катодов почти не шумит, обладает повышенной радиационной стойкостью и очень малыми размерами при большом токе эмиссии с единицы поверхности.

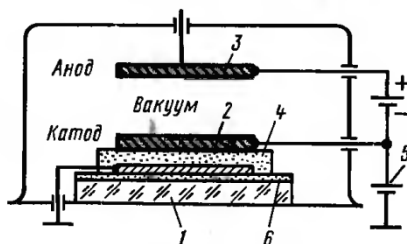


Рис. 1.2. Структура накаливаемого пленочного эмиттера:
 1 - подложка; 2 - алюминий, золото или вольфрам; 3 - золото;
 4 - SiO_2 или AlO_3 ; 5 - алюминий;
 6 - грунтовой подслон из SiO_2

11. Когерентные свойства сигнала для создания ряда новых твердотельных функциональных приборов: генераторов синусоидальных колебаний, усилителей, умножителей, преобразователей частоты, фазовращателей, трансформаторов, линий задержки, нейристорных линий, логических элементов, ячеек памяти и т. д. Следует особо выделить специфическое физическое явление, основанное на квантовых когерентных свойствах носителей заряда - *эффект Джозефсона*. Суть его состоит в том, что через достаточно тонкую (порядка 2 нм) диэлектрическую прослойку между сверхпроводящими слоями при низких температурах даже в отсутствие разности потенциалов может протекать своеобразный туннельный ток, легко управляемый сравнительно слабым внешними сигналами. Значения парамет-

ров приборов, основанных на этом эффекте, существенно превышают значения соответствующих параметров приборов интегральной микроэлектроники. Исследования показали, что быстроедействие отдельных приборов на эффекте Джозефсона достигает 20 - 30 пс, а мощность рассеяния равна 100 нВт, т. е. во много раз меньше, чем в обычных интегральных микросхемах. Основная трудность при изготовлении таких приборов - получение стабильного диэлектрика при толщинах порядка 2 нм.

Известно большое количество динамических неоднородностей различной физической природы (рис. 1.3). Это ансамбли заряженных частиц и квазичастиц (зарядовые пакеты, флюксоны и т. п.), домены (сегнетоэлектрические домены, домены Ганна, цилиндрические магнитные домены и т. п.), динамические неоднородности волновой природы (поверхностные акустические волны (ПАВ), магнитные статические волны (МСВ), волны пространственного заряда (ВПЗ), волны зарядовой плотности (ВЗП) и т. д.).

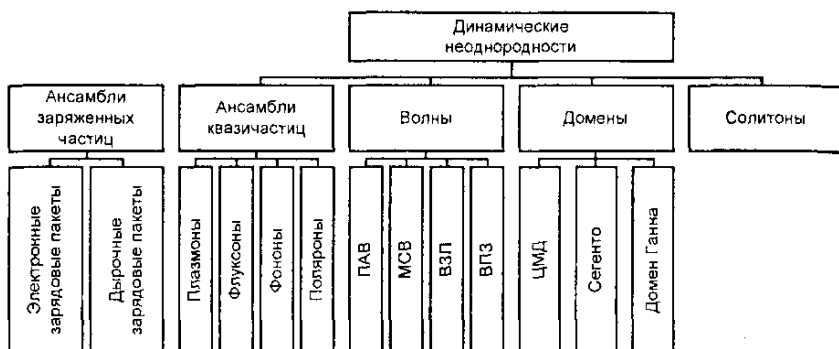


Рис. 1.3. Некоторые типы динамических неоднородностей

1.3. Основные направления и тенденции развития функциональной микроэлектроники

В зависимости от типа используемой динамической неоднородности, континуальной среды, той или иной комбинации физических полей или явлений различают направления в функциональной электронике, например, функциональная акустоэлектроника, функциональная магнетоэлектроника, функциональная оптоэлектроника, функциональная диэлектрическая электроника, молекулярная электроника и т. п. Объединяющим их признаком является динамическая неоднородность как носитель или транслятор или хранитель информации.

Например, традиционная полупроводниковая схемотехническая электроника отличается от полупроводниковой функциональной электроники носителем информационного сигнала. В приборах схемотехнической микроэлектроники - аналоговых или цифровых ИС - информация хранится или обрабатывается в ячейках в виде заряда, потенциала или тока определенного уровня на определенной статической неоднородности.

Напротив, в ПЗС-матрицах, относящихся по своей физической природе к изделиям функциональной полупроводниковой электроники, информация хранится (либо обрабатывается) в виде динамической неоднородности - зарядового пакета, состоящего из электронов или дырок. Статические неоднородности, различные схемы обрaмления в этих изделиях играют вспомогательную роль.

Основные направления развития функциональной микроэлектроники:

Оптоэлектроника - это направление электроники, основанное на использовании фотонов для передачи, приема, хранения и переработки информации. Динамическими неоднородностями в оптоэлектронике являются сгустки фотонов.

Акустоэлектроника — это направление электроники, основанное на использовании фононов для передачи, приема и

переработки информации. Динамическими неоднородностями в акустоэлектронике являются фононы. **Фонон** – это квант энергии упругого колебания кристаллической решетки вещества.

Магнетoeлектроника – это направление электроники, развиваемое на основе использования новых совершенных магнитных материалов, позволяющих формировать и перемещать в слабых магнитных полях устойчивые образования микроскопических размеров (цилиндрические магнитные домены), т.е. динамическими неоднородностями в магнетoeлектронике являются цилиндрические магнитные домены – ЦМД (общепринятая аббревиатура).

Функциональная полупроводниковая электроника - это направление электроники, основанное на использовании взаимодействия динамических неоднородностей в полупроводниковых континуальных средах с физическими полями. Динамическими неоднородностями являются зарядовые пакеты, домены Ганна, токовые шнуры, волны пространственного заряда (ВПЗ), фононы, поляроны, биполяроны, флуктуоны, экситоны Френкеля, экситоны Ванье-Мотта, поляритон.

Разновидность функциональной полупроводниковой электроники - **электроника переноса заряда** – это направление электроники, основанное на использовании электрических зарядов неосновных носителей в полупроводниковых структурах для передачи, приема, хранения и обработки информации. Динамическими неоднородностями здесь являются зарядовые пакеты (сгустки) электронов или дырок, искусственно созданные в приповерхностной или внутренней области полупроводника.

Устройства, в которых используются зарядовые пакеты, получили название приборов с переносом заряда.

Плазменная электроника – это направление электроники, основанное на использовании ионизированных частиц в качестве функциональных элементов. Динамическими неоднородностями здесь являются заряженные частицы вещества.

Криоэлектроника – это направление электроники, основанное на использовании электронных явлений, проявляющихся при низких криогенных температурах, когда возникает явление сверхпроводимости (наиболее низкую (криогенную) температуру 4,2 К дает жидкий гелий). Динамическими неоднородностями являются сверхпроводники первого и второго рода, высокотемпературные сверхпроводники, параэлектрики. В криоэлектронике используются эффект Джозефсона (стационарный и нестационарный), сверхпроводящие туннельные, мостиковые переходы на эффекте Джозефсона, структуры на узкозонных соединениях (InSb, InAs) и твердых растворах (BiSb (антимонид висмута), CdHgTe (теллурид кадмия - ртути), PbSnTe (халькогенид свинца - олова), а также нелинейных кристаллопараэлектриков, которые не переходят в сегнетоэлектрическую фазу при низких температурах (SrTiO₃ - титанат стронция), и сегнетоэлектриков с низкой температурой Кюри-Вейсса.

Молекулярная электроника - область электроники, в которой функциональные электронные компоненты и устройства организованы на уровне отдельных молекул и их комплексов. Динамическими неоднородностями являются ансамбли солитонов (структурное возмущение, способное перемещаться в одном или двух направлениях подобно частице) или электронов.

Биоэлектроника – раздел молекулярной электроники, одно из направлений бионики, решающей задачи электроники на основе анализа структуры и жизнедеятельности живых организмов, исследует возможность применения биополимеров в качестве управляемых светом или электрическими импульсами модулей компьютерных и оптических систем.

Диэлектрическая электроника – изучает протекание токов ограниченных объемным зарядом в диэлектриках, при термоэлектронной эмиссии из металлов и полупроводников, туннельной эмиссии. Динамическими неоднородностями являются домены, квазичастицы, неоднородности фоторефрактивной и электрооптической природы (сегнетоэлектрические домены,

пиелектрики, сегнетоэластики, фазоны - возникают при фото-стимулированных фазовых переходах в сегнетоэлектриках, флутоны, экситоны, поляритоны).

Хемотроника (ионика) – возникла как научное направление на стыке двух развивающихся направлений электроника и электрохимии – наука, изучающая перспективы построения информационных и управляющих систем на основе процессов протекающих в жидкостях и на границах жидких фаз. Динамическими неоднородностями являются ионы в растворе.

Основные направления функциональной микроэлектроники можно свести в таблицу (см. рис. 1.4).

Таким образом, все основные направления функциональной электроники базируются на использовании различных физических явлений в твердом теле. В виде микросхем выпускается некоторая часть опто- , акусто- и магнитоэлектронных приборов, а также ПЗС.

Основные тенденции развития функциональной электроники:

- поиск новых перспективных видов континуальных (непрерывных) сред и динамических неоднородностей;
- разработка новых технологий для выращивания структур полупроводник - пьезоэлектрик, полупроводник - сегнетоэлектрик;
- изучение возможности использования взаимодействия динамических неоднородностей различной природы в однородной структуре.

Функциональная электроника не исключает традиционную схемотехническую микроэлектронику, а дополняет ее и расширяет границы и области ее применения. Поэтому наиболее перспективным направлением развития и совершенствования современных РЭС является разработка новых структур и систем, в которых в полной мере будут воплощены преимущества совместного использования элементов интегральной и функциональной электроники.



Рис. 1.4. Основные направления функциональной микроэлектроники

2. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ АКУСТОЭЛЕКТРОНИКА

2.1. Физические основы

Функциональная акустоэлектроника является направлением функциональной электроники, в котором исследуются акустоэлектронные эффекты и явления в различных континуальных средах, а также возможность создания приборов и устройств электронной техники для обработки, передачи и хранения информации с использованием динамических неоднородностей акустической и (или) акустоэлектронной, акустооптической природы.

Акустоэлектроника – направление функциональной микроэлектроники, связанное с использованием механических резонансных эффектов, пьезоэлектрического эффекта, а также эффекта, основанного на взаимодействии электрических полей с волнами акустических напряжений в пьезоэлектрическом полупроводниковом материале.

К акустоэлектронным явлениям и эффектам относятся:

- генерация, распространение, преобразование и детектирование объемных (ОАВ) и поверхностных (ПАВ) акустических волн;
- преобразование электрического сигнала в акустический сигнал и обратно;
- электронное поглощение и усиление акустических волн;
- акустоэлектронные и акустомагнитные эффекты;
- нелинейные акустоэлектронные явления: генерация гармоник, акустоэлектронные домены, параметрическое и супергетеродинное усиление звука;
- взаимодействие света и звука в твердых телах, дифракция, модуляция и сканирование света звуком.

Исследования этих явлений и эффектов показывают, что с их помощью возможна генерация динамических неоднородностей волновой и доменной природы, которые широко исполь-

зуются в процессорах сигналов и устройствах памяти для обработки и хранения информации.

Акустоэлектроника занимается преобразованием акустических сигналов в электрические сигналы и электрических сигналов в акустические.

2.1.1. Динамические неоднородности

В функциональной акустоэлектронике используются динамические неоднородности акустической, акустоэлектронной или акустооптической природы. В твердом теле могут возбуждаться акустические волны, представляющие собой упругое возмущение вследствие деформации материала. Такие деформации имеют место при движении отдельных атомов и сопряжены с изменением расстояний между ними. При этом возникают внутренние упругие силы, стремящиеся вернуть материал в исходное состояние. Колебания атомов происходят вблизи положения равновесия, и при этом генерируется волна механического напряжения и растяжения. Скорость распространения акустической волны лежит в пределах $(1,5 - 4,0) \times 10^3$ м/с. Диапазон частот акустических волн находится в интервале от нескольких герц до 10^{13} Гц, а их распространение сопровождается переносом энергии. Различают продольные и сдвиговые волны в зависимости от характера движения частиц (рис. 2.1).

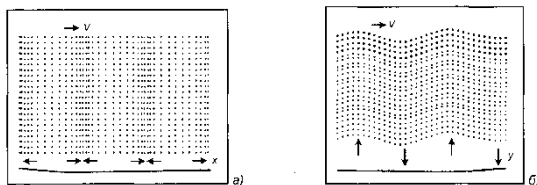


Рис. 2.1. Акустические волны продольного (а) и сдвигового (б) типов

Если размеры звукопровода намного больше длины акустической волны, то в нем могут распространяться объемные акустические волны.

Если же среда, в которой распространяются волны, является ограниченной, то на распространение волн существенное влияние оказывают граничные условия. В однородной среде со свободной плоской поверхностью существуют поверхностные акустические волны (ПАВ).

Поверхностные акустические волны – это упругие волны, распространяющиеся вдоль свободной поверхности твердого тела или вдоль границы твердого тела с другими средами и затухающие при удалении от границ. ПАВ бывают двух типов: **с вертикальной поляризацией**, у которых вектор колебательного смещения частиц среды в волне расположен в плоскости, перпендикулярной к граничной поверхности (вертикальная плоскость), и **с горизонтальной поляризацией**, у которых вектор смещения параллелен граничной поверхности и перпендикулярен направлению распространения волны.

К наиболее часто встречающимся частным случаям поверхностных волн можно отнести следующие виды волн.

Волны Рэлея (или рэлеевские), в классическом понимании распространяющиеся вдоль границы упругого полупространства с вакуумом или достаточно разреженной газовой средой.

Затухающие волны рэлеевского типа на границе твердого тела с жидкостью.

Незатухающая волна с вертикальной поляризацией, бегущая по границе жидкости и твердого тела

Волна Стоунли, распространяющаяся вдоль плоской границы двух твердых сред, модули упругости и плотности которых не сильно различаются.

Волны Лява — поверхностные волны с горизонтальной поляризацией (SH типа), которые могут распространяться в структуре упругий слой на упругом полупространстве.

Простейшими и наиболее часто встречающимися на практике ПАВ с вертикальной поляризацией являются волны Рэлея, распространяющиеся вдоль границы твердого тела с вакуумом или достаточно разреженной газовой средой. Частицы в волне движутся по эллипсам, большая полуось которых перпендикулярна границе, а малая – параллельна направлению распространения волны (рис. 2.2, *a*).

Волны Рэлея распространяются вблизи поверхности твердого тела. Фазовая скорость таких волн направлена параллельно поверхности. Амплитуды колебаний затухают при удалении от поверхности по экспоненциальным законам и энергия волны сосредоточена в области на расстоянии порядка длины волны от поверхности.

Энергия рэлеевских волн локализована в приповерхностном слое звукопровода $d_p \approx \lambda_s$, где λ_s – длина акустической волны. Волны Рэлея не обладают дисперсией, т. е. скорость их распространения не зависит от частоты.

Вдоль границы двух твердых тел могут распространяться волны Стоунли, состоящие как бы из двух рэлеевских волн. Вертикальная и горизонтальная компоненты смещений в каждой среде убывают при удалении от границы так, что энергия волны оказывается сосредоточенной в двух граничных слоях, толщиной близких к длине волны λ_s .

Волны с вертикальной поляризацией могут распространяться на границе твердого полупространства с жидким или твердым слоем или даже с системой таких слоев. Если толщина таких слоев много меньше длины волны, то движение в полупространстве примерно такое же, как в рэлеевской волне. В общем случае движение может быть таким, что энергия волны будет перераспределяться между твердым полупространством и слоями, а фазовая скорость будет зависеть от частоты и толщины слоев.

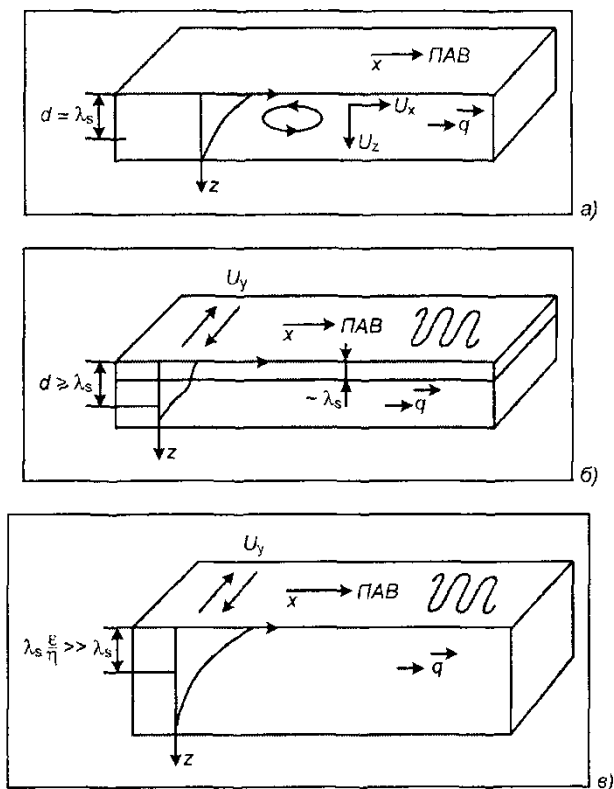


Рис. 2.2. Поверхностные акустические волны различных типов: *а* - волны Рэлея, *б* - волны Лява, *в* - волны Гуляева - Блюкштейна

К волнам с горизонтальной поляризацией относятся **волны Лява** (рис. 2.2, б). Это сдвиговые волны, существующие в тонком слое на поверхности твердого тела. Волны Лява обладают дисперсией и локализуются в слое, толщина которого $d_p > \lambda_s$. Это чисто поперечные волны: в них имеется только одна компонента смещения v , а упругая деформация в волне пред-

ставляет собой чистый сдвиг. Смещения в слое распределены по косинусу, а в полупространстве экспоненциально убывают с глубиной. Глубина проникновения волны в полупространство меняется от долей λ_s до многих λ_s , в зависимости от толщины слоя h , частоты ω и параметров сред. Само существование волны Лява как поверхностной акустической волны связано с наличием слоя на полупространстве: если глубина проникновения волны в полупространство стремится к бесконечности, то волна переходит в объемную.

Исследованы чисто сдвиговые волны, не обладающие дисперсией (рис. 2.2, в). Эти волны получили название **волн Гуллева - Блюштейна**. Они могут существовать на свободной поверхности пьезоэлектрических кристаллов. Глубина их проникновения в десятки раз превышает длину акустической волны ($d_p \gg \lambda_s$). Применение таких волн позволяет избежать тщательной обработки поверхности материала.

Наряду с обычными волнами Рэлея в некоторых образцах кристаллов вдоль свободной границы может распространяться затухающая волна, излучающая энергию вглубь кристалла (вытекающая волна). Наконец, если кристалл обладает пьезоэффектом и в нем имеется поток электронов (пьезополупроводниковый кристалл), то возможно взаимодействие поверхностных волн с электронами, приводящее к усилению этих волн (акусто-электронное взаимодействие).

На свободной поверхности жидкости упругие ПАВ существовать не могут, но на частотах ультразвукового диапазона и ниже могут возникать поверхностные волны, в которых определяющими являются не упругие силы, а поверхностное натяжение – это так называемые капиллярные волны.

Важной особенностью распространения динамических неоднородностей акустической природы (ПАВ) в континуальных средах с различными физическими свойствами является существующий эффект генерации динамических неоднородностей другой природы. Вследствие явления акустоэлектронного взаи-

модействия происходит воздействие акустической волны на электроны проводимости в твердых телах. Результатом такого воздействия является обмен энергией и импульсом между акустической волной и электронами проводимости. Например, передача энергии акустической волны электронам приводит к электронному поглощению звука, а передача импульса акустической волны стимулирует возникновение электрического тока. Возможно явление усиления звука за счет стимулированного дрейфа электронов в твердом теле и частичной передачи энергии акустической волне.

Возникающая при распространении акустической волны деформация вызывает в пьезоматериалах переменное электрическое поле, амплитуда и фаза которого находятся в прямой зависимости от объемного заряда электронов проводимости (прямой пьезоэффект). В свою очередь это поле вызывает деформацию кристалла и соответственно изменение характера распространения волны (обратный пьезоэффект). Акустическая волна генерирует волны электрических полей. В местах, где кристалл сжимается волной, наведенное электрическое поле замедляет движение электронов, а в местах растягивания кристалла волной наблюдается ускорение электронов за счет внутреннего электрического поля. Под действием этих полей носители стремятся сгруппироваться в областях с минимумом потенциальной энергии. Возникают затухающие волны объемного заряда, несколько запаздывающие по отношению к акустической волне (рис. 2.3, а). Волны объемного заряда представляют собой динамические неоднородности электрической природы, стимулированные ПАВ.

Если звукопровод поместить в постоянное электрическое поле E_0 , то возникает дрейф электронов со скоростью $v_{др} = \mu E_0$, где μ - подвижность электронов. В случае, когда $v_{др} > v_{пов}$ ($v_{пов}$ - фазовая скорость распространения акустической волны), электроны отдают свою энергию ПАВ и амплитуда ПАВ возрастает (рис. 2.3, б).

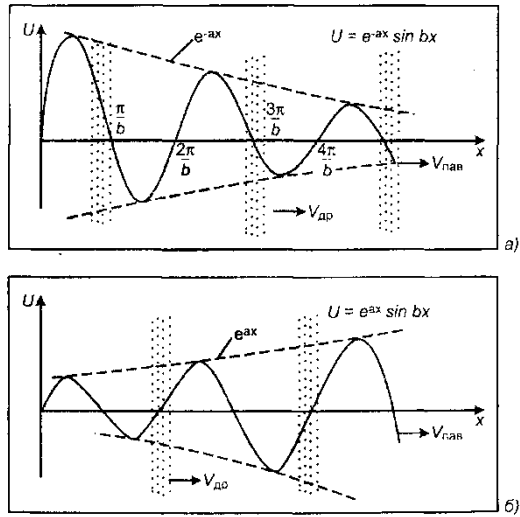


Рис. 2.3. Схема взаимодействия динамических неоднородностей акустической и электрической природы:
 а - при отсутствии потенциала; б - при наличии потенциала на звукопроводе

В случае затухания волны график функции достаточно точно описывается функцией типа

$$U = \exp(-ax) \cdot \sin(bx), \quad (2.1)$$

а в случае ее усиления

$$U = \exp(ax) \cdot \sin(bx), \quad (2.2)$$

где a и b - константы.

Обмен энергией между динамическими неоднородностями акустической и электронной природы в пределах одной кон-

тинуальной среды является *фундаментальным эффектом*, лежащим в основе приборов акустоэлектроники.

В акустооптических средах акустические и электромагнитные волны параметрически связаны *упругооптическим эффектом*. Упругая акустическая волна индуцирует изменение показателя преломления. Это позволяет сформировать динамические неоднородности в виде оптических неоднородностей по показателю преломления (фазовые решетки), распространяющихся вслед за акустической волной. Свет дифрагирует на таких регулярных динамических неоднородностях оптической природы.

Акустическая волна в пьезомагнитной среде (антиферромагнетиках) порождает *магнитоупругие волны*, которые являются еще одним типом динамических неоднородностей в акустоэлектронике.

2.1.2. Континуальные среды

Континуальными средами функциональной акустоэлектроники являются твердотельные материалы: пьезоэлектрики, пьезополупроводники, сложные слоистые среды. Выбор континуальных сред определяется природой используемых динамических неоднородностей. Основные требования к этим материалам сводятся к минимизации уровня потерь для распространения динамических неоднородностей акустической или иной природы, а также к максимальной температурной стабильности. Другие требования к среде диктуются функциональным назначением прибора, технологией его производства. Распространение волны в твердом теле сопряжено с локальной деформацией среды. Динамические неоднородности акустической природы определенными соотношениями связаны с динамическими неоднородностями электрической природы, и наоборот.

В настоящее время известно более 1500 веществ, обладающих пьезоэлектрическими свойствами. Охарактеризуем только некоторые из них.

Классическими материалами являются пьезоэлектрические монокристаллы. Наиболее широко известный кристалл - кварц, представляющий собой кристаллическую модификацию безводного диоксида кремния SiO_2 . Наряду с природными кристаллами используются и синтетические, превосходящие природные по однородности, размерам, а также по стоимости изготовленных из них изделий. Определенные срезы кварца характеризуются своими параметрами и используются в различных устройствах.

Кристаллы ниобата лития (LiNbO_3) и танталата лития (LiTaO_3) обладают более высоким, чем кварц пьезомодулями и коэффициентами электромеханической связи. Во многих областях приборостроения эти кристаллы вытеснили кварц, особенно в СВЧ-технике.

Пьезополупроводники (CdS , ZnS , ZnO) используются для пленочных преобразователей электромагнитных колебаний вплоть до СВЧ-диапазона. Технология их получения довольно хорошо отработана, и можно изготовить пленки с заданной симметрией.

Определенный интерес представляют такие пьезополупроводники, как селениды металлов (CdSe), арсенид галлия (GaAs), антимонид индия (InSb), а также кристаллы иодата лития (LiIO_3) и калия (KIO_3), германата висмута ($\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$).

Широкое распространение получили промышленные пьезокерамические материалы, как правило, представляющие собой твердые растворы. Свойства таких материалов задаются путем подбора соотношений компонентов, введением модифицированных добавок, а также технологией их изготовления.

К пьезокерамическим материалам относятся титанат бария (BaTiO_3), титанат свинца (PbTiO_3), ЦТС [$\text{Pb}(\text{Zr}_{0,53}\text{Ti}_{0,47})\text{O}_3$] и др. Добавки, вводимые, например, в ЦТС, расширяют двухфазную

область составов и усиливают нужные свойства пьезокерамики. Модификацию пьезокерамики можно осуществить в широком диапазоне свойств за счет введения добавок со скомпенсированной валентностью, другими словами, набора оксидов соответствующего перовскитному соединению.

Следует особо подчеркнуть, что поверхность используемых в акустоэлектронике континуальных сред должна быть тщательно обработана. Это диктуется тем, что звукопровод расположен в приповерхностном слое, и тщательная полировка поверхности позволит снизить рассеяние звука и избежать помех.

Анизотропность кристаллов приводит к резкой зависимости скорости распространения ПАВ от направления среза. Поэтому срезы необходимо выбирать так, чтобы добиться выполнения условия коллинеарности векторов фазовой и групповой скоростей.

Континуальные среды могут проявлять нелинейные свойства. Такая ситуация реализуется при достаточно больших смещениях частиц в акустических волнах. Главным проявлением нелинейности среды является нарушение принципа суперпозиции волн и, следствие, появление комбинационных частот колебаний ($\omega_1 \pm \omega_2$).

Нелинейность пьезоэлектрических сред порождает еще один эффект. Он связан с тем, что акустическая волна сопровождается волнами зарядовой плотности (электрического поля), и при достаточно больших амплитудах электрических полей тоже возникают нелинейные явления. Этот эффект получил название **нелинейный пьезоэффект**. Этот эффект сопровождается диэлектрической нелинейностью, связанной с нелинейностью электрической индукцией относительно компонентов электрического поля.

2.1.3. Генераторы динамических неоднородностей

Возбуждение динамических неоднородностей в виде акустической волны в пьезоэлектрике осуществляется с помощью вложенных друг в друга групп электродов, которые получили название ***встречно-штыревых преобразователей*** (ВШП).

Другое название такой системы электродов - двухфазный преобразователь ПАВ. Две группы чередующихся электродов соединены шинами, которые в свою очередь подключены к источнику напряжения (рис. 2.4). При подаче на ВШП напряжения каждая пара электродов возбуждает ПАВ. Если период преобразователя ($a + b$) равен длине ПАВ, возникает явление акустического синхронизма. В этом случае волны, возбуждаемые каждой парой электродов, имеют одинаковую фазу, и происходит когерентное сложение волн.

Суммирование происходит за счет локальных деформаций, образующихся под промежутками между электродами. Образовавшаяся деформация начинает перемещаться в оба направления и достигает следующих промежутков как раз в тот момент, когда полуволна внешнего напряжения достигнет максимума и вызовет деформацию под своими электродами.

Сложение деформаций происходит при выполнении условия

$$\lambda = 2(a + b) = v_a/f, \quad (2.3)$$

где λ , v_a , f – соответственно длина, скорость и частота звуковой волны.

Такая картина происходит под каждой парой ВШП. Чем больше штырей содержит преобразователь, тем эффективней происходит преобразование электрической энергии в механическую, и наоборот.

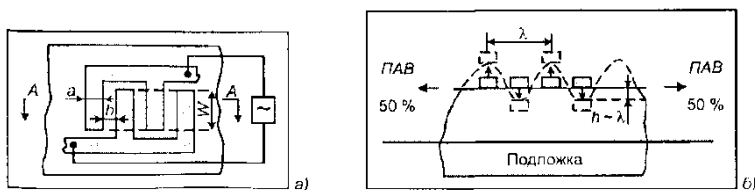


Рис. 2.4. Возбуждение ПАВ с помощью ВШП:
а – топология ВШП; *б* – схема возникновения
 акустических волн (сечение АА)

Генерацией динамических неоднородностей можно эффективно управлять путем изменения характеристик преобразователей ПАВ. Исследовано несколько способов управления генерацией ПАВ.

Первый способ предусматривает управление генерацией ПАВ путем изменения топологии ВШП, включая изменение числа штырей, их расстановку, варьирование функции аподизации или изменения длины отдельных электродов (штырей) или их групп, изменение полярности отдельных штырей или их групп. Устройство с управляемой топологией электродов ВШП предусматривает изменение топологии путем перекоммутации отдельных электродов или их групп относительно общих шин преобразователя. Устройства такого типа обладают достаточно широким диапазоном перестройки характеристик в частотной и временной областях, их параметры приближаются к предельно достижимым. Технологические приемы изменения топологии сводятся к проекционным методам, либо навешиванию дискретных элементов и проволочных межсоединений.

Другой способ управления генерацией ПАВ связан с операцией «взвешивания» электродов преобразователей, которая реализуется за счет изменения количества активных пар ВШП. Это позволяет менять ширину полосы генерации ПАВ и, следовательно, изменять характеристики динамических неоднород-

ностей. На рис. 2.5, *а* представлена конструкция дискретно-управляемого ВШП, позволяющая получить набор амплитудно-частотных характеристик генерируемых ПАВ с различной шириной пропускания, но одинаковой для всех центральной частотой (рис. 2.5, *б*).

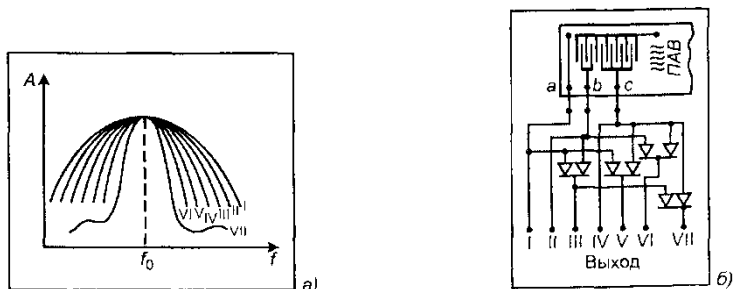


Рис. 2.5. Генерация ПАВ с различными АЧХ (*а*) и схема коммутации пар ВШП (*б*)

Преобразователь разбит на секции a, b, c с числом штырей 1, 2 и 4, соответственно. Количество каналов K определяется числом секции n и равно $K = 2^n - 1$.

В схеме коммутации предусмотрены усилители, и обеспечивается контроль выходных параметров за счет применения электронных переключающих схем.

Устройство с управляемым «взвешиванием» электродов представляет собой целенаправленное изменение эффективности преобразования энергии, осуществляемого каждой парой электродов или их группой путем подключения к электродам управляемых импедансных элементов. Это могут быть резистивные, емкостные или индуктивные элементы, а также их комбинации.

Третий способ опирается на управление электрофизическими свойствами подложки под электродами. Мгновенная фаза ПАВ, генерируемая каждой парой ВШП, зависит от знака

пьезоэлектрического коэффициента. В свою очередь знак пьезоэлектрического коэффициента может быть изменен переполаризацией в полном соответствии с гистерезисными свойствами материала. Такой прием позволяет управлять процессами генерации ПАВ, создать адаптивные устройства с «памятью». На рис. 2.6, а приведена одна из таких конструкций. Рядом с электродами ВШП (1) размещены электроды переключения поляризации (2), подключенные к источнику поляризующего напряжения $E^- < U_{\text{п}} < E^+$. Это позволяет менять знак поляризации материала звукопровода между металлическим электродом (3) и электродами (2) одновременно или путем перекоммутации локально под каждой парой ВШП. Варьируя значениями $U_{\text{п}}$ и $U_{\text{вх}}$, можно эффективно управлять генерацией ПАВ.

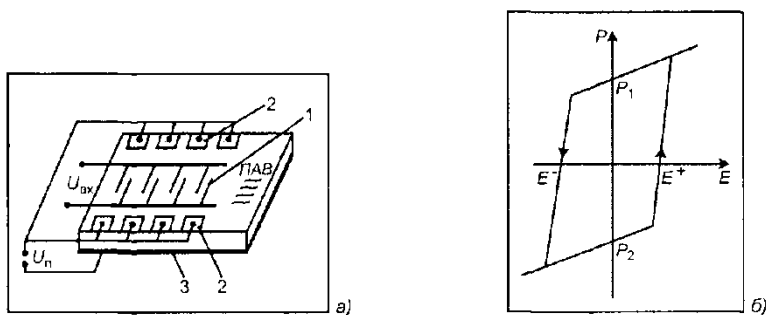


Рис. 2.6. Конструкция адаптивного генератора ПАВ (а) и гистерезис пьезоэлектрического звукопровода (б)

Двухфазные преобразователи позволяют генерировать колебания в обе стороны звукопровода «симметрично», другими словами, 50 % энергии направо и 50 % энергии налево. Однако можно управлять и направлением генерации ПАВ. С этой целью целесообразно использовать многофазные преобразователи, позволяющие синфазно подпитывать волну в заданном направлении (рис. 2.7, а). Фазовое распределение подбирается

так, чтобы в обратном направлении условие синфазности не выполнялось. Однако полоса пропускания трехфазного преобразователя определяется протяженностью ВШП и ограничена. Для расширения полосы пропускания и достижения однонаправленности генерации предложен преобразователь бегущей волны (рис. 2.7, б). Каждый из электродов ВШП запитывается от одного из отводов электрической линии задержки. Линия задержки рассчитывается так, что время задержки между соседними отводами равно времени распространения ПАВ между соседними электродами. Это резко несимметричный генератор ПАВ, обеспечивающий строго однонаправленную генерацию.

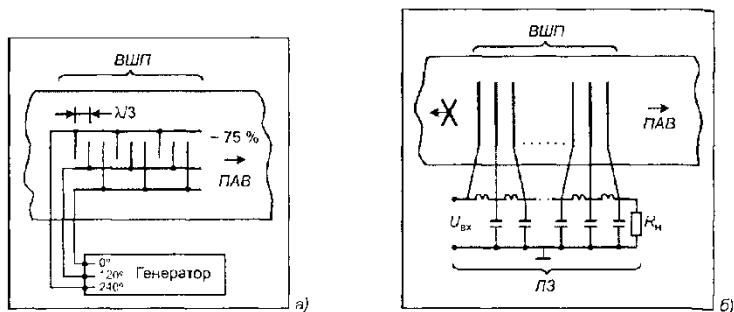


Рис. 2.7. Трехфазный (а) и многофазный (б) генераторы ПАВ

Эффективное управление генерацией осуществляется путем подбора необходимых топологических и технологических параметров.

2.1.4. Устройство управления динамическими неоднородностями

Исследовано несколько способов управления прохождением динамических неоднородностей по тракту передачи информации. Эти процессы определяются типом динамических неоднородности, функциональным назначением прибора или

устройства. Так, если используется только ПАВ, распространение которой происходит в тонком приповерхностном слое, то для эффективного управления можно использовать интерференцию, дифракцию, отражение, преломление, переизлучение, фокусирование волн. Можно варьировать также параметры звукопровода, изменяя такие характеристики процесса распределения, как скорость ПАВ, дисперсию, удельное затухание и т. п.

Наиболее распространенным методом является управление акустическим трактом путем изменения топологии его элементов. Эти элементы позволяют сформировать каналы распространения ПАВ. К таким элементам относится **многополосковый ответвитель** (МПО), который конструктивно выполняется в виде системы пленочных металлических электродов, нанесенных на подложку. В зависимости от назначения устройства управления топология МПО имеет различную форму и способна переизлучать энергию в любой из каналов, формировать эти каналы.

При выполнении условия синхронизма $\lambda = d$ МПО ведет себя как отражательная структура, и рабочий диапазон выбирается в пределах $0,4 - 0,9$ центральной частоты f_0 .

На рис. 2.8 приведены некоторые примеры использования МПО в звуковом канале. С помощью МПО можно переизлучать энергию из одного канала в другой (рис. 2.8, *а*), раздваивать акустический канал (рис. 2.8, *б*), разворачивать волновой фронт в обратном направлении (рис. 2.8, *в*)

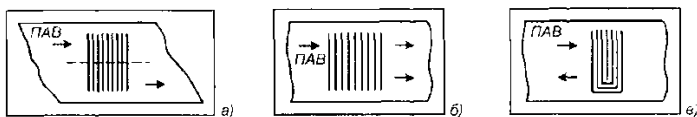


Рис. 2.8. Операции в тракте, осуществляемые МПО:
а – акустическая связь между двумя независимыми звукопроводами; *б* – раздвоение канала;
в – обращение акустической волны

В качестве элементов акустического тракта можно использовать периодические неоднородности на поверхности звукопровода в виде пазов, выступов металлических или диэлектрических полосок, а также комбинации этих структур.

Разработаны методы локализации (каналирования) волны в топографическом волноводе (рис. 2.9, *а, б*). Часто это связано с необходимостью увеличения протяженности тракта, чтобы обеспечить максимальное время задержки. Помимо топографических волноводов для локализации акустической волны можно применять и плоские слоистые волноводы (рис. 2.9, *в*).

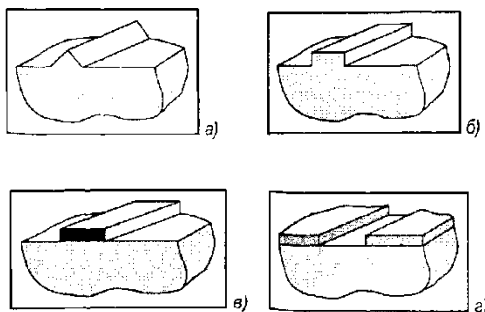


Рис. 2.9. Акустические волноводы: топографические волноводы треугольной (*а*) и прямоугольной (*б*) формы; слоистый волновод, с нанесенным звукопроводом (*в*); щелевой волновод (*г*)

Слоистые волноводы изготавливают путем нанесения вещества, скорость ПАВ в которых отлична от скорости в звукопроводе. Степень локализации волны зависит от соотношения скорости ПАВ в звукопроводе и в слое нанесенного вещества.

Разработаны конструкции МПО с динамически управляемой конфигурацией электродов, в которых под воздействием локального излучения создаются области повышенной проводимости.

Эффективное управление прохождением динамических неоднородностей является изменение граничных условий распространения ПАВ. К граничным условиям будем относить большое число физических параметров, характеризующих среду распространения волн вдоль границы твердого тела, и параметры, отражающие структуру звукопровода. Этот метод управления базируется на локальном изменении свойств среды, что весьма эффективно с энергетической точки зрения. Например, если покрыть поверхность звукопровода тонким слоем селенида кадмия, удельное сопротивление которого зависит от уровня освещенности, то можно менять мнимую часть акустического импеданса. В этом случае появляется возможность изменять амплитуду ПАВ в достаточно широком диапазоне значений.

Однако заметим, что методу управления удельной проводимостью поверхностного слоя присущи недостатки, связанные с большим энергопотреблением, громоздкостью проекционных систем.

Если же использовать магниточувствительные пленки, нанесенные на поверхность звукопровода, то изменять упругие свойства пленки, а также акустический импеданс звукопровода становится проще. Возникающие магнитоупругие поверхностные волны обладают рядом специфических свойств. В частности, их разовая скорость зависит от ориентации вектора управляющего магнитного поля, что позволяет эффективно управлять скоростью распространения в пределах 20 %.

Третий метод управления свойствами звукопровода основывается на целенаправленном изменении электрофизических свойств материала звукопровода. Возможность управления свойствами материала может быть реализована за счет термодинамической взаимосвязи тепловых, электрических, магнитных и упругих параметров среды. Управление в этом случае осуществляется с помощью полей различной физической природы.

В некоторых конструкциях приборов используется линейная зависимость между деформацией звукопровода и скоростью распространения ПАВ. Изменение скорости распространения ПАВ также линейно зависит от температуры.

Этот метод отличается простотой, отсутствием дополнительных потерь, позволяет эффективно использовать материалы с большим коэффициентом электромеханической связи.

Управление скоростью распространения ПАВ можно осуществлять, используя эффект электроупругого взаимодействия. С этой целью звукопровод помещается в электрическое поле с напряженностью порядка 10^3 В/см. Однако использование высоковольтного источника напряжения сопряжено с известными трудностями.

Скоростью распространения ПАВ можно также управлять, используя термоупругий эффект. Его применение позволяет изменять упругие константы материала в тепловых полях. Однако большая инерционность тепловых процессов ограничивает использование этого метода управления.

2.1.5. Детектирование динамических неоднородностей

Детектирование динамических неоднородностей является, как правило, физическим процессом, обратным их генерации. Если при генерации ПАВ используется прямой пьезоэффект, позволяющий преобразовывать энергию электрического поля в энергию акустической волны, то в процессе детектирования используется обратный пьезоэффект. Устройство, позволяющее детектировать ПАВ, аналогично генератору ПАВ и представляет собой ВШП.

Одним из способов детектирования является управление топологией электродов. С этой целью можно менять их геометрическую конфигурацию, перекоммутировать отдельные электроды или их группы, формировать латентные электроды и

управлять локальным облучением световым или электронным потоком.

Форма импульсного отклика ВШП зависит от закона изменения перекрытия электродов, другими словами, от их частоты и апертуры. На рис. 2.10 представлены формы выходных сигналов, зависящие от топологии детектора, при подаче на вход единичного импульса.

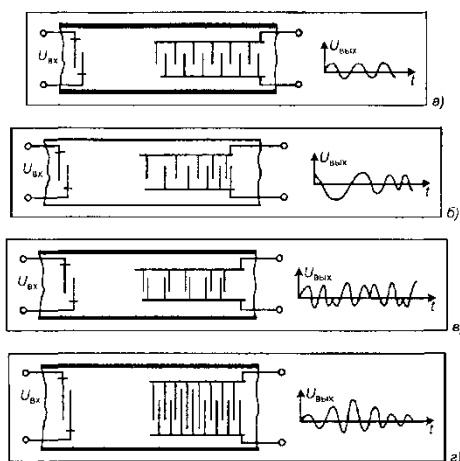


Рис. 2.10. Управление генерацией импульсов топологией ВШП:

- а* – эквидистантный, неаподизированный;
- б, в* – неэквидистантный; неаподизированный;
- г* – эквидистантный, аподизированный
по закону $\sin x / x$

Если произвести перекоммутацию штырей детектора, то можно управлять выходным сигналом, аналогично уже рассмотренному случаю (рис. 2.5). Детектирование ПАВ можно осуществлять также методом управляемого взвешивания, осуществляемое путем подключения к электродам преобразователя управляемых импедансных элементов любого типа. Такой прием обеспечивает регулируемую амплитудную модуляцию им-

пульсного отклика, а также управление формой амплитудно-частотной и фазово-частотной характеристик.

И наконец, детектирование можно осуществить, управляя электрофизическими свойствами подложки. В этом случае конструкции выходного ВШП аналогичны входному, а физические процессы детектирования дополнительные (обратны) процессам генерации.

2.2. Приборы функциональной акустоэлектроники

Приборы функциональной акустоэлектроники предназначены для преобразования, аналоговой обработки и хранения информации.

С помощью акустоэлектронных приборов и устройств можно производить различные операции с сигналами: задерживать по времени, изменять длительность и форму сигналов по амплитуде, частоте и фазе, преобразовывать частоты и спектр сигналов, сдвигать их по фазе, производить модулирование сигналов, производить кодирование и декодирование сигналов, интегрирование сигналов, получать функции свертки и корреляции сигналов. Устройства, производящие эти операции, относятся к процессорам сигналов.

Акустоэлектронные устройства позволяют также осуществлять хранение информации, такие устройства отнесем к запоминающим устройствам.

На пьезоэлектрическом эффекте основана работа некоторых радиотехнических функциональных приборов – кварцевых генераторов, фильтров, ультразвуковых линий задержки, акустоэлектронных усилителей и преобразователей.

Схема, отображающая классификацию приборов функциональной акустоэлектроники приведена на рис. 2.11. В этих устройствах используются акустические волны в диапазоне $5 \cdot 10^6 - 2 \cdot 10^9$ Гц. Использование приборов и устройств функциональной акустоэлектроники позволяет осуществлять процесс

обработки аналоговой и цифровой информации достаточно просто и надежно. При этом удастся получить выигрыш в габаритах, массе энергии и стоимости, что характерно для приборов микроэлектроники.

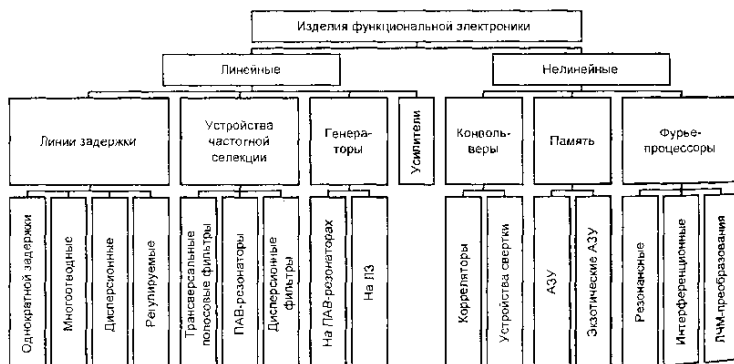


Рис. 2.11. Классификация устройств функциональной акустоэлектроники

2.2.1. Линии задержки

Линия задержки предназначена для временной задержки сигналов без заметных искажений.

Основным преимуществом линии задержки (ЛЗ) на ПАВ являются их небольшие габариты, достаточно широкий диапазон частот (до 10^9 Гц), хорошая температурная стабильность (порядка 10^{-6} °C⁻¹). Эти свойства обусловлены, прежде всего, особенностями ПАВ, а именно невысокой (около 10^5 см/с) скоростью распространения, бездисперсионностью, эффективным преобразованием электрической энергии в акустическую и наоборот. Классификация линий задержки приведена на схеме, представленной на рис. 2.11.

Линия задержки на поверхностных акустических волнах (ПАВ) (рис. 2.12) является твердотельным функциональным устройством и представляет собой подложку из пьезоэлектрика 1, на поверхность которой методом фотолитографии наносятся системы токопроводящих элементов. Одна из таких систем – излучающий преобразователь ПАВ 2 – подключается к источнику входного сигнала, другая – приемный преобразователь ПАВ 3 – к нагрузке.

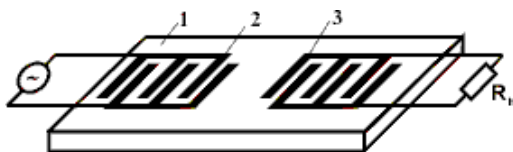


Рис. 2.12. Линия задержки на поверхностных акустических волнах

В качестве звукопровода 1 обычно применяется пластина, или стержень, или провод из пьезоэлектрического материала (например, ниобат лития LiNbO_3 , пьезокварц SiO_2 , германат висмута $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, пьезокерамика) с тщательно отполированной поверхностью, на которой расположены электромеханические преобразователи: входной 2 и выходной 3. Эти преобразователи обычно выполняются в виде гребенчатых электродов из тонкой металлической пленки толщиной 0,1 – 0,5 мкм. Их называют встречно-штыревыми преобразователями (ВШП). К входному ВШП подключен источник электрического сигнала, и в звукопроводе возникает ПАВ. А в выходном преобразователе, к которому подключена нагрузка, возникает электрический сигнал. Края на обоих концах пластинки искажаются или нагружаются абсорбционной резиной для подавления отражения в направлении распространения первичной волны. Под действием высокочастотного электрического напряжения источника сигнала в зазорах между смежными электродами излучаю-

щего преобразователя возникает переменное электрическое поле, которое вследствие пьезоэффекта материала подложки вызывает механические колебания в ее поверхностном слое. Эти колебания распространяются в тонком приповерхностном слое подложки в направлениях, перпендикулярных электродам в виде поверхностных акустических волн. Между смежными электродами приемного преобразователя вследствие обратного пьезоэффекта механические колебания ПАВ обуславливают появление электрического напряжения, которое и является выходным сигналом.

Время задержки t_z между входным и выходным электрическими сигналами определяется по формуле:

$$t_z = \frac{l}{v}, \quad (2.4)$$

где l - среднее расстояние между системами ВШП;

v - скорость распространения поверхностно-акустической волны.

Максимальное акустоэлектрическое взаимодействие систем ВШП имеет место при характеристической частоте f_0 , определяемой следующим соотношением:

$$f_0 = \frac{v}{h}, \quad (2.5)$$

где h - шаг ВШП.

С целью устранения нежелательных отражений ПАВ от торцов подложки, а также с целью ослабления других типов акустических волн, которые могут быть возбуждены излучающим преобразователем ПАВ, все нерабочие грани и ее торцы покрываются специальным звукопоглощающим покрытием.

Поверхностные акустические волны обладают всеми свойствами объемных волн, доступны для воздействия на всем пути их распространения вдоль линии, а технология изготовления ультразвуковых линий с поверхностными волнами совместима с технологией изготовления интегральных микросхем. Наиболее широкое распространение в технике получили поверхностные волны ультразвукового диапазона. Применение акустических волн этого диапазона позволило уменьшить габариты акустических линий задержки.

Линии с однократной задержкой сигнала предназначены для однократного или единого съема информационного сигнала и должны обеспечивать заданную задержку и форму АЧХ-сигнала с максимальной точностью в пределах широкого диапазона температур. Конструктивное решение линии задержки определяется требуемым временем задержки сигнала, а полоса пропускания выбранной топологией ВШП (рис. 2.13).

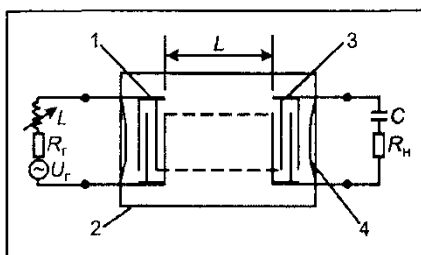


Рис. 2.13. Линия с однократной задержкой сигнала:
 1 - входной ВШП; 2 - непрерывная среда; 3 - выходной ВШП;
 4 - поглотители ПАВ; L , R_r , U_r - индуктивность,
 сопротивление и напряжение генератора входной цепи,
 соответственно; C , R_n - емкость и сопротивление нагрузки
 выходной цепи

Исходя из обобщенной модели изделия функциональной электроники, заметим, что в качестве континуальной среды в ЛЗ чаще используются кварц Y-среза (ST), ниобат лития, германат висмута. Выбор конкретного материала осуществляется на основе энергетического критерия, позволяющего обеспечить минимальные потери, или на основе критерия температурной стабильности параметров.

Генератором динамических неоднородностей в виде ПАВ служит ВШП, как правило, неаподизированный и эквидистантный.

В зависимости от характера включения линий задержки на ПАВ могут работать «на проход» (рис. 2.14, *а*) или «на отражение» (рис. 2.14, *б*), причем во втором случае один и тот же преобразователь выполняет функции, как излучателя, так и приемника ультразвука (УЗ).

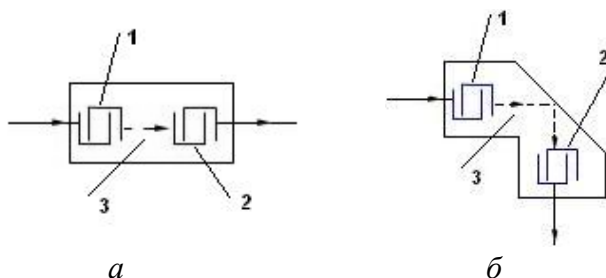


Рис. 2.14. Схема включения линий задержки на ПАВ, работающих «на проход» (*а*) и «на отражение» (*б*):
1 и 2 - преобразователи; 3 - звукопровод

Многоотводные линии задержки (МЛЗ) предназначены для увеличения максимального времени задержки, увеличения числа дискретных диапазонов задержки, регулировки времени задержки. Максимальную задержку сигналов можно получить, эффективно управляя распространением ПАВ. Увеличивая тра-

екторию распространения ПАВ в пределах одного звукопровода, можно получить заданные параметры. На рис. 2.15 приведены некоторые конструктивно-технологические решения, связанные с увеличением звукового тракта.

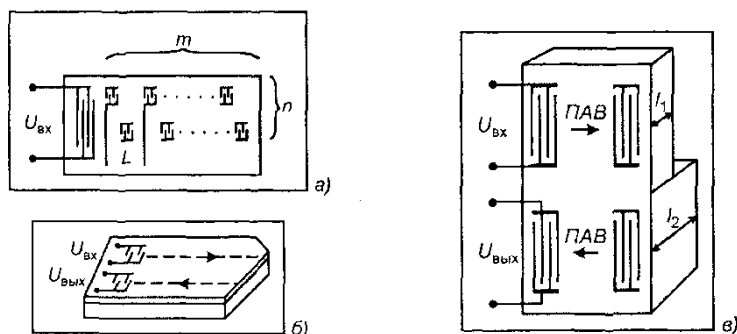


Рис. 2.15. Многоотводная линия задержки:
 а - матричная конструкция; б - пленочный звукопровод;
 в - каскадное включение парциальных ЛЗ

Матричная конструкция МЛЗ имеет входной ВШП и матрицу выходных, располагающихся по m в n независимых каналах (рис. 2.15, а). Шаг в одном составляет L , дискрет задержки $l = L / n$. Другие варианты, например, могут быть связаны с созданием звукового тракта в виде ломаной линии с использованием пьезоэлектрических пленок в качестве континуальной среды (рис. 2.15, б). Рассмотренные конструкции не обеспечивают подавление трехзаходного сигнала и объемных волн, возникающих между ВШП и тыльной стороной звукопровода. Конструкция каскадного включения парциальных ЛЗ позволяет избежать этих помех (рис. 2.15, в). Парциальные ЛЗ выполнены на подложках различной толщины l_1 и l_2 так, что АЧХ объемно-волновых трактов не совпадают, и отсутствует результирующая частота их взаимодействия.

Процесс производства МЛЗ заключается в поиске конструктивных и электрических характеристик звеньев линии задержки.

Дисперсионные линии задержки (ДЛЗ) предназначены для формирования зависимости задержки от частоты сигнала.

В ДЛЗ используется генерирующий ВШП с неэквидистантным расположением штырей. Шаг электродов меняется от $d_{\text{макс}}$ до $d_{\text{мин}}$.

В отличие от физической дисперсии используется «топологическая» дисперсия. На рис. 2.16 представлена одна из конструкций ДЛЗ. Генерирующий ВШП несимметричен и неоподизирован, а детектирующий имеет малое число штырей и рассчитан на широкую полосу АЧХ. Дисперсионная характеристика имеет линейный характер. Основное достоинство ДЛЗ несимметричной конструкции заключается в достаточно простом способе изменения наклона дисперсионной характеристики.

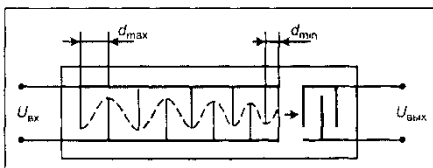


Рис. 2.16. Дисперсионная линия задержки с «топологической» дисперсией

С помощью ДЛЗ можно формировать линейно-частотно-модулированные сигналы (ЛЧМ). Линейный закон изменения задержки сигнала от частоты может быть обеспечен уменьшением шага электродов ВШП.

Простейшая **ультразвуковая линия задержки**, работающая на объемных акустических волнах, представляет собой стержень твердого тела, к противоположным концам которого

прикреплены пьезоэлектрические преобразователи (рис. 2.17). На вход подается радиоимпульс с несущей частотой порядка нескольких десятков мегагерц. Электрические колебания во входном пьезоэлектрическом преобразователе превращаются в акустические и излучаются в звукопровод, где распространяются со скоростью значительно меньшей, чем скорость распространения электромагнитных волн. Кварцевые преобразователи работают на сжатие. Дойдя до выходного преобразователя, акустические колебания вызывают появление в нем эдс, которая после усиления и детектирования образует выходной задержанный видеоимпульс. Задержка может достигать нескольких десятков миллисекунд.

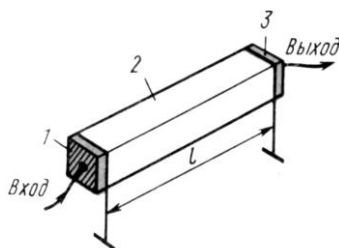


Рис. 2.17. Ультразвуковая линия задержки:
1 – входной преобразователь; 2 – звукопровод;
3 – выходной преобразователь

2.2.2. Устройства частотной селекции

На поверхностных волнах разработаны резонаторы, полосовые фильтры, фазовращатели и другие радиоэлектронные элементы. В основу работы этих устройств положено использование упругих поверхностных акустических волн, распространяющихся вдоль границы твердого упругого полупространства с вакуумом или другой разреженной средой, например воздухом.

Устройства частотной селекции представляют собой процессоры, предназначенные для выделения необходимых сигналов на фоне шумов и помех.

К устройствам частотной селекции относятся фильтры, которые можно классифицировать по следующим независимым признакам:

- по виду частотной характеристики: полосовые (пропускающие определенную полосу частот Δf), режекторные (подавляющие определенную полосу частот Δf), нижних частот (пропускающие частоты от 0 до f_v) верхних частот (пропускающие частоты выше f_v);

- по физическому принципу: резонансные (по акустическому или электрическому резонансу), трансверсальные (по фазочастотной характеристике), нетрансверсальные (по амплитудно-частотной характеристике);

- по виду обрабатываемых сигналов: аналоговые (обработка сигнала в виде непрерывной функции), цифровые (обработка сигнала в виде дискретной функции).

К устройствам частотной селекции относятся также резонаторы. Резонаторы на объемных акустических волнах были хорошо известны. ПАВ-резонаторы, как правило, самостоятельного значения не имеют, однако широко используются в конструкциях фильтров.

Большое распространение получили фильтры на ПАВ, позволяющие реализовать практически любую форму амплитудно-частотной характеристики. В основе способа функционирования таких фильтров лежит зависимость скорости акустических волн от условий распространения, а вместе с этим и частотных свойств фильтра. Электроакустический фильтр содержит управляющие электроды, расположенные по обеим сторонам звукопровода, между входным и выходным преобразователями. При изменении управляющего напряжения происходит соответствующее изменение характеристик фильтра.

Полосовые фильтры получили наиболее широкое распространение среди элементов частотной селекции на ПАВ. Различают сверхузкополосные фильтры ($0,01 \% < \Delta f/f_0 < 0,1 \%$), узкополосные ($0,1 \% < \Delta f/f_0 < 1 \%$), среднеполосные ($1 \% < \Delta f/f_0 < 10 \%$), широкополосные ($10 \% < \Delta f/f_0 < 50 \%$) и сверхширокополосные ($50 \% < \Delta f/f_0 < 100 \%$), где Δf – полоса пропускания; f_0 – центральная, рабочая частота. Полосовые фильтры используются в диапазоне частот от 10 МГц до 2 ГГц. Фильтрация частот в полосовых фильтрах осуществляется за счет селективных свойств ВШП. Основными разновидностями ВШП являются: эквидистантный преобразователь (с одинаковым расстоянием между штырями); неэквидистантный преобразователь (с различными расстояниями между штырями); неаподизированный преобразователь (с одинаковыми перекрытиями штырей); аподизированный (взвешенный) преобразователь (с различной степенью перекрытия штырей).

Самым простым по конструкции из полосовых фильтров является **однопроходной фильтр**. Рассмотрим элементы его конструкций. В качестве континуальной среды используются различные пьезоэлектрические материалы. Генератором динамических неоднородностей в виде ПАВ служит входной эквидистантный ВШП, имеющий многоэлектродную структуру. Амплитудно-частотная характеристика эквидистантного ВШП (рис. 2.18, *a*) может быть определена с помощью преобразования Фурье.

В исследованной конструкции фильтра входной сигнал представлен в виде импульса с прямоугольной огибающей, заполненной колебаниями с частотой f_0 . Входной ВШП преобразует входной сигнал. Фурье-спектр этого сигнала может быть аппроксимирован функцией

$$A(\omega) = \text{const} \frac{\sin X}{X}, \quad (2.6)$$

где $X = \frac{(N-1)}{2} \pi \frac{\Delta\omega}{\omega_0}$ (рис. 2.18, б, кривая 1).

Излучаемый ВШП сигнал распространяется в акустическом канале без искажения и поступает на выходной ВШП, который состоит из малого количества штырей и имеет достаточно широкую полосу пропускания (рис. 2.18, б, кривая 2).

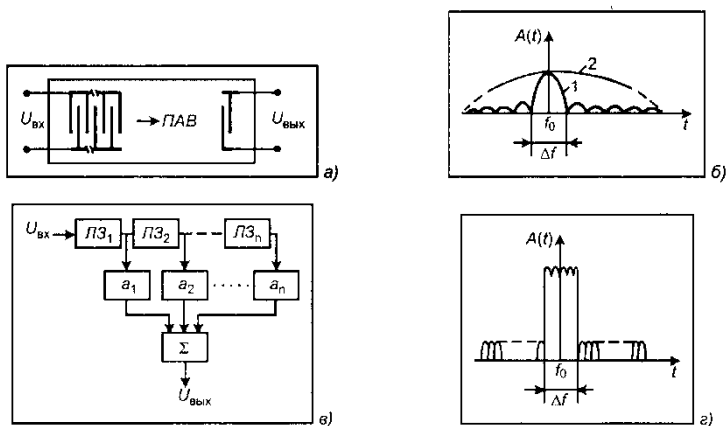


Рис. 2.18. Полосовой фильтр: а – конструкция; б – АЧХ фильтра; в – схема формирования трансверсального фильтра; г – суммарная АЧХ трансверсального фильтра

Полоса пропускания Δf такого полосового фильтра определяется входным ВШП и регулируется количеством штырей N . Конструкция фильтра мало чем отличается от ранее рассмотренной линии задержки. У нетрансверсальных фильтров свойства определяются амплитудно-частотной характеристикой. Конструкции, у которых свойства определяются фазочастотной характеристикой, известны как **трансверсальные фильтры**. Селекция частот в них осуществляется с помощью топологии ВШП. В более сложных конструкциях используются несколько

фильтров (линий задержек), сигналы от которых складываются синфазно. Фильтр имеет n линий задержки, отводы от которых характеризуются весовыми коэффициентами a_i . Сигналы от каждой линии задержки синфазно складываются в сумматоре и формируют сигнал на выходе фильтра (рис. 2.18, в). Частотная характеристика фильтра с множеством ЛЗ представлена на рис. 2.18, г и представляет собой сумму функций типа $\frac{\sin X}{X}$ для

большого числа N . Частотная характеристика трансверсального фильтра имеет почти прямоугольную форму.

Изменяя топологию электродов, их взаимное перекрытие можно менять АЧХ полосового фильтра. Такой метод обработки сигнала получил название *аподизации преобразователя*. В принятой модели изделия функциональной электроники аподизированный преобразователь представляет собой устройство управления.

Различают два основных метода аподизации преобразователей:

- внешнее взвешивание реализуется с помощью внешних шунтов емкостного или резистивного характера, которые позволяют создавать на электродах разность потенциалов, необходимую для формирования ПАВ (рис. 2.19);
- топологический или метод непосредственного взвешивания. Суть метода – амплитудная модуляция импульсного отклика осуществляется заданным изменением перекрытия электродов (рис. 2.20).

Фильтр с топологическим взвешиванием электродов конструктивно проще фильтра с внешним взвешиванием электродов, прежде всего потому, что внешние шунты нарушают микроэлектронную технологию.

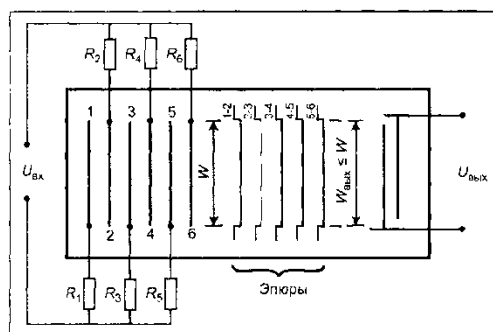


Рис. 2.19. Фильтр с внешним взвешиванием

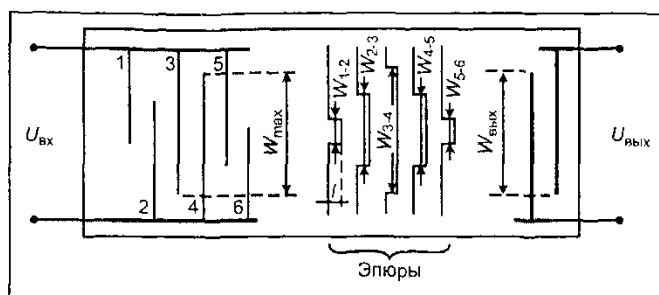


Рис. 2.20. Фильтр с топологическим (непосредственным) взвешиванием

Недостатком такого фильтра является невозможность разделения фронтов двух аподизированных преобразователей, работающих в одном акустическом канале. В этом случае применяют резонаторы ПАВ, позволяющие разделить акустические каналы.

ПАВ-резонаторы предназначены для стабилизации частоты генерируемых колебаний, а также используются в качестве узкополосных фильтров. В обычном фильтре на ПАВ полоса пропускания зависит от количества пар штырей: сужение

полосы пропускания требует увеличения пар штырей. Вместе с тем, имеется возможность повысить фильтрующие свойства фильтров на ПАВ, используя резонансные явления при наличии отражений. Поверхностная акустическая волна, встречаясь с неоднородностью, будет частично отражаться. Если расположить определенным образом несколько пар штырей, то можно достигнуть такого состояния, когда основная часть энергии ПАВ будет отражаться.

Амплитудно-частотная характеристика ПАВ-резонатора представляет собой резонансную кривую, и подавление вне полосы пропускания оказывается недостаточно сильным.

Резонанс колебаний формируется в резонаторе, реализованном на ВШП, либо зеркалах из отражательных решеток.

На рис. 2.21 представлена конструкция узкополосного фильтра, реализованного на основе ПАВ-резонаторов. Они размещены на одной подложке и акустически связаны с помощью многополоскового отражателя.

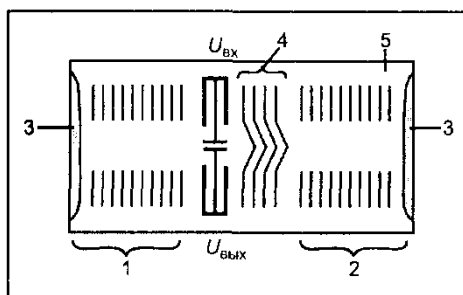


Рис. 2.21. ПАВ-резонатор, выполняющий функцию фильтра:
1, 2 – резонаторные полости; 3 – акустические поглотители;
4 – многополосковый ответвитель; 5 – кварцевая подложка

В соответствии с принятой моделью устройства функциональной электроники между генератором и детектором динами-

ческих неоднородностей вводится дополнительное устройство управления в виде многополоскового отражателя (МПО). Например, МПО расположены непосредственно в акустическом канале на рабочей поверхности звукопровода и конструктивно могут быть выполнены в виде напыленных электродов или распределенных отражателей - канавок (акустических неоднородностей). Как правило, МПО представляют собой эквидистантную решетку отражателей с шагом d , так что центральная частота $f_0 = V_a / d$.

Отражательные структуры могут быть выполнены в виде металлических электродов (рис. 2.22, а), топографических (рис. 2.22, б) или диффузионных статистических неоднородностей (рис. 2.22, в). В любом случае основой является технология микроэлектроники.

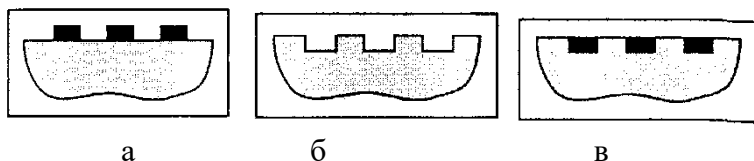


Рис. 2.22. Отражательные структуры

Фильтры на основе ПАВ-резонаторов предназначены для перестройки частоты с помощью управляемого изменения параметров ПАВ и разделения акустических каналов двух аподизированных преобразователей.

Добротность ПАВ-резонаторов определяется в основном потерями на распространение волны в резонирующей полости, дифракционными эффектами, генерацией паразитных объемных волн, потерями энергии волны в самих отражателях и составляет около 10^4 .

Введением входного ВШП между ПАВ-отражателями можно получить ПАВ-резонатор с одним входом. Такая струк-

тура поддерживает несколько стоячих волн и позволяет выделить нужную моду путем выбора соответствующей конструкции электродов преобразователя и определенной формы отражателя.

Повышения селективности полосовых фильтров можно достичь путем использования аподизированных входного и выходного преобразователей, расположенных в параллельных акустических каналах. Связь между каналами и управление распространением ПАВ осуществляется с помощью МПО (рис. 2.23, а).

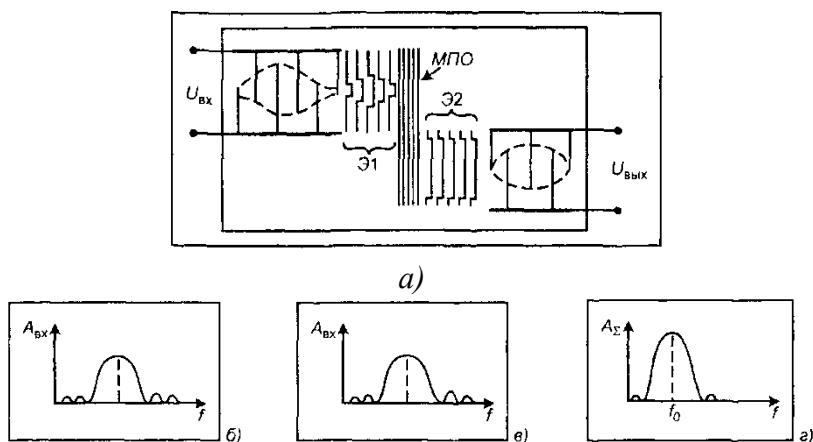


Рис. 2.23. Фильтр с использованием ПАВ - резонаторов:

а – общая схема; б – АЧХ входного ВШП;

в – АЧХ выходного ВШП; г – суммарная АЧХ

В процессе переизлучения волны из верхнего канала в нижний происходит преобразование апертурной модуляции ПАВ в модуляцию интенсивности звуковой волны. Это позволяет принимать сигнал выходным ВШП, аподизированным непосредственным взвешиванием электродов. В таком фильтре происходит достаточно сильное подавление сигнала вне полосы

пропускания входного (рис. 2.23, б) и выходного (рис. 2.23, в) преобразователей. Амплитудно-частотная характеристика такого фильтр получается путем перемножения парциальных характеристик: $A_{\Sigma} = A_{\text{вх}} \times A_{\text{вых}}$.

Полосовые фильтры позволяют реализовать заданную АЧХ с подавлением за полосой пропускания до 40 - 70 дБ с коэффициентом прямоугольности формы 1,2 - 1,5. Фильтры рассчитаны на центральные частоты от 10^7 до 10^9 Гц с полосой пропускания от 10^{-1} до 4×10^5 Гц.

Микроэлектронная технология производства полосовых фильтров позволяет легко интегрировать их в радиотехнические цепи и системы, тиражировать без подстройки параметров.

Системный анализ показал, что улучшение характеристик полосовых фильтров возможно за счет снижения вклада физических эффектов второго порядка:

- многократные отражения ПАВ от краев ВПП;
- сигналы тройного прохождения, обусловленные преобразователями;
- электроакустическая регенерация вследствие постоянного чередования электрических и акустических полей;
- дифракция пучка ПАВ и его отклонение от направления распространения;
- отражение от краев звукопровода;
- ложные сигналы, вызываемые объемными, продольными и поперечными модами;
- изменение скорости ПАВ из-за поверхностной загрузки звукопровода;
- дисперсия скорости звука в металлизированных областях;
- искажение фазового фронта ПАВ вследствие различия прохождения в центральной и периферийной областях;
- краевые эффекты взаимодействия соседних электродов;
- паразитные электростатическая и электромагнитная связи входного и выходного преобразователя;

- искажение характеристик внешними цепями согласования и т. п.

Полосовые фильтры имеют достаточно широкий диапазон частот и полос пропускания. Поэтому они нашли применение в качестве фильтров промежуточной частоты для телевизионных приемников, в системах связи и радиолокации.

Дисперсионные фильтры - представляют собой функциональное линейное устройство, предназначенное для получения задержки, зависимой от частоты, и имеющее модулированную импульсную характеристику. Устройства со сжатием импульса находят широкое распространение в радиолокационных системах. В этих системах увеличение длительности зондирующего импульса позволяет увеличить чувствительность за счет увеличения отношения сигнал/шум. При этом необходимо сузить полосу пропускания приемника и снизить мощность шума на входе. Однако большая длительность импульса ведет к ухудшению разрешающей способности по дальности и невозможности различать две близко находящиеся цели. Это противоречие можно разрешить методом сжатия импульсов с использованием дисперсионных фильтров.

На рис. 2.24 представлена конструкция дисперсионного фильтра на отражательных решетках.



Рис. 2.24. Конструкция дисперсионного фильтра на отражательных решетках

Входной и выходной ВШП практически идентичны. В качестве устройства управления ПАВ используются отражательные неэквидистантные решетки из канавок. Каждая из решеток меняет направление волн на 90° .

2.2.3. Генераторы на ПАВ

Акустоэлектронный генератор является активным акустоэлектронным устройством, предназначенным для генерации акустических сигналов.

Различают два типа генераторов на ПАВ в зависимости от используемого стабилизирующего элемента. В первом типе используется ПАВ-линия задержки, включенная в цепь положительной обратной связи усилителя (рис. 2.25, а).

Линия задержки позволяет возбудить колебания на частотах ω , определяемых соотношением $\omega = 2\pi V_a / L$, где L - длина линии задержки.

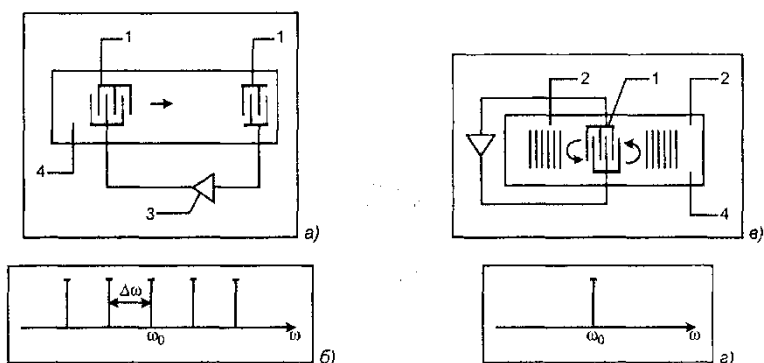


Рис. 2.25. ПАВ-генератор на основе ЛЗ (а) и его спектральная характеристика (б); на основе резонатора (в) и его спектральная характеристика (г); 1 - ВШП; 2 - отражательные структуры; 3 - усилитель; 4 - подложка

Для получения одномодового режима необходимо строгое выполнение соотношения $L = n\lambda$, где λ - длина звуковой волны, n - целое число. Частота генераций может быть изменена за счет изменения скорости ПАВ в резонирующей полости или введением фазового сдвига во внешней цепи. Спектральные характеристики генератора на ЛЗ приведены на рис. 2.25, б.

В генераторе второго типа в качестве стабилизатора частоты используется ПАВ-резонатор с одним входом (рис. 2.25, в). Усилитель подключается между разнополярными шинами преобразователя. Селективные свойства генератора определяются размерами резонирующей полости и параметрами отражательной структуры. Добротность ПАВ-резонаторов составляет около 10^4 и это позволяет создавать конкурентоспособные генераторы. В одновходовых генераторах возникают трудности с перестройкой частот. Линейная модуляция в таких генераторах обеспечивается в очень узкой полосе.

У генераторов этого типа шумовые характеристики лучше, чем у генераторов на ПАВ ЛЗ. На рис. 2.22, г приведены спектральные характеристики генератора на ПАВ-резонаторе.

Оба типа генераторов могут работать на основных частотах от 10^7 до 10^9 Гц без использования дополнительных схем умножения частоты.

Анализ показал, что важным преимуществом генераторов на ПАВ является возможность частотной модуляции, а также заданный переход к нужным частотам при условии сохранения стабильности частоты: кратковременной 10^{-9} с $^{-1}$, долговременной 10^{-6} год $^{-1}$ и температурной около 10^{-6} °С $^{-1}$ в диапазоне до + 50 °С. Такие генераторы могут быть использованы в радиолокационных системах, дальномерах на основе доплеровского сдвига частоты, а также в стандартных радиотехнических устройствах.

2.2.4. Усилители

Усилители представляют собой акустоэлектронное устройство, предназначенное для усиления акустических сигналов.

Во всех ранее рассмотренных устройствах функциональной электроники уровень входного сигнала существенно выше уровня выходного, преобразованного сигнала. Это вполне закономерно, т. к. значительная часть энергии затрачивается на преобразование одного вида сигнала в другой и обратно, прохождение через звукопровод и т. п. Для сохранения уровня сигнала необходимо встраивать усилители, что приводит к значительным технологическим трудностям.

Решение проблемы усиления сигналов можно найти, более пристально изучая физические процессы при распространении динамических неоднородностей. Ранее уже указывалось, что динамические неоднородности в виде ПАВ являются результатом взаимодействия электрических полей с пьезоэлектриками. Распространение акустических волн сопряжено с распространением волн зарядовой плотности. Усиление акустических волн можно производить как за счет подачи на электроды ВШП большего сигнала, так и за счет «перекачки» энергии из волн зарядовой плоскости в акустические волны. Это явление акустоэлектронного взаимодействия, широко используемое в конструкциях усилителей.

В зависимости от типа континуальной среды различают ионное взаимодействие (в металлах), потенциал - деформационное взаимодействие (в полуметаллах и полупроводниках) и пьезоэлектрическое взаимодействие (в пьезополупроводниках). Если к кристаллу пьезополупроводника приложить внешнее постоянное электрическое поле E_0 , создающее дрейф электронов в направлении ПАВ, то усиление будет зависеть от соотношения скорости дрейфа носителей $V_{др}$ и скорости звука V_a (рис. 2.26, а).

Так, при скорости дрейфа носителей, меньшей скорости распространения ПАВ $V_a > V_{др} = \mu E_0$ (μ - подвижность электронов), энергия волны поглощается электронным газом. При скорости дрейфа, большей фазовой скорости ПАВ $V_{др} > V_\omega$ происходит перекачка энергии электронов в энергию акустической волны, возрастает ее амплитуда в канале распространения и, соответственно, на выходных ВПП получится усиленный сигнал.

Таким образом, за счет перераспределения энергии в динамических неоднородностях различной физической природы можно получить эффект усиления. Исследовались конструкции усилителей на основе этого эффекта. В частности акустоэлектронный усилитель, схема которого приведена на рис. 2.26, б.

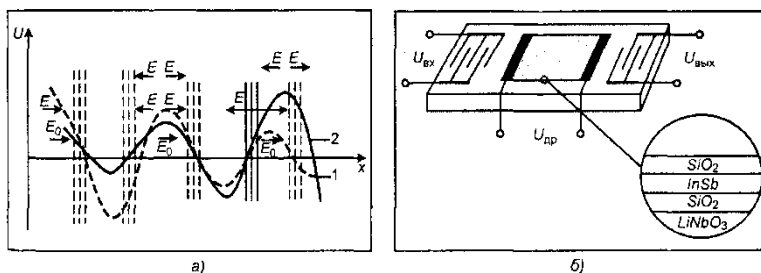


Рис. 2.26. Схема взаимодействия динамических неоднородностей в полупроводнике с пьезоэлектрическими свойствами (а), конструкция усилителя на ПАВ (б); 1 - акустическая волна и зарядовые пакеты в отсутствии электрического поля E_0 ; 2 - то же в присутствии поля

С целью обеспечения взаимодействия динамических неоднородностей различной физической природы предложены две континуальные среды. В одной преимущественно распространяются акустические волны (пьезоэлектрик), в другой - электронные (полупроводник). Совмещение сред осуществляет-

ся путем создания слоистых структур с использованием технологии тонких пленок. В качестве генератора ПАВ используется стандартная конструкция ВШП. Звукопровод выполняется, например, на основе ниобата лития, на поверхности которого на изолирующей пленке диоксида кремния выращивается пленка антимолибдита индия толщиной около 500 Å. Вся поверхность покрывается достаточно толстой (порядка 1000 Å) защитной пленкой диоксида кремния. Края полупроводниковой пленки снабжены омическими контактами для подвода дрейфового напряжения. В качестве полупроводниковых сред могут быть использованы также CdS, CdSe, ZnS, ZnO, GaAs и др.

Сущность явления состоит в следующем. Если вблизи рабочей поверхности пьезоэлектрического волновода поместить полупроводник, то пьезоэлектрические поля, сопровождающие ПАВ, будут проникать в полупроводник и наводить в нем электрические токи. Если теперь приложить постоянное электрическое поле, которое вызовет дрейф носителей заряда в полупроводнике в направлении распространения ПАВ, то носители заряда будут отдавать свою энергию волне (ПАВ). Для усиления волны необходимо, чтобы скорость их дрейфа превышала фазовую скорость ПАВ.

Детектором является ВШП, на который поступает усиленная акустическая волна. В качестве устройства управления используется пленка полупроводника в слоистой структуре на тракте распространения сигнала.

На основе использования явления взаимодействия ПАВ с носителями заряда в полупроводниковых и слоистых структурах разработаны акустоэлектронные усилители.

На рис. 2.27 показано устройство акустоэлектронного усилителя на поверхностных волнах.

На сапфировой подложке 3 в пространстве между входным и выходным встречно-штыревыми преобразователями (ВШП) выращивают эпитаксиальным способом монокристаллический слой кремния *n*-типа 2 толщиной около 1 мкм. У кра-

ев слой кремния снабжен омическими контактами для подвода дрейфового напряжения $U_{др}$. Между акустической подложкой 4 и слоем кремния 2 существует воздушный зазор 1. Величина воздушного зазора выбирается в зависимости от частоты усиливаемых сигналов (от 50 нм для работы на частоте 100 МГц до 20 нм – для 1 ГГц). Такие усилители могут работать как в импульсном, так и в непрерывном режимах, имеют малый коэффициент шума и коэффициент усиления до 35 дБ.

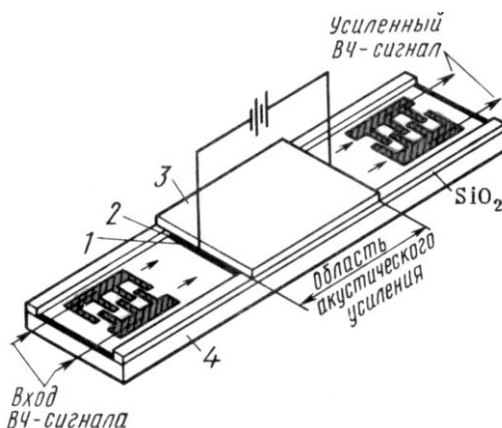


Рис. 2.27. Акустоэлектронный усилитель на ПАВ:

- 1 – воздушный зазор; 2 – кремниевая пленка;
3 – сапфировая подложка; 4 – акустическая подложка

Анализ показал, что акустоэлектронные усилители могут работать, как в импульсном, так и в непрерывном режимах усиления. Коэффициент электронного усиления лежит в пределах от 10 до 90 дБ, коэффициент шума до 10 дБ на центральных частотах 10 Гц с полосой порядка 10 %.

Акустоэлектронные усилители выполняются по микроэлектронной технологии и легко монтируются в соответствующие системы.

В настоящее время разработка функциональных акустоэлектронных устройств достигла такого уровня, что они способны заменить отдельные схемотехнические устройства при работе в реальном масштабе времени с выигрышем не только по потребляемой энергии и надежности, но также по стоимости габаритам и стоимости. Однако на пути широкой практической реализации этих приборов стоят еще значительные технологические трудности.

2.2.5. Акустические преобразователи

Пьезоэлектрические преобразователи используют для возбуждения с помощью электрических сигналов акустических волн в ультразвуковых линиях задержки и обратного преобразования их в электрический сигнал.

В настоящее время разработано множество акустических преобразователей.

Наилучшим пока является преобразователь, который изготовляют посредством напыления на торец звукопровода, покрытого металлической пленкой, тонкого слоя сульфида кадмия CdS (см. рис. 2.28).

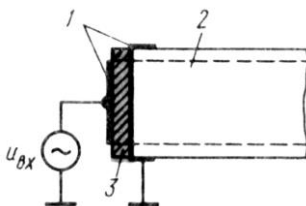


Рис. 2.28. Акустический преобразователь с напыленной пленкой сульфида кадмия: 1 – металлическая пленка; 2 – звукопровод; 3 – напыленная пленка сульфида кадмия

Такие преобразователи имеют малые потери (до 12 дБ для пары преобразователей на частотах 300...400 МГц) и широкую полосу пропускания (порядка 30 %) на частотах от 100 до 1000 МГц.

На частотах порядка 10 ГГц в качестве преобразователей используют обедненный слой смещенного в обратном направлении p - n -перехода (рис. 2.29). Выбором напряжения смещения $U_{см}$ толщину обедненного слоя доводят до десятых долей микрона и модулируют высокочастотным напряжением $u_{вх}$.

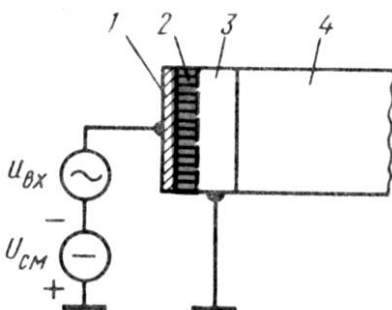


Рис. 2.29. Акустический преобразователь на p - n -переходе:

1 – золото; 2 – обедненный слой; 3 – GaAs n -типа;

4 – звукопровод

На принципе электромеханического резонанса основано действие прибора, называемого **резонистором** и представляющего собой транзистор с резонирующим затвором (рис. 2.30).

Затвор 3, представляющий собой часть балки, противоположный конец которой закреплен на изоляторе, нависает над каналом между стоком С и истоком И. Под балкой на изоляторе расположен электрод, на который подается входной сигнал. Сила электростатического взаимодействия сигнального электрода с затвором, на который также подано постоянное напряжение смещения, раскачивает балку в случае, когда частота сигнала совпадает с механическим резонансом балки. Вибри-

рующий затвор модулирует канал, обуславливая наличие переменной составляющей тока в нагрузке R_n . Консоль из золота имеет длину 0,25 мм. Такие резонисторы на частотах 1...45 кГц имеют добротность 100...750. При обратной связи с выхода на вход резонистора можно получить тональный генератор, подобный широко известному камертонному генератору. Разрабатываются и применяются резонисторы и для более высоких частот, приблизительно до 1 МГц.

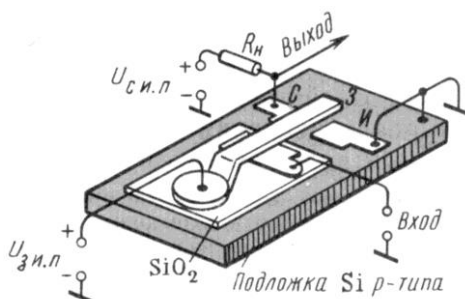


Рис. 2.30. Устройство резонистора

3. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

3.1. Физические основы

Функциональная диэлектрическая электроника представляет собой направление в функциональной электронике, в котором изучаются явления и эффекты в активных диэлектриках, а также возможность создания приборов и устройств обработки и хранения информации на основе динамических неоднородностей электрической, магнитной или электромагнитной природы.

3.1.1. Динамические неоднородности

Активные диэлектрики - это диэлектрические материалы, в которых могут быть возбуждены динамические неоднородности и которые предназначены для процессов генерации, усиления, преобразования и хранения информационных сигналов. Активные диэлектрики существенно отличаются от пассивных, которые применяются в основном в качестве электроизоляционных материалов.

В активных диэлектриках в основном используются динамические неоднородности различной физической природы: домены, квазичастицы, неоднородности фоторефрактивной и электрооптической природы.

Особый интерес представляют *сегнетоэлектрические домены*. Сегнетоэлектрики - это кристаллические диэлектрики, обладающие в определённом интервале температур спонтанной (самопроизвольной) поляризацией, которая существенно изменяется под влиянием внешних воздействий. К числу наиболее исследованных и используемых на практике сегнетоэлектриков относятся титанат бария, сегнетова соль (давшая название всей группе кристаллов), триглицинсульфат, дигидрофосфат калия и

др. Обычно сегнетоэлектрики не являются однородно поляризованными, а состоят из доменов (рис. 3.1, а) - областей с различными направлениями спонтанной поляризации, так что при отсутствии внешних воздействий суммарный электрический дипольный момент P_s образца практически равен нулю. Наличие поляризации в отсутствие внешнего электрического поля (спонтанной поляризации) является отличительной особенностью сегнетоэлектриков.

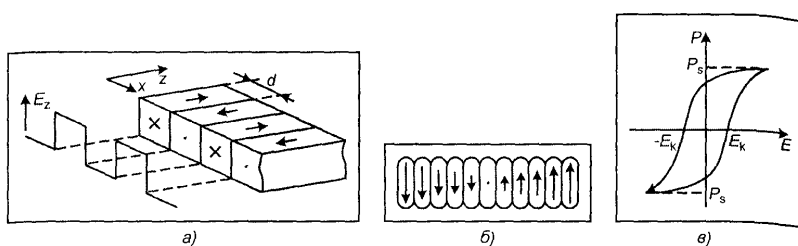


Рис. 3.1. Слоистая доменная структура и распределение в ней полей (а), структура сегнетоэлектрической доменной стенки (б), петля гистерезиса переполаризации домена (в)

В соседних доменах направление вектора спонтанной поляризации различно, а величина – одинакова. Поперечные размеры доменов обычно порядка $10^{-5} - 10^{-3}$ см. Домены разделены переходной областью или доменной границей (рис. 3.1, б). Переходная область между доменами (доменная граница, или стенка) имеет ширину около 10^{-7} см (иногда до 10^{-5} см). Доменная конфигурация зависит от размеров и формы образца, наличия неоднородностей и дефектов в кристалле и т.п., а также от симметрии кристалла, которая определяет число возможных направлений спонтанной поляризации. Например, у сегнетовой соли – два возможных антипараллельных направления, у титаната бария BaTiO_3 (тетрагональной модификации) – шесть направлений (рис. 3.2).

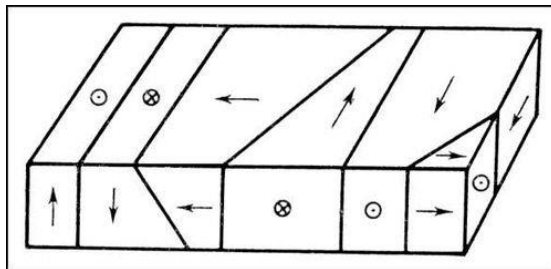


Рис. 3.2. Схематическое изображение доменов и их поляризации в тетрагональной модификации BaTiO_3 ; знаки $\odot$ $\otimes$ показывают, что поляризация перпендикулярна плоскости, на которой знак изображен, и направлена так, как показывают стрелки на плоскостях

Поляризация P_s зависит от напряженности электрического поля E нелинейным образом. При циклическом изменении E от $+E_k$ до $-E_k$ вектор поляризации меняется от $+P_s$ до $-P_s$, где E_k — коэрцитивная сила. Функция $P_s = f(E_k)$ имеет вид петли гистерезиса (рис. 3.1, в). Петля гистерезиса является отличительной чертой динамических неоднородностей сегнетоэлектрической природы. Время электронной переполаризации составляет около 10^{-15} с.

Спонтанной поляризацией обладают и *пироэлектрики*, но направление вектора P_s в них строго фиксировано и поэтому не обнаружено динамических неоднородностей типа доменов. Наличие спонтанной поляризации, т. е. электрического дипольного момента в отсутствии электрического поля, — отличительная особенность пироэлектриков.

В *сегнетоэлектриках – сегнетоэластиках* наблюдается спонтанная локальная деформация в результате изменения внешних условий. Спонтанная деформация сопровождается изменением знака при воздействии электрического поля.

При нагревании сегнетоэлектриков спонтанная поляризация, как правило, исчезает при определённой температуре T_c , называемой точкой Кюри, т. е. происходит фазовый переход сегнетоэлектриков из состояния со спонтанной поляризацией (полярная фаза) в состояние, в котором спонтанная поляризация отсутствует (неполярная фаза). Фазовый переход в сегнетоэлектриках состоит в перестройке структуры кристалла. В разных сегнетоэлектриках T_c сильно различаются.

Величина спонтанной поляризации P_s обычно сильно изменяется с температурой вблизи фазового перехода. Она исчезает в самой точке Кюри T_c либо скачком (фазовый переход 1-го рода, например в титанате бария), либо плавно уменьшаясь (фазовый переход 2-го рода, например в сегнетовой соли).

В сегнетоэлектриках в области фотостимулированных фазовых переходов типа «порядок—беспорядок», образуются макроскопические квазичастицы – **флуктоны**, которые можно рассматривать в качестве динамических неоднородностей. Флуктоны возбуждаются в гетерофазной системе и представляют собой флуктуации концентрации одной из компонент системы, создающие для частицы потенциальную яму, перемещающуюся вместе с частицей. **Флуктон** – квазичастица, представляющая собой возбуждение в гетерофазной системе (например, в сплавах), связанное с образованием вокруг заряженной частицы, например электрона, флуктуации концентраций одной из компонент системы, которая создаёт для заряженной частицы потенциальную яму. В результате попадания заряженной частицы в потенциальную яму флуктуация становится устойчивой и может перемещаться вместе с заряженной частицей. Если гетерофазная среда – смесь разных фазовых состояний одного и того же вещества, то флуктон называется **фазоном**.

В сегнетоэлектриках наблюдаются фотостимулированные фазовые переходы 1-го и 2-го рода, при которых генерируются **фазоны** – макроскопические квазичастицы. Фазоны представ-

ляют собой возбуждение в гетерофазной системе из смеси фазовых состояний одного и того же вещества, связанное с образованием вокруг заряженной частицы флуктуации концентрации одной из компонент системы, создающей для частицы потенциальную яму. Самосогласованный радиус фазона R_0 при данной температуре и заданной плотности поверхностной энергии пропорционален числу локализованных электронов n : $R_0 \sim n^{2/5}$ ($2 R_0 \approx 10 \text{ \AA}$). Фазоны можно рассматривать, как подвижные пакеты квазичастиц с эффективной массой M . Модель фазона предполагает существенное влияние фазового перехода 1-го рода на электропроводность. Такие пакеты квазичастиц – фазонов – можно, по-видимому, рассматривать как динамические неоднородности в сегнетоэлектриках.

В сегнетомагнитных кристаллах одновременно существуют магнитная и электрическая дипольные структуры и соответственно векторы спонтанной поляризации P_x и спонтанной намагниченности M_s . В элементарных ячейках кристаллографических структур сегнетомагнетиков должны находиться частицы, обладающие как электрическим дипольным моментом, так и магнитным. Сосуществование электрических и магнитных дипольных структур определяется принципом симметрии в различных кристаллографических структурах. Вещества определенной симметрии обладают магнитоэлектрическим эффектом. Он состоит в том, что при наложении электрического поля появляется пропорциональная полю намагниченность, а при наложении магнитного поля появляется электрическая поляризация, пропорциональная этому полю. В общем случае для таких сред справедливы соотношения:

$$D = \varepsilon E + vH, B = \mu H + v'E', \quad (3.1)$$

где v и v' - магнитоэлектрические тензоры, ε - диэлектрическая проницаемость, μ - магнитная проницаемость вещества.

Представляют интерес для их использования в качестве динамических неоднородностей **экситоны** и **поляритоны**.

Экситон (лат. *excito* — «возбуждаю») - водородоподобная квазичастица, представляющая собой электронное возбуждение в диэлектрике или полупроводнике, мигрирующее по кристаллу и не связанное с переносом электрического заряда и массы.

Хотя экситон состоит из электрона и дырки, его следует считать самостоятельной элементарной (не сводимой) частицей в случаях, когда энергия взаимодействия электрона и дырки имеет тот же порядок, что и энергия их движения, а энергия взаимодействия между двумя экситонами мала по сравнению с энергией каждого из них. Экситон можно считать элементарной квазичастицей в тех явлениях, в которых он выступает как целое образование, не подвергающееся воздействиям, способным его разрушить.

Экситон может быть представлен в виде связанного состояния электрона проводимости и дырки, расположенных или в одном узле кристаллической решётки (экситон Френкеля, $a^* < a_0$, a^* - радиус экситона, a_0 — период решётки), или на расстояниях, значительно больше междоузельных (экситон Ванье — Мотта, $a^* \gg a_0$). В полупроводниках, за счёт высокой диэлектрической проницаемости, существуют только экситоны Ванье - Мотта. Экситоны Френкеля применимы, прежде всего, к молекулярным кристаллам.

При освещении кристалла могут возникнуть **поляритоны**, представляющие собой квантовые квазичастицы, возникающие при взаимодействии экситона и оптического фонона с фотоном. **Поляритон** (англ. *polariton*) — составная квазичастица, возникающая при взаимодействии фотонов и элементарных возбуждений среды — оптическими фононами, экситонами, плазмонами, магнонами и так далее (которые называются соответственно фононными поляритонами, экситонными поляритонами (свето-экситонами), плазмон-поляритонами, магنونными поляритона-

ми и так далее). Эти экзотические квазичастицы способны переносить информационный сигнал и могут быть использованы в устройствах функциональной электроники.

3.1.2. Континуальные среды

В качестве континуальных сред в функциональной диэлектрической электронике используются, как правило, активные диэлектрики. Под активными диэлектриками будем понимать диэлектрические материалы, в которых могут быть возбуждены динамические неоднородности и которые предназначены для процессов генерации, усиления, преобразования и хранения информационных сигналов.

Активные диэлектрики существенно отличаются от пассивных, которые применяются в основном в качестве электроизоляционных материалов.

Свойства активных диэлектриков зависят от воздействия на них определенных физических полей; механических, тепловых, электрических, магнитных. Результатом взаимодействия структуры диэлектрика и полей является генерация динамических неоднородностей определенной физической природы. Активные диэлектрики, используемые в качестве континуальных сред в приборах и устройствах функциональной диэлектрической электроники, обладают широким набором свойств, определяемых типом воздействующих физических полей: механических, тепловых, электрических, магнитных, оптических. В результате анализа континуальных сред удалось систематизировать свойства диэлектриков в зависимости от воздействующих на них физических полей. На рис. 3.3 схематично представлены информационные поля, отражающие различные физические взаимодействия в активных диэлектриках. В соответствии с принятой системой классификации пронумеруем различные свойства активных диэлектриков в зависимости от *типов информационных полей*.

Область, ограниченная координатами 1.1 – 2.1, 1.3 – 2.1, 1.1 – 2.3, 1.3 – 2.3 представляет собой *термоупругие* свойства диэлектриков.

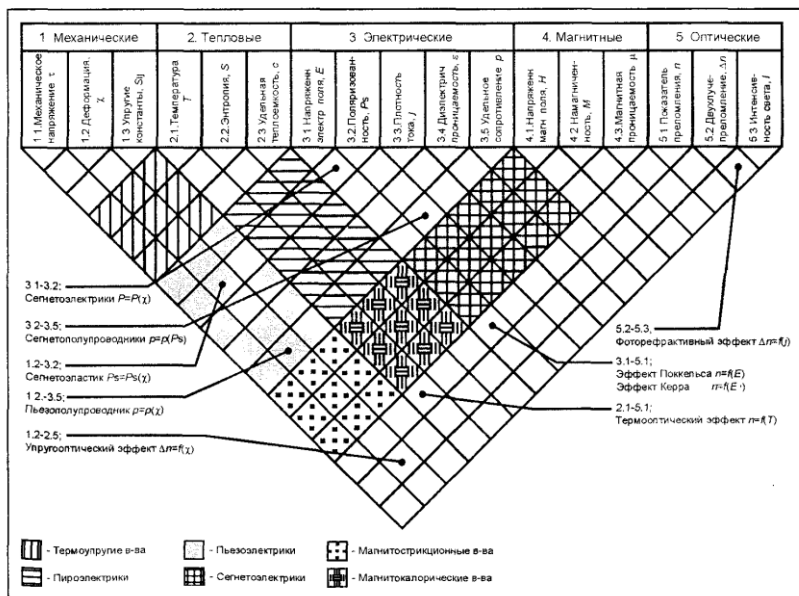


Рис. 3.3. Системный анализ свойств активных диэлектриков

Пьезоэлектрики располагаются в области, ограниченной координатами 1.1 – 3.1, 1.3 – 3.1, 1.1 – 3.5, 1.3 – 3.5. Их основным свойством является *наличие поляризации*, направление и уровень которой могут быть изменены при внешних воздействиях. Различают *прямой пьезоэлектрический эффект*, заключающийся в поляризованности P диэлектрика в зависимости от механического напряжения σ , описываемый соотношением

$$P = d\sigma, \quad (3.2)$$

где d - пьезомодуль.

В *обратном пьезоэлектрическом эффекте* деформация x линейно зависит от поляризованности P в соответствии с соотношением

$$x = gP, \quad (3.3)$$

где $g = d / [\varepsilon_0 (\varepsilon - 1)]$; здесь ε - диэлектрическая проницаемость диэлектрика, ε_0 - диэлектрическая проницаемость вакуума.

Заметим, что пьезоэлектрические материалы анизотропны. Их пьезоэлектрические, диэлектрические и упругие свойства описываются набором компонент пьезомодулей d_{ij} , упругих констант S_{ij} , диэлектрических проницаемостей ε_{ij} по разным направлениям.

Каждая ячейка описываемой информационной области обладает рядом замечательных свойств и определяет тип пьезоэлектриков.

Сегнетоэластики занимают ячейку с координатами 1.2 - 3.2 и описываются зависимостью $P = P(\chi)$. **Пьезополупроводники** располагаются в ячейках с координатами 1.2 - 3.5 и, как правило, представляют собой пленки CdS, ZnS, ZnO с низким значением ε (менее 10) и с выраженной зависимостью $\rho = \rho(\chi)$. **Пироэлектрики** представляют собой класс активных диэлектриков, в которых происходит поляризация при однородном по объему изменению температуры. Этот класс располагается в информационной области с координатами 2.1 - 3.1; 2.3 - 3.1; 2.1 - 3.5; 2.3 - 3.5. Спонтанная или остаточная поляризация P зависит от температуры $P = P(T)$, и для количественного описания вводят **пирокоэффициент** p , определяемый выражением $p = dP/dT$

Все пироэлектрики обладают **обратным электрокалорическим эффектом**, потому что их температура изменяется при поляризации.

Особый интерес для функциональной электроники представляют собой **сегнетоэлектрические континуальные среды**, имеющие доменную структуру. Каждый домен обладает спонтанной поляризацией, уровень и направление которых могут быть изменены внешними полями, например электрическим. В отличие от пьезоэлектриков, у которых направление вектора поляризации P строго фиксировано, у сегнетоэлектриков суммарная поляризация зависит от поляризации отдельных доменов. На рис. 3.3 сегнетоэлектрики занимают область с координатами 3.1 - 3.2.

В зависимости от вида поляризации различают ионные, дипольные и несовершенные сегнетоэлектрики. В **ионных сегнетоэлектриках** ячейка имеет вид куба типа ABO_3 по вершинам которого расположены ионы типа A (Ba^{2+} , Pb^{2+} , K^{2+} ...), в центре ионы типа B (Ti^{4+} , Nb^{4+}), а в центрах граней ионы кислорода O^{2-} . Если ионы типа B находятся в центре элементарной ячейки (рис. 3.4, *a*) то центры тяжести положительных и отрицательных ионов совпадают и общий дипольный момент равен нулю. Смещение иона B (Ti^{4+} , например) из центра кислородного октаэдра приводит к разбалансировке и возникновению дипольного момента P , направленного в сторону смещения (рис. 3.4, *б*).

Спонтанная поляризация в сегнетоэлектриках такого типа является следствием упорядоченного смещения ионов и представляет собой фазовый переход типа смещения.

К ионным сегнетоэлектрикам относятся структуры типа перовскита ($CaTiO_3$), титанат бария ($BaTiO_3$), титанат свинца ($PbTiO_3$), ниобат калия ($KNbO_3$) и т. п.

В элементарной ячейке **дипольных сегнетоэлектриков** содержатся атомы с двумя положениями равновесия, ее электрическая поляризация определяется взаимным положением атомов. На рис. 3.4, *в* представлено взаимное расположение ионов при положительном и отрицательном направлениях дипольного момента (рис. 3.4, *г*). Фазовый переход в дипольных

сегнетоэлектриках, происходящий в точке Кюри, называется переходом типа «порядок - беспорядок».

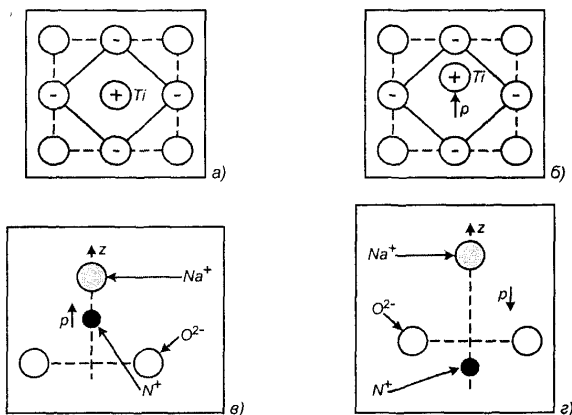


Рис. 3.4. Элементарные ячейки сегнетоэлектриков: ионный тип в неполяризованном (а) и поляризованном (б) состояниях; дипольный тип при положительном (в) и отрицательном (г) дипольных моментах

К дипольным сегнетоэлектрикам относятся сегнетова соль ($NaKC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$) триглицинсульфат ТГС $(NH_2CH_2COOH)_3 \cdot H_2SO_4$, нитрид натрия ($NaNO_2$) и т. п.

К особой группе относятся **несобственные сегнетоэлектрики**, в которых спонтанная поляризация обусловлена, например, деформацией кристаллической решетки при фазовом переходе. К этому типу относятся молибдат гадолиния $[Gd_2(MoO_4)_3]$, лангбейниты, $[Tl_2Cd_2(SO_4)]_3$ – талий кадмиевый лангбейнит, фторбериллат аммония $[(NH_4)_2BeF]$ и т. п.

Кристаллы, в соседних ячейках которых одноименные ионы смещены в противоположных направлениях, называются **антисегнетоэлектриками**. Спонтанная поляризованность антисегнетоэлектриков равна нулю. При наложении сильного

электрического поля антисегнетоэлектрик может переходить в сегнетоэлектрик с параллельной ориентацией диполей. Отличительной особенностью антисегнетоэлектриков является наличие двойных петель диэлектрического гистерезиса.

К антисегнетоэлектрикам относятся кристаллы цирконата свинца (PbZrO_3), ниобата натрия (NaNbO_3), гафната свинца (PbHfO_3), дигидрофосфата аммония ADP ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$).

Сегнетоэлектрики обладают довольно большим удельным сопротивлением ($\rho > 10^9$ Ом м). Однако существуют такие сегнетоэлектрики, у которых значение ρ соответствует полупроводникам. Можно искусственно снизить значение ρ , например, ионным легированием и получить новый тип сегнетоэлектрика - **сегнетополупроводник**. К ним относятся вещества феррит висмута BiFeO_3 , титанат свинца PbTiO_3 и др. Эти вещества занимают ячейку с координатами 3.2 - 3.5 (рис. 3.3).

Весьма перспективными являются полимерные сегнетоэлектрические пленки, нанесенные на поверхность кремния. Пленки наносятся методом литья из раствора винилиденфторида $\text{CH}_2\text{-CF}_2$ и трифторэтилена $\text{CH}_2\text{-F}_2\text{-CHF-CF}_2$ в ацетоне с последующим осаждением при температуре + (20 – 22) °С. Толщина пленок лежит в пределах от 6 до 20 мкм.

На пересечении информационных полей электрических и магнитных свойств диэлектриков (см. рис. 3.3) располагаются **сегнетомагнитные кристаллы**. Отличительной особенностью структуры сегнетоэлектриков является сосуществование магнитная и электрическая взаимопроникающие решетки. Они образованы частицами, несущими электрические и магнитные дипольные моменты.

В диэлектриках этого класса обнаружен **магнитоэлектрический эффект**. Его сущность состоит в том, что в веществах определенной симметрии при наложении электрического поля появляется намагниченность, пропорциональная полю, и при приложении магнитного поля появляется электрическая составляющая, пропорциональная полю.

Сегнетомагнетики перспективны для устройств функциональной электроники второго поколения, где возможна интеграция эффектов и явлений за счет присутствия в среде спонтанной поляризации P_x и спонтанной намагниченности M_s . К сегнетомагнетикам, прежде всего, относятся перовскитные соединения типа ферровольфрамат $[Pb(Fe_{2/3}Nb_{1/3})O_3]$ и феррониобат свинца $[Pb(Fe_{1/2}Nb_{1/2})O_3]$, а также феррит висмута ($BiFeO_3$), ренийсодержащие перовскиты (Sr_2CoReO_6 , $SrNiReO_6$), сегнетомагнитные борадады ($Mg_3V_7O_{13}Cl$) и т. п.

Континуальные среды, соответствующие ячейкам информационного поля с координатами 1.1 - 4.1, 1.3 - 4.1, 1.3 - 4.3, 1.1 - 4.3 (см. рис. 3.3), обладают *магнитоотрицательными свойствами*, а расположенные в информационном поле 2.1 - 4.1, 2.3 - 4.1, 2.1 - 4.3, 1.1 - 4.3 - *магнитокалорическими*.

Менее изучены свойства континуальных сред на пересечении оптических взаимодействий с механическими, тепловыми, электрическими и магнитными.

В ячейках с координатами 1.2 - 5.1 и 1.2 - 5.2 среды обладают *упругооптическим эффектом*, с координатами 2.1 - 5.1 и 2.1 - 5.2 - *термооптическим эффектом* (см. рис. 3.3).

Свойства сред, расположенных в ячейке 3.1 - 5.1, описываются *эффектом Погеля* - $n = f(E)$ и *эффектом Керра* - $n = f(E^2)$. Среда, обладающая *фоторефрактивным эффектом* $\Delta n = f(I)$ расположена в ячейках с координатами 5.1 - 5.3. Проведенный системный анализ диэлектрических континуальных сред позволяет более эффективно осуществлять их выбор для перспективных процессоров и запоминающих устройств.

3.1.3. Генераторы динамических неоднородностей

Генерирование динамических неоднородностей в диэлектрических континуальных средах осуществляется физическими полями. Динамические неоднородности в устройствах диэлектрической электроники, как правило, не перемещаются в кон-

тинуальной среде. Информационный сигнал передается за счет изменения локальных физических свойств среды, прежде всего за счет локальных полей. При приложении электрического поля с помощью статических неоднородностей соответствующей конфигурации к сегнетоэлектрику в нем генерируется неоднородность в виде домена определенной поляризации. При приложении электромагнитного поля к сегнетоэлектрикам (например, KDP - дигидрофосфат калия, ADP – дигидрофосфат аммония и др.) можно получить динамические неоднородности, изменяющие оптическую плотность среды и способствующие линейному преобразованию падающего излучения. В любом случае реализуется элемент конструкции - *генератор динамических неоднородностей*.

3.1.4. Другие элементы приборов

В приборах и устройствах диэлектрической электроники управление динамическими неоднородностями, как правило, носит статический характер и осуществляется с помощью меняющихся физических полей, в зависимости от типа выбранной динамической неоднородности.

Детектором динамических неоднородностей является, как правило, локальная область, изменяющая свои свойства под действием физических полей. Считывание информации можно осуществлять и сканирующим детектором. В этом случае имеет смысл говорить о распределенном детекторе.

3.2. Приборы и устройства функциональной диэлектрической электроники

3.2.1. Слоистые структуры

В приборах диэлектрической функциональной электроники используются, как правило, *слоистые структуры*. Слои ак-

тивного диэлектрика применяется для хранения или обработки информации, а ввод и детектирование информации осуществляется в других слоях с соответствующими статическими неоднородностями.

Например, в структурах «сегнетоэлектрик - полупроводник» используется эффект поля. В этом случае свойства полупроводника определяются состоянием поляризации сегнетоэлектрика.

Если сегнетоэлектрик деполяризован ($P = 0$), то на границе раздела «сегнетоэлектрик – полупроводник» n -типа нет изгиба зон (рис. 3.5, *а*). Собственный уровень Ферми E_{FC} представляет собой прямую линию, а основные носители смешаны в полупроводнике с неосновными. При поляризации сегнетоэлектрика ($-P$) у границы раздела в полупроводниковом слое образуется слой накопления основных носителей. Происходит изгиб зон, включая уровень Ферми, и при этом поверхностная плотность больше объемной плотности (рис. 3.5, *б*).

Если переполаризовать сегнетоэлектрик ($+P$), то у границы раздела в полупроводнике образуется слой обеднения основными носителями. Зоны изогнуться в противоположную сторону и поверхностная плотность будет меньше объемной плотности зарядов (рис. 3.5, *в*).

В таких структурах информация, соответствующая одному из направлений вектора спонтанной поляризации, может быть считана по изменению поверхностного потенциала полупроводника. Время перезаписи информации определяется временем переполаризации. В таких слоистых средах большое значение имеют электрические поля в сегнетоэлектриках. Поле спонтанной поляризации должно быть меньше коэрцитивного. (Коэрцитивное поле в сегнетоэлектриках – это электрическое поле, которое необходимо приложить к сегнетоэлектрику в полярной фазе для уменьшения его поляризации до нуля.) В этом случае энергия переключения знака поляризации меньше затрачиваемой энергии. Одновременно должно соблюдаться условие,

при котором уровень коэрцитивного поля меньше уровня электрического пробивного поля. Это условие позволит производить переполяризацию сегнетоэлектрика без его разрушения.

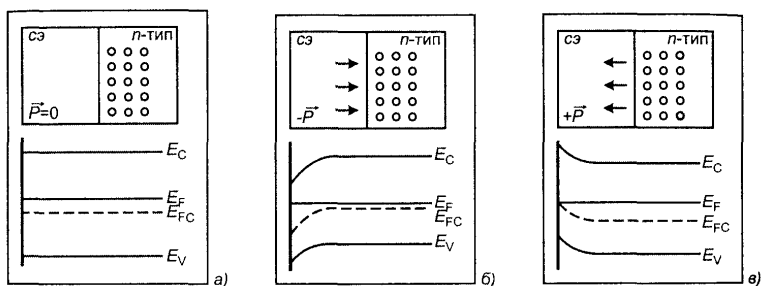


Рис. 3.5. Изменение свойств полупроводника при изменении поляризации сегнетоэлектрика

Управляемость поверхностным потенциалом полупроводника в структуре типа «металл – сегнетоэлектрик – полупроводник» (МСЭП-структура) существенным образом зависит от качества границы раздела, от фиксированного в сегнетоэлектрике заряда $Q_{сэ}$, заряда, захваченного на поверхностных состояниях полупроводника Q_{ss} .

Весьма перспективной является структура «сегнетоэлектрик – фотополупроводник». Такая структура помещается между оптически прозрачными проводящими электродами. При локальном освещении полупроводника его сопротивление уменьшается, и все напряжение между проводящими электродами падает на слой сегнетоэлектрика. В освещенных областях сегнетоэлектрик переполяризуется. Возникающее пространственное распределение поляризации сегнетоэлектрика соответствует распределению освещенности и позволяет осуществить оптическое считывание.

3.2.2. Устройства памяти

Использование диэлектрических материалов при создании запоминающих устройств весьма перспективно для создания новых приборов, характеризующихся энергонезависимостью, высоким выходным сигналом, устойчивостью к воздействию перегрузок и радиации. По функциональному назначению эти устройства близки к репрограммируемым полупроводниковым ЗУ (РПЗУ). Одними из первых устройств этого типа были сегнетоэлектрические ЗУ, изготовленные на поликристаллической сегнетокерамике типа цирконата - титаната свинца (PZT-керамика).

Запоминающее устройство изготовлялось на основе керамической пластины (2) в форме диска или прямоугольника, фрагмент которого изображен на рис. 3.6.

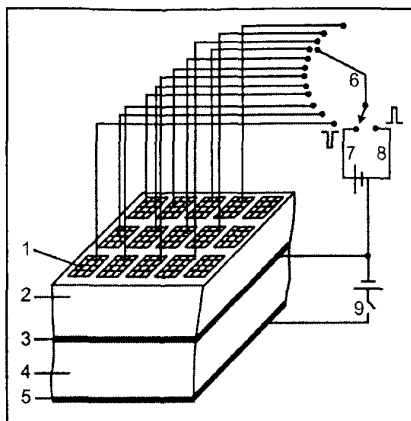


Рис. 3.6. Фрагмент устройства памяти на сегнетоэлектрической PZT-керамике

Термическим напылением в вакууме на внешнюю поверхность наносились металлические электроды в форме секторов

или прямоугольников (1). С другой стороны наклеивался сплошной электрод из латуни или инвара (3), который служил общим электродом и для еще одной пластины PZT-керамики (4) со сплошным электродом (5), присоединенной снизу. Такая слоистая структура из двух типов сегнетоэлектриков с электродами между ними представляет собой твердотельную память на диэлектрике.

Первоначально сегнетоэлектрик имеет остаточную поляризацию, например, отрицательную, при которой вектор остаточной поляризации – P_2 направлен вниз. Этому состоянию памяти можно приписать хранение во всех разрядах информационных нулей. Это же состояние можно сформировать путем реполяризации секторов (разрядов) памяти, подавая отрицательный импульс напряжения с помощью коммутаторов 6 и 7.

Программирование запоминающего устройства происходит путем записи двоичной единицы информации в соответствующий разряд памяти ($+P_2$). С этой целью туда необходимо подать положительный импульс напряжения соответствующей комбинацией коммутаторов 6 и 8. Амплитуда и длительность положительного импульса определяется процессом локальной реполяризации сегнетокерамики. После снятия напряжения записи заданное направление поляризации сохраняется в силу гистерезисных свойств сегнетокерамики.

Процесс считывания двоичной информации основывается на пьезоэлектрических свойствах сегнетокерамики. Так, если к электродам 3 и 5 сегнетокерамики 4 приложить напряжение с помощью коммутатора 9, то возникнет механическая деформация. Импульс деформации от изгибающего элемента 4 пройдет через сегнетокерамику 2 и индуцирует на секторных электродах заряд, соответствующий ранее записанной двоичной информации. Этот заряд может быть считан как соответствующий ему потенциал с помощью коммутатора 5 и, таким образом, расшифрована ранее записанная информация. Такая память на изгибающем элементе требует довольно больших входных сигнала-

лов (порядка 15 В), способных вызвать значительные механические деформации и, соответственно, большие значения выходных сигналов (порядка 2 В).

В процессе совершенствования конструкции сегнетокерамику 2 и 4 изготавливают из нескольких различных составов, с разными значениями коэрцитивной силы, что позволяет оптимизировать соотношения между амплитудами импульсов записи и считывания информации, выбирать резонансный или не резонансный режим работы.

Описанные ЗУ отличаются простотой в обращении, имеют малую стоимость, простую конструкцию, высокую радиационную стойкость. Со временем эта конструкция стимулировала развитие идеи создания ***пьезоэлектрической вычислительной среды*** (ПЭВС) с функциями запоминающих устройств. При этом использовалось два типа динамических неоднородностей сегнетоэлектрические домены для хранения информации и акустические волны для обработки информации.

Важно отметить, что в этом случае решается принципиально новая технологическая задача: активная диэлектрическая континуальная среда в виде твердых тел заменяется аналогичной пленочной структурой. При этом необходимо воспроизвести сегнетоэлектрические свойства в тонких континуальных слоях. Сложность заключается в том, что физическая природа сегнетоэлектричества формируется дальнедействующими силами дипольного происхождения. Радиус действия таких сил определяется корреляционной длиной. В этом случае толщина слоев сегнетоэлектрика должна на порядок превышать корреляционную длину и составлять 100 - 500 нм. При этом необходимо достаточно точно воспроизвести стехиометрии трех-, четырех- и более компонентного состава. В этих пленках должны быть сохранены физические свойства объемного материала. При этом одновременно уменьшаются управляющие электри-

ческие и механические напряжения, оптические и акустические потери, улучшаются другие потребительские свойства.

Вопросы получения промышленных пленок сегнетоэлектриков являются специальной, технологической проблемой. Информационным значениям «0» или «1» соответствует разность фаз считываемого сигнала в 2π , что соответствует направлениям поляризации $\pm P_2$ в отдельных ячейках памяти.

Разработанные *пьезокермические матрицы* (ПКМ) функционируют на принципе импульсного или резонансного считывания информации и напоминают конструкцию, рассмотренную на рис. 3.6.

Считывание информации происходит без ее разрушения с тактовой частотой до 1 МГц, определяемой временем переполяризации (около 50 мкс). Допускается $10^6 - 10^8$ циклов перезаписи информации. Разработаны интегральные ПКМ емкостью более 512 бит с напряжением перезаписи порядка 4 В, работающие в интервале температур 80 - 200 °С, выдерживающие ударные нагрузки до $3 \cdot 10^4 g$ и отличающиеся высокой радиационной стойкостью.

Следует отметить возможность увеличения на порядок плотности записи информации без увеличения числа ячеек памяти. В основе лежит физический принцип переключения поляризации из состояния $-P_2$ в состояние $+P_2$. Из-за отсутствия абсолютного порога переключения можно один бит информации, например «1», разложить на амплитудный многоуровневый аналоговый сигнал и воспользоваться законами многозначной логики. Так, в ПКМ достаточно легко обеспечить 20 уровней $\pm \Delta P_2$ во всем диапазоне $\pm P_2$ с разрешением цифроаналогового преобразования 10^{-1} В. Одним из основных требований к сегнетоэлектрическим материалам таких ПКМ является обеспечение коэффициента прямоугольности петли диэлектрического гистерезиса $0,85 \leq K_{ГП} = P_2 / P_s < 1$. Весьма перспективным материалом для ЗУ являются сегнетоэлектрические пленки на основе нитрата калия (KNO_3). Они отличаются малым вре-

менем переключения порядка 10^{-9} с, высокой тактовой частотой около 10^8 Гц, малыми геометрическими размерами доменов, позволяющими получить размер ячейки около 20 мкм^2 и, соответственно, достичь степени интеграции $10^8 - 10^{19}$ бит/см². Емкостные элементы функциональной электроники нашли перспективное применение в устройствах памяти схемотехнической электроники.

Известно, что одним из существенных недостатков существующих схем памяти является отсутствие энергозависимости. Разработано несколько подходов к созданию энергонезависимых схем памяти. Лучший результат дает технология осаждения на поверхность тонкой пленки цирконата титаната свинца (ЦТС или PZT), с помощью которой формируются сегнетоэлектрические конденсаторы. Такие конденсаторы соответствующим образом поляризуются и, имея высокое значение диэлектрической проницаемости ($\varepsilon \cong 1200$), обеспечивают определенное состояние ЗУ при частом отключении питания. Керамика цирконат титанат свинца (PZT) обладает высоким удельным сопротивлением (изолятор), термической и химической стойкостью, высокой механической прочностью. Температура фазового перехода PZT-керамики составляет 330°C , и поэтому такие схемы могут работать в температурном диапазоне от -180 до $+320^\circ\text{C}$. Пробивное напряжение таких схем составляет около 40 В , диэлектрическая проницаемость выше $1,2 \times 10^3$, что позволяет резко повысить плотность интеграции по сравнению с известными схемами ДОЗУ. Таким образом, динамические неоднородности в виде сегнетоэлектрических доменов, встроенных в устройства схемотехнической электроники, позволяют получить их новое качество, существенно улучшить выходные характеристики.

3.2.3. Процессоры

Значительный интерес представляют процессоры для обработки больших информационных массивов, реализованные на принципах функциональной электроники. Это обусловлено тем, что такие устройства позволяют обрабатывать информацию в аналоговом виде, одномоментно либо весь массив, либо его часть, Результирующая информация может быть преобразована в цифровую форму. Возможна операция выделения разностной информации между двумя и более временными состояниями информационного массива.

Процессоры можно реализовать на слоистых структурах типа «сегнетоэлектрик - фотополупроводник». С обеих сторон такой структуры напыляются проводящие пленки, причем со стороны фотополупроводника пленка должна быть оптически прозрачной. При формировании на слое фотополупроводника оптического информационного массива на слоистую структуру одновременно подается «записывающий» импульс напряжения. На освещенных участках сопротивление фотополупроводника резко уменьшается, и все приложенное напряжение падает на слое сегнетоэлектрика. Под засвеченными местами сегнетоэлектрик переполяризуется. В темных местах сопротивление фотополупроводника велико и все напряжение падает на него. Сегнетоэлектрик под темными местами не переполяризуется. Возникает пространственное распределение поляризации сегнетоэлектрика, соответствующее распределению освещенности.

Таким образом, оптический информационный массив преобразован в электрически заряженный информационный массив, который может быть легко считан. Стирание записанной информации может быть осуществлено путем засветки всей поверхности фотополупроводника с одновременной подачей импульса напряжения, противоположного по знаку записываемому импульсу. Это позволяет перевести сегнетоэлектрик в ис-

ходное состояние. Такая структура является основой для создания оптических процессоров сигналов с промежуточным запоминанием информации, систем отображения информации. Оптоэлектронные свойства материалов определяются характером переориентации доменов над воздействием поляризующего электрического поля. Домены образуют зерна, размер которых определяется характеристиками материала. Так для цирконата титаната свинца, легированного лантаном (ЦТСЛ, PLZT), размер зерна составляет несколько микрон и включает в себя до десятка сегнетодоменов. Простейший тип переориентации доменов под действием электрического поля приводит к изменению вектора поляризации на противоположное (180°). Однако режим поворота доменов каждого элемента сопряжен с трудностями нормирования матрицы таких элементов с множеством электродов.

Устройство на основе метода преимущественной ориентации доменов с помощью механического напряжения, создаваемого деформацией пластины, получила название ФЕРПИК (FERPIC, FERroelectric Picture). Его структура приведена на рис. 3.7. Проведем анализ работы процессора в терминах модели прибора функциональной электроники.

В качестве основной континуальной среды используется сегнетоэлектрик (3) в виде ЦТСЛ - керамики $[(\text{Pb}_{0,99}\text{Zr}_{0,65}\text{Ti}_{0,35})_{0,93}\text{La}_{0,07}\text{O}_3]$ со средним размером зерна 1,0 - 1,5 мкм. В такой среде динамические неоднородности представляют собой субмикронные сегнетоэлектрические домены. Континуальная среда подвергается смещению деформацией, что позволяет сориентировать домены вдоль оси напряжения. Континуальная среда сопряжена, с одной стороны, с фотопроводником (2), с другой – с прозрачным проводящим электродом (1) и прозрачной подложкой (4), несущей механические нагрузки. Прозрачный электрод (1) нанесен и с другой стороны фотопроводящего слоя.

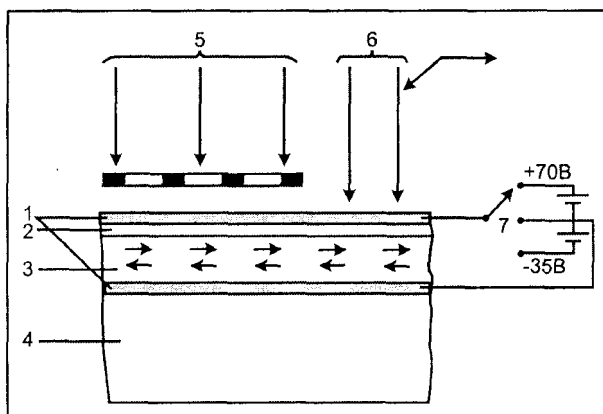


Рис. 3.7. Устройство обработки информации типа ФЕРПИК;
 1 - прозрачные проводящие электроды;
 2 - фотополупроводник, 3 - сегнетокерамика;
 4 - прозрачная подложка; 5 - облучение через маску;
 6 - облучение сканированием; 7 - переключатель режимов
 работы; 8 - источники напряжения

Запись информационного массива осуществляется путем освещения устройства через транспарант (5), либо сканированием модулируемого по амплитуде (или по растру) лазерного луча. Управление записью осуществляется полями. На керамическую пластину подается напряжение $+70\text{ В}$. В местах засветки уменьшается сопротивление фотопроводящего слоя, и величина напряженности электрического поля достаточна для поворота доменов на 90° . По окончании сканирования информационный массив записан в виде распределения доменов различных направлений поляризации. В этом случае можно говорить, что одновременно произошло детектирование информационных сигналов. Заметим, что оптическое пропускание устройства типа ФЕРПИК зависит от состояния доменов.

Записанную информацию можно считать, соединив электроды (поставив переключатель 7 в среднее положение и осветив устройство пучком монохроматического света). При этом достигается разрешение порядка 40 лин/мм, эффективность считывания около 10 % и контраст 10:1.

Стирание информационного массива можно осуществить путем освещения всей поверхности и одновременной подачей на слоистую структуру отрицательного напряжения (порядка 35 В). При этом динамические неоднородности в виде сегнетоэлектрических доменов возвращаются в исходное состояние. Это устройство обработки информации в русской терминологии называют еще «Сегнот» - сегнетоэлектрическое отображение. В дальнейшем эта конструкция процессора стимулировала появление аналогичных устройств на основе слоистых структур «сегнетокерамика – фотопроводник», К ним относятся, например, КЕРАМПИК (CERAMPIC, CERAMic Picture), континуальной средой в котором служит крупнозернистая керамика $[(\text{Pb}_{0,99}\text{La}_{0,77}\text{Zr}_{0,65}\text{Ti}_{0,35})_{0,93}\text{O}_3]$ размером зерен около 3,0 мкм.

В процессоре такого типа в качестве континуальной среды используется сегнетокерамика толщиной 250 мкм, обладающая свойством локально деформироваться, и, таким образом, распределение поверхностной деформации соответствует распределению переполяризовавшихся участков. Амплитуда деформации составляет 0,5 мкм и шпирен - методом можно получить увеличенное изображение в отраженном свете с разрешением до 100 лин/мм. Слоистая структура может применяться в качестве оптических процессоров, в частности для преобразования входного некогерентного изображения в выходной когерентный сигнал, что используется в голографических ЗУ. Весьма перспективно применение таких структур в процессорах сложения и вычитания информационных массивов. В этих устройствах используется способность сегнетоэлектрика к устойчивому частичному переключению в пределах от $-P_s$ до $+P_s$ под действием электрического поля.

В устройстве, аналогичном известной конструкции ФОТОТИТУСа, операции сложения изображений можно применять для увеличения отношения сигнал/шум в процессе обработки изображений. Операцию вычитания изображений можно использовать для обращения изображения - преобразования положительного изображения в негативное, дифференцирования изображения, выделения слабоконтрастных контуров.

Слоистые структуры типа «сегнетоэлектрик – фотополупроводник» можно использовать в основе устройств памяти, оптических процессоров, устройств отображения информации.

4. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

4.1. Физические основы

Функциональная полупроводниковая электроника является направлением в функциональной электронике, в котором изучаются взаимодействия динамических неоднородностей в полупроводниковых континуальных средах с физическими полями, а также возможность создания приборов и устройств для преобразования и хранения информации.

Одним из основных отличий приборов и устройств полупроводниковой функциональной электроники от аналогичных устройств полупроводниковой схемотехнической электроники является способ обработки информации. В приборах и устройствах функциональной электроники для обработки и хранения информации используются динамические неоднородности различной физической природы, в приборах же схемотехнической микроэлектроники - различные схемные решения на основе транзисторных структур.

Если в устройствах функциональной электроники развивается принципиально новый подход к методам обработки и хранения информации, связанный с использованием динамических неоднородностей в качестве носителей информационного сигнала, то в традиционных устройствах полупроводниковой электроники используются либо классические схемотехнические решения, известные со времен дискретной электроники, либо новые технические решения, использующие уникальные возможности микроэлектронной технологии, обязательно связанные с созданием в строго регламентируемых технологических процессах различных статических неоднородностей.

4.1.1. Динамические неоднородности в полупроводниках

В состоянии термодинамического равновесия электроны проводимости и дырки в полупроводниках движутся хаотически. Направленное движение, или дрейф, электроны и дырки приобретают под действием внешнего электрического поля E . Скорость дрейфа определяется выражением

$$v_{др} = \mu E, \quad (4.1)$$

где μ - подвижность носителей заряда.

Носители могут объединяться в группы, называемые *зарядовыми пакетами*. Величина зарядового пакета определяется количеством сконцентрированных носителей, его скорость перемещения в полупроводнике - соответствующими электрическими полями. Зарядовые пакеты, состоящие из электронов или дырок, представляют собой динамические неоднородности полупроводниковой природы. Величина зарядового пакета определяется физическими параметрами среды и топологией емкостной структуры:

$$Q = SC_{уд}U_m, \quad (4.2)$$

где S - площадь затвора, $C_{уд} = \varepsilon_d \varepsilon_0 / h_d$ - удельная емкость подзатворного диэлектрика, ε_d и ε_0 - соответственно диэлектрические проницаемости окисла и вакуума, U_m - максимальное напряжение на затворе, h_d - толщина подзатворного диэлектрика.

Верхнее предельное значение поверхностной плотности зарядов оценивается величиной

$$Q_{\max} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ Кл} \cdot \text{см}^{-2} = 3,13 \cdot 10^{12} \text{ электронов} / \text{см}^{-2},$$

а нижнее

$$Q_{\min} = 5 \cdot 10^{-10} \text{ Кл} \cdot \text{см}^{-2} = 3,13 \cdot 10^9 \text{ электронов} / \text{см}^{-2}.$$

Критический уровень величины зарядового пакета, соответствующий значению логической единицы, оценивается величиной $Q_{\text{крит}} = 10^5$ электронов/см². Если приложить к полупроводнику внешнее магнитное поле, перпендикулярное к направлению дрейфа носителей, то под действием силы Лоренца носители отклоняются в соответствии с известным эффектом Холла.

В сильных электрических полях напряженностью $10^2 - 10^3$ В/см наблюдается изменение распределения носителей по энергии в сторону увеличения средней энергии. Изменяется подвижность, время свободного пробега, коэффициент диффузии. Разогрев носителей способствует возникновению горячих электронов и приводит к отклонению от закона Ома:

$$E = \rho \cdot j, \quad (4.3)$$

где j - плотность тока, E - напряженность электрического поля, ρ - удельное сопротивление полупроводника. Возникает **отрицательное дифференциальное сопротивление** (ОДС) или **отрицательная дифференциальная проводимость** (ОДП). Это явление связывают с переходом электронов, стимулированных электрическим полем зоны проводимости, из низкоэнергетической долины, в которой их подвижность относительно велика, в высокоэнергетические долины с меньшими значениями подвижностей носителей. Флуктуации концентрации свободных носителей в среде с объемным отрицательным удельным сопротивлением генерируют пространственный заряд.

Различают два типа полупроводников, обладающих объемной неустойчивостью. У некоторых полупроводников удельное сопротивление при определенных значениях напряженности поля резко и нелинейно увеличивается (рис. 4.1, а). Приборы на таких полупроводниках имеют N-образную вольтамперную характеристику и относятся к полупроводникам с ОДП (рис. 4.1, в). В полупроводниках такого типа возникают элект-

трические домены, движущиеся по направлению тока (рис. 4.1, д). Эти домены характеризуются тем, что их поле значительно больше, а концентрация носителей в них меньше, чем в остальной части полупроводниковой среды.

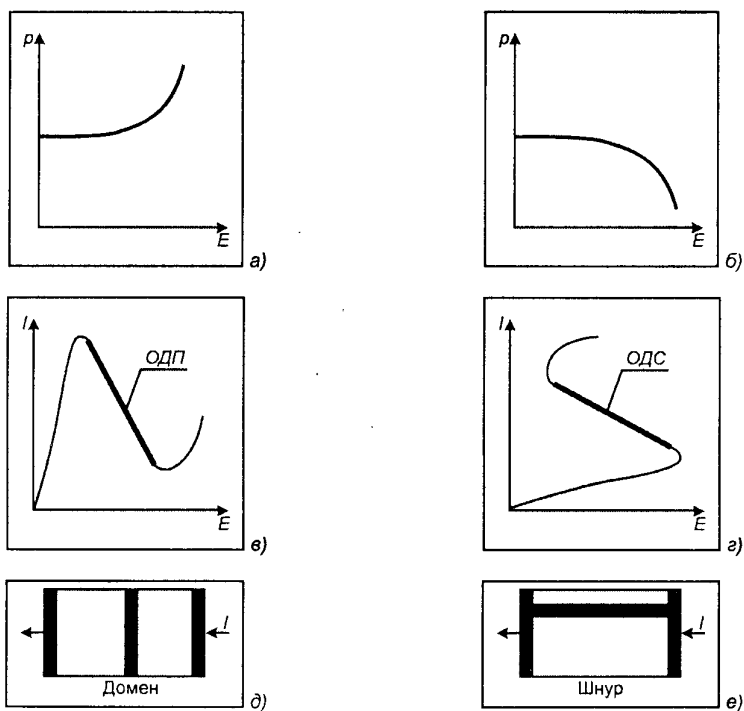


Рис. 4.1. Зависимость удельного дифференциального сопротивления от напряженности электрического поля для двух типов полупроводников: а, в - для приборов с доменами и N-образным ВАХ, б, г - для приборов с токовыми шнурами и S-образным ВАХ. Формирование домена сильного поля (д) и токового шнура высокой плотности (е)

В этих полупроводниках возникает внутренняя положительная обратная связь по напряжению. Домены получили название *доменов Ганна* и также представляют собой динамические неоднородности. Линейные размеры таких доменов лежат в пределах нескольких микрон, скорость перемещения составляет порядка 10^5 м/с, электрическое поле в нем достигает значения 10^5 В/см. Если домен не образуется, то в полупроводниковой континуальной среде могут возникнуть волны пространственного заряда.

В электронной системе полупроводника, обладающего объемной отрицательной дифференциальной проводимостью, когда характерные масштабы изменения параметров среды, приложенного поля и концентрации носителей заряда существенно превосходят длины релаксации энергии и импульса электронов, возникает возмущение электронной плотности. Такие волны называются *волнами пространственного заряда* (ВПЗ). Так для GaAs в сильном (около $3,5 \cdot 10^3$ В/см) электрическом поле возникают волны пространственного заряда, движущиеся со скоростью около 10 м/с. Фазовая скорость ВПЗ совпадает со скоростью дрейфа носителей заряда $v_{др}$. Дисперсия ВПЗ несущественна вплоть до частоты 50 ГГц.

Волны пространственного заряда могут усиливаться при распространении. Этими волнами можно управлять, меняя вектор скорости дрейфа носителей. Длина когерентности в тонких полупроводниковых слоях может на два порядка превышать длину волны ВПЗ. Такие свойства ВПЗ как динамических неоднородностей делают их весьма перспективными в устройствах функциональной электроники.

В другом типе полупроводников наблюдается падение удельного сопротивления с ростом напряженности электрического поля (рис. 4.1, б). Этот тип полупроводников относят к полупроводникам с ОДС. Приборы, изготовленные на основе таких полупроводников, имеют S-образную характеристику с положительной обратной связью по току (рис. 4.1, г). В прибо-

рах с S -образными ВАХ возникают динамические неоднородности с высокой плотностью тока, называемые **токовыми шнурами** (рис. 4.1, e). Токовые шнуры могут быть использованы в качестве динамических неоднородностей только при условии, если плотность тока в шнуре существенно меньше значения соответствующего пробой полупроводника и последующему необратимому процессу его разрушения.

В полупроводниках, обладающих пьезоэлектрическими свойствами (Te, Se, CdS, CdSe, ZnO, GaAs, InSb), в результате электрон-фононного взаимодействия поток носителей становится интенсивным излучателем упругих волн. Частным случаем электрон-фононного взаимодействия является акустоэлектронное взаимодействие. В результате обмена энергией между потоком дрейфующих электронов в электрическом поле в направлении распространения звуковой волны акустоэлектронное взаимодействие зависит от соотношения скорости дрейфа $v_{др}$, и скорости звука v . Если выполняется соотношение $v_{др} = \mu E < v$, то волна поглощается электронным газом, а если $v_{др} > v$ - электроны отдают свою кинетическую энергию акустической волне. Как уже ранее описывалось, такие акустические волны также являются динамическими неоднородностями.

В плазме полупроводника, находящегося в магнитном поле, могут возникнуть **геликоны** - слабо затухающие низкочастотные электромагнитные волны. Геликоны могут взаимодействовать со звуковыми волнами.

В плазме твердых тел могут возникать кванты плазменных колебаний - **плазмоны**, вызываемые созданием электрического поля за счет флуктуаций плотности заряда. В свою очередь электрическое поле в плазме вызывает ток носителей, стремящийся восстановить локальную электронейтральность. Вследствие инерционности носителей, проскакивающих положение равновесия, возникают кванты коллективных колебаний со спектром, определяемым зонной структурой. Плазмон является квазичастицей, способной переносить информационный сигнал.

В полупроводниковых кристаллах могут распространяться **фононы** - квазичастицы, соответствующие волне смещения атомов (ионов) и молекул из положения равновесия. Фононы взаимодействуют друг с другом, с другими квазичастицами, а также с дефектами кристаллической решетки. С помощью фононов осуществляется связь всех квазичастиц твердотельной континуальной среды с окружающей средой. В аморфных средах понятие фононов вводится для длинноволновых акустических колебаний.

Интерес вызывают **поляроны**. Это квазичастицы, состоящие из носителей заряда в полупроводнике (электрон или дырка) и фонона, образованного деформацией и поляризацией кристаллической решетки за счет движения в полупроводнике электрона проводимости (дырки). Такая составная квазичастица движется по кристаллу как единое целое, она способна переносить заряд. Эффективная масса полярона значительно превышает эффективную массу электрона. Поляроны могут служить носителями заряда в кристалле, возможно образование **биполяронов**, представляющих собой связку двух электронов в общей деформационной яме. По своей природе поляроны близки к **флуктонам**.

В полупроводниковых континуальных средах наблюдаются и другие квазичастицы. Речь идет об **экситонах**, представляющих собой связанное состояние электрона проводимости и дырки. Такая квазичастица электрически нейтральна и не способна переносить заряд и массу. Различают два типа экситонов.

Экситоны Френкеля возбуждаются в узлах кристаллической решетки и благодаря межмолекулярным взаимодействиям они распространяются по кристаллу в виде волны.

Экситоны Ванье - Мотта представляют собой водородоподобное связанное состояние электрона и дырки. Время жизни экситонов достаточно мало. Они исчезают в результате рекомбинации с излучением фонона и фотона, а также при захвате дефектами решетки. Именно это обстоятельство затруд-

няет использование экситонов в качестве динамических неоднородностей в устройствах функциональной электроники.

Если экситонный газ освещать, то в результате взаимодействия экситонов с энергией E и фотонов частоты $\nu = E / h$ - рождается составная квазичастица - **поляритон**. Свойства поляритонов отличаются от свойств экситонов и фотонов. Их наличие в полупроводниках существенно влияет на оптические спектры последних.

При дискретном туннелировании одного электрона возникают импульсы тока I , определяемые соотношением

$$\int I dt = e \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ А} \cdot \text{с}. \quad (4.4)$$

Такой импульс тока может быть использован в качестве динамической неоднородности.

Перечисленные типы динамических неоднородностей являются наиболее заслуживающими внимание и не исчерпывают весь их перечень.

4.1.2. Континуальные среды

Полупроводниковые среды занимают промежуточное положение по проводимости электрического тока между диэлектриками и металлами. При комнатной температуре их удельное сопротивление лежит в пределах от 10^{-6} до $10^9 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Такой огромный диапазон (15 порядков) значений определяется рядом специфических свойств полупроводников. Прежде всего, удельная проводимость зависит от количества примесей. Одна тысячная процента примеси может изменить проводимость полупроводника на 4 - 5 порядков. Полупроводники обладают отрицательным температурным коэффициентом сопротивления в большом диапазоне температур. К полупроводникам относится большой ряд простых веществ из II, III, IV, VI, VII групп таблицы Менделеева: германий, кремний, селен, теллур, бор, угле-

род, фосфор, сера, сурьма, мышьяк, серое олово, йод, а также соединения различных типов: $A^I B^V$, $A^I B^{VI}$, $A^I B^{VII}$, $A^{II} B^{IV}$, $A^{II} B^V$, $A^{II} B^{VI}$, $A^{II} B^{VII}$, $A^{III} B^V$, $A^{III} B^{VI}$, $A^{III} B^{VII}$, $A^{IV} B^{IV}$, $A^{IV} B^V$, $A^{IV} B^{VI}$, $A^V B^{VI}$, $A^{VI} B^{VI}$, $A^{VII} B^{VI}$, $A^I B^{VII} B_2^{VI}$, $A^I B^V B_2^{VI}$ и т. д.

Различают некоторые классы полупроводниковых континуальных сред. Элементарные полупроводники представляют собой кристаллическую решетку. Например, в германии и кремнии, являющимися основными материалами, атомы образуют кристаллическую решетку типа алмаза. Каждый атом взаимодействует с четырьмя ближайшими соседями, с каждым из которых связан ковалентной связью. Содержание посторонних примесей не должно превышать $10^{-7} \%$, а дозируемое введение донорных (P, As, Sb) или акцепторных (B, Al, Ga, In) примесей меняет их тип проводимости в достаточно широких пределах. Монокристаллы можно выращивать методами Чохральского или бестигельной зонной плавки, получать в процессе эпитаксиального выращивания тонких кристаллических слоев, а также в процессе лазерной рекристаллизации поликристаллов.

Соединения типа $A^{III} B^V$ (GaAs, InAs, GaSb, InSb, GaP, InP) представляют собой твердые растворы. Они характеризуются ковалентной связью с некоторой долей ионной составляющей. Возможно образование тройных и более сложных растворов ($Ga_x Al_{1-x} As$, $Ga_x Al_{1-x} P$ и т. п.). Электрические свойства таких полупроводников могут меняться путем легирования донорными (Sn, Te, Se, S) или акцепторными (Zn, Cd, Mg) примесями. Монокристаллы этого класса получают методом Чохральского, зонной кристаллизацией, кристаллизацией из газовой или жидкой фазы, молекулярно-лучевой эпитаксией.

Соединения типа $A^{II} B^{IV}$ (ZnS, CdS, HgSe, ZnSe, ZnTe) представляют собой твердые растворы. Кристаллическая структура имеет ковалентно-ионную связь. Физические свойства определяются содержанием точечных дефектов, обусловленных отклонениями от стехиометрии состава. Аналогичными свой-

ствами обладают соединения типа $A^{IV}B^{VI}$ (PbS, SnS, SnSe, PbTe, SnTe).

Соединения элементов VI группы с элементами I - V групп образуют кристаллы, в которых преобладает ионная связь. Если элементы этой группы связаны с переходными или редкоземельными элементами, то такие соединения обладают магнитными свойствами. Некоторые из таких полупроводников обладают ферромагнитными свойствами (EuO, EuS, $CdCr_2Se_4$), другие - антиферромагнитными (EuTe, EuSe, NiO).

Тройные соединения $A^{II}B^{IV}C_2^V$ ($CdSnAs_2$, $CdGeAs_2$, $ZnSnAs_2$) обладают ферромагнитными и (или) сегнетоэлектрическими свойствами.

Аморфные полупроводники представляют собой класс сильно легированных веществ - компенсированный полупроводник со смешанной ионно-ковалентной связью. К этому классу относятся халькогениды свинца: галенит (PbS), клаусталит (PbSe), алтаит (PbTe), халькогенидные стекла ($As_{31}Ge_{30}Se_{21}Te_{18}$), оксидные стекла ($V_2O_5 - P_2O_5$).

Органические полупроводники характеризуются наличием в молекулах сопряженных связей. К этому классу веществ относятся ароматические соединения (например, нафталин и др.), природные пигменты (хлорофил, каротин и др.), ион-радикальные соли, молекулярные комплексы с переносом заряда. Это могут быть монокристаллы, поликристаллы или аморфные порошки.

Определенный интерес вызывают полупроводники, в которых проявляются механизмы оптической нелинейности.

Качественно новый класс полупроводниковых материалов и континуальных сред представляют собой *сверхрешетки* - синтезированные структуры, в которой на носители заряда, помимо кристаллической решетки, действует дополнительный потенциал с периодом, существенно превышающим постоянную решетки. Параметры этого потенциала можно менять и тем самым управлять энергетическим спектром носителей. Тип

сверхрешетки определяется технологией изготовления. **Композиционные** сверхрешетки формируются путем чередования тонких слоев различных материалов с близкими значениями постоянных решетки. **Легированные** сверхрешетки формируются из слоев с дырочной и электронной проводимостями в объеме одной полупроводниковой среды. **Спиновые** сверхрешетки создаются технологией селективного легирования полупроводника магнитными и немагнитными примесями. Наиболее совершенные сверхрешетки формируют при использовании молекулярно-лучевой эпитаксии.

Свойства полупроводниковых континуальных сред могут быть достаточно полно описаны с помощью квантовой теории энергетического спектра электронов, зонной теории.

4.1.3. Генераторы динамических неоднородностей

Процесс генерирования динамических неоднородностей в полупроводниковой континуальной среде определяется конкретными физическими явлениями и эффектами, характерными для данного их типа, и данной среды. Рассмотрим некоторые генераторы динамических неоднородностей.

Генераторы зарядовых пакетов в полупроводниковых структурах могут быть нескольких типов. В приборах и устройствах функциональной электроники используется нестационарное состояние полупроводниковых структур. Например, в МДП-конденсаторе при подаче напряжения на металлическую обкладку возникает электрическое поле. Это электрическое поле вытесняет основные носители вглубь полупроводника.

В результате процесса термогенерации в полупроводнике образуются электронно-дырочные пары и под воздействием электрического поля генерируются те заряженные частицы, которые имеют знак противоположный напряжению на металлической обкладке. Они же заполняют обедненную область. Заряженные частицы одноименного знака с основными носите-

лями полупроводника оттесняются этим полем вглубь среды. Однако процессы термогенерации инерционны (0,1 - 0,5 с) и не используются в качестве основного механизма создания динамических неоднородностей, типа зарядовых пакетов.

Генерацию зарядовых пакетов целесообразно осуществлять *методом инжекции - экстракции зарядов через прямосмещенный p - n -переход*. Одно из конструктивных решений генератора зарядовых пакетов приведено на рис. 4.2. Здесь рассмотрен случай, когда используется подложка из кремния p -типа с зарядовыми пакетами, состоящими из электронов. Практически аналогичная ситуация реализуется для подложки из n -типа.

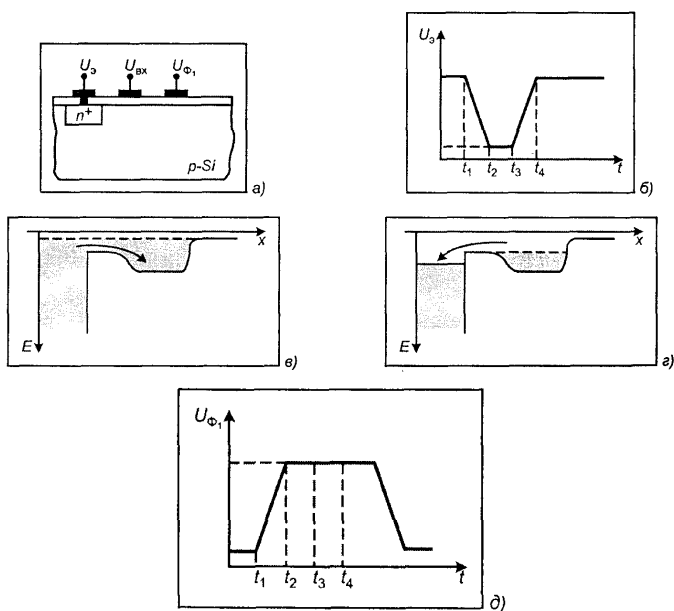


Рис. 4.2. Генератор зарядовых пакетов (а), форма импульса напряжения на эмиттере U_3 (б), в процессе инжекции (в) и экстракции (г), форма импульса на первом электроде (д)

Сильно легированная область n -типа является источником электронов и находится под потенциалом $U_{\text{э}}$. На входной электрод (затвор) подается потенциал. Потенциал на первом электроде $U_{\text{ф1}}$ больше потенциала на входном электроде $U_{\text{вх}}$. Происходит экстракция или ток носителей заряда из высоколегированной области перетекает под электроды в другой области полупроводника. Ток течет только во время действия импульса на эмитирующем электроде. Это время выбирается таким, чтобы успела заполниться потенциальная яма под электродом $U_{\text{ф1}}$.

Такой процесс называют еще *режимом залива заряда через барьер*. Он характерен тем, что в исходном состоянии элемента весь заряд находится в эмитирующей области. Между этой областью и первой ячейкой существует потенциальный барьер, формируемый импульсом напряжения. Заполнение ячейки осуществляется как бы подъемом дна и заливкой через канал, образованный под входным затвором (рис. 4.2, в).

Величина накопленного заряда определяется как:

$$Q_{\text{зн}} = SC_{\text{д}}(U_{\text{ф}} - U_0), \quad (4.5)$$

где $C_{\text{д}}$ - удельная емкость МОП-конденсатора, S - площадь затвора, $U_{\text{ф}}$ - фазовый потенциал на затворе, U_0 - пороговое напряжение, необходимое, для создания канала в полупроводнике.

Когда зарядовый пакет полностью сформирован, дно опускается и часть заряда, превышающая емкость зарядового пакета, снова стекает в эмиттерную область. Это наступает, когда потенциалы входной и первой ячейки сравниваются (рис. 4.2, г).

Генерацию зарядовых пакетов можно осуществить и оптическим путем. Различают четыре основных способа генерации оптической информации:

- непосредственный оптический ввод со стороны подложки;

- оптический ввод со стороны оптических электродов;
- ввод с использованием фоточувствительного слоя;
- ввод путем фотоэлектронного преобразования оптической информации.

С этой целью используются внешний и внутренний фотоэффекты. Основным физическим механизмом генерации зарядовых пакетов является внутренний фотоэффект, возникающий при поглощении фотонов и генерации носителей заряда. Различают собственный внутренний фотоэффект, заключающийся в образовании одновременно электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне. Этот эффект реализуется в случае, когда энергия фотона больше ширины запрещенной зоны ($h\nu > E_g$).

Примесный внутренний фотоэффект возникает в случае, когда энергия фотона меньше ширины запрещенной зоны, но больше энергии возбуждения примеси. В этом случае при поглощении фотона возбуждаются доноры и акцепторы в примесях, и образуется один носитель: электрон в зоне проводимости или дырка в валентной зоне.

На рис. 4.3 приведены конструкции фотогенераторов зарядовых пакетов. Фотогенерированные в полупроводниковой среде носители собираются в элементе накопления или в фотодиоде и являются по существу генераторами динамических неоднородностей в устройствах подобного типа (рис. 4.3, *а*, *б*). Модель накопителя можно рассматривать как модель фотодиода с глубиной p - n -перехода, равной нулю. Генерируемые в обедненной области носители в ней не рекомбинируют и попадают в потенциальную яму. Если носители генерируются в квазинейтральной области, то они диффундируют к границе обедненной области. Под действием электрического поля они падают в потенциальную яму, частично рекомбинируя. Общий фототок определяется суммой тока в обедненной области $I_{об}$ и диффузионного тока $I_{диф}$ и может быть записан в виде:

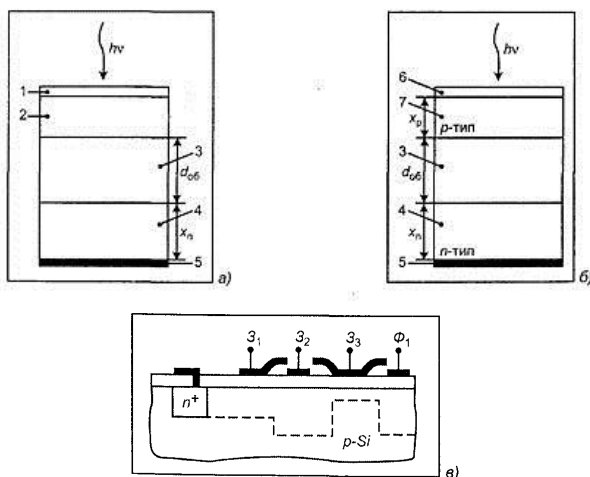


Рис. 4.3. Схема генерации оптических зарядовых пакетов на основе МОП-накопителя (а), фотодиода (б) и фотогенератора ПЗС-структуры (в): 1 - затвор; 2 - диоксид кремния; 3 - обедненная область; 4 - квазинейтральная n -область; 5 - контакт; 6 - инверсный слой; 7 - квазинейтральная p -область фотодиода

$$I_{\Phi} = I_{об} + I_{диф}. \quad (4.6)$$

Зарядовый пакет формируется интеграцией тока за промежутки времени освещения τ и определяется пропусканием электродной системы T , падающим потоком излучения Φ_0 , частотой ν , коэффициентом поглощения α , толщиной обедненной области $d_{об}$, диффузионной длиной неосновных носителей L_H . В итоге будет сформирован зарядовый пакет величиной:

$$Q_{зп} = q\Phi_0 \cdot T \cdot \tau \cdot Sh\nu \left[1 - \exp \frac{-\alpha d_{об}}{1 - \frac{\alpha L_H}{1 + L_H}} \right]. \quad (4.7)$$

Для значений $d_{об} = 10$ мкм, $L_n = 100$ мкм и для видимого светового диапазона выражение в квадратной скобке будет близко к единице.

Тогда имеем

$$Q_{зп} = q\Phi_0 \cdot T \cdot \tau \cdot Sh\nu. \quad (4.8)$$

Квантовый выход η_f определяется отношением фототока к поглощенному потоку излучения:

$$\eta_f = \eta_{об} + \eta_{диф} \quad (4.9)$$

Чувствительность определяется произведением коэффициента пропускания T на общий квантовый выход η_f .

Фотодиодная ячейка также может служить генератором зарядовых пакетов и ее использование предпочтительнее в коротковолновой части спектра (0,4 - 0,45 нм).

Генератор типа ПЗС-структуры (рис. 4.3, в) представляет собой фотодиод и три МОП-затвора.

Первый разделительный затвор Z_1 служит для формирования потенциального барьера и зарядового пакета в процессе разделения полем фотогенерированных электроно-дырочных пар.

Второй затвор Z_2 является накопительным и формирует величину зарядового пакета. По окончании периода накопления заряда и окончательного формирования зарядового пакета на разрешающий затвор подается высокий потенциал и зарядовый пакет перетекает в фазовый элемент шины Φ .

Напряжение на разделительном затворе Z_1 понижается, и между накопительными элементами и элементами фазового напряжения создается потенциальный барьер. Начинается следующий период накопления, в процессе которого весь процесс

генерирования зарядового пакета повторяется и он перемещается в регистр ПЗС.

Такие генераторы характеризуются высокой интегральной чувствительностью, линейным преобразованием падающего излучения в зарядовый пакет, удовлетворительной скоростью параллельной передачи зарядовых пакетов из секции накопления в ПЗС-регистры, улучшением частотно-контрастной характеристики.

Конструкция генераторов неоднородностей в виде электрического домена (домена Ганна) весьма проста (рис. 4.4, *а*). На отрицательном электроде кристалла двухдолинного полупроводника, например арсенида галлия, возникает неоднородное распределение концентрации электронов в виде дипольного слоя. Такой полупроводник имеет *N*-образную характеристику. Слой образуется между слоями электронов и дырок. Между этими слоями создается дополнительное поле ΔE , которое добавляется к внешнему электрическому полю. Поле внутри домена становится больше, чем вне его (рис. 4.4, *б*). Если дифференциальное сопротивление меньше нуля, то ток уменьшается с ростом поля внутри диполя. Растет падение напряжения на дипольном слое и домен стабилизируется. Распределение зарядов представлено на рис. 4.4, *б*. Так как напряженность поля вне домена меньше, чем внутри, то новые домены не образуются. Домен образован электронами проводимости и движется в направлении их дрейфа со скоростью, близкой к скорости дрейфа $v_{др}$.

Новый домен может образоваться только после аннигиляции домена у анода, Размер домена составляет 10 - 20 мкм. Домены могут генерироваться в полупроводниках как с электронным, так и с дырочным типом проводимости. Форма колебаний тока представлена на рис. 4.4, *в*, а частота следования колебаний f пропорциональна отношению v/l , где v - скорость домена, l - длина образца.

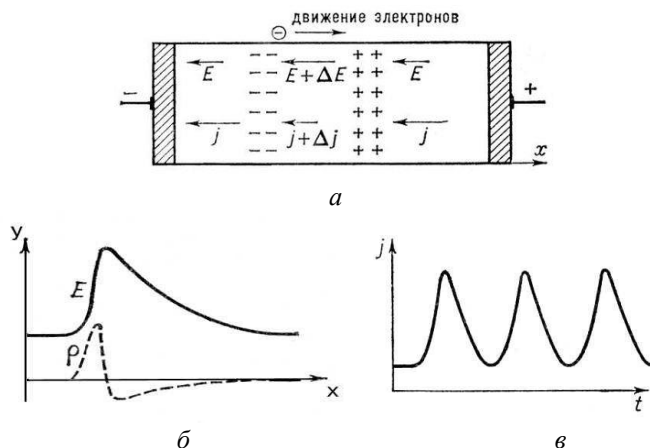


Рис. 4.4. Генератор доменов Ганна (а), распределение электрического поля E и объемного заряда ρ (б) в домене, форма колебаний тока (в)

Генерирование динамических неоднородностей в виде токовой неустойчивости возможно и в полупроводниках с S -образной вольтамперной характеристикой. В полупроводниковой структуре ток по сечению распределен неравномерно. Происходит образование областей с большей плотностью тока, чем в остальном сечении. Это так называемые токовые шнуры. Это явление характерно для всех приборов с ВАХ S -типа независимо от физического механизма их работы. В некоторых приборах это явление относится к паразитным, поскольку не используется полная, площадь прибора. Увеличение тока через полупроводниковую структуру в области шнурования происходит при постоянном напряжении. Шнур может перемещаться от места своего образования под действием физических полей различной природы. Подвижность шнура зависит от напряженности полей и может быть использована для переноса информационного сигнала.

В полупроводниковой структуре, обладающей S -образной ВАХ, распределенный p^+ - n -переход находится одновременно в

двух пространственно разделенных состояниях. Эти состояния определяются разными потенциалами смещения: прямое смещение под нелинейным контактом и обратное смещение на остальной части структуры. Получился бисмещенный переход с инжекционной неустойчивостью или, сокращенно, БИСПИН. Токовая неустойчивость возникает после достижения определенного порога генерации. Порог можно понизить освещением полупроводника или путем пропускания небольшого тока через распределенный p - n -переход.

Волны пространственного заряда генерируются в полупроводнике с объемной отрицательной дифференциальной проводимостью с помощью двух электродов. Электроды располагаются в области распространения волн и обеспечивают однородное электрическое поле, что является условием возникновения отрицательной дифференциальной проводимости (рис. 4.5, а).

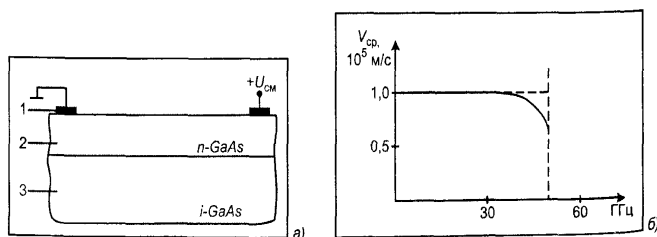


Рис. 4.5. Генератор волн пространственного заряда (а) и частотная зависимость фазовой скорости волн (б):
 1 - металлический контакт; 2 - легированный слой ($n \cong 10^{16} \text{ см}^{-3}$); 3 - собственный полупроводник;
 $U_{\text{см}}$ - напряжение смещения

Значение напряженности электрического поля E лежит в пределах $(3 - 12) \cdot 10^3 \text{ В/см}$. Обеспечение таких значений напряженности поля на больших длинах волн является самостоя-

тельной задачей. Частотная зависимость фазовой скорости приведена на рис. 4.5, б. Длина когерентности волн пространственного заряда на несколько порядков может превышать длину волны. Величиной и вектором фазовой скорости волн пространственного заряда можно управлять путем изменения вектора скорости дрейфа электронов, другими словами, направлением электрического поля. Таким образом, в основе всех рассмотренных конструкций генераторов динамических неоднородностей лежит идея использования электрических полей. Возбуждаемые динамические неоднородности можно отнести к электрической природе.

Если же поместить полупроводник с разными концентрациями носителей тока в постоянное магнитное поле, то возникают спиральные волны - *геликоны*. Магнитное поле должно быть достаточно сильным, чтобы радиус орбиты носителей R был много меньше длины свободного пробега носителей $R \ll l$. Геликоны представляют собой динамические неоднородности уже электромагнитной природы.

4.1.4. Устройства управления динамическими неоднородностями

Существуют различные способы управления распространением динамических неоднородностей в полупроводниках, но все они основываются на эффекте воздействия поля на динамические неоднородности. Рассмотрим некоторые примеры.

Подавая на каждый последующий электрод цепочки МОП-конденсаторов (рис. 4.6, а) напряжение выше предыдущего, можно осуществить процесс перетекания заряда во все более глубокую потенциальную яму. Однако такой процесс не может быть долгим потому, что легко может быть получено пробивное напряжение. Для перемещения зарядовых пакетов удобно использовать импульсы напряжения трапецеобразной формы (рис. 4.6, б).

В момент подачи импульса напряжения на электрод 1, на электроде 2 напряжение мало. С уменьшением амплитуды тактового импульса U_1 увеличивается амплитуда импульса U_2 . Соответственно потенциальная яма под электродом 1 уменьшается, а под электродом 2 увеличивается (рис. 4.6 в, г) Зарядовый пакет из-под электрода 1 перемещается под электрод 2. Возможно обратное перемещение заряда в случае обратной последовательности подачи напряжения, перенос зарядов осуществляется в три стадии.

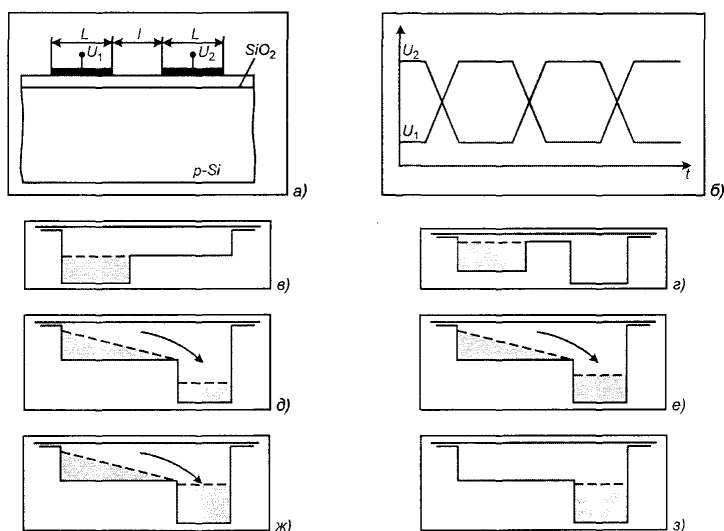


Рис. 4.6. Зарядовая связь между двумя МОП-конденсаторами:
 а - сечение МОП-конденсаторов; б - импульсы, подаваемые на электроды; в - зарядовый пакет в левой потенциальной яме;
 г - сформированная пустая потенциальная яма;
 д - перенос зарядового пакета самоиндуцированным дрейфом;
 е - перенос зарядов краевым полем; ж - перенос зарядов диффузией; з - зарядовый пакет в правой потенциальной яме

В начальный момент, когда яма полностью заполнена и зарядовый пакет имеет максимальную величину, перенос происходит из-за электростатического расталкивания инверсионных электронов. Как только часть носителей попадает в потенциальную яму под второй электрод, возникает градиент плотности заряда и соответственно градиент электрического поля. Именно это поле вызывает ток носителей или самоиндуцированный дрейф (рис. 4.6, *д*). Величина заряда в первой яме уменьшается по гиперболическому закону. Время перетекания заряда составляет порядка 10^{-9} с.

С уменьшением зарядового пакета силы расталкивания ослабевают и самоиндуцированный дрейф замедляется. Начинается дрейф под действием краевого поля, обусловленного разностью потенциалов под соседними электродами. Величина краевого поля зависит от амплитуды тактовых импульсов. Дно потенциальной ямы под первым электродом наклоняется в сторону перетекания заряда. Угол наклона пропорционален напряженности краевого поля (рис. 4.6, *е*). По гидравлической аналогии это соответствует наклону дна сосуда. Основная часть зарядового пакета 90 % переносится именно с помощью этого механизма (рис. 4.6, *ж*).

Это медленная стадия процесса переноса. Эффективность переноса определяется величиной

$$\eta = 1 - \frac{Q(T)}{Q_{\Sigma}}, \quad (4.10)$$

где $Q(T)$ — величина зарядового пакета, успевшего перетечь за период такта, Q_{Σ} — величина полного зарядового пакета. При малом значении η происходит искажение информационного сигнала, что недопустимо в устройствах. Оценки показывают, что допустимая неэффективность переноса $\varepsilon = \eta - 1 \cong 10^{-5}$.

В момент минимального значения импульса U_1 яма под электродом 1 схлопнется, в то время как на электроде 2 будет максимальное значение амплитуды импульса, а под электродом будет локализован практически весь зарядовый пакет (рис. 4.6, з). Цепочка таких МОП-конденсаторов с зарядовой связью образует сдвиговый регистр, предназначенный для транспортировки и хранения зарядовых пакетов.

Управлять процессом передачи зарядов можно, управляя величиной на затворах зарядово-связанных МОП-конденсаторов. Различают несколько типов ПЗС-регистров, различающихся количеством фаз.

На рис. 4.7 представлена схема накопления и переноса зарядовых пакетов в трехфазном ПЗС. Последовательность импульсов на фазах Φ_1 , Φ_2 , имеет периодический характер и трапециевидную форму. Их временная диаграмма представлена на рис. 4.7, в, г, б. Импульсы следуют с некоторым временным перекрытием так, чтобы фронт последующего по времени импульса нарастал бы раньше, чем начался спад импульса предыдущей фазы. Заметим также, что импульсы имеют некоторое постоянное смещение $U_{см}$ (1 - 3 В), обеспечивающее постоянное обеднение поверхности основными носителями. Отсутствие такого напряжения смещения приводило бы к потерям величины зарядового пакета вследствие рекомбинации электронов с дырками. Напряжение на фазах ПЗС-структуры колеблется в пределах 10 - 20 В.

Формируя симметричные либо асимметричные топологии структуры, можно создать также одно-, двух-, четырехтактные сдвиговые регистры. Рассмотренный трехтактный ПЗС-регистр относится к первому типу, в котором направленность переноса зарядового пакета обеспечивается индуцированными потенциальными барьерами. Эти барьеры формируются электрическими полями со стороны, противоположной переносу зарядового пакета.

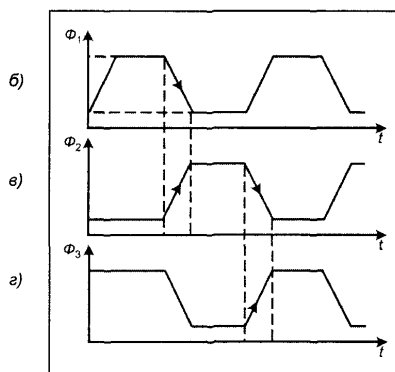
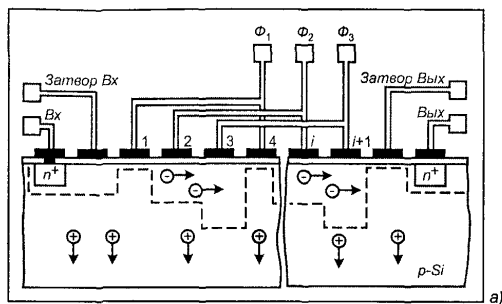


Рис. 4.7. Накопление и перенос зарядовых пакетов в трехфазном ПЗС (а) и диаграммы управляющих импульсов на фазах Φ_1 (б), Φ_2 (в), Φ_3 (з)

Направленность переноса зарядовых пакетов можно обеспечить с помощью технологически встроенных зарядовых барьеров. Такие конструкции относятся ко второму типу сдвиговых регистров.

Асимметричное распределение потенциала, обеспечивающее направление и управляемый перенос зарядовых пакетов, можно получить неоднородным распределением примесей под электродами, а также изменением толщины слоя диэлектрика.

В процессе управляемого переноса информационного сигнала существенную роль играют каналы переноса, которые можно классифицировать по признаку локализации.

Различают:

- поверхностный канал, расположенный у границы «ди-электрик – подложка», который обеспечивает высокую зарядовую емкость, простоту технологии. К недостаткам поверхностного канала следует отнести невысокое быстродействие, большие шумы, низкую эффективность переноса;

- объемный канал, расположенный на глубине 0,2 мкм, называют мелким, на глубине до 0,5 мкм - глубоким. Достоинством этого канала является более высокое, чем у поверхностных каналов, быстродействие, высокая эффективность переноса из-за устранения влияния поверхностных ловушек и поверхностного рассеяния носителей. К недостаткам относится небольшая зарядовая емкость и усложнение технологии производства;

- перистальтический канал, состоящий из неглубокого канала с высокой степенью легирования и находящегося под ним глубокого канала с небольшой степенью легирования. Такая комбинация позволяет достичь оптимального сочетания быстродействия и зарядовой емкости. Недостатком является существенное усложнение технологии производства;

- многоканальные структуры содержат много каналов переноса, позволяющие переносить носители зарядов противоположного знака. Такая сложная конструкция сложна в изготовлении, но расширяет функциональные возможности ПЗС-регистра;

- канал с резистивным электродам является типом канала, в котором перенос заряда осуществляется под действием в канале электрического поля переменной напряженности. Перенос осуществляется механизмом дрейфа носителей. Это является ограничивающим фактором на число электродов в регистре при достаточно простой его конструкции.

Направленный перенос зарядовых пакетов обеспечивается также *стоп-канальными областями*, Эти области формируются легированием подложки примесями того же типа проводимости, что и зарядовые пакеты, но с большей концентрацией (рис. 4.8).

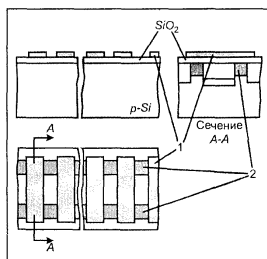


Рис. 4.8. Формирование стоп-канальных областей в ПЗС-регистре: 1 - металлический электрод; 2 – стоп-канальные области n^+ -типа проводимости

Стоп-каналы легируются до такой степени, чтобы состояние обеднения в них не достигалось при максимальном напряжении смещения. С помощью стоп-канальных областей можно соединять и разделять каналы переноса, проводить другие операции управления.

Рассмотрим другой пример - управление динамическими неоднородностями волновой природы. Величина и направление фазовой скорости волн пространственного заряда задается с помощью электрического статического тянущего поля $U_{ст}$. Это поле формируется между и стоковым и стоковым омическими контактами в эпитаксиальном арсенид-галлиевом слое n -типа проводимости. Управлять формой выходного высокочастотного сигнала можно с помощью встречно-штыревых преобразователей (ВШП). Их конфигурация позволяет отслеживать объемный заряд в полупроводниковой пленке, индуцирующий выходной сигнал.

Весьма перспективными являются полупроводниковые структуры, работа которых основана на управлении путем интерференции электронных волн. Если сгенерировать динамические неоднородности в виде электронных волн с высокой фазовой когерентностью на протяжении длины их распространения, то электрическим полем можно модулировать электронную волну.

В области детектора наблюдается конструктивная или деструктивная интерференция двух электронных волн в зависимости от напряжения на устройстве управления (рис. 4.9). Трудность реализации таких приборов заключается в малой длине когерентности электронных волн в твердом теле.

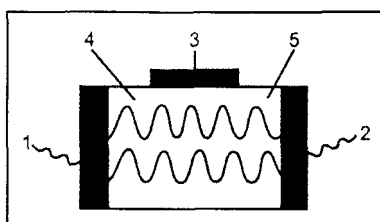


Рис. 4.9. Интерференция электронных волн в твердом теле:

- 1 - генератор; 2 - детектор электронных волн;
- 3 - электрическое устройство управления фазой электронной волны; 4 - когерентные электронные волны; 5 - электронные волны с противоположными фазами

4.1.5. Детекторы динамических неоднородностей

Детекторы динамических неоднородностей в полупроводниковых приборах функциональной электроники предназначены для считывания информации. При этом информационный сигнал может быть либо аналоговым, либо цифровым. В основе работы детекторов лежат различные процессы взаимодействия

динамических неоднородностей с веществом или полями. Это могут быть различные электрические явления наведения тока или образования заряда, появление потенциала или наведение электрического или магнитного импульсного поля, возбуждение атомов или молекул. Электрически нейтральные динамические неоднородности могут быть зарегистрированы по вторичным заряженным частицам или продуктам взаимодействия, возникающим в результате взаимодействия с веществом.

Все детекторы динамических неоднородностей, как правило, являются элементами двоичной логики и выделяют логические нуль и единицу. Детекторы многозначной логики используются в более сложных комбинациях физических процессов и явлений. Рассмотрим некоторые примеры детекторов динамических неоднородностей полупроводниковой природы. Простейшим является *плавающий обратносмещенный р-п-переход* (рис. 4.10).

С этой целью на выходе ПЗС-структуры создается *плавающая диффузионная область* (ПДО). Зарядку диффузионной области до плавающего потенциала производят путем подачи обратного смещения E на последнюю диффузионную область.

Соединение осуществляется за счет создания индуцированного канала в транзисторе сброса T . С этой целью на его затвор Z_t , подается импульс смещения, в течение которого плавающая диффузионная область заряжается от источника E (рис. 4.10, б).

Транзистор сброса запирается и ПДО остается заряженной и изолированной (рис. 4.10, в).

Приход зарядового пакета из-под затвора Z вызовет изменение потенциала ПДО на величину ΔU , способную открыть выходной транзистор $T_{\text{вых}}$ (рис. 4.10, г). Это приведет к возникновению в выходной цепи токового импульса. После процесса считывания ПДО очищается от уже продетектированного зарядового пакета путем подачи импульса на затвор и стока всего заряда.

Существуют и более сложные детекторы зарядовых пакетов, определяющих в системах многозначного информационного сигнала величину и знак заряда.

Детектирование динамических неоднородностей в виде волн пространственного заряда осуществляется с помощью металлического электрода, нанесенного на поверхность пленочных структур. Электрод располагается вблизи стока, на который подается напряжение смещения, вызывающее дрейф электронов от истока к стоку (от катода к аноду). Детектирующий электрод образует с полупроводниковой пленкой контакт типа барьера Шоттки. Такой емкостной зонд изолирован от пленки по постоянному току обедненной областью и способен детектировать, в том числе, высокочастотные сигналы.

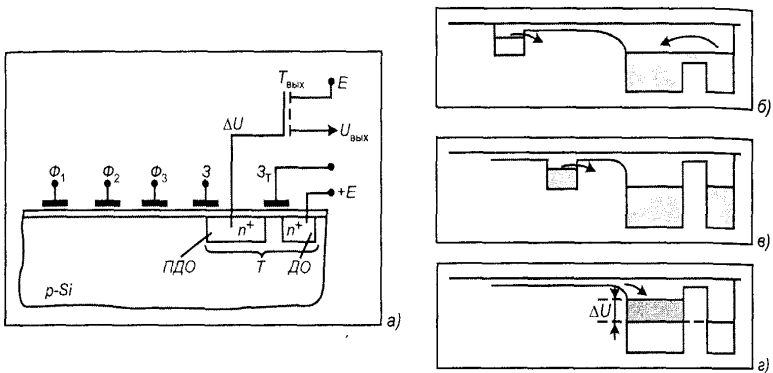


Рис. 4.10. Конструкция детектора зарядовых пакетов на основе ПДО (а), процесс перезарядки ПДО до плавающего потенциала (б), ждущий режим ПДО (в), детектирование зарядового пакета и возникновение импульса тока (г)

4.2. Приборы и устройства функциональной полупроводниковой электроники

4.2.1. Аналоговые процессоры на ПЗС-структурах

Аналоговые приборы предназначены для обработки информационных сигналов, заданных в виде непрерывных функций. Особый интерес представляют ПЗС-структуры. Приборы с зарядовой связью используются в различных системах для хранения и обработки цифровой и аналоговой информации.

ПЗС позволяют осуществлять обработку цифровой и аналоговой информации, а именно: аналоговое и цифровое суммирование, деление и усиление сигналов; возможность неразрушающего считывания с необходимыми весовыми коэффициентами; возможность многократного ввода и вывода зарядовых пакетов.

Различают цифровые, аналоговые и фоточувствительные ПЗС.

К аналоговым ПЗС следует отнести линии задержки (ЛЗ), фильтры, аналоговые процессоры.

Линии задержки выполняют функцию задержки сигналов. Для приборов ПЗС линия задержки или регистр сдвига являются базовым элементом (рис. 4.11, *а*). Различают последовательные (рис. 4.11, *б*), параллельные (рис. 4.11, *в*) и последовательно-параллельные линии задержки. В ЛЗ с последовательной организацией зарядовые пакеты последовательно сдвигаются через все N -элементов ПЗС. Время задержки определяется тактовой частотой f_T и числом элементов N :

$$\tau_z = N / f_T. \quad (4.11)$$

Максимальная ширина полосы пропускания аналогового сигнала равна половине значения тактовой частоты $\Delta f = f/2$. Та-

кая простая организация ЛЗ при $N \cong 10^2 - 10^3$ позволяет получить небольшую задержку сигнала.

Для получения большей задержки используется последовательно-параллельная организация ЛЗ (рис. 4.11, з).

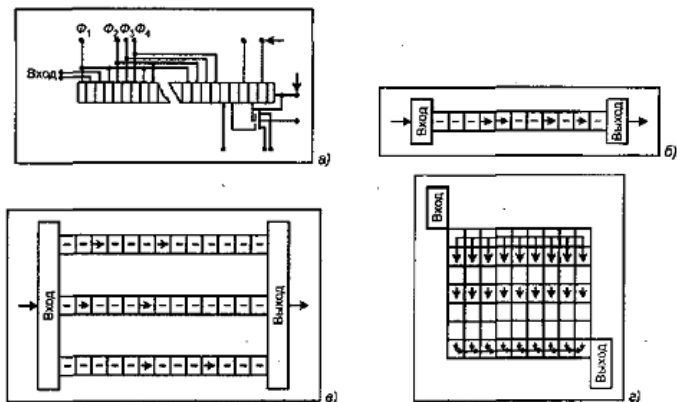


Рис. 4.11. Конструкция линий задержек на ПЗС

Информационный поток последовательно вводится с частотой f_T во входную последовательную секцию и после ее заполнения вся строка параллельно сдвигается в нижний регистр. В выходной секции зарядовые пакеты в последовательной форме передаются на выход, воспроизводя исходный сигнал.

Линия задержки на ПЗС-структурах позволяет регулировать задержку сигнала в пределах от звуковых частот до частот телевизионных и радиолокационных сигналов.

Фильтры на ПЗС являются дискретно-аналоговым прибором и служат для частотного разделения сигналов, определенного полосой пропускания. Входной сигнал в них дискретизируется во времени или представляется совокупностью значений (отсчетов, выборок). Выборки обрабатываются в фильтрах по определенным правилам.

Различают трансверсальные, рекурсивные фильтры, а также корреляторы, в которых сигнал обрабатывается по определенным правилам.

Трансверсальные фильтры на ПЗС реализуются на основе ЛЗ с отводами, имеющими различные весовые коэффициенты в соответствии с требуемой полосой пропускания (рис. 4.12, а). Взвешивание сигналов в фильтрах осуществляется с помощью разделения элементов на две части. Величина зарядового пакета делится пропорционально площади электродов. Суммирование взвешенных сигналов осуществляется с помощью тактовых шин, на которые подаются идентичные тактовые импульсы. Протекающие токи считываются отдельно, и разность сигналов усиливается дифференциальным усилителем (ДУ). Такая конструкция называется трансверсальным фильтром и имеет точность взвешивания 1 – 2 %. Трансверсальный фильтр может производить операцию свертки

Рекурсивные фильтры на ПЗС содержат несколько ЛЗ и внешние обрамляющие схемы. Такой фильтр получается путем соединения выхода трансверсального фильтра через цепь обратной связи с входом. Рекурсивные фильтры на ПЗС содержат несколько ЛЗ и внешние обрамляющие схемы.

Корреляторы предназначены для перемножения двух аналоговых сигналов, например, входного сигнала $U(t)$ и опорного $U(t + r)$, т.е. $U(t) \times U(t + r)$. Коррелятор конструктивно состоит из двух линий задержки на ПЗС с отводами, подключенными к умножителям и сумматору (рис. 4.12, б).

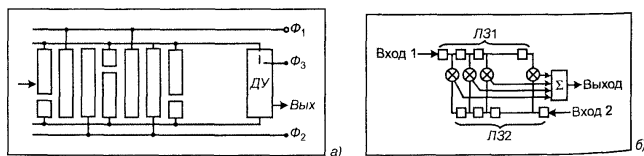


Рис. 4.12. Использование линий задержки в качестве фильтра (а) и коррелятора (б)

Один входной сигнал вводится в ЛЗ₁ и там хранится, другой - в ЛЗ₂. Сигналы с соответствующих входов перемножаются, суммируются и на выходе формируется свертка двух сигналов.

Тенденция развития фильтров на ПЗС будет идти по пути расширения универсальности, улучшения характеристик, а также максимальной интеграции электронного обрамления. На аналоговых устройствах можно построить сложные многофункциональные системы обработки аналоговых сигналов - **процессоры**. Аналоговые процессоры являются высокопроизводительными, имеют малые габариты, массу и низкую потребляемую мощность, высокую надежность, характеризуются высокой степенью функциональной интеграции. К аналоговым процессорам относятся, например, программируемые трансверсальные фильтры. У таких фильтров весовые коэффициенты программируются с помощью микропроцессора.

Фоточувствительные приборы с зарядовой связью (ФПЗС) являются весьма перспективными процессорами.

ФПЗС является изделием функциональной электроники, предназначенным для преобразования оптического изображения в электрический сигнал, действие которого основано на формировании и переносе зарядовых пакетов под действием света по поверхности или внутри полупроводника.

Различают линейные и матричные ФПЗС.

В **линейных ФПЗС** фоточувствительные элементы расположены в один ряд. За один период интегрирования линейный ФПЗС воспринимает изображение и преобразует в электрический (цифровой) сигнал одну строку оптического изображения.

В режиме накопления информации в потенциальных ямах ФПЗС накапливаются фотогенерированные зарядовые пакеты, а затем эти фоточувствительные элементы используются для транспортировки зарядовых пакетов к выходу. Эта конструкция линейных ФПЗС проста, но в ней происходят искажения сигналов за счет засветки в процессе сканирования (рис. 4.13, а).

Целесообразно разделить функции накопления и сканирования. С этой целью вводят дополнительный регистр сдвига (рис. 4.13, б) и разрешающий затвор. Фотогенирированные зарядовые пакеты формируются в фоточувствительных элементах секции накопления. Затем на разрешающий затвор поступает отпирающее напряжение, и весь массив информации параллельно переносится в соответствующие элементы регистра сдвига, защищенного от света. На следующем периоде накопления формируется новая конфигурация зарядовых пакетов, а предыдущие пакеты передаются на выход. В таком приборе устраняется влияние засветки.

Линейные ФПЗС используются в системах, где движется объект либо сам прибор. В настоящее время разработаны линейные ФПЗС, имеющие 2048 элементов разложения с шагом 12 мкм, интегральную чувствительность около $5 \cdot 10^2$ Вм²/Дж, динамический диапазон 60 - 70 дБ на частоте вывода информации 20 МГц.

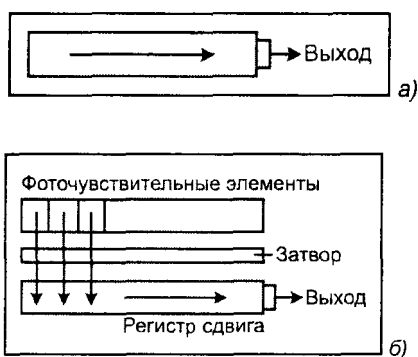


Рис. 4.13. Конструкции линейных ФПЗС: а – без разделения областей накопления и передачи; б - с дополнительным регистром сдвига

Матричные ФПЗС представляют собой фоточувствительные приборы с переносом заряда, в которых фоточувствительные элементы организованы в матрицу по строкам и столбцам.

За один период интегрирования матричный ФПЗС преобразует в электрический сигнал один кадр оптического изображения. В этом приборе зарядовые пакеты передаются на выход путем перемещения потенциальных ям, вызываемого периодическим изменением амплитуды управляющих импульсов.

В конструкции ФПЗС с кадровой организацией различают секцию накопления, секцию хранения, входные и выходные регистры сдвига (рис. 4.14). Секции накопления и хранения образуются трехфазными поликремниевыми электродами, имеющими, например, 288 строк и 360 столбцов каждая. В малокадровом режиме изображение можно проектировать на обе секции. Все регистры имеют идентичные входные устройства, работающие по методу уравнивания потенциалов инжекции - экстракции.

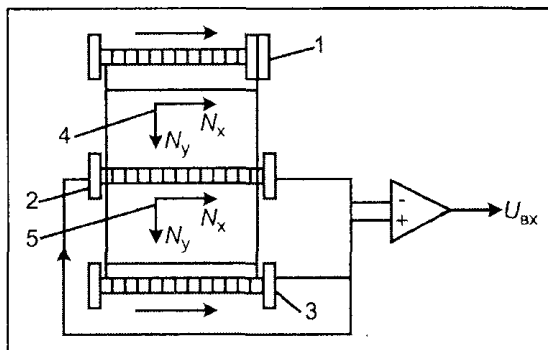


Рис. 4.14. Схема матричной ФПЗС с межкадровым вычитанием: 1, 2, 3 - регистры; 4 - секция накопления; 5 - секция хранения

Обычно обработка видеосигналов ведется внешними устройствами на дискретных элементах. В приборах с зарядовой связью заложены возможности обработки видеосигнала непосредственно в кристалле. В этом случае можно говорить о встроенном процессоре, который может производить межкадровую обработку видеосигнала, подчеркивание контуров, устранение точечных дефектов, распознавание образов. Другими словами, процессор представляет собой устройство функциональной электроники, осуществляющее процесс одномоментной обработки большого информационного массива в реальном масштабе времени.

С целью выделения информации о движущихся объектах на сложном стационарном фоне стараются подавить изображение его стационарных частей в обоих полукадрах.

Режим работы ФПЗС состоит из следующих циклов. Информация в виде i -го кадра накапливается в секции накопления, а затем переносится в секцию хранения; информация $(i + 1)$ кадра накапливается в секции накопления и происходит синхронная передача зарядов i -го и $(i + 1)$ -го кадров на выход через регистры 2 и 3.

Таким образом, матричная структура запоминает оба кадра видеоинформации и одновременно выводит их на дифференциальный усилитель, в котором происходит поэлементное, межкадровое вычитание. Операция межкадрового вычитания может быть представлена в виде:

$$\Delta U'(t) = U'(t + nT_K) - U'(t), \quad (4.12)$$

где $U'(t)$ - видеосигнал i -го элемента текущего кадра; $U'(t + nT_K)$ - видеосигнал i -го элемента, задержанный на время, кратное времени кадра n - целое число; $\Delta U'(t)$ - видеосигнал межкадровой разности i -го элемента. Таким образом, реализован режим обработки разностной информации в большом информационном массиве.

Существует также *фоточувствительный прибор с зарядовой инжекцией* (ФПЗИ), в котором перемещение зарядового пакета происходит внутри фоточувствительного элемента с последующей инжекцией в подложку или область стока заряда. Такие структуры имеют следующие достоинства: практическое отсутствие потерь передачи; возможность использования в качестве фоточувствительных элементов фотодиодов, имеющих большую по сравнению с МДП-структурами чувствительность; возможность организации произвольной выборки любого элемента или группы элементов.

Изготовление ФПЗС можно осуществлять по двум технологиям.

В приборах с поверхностным каналом перенос сигнальных зарядовых пакетов осуществляется на границе раздела «окисел – полупроводник». В этом типе ФПЗС легко управлять переносом, однако, взаимодействие зарядовых пакетов с поверхностным состоянием приводит к захвату и эмиссии носителей. Все это приводит к снижению эффективности переноса носителей при низких уровнях освещенности.

В технологии с объемным каналом переноса зарядовых пакетов предусмотрено заглубление канала путем его ионного легирования примесью с проводимостью, противоположной подложке. Этот технологический прием существенно увеличивает эффективность переноса, но несколько снижает управляемость.

В последнее время весьма перспективны ФПЗС для цветного телевидения, конструктивно оформленные в виде строчных или строчно-кадровых матриц с числом элементов 500 x 500 и совмещенных с цветокодирующим фильтром.

На основе ФПЗС разрабатывается серия многоэлементных приемников изображения средневолнового и длинноволнового ИК диапазона длин волн. В их основе гибридные структуры с интегральными элементами считывания и предпроцессорной аналоговой обработкой видеосигнала на кристалле.

Тепловизионные системы на основе ИК ПЗС по пороговой температурно-пространственной чувствительности и быстродействию не уступают лучшим образцам современных тепловизоров.

4.2.2. Цифровые процессоры на ПЗС-структурах

Цифровые ПЗС предназначены для обработки сигналов в виде дискретных функций, и их можно разделить на структуры для арифметико-логической обработки информации и структуры для хранения информации - запоминающие устройства.

В цифровые ПЗС можно включить регистры сдвига, логические и арифметические устройства, запоминающие устройства. В них информация представляется двумя уровнями зарядов, локализованных в потенциальной яме под затвором. Состояние логической единицы определяется максимальным зарядовым пакетом в яме, состояние логического нуля - отсутствием заряда или величиной фонового заряда. Следует заметить, что цифровые устройства ПЗС являются устройствами динамического типа, т. к. необходима регенерация информации.

К основным аналоговым операциям относятся сложение, вычитание, умножение, умножение на весовой коэффициент, дифференцирование, интегрирование. Операцию аналогового сложения в зарядовой форме можно произвести различными способами, зависящими от конструкции ПЗС. В схемах параллельного сложения зарядовые пакеты величиной Q_1 , Q_2 и Q_3 , передаются по n -параллельным каналам ПЗС (рис. 4.15, а). Суммирующий элемент должен иметь зарядовую связь с элементами цепочек. Суммирование осуществляется в процессе слияния всех зарядов q , из параллельных цепочек в потенциальную яму суммирующего элемента, т. е.

$$q_1 + q_2 + \dots + q_n = Q_{\Sigma} < C_{\Sigma}(U_{\phi} - U_{cm}), \quad (4.13)$$

где Q_{Σ} - суммарный заряд, который должен уменьшаться в потенциальной яме суммирующего элемента емкостью C_{Σ} .

В схеме последовательного сложения между суммирующими последними тактовыми электродами расположен экранирующий электрод, создающий потенциальный барьер и препятствующий обратной передаче зарядов из суммирующего элемента (рис. 4.15, б). На суммирующий затвор подается импульс Φ_{Σ} длительность которого больше периода следования тактовых импульсов. На срезе распределения фазы Φ_3 , очередной зарядовый пакет перетекает через экранирующий элемент в потенциальную яму суммирующего элемента и складывается с ранее переданными зарядами. Зарядовая емкость суммирующего элемента определяется условием:

$$C_{\Sigma}(U_{\Phi} - E_3) \geq \sum_{i=1}^n q_i, \quad (4.14)$$

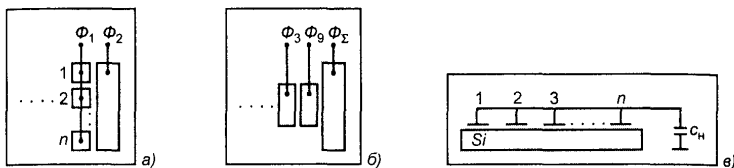


Рис. 4.15. Схемы суммирования зарядовых пакетов:
 а - параллельный; б - последовательный;
 в - на плавающих затворах

Аналогичным способом зарядовые пакеты можно суммировать в плавающей диффузионной области. В каждый элемент поступает определенный зарядовый пакет. На общей шине находится емкостная нагрузка. Используя принцип суперпозиции, можно вычислить изменение потенциала при суммировании зарядового пакета на общей шине нагрузочной емкости.

Полное изменение потенциала при поступлении зарядовых пакетов во все элементы определяется выражением:

$$\Delta U = \sum_{i=1}^n \Delta U_i = -\frac{1}{C_{\Sigma}} \sum_{i=1}^n q_i. \quad (4.15)$$

Таким образом, выходной сигнал на плавающей шине будет пропорционален сумме зарядовых пакетов. Этот прием позволяет производить суммирование без разрушения зарядового пакета.

Операцию вычитания аналоговых сигналов можно производить различными способами (рис. 4.16). Одним из способов является формирование пакета заряда, пропорционального разности напряжений на электродах (рис. 4.16, *а*). В этом случае используются перекрестные связи затворов, которые управляются напряжениями аналоговых сигналов U_1 и U_2 . Если $U_1 > U_2$, то в верхнюю цепочку элементов заряд не поступает вследствие более глубокой потенциальной ямы в первом элементе верхней цепочки по сравнению со второй.

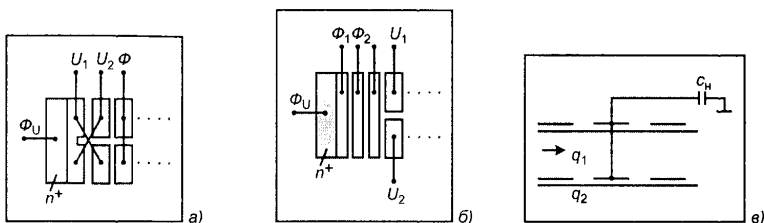


Рис. 4.16. Схемы вычитания зарядовых пакетов:
а - с перекрестными связями; *б* - с зарядом смещения;
в - на плавающих затворах

Таким образом, после этапа экстракции электроны будут экстрагированы обратносмещенной n^+ -областью истока. В нижнюю цепочку будет введен зарядовый пакет величиной

$$q_2 = SC(U_1 - U_2), q_1 = 0. \quad (4.16)$$

Для случая $U_1 < U_2$ заряд вводится только в верхнюю цепочку, т. е.

$$q_1 = SC_{\text{д}}(U_2 - U_1), q_2 = 0. \quad (4.17)$$

Итак, разность двух сигналов ($U_2 - U_1$) формируется в нижней цепочке, если разность положительная, и в верхней - при отрицательной разности. При считывании сигналов из обеих цепочек можно определить как разность потенциалов $U_1 - U_2$, так и знак этой разности.

Другой способ предусматривает представление входных сигналов в виде зарядовых пакетов. Разностный сигнал преобразуется в нужную форму: в виде заряда или напряжения (рис. 4.16, б). Во входной элемент инжекции - экстракции вводится фиксированный зарядовый пакет q_0 . Этот заряд делится между двумя элементами, затворы которых находятся под напряжением U_1 и U_2 .

При достаточно медленном спаде напряжения на шине Φ_2 соблюдаются квазистатические условия передачи. Это означает, что поверхностный потенциал шины Φ_2 и электродов U_1 и U_2 одинаковы и $\varphi_1 = \varphi_2$. Если

$$S_1 = S_2 = S, \quad (4.18)$$

$$q_1 = q_2 = q, \quad (4.19)$$

то

$$q_1 = 1/2[q_0 + SC_{\text{д}}(U_1 - U_2)], \quad (4.20)$$

$$q_2 = 1/2[q_0 + SC_{\text{д}}(U_2 - U_1)]. \quad (4.21)$$

Таким образом, в верхней и нижней цепочке электродов будут передаваться заряды, отличающиеся от половинного заряда $q_0/2$ на величину, пропорциональную разности входных

сигналов ($U_1 - U_2$). При считывании выходной сигнал будет смещен относительно среднего уровня, соответствующего $q_0/2$ (при $U_1 = U_2$), на величину, пропорциональную ($U_2 - U_1$).

Операцию вычитания можно реализовать на плавающих затворах (рис. 4.16, в). При этом используется эффект умножения потенциала затвора при передаче зарядового пакета в элемент с плавающим затвором. Если объединить два плавающих затвора и в один вводить заряд q_1 , а из другого выводить заряд q_2 , то заряд q_1 вызовет понижение потенциала, а выводимый заряд q_2 - повышение потенциала плавающего затвора. Результирующее изменение потенциала плавающей шины будет пропорционально разности зарядовых пакетов, передающихся по верхним и нижним цепочкам.

Операцию дифференцирования можно реализовать путем соединения плавающих затворов двух соседних разрядов (рис. 4.17, а). При этом зарядовый пакет $Q_n(nT)$ из элементов 1 экстрагируется и вызывает увеличение потенциала U_A , одновременно в элемент 2 вводится зарядовый пакет $Q_n[(n + 1)T]$, соответствующий следующей выборке сигнала. На плавающей шине формируется сигнал, пропорциональный разности двух зарядов или производной передаваемого аналогового сигнала.

Операция интегрирования сигнала является обратной операции дифференцирования и осуществляется суммированием (накоплением) зарядовых пакетов.

На ПЗС-структурах выполняют аналогово-цифровые и цифроаналоговые процессоры, мультиплексоры и демультиплексоры.

Мультиплексор, например, служит для временной задержки и накопления информации (рис. 4.17, б). Тактовая частота подбирается таким образом, чтобы задержка между отдельными входами была равна времени перемещения изображения между входными приемниками. При этом происходит когерентное сложение зарядовых пакетов. Важно отметить, что шумы складываются некогерентно.

Логические ячейки и операции могут быть реализованы с помощью комбинации уже рассмотренных устройств, предназначенных для арифметических операций.

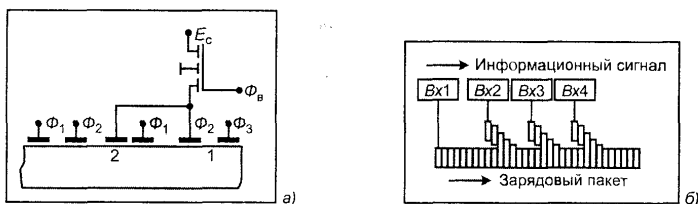


Рис. 4.17. Схемы дифференцирования и умножения сигналов (а) и мультиплексора (б)

Подадим на входные электроды в отдельности или на оба сразу напряжение, соответствующее логической единице. Возникающий зарядовый пакет также будет иметь величину, соответствующую логической единице (рис. 4.18). С любого из входов X_1 или X_2 зарядовый пакет, благодаря зарядовой связи перемещается под общий электрод и далее индицируется как логическая единица. Если же логическая единица подается сразу на оба входа, то на общем электроде будет удвоенный заряд. Для преобразования такого удвоенного зарядового пакета в зарядовый пакет, соответствующий логической единице, формируется регулируемый сток заряда. Он отделяется от потенциальной ямы под общим электродом с помощью потенциального барьера в виде ионно-легированной области.

Высота барьера выбирается такой, чтобы в потенциальной яме оставался зарядовый пакет, строго соответствующий логической единице. Стоком является обратносмещенный p - n -переход.

На рис. 4.18, а представлена логическая ПЗС-ячейка, выполняющая операцию логического сложения (ИЛИ).

Логическая ячейка для операции логического умножения (И) строится аналогично ячейке типа ИЛИ. За время действия напряжения фазы Φ_1 потенциальные ямы образуются под электродами D и C . Под электрод C заряд попадает только в том случае, если на оба входа X_1 и X_2 подаются одновременно зарядовые пакеты, соответствующие логической единице. По окончании действия фазового напряжения Φ_1 начинает действовать напряжение Φ_2 . Этим напряжением зарядовый пакет перемещается на выход из-под электрода C , а из-под электрода D переводится в обратномещенную область и затем экстрагируется. По такому принципу конструируются логические ячейки, выполняющие комбинацию логических функций. Малые размеры логических ячеек позволяют формировать сложные арифметико-логические устройства.

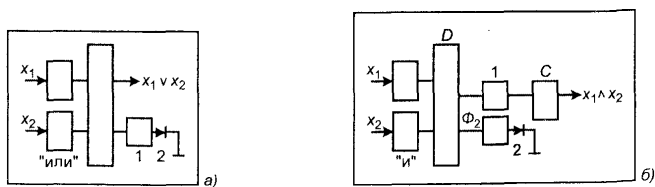


Рис. 4.18. Логические ПЗС-ячейки: а - схема реализации функции ИЛИ; б - функции И

4.2.3. Запоминающие устройства на ПЗС-структурах

Запоминающие устройства на принципах зарядовой связи легко реализуются с помощью ячеек аналоговой памяти. По существу эти ячейки являются конденсаторными МОП-структурами, в которых хранится зарядовый пакет или отсутствует вовсе. В первом случае говорят о хранении логической единицы, в другом - логического нуля. Объединенные в линейки такие ячейки образуют регистры сдвига.

Постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) состоит из накопителя с однократной записанной информацией и системы вывода информации на регистрах с зарядовой связью. Один из вариантов ПЗУ на ПЗС для хранения аналоговых сигналов содержит регистр сдвига, связанный с МОП-конденсаторами, размеры которых соответствуют записанной информации. На рис. 4.19, *а* изображен отдельный элемент такого устройства, где трехтактный регистр $P_1 - P_3$ непостоянно связан с конденсаторами постоянной памяти $K_1 - K_3$. В режиме считывания на выбранный конденсатор подается напряжение и под его действием накапливается заряд, пропорциональный площади последнего. Затем напряжение подается на выбранный электрод, и заряд передается в регистр. Это выполняется одновременно во всех элементах, так что регистр принимает параллельный код, который затем поступает к выходному усилителю.

Элементы хранения отделены от регистра, подобно фоточувствительным элементам в фотоприемниках со строчной разверткой. Однако они могут быть совмещены с электродами переноса, как показано на рис. 4.19, *б*. При этом информация представлена величиной заряда, встроенного в электродный диэлектрик. Наличие такого заряда приводит к модуляции поверхностного потенциала вдоль канала ПЗС, что позволяет считывать записанный заряд.

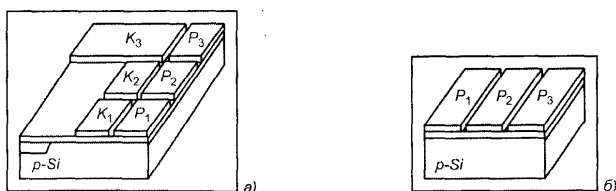


Рис. 4.19. ПЗУ на ПЗС: *а* – элемент памяти вне регистра; *б* – элементы памяти, совмещенные с электродами переноса

Операция считывания протекает в две стадии: вначале производится передача информации из постоянного накопителя в регистры ПЗС, затем - перенос зарядовых пакетов к выходу устройства. Первая стадия зависит от способа представления информации в накопителе, который при соответствующих управляющих сигналах определяет процесс генерации зарядовых пакетов, степень заполнения ими потенциальных ям или распределение зарядов между соседними элементами.

Информация записывается в диэлектрике, что обуславливает различное пороговое напряжение на электродах и одновременно различную управляющую способность. При подаче напряжения на электроды выбранной фазы под ними образуются потенциальные ямы различной глубины. Заполнение их зарядом, за счет естественной термогенерации, создает зарядовый рельеф, отображающий ранее записанную информацию. Для ускорения заполнения ям «опрашивающие» заряды подводят с помощью самого ПЗС. Репрограммируемое постоянное запоминающее устройство (РПЗУ) на ПЗС позволяет перезаписывать информацию в процессе работы в соответствии с введенным в него массивом зарядовых пакетов. Из некоторых способов хранения информации перепрограммирование допускает лишь заряд, встроенный в диэлектрик, но сам диэлектрик должен быть усложнен: диэлектрик с захватом заряда и диэлектрик со встроенным плавающим затвором.

Запоминающее устройство с произвольной выборкой по считыванию (ЗУПВ) на ПЗС позволяет считывать информацию из произвольной ячейки матрицы. В их основе лежит матрица ПЗС с дополнительной системой электродов, обеспечивающих произвольную выборку. Как известно, произвольная выборка возможна и в приборах с инъекцией заряда, но зарядовое считывание в матрицах большого объема дает очень слабые выходные сигналы, налагает чрезмерно жесткие требования на ее элементы, в особенности на усилители считывания. Более перспективным представляется использование токового считыва-

ния. В этом случае заряд, хранимый элементом, модулирует протекающий в нем ток. Допустимы различные способы токового считывания при ориентации канала транзистора в различных направлениях по отношению к каналу ПЗС (рис. 4.20): в горизонтальном (а, б) и в вертикальном (в, г).

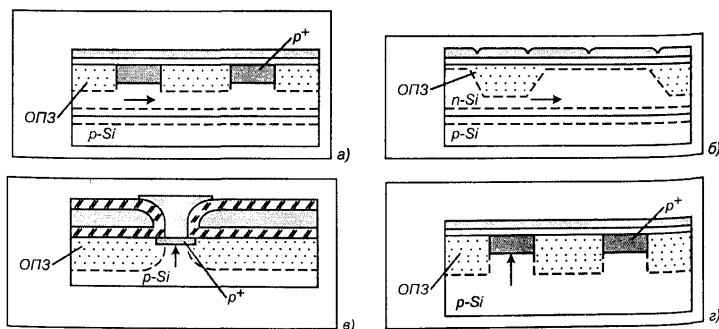


Рис. 4.20. Комбинация элемента ПЗС с транзистором:
горизонтальный канал → транзистора поперек (а)
и вдоль канала ПЗС (б); вертикальный канал ↑ транзистора
со стоком в отверстии электрода ПЗС (в)
и в виде изолирующей диффузионной области (г)

Области стока и истока канального транзистора могут быть включены в конструкцию дополнительно, но можно использовать и структуры, входящие в ПЗС-подложку, например, области изолирующей стоп-диффузии. При горизонтальном канале на подложке необходимо наличие слоя противоположного типа проводимости.

Для вертикального канала размеры стока должны быть меньше глубины области пространственного заряда.

Итак, ЗУ строятся на основе регистров сдвига, позволяющих реализовать в ячейках два устойчивых состояния «1» или «0» и перемещать информацию по регистру. По методу поиска

адреса ячейки памяти ЗУ делятся на устройства с произвольным и последовательным доступом информации. ЗУ с произвольным доступом позволяют использовать в любой момент времени любую ячейку и имеют число выходов блока выборки, равное числу адресов блока запоминания. ЗУ на основе регистров сдвига на ПЗС относятся к устройствам с последовательным доступом к информации.

Для увеличения времени хранения информации зарядовые пакеты непрерывно циркулируют по ПЗС-структуре путем передачи их с выхода на вход через устройство регенерации, позволяющее компенсировать утечку и рассасывание зарядов.

Конструктивно ЗУ организуются по различным схемам (рис. 4.21). Регистры сдвига могут быть объединены в виде серпантинно-петлевой структуры (рис. 4.21, *а*) с элементами регенерации *R*. Перспективными также являются структуры ЗУ с произвольной выборкой (рис. 4.21, *б*) и со строчной адресацией (рис. 4.21, *в*). Структуры с последовательно - параллельно - последовательной адресацией (ППП) образуют регистр, состоящий из матрицы параллельно включенных регистров сдвига с последовательным переносом двух регистров - входного и выходного. Информация последовательно заносится в верхний регистр, затем переносится параллельно в матрицу и в ней построчно сдвигается. Достигнув выходного регистра, информация заносится в него, а затем последовательно сдвигается к выходному устройству. Структура типа ППП должна содержать элементы регенерации *R*, восстанавливающие уровень зарядовых пакетов.

ЗУ на ПЗС большой емкости строятся по блочной структуре или с блочной выборкой.

Основной областью применения ЗУ на ПЗС является буферная память. Так замена буферной памяти на магнитных дисках в ЭВМ позволит резко сократить габариты, потребляемую мощность, другие технические характеристики.

Плотность записи информации в ЗУ на ПЗС может достигать 10^5 бит/см² при скорости записи и считывания 5 Мбит/с. К недостаткам ЗУ на ПЗС следует отнести ограниченное время хранения информации в ЗУ, а также энергозависимость схем.

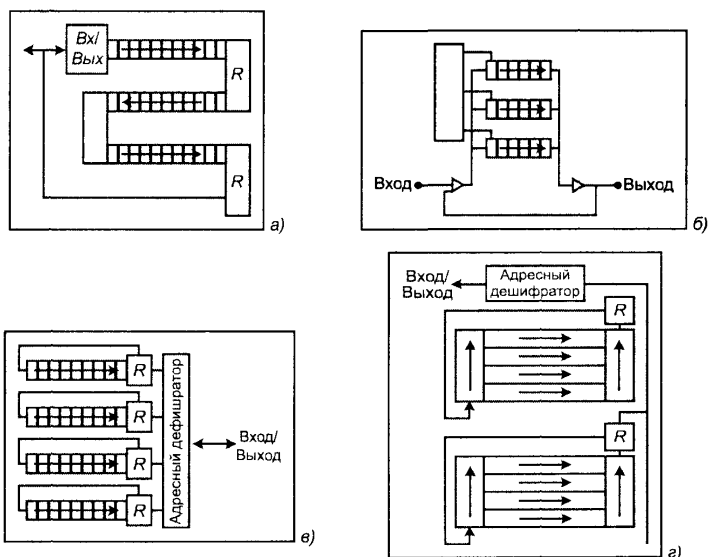


Рис. 4.21. Структурные схемы ЗУ на ПЗС:

а - серпантинно-петлеобразная;

б - с произвольной выборкой блоков,

в - со строчной адресацией;

г - последовательно - параллельно - последовательная

4.2.4. БИСПИН-приборы

БИСПИН-приборы представляют собой полупроводниковые структуры с БИСмещенным Переходом и Инжекционной Неустойчивостью. Эти приборы преобразуют входной аналого-

В качестве континуальной среды используется полупроводниковая структура с распределенным p^+ - n - или n - p -переходом (рис. 4.22, *a*).

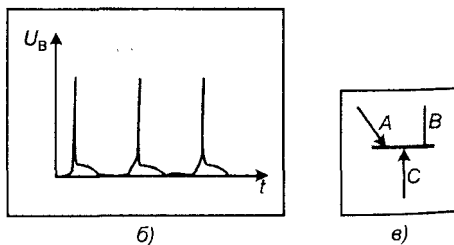


Рис. 4.22. БИСПИН-структура (a), форма генерируемых импульсов ($\bar{b}$) и условное обозначение ($\bar{c}$)

На поверхности слаболегированной n - или p -области формируют нелинейный A и омический B контакты. В качестве не-

линейного контакта может выступать встроенный локальный n^+ - p - n - или p^+ - n - p -транзистор.

На поверхности сильно легированной p^+ - или n^+ -подложки формируется омический контакт C . Если к контактам A и B приложить определенную разность потенциалов таким образом, чтобы n^+ -область была включена в прямом направлении, а затем структуру осветить со стороны слаболегированной области, то во внешней цепи появляются импульсы тока определенной частоты следования. При большой скважности импульсы тока имеют релаксационную форму (рис. 4.22, б). В промежутках между импульсами тока на контакте C имеют место пилообразные импульсы напряжения. Аналогичная генерация проявляется и без подсветки, но при пропускании тока через распределенный p^+ - n -переход. Увеличение интенсивности подсветки или уровня тока в подложку приводит к пропорциональному росту частоты следования импульсов без изменения их амплитуды, величина которой определяется разностью потенциалов U_{AB} на структуре.

Таким образом, БИСПИН может рассматриваться как релаксационный генератор, имеющий три независимых канала управления; потенциальный, токовый и гальванически развязанный - световой. Каждый из каналов характеризуется порогом генерации, величина которого зависит от состояния двух других каналов, и с их помощью легко изменяется в большую или меньшую сторону.

В зависимости от напряжения питания, уровня освещенности или тока в подложку БИСПИН может находиться в трех состояниях:

- закрытое, с низкой проводимостью, когда внутреннее сопротивление структуры между контактами A и B определяется сопротивлением обратносмещенного коллекторного перехода локального транзистора и составляет около 10^8 Ом;
- открытое, с высокой проводимостью, когда сопротивление структуры не превышает единиц килоом. В это состояние

структура переходит при больших уровнях токов в подложке или подсветке;

- автоколебательное.

Из сказанного выше следует, что БИСПИН может работать как ключ, если время нарастания подаваемого на его вход сигнала не превышает периода следования импульсов при максимальной частоте повторения.

Физический механизм работы БИСПИНа в автоколебательном режиме состоит в следующем. После включения источника напряжения благодаря тому, что сопротивление обратносмещенного коллекторного перехода локального транзистора существенно превышает сопротивление R_n n -слоя, коллекторный потенциал φ_k и потенциал под омическим контактом φ_B совпадают с точностью до 10^{-3} В, т. е. $\varphi_k \cong \varphi_B$. Такого же уровня достигает потенциал подложки φ . Следовательно, распределенный p^+ - n -переход находится под нулевым смещением. При включении света за счет внутреннего фотоэффекта происходит зарядка распределенного p^+ - n -перехода и возникает инжекция дырок из подложки в n -слой. При этом часть дырок попадает в коллекторную область встроенной локальной n - p - n -структуры. Для дырок в n -слое коллекторный переход является экстрактором, благодаря чему они поступают в p -базу локального транзистора и скапливаются в ней. Последнее обстоятельство приводит к понижению потенциального барьера эмиттерного n^+ - p -перехода и инжекции электронов из n -эмиттера в узкую p -базу, после пролета которой они оказываются в n -слое структуры. Возникает электронный ток I_n , протекающий по n -слою вдоль распределенного p^+ - n -перехода к омическому контакту. Следует иметь в виду, что этот электронный ток во много раз больше тока дырок, поступающих в p -базу локального транзистора.

Падение напряжения $I_n R_n$ на распределенном сопротивлении n -слоя ($R_n = 3 - 5$ кОм) приводит к снижению потенциала φ_k вблизи коллекторного перехода

$$\varphi_k = U_{AB} - I_n R_n. \quad (4.22)$$

Поскольку потенциал подложки φ вследствие ее высокого уровня легирования можно считать независимым от координаты, то смещение на распределенном p^+-n -переходе вдоль него изменяется. Прямое смещение этого перехода под коллектором локального транзистора увеличивается, а в остальной, большей его части, сначала уменьшается, а затем становится отрицательным. Инжекция дырок из p^+ -области в p -базу транзистора при этом растет, что в свою очередь вызывает еще больший перекос в смещении p^+-n -перехода и т. д. Процесс развивается лавинообразно и приводит транзистор в режим насыщения.

Вольтамперная характеристика структуры имеет S-образный вид, и в этом случае следует ожидать токовую неустойчивость.

При небольших уровнях фототока основной поток дырок в p -область локального транзистора поступает из p^+ -подложки за счет двух процессов: перераспределения фототока и перезарядов барьерной емкости p^+-n -перехода. В начале процесса дырки, образующиеся вследствие внутреннего фотоэффекта, захватываются полем объемного заряда $p-n$ -перехода и перебрасываются в p -подложку, благодаря чему он весь равномерно переходит в состояние прямого смещения (до 0,3 В). Вследствие этого дырки также равномерно инжектируются в n -слой по всей площади распределенного перехода, и в базу транзисторной структуры поступает лишь небольшая их часть, определяемая величиной площади этого перехода, расположенной под коллектором локальной структуры. Вследствие развивающейся описанной выше петли положительной обратной связи (включающей ток вдоль n -слоя, падение потенциала φ_k и рост прямого смещения на p^+-n -переходе) распределенный переход оказывается бисмещенным, происходит перераспределение инжекционного тока дырок, в результате чего все фотодырки, собранные основной обратносмещенной частью p^+-n -перехода,

поступают через прямосмещенную часть в базу локальной транзисторной структуры. К этому току добавляется ток перезарядки емкости p^+ - n -перехода через открытую вертикальную n^+ - p - n - p^+ -структуру. Оценки показывают, что начальный всплеск тока в импульсе носит емкостный характер, и его амплитуда линейно зависит от разности потенциалов на структуре.

После прекращения перезарядки p^+ - n -перехода количество дырок, поступающих в базу локальной транзисторной структуры, резко сокращается и остается только поток «фотодырок». Концентрация их в базе из-за рекомбинации резко сокращается и все большая часть коллекторного перехода выходит из насыщения, сопротивление растекания коллектора увеличивается, коллекторный ток снижается и площадь прямосмещенной части p^+ - n -перехода уменьшается.

Если фототок настолько велик, что ток вдоль p^+ - n -перехода обеспечивает сохранение на нем прямосмещенного участка, то структура остается открытой. В противном случае она переходит в закрытое состояние, и весь процесс повторяется (автоколебательный режим). Таким образом, в процессе развития импульса p^+ - n -переход проходит четыре состояния: с нулевым смещением, прямосмещенное, обратносмещенное и бисмещенное. Последнее обстоятельство послужило основанием для названия структуры и прибора.

Возможности практического применения БИСПИНов определяются их многофункциональностью, высокой чувствительностью по входу; большой амплитудой выходного сигнала; малыми темповыми токами; широким диапазоном перестройки; большой крутизной преобразования «аналоговый сигнал - частота следования импульсов»; наличием на выходе сигналов двух типов - релаксационного токового и пилообразного (напряжения); широким диапазоном напряжений питания; большим интервалом сопротивления нагрузки.

Особого внимания заслуживает вопрос о применении БИСПИНов в устройствах контроля. Здесь возможны два направления:

- использование БИСПИНа как датчика, например, светового потока, температуры, тока, напряжения и т. д.
- использование БИСПИНа в качестве преобразователя «аналоговый сигнал - частота» для любых стандартных и выпускаемых промышленностью датчиков.

На основе БИСПИН-приборов созданы различные типы датчиков с частотным выходом: оптоэлектронные преобразователи, преобразователь типа «аналоговый сигнал - количество импульсов», измеритель световых, магнитных потоков. Значительный интерес представляют датчики различных физических параметров, реализованные на БИСПИН-приборах. В этом случае резко повышается точность измерений, появляется возможность передачи данных по радиоканалу. На основе БИСПИН-приборов разработаны датчики для дистанционного контроля в системах экологического мониторинга.

Частотный выход датчиков на основе БИСПИН-приборов позволил создать на их основе комплект интеллектуальных датчиков для экологического мониторинга. Частотный выход БИСПИН-структур позволяет на их основе реализовать передачу телеинформации по радиоканалу. На этом принципе реализованы датчик магнитного поля, измеритель мощности световых потоков, датчик температуры с использованием термистора и др.

Следует заметить, что вся эта схема может быть реализована в виде одной интегральной схемы. Одновременно можно разместить несколько датчиков для контроля нескольких физических величин. Реально встроить схемы автоматического переключения каналов, адаптации к изменению эксплуатационных условий, схем промежуточной обработки информации. Такие конструкции получили название *интеллектуальные датчики* (сенсоры).

4.2.5. Приборы на волнах пространственного заряда

В континуальных средах, представляющих собой тонкие слои полупроводников и обладающих отрицательной объемной дифференциальной проводимостью (ОДП), при определенных условиях возбуждаются волны пространственного заряда (ВПЗ).

Такие волны по существу являются динамическими неоднородностями, обладающими уникальными свойствами:

- скорость волн близка к скорости дрейфа электронов (порядка 10^5 м/с);

- величина и направление скорости ВПЗ легко управляемы за счет изменения величины и направления статического электрического поля, приложенного в плоскости полупроводникового слоя;

- ВПЗ могут эффективно усиливаться, слабая дисперсия скорости позволяет организовать когерентное многоволновое взаимодействие со средой.

Это явление положено в основу нового класса приборов. Следует особо подчеркнуть, что технология создания континуальной среды, а также приборов на основе ВПЗ вполне совместима с технологией микроэлектроники.

Конструкция одного из процессоров, выполняющего функции усилителя и фильтра, приведена на рис. 4.23. Континуальной средой такого устройства является тонкий слой GaAs *n*-типа проводимости.

Возбуждение ВПЗ осуществляется многоэлементным преобразователем, выполненным в виде встречно-штыревого преобразователя (ВШП). Динамические неоднородности в виде ВПЗ, генерируемые каждым из электродов ВШП, распространяются к детектирующему ВШП и наводят в нем электрический сигнал. Этот сигнал пропорционален суммарному значению переменных составляющих концентрации электронов. Другими

словами, электрический сигнал с детектора равен сумме всех парциальных ВПЗ, возбужденных каждым из электродов.

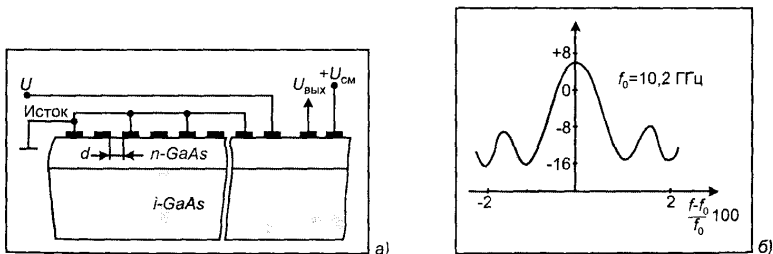


Рис. 4.23. Схема процессора на ВПЗ для усиления и фильтрации сигналов (а) и его частотная характеристика (б)

Максимальный выходной сигнал будет наблюдаться в том случае, если все парциальные ВПЗ придут на выходной электрод синфазно. Геометрия ВШП такова, что расстояние между соседними штырями должно быть равно половине длины ВПЗ λ ; тогда частота определяется соотношением

$$\omega_0 = \pi v_0 / d, \quad (4.23)$$

где v_0 - скорость волны.

Такой процессор одновременно выполняет функцию фильтра с амплитудно-частотной характеристикой вида $\sin x / x$ (рис. 4.23, б), причем

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{1}{N^{-3}}, \quad (4.24)$$

где N - число штырей ВШП. Подавление побочных максимумов можно осуществить путем аподизации ВШП подобно тому, как это рассматривалось в акустоэлектронных устройствах.

Другим примером процессора на ВПЗ является конвольвер сигналов СВЧ-диапазона. В этом процессоре используется нелинейное взаимодействие ВПЗ. Конвольвер представляет собой многослойную сэндвич-структуру (рис. 4.24). Две непрерывные среды, отличающиеся степенью легирования и скоростью дрейфа волн пространственного заряда, расположены одна над другой и разделены тонким слоем диэлектрика.

На входные электроды прибора подаются сигналы в СВЧ-диапазоне. Генерируемые электродами динамические неоднородности в виде ВПЗ распространяются в смежных непрерывных средах. Суммарная толщина полупроводниковых слоев и разделяющих их пленок диэлектрика меньше характерной длины ВПЗ и поэтому волны, распространяющиеся в непрерывных средах, эффективно взаимодействуют. Результатом их взаимодействия является результирующий сигнал, описываемый соотношением

$$U(t) = A \int f(t)\varphi(t + m\tau)d\tau, \quad (4.25)$$

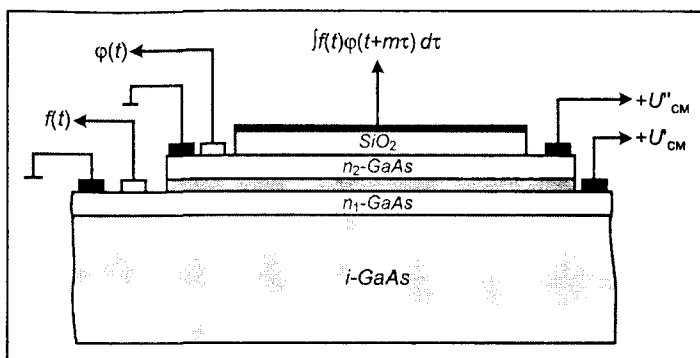


Рис. 4.24. Монолитный конвольвер на ВПЗ

где A - размерный коэффициент; m - множитель, определяемый относительной разностью скоростей дрейфа в двух кон-

тинуальных средах. Если две ВПЗ движутся в противоположных направлениях, то можно получить классическое преобразование - операцию свертки сигналов:

$$U(t) = A \int f(t)\varphi(t - \tau)d\tau. \quad (4.26)$$

Интервалы интегрирования определяются временем прохождения волны в приборе.

Помимо процессоров на ВПЗ можно реализовать устройства памяти аналоговых сигналов. На рис. 4.25 представлено устройство хранения аналоговых сигналов в СВЧ-диапазоне. Область хранения сигналов представляет собой эквидистантную систему хранящих электродов, связанных с шиной хранения через емкости. В режиме записи напряжение на шину хранения не подается. Хранящие затворы находятся под плавающим потенциалом и мало влияют на условия распространения ВПЗ в пролетной области. В этом случае реализуется режим широкополосного усилителя бегущей волны.

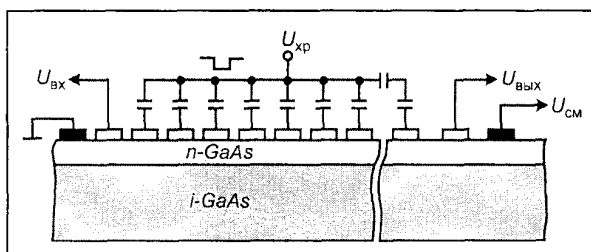


Рис. 4.25. Запоминающее устройство аналоговых сигналов

В режиме хранения на шину подается импульс хранения отрицательной полярности такой амплитуды, чтобы обедненные области под «хранящими» электродами полностью сомкнулись. В этом случае в пленке образуются изолированные области - **карманы**, содержащие динамические неоднородности в

виде зарядовых пакетов. Наличие или отсутствие зарядовых пакетов свидетельствует о наличии битов хранимой информации; ВПЗ в этом случае как бы замораживаются в среде. Положительный потенциал с выхода устройства может быть снят.

В режиме воспроизведения сигнала на сток подается положительное тянущее напряжение, снимается отрицательный потенциал с шины хранения. Происходит размораживание зарядовых пакетов, а затем их детектирование на электроде. Помимо одномерного рассмотрения процесса распространения ВПЗ исследованы двумерные явления. Управляя ВПЗ в заданной плоскости, созданы различные конструкции процессоров сигналов. Например, фазированные антенные решетки, линии задержки с дискретным или непрерывным управлением, селекторы СВЧ-импульсов с линейной частотой модуляции и т.п.

4.2.6. Ганновские приборы

В полупроводниковой континуальной среде с N -образной объемной вольтамперной характеристикой возникает генерация высокочастотных колебаний электрического тока, представляющая собой *эффект Ганна*.

Генерируется динамическая неоднородность в виде электрического домена, которая называется *доменом Ганна* (рис. 4.26).

Если к торцам кристалла GaAs n -типа длиной l , обладающего N -образной ВАХ, приложить напряжение U такое, что $E_{кр} < U/l < E_{пор}$, то возникают локальные флуктуации плотности заряда (рис. 4.26, *а*). Эта флуктуация величиной X_1, X_2 расположена на падающем участке ВАХ в области отрицательной дифференциальной проводимости (рис. 4.26, *б, в*).

Напряженность поля вследствие флуктуации возрастает на величину ΔE , а плотность тока j в области $X_1 < X < X_2$ окажется ниже, чем вне области. Электроны, движущиеся против сил поля, начинают скапливаться вблизи X_1 и образовывать отрица-

тельный заряд. На координате X_2 остается некомпенсированный положительный заряд (рис. 4.26, в). Образуется электростатический домен, обедненный свободными электронами.

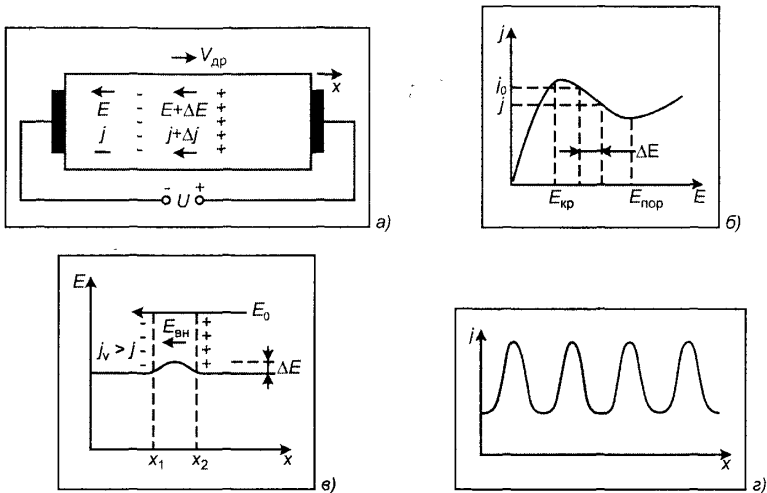


Рис. 4.26. Устройство на доменах Ганна (а), ВАХ (б),
распределение поля в полупроводнике (в)
и форма импульсов генерации (г)

Под воздействием электрического поля домен перемещается в континуальной среде от катода к аноду со скоростью дрейфа электронов $v_{др}$ ($10^5 - 10^7$ м/с). На аноде происходит рекомбинация электронов или их детектирование. Динамическая неоднородность распадается, вызывая импульс тока во внешней цепи. Форма импульса тока приведена на рис. 4.27, а. Одновременно у катода зарождается новая динамическая неоднородность в виде домена и процесс повторяется. Размер домена составляет $\Delta x = 10 - 20$ мкм. Специфичность эффекта Ганна состоит в том, что преобразование мощности постоянного тока происходит во всем объеме среды, а не в узкой области, напри-

мер, p - n -переходе. Поэтому генераторы на основе эффекта Ганна имеют значительную мощность. В качестве среды используются InP, CdTe, ZnS, InSb, InAs n -типа, а также в Ge p -типа с характерным размером - 1 мм.

На основе эффекта Ганна разработаны конструкции процессоров и памяти. Рассмотрим некоторые из них.

Управление импульсами тока может производиться функцией, являющейся произведением профиля легирования среды на площадь поперечного сечения образца. По существу эта функция определяет заряд электростатического домена. В этом случае легко генерировать колебания тока сложной формы, придавая соответствующую форму образцу (рис. 4.27, а).

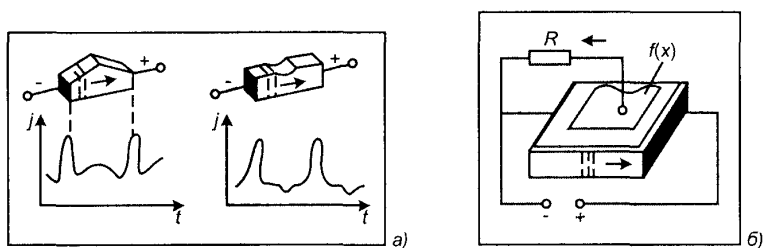


Рис. 4.27. Общий вид образцов и форма генерируемых импульсов тока (а); прибор с профилированным электродом (б)

Форму колебаний можно задавать также с помощью профиля металлического контакта на поверхности образца, описываемого заданной функцией $f(X)$. В этом случае процессор произведет преобразование функции координат $f(X)$ во временную функцию $f(t)$. Металлический электрод изолируется от образца диэлектрической пленкой (рис. 4.27, б).

На основе прибора Ганна неудачно названного диодом, можно реализовать устройства логики, используя два его состояния: омическое (без домена) и с доменом сильного поля. В ди-

од Ганна вводится устройство управления в виде затворов Шоттки, которые расположены перпендикулярно направлению тока. В таком приборе можно стимулировать или подавлять ганновский домен, а значит формировать нужную логическую функцию.

Диоды Ганна могут быть использованы в устройствах памяти высокого быстродействия (порядка 10^{-10} с). Как правило, как элементы памяти, так и ЗУ реализуются на диодах Ганна, объединенных в устройство на основе различных схемотехнических решений, и особого интереса для практической электроники не представляют.

5. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МАГНЕТОЭЛЕКТРОНИКА

5.1. Физические основы

Функциональная магнетоэлектроника представляет собой направление в функциональной электронике, в котором изучаются магнитоэлектронные эффекты и явления в магнитоупорядоченных континуальных средах, а также возможность создания приборов и устройств обработки и хранения информации с использованием динамических неоднородностей магнитоэлектронной природы.

Магнетоэлектроника — направление функциональной микроэлектроники, связанное с появлением новых магнитных материалов, обладающих малой намагниченностью насыщения, и с разработкой технологических методов получения тонких магнитных пленок.

Магнитное упорядочение заключается в существовании определенной закономерности расположения элементарных магнитных моментов атомов, ионов, электронов. Простейшие типы магнитного упорядочивания наблюдаются в ферри- и ферромагнетиках. *Ферромагнетик* представляет собой вещество, в котором ниже определенной температуры (точки Кюри) большинство атомных магнитных моментов параллельно друг другу и вещество обладает самопроизвольной (спонтанной) намагниченностью. Под *ферримagnetиками* понимают магнетики с несколькими магнитными подрешетками и с отличным от нуля суммарным магнитным моментом. Магнитное упорядочивание в любых классах магнетиков исчезает при температуре выше точки Кюри для ферромагнетиков и точки Нееля для ферри- и антиферромагнетиков.

5.1.1. Динамические неоднородности в магнетоэлектронике

В континуальных магнитоупорядоченных средах существует несколько видов физических носителей информационного сигнала - динамических неоднородностей.

Цилиндрические магнитные домены (ЦМД) представляют собой изолированные однородно намагниченные подвижные области в ферро- или ферримagnetиках. ЦМД имеют форму круговых цилиндров и направление намагниченности, противоположное направлению намагниченности магнетика.

ЦМД возникают при определенных условиях в тонких монокристаллических пластинках или пленках ферритов, обладающих сильной одноосной перпендикулярной анизотропией. Единственная ось легкого намагничивания направлена перпендикулярно поверхности континуальной среды, в которой формируются динамические неоднородности в виде ЦМД (рис. 5.1). Устойчивое равновесие ЦМД поддерживается под действием трех сил:

- 1) сжимающей силы со стороны внешнего магнитного поля;
- 2) магнитостатической силы растягивания домена за счет «магнитных зарядов»;
- 3) сжимающей силы поверхностного натяжения домена.

Изолированный домен существует в определенном интервале значений внешнего поля

$$H_{\text{мин}} < H_{\text{вн}} < H_{\text{макс}}, \quad (5.1)$$

где $H_{\text{мин}}$ - поле, при котором ЦМД растягивается в полосовой домен; $H_{\text{макс}}$ - поле, при котором ЦМД схлопывается - коллапсирует. Значение этих полей зависит от отношения толщины щелки к ее характеристической длине.

ЦМД можно перемещать в пленке воздействуя на него полем $H_{\text{вн}}$. Скорость перемещения определяется соотношением

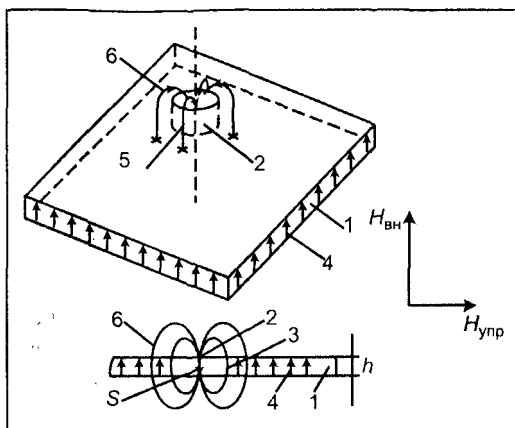


Рис. 5.1. Изолированный ЦМД: 1 – в пленке феррита-граната; 2 – ЦМД; 3 – стенка Блоха; 4 – вектор намагниченности соседнего домена; 5 – вектор намагниченности домена; 6 – поле рассеяния домена

$$v = \frac{\mu_g}{2} \left(\Delta H_{\text{вн}} - \frac{8}{\pi} H_c \right), \quad (5.2)$$

где $\Delta H_{\text{вн}}$ – изменение напряженности внешнего поля на расстоянии, равном диаметру домена, μ_g – подвижность домена, H_c – коэрцитивная сила материала. Скорость перемещения домене около 1 - 10 м/с.

Переход вектора намагниченности из одного положения в другое происходит на границе раздела между двумя доменами. Эта граница или переходной слой называется **доменной границей**. Различают следующие типы доменных границ.

Неелевская граница существует в очень тонких магнитных пленках (менее 30 нм). Вектор намагниченности ориенти-

рован по оси легкой намагниченности (ОНЛ), поворот атомных магнитных моментов в границе происходит только в плоскости пленки.

Блоховская граница существует в пленках толщиной более 100 нм и во всех массивных ферромагнетиках. Разворот магнитных моментов возможен как по часовой (правовинтовая граница), так и против часовой стрелки (левовинтовая граница). Особенностью блоховской доменной границы является отсутствие на ее краях магнитных зарядов.

Промежуточным типом является **граница с поперечными связями**, существующая в пленках толщиной от 30 до 100 нм.

В настоящее время значительный интерес представляют **вертикальные блоховские линии** (ВБЛ) в полосовых доменах. ВБЛ являются одним из типов динамических неоднородностей и на их основе созданы приборы для обработки и хранения информации.

В двоичном исчислении логические «1» и «0» образуются наличием или отсутствием ВБЛ. Расстояние между соседними ВБЛ достаточно мало, поэтому в стенке одного такого полоскового домена можно хранить множество битов информации, В полосовом домене размером 0,5 мкм можно хранить до 100 бит информации. Динамические неоднородности в виде ВБЛ, переносящие или хранящие биты информации, считываются на одном конце полоскового домена и генерируются (записываются) на другом (рис. 5.2).

В оптических дисках со стиранием и перезаписью информации используются домены в дисках из тербий-железко-кобальтового сплава с точкой Кюри 240 °С. Домены первоначально ориентированы в одном направлении (рис. 5.3, а). При воздействии лазерного излучения происходит локальный разогрев до точки Кюри (рис. 5.3, б). Если в этом месте действовать магнитным полем, то можно обратить поляризацию домена (рис. 5.3, в). Заметим, однако, что такие динамические неоднородности превращаются на определенное время в статические.

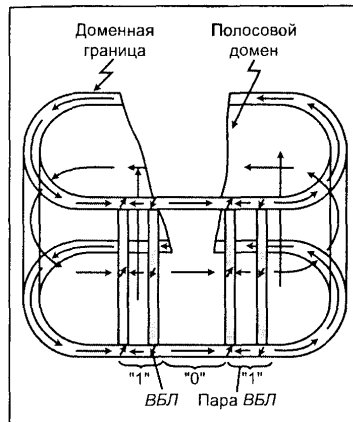


Рис. 5.2. Фрагмент полосового домена с тремя парами ВБЛ, представляющие собой логические единицы

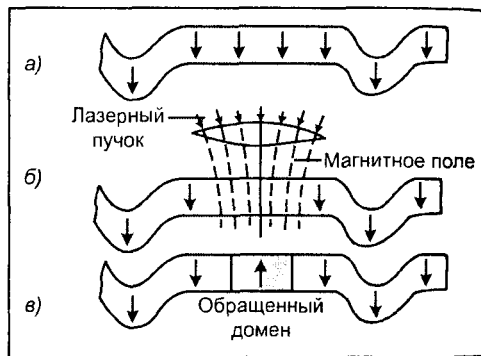


Рис. 5.3. Динамика обращения домена в оптическом диске

В функциональной магнетoeлектронике в качестве динамических неоднородностей часто используются **резонансы и волны**.

В квантовых системах под **резонансом** будем понимать резкое возрастание квантовых переходов при равенстве частот внешнего излучения $h\nu$ и квантового перехода $E_i - E_j$, или $h\nu = E_i - E_j$.

Явление резонанса проявляется в увеличении интенсивности обмена энергией в процессах поглощения и излучения.

Механический момент каждого магнитного иона в ферромагнетике (спин) совершает прецессию под воздействием поля $H_{\text{упр}}$, перпендикулярного внешнему $H_{\text{вн}}$. Величина прецессии определяется **ларморовской частотой**.

В реальной ситуации магнитные моменты ионов в ферромагнетике взаимодействуют между собой благодаря дипольным полям, обмену энергией, взаимодействию с полем кристаллической структуры.

Возникают объемные магнитостатические волны (ОМСВ) и поверхностные магнитооптические волны (ПМСВ).

Магнитостатические волны представляют собой электромагнитные волны, сопровождающие колебания спинов в магнитоупорядоченных средах.

Фазовая скорость магнитостатических волн много меньше скорости света. Магнитостатические волны возбуждаются неоднородным магнитным полем, создаваемым током, протекающим по проводнику на поверхности пленки. На рис. 5.4 представлены два состояния ионов во внешнем магнитном поле $H_{\text{вн}}$: в отсутствии управляющего поля спины выстраиваются вдоль направления постоянного поля (рис. 5.4, *a*); при наложении управляющего поля $H_{\text{упр}}$, например, за счет протекания тока по проводнику, создается спиновая волна, распространяющаяся по пленке и являющаяся динамической неоднородностью (рис. 5.4, *б*). Характер распространения возмущения напоминает движение одиночной волны по струне, причем увеличение натяжения струны аналогично увеличению магнитного поля $H_{\text{упр}}$. В обоих случаях наблюдается увеличение частоты. Эти волны называют также **спиновыми**.

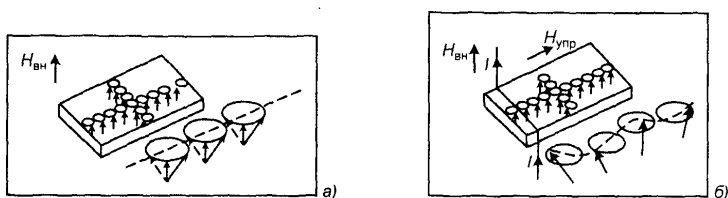


Рис. 5.4. Возникновение динамической неоднородности в виде спиновой волны: *а* - в отсутствие управляющего поля; *б* - при наличии управляющего поля

Наряду со спиновыми волнами в ферромагнетиках можно возбуждать упругие волны в ультразвуковом диапазоне, электромагнитные волны. Эти волны можно рассматривать как динамические неоднородности, между которыми могут возникать процессы взаимодействия в случае, если они распространяются одновременно. Взаимодействие упругих и спиновых волн, например, представляет собой магнитострикционную связь, которая позволяет изменить свойства волн вблизи точек синхронизма и образовать гибридную **магнитоупругую волну** (МУВ). Фазовые скорости таких волн выше скорости звука. Если рассмотреть слоистую структуру ферромагнетик - полупроводник, то спиновые волны в ферромагнитной пленке могут взаимодействовать с электронами проводимости полупроводника. Дело в том, что электрическое поле спиновой волны проникает через границу раздела в полупроводник и создает там переменный ток. Джоулево рассеяние мощности приводит к затуханию волны. В случае приложения поля к полупроводниковой пленке в ней возникает электрический ток, носители приобретают упорядоченное движение. На эти носители действует сила Лоренца, возникающая вследствие проникновения в полупроводник магнитного поля спиновой волны. В случае совпадения скорости упорядоченного движения носителей v_n в полупроводнике и фазовой скорости спиновой волны v_p сила Лоренца колеблется в

противофазе с силой электрического поля волны. При этом, если $v_n < v_p$, то происходит ослабление спиновой волны; если $v_n \cong v_p$, то не наблюдается поглощение спиновой волны и, наконец, если $v_n > v_p$, то происходит усиление спиновой волны или магнитоакустический резонанс. Это яркий пример взаимодействия динамических неоднородностей различной физической природы в различных континуальных средах. Магнитоакустический резонанс возникает на частотах $1 - 10^2$ ГГц.

В магнитоупорядоченных средах можно возбудить динамические неоднородности в виде *магнонов* - квазичастиц, представляющих собой квант колебаний спиновых волн.

В твердых телах, находящихся в сильном магнитном поле $H_{вн}$ возникают волны плазмы. Эти волны имеют круговую поляризацию, их называют *спиральными волнами* или *геликонами*. Геликоны в процессе распространения взаимодействуют с фотонами и при совпадении частоты звука с частотой колебаний плазмы возникают смешанные колебания. В этом случае наблюдаются явления возбуждения звуковых колебаний колебаниями плазмы и наоборот.

В достаточно однородных сверхпроводниках II рода могут быть возбуждены магнитные вихри или *вихри Абрикосова*. Магнитный вихрь представляет собой нить нормальной фазы, окруженную экранирующим током. Вдоль оси такой нити проходит квант магнитного потока или *флюксон*, величина которого определяется как

$$\Phi_0 = hc / 2q = 2,07 \cdot 10^{-15} \text{ Вб.} \quad (5.3)$$

Прикладывая к вихрю внешнюю силу (сила Лоренца), можно перемещать вихрь в плоскости пленки. Особый интерес представляет использование флюксонов в пленках *высокотемпературных сверхпроводников* (ВТСП).

5.1.2. Континуальные среды

При выборе континуальных сред руководствуются условием максимальной эффективности возбуждения заданного типа динамической неоднородности. Первые ЦМД приборы изготавливались на редкоземельных ортоферритах с общей формулой LnFeO_3 . Однако на их основе не могла быть обеспечена высокая плотность записи информации, экономичность приборов.

Наиболее оптимальной средой для создания ЦМД приборов оказались монокристаллические пленки феррит-гранатов (МПФГ), эпитаксиальные пленки феррит-шпинелей. В настоящее время магнитоодноосные пленки ферритов-гранатов, выращенных на намагниченных подложках галлий-гадолиниевого граната (ГГГ), не испытывают заметной конкуренции со стороны других материалов.

Различают гранаты следующих систем: $(\text{LaLuSmCd})_3 \cdot (\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$; $(\text{YLuSm})_3(\text{FeGaSe})_5\text{O}_{12}$; $(\text{YSm})_3(\text{FeAl})_5\text{O}_{12}$. При формировании континуальных сред стараются получить ЦМД субмикронного диаметра, для чего используют, например, гранаты без ионов Sm^{3+} . Для доменосдвигающих структур используются пермаллоевые пленки (79 % Ni + 21 % Fe) с нулевым коэффициентом магнитострикции.

Для устройств функциональной электроники, использующих в качестве динамических неоднородностей *спиновое эхо*, могут быть использованы соединения типа $\text{NiFe}^{57}\text{O}_4$, пленки или порошок Co^{59} , пленки $\text{Co}^{59}\text{Fe}^{57}$.

Широкие перспективы построения разнообразных функциональных устройств открывают новые материалы - **магнитные полупроводники**. К ним относятся магнетики, не обладающие металлической природой электропроводности и представляющие собой соединения магнитных и немагнитных элементов. В настоящее время известны такие магнитные полупроводники, как халькогениды европия, халькогенидные шпинели

хрома, сильно легированные ферриты (например, железиттриевый гранат, легированный кремнием) и т. д.

В магнитных полупроводниках при температурах, меньших температуры магнитного упорядочения Θ (точки Кюри), появляется как бы дополнительная по сравнению с обычными немагнитными полупроводниками степень свободы — магнитный порядок. Между магнитным порядком и полупроводниковыми свойствами материала (электрическими, оптическими) имеются взаимосвязь и взаимовлияние, которые и вызывают разнообразные, свойственные исключительно этим материалам, эффекты. Например, вследствие зависимости зонной структуры от величины магнитного момента при понижении температуры до значений, меньших Θ , в магнитных полупроводниках наблюдается аномально сильный сдвиг края полосы поглощения. При этом ширина запрещенной зоны может, как уменьшаться, так и увеличиваться. Магнетосопротивление в магнитных полупроводниках существенно больше, чем в обычных, и максимально вблизи точки Кюри. Возникает оно, прежде всего из-за воздействия внешнего поля на намагниченность, а не непосредственно на носитель заряда, как в обычных полупроводниках. Эти эффекты обусловлены влиянием намагниченности на оптические и электрические свойства вещества. Существуют эффекты и обратного порядка. Имеются сообщения о наблюдении изменений магнитной проницаемости и направления оси анизотропии в некоторых магнитных полупроводниках под воздействием света. В халькогенидах европия и некоторых других материалах имеют место повышение точки Кюри и изменение намагниченности с увеличением концентрации носителей заряда.

Ряд эффектов в магнитных полупроводниках возникает из-за взаимодействия носителей заряда со спиновыми волнами, в частности изменение знака магнетосопротивления. Экспериментально наблюдался эффект усиления СВЧ-излучения в маг-

нитных полупроводниках при пропускании через них электрического тока.

Продолжаются широкие исследования различных свойств магнитных полупроводников. Однако уже известные эффекты позволяют создавать монолитные СВЧ-микросхемы с активными и пассивными СВЧ-элементами на одной монокристаллической подложке из магнитного полупроводника, устройства бесконтактного управления и связи, заменители датчиков Холла и другие устройства.

Магнитные шпинели дают возможность реализовать запоминающие устройства, аналогичные запоминающим устройствам на ферритовых сердечниках. Предполагается, что шпинели будут технологичнее ферритов. Кроме того, из них можно делать также активные приборы, позволяющие параллельно с записью и считыванием информации производить обработку информации непосредственно в запоминающей среде.

5.1.3. Генерация, детектирование и управление динамическими неоднородностями

Информация в устройствах на динамических неоднородностях, например, типа доменов, кодируется двумя основными способами, наличием или отсутствием доменов в заданный момент времени в заданном месте, либо состояниями границ доменов.

Процесс генерации доменов осуществляется в основном локализацией электромагнитного поля, например, с помощью аппликации в виде петли, по которой протекает ток I (рис. 5.5). При подаче импульса тока будет создано размагничивающее поле $H_{\text{разм}}$, превосходящее значение рабочего поля $H_{\text{раб}}$ и имеющее противоположный знак. Под аппликацией пленка локально перемагнитится и образуется домен.

Другим примером процесса генерации доменов может служить деление зародышевого домена. Если домен зародится,

то будет записана логическая единица, в противном случае - логический нуль.

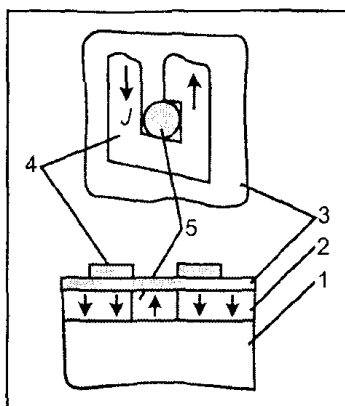


Рис. 5.5. Генерация доменов с помощью петли тока:
1 - подложка ГТГ; 2 - эпитаксиальная ферритовая пленка;
3 - изолирующая пленка; 4 - аппликация; 5 – ЦМД

Если в качестве динамической неоднородности применяется ВБЛ, то используется растянутый ЦМД или *страйп-домен* (рис. 5.6). Операцию записи производят в следующем порядке: вначале отрицательную ВБЛ, находящуюся в вершине страйпа (рис. 5.6, а), переводят в другое положение (рис. 5.6, б, в). Прилагая к вершине страйпа импульс поля смещения, можно получить пару ВБЛ разных знаков (рис. 5.6, г). Положительную ВБЛ переводят в вершину страйпа (рис. 5.6, д), определяют ЦМД (рис. 5.6, е), и уничтожают его путем аннигиляции. Итогом генерации является отрицательная пара ВБЛ в вершине страйпа. Наличие пары отрицательных ВБЛ соответствует логической единице, а ее отсутствие - логическому нулю.

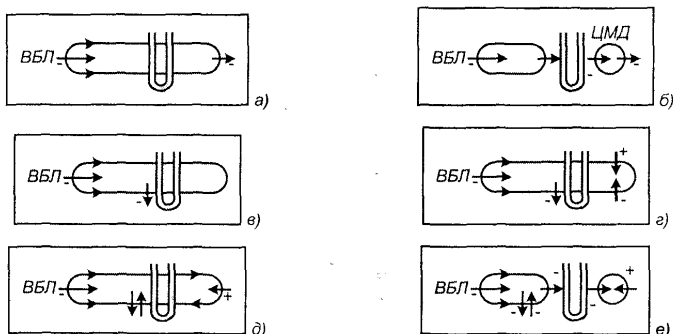


Рис. 5.6. Запись ВБП в накопительный регистр (а, в, г, д, е) и ее считывание (б)

Для других устройств функциональной магнетoeлектроники существуют свои методы генерации, в основе которых также лежит принцип возбуждения полем. В устройствах на спиновых волнах используется проводник с током, токовая петля, а также другие генераторы управляющего магнитного поля. Управление динамическими неоднородностями магнетoeлектронной природы осуществляется различными физическими эффектами и явлениями, связанными с наложением физических полей. По своей природе ЦМД имеют магнитное поле, которое, взаимодействуя с внешним полем, создает силы, перемещающие домен в направлении минимальной интенсивности внешнего поля. Другими словами, домен перемещается в таком направлении, в котором его энергия будет минимальной. Токовые аппликации, генерирующие магнитное поле, имеют вид петли из металлической пленки (рис. 5.7, а). Направление тока в аппликации таково, что создается поле, противоположное внешнему, и образуется «яма», которая движется в заданном направлении вследствие последовательной подачи импульсов на фазы Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 . Предпочтение отдается трехактной схеме, чтобы избежать взаимодействия следующих друг за другом до-

менов, а также возвратного их движения. Тактовые аппликатуры просты, но ненадежны из-за большого количества проводников.

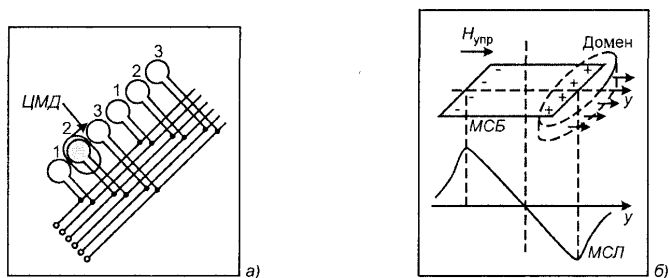


Рис. 5.7. Управление движением ЦМД: а – с помощью токовых аппликаций; б – с помощью пермалловых аппликаций

Более удобны магнитные аппликации, управляющее внешнее поле в которых создает магнитостатические ямы и барьеры (МСБ) (рис. 5.7, б). В таких конструкциях домен продвигается от аппликации к аппликации, форма которых оптимизируется в конкретном случае и представляет собой доменопредвигающую структуру (ДПС). ДПС является эффективным устройством управления динамической неоднородностью в виде домена.

На рис. 5.8 проиллюстрирована идея перемещения ЦМД по классическим Π -образным ДПС в различные моменты времени, связанные с направлением вектора управляющего магнитного поля $H_{упр}$.

Генерация доменов происходит в генераторе Г, а детектирование - в детекторе Д. ДПС могут полностью управлять перемещением и коммутировать ЦМД по любому ранее заданному направлению или каналу. Существуют множество конструкций ДПС, однако, наиболее перспективны ионно-

имплантированные ДПС. Для других видов динамических неоднородностей существуют свои конструкция устройств управления, основанные на магнитоэлектрических эффектах и явлениях.

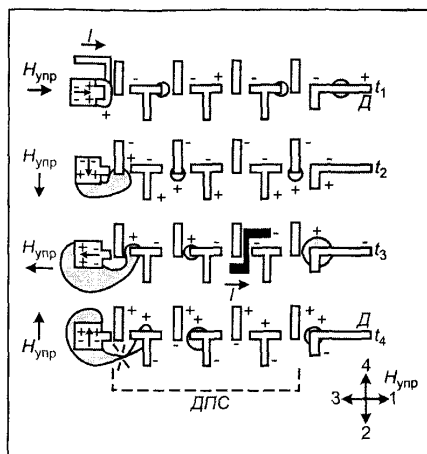


Рис. 5.8. Движение ЦМД по доменопредвигающим структурам: Г – генератор; Д – детектор

Считывание информации сводится к выявлению динамических неоднородности, несущих логические «0» и «1», и осуществляется в устройстве, называемом **детектором**. При детектировании динамических неоднородностей используются, как правило, физические процессы и явления, обратные процессам генерации. Это эффекты индукции, магниторезистивный, магнитооптический и т. п. Общие принципы построения детекторов включают ряд положений, среди которых: обеспечение отношения сигнал/шум, достаточного для получения заданной вероятности сбоя; технологическая совместимость детектора, устройства управления и генератора; согласованность детектора

с входом усилителя считывания; устойчивость к внешним воздействиям.

Детекторы для считывания ЦМД могут быть различной конструкции в зависимости от используемого физического эффекта. Наиболее распространенной является конструкция с использованием шевронных ферромагнитных или токовых проводниковых расширителей ЦМД.

Увеличение площади считывающего ЦМД с помощью расширителя позволяет получить большую величину выходного сигнала.

Процесс считывания информации в конструкциях на ВБЛ можно понять из рис. 5.7, б. На пару проводников подается импульс тока, и концы страйпов сближаются. Происходит репликация (отделение) ЦМД, которая каналируется в регистр вывода информации и затем детектируется. На конце страйпа сохраняется отрицательная ВБЛ.

Детекторы спиновых волн конструктивно практически не отличаются от генераторов и, пришедшая к ним МСВ возбуждает в проводнике импульс тока. Детектирование флюксонов осуществляется путем их аннигиляции в детекторе.

5.2. Приборы и устройства функциональной магнетоэлектроники

5.2.1. Процессоры сигналов на ЦМД

Уникальные свойства динамических неоднородностей магнитоэлектронной природы позволяют создать весьма эффективные устройства обработки информации. ЦМД как носитель информационного сигнала обладает следующими уникальными свойствами:

- домен в процессах сохраняет форму круглого цилиндра;
- свободно перемещается в двух измерениях;

- управляемо меняет форму, растягиваясь в полосовой домен;
- позволяет перейти к другому физическому носителю информационного сигнала, в том числе многозначному;
- управляемо зарождается или коллапсирует;
- реплицируется, делясь на две части и восстанавливая первоначальную форму и размер;
- визуально и электрически регистрируется;
- дипольно взаимодействует с другими соответствующими ЦМД.

Учитывая эти свойства ЦМД, можно выделить следующие отличительные от интегральных схем свойства приборов функциональной электроники:

1) управление процессами обработки информации и ее передача физическими носителями по информационным каналам имеет тотальный и синхронный характер;

2) компланарность носителей информационного сигнала имеет две степени свободы его передачи и поэтому время обработки информации уменьшается;

3) динамические неоднородности в виде ЦМД при взаимодействии друг с другом неограниченно долго сохраняют свои конечные размеры и количество в системе до, во время и после взаимодействия.

Эти свойства позволяют создать процессоры для обработки дискретной информации. Анализ показывает, что можно создать логические элементы, реализующие следующие функции: повторение, ИЛИ, И, НЕ, исключающее ИЛИ. Эти элементы и их сочетания позволяют обрабатывать функционально полные системы логических элементов.

На рис. 5.9 показаны реализации логических элементов с ортогональным и антипараллельным расположением входов.

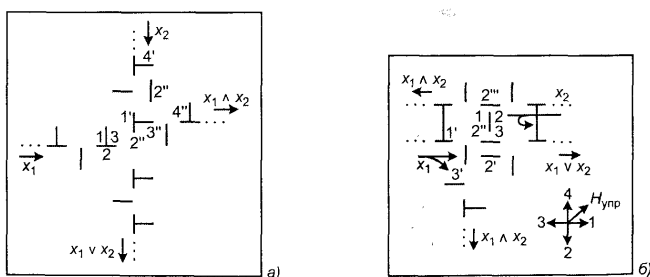


Рис. 5.9. Логические элементы на основе ЦМД:
 а - с ортогональным; б - с параллельным
 расположением входов X_1 и X_2

5.2.2. Процессоры сигналов на МСВ

Перспективными процессами обработки сигналов в гигагерцевом диапазоне являются линии задержки на магнитостатических волнах. Эти устройства напоминают процессоры на ПАВ.

Конструктивно линия задержки на МСВ реализуется на многослойной структуре, состоящей из прочной подложки (Al_2O_3), тонкопленочной континуальной среды из железомитриевого граната (ЖИГ) и галлий-гадолиниевый граната (ГГГ) (рис. 5.10).

Такой «сэндвич» является эффективной континуальной средой. Следует отметить, что тонкопленочная технология производства сред для устройств на МСВ совместима с технологией интегральных схем. В зависимости от свойств среды магнитостатические волны распространяются с дисперсией или бездисперсионно, время задержки на всех частотах одинаково. На рис. 5.10, а представлена бездисперсионная линия задержки. На входной детектирующий микрополосковый преобразователь поступает сигнал, который возбуждает МСВ, несущие с задержкой информацию на выходной генерирующий микропо-

лосковый преобразователь. МСВ с частотой линейно не связаны, поэтому в линиях задержки наблюдается зависимость времени задержки от частоты (рис. 5.10, б). Для компенсации такой зависимости прикладывают магнитное поле, перпендикулярно направленное к пленке железо-иттриевого граната (ЖИГ). Используя также две заземленные обкладки, можно изменить параметры распространения МСВ и обеспечить постоянное время задержки в заданном частотном интервале.

В зависимости от направления приложенного поля можно возбудить различные типы волн. При направлении поля по оси z , приложенного перпендикулярно слою ЖИГ, возбуждается прямая объемная волна. Задержка сигнала возрастает с частотой.

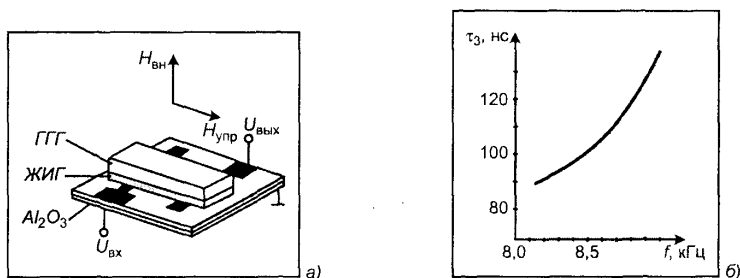


Рис. 5.10. Линия задержки на МСБ (а) и ее характеристика (б)

При приложении поля вдоль оси x генерируется обратная объемная волна с убывающей зависимостью задержки от частоты. И наконец, при направлении магнитного поля вдоль оси y генерируются поверхностные волны, аналогичные ПАВ.

Линия задержки, использующая прямую волну, имеет возрастающую линейно-частотную модуляцию (ЛЧМ), а с обратной волной - убывающую. Если спектр сигнала, поступающего в линию задержки, соответствует полосе пропускания этой линии задержки, но имеет противоположный закон изменения за-

держки с частотой, например, убывающей, то выходной сигнал будет иметь форму узкого пика. Коэффициент сжатия может составлять несколько порядков.

Линия задержки может быть использована в качестве трансверсального фильтра. Известно, что требуемую характеристику фильтра получают путем суммирования и взвешивания выходных сигналов с ряда слабо связанных отводов. С их помощью снимают сигналы, распространяющиеся в линии задержки. Для приборов на магнитостатических поверхностных волнах существует возможность легкого ветвления волны в любых точках тракта распространения.

Заметим, что в зависимости от типа используемых входных и выходных преобразователей, соответственно генераторов и детекторов МСВ, можно получить различные амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) преобразования. Преобразователь меандрового типа генерирует АЧХ, описываемую функцией $(\sin x)/x$. Преобразователь с параллельными полосками работает в длинноволновой части спектра и генерирует вдвое больше гармоник, чем меандровая структура. Эти преобразователи легли в основу конструкции трансверсальных фильтров на МСВ, полосковых фильтров.

Устройство преобразования спектра СВЧ-сигналов - *серродин* представлен на рис. 5.11.

Основой конструкции является линия задержки, в которую встроена катушка подмагничивания для модуляции магнитного поля. В качестве континуальной среды использовалась пленка ЖИГ толщиной 10 мкм на подложке из ГГГ. Серродин работает в диапазоне частот 2 - 5 ГГц. Для динамической перестройки серродина необходимо изменить магнитное поле на несколько эрстед. Это можно реализовать с помощью малоиндукционных катушек, входящих в устройство управления серродном. Динамический диапазон по входному сигналу составляет 30 - 50 дБ, величина управляемого сдвига частот от сотых долей до десятка килогерц при искажении спектра частот по-

рядка 5 %. Расширение функциональных возможностей приборов на магнитоэлектрических волнах будет обеспечено благодаря использованию эффектов взаимодействия этого типа динамических неоднородностей с акустическими, оптическими и другими типами волн.

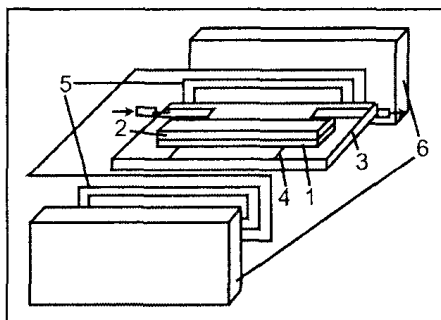


Рис. 5.11. Конструкция серродина на МСВ: 1 - пленка ЖИГ; 2 - подложка из ГГГ; 3 - поликоровая пластина; 4 - микрополосковые преобразователи; 5 - модулирующие катушки; 6 - самарий-кобальтовые постоянные магниты

5.2.3. Запоминающие устройства на ЦМД

Наиболее широкое применение ЦМД нашли в устройствах памяти, позволяющих получить высокую плотность записи информации, энергонезависимость, малую потребляемую мощность, высокое быстродействие, низкую стоимость. Отсутствие движущихся носителей позволяет ЗУ на ЦМД использовать в бортовых системах. Информационные структуры ЗУ на ЦМД могут быть организованы различными способами. Для ЗУ большой информационной емкости характерна организация последовательно-параллельного типа. Рассмотрим структуру с

раздельными регистрами ввода-вывода информации и n -накопительными регистрами (рис. 5.12).

Накопительные регистры (НР) формируются на основе ДПС и информация в них поступает из генератора Γ через регистр ввода (РВ) и однонаправленного переключателя (П). Накопительные регистры связаны с регистром вывода $P_{\text{выв}}$ с помощью репликаторов-переключателей (Р/П), которые при считывании работают в режимах реплицирования. Копии выбранного блока информации из НР попадают в $P_{\text{выв}}$, а далее в детектор D . В свободные поля через однонаправленные переключатели записываются новые информационные блоки (рис. 5.12, а). На рис. 5.12, б приведены схемы операций обработки информации. Позиция 1 иллюстрирует операцию стирания в Р/П, 2 - запись в однонаправленном переключателе и 3 - считывание в Р/П. В этом случае информация считывается без ее разрушения.

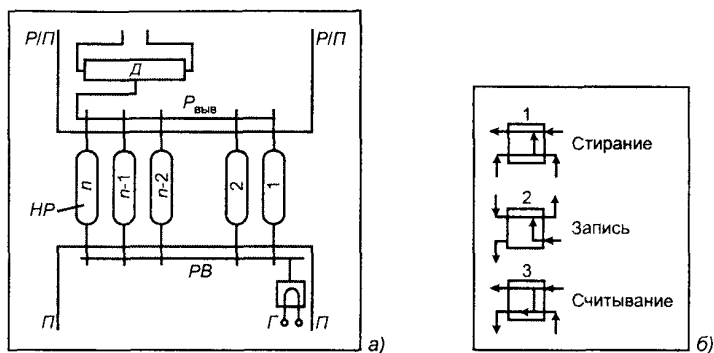


Рис. 5.12. Организация последовательно-параллельной структуры хранения информации: а – с раздельным входом-выходом; б – схема обработки информации

Конструкция ЗУ на ЦМД приведена на рис. 5.13. Микросборка монтируется в корпусе 5 типа DIP. Отдельный чип изго-

товляется по планарной технологии групповым методом. В последнее время в качестве подложки чипа используется сапфировая подложка. На нее наносится феррит-гранатовая пленка, в которой могут образовываться домены. С помощью фотолитографии формируются токовые шины, пермаллоевые (Ni/Fe) *доменопередвигающие структуры*. ЧИП защищен пленкой нитрида кремния и закрепляется на диэлектрической немагнитной пластине. Два постоянных самарий-кобальтовых магнита 3 создают внешнее поле $H_{\text{вн}}$, формирующее в феррит-гранатовой пленке ЦМД оптимальных размеров. Между постоянными магнитами помещены две ортогональные катушки 2 и 4, управляемые смещенными на 90° по фазе токами. Это позволяет создать управляющее поле $H_{\text{упр}}$, вращающееся по часовой стрелке в плоскости ЧИПа: собранная конструкция помещается в корпус со стандартными штырьками, который экранируется от внешнего магнитного поля.

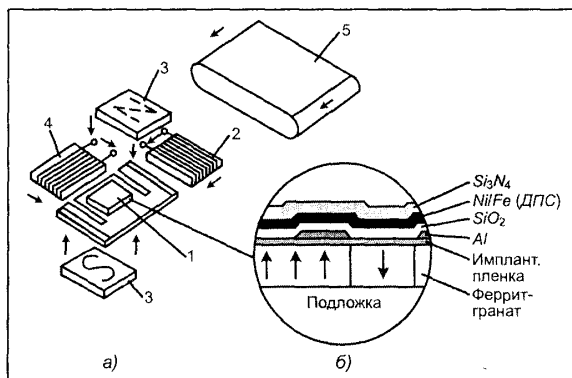


Рис. 5.13. Конструкция микросборки ЗУ на МВД (а) и структура слоев отдельного чипа (б)

ЗУ на ЦМД формируется в ЦМД-накопитель, состоящий из нескольких ЦМД-микросборок. Последние выполняют ряд

сложных функций, среди которых роль носителей записанного информационного массива, обслуживающих электронных схем и узлов для обеспечения замен, считывания и регенерации информации.

Основным элементом ЦМД-накопителя являются ЦМД-микросборки, содержащие в корпусе одну (однокристалльные) или несколько (многокристалльные) ЦМД-микросхемы, катушки управления полем, постоянные магниты, плату управляющих схем и электромагнитный и электростатический экраны.

Повышение плотности записи информации в устройствах на ЦМД-доменах может быть достигнуто за счет уменьшения диаметра домена. На доменах диаметром около 1 мкм созданы ЗУ с плотностью записи порядка 10^8 бит/см².

Разрабатываются устройства с субмикронными размерами доменов.

Уменьшения размеров носителя информации можно получить, перейдя на ЗУ на вертикальных блоховских линиях. Информационный массив в этом случае формируется из страйпов.

Канал ввода информации состоит из генератора ВБЛ, доменопередвигающей структуры с числом позиций равной числу страйпов и токовых шин. Эта система осуществляет преобразования типа ЦМД → ВБЛ.

Канал вывода информации имеет в своем составе систему репликаторов (по числу страйпов), осуществляющих преобразование типа ВБЛ → ЦМД. Сформированная кодовая последовательность ЦМД направляется в детектор, где происходит считывание информации. Информационная емкость ЗУ на ВБЛ достигает $1,5 \cdot 10^9$ бит.

Ведутся исследования по созданию «интеллектуальных» ЦМД-ВБЛ систем, в которых на одном кристалле размещены логический процессор и информационный массив. В такой системе можно совместить на одной плате процессы хранения и

обработки информационных массивов в реальном масштабе времени со скоростью выше 10^{10} байт/с.

Устройства памяти на цилиндрических магнитных доменах весьма перспективны. Плотность записи таких устройств достигает 10^5 бит/см² при скорости обработки информации $3 \cdot 10^6$ бит/с. Преимущество этих устройств заключается также в том, что магнитные домены могут составить систему идентичных элементов, реализующих функции логики, памяти и коммутации без нарушения однородности структуры материала носителя информации. Следовательно, кристалл на магнитных доменах является вычислительной средой, на поверхности которой посредством системы внешних аппликаций можно размещать схемы, реализующие различные комбинации логических и переключающих функций и функций памяти.

5.2.4. Запоминающие устройства на магнитных вихрях

Принципы организации ЗУ на магнитных вихрях аналогичны ЗУ на ЦМД. Генератор магнитных вихрей (флюксонов) формирует вихри, находящиеся в состоянии безразличного равновесия. Устройство управления представляет собой схему продвижения вихрей по каналу, осуществляемой силой Лоренца, создаваемую транспортным током (рис. 5.14, а). Однонаправленность движения вихрей обеспечивается асимметрией канала продвижения. Считывание магнитных вихрей может осуществляться с использованием квантовых интерферометров, а также одиночных джозефсоновских контактов.

Возможен вариант формирования сдвигового регистра на магнитных вихрях, либо вариант мажор-минорной организации. В этом случае реализуется накопитель на магнитных вихрях с параллельно-последовательной организацией записи и считывания информации (рис. 5.14, б). Плотность записи информации в этом случае ожидается около $2 \cdot 10^8$ бит/см². Анализ показывает, что скорость обработки информации в этом случае дости-

гает величин 10^9 бит/с. Буферная или внешняя память на флюк-сонных запоминающих устройствах технологически и оперативно совместима с микроэлектронными системами и криогенными процессорами.

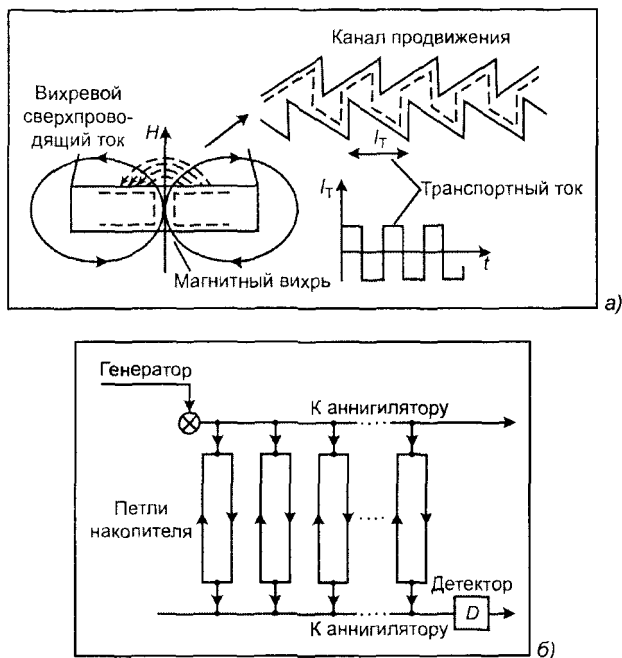


Рис. 5.14. Магнитный вихрь и его канал продвижения (а), мажор-минорная организация ЗУ на флюсонах (б)

5.2.5. Запоминающие устройства на магнитных пленках

Наибольший интерес представляет использование тонкопленочных металлических магнитных материалов в микроэлектронных запоминающих устройствах (ЗУ), где в качестве элемента памяти применяются тонкие магнитные пленки. Эти

пленки позволяют создавать надежные быстродействующие ЗУ с малой мощностью управления.

На перемагничивание тонкопленочного элемента, толщина которого обычно не превышает толщины одного домена, требуется энергии в 10 - 20 раз и времени в 10 - 30 раз меньше, чем на перемагничивание ферритового сердечника.

Применение тонких магнитных пленок в качестве носителей информации основано на том, что они обладают **двумя устойчивыми состояниями**. Эти состояния пленки обеспечиваются благодаря одноосной магнитной анизотропии - предпочтительной ориентации вектора намагниченности, которая создается в процессе изготовления пленки или при ее последующей термической обработке с помощью внешнего магнитного поля. Тонкие пленки пермаллоя (сплав никеля и железа с небольшими добавками меди, хрома и молибдена) можно изготовить так, что их магнитные свойства в разных направлениях будут сильно различаться. В направлении **оси трудного намагничивания** (ОТН) петля гистерезиса практически полностью отсутствует, зато под прямым углом к ней в направлении **оси легкого намагничивания** (ОЛН) петля гистерезиса является почти полной (рис. 5.15, а). Это свойство используется в двух видах интегральной памяти: элементе памяти с плоскими магнитными пленками (рис. 5.15, б) и элементе памяти с электролитическим магнитным покрытием, нанесенным на проволоку (рис. 5.15, в).

При хранении информации пермаллоидные элементы намагничены в одном или другом направлении оси легкого намагничивания, которое совпадает с продольным направлением в пленке и является окружностью для проволоки с электролитическим покрытием. При записи ток слов делает направление намагниченности почти совпадающим с направлением оси трудного намагничивания. Ток чисел отклоняет направление намагниченности в ту или другую сторону, так что после прохождения импульсов намагниченность устанавливается в направлении ОЛН.

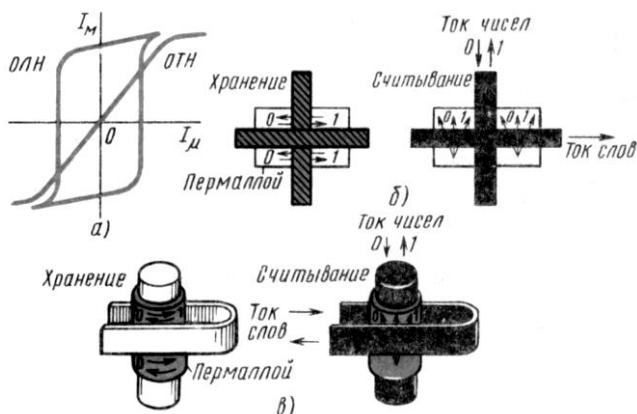


Рис. 5.15. Использование тонких магнитных пленок для элементов памяти ЭВМ: *а* – петля гистерезиса тонкой магнитной пленки; *б* – элемент памяти с плоскими магнитными пленками; *в* – элемент памяти с электролитическим магнитным покрытием, нанесенным на проволоку

Третьим типом интегральной памяти на магнитных пленках является плоская проволочная память (рис. 5.16). Ее изготовляют путем электролитического нанесения пленки пермаллоя на медно-бериллиевую проволоку. Прямые параллельные отрезки такой проволоки образуют линии чисел; проводящие ленты, протянутые в поперечном направлении, служат линиями слов. Запоминание осуществляется намагничиванием по окружности пленки, нанесенной электролизом на проволоку, причем это соответствует направлению оси легкого намагничивания, которое устанавливается при электролизе за счет пропускания постоянного тока через проволоку. Ток слов направляет поле по оси проволоки, т. е. в направлении оси трудного намагничивания. Это индуцирует напряжения в линиях чисел,

причем небольшие токи чисел направляют поля вдоль оси легкого намагничивания.

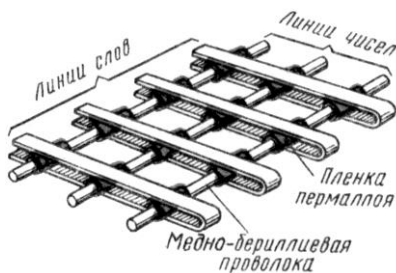


Рис. 5.16. Плоская проволочная память

На тонких магнитных пленках могут быть выполнены не только элементы памяти ЭВМ, но также логические микросхемы, магнитные усилители и другие приборы.

6. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ КРИОЭЛЕКТРОНИКА

Криоэлектроника (криогенная электроника) (от греческого «криос» - холод, мороз) - направления электроники и микроэлектроники, охватывающие исследование взаимодействия электромагнитного поля с электронами в твердых телах при криогенных температурах и создание электронных приборов на их основе.

К криогенным температурам относят температуры, при которых наступает глубокое охлаждение, т. е. температуры от 80 до 0 °К. В криоэлектронных приборах используются различные явления: сверхпроводимость металлов и сплавов, зависимость диэлектрической проницаемости некоторых диэлектриков от напряженности электрического поля, появление у металлов при температуре ниже 80 °К полупроводниковых свойств при аномально высокой подвижности носителей заряда и др.

Криоэлектроника - одна из основных и весьма перспективных отраслей науки. Её интенсивному развитию способствовали, с одной стороны, широкие исследования явлений, происходящих в твёрдом теле при низких температурах, и практическое применение полученных результатов в различных отраслях радиоэлектроники (в первую очередь в космической радиоэлектронике), а с другой - определенные достижения криогенной техники, позволившие на основании как новых, так и ранее известных принципов разработать экономичные, малогабаритные и надежные системы охлаждения.

Значительным стимулом к развитию криоэлектроники послужило также и то немаловажное обстоятельство, что при создании современных электронных устройств - высокочувствительной радиоприемной аппаратуры, быстродействующих электронных вычислительных машин и др. - конструкторы подошли буквально к пределу возможностей радиоэлектроники, принципиально достижимому в обычном интервале температур. Использование низких температур позволяет преодолеть это пре-

пятствие и открывает новые пути в разработке радиоэлектронных систем.

Во-первых, глубокое охлаждение способствует значительному улучшению технических и экономических параметров радиоэлектронных устройств - преимущества компактных сверхпроводящих запоминающих устройств большой емкости и быстродействия для ЭВМ, сверхпроводящих магнитов и другой аппаратуры неоспоримы. Во-вторых, возникающие в условиях глубокого охлаждения явления, которые присущи только такому состоянию вещества, позволяют создавать принципиально новые приборы. Именно так, например, был сконструирован мазер, успешно используемый в спутниковых системах связи, радиоастрономии и т.д.

Криоэлектроника изучает особенности поведения радиоэлектронных компонентов и материалов при очень низких температурах (0 - 20 °K)

6.1. Физические основы криоэлектроники

В криоэлектронных приборах используются различные явления: сверхпроводимость металлов и сплавов, зависимость диэлектрической проницаемости некоторых диэлектриков от электрического поля, появление у металлов при $T < 80 \text{ }^{\circ}\text{K}$ полупроводниковых свойств при аномально высокой подвижности электронов проводимости и др. Большинство современных криоэлектронных приборов основано на явлении *сверхпроводимости*, в частности, на *эффекте Джозефсона*, а также на явлении *одноэлектронного туннелирования* между сверхпроводниками.

Сверхпроводимость – физическое явление, наблюдаемое у некоторых веществ (сверхпроводников) при охлаждении их ниже определенной критической температуры и состоящее в обращении в нуль электрического сопротивления постоянному току и выталкивании магнитного поля из объема образца.

Сверхпроводимость открыта Х. Камерлинг-Оннесом в 1911 году.

Сверхпроводимость, свойство многих проводников, состоящее в том, что их электрическое сопротивление скачком падает до нуля при охлаждении ниже определённой критической температуры T_k , характерной для данного материала. Сверхпроводимость обнаружена у более чем 25 металлических элементов, у большого числа сплавов и интерметаллических соединений, а также у некоторых полупроводников. Рекордно высоким значением T_k (около 23 °K) обладает соединение Nb_3Ge .

Скачкообразное исчезновение сопротивления при понижении температуры впервые наблюдал Х. Камерлинг-Оннес на ртути (рис. 6.1).

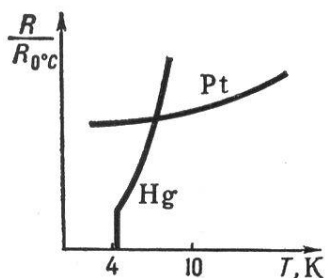


Рис. 6.1. Зависимость сопротивления R от температуры T для ртути (Hg) и для платины (Pt). Ртуть при $T = 4,12$ °K переходит в сверхпроводящее состояние. $R_{0^{\circ}C}$ - значение R при $0^{\circ}C$

Он пришёл к выводу, что ртуть при $T = 4,15$ К переходит в новое состояние, которое вследствие его необычных электрических свойств может быть названо сверхпроводящим. Несколько позднее Камерлинг-Оннес обнаружил, что электрическое сопротивление ртути восстанавливается при включении доста-

точно сильного магнитного поля (его называют критическим магнитным полем H_k). Измерения показали, что падение сопротивления до нуля происходит на протяжении очень узкого, но конечного интервала температур.

Ширина этого интервала для чистых образцов составляет $10^{-3} - 10^{-4}$ °К и возрастает при наличии примесей и других дефектов структуры.

Отсутствие сопротивления в сверхпроводящем состоянии с наибольшей убедительностью демонстрируется опытами, в которых в сверхпроводящем кольце возбуждается ток, практически не затухающий с течением времени. В одном из вариантов опыта используются два кольца из сверхпроводящего металла. Большее из колец неподвижно закрепляется, а меньшее концентрически подвешивается на упругой нити таким образом, что когда нить не закручена, плоскости колец образуют между собой некоторый угол. Кольца охлаждаются в присутствии магнитного поля ниже температуры T_k , после чего поле выключается. При этом в кольцах возбуждаются токи, взаимодействие между которыми стремится уменьшить первоначальный угол между плоскостями колец. Нить закручивается, а наблюдаемое постоянство угла закручивания показывает, что токи в кольцах являются незатухающими. Опыты такого рода позволили установить, что сопротивление металла в сверхпроводящем состоянии меньше чем 10^{-20} Ом·см (сопротивление чистых образцов меди или серебра составляет около 10^{-9} Ом·см при температуре жидкого гелия). Однако сверхпроводник не является просто идеальным проводником, как это считалось ещё в течение более чем 20 лет после открытия сверхпроводимости. Существование значительно более глубокого различия между нормальным и сверхпроводящим состояниями металла стало очевидным, после того как немецкие физики В. Мейснер и Р. Оксенфельд (1933 г.) установили, что слабое магнитное поле не проникает в глубь сверхпроводника. Особенно важно, что это имеет место независимо от того, было ли поле включено до

или после перехода металла в сверхпроводящее состояние. В отличие от этого, идеальный проводник (т. е. проводник с исчезающе малым сопротивлением) должен захватывать пронизывающий его магнитный поток. Это различие иллюстрирует рис. 6.2 (*а, б, в*), на котором схематически изображено распределение поля вблизи односвязного металлического образца на трёх последовательных этапах опыта: *а* - образец находится в нормальном состоянии, внешнее поле свободно проникает в глубь металла; *б* - образец охлаждается ниже T_k , магнитное поле выталкивается из сверхпроводника (верхний рисунок), тогда как в случае идеального проводника распределение поля оставалось бы неизменным (нижний рисунок); *в* - внешнее поле выключается, при этом исчезает и намагниченность сверхпроводника. В случае идеального проводника поток магнитной индукции через образец сохранил бы свою величину, и картина поля была бы такой же, как у постоянного магнита.

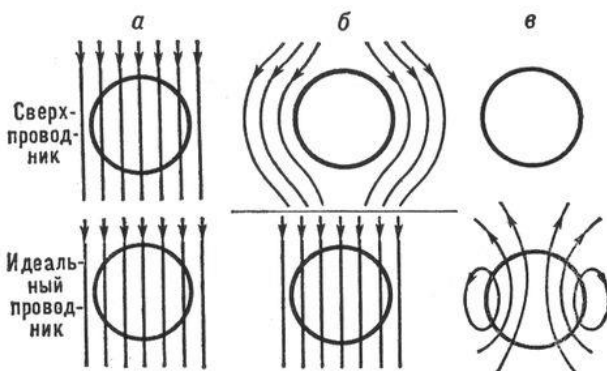


Рис. 6.2. Распределение магнитного поля около сверхпроводящего шара и около шара с исчезающим сопротивлением (идеальный проводник): *а* - $T > T_k$; *б* - $T < T_k$, внешнее поле $H_{\text{вн}} \neq 0$; *в* - $T < T_k$, $H_{\text{вн}} = 0$

Выталкивание магнитного поля из сверхпроводящего образца (это явление обычно называют *эффектом Мейснера*) означает, что в присутствии внешнего магнитного поля такой образец ведёт себя как идеальный *диамагнетик* той же формы с магнитной восприимчивостью $\chi = -1/4\pi$. В частности, если образец имеет форму длинного сплошного цилиндра, а внешнее поле H однородно и параллельно оси цилиндра, то магнитный момент, отнесённый к единице объёма, будет равен $M = -H/4\pi$. Это примерно в 10^5 раз больше по абсолютной величине, чем удельная намагниченность диамагнитного металла в нормальном состоянии. Эффект Мейснера связан с тем, что при $H < H_k$ в поверхностном слое сверхпроводящего цилиндра появляется круговой незатухающий ток, сила которого как раз такова, что магнитное поле этого тока компенсирует внешнее поле в толще сверхпроводника. Опыт показывает, что в случае больших образцов слабое магнитное поле в условиях эффекта Мейснера проникает в металл на глубину $\delta \cong 10^{-5} - 10^{-6}$ см, именно в этом слое течёт поверхностный ток.

По своему поведению в достаточно сильных полях сверхпроводники подразделяются на две большие группы, так называемые *сверхпроводники 1-го и 2-го рода*.

На рис. 6.3 и 6.4 в несколько идеализированной форме изображены кривые намагничивания $M(H)$, типичные для каждой из этих групп. Кривые относятся к случаю длинных цилиндрических образцов, помещенных в поле, параллельное оси цилиндра. При такой геометрии опыта отсутствуют эффекты размагничивания, и картина, поэтому является наиболее простой. Начальный прямолинейный участок на этих кривых, где $M = -H/4\pi$, соответствует интервалу значений H , на котором имеет место эффект Мейснера. Как видно из рисунка, дальнейший ход кривых $M(H)$ для сверхпроводников 1-го и 2-го рода существенно различается.

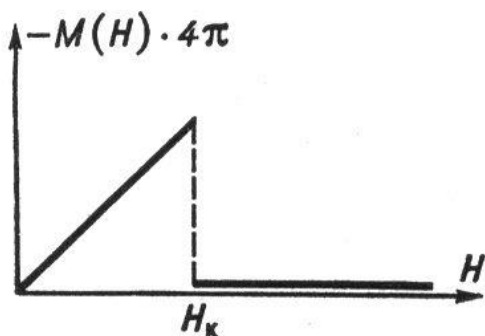


Рис. 6.3. Кривая намагничивания сверхпроводников 1-го рода

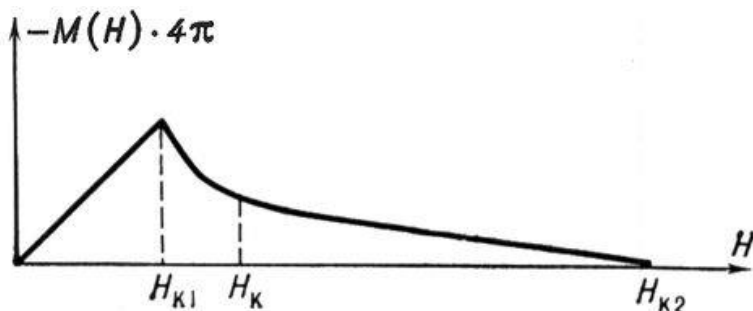


Рис. 6.4. Кривая намагничивания сверхпроводников 2-го рода

Сверхпроводники 1-го рода, которыми являются все достаточно чистые сверхпроводящие металлические элементы (за исключением V и Nb), теряют сверхпроводимость при поле $H = H_K$, когда поле скачком проникает в металл, и он во всём объёме переходит в нормальное состояние. При этом удельный магнитный момент также скачком уменьшается примерно в 10^5 раз. Критическому полю H_K можно дать простое термодинамическое истолкование. При температуре $T < T_K$ и в отсутствии магнитного поля свободная энергия в сверхпроводящем состоянии F_c

ниже, чем в нормальном F_n . При включении поля свободная энергия сверхпроводника возрастает на величину $H^2/8\pi$, равную работе намагничивания, и при $H = H_k$ сравнивается с F_n (в силу малости магнитного момента в нормальном состоянии F_n практически не изменяется при включении поля). Таким образом, поле H_k определяется из условия равновесия в точке перехода:

$$F_c + H_k^2/8\pi = F_n. \quad (6.1)$$

Критическое поле H_k зависит от температуры: оно максимально при $T = 0$ и монотонно убывает до нуля по мере приближения к T_k . На рис. 6.5 изображена фазовая диаграмма на плоскости (H, T) . Заштрихованная область, ограниченная кривой $H_k(T)$, соответствует сверхпроводящему состоянию.

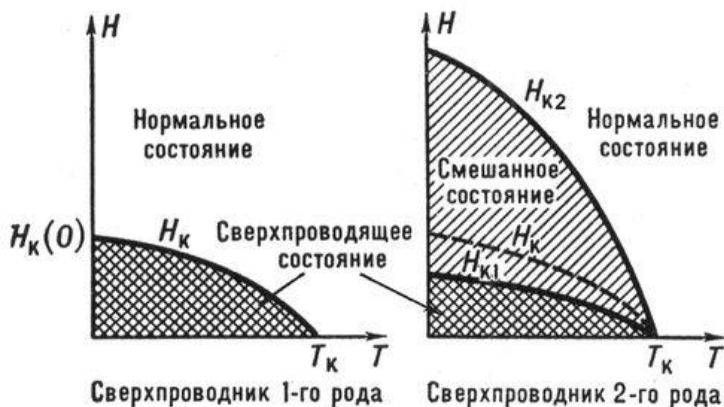


Рис. 6.5. Фазовая диаграмма для сверхпроводников 1-го и 2-го рода

По измеренной зависимости $H_k(T)$ могут быть рассчитаны все термодинамические характеристики сверхпроводника 1-го

рода. В частности, из формулы (6.1) непосредственно получается (при дифференцировании по температуре) выражение для теплоты фазового перехода в сверхпроводящее состояние:

$$Q = T(S_H - S_C) = -T \frac{H_k}{4\pi} \frac{dH_k}{dT}, \quad (6.2)$$

где S - энтропия единицы объёма. Знак Q таков, что теплота поглощается сверхпроводником при переходе в нормальное состояние. Поэтому если разрушение сверхпроводимости магнитным полем производится при адиабатической изоляции образца, то последний будет охлаждаться.

Скачкообразный характер фазового перехода в магнитном поле (рис. 6.3) наблюдается только в случае весьма специальной геометрии опыта: длинный цилиндр в продольном поле. При произвольной форме образца и других ориентациях поля переход оказывается растянутым по более или менее широкому интервалу значений H : он начинается при $H < H_k$ и заканчивается, когда поле во всех точках образца превысит H_k . В этом интервале значений H сверхпроводник 1-го рода находится в так называемом промежуточном состоянии. Он расслаивается на чередующиеся области нормальной и сверхпроводящей фаз, причём так, что поле в нормальной фазе вблизи границы раздела параллельно этой границе и равно H_k . По мере увеличения поля возрастает доля нормальной фазы и происходит уменьшение магнитного момента образца. Структура расслоения и характер кривой намагничивания существенно зависят от геометрических факторов. В частности, для пластинки, ориентированной перпендикулярно магнитному полю, расслоение начинается уже в слабом поле, гораздо меньшем, чем H_k .

С магнитными свойствами сверхпроводников тесно связаны и особенности протекания в них тока. В силу эффекта Мейснера ток является поверхностным, он сосредоточен в тонком слое, определяемом глубиной проникновения магнитного

поля. Когда ток достигает некоторой критической величины, достаточной для создания критического магнитного поля, сверхпроводник 1-го рода переходит в промежуточное состояние и приобретает электрическое сопротивление.

К *сверхпроводникам 2-го рода* относится большинство сверхпроводящих сплавов. Кроме того, сверхпроводниками 2-го рода становятся и сверхпроводящие металлические элементы (сверхпроводники 1-го рода) при введении в них достаточно большого количества примесей. Картина разрушения сверхпроводимости магнитным полем является у этих сверхпроводников более сложной. Как видно из рис. 6.4, даже в случае цилиндрического образца в продольном поле происходит постепенное уменьшение магнитного момента на протяжении значительного интервала полей от H_k , когда поле начинает проникать в толщу образца, и до поля H_k , при котором происходит полное разрушение сверхпроводящего состояния. В большинстве случаев кривая намагничивания такого типа является необратимой (наблюдается магнитный гистерезис). Величина гистерезиса очень чувствительна к технологии приготовления образцов, и в некоторых случаях путём специальной обработки удаётся получить образцы с почти обратимой кривой намагничивания. Поле H_k часто оказывается весьма большим, достигая сотен тысяч эрстед. Что же касается термодинамического критического поля H_k , определяемого соотношением (6.1), то оно для сверхпроводников 2-го рода не является непосредственно наблюдаемой характеристикой. Однако его можно рассчитать, исходя из найденных опытным путём значений свободной энергии в нормальном и сверхпроводящем состояниях в отсутствии магнитного поля. Оказывается, что вычисленное таким способом значение H_k попадает в интервал между H_{k1} и H_{k2} . Таким образом, проникновение магнитного поля в сверхпроводник 2-го рода начинается уже в поле, меньшем, чем H_k , когда условие равновесия (6.1) ещё нарушено в пользу сверхпроводящего состояния. Понять это парадоксальное на первый взгляд явление мож-

но, если принять во внимание поверхностную энергию границы раздела нормальной и сверхпроводящей фаз. В случае сверхпроводников 1-го рода эта энергия положительна, так что появление границы раздела приводит к проигрышу в энергии. Это существенно ограничивает степень расслоения в промежуточном состоянии. Аномальные магнитные свойства сверхпроводников 2-го рода можно качественно объяснить, если принять, что в этом случае поверхностная энергия отрицательна. Именно к такому выводу приводит современная теория сверхпроводимости. При отрицательной поверхностной энергии уже при $H < H_k$ энергетически выгодным является образование тонких областей нормальной фазы, ориентированных вдоль магнитного поля. Возможность реализации такого состояния сверхпроводника 2-го рода была предсказана А. А. Абрикосовым (1952 г) на основе теории сверхпроводимости В. Л. Гинзбурга и Л. Д. Ландау. Позднее им же был произведён детальный расчёт структуры этого состояния. Оказалось, что нормальные области зарождаются в форме нитей, пронизывающих образец и имеющих толщину, грубо говоря, сравнимую с глубиной проникновения магнитного поля. При увеличении внешнего поля концентрация нитей возрастает, что и приводит к постепенному уменьшению магнитного момента. Таким образом, в интервале значений поля от H_{k1} до H_{k2} , сверхпроводник находится в состоянии, которое принято называть *смешанным*.

Фазовый переход в сверхпроводящее состояние в отсутствии магнитного поля. Прямые измерения теплоёмкости сверхпроводников при $H = 0$ показывают, что при понижении температуры теплоёмкость в точке перехода T_k испытывает скачок до величины, которая примерно в 2,5 раза превышает её значение в нормальном состоянии в окрестности T_k (рис. 6.6). При этом теплота перехода $Q = 0$, что следует, в частности, из формулы (6.2) ($H_k = 0$ при $T = T_k$). Таким образом, переход из нормального в сверхпроводящее состояние в отсутствии магнитного поля является фазовым переходом 2-го рода. Из фор-

мулы (6.2) можно получить важное соотношение между скачком теплоёмкости и углом наклона кривой $H_k(T)$ (рис. 6.5) в точке $T = T_k$:

$$C_C - C_H = \frac{T_k}{4\pi} \left(\frac{dH_k}{dT} \right)_{T=T_k}^2, \quad (6.3)$$

где C_C и C_H - значения теплоёмкости в сверхпроводящем и нормальном состояниях. Это соотношение с хорошей точностью подтверждается экспериментом.

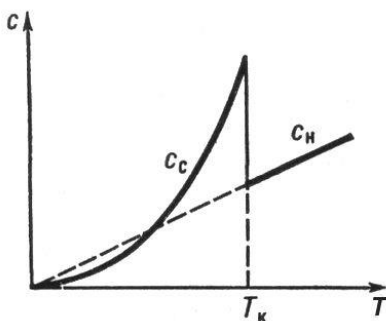


Рис. 6.6. Скачок теплоёмкости сверхпроводника в точке перехода (T_k) в отсутствии внешнего магнитного поля (C_C и C_H - теплоёмкость в сверхпроводящем и нормальном состояниях)

Совокупность экспериментальных фактов о сверхпроводимости убедительно показывает, что при охлаждении ниже T_k проводник переходит в новое состояние, качественно отличающееся от нормального. Исследуя различные возможности объяснения свойств сверхпроводника, особенно эффекта Мейснера, немецкие учёные, работавшие в Англии, Г. и Ф. Лондоны (1934 г.) пришли к заключению, что сверхпроводящее состоя-

ние является макроскопическим квантовым состоянием металла. На основе этого представления они создали феноменологическую теорию, объясняющую поведение сверхпроводников в слабом магнитном поле - эффект Мейснера и отсутствие сопротивления. Обобщение теории Лондонов, сделанное Гинзбургом и Ландау (1950 г), позволило рассмотреть вопросы, относящиеся к поведению сверхпроводников в сильных магнитных полях. При этом было объяснено огромное количество экспериментальных данных и предсказаны новые важные явления. Убедительным подтверждением правильности исходных предпосылок упомянутых теорий явилось открытие эффекта **квантования магнитного потока**, заключённого внутри сверхпроводящего кольца. Из уравнений Лондонов следует, что магнитный поток в этом случае может принимать лишь значения, кратные кванту потока $\Phi_0 = hc/e^*$, где e^* - заряд носителей сверхпроводящего тока, h - постоянная Планка, c - скорость света. В 1961 г. Р. Долл и М. Небауэр и, независимо, Б. Дивер и У. Фейроенк (США) обнаружили этот эффект. Оказалось, что $e^* = 2e$, где e - заряд электрона. Явление квантования магнитного потока имеет место и в случае упомянутого выше состояния сверхпроводника 2-го рода в магнитном поле, большем, чем $H_{к1}$. Образующиеся здесь нити нормальной фазы несут квант потока Φ_0 . Найденная в опытах величина заряда частиц, создающих своим движением сверхпроводящий ток ($e^* = 2e$), подтверждает эффект Купера, на основе которого в 1957 Дж. Бардин, Л. Купер и Дж. Шриффер (США) и Н. Н. Боголюбов (СССР) построили последовательную микроскопическую теорию сверхпроводимости. Согласно Куперу, два электрона с противоположными спинами при определённых условиях могут образовывать связанное состояние (куперовскую пару). Заряд такой пары равен $2e$. Пары обладают нулевым значением спина и подчиняются статистике Бозе - Эйнштейна. Образуюсь при переходе металла в сверхпроводящее состояние, пары испытывают так называемую бозе-конденсацию, и поэтому система куперовских пар обладает

свойством *сверхтекучести*. Таким образом, сверхпроводимость представляет собой сверхтекучесть электронной жидкости. При $T = 0$ связаны в пары все электроны проводимости. Энергия связи электронов в паре весьма мала: она равна примерно $3,5kT_k$, где k - постоянная Больцмана. При разрыве пары, происходящем, например, при поглощении кванта электромагнитного поля или кванта звука (фонона), в системе возникают возбуждения. При отличной от нуля температуре имеется определённая равновесная концентрация возбуждений, она возрастает с температурой, а концентрация пар соответственно уменьшается. Энергия связи пары определяет так называемую щель в энергетическом спектре возбуждений, т. е. минимальную энергию, необходимую для создания отдельного возбуждения. Природа сил притяжения между электронами, приводящих к образованию пар, вообще говоря, может быть различной, хотя у всех известных сверхпроводников эти силы определяются взаимодействием электронов с фононами. Тем не менее, развитие теории сверхпроводимости стимулировало интенсивные теоретические поиски других механизмов. В этом плане особое внимание уделяется так называемым нитевидным (одномерным) и слоистым (двумерным) структурам, обладающим достаточно большой проводимостью, в которых имеются основания ожидать более интенсивного притяжения между электронами, чем в обычных сверхпроводниках, а, следовательно, - и более высокой температуры перехода в сверхпроводящее состояние.

Эффект Джозефсона – протекание сверхпроводящего тока через тонкий слой изолятора, разделяющий два сверхпроводника (так называемый контакт Джозефсона). Если ток не превышает критического значения, то падение напряжения на контакте отсутствует, если превышает – то возникает падение напряжения и контакт излучает электромагнитные волны (рис. 6.7).

Эффект предсказан на основе теории сверхпроводимости английским физиком Б. Джозефсоном в 1962 г, обнаружен аме-

риканскими физиками П. Андерсоном и Дж. Роуэллом в 1963 г. Электроны проводимости проходят через диэлектрик (обычно плёнку оксида металла толщиной около $10 \text{ \AA}$) благодаря **туннельному эффекту**. **Туннелирование** – прохождение через потенциальный барьер микрочастицы, энергия которой меньше высоты барьера.

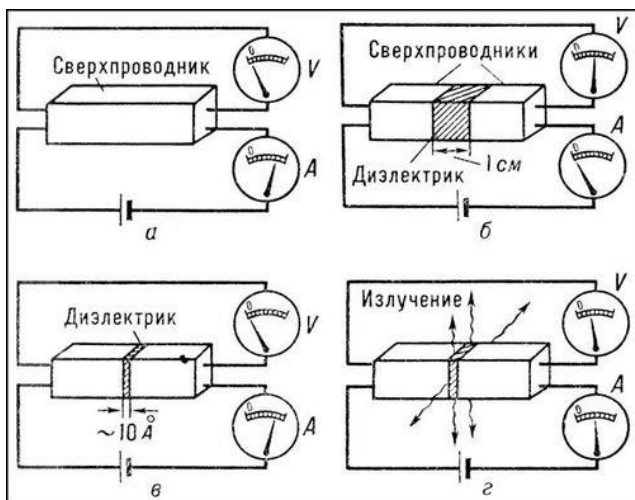


Рис. 6.7. Схемы экспериментов, объясняющих эффект Джозефсона: *а* - падение напряжения на включенном в электрическую цепь сверхпроводнике равно нулю; *б* - при значительной толщине диэлектрика, разделяющего сверхпроводники, тока в цепи нет, вольтметр показывает эдс батареи; *в* - при малом зазоре между сверхпроводниками (около $10 \text{ \AA}$) существует ток сверхпроводимости (стационарный эффект Джозефсона)); *г* - при наличии тока в цепи и напряжения на контакте Джозефсона в нём возникает электромагнитное излучение (нестационарный эффект Джозефсона)

Если ток через контакт Джозефсона не превышает определённого значения, называемого критическим током контакта, то падение напряжения на контакте отсутствует (так называемый стационарный эффект Джозефсона, см. рис. 6.7, в).

Если же через контакт пропускать ток, больший критического, то на контакте возникает падение напряжения V , и контакт излучает электромагнитные волны (нестационарный эффект Джозефсона, рис. 6.7, з). Частота излучения ν связана с напряжением на контакте соотношением $\nu = 2eV/h$, где e - заряд электрона, h - постоянная Планка. Возникновение излучения связано с тем, что объединённые в пары электроны, создающие сверхпроводящий ток, при переходе через контакт приобретают избыточную по отношению к основному состоянию сверхпроводника энергию $2eV$. Единственная возможность для пары электронов вернуться в основное состояние - это излучить квант электромагнитной энергии $h\nu = 2eV$.

Аналогичный эффект наблюдается и в том случае, когда сверхпроводники соединены тонкой перемычкой (мостиком или точечным контактом) или между ними находится тонкий слой металла в нормальном состоянии. Такие системы вместе с контактами Джозефсона называют *слабосвязанными сверхпроводниками*.

На основе эффекта Джозефсона созданы сверхпроводящие интерферометры, содержащие две параллельно включённые слабые связи между сверхпроводниками. Особый, квантовый характер сверхпроводящего состояния приводит к интерференции сверхпроводящих токов, прошедших через слабые связи. При этом критический ток оказывается зависящим от внешнего магнитного поля, что позволяет использовать такое устройство для чрезвычайно точного измерения, до $8 \cdot 10^{-7}$ - $8 \cdot 10^{-8}$ А/м (10^{-8} - 10^{-9} э), магнитных полей.

Имеются также возможности применения слабосвязанных сверхпроводников в качестве легко перестраиваемых в широком диапазоне частот маломощных генераторов, чувстви-

тельных детекторов, усилителей и др. приборов СВЧ- и далёкого ИК-диапазонов.

6.2. Исторические аспекты криоэлектроники

Вопрос о минимально возможной температуре впервые привлек внимание исследователей еще около ста лет назад. Ныне охлаждение до низких температур широко используется на практике в различного рода устройствах и системах, особенно в радиоэлектронной аппаратуре. Это стало возможным благодаря успешному решению проблемы сжижения газов.

Хотя многие газы сжижаются сравнительно легко, первоначально считалось, что некоторые газообразные вещества при любых условиях сохраняют свое состояние неизменным. Однако во второй половине XIX в. ученые добились определенных успехов в исследовании проблемы перехода веществ из газообразного состояния в жидкое. В частности, было установлено, что каждый газ характеризуется некоторой критической температурой, выше которой его невозможно сжижать только путем повышения давления. В 1898 г. впервые был получен жидкий газ (водород), а в 1908 г. голландский физик Камерлинг-Оннес осуществил сжижение гелия, завершив тем самым первый этап работ по сжижению газов.

В последующие десятилетия началось быстрое развитие методов использования новых криогенных жидкостей - сжиженных газов в фундаментальных научных исследованиях в промышленности. От лабораторных экспериментов, которые, кстати, привели к открытию явления сверхпроводимости, перешли к производству сжиженных газов в промышленных масштабах. Их стали выпускать тоннами из смесей газов, например воздуха (разделяя его на составляющие, - кислород, азот и инертные газы).

Чисто научный интерес и потребности промышленности стимулировали исследования физических свойств материалов при глубоком охлаждении.

Такого рода исследования оказались особенно важными для радиоэлектроники, где в 40 - 50-х годах появилось много новых материалов, в частности полупроводников. Десятилетием позже интерес специалистов по радиоэлектронике к использованию криогенных жидкостей еще более возрос. С их помощью удалось улучшить параметры (в частности, повысить чувствительность) обычных радиотехнических схем и создать принципиально новые радиоэлектронные устройства, например, мазер.

Наиболее распространенные охлаждающие агенты (криогены) при нормальном атмосферном давлении имеют следующие температуры кипения: He – 4 °K; H – 20 °K; N – 77 °K; O – 90 °K; CO₂ – 195 °K (симблирует).

Четкого и однозначного определения интервала криогенных (низких) температур нет, но чаще всего его ограничивают областью, простирающейся примерно от 100 °K до абсолютного нуля (0 °K). Иногда особо выделяется интервал 20 – 0 °K, называемый интервалом гиперкриогенных (сверхнизких) температур. Большинство криогенных систем, используемых в радиоэлектронике, работает при нормальной температуре кипения жидкого гелия, то есть приблизительно при 4 °K.

Одной из важнейших проблем современной электроники считается проблема уменьшения степени неупорядоченности структуры вещества. Для этой цели применяется глубокое охлаждение.

Материалы, применяемые в электронике, обычно оценивают с точки зрения упорядоченности их химической (чистоты) и геометрической (кристаллической) структуры, а также упорядоченности движения частиц вещества (температуры). Любые факторы, вызывающие отклонения в движении носителей

заряда между двумя точками, уменьшают эффективную силу тока.

Всякого рода неупорядоченность структуры способствует таким отклонениям, увеличивая тем самым электрическое сопротивление материала. В сложных электронных системах требуется, чтобы электрический сигнал заданной формы проходил через материал без искажения. Однако неупорядоченность структуры материала приводит к уменьшению амплитуды сигнала и изменению его формы, так как ее влияние носит случайный характер. Например, плавное синусоидальное колебание становится искаженным, неровным, и в системе возникают нежелательные сигналы (помехи).

Посмотрим, как различные типы неупорядоченности структуры проводника влияют на его удельное сопротивление.

Нарушения химической структуры, обусловленного присутствием даже незначительного количества примеси, достаточно, чтобы заметно увеличить удельное сопротивление металлического проводника. Так, добавление к меди 0,1 % фосфора приводит к уменьшению ее проводимости примерно на 50 %, тогда как введение 1 % кадмия (для получения сплава большей механической прочности) уменьшает его проводимость лишь немногим более чем на 10 %.

В химически чистом материале геометрический порядок его внутренней структуры может быть нарушен за счет остаточных напряжений (деформаций), возникших при механической обработке. Поэтому после холодной протяжки удельное сопротивление меди обычно возрастает на несколько процентов.

Подобные нарушения физической упорядоченности, обусловленные остаточными напряжениями, можно устранить или, по крайней мере, уменьшить путем отжига материала. Влияние различных типов геометрической упорядоченности особенно заметно в несимметричных кристаллах, например в цинке, где различие в удельном сопротивлении для двух взаимно перпен-

дикулярных направлений в кристаллической решетке достигает 4 %.

Взаимосвязь химической и геометрической упорядоченности мы можем наблюдать в экспериментах по получению сплавов меди с золотом. При увеличении концентрации золота удельное сопротивление случайной смеси возрастает. Но если случайную смесь, содержащую около 25 % золота, отжигать в течение продолжительного времени, то обнаруживается тенденция к перегруппировке атомов в упорядоченную структуру сплава Cu_3Au . Удельное сопротивление резко падает, хотя и остается выше, чем у чистой меди

Говоря о криоэлектронике, основное внимание следует уделить кинетической упорядоченности (упорядоченности движения) частиц, так как понижение температуры обычно позволяет свести эту неупорядоченность к минимуму. В проводнике кинетический беспорядок связан со случайным движением свободных электронов, а в любом твердом теле он обусловлен тепловыми колебаниями атомов в кристаллической решетке. При низких температурах оба типа неупорядоченности значительно уменьшаются.

В некотором отношении тепловое колебание атомов в твердом теле можно рассматривать как своеобразное нарушение геометрического порядка, поскольку в результате таких колебаний нарушается регулярный шаг кристаллической решетки. Как показал де Бройль, движению каждого атома кристаллической решетки можно приписать определенные волновые свойства.

Таким образом, в любом твердом теле существуют упругие волны, распространяющиеся со скоростью звука. Эти волны представляют собой как бы локализованные, сосредоточенные пакеты (кванты) тепловой энергии, подобно тому, как фотоны являются локализованными пакетами электромагнитной энергии. Кванты тепловой энергии называются фононами; как и фотон, каждый фонон характеризуется энергией hf (где f - частота,

соответствующая длине волны фонона) и количеством движения (импульсом). В определенных случаях фонон удобно рассматривать как частицу.

Таким образом, можно считать, что твердое тело содержит хаотично, беспорядочно перемещающиеся *фононы различных энергий*, которые соударяются с подвижными носителями заряда, создающими в материале электрический ток.

При понижении температуры число таких фононов в материале уменьшается и поэтому его удельное сопротивление падает. Фононы играют в веществе определенную положительную роль: в процессе рекомбинации электронно-дырочной пары они обеспечивают сохранение количества движения, благодаря чему становится возможным процесс рекомбинационной люминесценции.

Полупроводники, используемые в электронике, обычно имеют очень высокую степень химической (а часто также и геометрической) упорядоченности.

Низкая температура позволяет значительно уменьшить в них нежелательный собственный ток, но для ионизации атомов и, следовательно, образования свободных носителей, как правило, необходимо определенное количество тепловой энергии. Точно так же, чтобы свести к минимуму шумы электронной лампы (то есть обеспечить беспрепятственное движение электронов от катода к аноду), необходимо обеспечить надлежащую геометрию проводников в ее управляющих сетках. Но в то же время общеизвестно, что для нормальной работы лампы катод должен быть разогрет до высокой температуры, а потому ток эмиссии характеризуется высокой степенью кинетической неупорядоченности, которая и обуславливает шумы.

Однако наиболее интересные и потенциально важные особенности радиоэлектроники низких температур сводятся к исключительным, тонким ситуациям, которые возникают только тогда, когда неупорядоченность обычных типов сведена к минимуму.

В сверхпроводниках между парами электронов существует особый вид упорядоченности, благодаря этому сопротивление материала становится равным нулю и внутри него не возникает магнитного поля. Но если температура материала достаточно высока, фононы разрушают эти упорядоченные пары электронов и сверхпроводящее состояние исчезает.

Аналогичным образом упорядоченное состояние нарушается и материал возвращается в нормальное состояние и тогда, когда плотность тока или напряженность внешнего магнитного поля превысит критическое значение.

В лазере особая форма упорядоченности проявляется в том, что на более высоком из двух энергетических уровней находится значительно больше атомов, чем на более низком. Однако эта неустойчивая форма равновесия быстро нарушается из-за тепловой неупорядоченности, после чего вновь восстанавливается нормальное равновесное состояние, при котором преобладают атомы с низкими энергиями. Требуемое состояние неустойчивого равновесия можно обеспечить лишь путем подачи в систему энергии извне, причём количество этой энергии тем меньше, чем ниже температура.

Принципы, на которых основываются сверхпроводящие и лазерные системы, известны более полувека, но только в последние десятилетия они получили широкое техническое развитие. Мазер применяется в современных системах радиосвязи, был достигнут значительный прогресс в области применения сверхпроводников в различных радиоэлектронных системах и устройствах: больших электронно-вычислительных машинах, крупных электродвигателях и генераторах, электромагнитах, трансформаторах и линиях передач электроэнергии. Открытия, вроде эффекта Джозефсона, также нашли своё применение в области очень низких температур, где беспорядочные тепловые возмущения настолько малы, что становится возможным наблюдать и использовать весьма тонкие, едва уловимые явления.

В последние десятилетия все шире разворачивались работы по созданию новых электронных приборов и сложных систем, основанных на свойствах твердого тела при криогенных температурах. Этому способствуют не только успехи в физике низких температур и технике глубокого охлаждения, но и появление новых проблем, которые не решаются другими методами.

Криоэлектроника охватывает широкий круг вопросов: от взаимодействия электромагнитных волн с твердым телом при сильном ослаблении тепловых колебаний решетки до методов охлаждения и конструирования криоэлектронных автономных приборов с корпусом-криостатом.

6.3. Основные направления криоэлектроники

Явления физики твердого тела при низких температурах, дающих доступ к глубинным квантовым свойствам вещества в конденсированном состоянии, совместно с явлениями физики низких температур, выделившейся в самостоятельную науку, составили научную базу криоэлектроники. Хотя слово «криос» означает просто «холод», криогенными принято считать лишь те температуры, при которых тепловые колебания решетки вещества сильно ослабевают и в веществах начинают проявляться дальний порядок и эффекты, замаскированные тепловым движением частиц при обычных температурах. Это и приводит, в конечном счете, к тем удивительным особенностям сверхпроводников, в которых квантовые эффекты проявляются в макроскопических масштабах, а также к целому ряду качественно новых явлений и эффектов в других материалах. Область криогенных температур, при которых четыре газа (азот, неон, водород и гелий) превращаются в криогенные жидкости, можно условно разделить на четыре температурные зоны: азотную (80 К), неоновую (27 К), водородную (20 К) и гелиевую (около 4,2 К). Температуры много ниже точки кипения жидкого гелия выделялись в отдельную область «сверхнизких» температур, при-

чем многие эффекты в твердом теле являются характерными только для этой, пока еще экзотической области.

Деления криоэлектроники на направления можно производить в соответствии с типом применяемого материала: например, *сверхпроводниковая криоэлектроника* на основе сверхпроводников, *полупроводниковая криоэлектроника* на основе охлажденных полупроводников и полуметаллов и т. д.

Однако возможен и другой принцип, пробивающий себе дорогу: по выполняемым криоэлектронными приборами функциям, по диапазонам частот, по технологическим методам, положенным в основу изготовления прибора.

Все криоэлектронные приборы в зависимости от температуры охлаждения, применяемых материалов и явлений в них могут быть разделены на изделия (приборы) азотного, неоновом, водородного и гелиевого уровней охлаждения. Уровень охлаждения во многом определяет параметры и области применения криоэлектронных изделий.

Еще в 40-х годах были предприняты попытки создать высокочувствительные, «нешумящие» приемники для индикации слабого теплового излучения в ИК диапазоне. Так, появились угольный болометр, охлаждаемый до температуры жидкого гелия, болометр на основе *p*-Ge, легированного гелием, работающий при 2,15 °K, а затем сверхпроводящий приемный элемент на основе тонкой фольги из нитрида ниобия.

Были созданы первые переключатели со сверхпроводящим соленоидом. В 1954 г. произошло большое событие: Бакк предложил принципиально новый электронный прибор и дал ему имя «криотрон». Вслед за этим прибором на базе механизма возникновения отрицательного сопротивления в полупроводниковом кристалле, охлажденном до такой степени, что примеси в нем были «выморожены», был предложен еще один новый прибор - «криосар».

Проблема использования квантовых резонансных свойств твердого тела при низких температурах для приема сверхсла-

бых СВЧ сигналов привела к созданию квантовых парамагнитных усилителей (мазеров). Мазеры появились вскоре после того, как Н. Г. Басов и А. М. Прохоров предложили так называемый «трехуровневый метод» (метод «накачки») создания избыточной населенности верхнего энергетического уровня, необходимый для получения эффекта «отрицательного поглощения», а Н. Бломберген предложил использовать в качестве активного вещества для таких мазеров парамагнитные кристаллы, находящиеся при гелиевых температурах. Вскоре А. М. Прохоровым, Н. В. Карловым, А. А. Маненковым и др. были созданы резонаторные парамагнитные СВЧ усилители, с помощью которых была продемонстрирована перспективность комплексного использования двух криоэлектронных материалов: парамагнетиков и сверхпроводников. В. Б. Штейншлейгером, Г. С. Мисежниковым и др. были разработаны мазеры бегущей волны, в которых криоэлектронные элементы защиты входа усилителя были построены на полупроводниках. Работы по исследованию вырожденных и невырожденных p - n -переходов при низких температурах, широко известные работы по физике низких температур в Институте физических проблем, Физическом институте АН СССР, Институте радиотехники и электроники, Физико-техническом институте АН СССР, работы украинских физиков проложили дорогу электронике к новым явлениям, возникающим при сильном ослаблении тепловых колебаний решетки.

В 1963 г. в СССР вышел в свет первый научно-технический сборник по охлаждаемым электронным приборам и сложным устройствам в корпусе - криостате. Вслед за ним в 1964 г. в США группой в составе Т. Шмидта и др. был также выпущен сборник, в названии которого впервые было напечатано «криогенная электроника». Если до этого применялись различные термины: «радиотехника низких температур», «криотроника», «радиоэлектроника сверхнизких температур» и др., то теперь положение изменилось. Стало ясно, что назрела

пора оформления нового перспективного направления электроники, основанного на сверхпроводимости и других явлениях в твердом теле при криогенных температурах, которому окончательно присвоили название «криоэлектроника» или «криогенная электроника». В попытках заглянуть в будущее криоэлектроники, предпринятых за последние 15 лет в ряде обзорных и проблемных работ, можно выделить два крупных этапа.

Первый этап относится к 1962 - 1966 гг., когда в СССР и США появились оптимистические прогнозы вскоре после разработки дискретных криоэлектронных приборов: криотронных пленочных схем, детекторов ИК диапазона и СВЧ усилителей на охлажденных полупроводниковых структурах с *p-n*-переходом. Этому этапу предшествовало создание микроскопической теории сверхпроводимости, установление, ее связи с феноменологической теорией Гинзбурга - Ландау (ГЛ), открытие квантовых макроскопических явлений, включая открытие эффекта Джозефсона, синтез новых сверхпроводящих материалов и разработка квантовых парамагнитных СВЧ усилителей со сверхпроводящим соленоидом в гелиевом криостате.

Второй этап прогнозов (1969 - 1973 гг.) был стимулирован развитием технологии полупроводниковой микроэлектроники, созданием работоспособных сверхпроводящих туннельных, мо-стиковых переходов на эффекте Джозефсона, структур на узкозонных соединениях (InSb, InAs) и твердых растворах (BiSb, CdHgTe, PbSnTe), а также нелинейных кристалло-параэлектриков, которые не переходят в сегнетоэлектрическую фазу при низких температурах (SrTiO₃), и сегнетоэлектриков с низкой температурой Кюри-Вейсса. Анализ работ по криоэлектронике за последние 10 - 15 лет показывает, что основные идеи этих прогнозов подтвердились, хотя огромные успехи микроэлектроники, открывая новые технологические возможности, в ряде случаев поставили под сомнение целесообразность широкого применения некоторых криоэлектронных приборов, например пленочных криотронов. Криоэлектроника стала при-

влекать не только исследователей, работающих в области электроники, но и специалистов по физике твердого тела, которые ранее электронными приборами не увлекались, специалистов-«комплексников», которые ранее стремились любой ценой избавиться от необходимости внедрения криогенных элементов в аппаратуру, специалистов в области космонавтики и астрономии.

Это во многом объясняется успехами космической криогенной техники и тем, что с каждым пятилетием все глубже во все сферы жизни человека проникают средства ИК диапазона волн. Действительно, в наши дни трудно указать область науки и техники, в которой не применялись бы инфракрасные устройства. Специфические особенности ИК излучения как носителя информации ставят его в один ряд со светом и радиоизлучением. Поскольку тепловое излучение тел связано непосредственно с их термодинамическим состоянием, оно содержит полные сведения о температуре источника. Кроме того, спектральный состав излучения зависит от материала поверхности и вида излучаемых различными телами частиц, например газов. Поэтому он несет в себе информацию о веществе и состоянии поверхности источника излучения. Эти качества ИК излучения, позволяющие выявлять внутренние свойства объектов и наблюдать глубинные процессы, протекающие в них, способствуют привлечению его для решения таких задач, в которых получить указанную информацию с помощью других сигналов не удастся. Особенно заметный сдвиг в развитии криоэлектронной ПК техники был сделан в связи с изобретением охлаждаемых твердотельных лазеров ИК диапазона и освоением космического пространства. Этот сдвиг был вызван еще и тем, что в космосе имеются идеальные условия для распространения ИК излучения и сравнительно однородный фон неба, отсутствует поглощающая и рассеивающая среда и имеются условия для использования естественного охлаждения приёмных элементов за счет тепловой радиации либо за счет применения отвердевших газов.

Космическая связь, локация и наведение кораблей, поиск и обнаружение теплоизлучающих объектов, дистанционное измерение температур, спектральный анализ атмосферы планет, тепловидение в медицине, промышленности и геологии - все это новые задачи, решать которые призвана криоэлектронная техника ИК диапазона. Другое направление, вызвавшее появление новых средств и криоэлектронных приборов - это дистанционные исследования природных ресурсов Земли и планет во всём спектре ИК волн: от ближнего ИК до субмиллиметрового диапазона.

Инфракрасные системы дистанционного зондирования развиваются столь стремительно, что почти все отрасли народного хозяйства, включая промышленность, морской флот, сельское хозяйство, геологию будут получать все больше ощутимой пользы от внедрения этих систем. Не менее быстро развиваются космические радиотелескопы, как автоматические, так и обслуживаемые космонавтами. Для того, чтобы эти телескопы, позволяющие изучать объекты в наименее доступных с поверхности Земли дальнем ИК диапазоне и участке субмиллиметровых волн, могли длительное время работать в космосе, их криоэлектронная приемная часть должна представлять единое целое с криогенной установкой замкнутого цикла. Совсем недавно бортовая криогенная установка даже азотного уровня охлаждения была мечтой, а теперь при полете орбитального научно-исследовательского комплекса «Салют-6»-«Союз-27» на борту станции уже успешно работала криогенная установка, обеспечивающая получение температуры 4,2 °К для криоэлектронного приемника субмиллиметрового диапазона волн. Проведение космонавтами Ю. Романенко и Г. Гречко испытания впервые созданной учеными Физического института АН СССР и советскими специалистами по микрокриогенной технике малогабаритной криоэлектронной приемной системы гелиевого уровня, включение, юстировка и осуществление измерений на телескопе открыли новую страницу в криоэлектронике. Мощным до-

полнительным толчком послужили запуски не только на эллиптические, но и на стационарные орбиты спутников-ретрансляторов, позволившие создать во многих странах спутниковые системы связи и телевидения и начать продвижение рабочих частот спутниковых систем в область все более высоких частот, включая диапазон миллиметровых волн и в перспективе дальний ИК диапазон. Энергетический голод заставил человечество срочно искать новые источники энергии, и взоры обратились к криогенному газу - водороду, являющемуся прекрасным топливом, - назрела пора водородной энергетики.

Криоэнергетика, криобиология, криохимия, криомедицина стремительно возникали, усиливая всеобщую тенденцию к использованию в технике свойств веществ при низких температурах.

По мере того как в радиоэлектронике назревал коренной поворот, обусловленный развитием технологической базы микроэлектроники, это тяготение к низким температурам охватило и микроэлектронное аппаратостроение. Одна за другой возникали новые проблемы, решение которых известными методами интегральных схем при обычных температурах было в принципе невозможно или настолько затруднено, что их практическая реализация ставилась под сомнение. В то же время одно за другим следовали открытия новых явлений в пленочных структурах при низких температурах, не реализованных в микроэлектронике. Однако криоэлектроника все-таки развивалась не так быстро, как другие ветви микроэлектроники. Причин, тормозивших ее развитие, было немало, прежде всего: недостаточная изученность электронных процессов в охлажденных структурах и пленках на базе твердого тела, недостаточность реальных конструкторско-технологических идей по созданию интегральных электронных приборов на основе этих процессов и особенно надежных, воспроизводимых многоэлементных, многослойных интегральных схем с субмикронными зазорами, а также практических методов снижения удельного веса затрат на

охлаждение интегральных приборов до уровня затрат на обычное термостатирование и увеличение срока непрерывного действия охлажденных устройств. Поэтому криоэлектроника является комплексной областью знаний и включает несколько основных направлений: *криоэлектронное материаловедение; СВЧ криоэлектронику на объемных компонентах; сверхпроводниковую криоэлектронику; криоэлектронную ИК технику, интегральную криоэлектронику и технику криостатирования*. Рассмотрим основные из данных направлений.

Криоэлектронное материаловедение охватывает изучение электронных и магнитных явлений в охлажденных твердых телах, в том числе и в отвердевших газах, разработку технологии и синтез новых материалов с заданными свойствами в области криогенных температур с целью создания новых дискретных криоэлектронных элементов, функциональных радиоэлектронных приборов и микроохладителей.

СВЧ криоэлектроника включает создание нового класса микроприборов: охлаждаемых параметрических и транзисторных усилителей, смесителей, детекторов и сложных многофункциональных приемных модулей на объемных сверхпроводящих, полупроводниковых и других компонентах, представляющих сочетание фильтров, усилителей, циркуляторов, конструктивно объединенных в одной оболочке - криостате и связанных с криогенной установкой. СВЧ криоэлектроника на объемных компонентах является большим комплексным направлением и охватывает весьма широкий круг задач: от технологии создания активных и пассивных СВЧ элементов до разработки функциональных приборов и сложных приемных модулей, являющихся по существу самостоятельными радиоприемными устройствами.

Сверхпроводниковая криоэлектроника, начавшаяся с создания криотрона, развивалась по пути разработки дискретных приборов, основанных на сверхпроводимости, с уникальными характеристиками: сверхпроводящих СВЧ резонаторов с доб-

ротностью до 109, СВЧ линий задержки и коаксиальных кабелей, практически не имеющих потерь, мощных микромагнитов. Выдающимся достижением стало создание на основе эффекта Джозефсона сверхпроводящих магнитометров, обладающих недостижимыми прежде параметрами, индикаторов сверхмалых напряжений и токов, а также детекторов субмиллиметрового диапазона волн.

Криоэлектронная ИК техника вначале тоже включала дискретные элементы: охлаждаемые тепловые ИК приемники (болометры), спектральный диапазон которых зависит от характеристик оптических фильтров, и фотонные, селективные, ИК приемники, основанные на применении собственных узкозонных и примесных полупроводников, фоторезистивных и фотovoltaических свойств охлажденных структур в различных участках ИК диапазона.

Поток открытий и идей в физике низких температур, физике тонких пленок, хлынувший после создания микроскопической теории сверхпроводимости и синтеза низкотемпературных материалов, успехи технологии распахнули двери и новый мир. Симбиоз новейшей технологии микроэлектроники с физическими принципами и материалами криоэлектроники привел к переходу от дискретного уникального криоприбора к интегральному криоэлектронному модулю, т. е. к интегральной криоэлектронике. Родились новейшие направления **интегральной криоэлектроники** со своими проблемами и перспективами, из которых наибольшее развитие получают:

- интегральная криоэлектроника ИК диапазона (приборы с зарядовой связью, многоэлементные ИК приемники, ИК лазеры и др.);

- интегральная СВЧ криоэлектроника (интегральные схемы СВЧ усилителей, циркуляторов, фильтров, смесителей и др.);

- интегральная криоэлектроника на основе слабосвязанных сверхпроводников для вычислительной техники (интегральные схемы логики и памяти).

Значительное увеличение удельного веса работ по интегральной криоэлектронике отражает суть нового этапа в развитии криоэлектроники, обусловленного успехами технологии пленочных и полупроводниковых схем микроэлектроники. Использование достижений технологии изготовления интегральных схем в криоэлектронике открыло пути комплексной микроминиатюризации ряда электронной приемной аппаратуры при одновременном качественном улучшении ее основных параметров. Такому положению способствуют глубинные процессы, происходящие в электронике.

- интеграция большого числа элементов в одном криостатируемом корпусе;

- создание многокомпонентных гетероструктур, в том числе на основе узкозонных материалов;

- интеграция явлений, функций и разнородных материалов в одной структуре на основе контактов сверхпроводник - полупроводник, параэлектрик - сверхпроводник;

- применение криогенной технологии (крионасосов, криогенного охлаждения подложек, охлаждения химических веществ для проведения уникальных реакций методом туннелирования при низких температурах) для создания криоэлектронных элементов. Исчезновение активного сопротивления в сверхпроводниках при криогенных температурах в широком спектре частот позволяет практически полностью устранить тепловые потери, повысить КПД элементов и создать резонаторы с добротностью до $10^8 - 10^{12}$ вместо $10^3 - 10^4$ на частотах вплоть до 10 - 30 ГГц. На основе эффекта Джозефсона и явлений в контактах сверхпроводник - полупроводник могут быть разработаны высокочувствительные датчики, измеряющие напряжения 10^{-16} В, видеодетекторы миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн с чувствительностью 10^{-15} Вт/Гц^{1/2}, тонко-

пленочные интегральные схемы памяти и логики с быстродействием 10^{-11} с, работающие почти без выделения тепла, магнитометры с чувствительностью на 5 порядков выше, чем у наилучших известных приборов.

Вымораживание примеси в полупроводнике при уменьшении тепловой энергии решетки ниже энергии ионизации примеси, устранение собственной проводимости в узкозонных полупроводниках, токов термоэлектронной эмиссии в барьерах Шоттки за счет охлаждения открывают пути для приема излучений в недоступных кремниевым фотодиодам и ПЗС участках спектра, вплоть до дальнего ИК диапазона. Кремниевые ПЗС с барьерами Шоттки при азотных температурах охватывают диапазон до 3,5 мкм, ПЗС на основе InSb и кремниевые ПЗС, легированные In, до 3 - 5 мкм, гибридные ПЗС с применением HgCdTe, PbSnTe имеют в дальнем ИК диапазоне пороговую чувствительность, приведенную к единичной фотоприемной площадке 1 см^2 , при азотных температурах порядка $10^{-10} - 10^{-11} \text{ Вт/Гц}^{1/2}$, если отношение сигнал/шум равно 1. Глубокое охлаждение решетки твердого тела приводит к значительному уменьшению тепловых шумов, являющихся принципиальным ограничением при повышении чувствительности электронных приборов, особенно в СВЧ и ИК диапазонах. Шумовая температура охлажденных полупроводниковых усилителей может достигать 5 - 20 °К в широком диапазоне частот, а шумовая температура смесителя на контакте полупроводник - сверхпроводник на частотах порядка 10^{10} Гц составляет при гелиевых температурах рекордно малую величину - около 13 °К, гетеродинный приемник лазерного излучения имеет при 77 °К чувствительность около $10^{-20} \text{ Вт/Гц}^{1/2}$ в ИК диапазоне.

Интенсивное развитие интегральной криоэлектроники тесно связано с *созданием криостатов* с жидким и твердым хладагентом и микрокриогенных систем с замкнутым циклом, не требующих периодического пополнения жидким или газообразным хладагентом. Создание криостатов с охладителями ти-

па Макмагона - Джиффорда позволило надежно освоить диапазон на стыке водородных и гелиевых температур, появились микрокриогенные системы гелиевого уровня. Криостаты с дроссельными микроохладителями после применения в них газовых смесей становятся конкурентоспособными по сравнению с другими системами. Начинается внедрение гибридных электронных охладителей на основе эффектов Пельтье, Эттингсгаузена. Существенной особенностью этих охладителей является слабая зависимость относительного термодинамического КПД от холодопроизводительности, в то время как соответствующий коэффициент газовых машинных охладителей резко снижается при уменьшении холодопроизводительности. Таким образом, можно будет снять ограничение с минимально достижимой холодопроизводительности, что, в свою очередь, уменьшает размеры всей охлаждающей системы. Именно в области криогенных систем малой холодопроизводительности электронное криостатирование, в задачи которого входит создание криогенных твердотельных электронных микроохладителей на различных уровнях температур вплоть до сверхнизких, будет, по-видимому, наиболее конкурентоспособным.

Интегральная криоэлектроника позволит в дальнейшем объединить в одном твердотельном модуле электронную охлаждаемую схему с электронным охладителем, что является способом создания полностью твердотельных криоэлектронных интегральных схем. В такой необычной схеме охлаждающая часть также может быть выполнена методами интегральной технологии и иметь один и тот же источник питания. При этом предварительное охлаждение может осуществляться не электронными методами, что важно для разработки микроэлектронных систем с большой степенью интеграции, например антенных фазированных решеток. Развитие интегральной криоэлектроники как новой отрасли микроэлектронной техники непрерывно ставит перед исследователями новые задачи:

- создание электронных приборов с принципиально новыми свойствами на основе открытых физических низкотемпературных явлений путем использования технологии интегральных полупроводниковых схем;

- изменение физических свойств структур за счет глубокого охлаждения для получения принципиально нового прибора;

- создание новых конструктивных и технологических методов с целью сочетания в одном электронном функциональном модуле свойств криоэлектронного прибора и микроохладителя;

- комплексная микроминиатюризация охлаждаемых многофункциональных узлов аппаратуры с одновременным улучшением ее электрических параметров.

Большое внимание наука уделяет сейчас разработки способов получения сверхчистых металлов, анализа их чистоты и изучения их свойств. Например, титан, висмут, вольфрам, хром, молибден, тантал, цирконий долго считались хрупкими. В чистом же виде они оказались пластичными и прочными. И чем выше чистота полученных образцов, тем больше вероятность обнаружения «маскируемых» примесями подлинных свойств металлов.

В лабораториях Института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов получены монокристаллы многих сверхчистых металлов - меди и серебра, никеля и кобальта, висмута и свинца, индия, сурьмы, самария. Их проба чистоты чрезвычайно высока - до 99,999999 процента.

Такая почти идеальная чистота удовлетворяет требованиям микроэлектроники, где металлы находят все более широкое применение.

Жесткие требования микроэлектроники к чистоте используемых металлических материалов связаны с тем, что сверхчистый металл ведет себя почти как сверхпроводник, помехи электронам проводимости создают «чужие» атомы. А это значит, что при отсутствии таких помех, т.е. при работе со сверх-

чистыми металлами, не возникает (или, точнее, значительно слабее проявляется) проблема отвода тепла. Кроме того, что очень важно для электронно-вычислительной техники, непрерывно циркулирующий поток информации в виде заряда, волны и пр. в схеме, выполненной из сверхчистых металлов, не встретит препятствий, а это предохранит устройство от сбоев и ошибок.

Сохранить вещество в чистом виде не менее сложно, чем получить. И здесь на помощь опять-таки приходит криогенная техника: один из эффективных способов сохранения чистоты металлических материалов - содержание их в условиях сверхнизких температур (в жидком азоте, а еще лучше - в жидком гелии).

В Советском Союзе разработан метод определения чистоты сверхчистых металлов (при содержании примесей менее 10^{-4} %), основанный на использовании электромагнитных волн особого, типа - *геликонов*. Эти волны затухают в ряде металлов пропорционально концентрации примесей.

Любопытно, что геликоны есть не что иное, как затухание электромагнитных волн, испускаемых плазмой заряженных частиц, что наблюдается лишь в вакууме. Иными словами, сверхчистые металлы проявляют свойства вакуума.

Такое же сходство свойств с вакуумом сверхчистые металлы проявили при исследовании «пробега» в них свободных электронов. В сверхчистых образцах индия, например, охлажденных до температур ниже температуры кипения гелия, электроны проходили 8 – 10 мм как в вакууме. Более того, была доказана возможность с помощью магнитного поля фокусировать и управлять траекториями электронов проводимости внутри образца сверхчистого металла.

Важно отметить, что в сверхчистых металлах плотность потока электронов проводимости составляет 10^{22} см⁻³, т. е. почти как в вакууме и в сотни тысяч раз больше, чем в полупроводниках.

Отсюда был сделан естественный вывод: использование сверхчистых металлов в конструкциях ЭВМ резко повысило бы эффективность вычислительных и управляющих систем. По мнению директора Института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов, члена-корреспондента АН СССР Ч. В. Копецкого, развитие науки и техники в этом направлении может привести к появлению новой отрасли - металлической электроники, или *металлотроники*. Основным элементом электронных систем, по его мнению, могут стать «триады» из двух сверхчистых металлических монокристаллов, соединенных (или разделенных) микромостиком («длиной» до 100 мкм), изготовленным также из металлического монокристалла особой чистоты. Через такой микромостик при близких к абсолютному нулю температурах можно пропускать электроток огромной плотности порядка $10^9 - 10^{10}$ А/см². И мостик при этом даже не нагревается. Это поистине парадоксальное свойство сверхчистых металлов, ведь самый тугоплавкий металл обычной технической чистоты испаряется при плотности тока 10^5 А/см².

Одним словом, металлотроника в содружестве с криогенной техникой являются продвижением научно-технического прогресса.

Перспективно применения структур на основе контактов сверхпроводников с полупроводниками в криогенной микроэлектронике

Проблема создания структур на основе *контактов сверхпроводник - полупроводник*, приборов и многофункциональных устройств на этих структурах является комплексной.

Применение структур на основе контактов сверхпроводников с полупроводниками в криоэлектронике открывает новые возможности для создания различных функциональных приборов: усилителей, детекторов, преобразователей, ПЗС с внутренним усилением, приемников ИК диапазона, линий задержки, регистров сдвига. Сочетание на одном полупроводниковом

кристалле нескольких структур, выполненных в одном технологическом цикле, например структур, имеющих параметрические и детекторные элементы, в принципе позволяет поднять чувствительность криоэлектронных приемников прямого усиления до уровня супергетеродинных. Сочетание сверхпроводящих структур с полупроводниковым барьером, в которых при проявлении эффекта Джозефсона частоты принимаемого сигнала могут охватить практически весь ИК диапазон, с регистром сдвига на структурах с зарядовой связью и малошумящими усилительными элементами позволяет создать многоэлементные приемники с самосканированием, работающие в дальнем и сверхдальнем ИК диапазонах. Возможно создание на этой основе и многодиапазонных ПЗС ИК диапазона. При построении сложных интегральных схем на СВЧ микрополосковые линии и резонаторы усилителей могут быть выполнены непосредственно на той части поверхности полупроводникового кристалла, в которой при температурах $T < T_c$ наступает «вымораживание» носителей заряда и потери становятся примерно такими же, как и в хороших диэлектриках. На эту часть кристалла может быть нанесено и несколько дополнительных связанных пленочных сверхпроводящих резонаторов, образующих сверхпроводниковые СВЧ фильтры, либо преселекторы - усилители со сверхпроводниковыми резонаторами, предложенные и рассмотренные для мазера с пассивными сверхпроводниковыми резонаторами, либо сверхпроводниковые болометры. Способность работать при любых условиях охлаждения, вплоть до температур, близких к абсолютному нулю, где отсутствуют тепловые колебания, а шумы кристаллической решетки становятся исключительно малыми, причем ассортимент сверхпроводниковых и полупроводниковых материалов существенно расширен, является одним из ценных свойств рассматриваемых структур, которые базируются на передовой технологии БИС. Тенденция к освоению в микроэлектронике свойств твердого тела при криогенных температурах, проявившаяся благодаря успехам в создании раз-

личных криоэлектронных приемных систем на базе сверхпроводников, узкозонных полупроводников и других материалов, неуклонно пробивает себе дорогу. Одновременно появилась и другая тенденция, созревшая по мере развития электронного материаловедения и функциональной микроэлектроники. Это - переход к созданию в едином технологическом цикле уже не только материалов, например полупроводниковых кристаллов, и не только эпитаксиальных пленок из одного материала, но сначала «простых» полупроводниковых гетероструктур, МДП-структур, вплоть до рассматриваемых сложных структур сверхпроводник - полупроводник, сверхпроводник – полупроводник - сверхпроводник и др. Эти структуры можно назвать функциональными.

Прикладное значение контактов сверхпроводников и полупроводников для микроэлектроники с годами, особенно по мере развития технологии получения сверхтонких однородных полупроводников, сверхпроводников, слоев и субмикронных зазоров, возрастало наряду с возрастанием значения полупроводниковых охлаждаемых гетероструктур.

Новые криоэлектронные структуры на базе контактов сверхпроводников с полупроводниками и полуметаллами так же, как и новые структуры на базе контактов сверхпроводников с нелинейными сегнетоэлектриками в параэлектрической фазе (при $T > T_c$) и нелинейными криопараэлектриками, в которых заложены многие новые функциональные возможности, заняли свое место среди новых материалов и структур микроэлектроники. При этом могли появиться приборы как бы с тройной интеграцией: интеграцией элементов, интеграцией материалов и явлений и интеграцией функций в одной твердотельной схеме с корпусом-криостатом.

Полезно обратить внимание на принципиальное различие между энергетической щелью (запрещенной зоной) в полупроводнике и щелью в сверхпроводнике. В полупроводнике минимумы энергии $E(p)$ определяются кристаллической решеткой и

наличие щели приводит при $T = 0$ К (при отсутствии контакта со сверхпроводником), к нулевой проводимости. В сверхпроводнике минимумы $E(p)$ определяются взаимодействием электронов внутри электронной системы и наличие щели приводит к бесконечной проводимости.

Криоэлектронику часто относят к микроэлектронике, считая ее высшей ступенью создания интегральных пленочных схем для ЭВМ. Это определение весьма неполное и охватывает только одно из направлений криоэлектроники - ***интегральную криотронику на тонкопленочных сверхпроводниковых элементах со слабой связью***. В целом же интегральная криоэлектроника, базируясь на достижениях технологии современной микроэлектроники, включает более широкий круг проблем, без решения которых невозможно создать приборы, работающие при криогенных температурах и пригодные для серийного производства и постоянной эксплуатации. Дело в том, что криоэлектроника в отличие от полупроводниковой микроэлектроники опирается на новые физические явления, такие как: сверхпроводимость, эффекты Джозефсона, явления в узкозонных полупроводниках, полуметаллах, параэлектриках и др., проявляющиеся только при охлаждении и не реализованные ранее. При этом криоэлектронный микроприбор или интегральная криоэлектронная схема может представлять собой симбиоз охлаждаемой электронной схемы и охладителя (газового, электронного либо радиационного). Развитие интегральной криоэлектроники, как и развитие всей микроэлектроники, знаменует собой новый этап в электронной технике. Внедрение криоэлектронных приборов в народное хозяйство, в технику связи и телевидение, вычислительную, радиолокационную технику и приборостроение не только позволяет в больших системах уменьшить габариты, массу и стоимость аппаратуры при увеличении ее надежности, но и приведет к коренному улучшению электрических параметров этой аппаратуры. Как видно из приведенных материалов, уровень охлаждения в основном опреде-

ляет параметры и область применения криоэлектронных приборов. Приборы азотного уровня охлаждения, самые дешевые и легкие, могут все шире применяться в массовой мобильной аппаратуре, а приборы гелиевого уровня охлаждения, энергопотребление которых в 25 - 70 раз больше, находят применение в стационарных, тяжелых объектах или там, где уже есть жидкий гелий. При этом электрические параметры приборов гелиевого уровня, в которых могут использоваться сверхпроводники, будут значительно лучше параметров приборов других уровней охлаждения, где сверхпроводники применить не удастся. Границы применения криоэлектронных изделий трудно установить, но совершенно очевидно, что расширение и углубление научных, конструкторских и технологических работ в области криоэлектроники вообще и, в частности, **техники криостатирования** позволяет решить ряд важных проблем.

Первая проблема - освоение дальнего и сверхдальнего ИК диапазонов для приема естественных и лазерных ИК излучений. Это позволяет расширить спектральные границы систем для изучения природных ресурсов Земли и планет и поставить новые твердотельные охлаждаемые лазеры, эффективно работающие в ИК диапазонах на службу человеку.

Вторая проблема - создание криоэлектронных индикаторов слабого теплового излучения на базе интегральных приборов с зарядовой связью для тепловидения в промышленности, геологии и в медицине. Есть основание полагать, что криоэлектронные индикаторы дадут возможность осуществить раннюю диагностику ряда раковых заболеваний.

Третья проблема - создание массовых малогабаритных сверхчувствительных приемников, воспринимающих с высокой избирательностью по частоте и помехозащищенностью такие слабые радиосигналы, которые обычные приемники даже не в состоянии обнаружить. Эти приборы находят самое широкое применение в системах оповещения, управления, связи, телевидения, телеметрии, пассивной локации и навигации, космиче-

ской техники, радиоастрономии, приборостроения и системах наведения. При этом, например, дальность обнаружения пассивной локации, связи, телеметрии возрастает в 2 - 3 раза, защита от помех в 10 - 100 раз. Прием сверхдального телевидения через спутник в любой точке страны в новых высокоинформативных участках СВЧ диапазона возможен непосредственно домашними телевизорами с помощью небольшой коллективной антенны.

Разработка твердотельных перестраиваемых и модулируемых лазеров дальнего ИК диапазона и создание нового типа твердотельных СВЧ генераторов, имеющих при высоком к. п. д. стабильность частоты, присущую квантовым генераторам, в десятки и сотни раз большую выходную мощность во всем СВЧ диапазоне, является четвертой проблемой.

Криоэлектроника позволила создать большие и сверхбольшие интегральные схемы нового типа на основе сверхпроводящих пленочных структур для разработки нового класса электронных вычислительных машин со сверхбольшой памятью, меньших по габаритам и в 10 - 100 раз более производительных, чем ранее существующие. В результате успешного решения технологических проблем в 1980 - 1985 гг. были изготовлены ЗУ с емкостью 256 Кбит на кристалле, временем записи и считывания 620 и 340 нс соответственно и потребляемой мощностью 7 мВт.

Согласно прогнозам давних лет сверхпроводниковая ЭВМ могла бы быть изготовлена к 1990 г., причем память большой емкости - к 1983 - 1985 г.г., а Центральный криоэлектронный процессор - к 1985 - 1987 гг. Однако из-за необходимости охлаждения сверхпроводниковые вычислительные устройства имеют ограниченные специальными целями применения. Значительный прогресс в разработке и выпуске, холодильных устройств (криостатов и рефрижераторов с замкнутым циклом на температуру 4,2 °К) существенно удешевляет затраты, связанные с охлаждением. Действительно, ЗУ емкостью 108 бит

состоит из $5 \cdot 10^3$ пластин размером 1 см^2 содержащих каждая $2 \cdot 10^4$ бит. Мощность, потребляемая одной платой 10^{-4} Вт, полным ЗУ - 0,5 Вт.

В эти же годы, по прогнозу, должны были быть созданы комбинированные (с газовым каскадом) и электронные твердотельные микроохладители на различные уровни криогенных температур, вакуумные и твердотельные приборы со сверхпроводящими соленоидами для освоения новых СВЧ диапазонов (миллиметровых и субмиллиметровых волн), измерительные приборы с разрешающей способностью и чувствительностью в 100 - 1000 раз лучше существующих.

Характерной чертой электроники являлось разнообразие материалов, применяемых в электронной технике. Наряду с диэлектриками и широкозонными полупроводниками все большую роль в электронике играли узкозонные полупроводники, материалы с температурой Кюри, лежащей в области криогенных температур, и сверхпроводящие материалы. Если ранее широкому внедрению сверхпроводников в электронику препятствовало то, что сверхпроводимость в них наступала при очень глубоком охлаждении, близком к абсолютному нулю, то теперь положение коренным образом изменилось.

Синтезированы новые материалы, которые уже при 20 К становятся сверхпроводниками, созданы узкозонные полупроводниковые твердые растворы, полуметаллы, тонкие пленки, гетеро- и варизонные структуры на их основе, параэлектрические пленки на SrTiO_3 с высокой нелинейностью, примесные пленки. Для выполнения столь обширной программы в области криоэлектроники необходима консолидация научных сил, занимающихся низкотемпературным материаловедением, низкотемпературной электроникой твердого тела и криогенным приборостроением, а также проведение фундаментальных работ по основным направлениям криоэлектроники, без которых нельзя ликвидировать создавшийся разрыв между большими открытиями в физике низких температур, прежде всего по сверхпрово-

димости и свойствам узкозонных полупроводников, полуметаллов и параэлектриков при криогенных температурах, и возможностью их широкого практического использования. Вместе с тем, очевидно, что развитие криоэлектроники обогащало научно-техническую оснащенность страны, способствовало более быстрому развитию физики, химии, радиотехники, связи, автоматики, приборостроения. С каждым годом увеличивалось влияние криоэлектроники на другие области электронной техники. Это обусловлено тем, что непрерывное улучшение параметров электронных приборов постепенно приближает их к теоретически возможному пределу при обычных температурах. Глубокое охлаждение позволяет намного перешагнуть эти пределы и применять охлажденные приборы в едином модуле с криоэлектронными, что приводит к комплексной микроминиатюризации сложной радиоэлектронной аппаратуры.

Приборы криоэлектроники, как и приборы вакуумной, полупроводниковой, квантовой электроники и микроэлектроники, должны непрерывно дополнять и расширять возможности электроники. Это открыло огромные перспективы. На рубеже 1985 - 1995 гг. планировалось осуществить разработку и выпуск многоспектральных криоэлектронных приемных устройств, перекрывающих средний, дальний и сверхдальний ИК диапазоны для комплексов изучения природных ресурсов Земли и планет. А также следующее:

- промышленный выпуск приемных и приемопередающих ИК и СВЧ криоэлектронных модулей с твердотельными и электронными охладителями, которые находят широкое применение во многих наземных, космических и орбитальных системах связи, в радиолокации, телеметрии, управлении, автоматике, приборостроении, ракетной технике;

- широкое внедрение криоэлектронных приборов, обеспечивающих непосредственный прием через космос многих программ телевидения в любой точке Земли домашними телевизорами, а также прием сверхдальнего телевидения в салонах са-

молетов дальних рейсов, поездах и пароходах дальнего следования, в автомобилях. Возможен прием в любой точке Земли цветного телевидения, передаваемого как земными телецентрами, так и телецентрами других объектов;

- возможно также создание крупных орбитальных криогенных вычислительных центров единой системы навигации и прогноза погоды; сооружение криогенных вычислительных центров на Луне и других планетах, а также комплексов, работающих в открытом космическом пространстве с охлаждением за счет радиации и твердых газов;

- приближение КПД многих электронных приборов СВЧ к 100 %; освоение новых участков спектра в дальнем ИК диапазоне;

- разработка массивов криотронных микропереключателей с внутренней логикой для создания автоматической телескопной связи, охватывающей в единой системе народное хозяйство и население страны.

Одной из причин, вынуждающих уже сегодня все шире применять криоэлектронные приборы, является резкое усложнение условий, в которых должны работать электронные приборы. С каждым годом область рабочих температур непрерывно расширяется, и если когда-то температура – 80 °С была пределом для интегральной схемы, то теперь рабочие температуры понижаются до – 200 °С и даже – 270 °С, т. е. почти до абсолютного нуля. Космическое пространство с его условиями вакуума, холода, радиации, а также ракетные криогенные жидкости (жидкий кислород, водород, гелий) и отвердевшие замороженные газы - вот примеры сред, в которых должны функционировать современные приборы электроники.

Развитие в мире нового вида энергетики, основанного на промышленном использовании криогенного водородного топлива (газа, жидкой и твердой фазы) вместо минерального топлива и электроэнергии, стремительное освоение космоса делают

все более обычным внедрение криоэлектронных изделий в народное хозяйство.

Развитие криоэлектроники, конечно, не приводит к замене существующих методов создания электронных приборов, а лишь расширяет возможности электронной техники, особенно там, где не требуется сверхминиатюрность, а высокие электрические параметры интегральных устройств являются определяющим фактором.

Применение криогенных температур в электронике в промышленных масштабах началось в 50-х гг. XX в. в СССР, США и др. странах, когда были получены важные для радиоэлектроники практические результаты исследований низкотемпературных явлений в твердом теле и достигнуты успехи в области криогенной техники по разработке малогабаритных, экономичных и надежных систем охлаждения. Существенную роль в развитии криоэлектроники сыграли потребности радиоастрономии и космической связи в радиотелескопах и земных станциях, обладающих высокочувствительными приемными трактами, с помощью которых можно было бы компенсировать затухания радиоволн при распространении на протяженных трассах. Применение криогенного оборудования позволило снизить собственные тепловые шумы входных цепей радиоэлектронных устройств, предназначенных для работы при малом отношении сигнал-шум. В СССР результатом комплексных исследований свойств охлажденного твердого тела стало создание в 1967 системы земных станций космической связи «Орбита» для приема программ центрального телевидения через спутник связи «Молния» в диапазоне частот около 1 ГГц. В составе приемной аппаратуре земных станций применялся многокаскадный широкополосный малошумящий параметрический усилитель, первые каскады которого охлаждались жидким азотом. Важным этапом в развитии криоэлектроники явились разработка в СССР первого в мире приемника субмиллиметрового диапазона длин волн с гелиевым охлаждением и его успешные испытания в

1978 на борту научно-исследовательского комплекса «Салют-6» - «Союз-27». Установленный в 1979 на радиотелескопе АН СССР (РАТАН-600) криоэлектронный радиометр вывел этот радиотелескоп в разряд одного из самых чувствительных в мире и позволил на порядок увеличить объем информации о радиои-злучении Галактики. В 1984 – 86 г.г. в процессе реализации многоцелевого международного проекта «Венера - комета Галлея» криоэлектронный параметрический усилитель в составе радиоприемной аппаратуры обеспечил прием с расстояния более 100 млн. км радиолокационного изображения планеты Венеры и крупномасштабных телевизионных изображений кометы Галлея с космических аппаратов «Венера-15», «Венера-16», «Вега-1», «Вега-2».

6.4. Приборы криоэлектроники

К криоэлектронным приборам следует отнести: запоминающие и логические криоэлектронные устройства вычислительной техники; генераторы, усилители, переключатели, резонаторы, детекторы, преобразователи частоты, фильтры, линии задержки, модуляторы и др. приборы СВЧ; сверхпроводящие магнитометры, гальванометры, болометры и др. Одной из задач криоэлектроники является создание электронных охладителей, а также миниатюрных приборов, сочетающих в одной конструкции электронную схему, криостат, служащий герметической оболочкой, и охлаждающее устройство.

По назначению криоэлектронные приборы можно разделить на несколько групп:

- приборы квантовой метрологии;
- низкочастотные измерительные приборы – сверхпроводниковые квантовые интерферометрические датчики (СКВИДы) для измерения магнитных полей;
- пассивные СВЧ-устройства, в том числе параметрические усилители, смесители, видеодетекторы и болометры,

сверхпроводниковые цифровые и импульсные устройства, в том числе ячейки логики и памяти ЭВМ, аналого-цифровые преобразователи, стробоскопические преобразователи сигналов.

Принципы криоэлектроники используют для построения ряда приборов (криотроны, квантовые и параметрические усилители, резонаторы, фильтры, линии задержки и др.). Наиболее распространенным из этих приборов является криотрон. Развитие криоэлектроники началось с создания криотрона (1955 г.) - миниатюрного переключательного элемента, действие которого основано на явлении сверхпроводимости.

Криотрон (от крио... и (элек)трон) - это переключательный криогенный элемент, основан на свойстве сверхпроводников скачком менять свою проводимость под воздействием критического магнитного поля. Действие криотрона аналогично работе ключа или реле; криотрон может находиться только в одном из двух состояний - либо в сверхпроводящем, либо с малой проводимостью. Криотроны обладают высоким быстродействием (время перехода из одного состояния в другое несколько долей мксек, порядка 10^{-11} сек), малыми размерами до 10^{-6} мм² (несколько тысяч криотронов на площади в 1 см²), дешёвы в изготовлении и достаточно надёжны, отличаются низким потреблением энергии (10^{-18} Дж).

Криотроны - элементы логических, запоминающих и переключательных устройств. Криотроны могут быть как проводочными, так и плоскими (плёночными). На рис. 6.8 показана конструкция плёночного криотрона. Первые проводочные криотроны были вскоре заменены плёночными (1958 – 1960 г.г.). В 1955 – 56 г.г. появились другие плёночные запоминающие элементы: персистер, персистотрон, ячейка Кроу, однако они не получили распространения. Основным криоэлектронным элементом в вычислительной технике остался плёночный криотрон. В 1967 г. был разработан плёночный туннельный криотрон (криосар), основан на эффекте Джозефсона.

На основе криотронов можно создать криотронные БИС, выполняющие логические функции, функции запоминания с неразрушающим считыванием, управления и межэлементных соединений. Однако необходимость работы в условиях глубокого охлаждения и связанные с этим технологические трудности резко ограничивают применение криотронов.

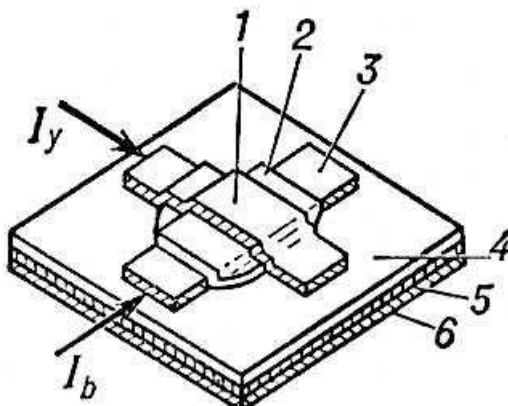


Рис. 6.8. Крестообразный плёночный криотрон:

1 - управляющая плёнка (Pb); 2 - изолирующий слой (SiO_2);

3 - управляемая плёнка (Sn); 4 - изоляция (SiO_2);

5 - экранирующий подслой (Pb); 6 - подложка;

I_y - управляющий электрический ток;

I_b - управляемый электрический ток

Криоэлектронные усилители. Усилители, принцип действия которых основан на использовании криоэлектронных явлений, главным образом служат для приема слабых сигналов СВЧ. Они обладают ничтожно малым уровнем шумов, широкой полосой пропускания (десятки гигагерц) и высоким усилением (до 10000). Шумовые температуры криоэлектронных усилителей достигают единиц и долей градуса Кельвина.

Проблема приёма слабых сигналов СВЧ стимулировала появление низкотемпературных твердотельных усилителей, основанных на разных физических явлениях и обладающих ничтожно малыми шумами.

Перечислим основные особенности различных типов криоэлектронных усилителей.

Квантовые усилители служат для усиления электромагнитных волн за счет вынужденного излучения возбужденных атомов, молекул или ионов. Эффект усиления квантовых усилителей связан с изменением энергии внутриатомных (связанных) электронов в отличие от ламповых усилителей, в которых используются потоки свободных электронов. Наиболее подходящим материалом для квантовых усилителей радиодиапазона оказались диамагнитные кристаллы с небольшой примесью парамагнитных ионов. Обычно применяют рубин, рутил, изумруд с примесью окиси хрома. Охлаждение квантовых усилителей производят жидким гелием в криостатах.

В **параметрических усилителях** роль активного элемента (**параметрического полупроводникового диода**) выполняет либо *p-n*-переход в полупроводнике с высокой подвижностью носителей заряда при температурах ниже 90 °К, либо переход металл - полуметалл (InSb, рис. 6.9). Этот полуметалл при температурах ниже 90 °К приобретает свойства полупроводника, имеющего подвижность носителей заряда в 100 - 1000 раз выше, чем германий и кремний. В параметрическом усилителе периодически изменяется емкость колебательной системы. Мощность, потребляемая параметрическими усилителями, равна примерно 0,02 - 0,1 Вт.

Сверхпроводниковые усилители также основаны на принципе параметрического усиления, но в них периодически изменяется не емкость, а индуктивность колебательной системы (рис. 6.10). Индуктивным элементом такого усилителя служит тонкая пленка сверхпроводника при температуре ниже $T_{к0}$. В сверхпроводящей пленке возникает так называемая **сверхин-**

дуктивность L_k , обусловленная взаимодействием возникающих в ней высокоэнергетических электронных пар. Индуктивность L_k при определенном выборе геометрии пленки может преобладать над обычной индуктивностью L проводника. Внешним электромагнитным полем можно периодически разрушать и восстанавливать такие электронные пары, изменяя их концентрацию n_k , и тем самым периодически изменять индуктивность L_k по закону

$$L_k = 1/n_k.$$



Рис. 6.9. Низкотемпературный параметрический усилитель: а - эквивалентная схема; б - вольтамперная характеристика перехода металл-полуметалл (U - напряжение, I - ток) и зависимость его ёмкости C от напряжения при $T < 80$ К; пунктиром показана эта же характеристика при комнатной температуре (300 К); U_n и ω_n - напряжение и частота накачки; в - переход металл-полуметалл - активный элемент усилителя

Параэлектрические усилители основаны на аномально высокой поляризации некоторых диэлектриков (например, SrTiO_3) при низких температурах. Диэлектрическая проницаемость таких диэлектриков (параэлектриков) от 10 до $15 \cdot 10^3$,

при $T < 80 \text{ }^\circ\text{K}$ появляется сильная зависимость диэлектрических потерь от внешнего электрического поля (рис. 6.11). Активный элемент параэлектрического усилителя представляет собой электрический конденсатор, заполненный таким параэлектриком, помещенным в электромагнитное поле (накачка). Ёмкость такого конденсатора периодически изменяется с частотой накачки, что позволяет осуществить параметрическое усиление.



Рис. 6.10. Сверхпроводящий усилитель: a – схема, L – управляемая индуктивность, $R_{\text{п}}$ – сопротивление перехода Джозефсона; b – активный элемент усилителя

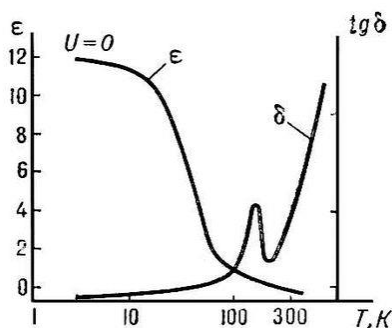


Рис. 6.11. Зависимость диэлектрической проницаемости ϵ и угла диэлектрических потерь δ от температуры T

На рис. 6.12, *а* приведена структура активного элемента параэлектрического усилителя, а на рис. 6.12, *б* - зависимость его емкости от напряжения при температуре 4,2° К. Пунктиром показана эта же зависимость при нормальной температуре (300° К).

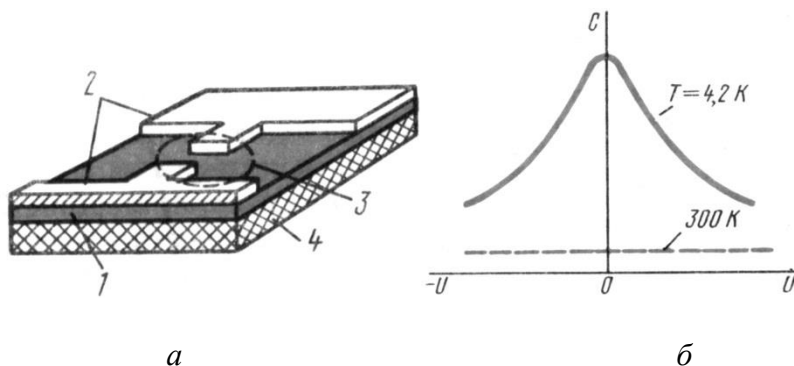


Рис. 6.12. Параэлектрический усилитель: *а* – структура активного элемента; *б* – зависимость емкости от напряжения (1 – пленка параэлектрика; 2 – металлические пленки; 3 – конденсатор; 4 – диэлектрическая подложка;)

Существуют усилители, в которых используются комбинации перечисленных методов. Например, сочетание изменяющихся индуктивности L сверхпроводника и ёмкости C «запертого» перехода металл - полуметалл позволяет создать усилитель, где одновременно от одного генератора модулируется C и L , что улучшает характеристики усилителей (рис. 6.13).

Количественным критерием чувствительности криоэлектронных усилителей является их **шумовая температура** $T_{ш}$. У криоэлектронных усилителей она достигает единиц и долей градуса Кельвина (рис. 6.14). Наряду с этим криоэлектронные усилители обладают широкой полосой пропускания и высоким усилением (обычно от 10 до 10^4).

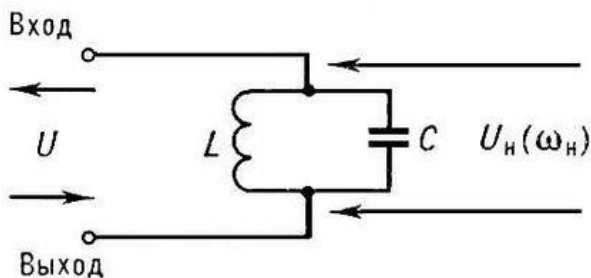


Рис. 6.13. Криоэлектронный усилитель с 4 управляемыми реактивными параметрами.

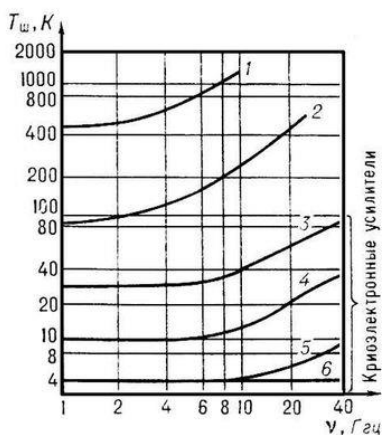


Рис. 6.14. Зависимость шумовой температуры $T_{ш}$, различных усилителей СВЧ от частоты: 1 - сверхмалошумящие электровакуумные (специальные типы ЛБВ) и полупроводниковые (туннельные и транзисторные) усилители; 2 - неохлаждаемые параметрические усилители; 3, 4, 5 - криоэлектронные усилители азотного, водородного и гелиевого уровней охлаждения; 6 - парамагнитные квантовые усилители.

Криоэлектронные резонаторы теоретически должны иметь бесконечно большую добротность из-за отсутствия потерь в поверхностном слое сверхпроводящих стенок. Однако практически потери существуют вследствие инерционности электронов. Наибольшая добротность достигается в дециметровом диапазоне волн. При длине волны 3 см добротность криоэлектронных резонаторов равна примерно $10^7 - 10^9$. Сверхпроводящие резонаторы обычно работают при гелиевых температурах ($T = 4,2^\circ \text{K}$). Повышение стабильности частоты генераторов СВЧ ограничено величиной добротности Q объёмных резонаторов, которая зависит от активных потерь энергии в их проводящих стенках. Теоретически предел Q обычных резонаторов $2 - 8 \cdot 10^3$ для основного типа волн в сантиметровом диапазоне. Добротность может быть увеличена в 10 - 100 раз охлаждением до $15 - 20^\circ \text{K}$ за счёт уменьшения рассеяния электронов на тепловых колебаниях кристаллической решётки металла.

Резонаторы со сверхпроводящими стенками теоретически должны обладать бесконечно большой добротностью из-за отсутствия потерь в поверхностном слое сверхпроводника. В действительности же потери существуют вследствие инерционности электронов. С другой стороны, на очень высоких частотах (около 10^{11}Гц), когда энергия кванта электромагнитного поля сравнима с энергией расщепления сверхпроводящих электронных пар ($3,52 \text{ k T}$), потери в сверхпроводящем и нормальном состояниях становятся одинаковыми. Поэтому наибольшая добротность (порядка 10^{11}) достигается в дециметровом диапазоне длин волн. Для $\lambda = 3 \text{ см}$ добротность сверхпроводящих резонаторов порядка $10^7 - 10^{10}$. С помощью сверхпроводящих резонаторов стабильность частоты обычных клистронов может быть улучшена с $5 \cdot 10^{-4}$ до $10^{-9} - 10^{-10}$, т. е. до уровня стабильности квантовых стандартов частоты при сохранении всех преимуществ клистронов. Сверхпроводящие резонаторы обычно работают при гелиевых температурах ($4,2^\circ \text{K}$). Если в них ис-

пользуются сверхпроводники 1-го рода, то их рабочая температура поднимается до 10 - 15 °К.

Криоэлектронный фильтр представляет собой цепочку последовательно соединенных сверхпроводящих резонаторов. Избирательность такого фильтра в полосе запираания повышена в 10^3 - 10^6 раз по сравнению с обычными фильтрами.

Криоэлектронные линии задержки представляют собой тонкий кабель из сверхпроводника, свернутый в спираль и помещенный в криостат. Время задержки определяется длиной кабеля и соответствует единицам или долям миллисекунды. Для получения времени задержки, измеряемого наносекундами или пикосекундами, используют сверхпроводящие меандры - извилистые линии из узких тонких сверхпроводящих пленок на диэлектрической подложке. Изменяя внешним полем распределенную индуктивность такой линии, можно управлять временем задержки.

Охлаждение в криоэлектронике достигается различными методами. **Криостат**, который обычно служит оболочкой прибора, часто соединяют с криогенной установкой. Для охлаждения используются также **эффект Джоуля - Томсона**, **эффект Пельтье**, **эффект Эттингсгаузена**, **магнитное охлаждение** и др. В приборах для космических исследований охлаждение и поддержание низких температур достигается за счёт использования отвердевших газов (1 кг твёрдого азота может находиться в космосе до 1 года).

Иногда несколько приборов помещают в общий криостат, который может выполнять также определённые функции, например, служить **антенной**. Таким образом, осуществляют интеграцию. Развитие криоэлектроники особенно интегральной, приводит к увеличению надёжности приборов, уменьшению их габаритов, веса и расширяет области их применения (рис. 6.15).

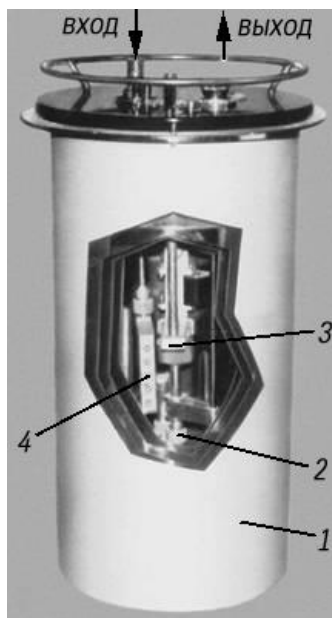


Рис. 6.15. Низкотемпературный параметрический усилитель для
сверхдального приёма телевизионных сигналов через искус-
ственные спутники Земли: 1 - криостат;
2 - колебательная система с активным элементом;
3 - генератор накачки; 4 - входной фильтр

7. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И БИОЭЛЕКТРОНИКА

7.1. Физические основы

Функциональная молекулярная электроника представляет собой направление в функциональной электронике, в котором изучаются процессы переноса и хранения информационного сигнала в молекулярных системах, а также разработка молекулярно-инженерных технологий для создания приборов и устройств обработки и хранения информации.

Идеи молекулярной электроники несколько отличаются от идей микроэлектроники. В процессе создания и миниатюризации приборов микроэлектроники создаются технологические процессы, связанные с удалением лишнего материала, изменением проводящих свойств материала с целью создания физических барьеров и переходов. В молекулярной электронике развиваются методы конструирования и изготовления органических молекул с заданными свойствами, методы агрегации молекул нескольких типов. Первые методы связаны с созданием материалов с заданными электрическими свойствами путем подбора размеров молекул, их формы, взаимного пространственного их расположения, параметров различных функциональных групп молекул. Этот метод получил название **молекулярная инженерия** и с его помощью разработана концепция создания молекулярного электронного прибора.

Молекулярный электронный прибор приобрел статус микроэлектронного прибора после того, как были изготовлены переключатели и инверторы на молекулярном уровне. Проводниками, линиями межсоединений в таких структурах служат одномерные полимеры типа трансполиацетилена $(CH)_x$ или нитрида хлора $(SN)_x$. Электрически механизм переключения на молекулярном уровне эквивалентен изменению валентности молекул. Валентность же связана с туннелированием электро-

нов через неширокие периодические решетки, образованные молекулами (рис. 7.1).

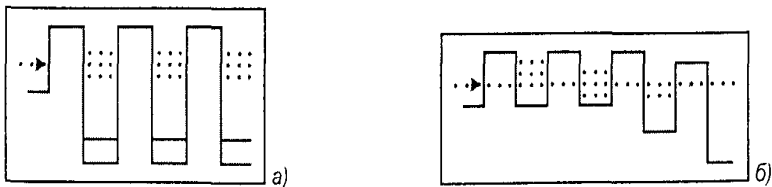


Рис. 7.1. Туннелирование электрона сквозь периодическую молекулярную решетку

Электрон способен преодолеть периодическую молекулярную решетку только в том случае, если его энергия равна или больше энергетического барьера внутри решетки. Электроны не могут преодолеть молекулярную периодическую решетку, если их энергия соответствует величине каждого энергетического барьера внутри решетки (рис. 7.1, *a*), и свободно проходят через систему потенциальных барьеров при условии равенства или превышения энергии псевдостационарного уровня (рис. 7.1, *б*).

Идея переключения в подобных структурах будет осуществляться, если высота барьера или глубина ямы регулируются внешними факторами. Среди таких механизмов отметим перемещение положительного или отрицательного заряда внутри молекулярной цепочки, переключение потока туннелирующих электронов путем смещения высоты псевдоэнергетических барьеров. Этот метод развивает схемотехнические принципы обработки информации и ее хранения.

Молекулярный аналог элементарной логической ячейки И - НЕ строится на базе тетрамерной производной с диазосвязями (рис. 7.2).

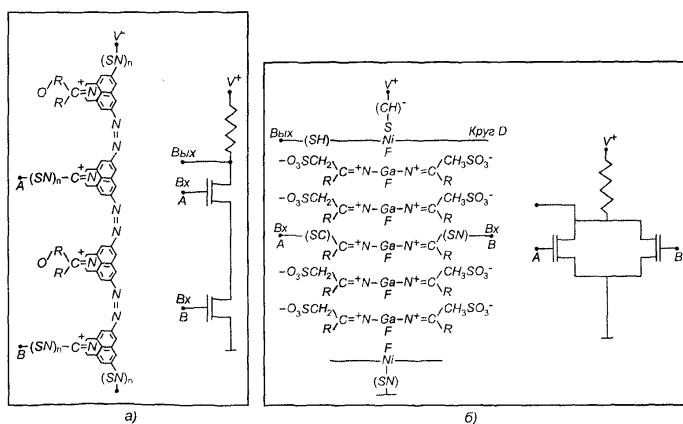


Рис. 7.2. Молекулярные логические вентили типов И - НЕ (а) и ИЛИ - НЕ (б)

Периодический потенциал формируется четвертичными атомами азота, входящими в структуру. Две из четырех контрольных групп могут управляться потоками заряда через цепочки $(\text{CH})_x$ путем нейтрализации положительного заряда.

Молекулярная ячейка типа ИЛИ-НЕ представляет собой набор колец фталоцианида галлия, связанных фтором. Соединения типа $\text{Ni} - \text{S}$ обеспечивают заземление и связь с отрицательным потенциалом, а также с выходным выводом $(\text{SN})_n$ (рис. 7.2, б). Эти базовые элементы могут стать составными частями биологических компьютерных систем. Размеры структур логических ячеек могут составлять менее одной сотой размера полупроводниковой логической ячейки. Ожидаемая плотность размещения составит 10^{18} вентилях/см³. При всей привлекательности такой идеи молекулярных схем (даже с точки зрения использования при создании компьютеров) в ней содержится врожденный порок схемотехники. Речь идет о тех же схемотехнических решениях, тех же проводах, хотя это уже не пленочные токоведущие дорожки, а молекулярные цепочки. Все это не

исключает возможность возникновения традиционных для схемотехнических решений недостатков, а также новых, специфика которых состоит в налаживании надежных контактов между отдельными соединениями.

Методы агрегации определенного числа молекул нескольких типов или межмолекулярной самосборки позволяют получать заданные размеры и форму функционального элемента за счет выбора параметров, участвующих в самосборке молекулы, создать серию функциональных элементов без разброса параметров со строгой атомной детализацией. Для получения сверхтонких пленок используется *метод Ленгмюра — Блоджетт*. Суть метода сводится к использованию нерастворимых поверхностно-активных веществ. Эти вещества формируют из двух фрагментов. Один фрагмент представляет собой гидрофильное вещество, имеющее сродство к воде, и хорошо в ней растворяющееся. Второй компонент - гидрофобный. Он не растворяется в воде и не позволяет молекуле поверхностно-активного вещества погрузиться в воду. Формирующиеся на поверхности воды однородные мономолекулярные пленки могут быть перенесены на твердые структуры подложки с различными типами слоев.

7.1.1. Динамические неоднородности

Передача информации в молекулярной электронике осуществляется ансамблями электронов или солитонов.

В масштабах микромира под *солитоном* понимают структурное возмущение, способное перемещаться в одном или двух направлениях подобно частице. Перенос солитона связан с возмущением, которое меняет положение молекулярных, так называемых π -орбиталей между атомами углерода. В центре солитона существует движущаяся межфазная или междолинная граница между эквивалентными фазами *A* и *B* (рис. 7.3, *a*). Прохождение солитона через сопряженную систему приводит к пе-

переходу между фазами *A* и *B* и к обмену одинарных и двойных связей.

Солитоны могут быть интерпретированы как топологические узлы валентной π -электронной системы.

Вследствие вырожденности основного состояния электропроводящих полимеров солитоны могут свободно перемещаться вдоль цепи сопряжений подобно волне плотности π -электронов (рис. 7.3). Скорость перемещения солитонов близка к скорости звука.

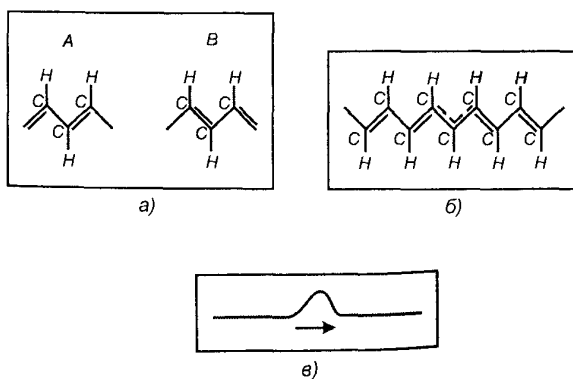


Рис. 7.3. Генерация и распространение солитона в полиацетиленовой цепи (*а, б*); интерпретация в виде волны возмущения (*в*)

Солитон обладает свойствами квазичастицы, имеет определенную энергию, форму, момент импульса. На молекулярном уровне также наблюдается реверсирование солитонов. Различают два режима отражения солитонов. Две трансполиацетиленовые цепочки сопрягаются с трициклическим пентоином. Солитон проходит, отражаясь от пентоина словно от стенки (рис. 7.4, *а*). Другой вариант предусматривает использование гидрированного каротена в качестве реверсивной среды (рис. 7.4, *б*).

В этом случае солитон обходит молекулу по часовой стрелке. Движение валентных π -электронов происходит по пронумерованному порядку. Движение электрона со стрелкой под номером 10 может произойти только после того, как завершится движение со стрелкой 1. Солитон проходит по одной цепочке дважды.

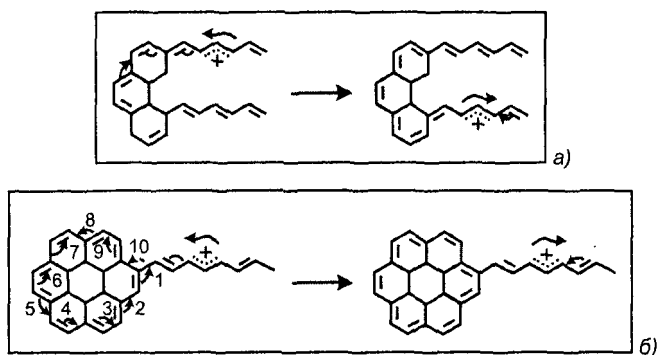


Рис. 7.4. Процесс реверсирования солитонов

Наряду с солитонами в молекулярной системотехнике используются процессы переноса электронов по цепочкам различных циклических молекул, даже разделенных зазором до 1 нм. Электроны туннелируют по молекулам, переходя в соседние молекулы за время порядка $10^{-10} - 10^{-12}$ с. Основным эффектом при этом является быстрое резонансное и одновременно однонаправленное туннелирование за счет того, что уровень для лишнего электрона в каждой последующей молекуле на (0,1 - 0,2) эВ ниже, чем в предыдущей. Эффект быстрого резонансного туннелирования проявлялся в континуальных молекулярных средах, у которых молекулы в цепочке подобраны так, что энергия электрона, поляризовавшего одну молекулу, равна энергии электронного уровня другой, не поляризованной молекулы. Другими словами, цепочка молекул должна строиться

так, чтобы энергии уровней для лишнего электрона снижались на 0,1 - 0,2 эВ.

В лентгмюровских пленках с помощью света можно возбудить экситоны, представляющие собой мигрирующее электронное возбуждение, не связанное с переносом электрического заряда и массы.

В качестве динамической неоднородности можно использовать один электрон. Это позволяет достичь энергетического предела, минимизировать энергию на одну информационную операцию. Если между отдельными молекулами создать разность потенциалов V , а энергетический барьер по полю составляет $E_{\text{пр}} = E_{\text{ср}}$, то в обратном направлении этот барьер будет определяться величиной

$$E_{\text{обр}} = E_{\text{ср}} + eV, \quad (7.1)$$

где e - заряд электрона. Барьер одновременно будет препятствовать движению электрона в обратном направлении. Однако использование только одного электрона накладывают значительные ограничения на «одноэлектронику».

7.1.2. Континуальные среды

Лентгмюровские пленки представляют собой многофункциональную континуальную среду. На основе пленок Лентгюра - Блуджетт (ЛБ) можно создать молекулярно-гладкую континуальную среду со свойствами проводника, подзатворного диэлектрика, плазмостойкого резистора, пирозлектрика и биосенсора (рис. 7.5).

На рис. 7.6 показаны структуры ряда синтезированных органических полимеров.

Весьма перспективной средой для функциональной молекулярной электроники являются *органические полимеры*. Они

состоят из цепочки слабосвязанных молекул с частично заполненными зонами валентных электронов.

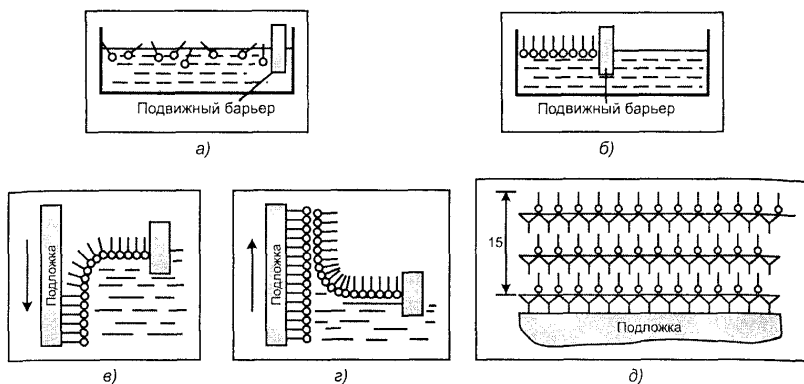


Рис. 7.5. Высаживаемые на различные подложки пленки Ленгмюра - Блоджетт, состоящие из разного типа молекул (а, б, в, г), и создание континуальных сред на их основе (д)

Квазиодномерный органический полимер полиацетилен может быть легирован донорами (K, Na, Li) и акцепторами (Br, AsF₅, PF₆), и имеет слабое взаимодействие электронов с решеткой.

Цепочки образуют поликристаллические волокна диаметром 20 нм. Пленка полиацетилена представляет собой переплетенные волокна (паутина). Различают две модификации полиацетилена: цис- и трансизомеры. Полиацетилены могут быть получены в виде молекулярных кристаллов диацетилена (мономер).

Возможно получение пленок из поликристаллов полиацетилена. Полипролл представляет собой пленки с локальным кристаллическим порядком. В них можно осуществить регулярность в расположении легирующих примесей и стехиометричность состава легированных материалов. Полифенилены

существуют в виде порошков и пленок. Это далеко не полный перечень сред. Число известных синтезированных органических веществ превысило пять миллионов.

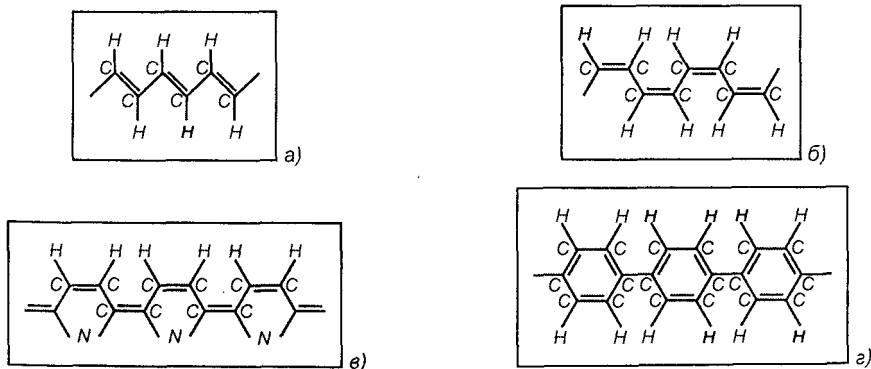


Рис. 7.6. Структуры полимерных континуальных сред:
а - полиэтилен (трансформа), *б* - полиэтилен (цисформа);
в - полипролл; *г* - полифенилен

7.1.3. Другие элементы приборов

Динамическими неоднородностями типа электронов и солитонов можно управлять. В молекулярной системе, в которой двойная связь является частью большой полиацетиленовой цепочкой, под воздействием поляризованной фотоактивации включается процесс переноса электронов (рис. 7.7). При прохождении солитона (см. нижнюю цепочку) фотоактивационный процесс становится невозможным.

Другими словами, солитон включает реакцию внутреннего переноса заряда, а изменения в спектре поглощения олефина может служить детектором, регистрирующим прохождение солитона.

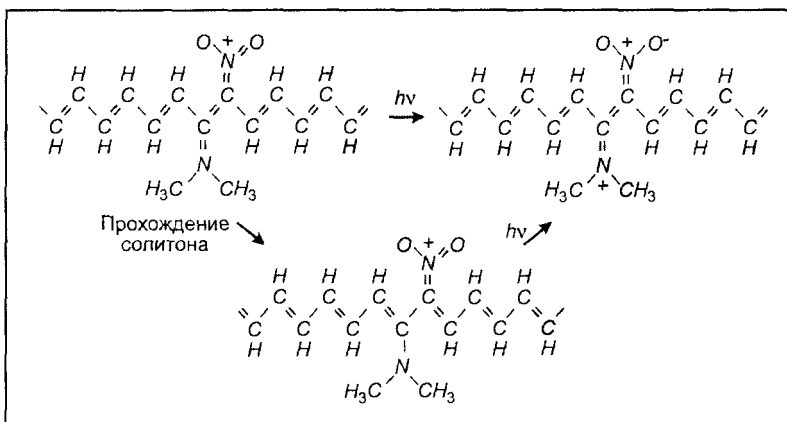


Рис. 7.7. Молекулярный детектор солитонов

Генерация солитонов осуществляется в процессе прогонного туннелирования, например, между вторичным анином и кетонной группой трансполиацетилена в присутствии электрического поля.

Итак, показана возможность генерации, управления и детектирования солитонов. Солитон, являясь динамической неоднородностью, способен переносить информацию; с его помощью можно и хранить информацию.

7.2. Молекулярные устройства

Хранение бита информации в солитонной памяти определяется наличием или отсутствием солитона, а число хранимых битов зависит от скорости распространения солитона и длины сопряженного полимера (рис. 7.8). Сопряженный полимер связывает генератор солитонов (ГС) и электронный туннельный переключатель (ТП). Показана возможность накопления четырех битов информации. При одновременном прибытии положи-

тельного и отрицательного солитонов срабатывает туннельный переключатель. Солитонные устройства памяти не имеют высокого быстродействия, однако, отличаются высокой плотностью хранения информации. Оценки показывают, что если расстояние между солитонами составляет около $200 \text{ \AA}$, а расстояние между центрами цепочек порядка $50 \text{ \AA}$, то информационная емкость близка к 10^{18} бит/см^3 .

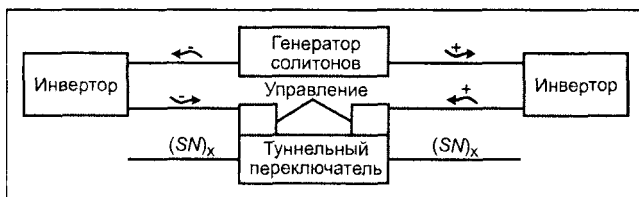


Рис. 7.8. Схема устройства памяти, реализованная на солитонах

В устройствах памяти могут быть использованы и пленки Ленгмюра - Блоджетт. Каждая молекулярная система имеет свою частоту поглощения. Запись информации осуществляется избирательно в ансамбль молекул трехмерной молекулярной пленки с помощью лазерного излучения определенной частоты. Считывание информации осуществляется за счет обратных физических явлений. Использование свойств молекулярных структур позволяет создать трехмерные запоминающие устройства высокой информационной емкости.

Существуют различные идеи построения молекулярных компьютеров. Их микросборка, например, может быть осуществлена химическим осаждением из газовой фазы. Последовательность химических превращений при создании молекулярной вычислительной машины рассчитывается по заданному алгоритму.

В итоге к базовой молекуле добавляются все новые и новые звенья, формируются проводники, изоляторы, вентили, компоненты вычислительных устройств. Так, например, размер молекулярного вентиля может быть меньше одной сотой микрометра, а плотность сборки может достичь 10^{18} вентиляей/см³.

Процессор и память гипотетического молекулярного компьютера занимают объем около 1 см² и монтируются на криостате, который предотвращает нагрев контактов и снижает химическую активность молекул. Для уменьшения количества межсоединений предусматривается использование оптических каналов для ввода - вывода информации. Обработка информационных массивов молекулярными системами имеет ряд особенностей, среди которых важнейшими являются:

- гигантский параллелизм переработки информации;
- высокая эффективность преобразования информации;
- значительная информационная сложность исходных операций;
- способность к изменчивости и эволюции молекулярных компонентов устройств переработки информации и эволюционному обучению (самообучению) устройств;
- динамические механизмы переработки информации, основанные на сложных нелинейных процессах.

Другим примерам высокой производительности может служить процессор, реализованный на пленках Ленгмюра - Блоджетт. На таких пленках можно создать молекулярные системы с высокой степенью параллелизма обработки информации и большой вычислительной мощностью.

В качестве примера приведем идею сложения двух образов, проецируемых на искусственную мембрану типа ленгмюровской пленки со встроенными молекулами фотоактивируемого фермента (динамические неоднородности). В этом случае выходной сигнал, представляющий собой концентрацию продукта ферменто-активной реакции, будет пропорционален сумме оптических сигналов на входе системы.

Оценки показывают, что при поверхности пленки около 1 см^3 и при разрешающей способности 10 мкм число ячеек составит 10^6 . Каждая ячейка будет содержать $10^4 - 10^5$ молекул фермента при 1% заполнении поверхности. Если оценить время операции в одной ячейке даже 10^{-2} с , то, учитывая высокую степень параллелизма обработки информации (порядка 10^6), эффективное время одной операции составит 10^{-8} с . Другими словами, обработка больших информационных массивов методами ФЭ позволяет предельно распараллеливать информацию в процессе ее обработки. Современные компьютеры не имеют такой производительности при обработке больших массивов информации.

7.3. Автоволновая электроника

Особое место в молекулярной электронике занимают перспективные идеи автоволновой электроники.

В *автоволновой электронике* изучаются процессы, происходящие в неравновесных открытых кинетических системах, которые проявляются в виде разнообразных нелинейных автоволн, стационарных пространственных структур, стратов, доменов и других типов динамических неоднородностей.

Наибольший, пожалуй, интерес представляют собой *автоволны* - класс нелинейных волн, распространяющихся в активных континуальных средах за счет запасенной энергии. Следует особо подчеркнуть, что автоволны распространяются в средах, в каждом локальном объеме которых осуществляется независимая накачка энергии (равно как и вещества) и имеется диссипативный сток для отработанных «продуктов» накачки (рис. 7.9).

В качестве континуальных сред в устройствах автоволновой электроники используются активные распределенные среды, в которых возможна реализация большого числа самозадерживающихся нелинейных пространственно-временных воз-

буждений. К таким средам можно отнести биологические активные мембраны, мышечные волокна, нейронные сети, распределенные биохимические среды, а также некоторые сообщества живых организмов.

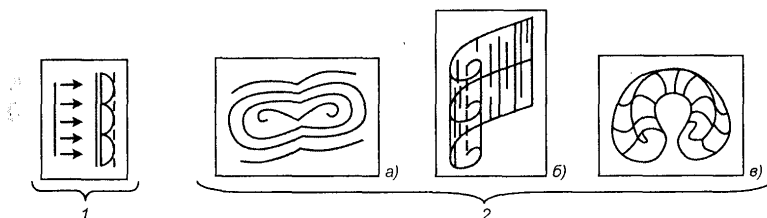


Рис. 7.9. Типы автоволновых процессов: 1 - плоский волновой фронт огибает препятствие; 2 - спиральные волны:
а - двумерная среда, *б* - вращающийся свиток,
в - вихревое облако

Генератором динамических неоднородностей автоволновой природы являются: импульсы внешней накачки, различные флуктуации.

Автоволны способны аннигилировать при столкновении двух встречных волновых фронтов, не отражаются от препятствий и границ среды, однако дифрагируют на препятствиях в соответствии с принципом Гюйгенса. Различают плоские и спиральные волны (рис. 7.9).

Управление автоволновыми процессами может осуществляться с помощью тепловых полей, локальным энергетическим воздействием, введением дополнительной массы вещества.

Автоволновые среды обладают свойством ассоциативной памяти. Это обусловлено рядом причин, среди которых важной является отсутствие локальной пространственной адресации записываемой информации. Адресация и считывание возможны только по содержанию информации, по характерным признакам. Автоволновые среды способны регистрировать предисто-

рию своего функционирования путем накопления определенных качеств или свойств в материале. Такие среды обладают распределенной памятью и способны к обучению под воздействием внешних условий.

Реализация памяти с использованием автоволновых процессов происходит по следующей схеме. В сосуде 1 находится вещество 2 и его расплав 3 (рис. 7.10). В режиме записи (рис. 7.10, а) опорный источник создает однородный лоток тепла. Возникший градиент температуры dT/dy возбуждает в диссипативной автоволновой среде конвективные ячейки.

Если на опорную матрицу воздействовать тепловым сигналом от источника B , то произойдет перестройка потоков, адекватная информационному воздействию потока B . Возникнет структура, описывающая поверхность изотермы плавления $\bar{a} \cdot \bar{b}$. Эта структура характеризует структуру конвективных потоков, интенсивности тепловых выбросов и т. д. Другими словами, можно изготовить копии рельефа в виде $a \cdot b$. Таким образом, реализуется память.

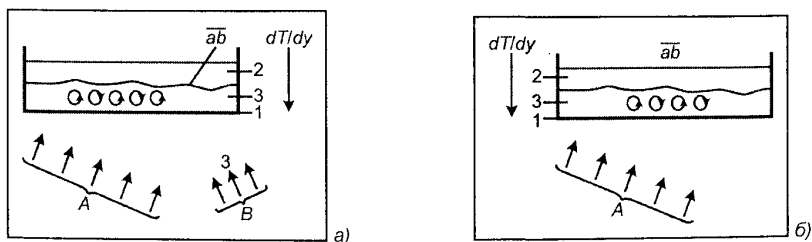


Рис. 7.10. Схема ассоциативной памяти: a – запись;
 $\bar{b}$ – воспроизведение структуры

Ассоциативное восстановление можно провести по схеме рис. 7.10, б. Условия неравновесности создаются источником A , а дополнительным организующим фактором является структура рельефа $\bar{a} \cdot \bar{b}$. Достижение комплементарного соответствия

вложений $\overline{a \cdot b}$ и $\overline{a} \cdot \overline{b}$ является актом распознавания образа. Этот метод имеет некоторое сходство с волновой голографией, а именно - реализуется в опорную упорядоченность в условиях самоорганизации.

Можно ожидать, что в дальнейшем исследования будут развиваться с использованием синергетического подхода к поведению автоволновых сред. Под *синергетикой* будем понимать процессы, происходящие в системах, состоящих из многих подсистем самой различной природы, например, электроны, атомы, молекулы, клетки, нейроны, фотоны, животные организмы. Такие структуры возникают в процессах самоорганизации, переходов типов «беспорядок - порядок», «порядок – порядок» и т. п.

7.4. Биoeлектроника

Термин молекулярная электроника необоснованно получил некоторое распространение в начале развития микроэлектроники (60-е годы). В последующем понятие молекулярной электроники справедливо относят к одному из направлений функциональной электроники.

Молекулярная электроника - область электроники, в которой функциональные электронные элементы и устройства организованы на уровне отдельных молекул и их комплексов. В биологических системах процессы преобразования информации протекают в основном на молекулярном уровне. Поэтому это направление близко к бионике.

Биoeлектроника - одно из направлений бионики, решающее задачи электроники на основе анализа структуры и жизнедеятельности живых организмов.

Биoeлектроника охватывает проблемы изучения нервной системы человека и животных и моделирование нервных клеток (нейронов и нейронных сетей) для дальнейшего совершенствования электронной вычислительной техники, техники связи,

разработки новых элементов и устройств автоматики и телемеханики.

Исследования *нервной системы* показали, что она обладает рядом ценных особенностей и преимуществ перед самыми совершенными вычислительными устройствами. Основными из них являются:

- совершенное и гибкое восприятие внешней информации независимо от формы, в которой она поступает;

- высокая надежность, значительно превышающая надежность технических систем (последние выходят из строя при обрыве в цепи одного или нескольких элементов; при гибели же миллионов нервных клеток из миллиардов клеток, составляющих головной мозг, работоспособность системы сохраняется);

- микроминиатюрность элементов (при количестве элементов 10^{10} - 10^{11} объем мозга человека составляет $1,5 \text{ дм}^3$; современное устройство на транзисторных структурах с таким же числом элементов заняло бы объем в несколько десятков кубических метров;

- экономичность работы (потребление энергии мозгом человека не превышает нескольких десятков ватт);

- высокая степень самоорганизации, быстрое приспособление к новым ситуациям, к изменению программ деятельности.

Нервная система состоит из клеток, получивших название *нейронов*. Нейроны, где бы они ни находились, имеют одинаковую структуру и примерно одинаковые логические характеристики. Они являются наиболее универсальным логическим элементом. На основе нейронов строятся простые и упорядоченные *нейронные сети*, указывающие на тот, пока еще не достижимый в технике факт, что с помощью единственного элемента можно построить систему, способную выполнять сложнейшие задачи, которые обычно решает человек.

На рис. 7.11 показано схематическое изображение нейрона. Луковицеобразная часть является телом ячейки - *сомой*. Ее

диаметр лежит в пределах от 10 мкм для связующих нейронов до 70 мкм для моторных нейронов. Отростки, отходящие от тела нейрона, называются дендритами и представляют собой входные связи нейрона. Длинный отросток, отходящий от одной из сторон сомы, называется аксоном и служит для передачи выходного сигнала к другим нейронам; длина аксона от долей миллиметра до 1,8 м и более. Аксон постепенно сужается, и на расстоянии 50 - 100 мкм от тела нейрона начинается изолирующий слой.

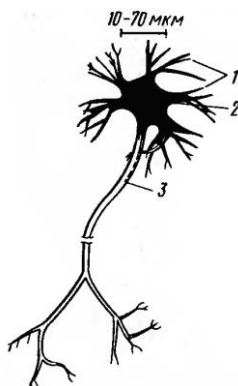


Рис. 7.11. Схематическое изображение нейрона: 1 – дендриты; 2 – тело нейрона (сoma); 3 - аксон

Сам нейрон изолирован от окружающей его жидкости тонкой мембраной и благодаря метаболическому процессу внутри него существует избыточная концентрация отрицательных ионов калия, хотя окружающая нейрон жидкость содержит избыток ионов натрия. Для предотвращения диффузии ионов калия через мембрану на ней поддерживается задерживающий потенциал около 70 мВ. Аксон по своей природе является аналогом соединительного провода электрической цепи. Ближе к концу он разветвляется, и более мелкие ветви образуют контак-

ты с другими нейронами. Дендриты оканчиваются синапсами, которые отделены от тела нейрона узким переходом шириной 0,01 - 0,02 мкм.

Нейрон во многом подобен электронному логическому элементу. Выполнив соединение нейрона определенным образом, нетрудно обнаружить, что он обладает свойствами, аналогичными свойствам одной из обычных схем вычислительной машины. Однако нейрон обладает и другими свойствами, например способностью увеличивать частоту выходного сигнала с изменением амплитуды входного, суммировать входные сигналы и т. д. Все это показывает, что нейрон - значительно более сложный элемент, чем обычная логическая схема. Нейрон может передавать информацию в аналоговой форме, что позволяет рассматривать нейронную систему как гибридное устройство из логических элементов и аналоговых блоков, в котором направление передачи аналоговой информации определяется коммутируемыми логическими связями между элементами. Адаптивные свойства нейронов могут быть использованы также при создании устройств для распознавания образов и знаков и при построении обучающих машин. Если сравнивать интегральные микросхемы с нейроном, то окажется, что мощность рассеяния в нейроне в 10^7 раз меньше, а степень интеграции в 10^7 раз больше.

Для технической реализации ряда сложных нейронных сетей в первом приближении достаточен *нейроноподобный элемент, обладающий аналого-логическими свойствами* и по своим функциональным возможностям приближающийся к биологическим рецепторным и некоторым видам центральных нейронов. Основной задачей при создании такого нейроноподобного элемента является реализация зависимости частоты импульсного выходного сигнала от суммарного импульсного «раздражения» на входе. Исследования показали, что модель нейрона может быть выполнена в виде двух интегральных микросхем на МДП-транзисторах.

Первая микросхема (импульсный сумматор) моделирует синапс биологического нейрона, осуществляя пространственное и временное суммирование импульсных входных сигналов с электрической регулировкой синаптических весов.

Вторая микросхема (пороговое устройство) моделирует тело нейрона. Она формирует требуемую передаточную характеристику «напряжение - напряжение» и преобразует напряжение в частоту.

Используя эти микросхемы, можно получить выходные частотные характеристики, близкие к характеристикам определенных классов нейронов.

Таким образом, по совокупности свойств рассмотренный нейроноподобный элемент является перспективным для моделирования определенного класса нейронных сетей в биологических системах.

В настоящее время ведутся большие исследования в различных направлениях биоэлектроники. Результаты исследований показывают, что использование явлений живой природы в электронике может привести к новой научно-технической революции в этой области техники.

8. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ХЕМОТРОНИКА

Хемотроника как новое научное направление возникла на стыке двух развивающихся направлений: электрохимии и электроники.

На первом этапе своего развития хемотроника как техническая отрасль была призвана разрабатывать общие теоретические и технологические принципы построения электрохимических преобразователей. При этом создавались в основном аналоги электронных приборов с той разницей, что носителями заряда были не электроны в вакууме, газе или твердом теле, а ионы в растворе. Так были созданы *электрохимические выпрямители, интеграторы, усилители*. Подвижность ионов в растворе намного меньше, чем подвижность электронов в газе или твердом теле, поэтому электрохимические приборы являются низкочастотными по своей физической природе, однако они имеют и ряд преимуществ перед электронными приборами.

В настоящее время хемотроника сформировалась как наука, изучающая перспективы построения информационных и управляющих систем на основе процессов, протекающих в жидкостях и на границе жидких фаз.

В ряде литературных источников вместо термина «хемотроника» по аналогии с электроникой фигурирует термин «ионика», так как во всех электрохимических приборах используются ионные процессы.

Исследования показали, что жидкостные системы имеют ряд важных преимуществ перед системами на основе твердых тел, прежде всего к ним следует отнести компактность и многофункциональность жидкостных элементов, где в небольшом объеме может происходить одновременно с разной скоростью множество разнообразных физико-химических процессов. Эти системы надежны и обеспечивают возможность изменения своей внутренней структуры, т. е. внутреннего управления. Наибо-

более характерным примером жидкостной системы является человеческий мозг.

Таким образом, перспектива развития хемотроники - это создание *информационных и управляющих систем* на жидкостной основе, а в более далеком будущем - биопреобразователей информации. Для успешного развития хемотроники требуются фундаментальные исследования не только физики жидкости, но также сложных физико-химических и электрохимических процессов в жидкостях и на границе жидких фаз.

В настоящее время на основе электрохимических явлений создан ряд хемотронных приборов: диоды-выпрямители, интеграторы, усилители, электрокинетические преобразователи, твердофазные электрохимические преобразователи и др.

Диод-выпрямитель концентрированного типа имеет хорошие характеристики при малых токах и напряжениях. Диод состоит из стеклянного корпуса, заполненного электролитом окислительно-восстановительной системы. Выпрямляющий эффект прибора обусловлен тем, что площадь большого электрода (платиновая сетка) в 400 раз больше площади малого электрода (платиновая проволока) и, следовательно, велика разница в концентрациях ионов, участвующих в окислительно-восстановительных реакциях на электродах.

В последние годы все большее внимание привлекают *электрохимические интеграторы*, которые в большинстве случаев не уступают электромеханическим, магнитным и электростатическим интеграторам ни по кратности измерения считываемого параметра, ни по точности работы в режиме интегрирования. Кроме того, они, как правило, потребляют значительно меньшую мощность и имеют меньшие габариты, уступая лишь в быстродействии, т. е. в частоте считываемого сигнала и времени изменения считываемого параметра в динамическом диапазоне.

Для усиления сверхнизкочастотных электрических сигналов наиболее эффективны *электролитические усилительные*

элементы. Разработано несколько конструкций транзисторов-усилителей. Транзистор-усилитель отечественной конструкции имеет платиновые электроды, а в качестве электролита - водный раствор ферриферроцианида калия, образующего с электродами окислительно-восстановительную систему.

В любой системе, содержащей вещество в двух фазах, одна из которых заряжена положительно, а другая - отрицательно, с приложением электрического поля фазы начинают двигаться относительно друг друга, причем положительная - к отрицательному полюсу, а отрицательная - к положительному. Такое движение называется электрокинетическим. Скорость относительного движения двух фаз пропорциональна напряженности приложенного электрического поля и зависит от размеров и формы тела, структуры двойного электрического слоя, а также свойств жидкости или газа. На основе электрокинетических явлений построены такие приборы, как виброметры, акселерометры, приборы для измерения скорости подъема самолета и др.

Одно из наиболее перспективных направлений хемотроники связано с использованием явлений фазовых переходов на электродах, имеющих место при прохождении электрического тока через электрохимическую ячейку. На этом принципе созданы такие приборы, как счетчики машинного времени, твердofазные интеграторы, управляемые сопротивления, запоминающее устройства и др.

Для электроники особый интерес представляют управляемые сопротивления и запоминающие устройства.

Управляемое сопротивление представляет собой бесконтактный аналог переменного резистора, в котором значение сопротивления изменяется под действием электрического сигнала и может оставаться неизменным («помнить») длительное время после подачи управляющего сигнала. Иногда этот прибор называют мемистером. Управляемое сопротивление размещено в герметически закрытом корпусе (рис. 8.1), где имеются два электрода 4 и 5. Электрод 5, выполненный из инертного метал-

ла (платина или родий), является резистивным и имеет некоторое омическое сопротивление, которое и представляет собой выходную величину. Электрод 4 является управляющим. Обычно его выполняют из металла (например, меди), причем соединение этого металла с кислотным остатком (например, CuSO_4) используют для приготовления электролита. В электролит добавляют также кислоту и вещества, способствующие осаждению металла. Управляемое сопротивление имеет три вывода (1, 2, 3), причем выводы 1 и 2 относятся к резистивному электроду и используются для включения в измерительную цепь. При подаче управляющего сигнала постоянного тока на выводы 2 и 3 через прибор начинает протекать ток той полярности, при которой резистивный электрод будет катодом; на нем происходит электролитическое осаждение меди из раствора. Управляющий электрод (анод) при этом растворяется. При изменении полярности управляющего сигнала во входной цепи электроды меняются ролями, и состав электролита в ячейке остается неизменным. Растворение меди резистивного электрода или осаждение меди на нем изменяет сечение, а, следовательно, и сопротивление электрода.

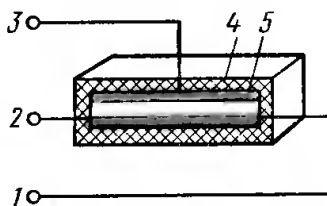


Рис. 8.1. Структура электрохимического управляемого сопротивления: 1, 2, 3 – выводы; 4 – управляющий электрод; 5 – резистивный электрод

Некоторые типы выпускаемых приборов имеют диапазон изменения сопротивления 0,5 - 50; 0 - 100; 0 - 200; 0 - 1000 Ом, диапазон токов управления 0,05 - 1 мА, частоту считываемого сигнала 10 - 50 Гц, потребляемую мощность управления 10^{-3} - 10^{-6} Вт, объем 0,2 - 0,4 см³, массу - несколько граммов.

Электрохимические элементы памяти преобразуют импульсы напряжения в сигналы двоичного кода, причем запись, воспроизведение и хранение этих сигналов осуществляют простым способом. В этих элементах нет движущихся частей, они имеют очень малые массу и объем.

Применяются электрохимические элементы памяти различной конструкции, например трехэлектродные ячейки, в которых для хранения информации в двоичном коде используется процесс электроосаждения. Принцип действия таких ячеек поясняет рис. 8.2. Ячейка, выполненная из изолирующего материала, заполнена раствором сульфата меди. В ячейке расположено два пластинчатых электрода 1 из золота или платины. Электроды с внутренней стороны изолированы эпоксидным покрытием 2, за исключением узкого зазора 3 (шириной в сотые или тысячные доли миллиметра). На противоположной стенке ячейки напротив зазора расположен медный электрод 4, который может быть также хромовым, цинковым или никелевым, причем раствор соли в электролите во всех случаях должен соответствовать выбранному металлу электрода. Входным сигналом ячейки является изменяемое сопротивление между электродами 1, разделенными зазором 3. Если зазор заполнен раствором, то это сопротивление велико. При подаче на электрод 1 напряжения, отрицательного относительно электрода 4, последний начинает растворяться, и в зазоре 3 происходит отложение меди. Через некоторое время (время записи) зазор между электродами 1 будет замкнут осажденной медью, и сопротивление между ними резко снизится из-за высокой проводимости меди. При подаче на электроды 1 напряжения, положительного относительно электрода 4, осажденная в зазоре медь растворяется, и ячейка

возвращается в прежнее состояние, характеризующееся высоким сопротивлением между электродами 1. Таким образом, ячейка имеет два состояния: замкнутый зазор между электродами 1 (логическая «1») и разомкнутый зазор (логический «0»). Совокупность подобных ячеек памяти позволяет записывать информацию в двоичном коде. Такой прибор, кроме того, можно использовать в качестве зашелкивающего переключателя, или реле.

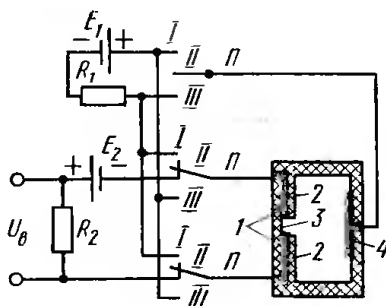


Рис. 8.2. Электрохимическая ячейка памяти
(I, II, III – соответственно запись, считывание и стирание информации): 1 - пластинчатые электроды из золота или платины; 2 - эпоксидное изолирующее покрытие; 3 - узкий межэлектродный зазор; 4 - медный электрод (или хромовый, цинковый или никелевый)

На рис. 8.2 показана электрическая схема, в которую входит *электрохимический элемент памяти*. Трехпозиционный переключатель П служит для подключения трех видов операций - записи, считывания и стирания. При положении I переключателя на электроды 1 от батареи E_1 через резистор R_1 подается отрицательное относительно электрода 4 напряжение. Происходит запись - в зазоре осаждается медь. При положении III переключателя на электроды 1 подается положительное напряже-

ние от батареи E_1 . Происходит стирание - медь в зазоре растворяется. Положение II переключателя соответствует процессу считывания, когда к электродам 1 подключается измерительная схема, состоящая из источника эдс. E_2 и резистора R_2 . Выходным сигналом служит падение напряжения U_B на резисторе R_2 . При замкнутом зазоре $U_B \approx E_2$, при разомкнутом зазоре $U_B \ll E_2$.

Представляют большой интерес электрохимические твердотельные элементы - **ионисторы**, выполненные на основе высокопроводящих твердых электролитов.

Основой ионистора является **твёрдый электролит** ($RbAg_4I_3$) с высокой проводимостью 0,27 См/см (при температуре 25 °С). Во время зарядки (минус на серебряном электроде) подвижные ионы серебра, содержащиеся в твердом электролите, мигрируют к катоду (рис. 8.3) и оседают на нем в виде металлического серебра. На положительном угольном электроде происходит разделение заряда и образование двойного электрического слоя. Этот процесс протекает вплоть до напряжения разложения электролита ($E_p = 0,67$ В), по достижении которого на угольном электроде начинает выделяться свободный йод. Во время разрядки осевшее серебро растворяется и возвращается в электролит.

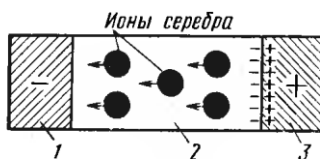


Рис. 8.3. Принцип работы ионистора: 1 - серебряный катод; 2 - твердый электролит; 3 - угольный анод

Из-за отсутствия диэлектрика рабочее напряжение ионистора мало: оно должно быть меньше напряжения разложения электролита и составлять около 0,5 В. Для получения более высоких напряжений и токов ионисторы можно соединять последовательно-параллельно, как конденсаторы и батареи.

Конструктивно отечественные ионисторы (типа И50-1) выполнены из трех спрессованных таблеток (рис. 8.4), герметизированных в металлическом (*а*) или пластмассовом (*б*) корпусе. Ионисторы имеют емкость 50 Ф и более, длительно хранят заряд благодаря малым токам утечки (сохраняют до 97 % заряда после 16 месяцев хранения) и устойчиво работают в диапазоне температур от - 60 до + 145°С.

Ионистор может служить *интегратором напряжений, источником питания, запоминающим устройством* и т. д.

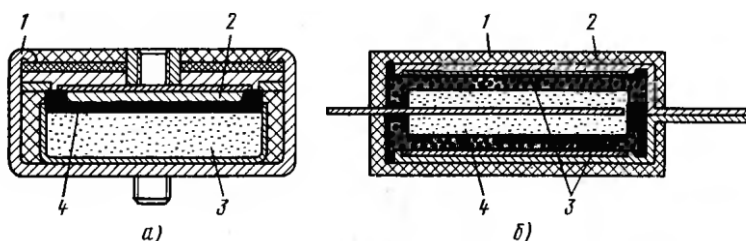


Рис. 8.4. Конструктивные разновидности ионистора
а - в металлическом корпусе (1 - металлический корпус;
 2 - катодная таблетка; 3 - анодная таблетка; 4 - таблетка электролита); *б* - в пластмассовом корпусе
 (1 - пластмассовый корпус; 2 - таблетка электролита;
 3 - катодные таблетки; 4 - анодная таблетка)

Использование ионистора как интегратора напряжений обеспечивается хорошей воспроизводимостью процесса заряда - разряда. При зарядке постоянным током получается зависимость напряжения от времени, близкая к линейной; при разряд-

ке наблюдается похожая зависимость, но с отрицательным наклоном. С помощью такой треугольной формы напряжения можно производить интегрирование напряжения.

Последовательным соединением ионисторов можно добиться более высоких рабочих напряжений, применяя такую батарею в качестве источника питания. Например, 10 элементов емкостью по 50 Ф образуют модуль диаметром 25 мм и высотой 64 мм, имеющий емкость 5 Ф и напряжение 5 В. Такой источник питания можно успешно применять в различной микроэлектронной аппаратуре.

Запоминающие модули на ионисторах способны хранить информацию в течение многих часов или дней с временем выборки несколько секунд или минут. Применение ионистора в качестве запоминающего устройства основано на том, что полностью заряженный ионистор соответствует логической «1», а полностью разряженный ионистор - логическому «0». Миниатюрные ионисторы, сформированные на подложках, изготовленных по планарной технологии, можно применять для простых запоминающих устройств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На протяжении многих лет наблюдалась устойчивая тенденция экспоненциального роста степени интеграции. Однако за последние годы произошло снижение темпа роста степени интеграции. Анализ современных проблем обработки информации показывает, что, даже выйдя на предельные показатели, схемотехническая электроника не всегда сможет удовлетворить современным требованиям. Ряд задач, таких как распознавание образов, синтезирование конструкций, управление базой знаний, создание системы искусственного интеллекта не могут быть успешно решены в рамках существующих микроэлектронных систем обработки больших информационных массивов. Надежды возлагаются на применение элементов и приборов функциональной электроники.

Современный этап развития микроэлектроники характеризуется непрерывным повышением комплексной (физической, технологической и схемотехнической) интеграции изделий, что обусловило интенсивное развитие БИС и СБИС их разработку, освоение в производстве, расширение сфер применения в различных видах микроэлектронной аппаратуры.

Функциональная микроэлектроника предполагает принципиально новый подход, позволяющий реализовать определенную функцию аппаратуры без применения стандартных базовых элементов, основываясь непосредственно на физических явлениях в твердом теле.

Иными словами, функциональная микроэлектроника охватывает вопросы получения специальных сред с наперед заданными свойствами и создания различных электронных устройств методом физической интеграции, то есть использования таких физических принципов и явлений, реализация которых позволяет получить приборы со сложным схемотехническим или системотехническим функциональным назначением.

Систематизированное рассмотрение физических и микросистемных основ построения элементной базы приборов и устройств направлений развития функциональной электроники (акустоэлектроники, диэлектрической электроники, полупроводниковой электроники, магнитоэлектроники, молекулярной электроники, криоэлектроники, хемоэлектроники) облегчит понимание и восприятие материала лекций и практических занятий по дисциплине «Функциональная электроника», читаемых студентам третьего курса, обучающимся на кафедре полупроводниковой электроники и наноэлектроники ВГТУ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Балышева, О.Л. Материалы для акустоэлектронных устройств [Текст]: учеб. пособие. - СПб.: ГУАП, 2005. - 53 с.
2. Бугаев, А.С. Устройства на поверхностных акустических волнах [Текст]: учеб. пособие / А.С. Бугаев, В.Ф. Дмитриев, С.В. Кулаков. - СПб.: ГУАП, 2009. - 188 с.
2. Гуртов, В.А. Твердотельная электроника [Текст]: учеб. пособие / В.А. Гуртов. - М.: Техносфера, 2005. - 408 с.
3. Ефимов, И.Е. Микроэлектроника. Проектирование, виды микросхем, функциональная электроника [Текст]: учеб. пособие / И.Е. Ефимов, И.Я. Козырь, Ю.И. Горбунов. - М.: Высш. шк., 1987. - 416 с.
4. Кравченко, А.Ф. Физические основы функциональной электроники [Текст]: учеб. пособие / А.Ф. Кравченко. - Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 2000. - 444 с.
5. Смирнов, Ю.А. Основы нано- и функциональной электроники [Текст]: учеб. пособие / Ю.А. Смирнов, С.В. Соколов, Е.В. Титов. - СПб: Лань, 2013. - 320 с.
6. Щука, А.А. Функциональная электроника [Текст]: учебник для вузов / А.А. Щука. - М: МИРЭА, 1998. - 260 с.
7. Щука, А.А. Электроника [Текст]: учеб. пособие / А.А. Щука; под ред. А.С. Ситова. - СПб: БХВ-Петербург, 2005. - 800 с.
8. Юшина, Л.Д. Твердотельная хемотроника [Текст] / Л.Д. Юшина. - Екатеринбург: УрО РАН, 2003. - 204 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. Функциональная электроника	9
Основные понятия	
1.1. Особенности функциональной электроники	9
1.2. Динамическая неоднородность. Типы динамических неоднородностей	13
1.3. Основные направления и тенденции развития функциональной микроэлектроники	23
2. Функциональная акустоэлектроника	28
2.1. Физические основы	28
2.1.1. Динамические неоднородности	29
2.1.2. Континуальные среды	36
2.1.3. Генераторы динамических неоднородностей	39
2.1.4. Устройство управления динамическими неоднородностями	43
2.1.5. Детектирование динамических неоднородностей	47
2.2. Приборы функциональной акустоэлектроники	49
2.2.1. Линии задержки	50
2.2.2. Устройства частотной селекции	57
2.2.3. Генераторы на ПАВ	68
2.2.4. Усилители	70
2.2.5. Акустические преобразователи	74
3. Функциональная диэлектрическая электроника	77
3.1. Физические основы	77
3.1.1. Динамические неоднородности	77
3.1.2. Континуальные среды	83
3.1.3. Генераторы динамических неоднородностей	89
3.1.4. Другие элементы приборов	90

3.2. Приборы и устройства функциональной диэлектрической электроники	90
3.2.1. Слоистые структуры	90
3.2.2. Устройства памяти	93
3.2.3. Процессоры	98
4. Функциональная полупроводниковая электроника	103
4.1. Физические основы	103
4.1.1. Динамические неоднородности в полупроводниках	104
4.1.2. Континуальные среды	110
4.1.3. Генераторы динамических неоднородностей	113
4.1.4. Устройства управления динамическими неоднородностями	122
4.1.5. Детекторы динамических неоднородностей	129
4.2. Приборы и устройства функциональной полупроводниковой электроники	132
4.2.1. Аналоговые процессоры на ПЗС-структурах	132
4.2.2. Цифровые процессоры на ПЗС-структурах	140
4.2.3. Запоминающие устройства на ПЗС-структурах	146
4.2.4. БИСПИН-приборы	151
4.2.5. Приборы на волнах пространственного заряда	158
4.2.6. Ганновские приборы	162
5. Функциональная магнетоэлектроника	166
5.1. Физические основы	166
5.1.1. Динамические неоднородности в магнетоэлектронике	167
5.1.2. Континуальные среды	174

5.1.3. Генерация, детектирование и управление динамическими неоднородностями	176
5.2. Приборы и устройства функциональной магнетoeлектроники	181
5.2.1. Процессоры сигналов на ЦМД	181
5.2.2. Процессоры сигналов на МСВ	183
5.2.3. Запоминающие устройства на ЦМД	186
5.2.4. Запоминающие устройства на магнитных вихрях	190
5.2.5. Запоминающие устройства на магнитных пленках	191
6. Функциональная криoeлектроника	195
6.1. Физические основы криoeлектроники	196
6.2. Исторические аспекты криoeлектроники	211
6.3. Основные направления криoeлектроники	217
6.4. Приборы криoeлектроники	241
7. Функциональная молекулярная электроника и биоэлектроника	252
7.1. Физические основы	252
7.1.1. Динамические неоднородности	255
7.1.2. Континуальные среды	258
7.1.3. Другие элементы приборов	260
7.2. Молекулярные устройства	261
7.3. Автоволновая электроника	264
7.4. Биоэлектроника	267
8. Функциональная хемотроника	272
Заключение	281
Библиографический список	283

Учебное издание

Свистова Тамара Витальевна

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

В авторской редакции

Подписано к изданию 25.11.2014.

Объем данных 3,2 Мб.

ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический
университет»

394026 Воронеж, Московский просп., 14