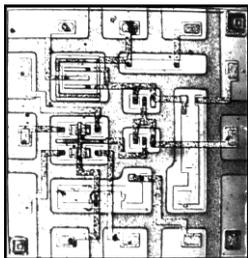


ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный
технический университет»

Кафедра полупроводниковой электроники и нанoeлектроники

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению контрольной работы № 1 по дисциплине
«Физические основы электроники»
для студентов направления подготовки бакалавров
210100 «Электроника и нанoeлектроника», профиля
«Микроэлектроника и твердотельная электроника»
заочной формы обучения



Воронеж 2013

Составитель канд. техн. наук Т.В. Свистова

УДК 621.382.2

Методические указания к выполнению контрольной работы № 1 по дисциплине «Физические основы электроники» для студентов направления подготовки бакалавров 210100 «Электроника и наноэлектроника», профиля «Микроэлектроника и твердотельная электроника» заочной формы обучения / ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет»; сост. Т.В. Свистова. Воронеж, 2013. 33 с.

Методические указания включают содержание контрольной работы, варианты и порядок выполнения работы, общие пояснения к тексту заданий, библиографический список рекомендуемой литературы.

Методические указания предназначены для студентов третьего курса

Издание подготовлено в электронном виде в текстовом редакторе MS WORD XP и содержится в файле «Му_кр_1_ФОЭ.doc».

Табл. 12. Ил. 2. Библиогр.: 9 назв.

Рецензент канд. физ.-мат. наук, доц. Е.В. Бордаков

Ответственный за выпуск зав. кафедрой
д-р физ.-мат. наук, проф. С.И. Рембеза

Издается по решению редакционно-издательского совета Воронежского государственного технического университета

© ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2013

СОДЕРЖАНИЕ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ, ВЫБОР ВАРИАНТОВ, ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ, ОБЩИЕ ПОЯСНЕНИЯ К ТЕКСТУ ЗАДАНИЙ

Электроника представляет собой обширную область науки и техники, базирующуюся на изучении физических явлений в полупроводниках, диэлектриках, вакууме, плазме, газе и т.д. для создания на их основе разнообразных изделий с электронными компонентами. Электроника прочно вошла в самые различные сферы нашей деятельности; область применения различных электронных устройств огромна – от наручных электронных часов до телевизора и радиоприемника; от электронного зажигания в автомобилях до сложнейших автоматических технологических линий; от бытовых нагревательных приборов (микроволновые печи) до сверхмощных компьютеров.

История развития электроники восходит к концу XIX – началу XX века. Первоначально она развивалась для удовлетворения потребностей бурно развивающихся средств связи – для генерирования, усиления и преобразования электрических сигналов.

История создания электронных приборов базируется на открытиях и исследованиях физических явлений, связанных с взаимодействием свободных электронов с электромагнитными полями и веществом. Поэтому первые работы М.В. Ломоносова, Г.В. Рихмана (Россия) и Б. Франклина (США) в конце XVIII века по исследованию электричества могут быть отнесены к началу возникновения электроники. Открытие электрической дуги академиком В.В. Петровым в 1802 г. является началом технического использования электричества.

Работы как отечественных, так и зарубежных ученых в течение XIX века создали фундамент электроники. Среди наиболее важных достижений можно отметить труды А. Ампера и М. Фарадея, установивших законы электричества

и электромагнитной индукции, создание теории электромагнетизма М. Максвеллом и теории электронов Х.А. Лоренцем, экспериментальное обнаружение электромагнитных волн Г. Герцем.

Первым электровакуумным прибором явилась осветительная лампа, изобретенная в 1872 г. выдающимся русским ученым А.Н. Лодыгиным. В 1883 г. американский ученый Т. Эдисон усовершенствовал лампу Лодыгина, введя в баллон пластинку, которая при подаче напряжения различной полярности притягивала или отталкивала от себя электроны, вылетающие из нити накала. Тем самым была создана первая двух-электродная лампа – диод.

Важными работами для создания электронных приборов являются открытие фотоэлектронной эмиссии русским ученым А.Г. Столетовым (1888 г.) и термоэлектронной эмиссии Т.А. Эдиссоном. Большую роль на развитие электроники оказали работы А.С. Попова, создавшего кристаллический детектор, К.Ф. Брауна, который изобрел первую электронно-лучевую трубку (1897 г.), Д. Томсона, О.У. Ричардсона, А. Эйнштейна и др., выполненные в конце XIX и начале XX веков. В начале XX века были изобретены электровакуумные диоды и триоды, газотроны. В 1907 г. русский ученый Б.Л. Розинг предложил использовать электронно-лучевую трубку для приема изображений, что может считаться началом телевидения. Много сделали для развития отечественной электроники русские ученые и инженеры В.И. Коваленков, А.Д. Папалески, М.А. Бонч-Бруевич, О.В. Лосев.

В советский период значительный вклад внесли А.А. Чернышев, который выдвинул идею создания видикона, Л. А. Кубецкий – изобретатель фотоэлектронного умножителя, А.П. Константинов и С.И. Котов – авторы приемной телевизионной трубки-иконоскопа и др. Существенное влияние на развитие полупроводниковых приборов оказали работы школы академика А.Д. Иоффе в 30-х – 40-х годах XX века. Важ-

нейшими из них являются: теория выпрямления тока в контакте металл – полупроводник, предложенная Б.И. Давыдовым; квантовая теория полупроводников и теория генерации пар носителей заряда электрон – дырка; разработка полупроводниковых термоэлектрических батарей. Трудями Я.И. Френкеля, Л.Д. Ландау, Б.И. Давыдова и др. создана теория фотоэдс в полупроводниках.

Однако подлинный период развития электроники начался после изобретения в 1948 году американскими учеными Д. Бардиным, У. Бреттейном и У. Шокли полупроводникового прибора - транзистора, технические характеристики которого значительно превосходили характеристики электронных ламп, применявшихся в электронных устройствах первого поколения. В 50-е годы были изобретены: полевой транзистор с *p-n*-переходом, солнечные батареи, оптроны, туннельные диоды, тиристоры и др. В 1960 г. Д. Кинг и М. Аттала создали МОП-транзистор, а в 1966 г. С. Мид разработал полевой транзистор с барьером Шоттки.

Следующий этап повышения технического уровня элементной базы, а также завершенных изделий электронной аппаратуры обусловлен переходом на интегральные микросхемы, что определило дальнейшее развитие и совершенствование технологических способов и процессов, общих для всех полупроводниковых приборов. Полупроводниковые интегральные схемы (ИС), представляющие собой функционально законченные узлы радиоаппаратуры: логические элементы, усилители, генераторы и др. были разработаны в шестидесятые годы XX столетия. В интегральной микросхеме все или часть элементов нераздельно связаны и электрически соединены между собой так, что устройство рассматривается как единое целое. Это позволяет резко уменьшить размеры функциональных узлов и повысить надежность монтажа.

Восьмидесятые и девяностые годы характеризуются бурным развитием микроэлектроники, увеличением функцио-

нальной сложности и плотности упаковки элементов в одном полупроводниковом кристалле, то есть разработкой и производством больших и сверхбольших интегральных схем (БИС и СБИС) и микропроцессоров.

Успехи квантовой электроники определили новые возможности оптики, приведя к возникновению и быстрому развитию нового направления – оптической электроники. Соединив в себе возможности, как оптики, так и электроники, оптическая электроника способна решать задачи, не посильные по отдельности ни оптике, ни электронике. Появление лазеров, их непрерывное совершенствование и быстрое освоение в промышленном масштабе привело к созданию принципиально новых приборов и методов, их широкому распространению в самых разнообразных областях науки и техники.

Целями преподавания дисциплины «Физические основы электроники» являются изучение студентами физики электронных процессов в вакууме, газах, твердых телах, на границах раздела сред и принципов построения и работы электронных приборов различного назначения. Дисциплина включает в себя четыре раздела: «Вакуумная и плазменная электроника», «Твердотельная электроника», «Микроэлектроника», «Квантовая и оптическая электроника».

В результате изучения дисциплины студент должен знать: физико-технические основы вакуумной и плазменной электроники: законы эмиссии, способы формирования и транспортировки потоков заряженных частиц (ПЗЧ) в вакууме и плазме, способы управления параметрами и преобразования энергии ПЗЧ в другие виды; основы физики твердого тела; принципы использования физических эффектов в твердом теле в электронных приборах и устройствах твердотельной электроники; конструкции, параметры, характеристики и методы моделирования приборов твердотельной электроники; основы разработки, изготовления и использования электронных устройств с минимально возможными габаритами и вы-

сокой надёжностью, изготавливаемых на основе интегрально-групповой технологии; основные физические процессы, лежащие в основе действия приборов квантовой и оптической электроники, методы их аналитического описания, факторы, определяющие их параметры и характеристики, а также особенности оптических методов передачи и обработки информации;

Студенты направления подготовки бакалавров 210100 «Электроника и наноэлектроника», профиля «Микроэлектроника и твердотельная электроника» заочной формы обучения согласно рабочей программе дисциплины «Физические основы электроники» выполняют две контрольных работы. Первая контрольная работа направлена на изучение разделов «Вакуумная и плазменная электроника» и «Твердотельная электроника», а вторая – разделов «Микроэлектроника», «Квантовая и оптическая электроника». Первая контрольная работа состоит из 12 заданий. Каждое задание имеет десять вариантов. ***Студенты в заданиях №№ 1 – 6 выбирают номер варианта, соответствующий последней цифре номера зачетки, в заданиях №№ 7 – 12 выбирают номер варианта, соответствующий предпоследней цифре номера зачетки.*** Например, если номер зачетки оканчивается числом 72, то выбирается вариант 2 заданий №№ 1 – 6 и вариант 7 заданий №№ 7 – 12.

Контрольная работа выполняется в отдельной тетради. На обложке указывается название дисциплины, фамилия и инициалы студента, номер зачетки, специальность и факультет, домашний адрес и телефон, а также варианты выполняемых заданий. Выполнение каждого задания желательно начинать с новой страницы. На каждой странице следует оставлять поля для замечаний. В заданиях после изложения текста задания указаны разделы учебных пособий, которые могут оказать помощь при их выполнении.

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

Задание № 1. Физические основы эмиссионной электроники. Дайте развернутый ответ на вопрос своего варианта.

Таблица 1

Вариант	Вопрос
0	Что такое эмиссия? Какие виды эмиссии в твердых телах Вы знаете?
1	В чем заключается явление автоэлектронной эмиссии?
2	В чем заключается явление взрывной эмиссии электронов?
3	В чем заключается явление фотоэлектронной эмиссии? Какие основные закономерности фотоэлектронной эмиссии Вы знаете?
4	В чем заключается явление фотоэлектронной эмиссии? Какие основные характеристики фотоэлектронной эмиссии Вы знаете?
5	Перечислите группы электронов, участвующих в фотоэлектронной эмиссии в полупроводниках.
6	В чем заключается явление вторичной электронной эмиссии? Поясните ее механизм.
7	Охарактеризуйте энергетический спектр вторичных электронов.
8	Какие коэффициенты, характеризующие вторичную электронную эмиссию, Вы знаете?
9	В чем заключается явление термоэлектронной эмиссии?

Рекомендуемая литература: [1], стр. 9 – 51.

Явление испускания электронов или ионов с поверхности вещества в окружающее пространство называется *электронной или ионной эмиссией*. Самопроизвольной эмиссии электронов из твердого тела препятствует наличие на границе потенциального барьера. Для выхода из вещества электрон должен совершить работу выхода. Эту работу электрон может совершить, если он получит извне некоторую дополнительную энергию. В зависимости от того, каким способом сообщается электрону дополнительная энергия различают следующие виды эмиссии в твердых телах: электростатическая (автоэлектронная) эмиссия; взрывная эмиссия; эмиссия «горячих» электронов; фотоэлектронная эмиссия; вторичная электронная эмиссия; термоэлектронная эмиссия; ионно-электронная эмиссия; экзоэлектронная эмиссия; гибридные эмиссии; вторичная ионная эмиссия.

В электровакуумных приборах наиболее широкое применение получили: автоэлектронная, взрывная, термоэлектронная, фотоэлектронная и вторичная электронная эмиссии

Задание № 2. Электронные электровакуумные приборы. Дайте развернутый ответ на вопрос своего варианта.

Таблица 2

Вариант	Вопрос
0	По каким принципам осуществляется классификация электровакуумных приборов и устройств, классификация электронно-управляемых ламп?
1	Какие катоды используются в электровакуумных приборах? Для чего они служат и какими параметрами характеризуются?

Вариант	Вопрос
2	Какие аноды и сетки используются в электровакуумных приборах? Для чего они служат и какими параметрами характеризуются?
3	Поясните принцип действия электровакуумного диода.
4	Какие основные характеристики электровакуумного диода Вы знаете?
5	Какие основные параметры электровакуумного диода Вы знаете?
6	Поясните принцип действия электровакуумного триода.
7	Какие основные характеристики электровакуумного триода Вы знаете?
8	Какие основные параметры электровакуумного триода Вы знаете?
9	Поясните принцип действия электровакуумного фотоэлемента и фотоэлектронного умножителя.

Рекомендуемая литература: [1], стр. 51 – 101.

Электровакуумный прибор – это прибор, в котором рабочее пространство, изолированное газонепроницаемой оболочкой, имеет высокую степень разрежения или заполнено специальной средой (парами или газами) и действие которого основано на использовании электрических явлений в вакууме или газе.

Электронный электровакуумный прибор – это прибор, в котором прохождение электрического тока осуществляется только свободными электронами.

Электронные электровакуумные приборы объединяют такие группы приборов, как электронно-управляемые лампы, электронно-лучевые приборы, фотоэлектронные приборы.

Независимо от функционального назначения любая электронная лампа состоит из баллона (колбы), системы электродов и системы выводов.

В рабочем пространстве электронного электровакуумного прибора происходят следующие основные процессы: образование свободных носителей электрического заряда – электронов в процессе эмиссии с поверхности твердого тела; создание направленного потока этих частиц; управление как плотностью потока, так и направлением движения частиц. Все эти процессы осуществляются с помощью электродов (катодов, сеток, анодов, специальных пластин), которые присоединяются к внешним источникам напряжения.

Система электродов в простейшей лампе содержит только катод и анод, в более сложных приборах, кроме катода и анода, имеются также сетки и другие специальные электроды.

Задание № 3. Электронные потоки в вакууме, их формирование и транспортировка. Дайте развернутый ответ на вопрос своего варианта.

Таблица 3

Вариант	Вопрос
0	Дайте определение электронного пучка, электронного потока. Перечислите их основные характеристики. Какие типы электронных пучков Вы знаете?
1	Какие упрощающие предположения используются при описании реальных электронных потоков?
2	Опишите системы формирования электронного потока.

Вариант	Вопрос
3	Что такое электронный прожектор? Как он устроен?
4	Как осуществляется модуляция электронного луча по плотности?
5	Как осуществляется фокусировка электронного луча с помощью электростатических линз?
6	Как осуществляется фокусировка электронного луча с помощью магнитных линз?
7	Изложите основные положения управления электронным лучом с помощью электростатических отклоняющих систем.
8	Изложите основные положения управления электронным лучом с помощью магнитных отклоняющих систем.
9	Охарактеризуйте экраны электронно-лучевых трубок. Какие характеристики и параметры экранов Вы знаете?

Рекомендуемая литература: [1], стр. 102 – 174.

Электроны, вышедшие из катода в вакуум и ставшие свободными заряженными частицами, несмотря на наличие начальных скоростей при отсутствии внешнего электрического поля в основном концентрируются вблизи поверхности ка-

тода. Для отбора электронов с поверхности катода используют постоянные или переменные электрические поля, которые обеспечивают не только заданное значение катодного конвекционного тока, но также энергию и направления распространения всей совокупности отобранных электронов, называемой электронным потоком. Таким образом, процесс отбора электронов с поверхности катода, т.е. отбора катодного тока, по существу, является начальной стадией формирования электронного потока.

Электронный поток – это совокупность свободных электронов, упорядоченно движущихся в определенном направлении.

Большое разнообразие электронных приборов и устройств, в которых используются электронные потоки, определило и разнообразие требований к параметрам этих потоков, в частности, к их геометрическим размерам. В связи с этим исторически, наряду с термином «электронный поток», появились и вошли в специальную литературу по физической электронике термины «электронный пучок» и «электронный луч». Они используются в тех случаях, когда необходимо подчеркнуть морфологические особенности электронного потока, т.е. его конфигурацию и соотношение геометрических размеров.

Электронный пучок – это поток электронов с вполне определенными границами, продольный размер которого, как правило, намного превышает поперечный. Такие пучки используются в разнообразных микроволновых электронных приборах: клистронах, лампах бегущей и обратной волны и др.

Электронный луч – это предельно тонкий электронный пучок, сечение которого можно считать сколь угодно малым. Такие остро сконцентрированные лучи используются в различных электронно-лучевых приборах: осциллографических и телевизионных трубках, электронных микроскопах и др.

Задание № 4. Физические основы газоразрядной электроники. Дайте развернутый ответ на вопрос своего варианта.

Таблица 4

Вариант	Вопрос
0	Какие взаимодействия между заряженными частицами в газовом разряде Вам известны?
1	Поясните явление электрического разряда в газах.
2	Какой газовый разряд является несамостоятельным, самостоятельным? Приведите условие самостоятельности разряда. Что характеризуют кривые Пашена?
3	Какие виды электрических разрядов в газах Вы знаете? Как осуществляется их классификация?
4	Охарактеризуйте темный разряд в газах.
5	Охарактеризуйте тлеющий разряд в газах.
6	Охарактеризуйте дуговой разряд в газах.
7	Охарактеризуйте искровой разряд в газах.
8	Охарактеризуйте коронный разряд в газах.
9	Охарактеризуйте высокочастотный разряд в газах.

Рекомендуемая литература: [2], стр. 6 – 52.

Известно, что газ хороший диэлектрик, но при достаточно больших напряжениях внешних электрических полей его проводимость резко увеличивается за счет повышения концентрации заряженных частиц. Причинами появления заряженных частиц в газовой среде являются:

- а) эмиссия с электродов и стенок сосуда;
- б) взаимодействие частиц газа.

Процесс прохождения тока в газовой среде называется **электрическим разрядом**. Все взаимодействия между частицами в газовом разряде делятся на **упругие** и **неупругие**.

При **упругих взаимодействиях** (столкновениях) суммарная кинетическая энергия взаимодействующих частиц остается постоянной. Наиболее существенны упругие взаимодействия типа: электрон-электронные, атом-атомные, ион-ионные, ион-атомные, электрон-атомные, электрон-ионные.

Для **неупругих взаимодействий** характерно изменение суммарной кинетической энергии частиц за счет изменения их внутренней энергии. Различают неупругие соударения первого и второго рода. **Неупругие соударения первого рода** – соударения, при которых часть кинетической энергии переходит во внутреннюю энергию частиц (возбуждение атомов электронным ударом, ионизация). **Неупругие соударения второго рода** – соударения, при которых суммарная кинетическая энергия сталкивающихся частиц увеличивается за счет их внутренней энергии (возвращение атома в невозбужденное состояние, рекомбинация, процессы перезарядки).

Самостоятельный разряд – это разряд, для поддержания которого достаточно разности потенциалов между катодом и анодом, разряд, который не требует никакого внешнего воздействия и в котором ионизация происходит за счет внутренних процессов.

Несамостоятельный разряд – это разряд, для поддержания которого, кроме разности потенциалов на электродах, требуется непрерывное воздействие внешнего ионизатора (подогрев катода, облучение светом). В отсутствие внешнего ионизатора несамостоятельный разряд прекращается.

Задание № 5. Физические основы плазменной электроники. Дайте развернутый ответ на вопрос своего варианта.

Таблица 5

Вариант	Вопрос
0	Что такое плазма? Какими параметрами она характеризуется? Как происходит образование активных частиц плазмы?
1	По каким признакам осуществляется классификация плазмы?
2	В чем заключаются особенности плазмы газового разряда при низком, среднем и высоком давлении?
3	Какие механизмы излучение плазмы Вы знаете?
4	Охарактеризуйте колебания в плазме.
5	Охарактеризуйте процессы переноса в плазме.
6	Какие методы диагностика плазмы Вы знаете?
7	Поясните, как осуществляется исследование плазмы методом ленгмюровского зонда.
8	Как влияет магнитное поле на процессы переноса в плазме?
9	Какие параметры плазмы можно определить из зондовой характеристики?

Рекомендуемая литература: [2], стр. 53 – 76.

Плазменная электроника – раздел электроники, в котором изучаются процессы коллективного взаимодействия потоков заряженных частиц с плазмой и ионизированным газом, приводящие к возбуждению в системе волн и колебаний, а также использование эффектов такого взаимодействия для создания приборов и устройств электронной техники.

Плазма представляет собой частично или полностью ионизированный газ, состоящий из смеси стабильных и возбужденных атомов и молекул и продуктов распада молекул: радикалов, положительно и отрицательно заряженных ионов, электронов.

Плазма образуется при внешнем воздействии на вещество с помощью различного рода газовых разрядов или в сильных переменных и постоянных электрических и магнитных полях. Основными процессами, приводящими к образованию активных частиц плазмы, являются неупругие столкновения электронов с атомами и молекулами.

Задание № 6. Контактные явления. Электронно-дырочный переход. Дайте краткий ответ на вопрос своего варианта.

Таблица 6

Вариант	Вопрос
0	Электронно-дырочный переход (<i>p-n</i> -переход) в состоянии термодинамического равновесия. Зонная диаграмма идеального <i>p-n</i> -перехода в состоянии термодинамического равновесия.
1	Какое включение <i>p-n</i> -перехода называется прямым? Приведите зонную диаграмму идеального <i>p-n</i> -перехода при прямом смещении. Что такое инжекция неосновных носителей заряда?

Вариант	Вопрос
2	Какое включение p - n -перехода называется обратным? Приведите зонную диаграмму идеального p - n -перехода при обратном смещении. Что такое экстракция неосновных носителей заряда?
3	Какими процессами определяется барьерная емкость p - n -перехода? Приведите зависимость барьерной емкости p - n перехода от напряжения.
4	Какими процессами определяется наличие диффузионной емкости p - n -перехода? Как изменяется диффузионная емкость с ростом прямого тока через p - n -переход?
5	Какова теоретическая зависимость тока через p - n -переход от величины приложенного внешнего напряжения? Приведите график этой зависимости.
6	Чем объясняется отклонение реальной вольт-амперной характеристики p - n -перехода от теоретической при больших прямых токах? Чем объясняется отклонение реальной вольт-амперной характеристики p - n -перехода от теоретической при обратном включении?
7	Что такое лавинный пробой p - n -перехода? Как температура влияет на напряжение лавинного пробоя?
8	Что такое туннельный пробой p - n -перехода? Как температура влияет на напряжение туннельного пробоя?
9	Что такое тепловой пробой p - n -перехода?

Рекомендуемая литература: [3], стр. 28 – 97; [4], стр. 35 – 68; [7], стр. 41 – 62; [8], стр. 53 – 103.

Электронно-дырочный переход (*p-n*-переход) находится на границе между двумя областями полупроводника, одна из которых имеет электронную (*n*), а другая – дырочную (*p*) электрические проводимости, то есть соответственно *n*- или *p*-области. Однако его нельзя создать простым соприкосновением полупроводниковых пластин *n*- или *p*-типов, так как при этом неизбежен промежуточный слой воздуха, оксидов или поверхностных загрязнений. Переход создается в кристалле полупроводника с помощью технологических процессов (например, сплавления, диффузии), в результате которых граница раздела между областями *p*- и *n*-типов находится внутри полупроводникового монокристалла. Классическим примером *p-n* перехода являются: $n\text{Si} - p\text{Si}$, $n\text{Ge} - p\text{Ge}$.

Обратите особое внимание на понятие **смещение** *p-n*-перехода.

При **прямом смещении** основные носители преодолевают потенциальный барьер и переходят в соседний слой. Переход основных носителей заряда в соседний слой, где они становятся неосновными, называется **инжекцией**.

При **обратном смещении** через *p-n*-переход протекает обратный ток. При достижении высокого обратного напряжения происходит **электрический пробой (туннельный или лавинный)**. Электрический пробой обратим. При увеличении тока и выделении большой мощности может произойти **тепловой пробой**. Он необратим и приводит к разрушению *p-n*-перехода.

Вольтамперная характеристика (ВАХ) *p-n*-перехода является основой понимания ВАХ всех полупроводниковых приборов. Нужно уметь объяснить ее вид на основе процессов на *p-n*-переходе. При повышении температуры различные участки ВАХ изменяются по-разному. Падение напряжения на прямо смещенном переходе при повышении температуры уменьшается незначительно. Особенно сильно меняется обратный ток. При увеличении температуры напряжение лавинного пробоя растет.

Задание № 7. Контактные явления. Разновидности электрических переходов и контактов. Дайте краткий ответ на вопрос своего варианта.

Таблица 7

Вариант	Вопрос
0	Почему электрический переход между двумя полупроводниками с одним типом электропроводности, но с разной концентрацией примесей, является омическим и неинжектирующим неосновные носители заряда в высокоомную область?
1	Приведите энергетическую диаграмму электрического перехода между двумя полупроводниками с одним типом электропроводности, но с разной концентрацией.
2	При каких условиях электрический переход между металлом и полупроводником будет омическим?
3	Приведите энергетическую диаграмму омического перехода между металлом и полупроводником.
4	При каких условиях электрический переход между металлом и полупроводником будет выпрямляющим?
5	Приведите энергетическую диаграмму выпрямляющего перехода между металлом и полупроводником.
6	Каковы правила построения энергетических диаграмм гетеропереходов?

Вариант	Вопрос
7	Почему и при каких условиях на гетеропереходах может происходить выпрямление без инжекции неосновных носителей заряда?
8	Почему на гетеропереходе между двумя полупроводниками с одним типом электропроводности может наблюдаться эффект выпрямления?
9	Каким требованиям должны удовлетворять омические переходы?

Рекомендуемая литература: [3], стр. 98 – 128; [4], стр. 69 – 103; [7], стр. 62 – 75; [8], стр. 46 – 53.

Основным элементом структуры большинства полупроводниковых приборов является электрический переход. *Электрический переход* – это переходный слой между областями твердого тела с различными типами проводимости или различными значениями удельной электрической проводимости.

Переходы между двумя областями с одним типом электропроводности (n - или p -типом), отличающиеся концентрацией примесей и соответственно значением удельной проводимости, называют *изотипными* переходами: *электронно-электронными* (n^+ - n -переход) или *дырочно-дырочными* (p^+ - p -переход). Термином n^+ и p^+ обозначают сильнолегированные области, следовательно, слои n^+ и p^+ имеют меньшее удельное сопротивление, поэтому большую удельную проводимость.

Переходы, образованные в одном полупроводниковом материале, например германии, кремнии, арсениде галлия, называют *гомпереходами*.

Переходы между двумя полупроводниковыми материалами, имеющими различную ширину запрещенной зоны, называют *гетеропереходами*.

Если одна из областей, образующих переход, является металлом, а другая полупроводником, то такие переходы называют *переходом металл-полупроводник* или *переходом Шоттки*.

По функциональному назначению электрические переходы делят на *выпрямляющие*, электрическое сопротивление которых при одном (прямом) направлении тока меньше, чем при другом – обратном и *омические*, электрическое сопротивление которых мало и практически не зависит от направления и значения тока в заданном диапазоне токов.

Задание № 8. Структура металл-диэлектрик полупроводник. Дайте краткий ответ на вопрос своего варианта.

Таблица 8

Вариант	Вопрос
0	Понятие идеальной МДП-структуры.
1	Режимы смещения МДП-структуры (на примере МДП-структуры с полупроводником <i>p</i> -типа).
2	Режимы смещения МДП-структуры (на примере МДП-структуры с полупроводником <i>n</i> -типа).
3	Дайте понятие сильной и слабой инверсии. Дайте определение порогового напряжения
4	Приведите зонную диаграмму МДП-структуры в режиме обогащения.
5	Приведите зонную диаграмму МДП-структуры в режиме обеднения.

Вариант	Вопрос
6	Приведите зонную диаграмму МДП-структуры в режиме слабой инверсии.
7	Приведите зонную диаграмму МДП-структуры в режиме сильной инверсии.
8	Емкость идеальной МДП-структуры. Приведите вольт-фарадную характеристику МДП-структуры
9	Компоненты заряда в реальном диоксиде кремния и их влияние на вольт-фарадную характеристику МДП-структуры. Дайте определение напряжению плоских зон.

Рекомендуемая литература: [3], стр. 129 – 166; [4], стр. 104 – 156; [8], стр. 291 – 299.

Широкий интерес к изучению их физических свойств структуры металл – диэлектрик – полупроводник (МДП-структуры) обусловлен появлением планарной технологии и развитием нового класса полупроводниковых приборов, работающих на основе эффекта поля, таких как приборы с зарядовой связью, полевые транзисторы с изолированным затвором, репрограммируемые элементы памяти с плавающим затвором и т.п.

Эффект поля – это изменение концентрации свободных носителей в приповерхностной области полупроводника под действием внешнего электрического поля.

МДП-структура представляет собой монокристаллическую пластину полупроводника, называемую *подложкой*, закрытую с планарной стороны *диэлектриком*. Металлический

электрод, нанесенный на диэлектрик, носит название *затвора*, а сам диэлектрик называется *подзатворным*. На обратную непланарную сторону полупроводниковой пластины наносится металлический электрод, называющийся омическим контактом. Довольно часто в качестве диэлектрика в МДП-структурах используют окислы, поэтому вместо МДП употребляется название МОП-структура.

Когда к идеальной МДП-структуре приложено напряжение того или другого знака, на полупроводниковой поверхности могут возникнуть три основные ситуации: *обогащение, обеднение и инверсия*.

График зависимости емкости МДП-структуры от напряжения на затворе называется вольт-фарадной характеристикой МДП-структуры.

Задание № 9. Полупроводниковые диоды. Дайте краткий ответ на вопрос своего варианта.

Таблица 9

Вариант	Вопрос
0	Что называют полупроводниковым диодом? Приведите классификацию полупроводниковых диодов.
1	Выпрямительный диод. Перечислите и объясните отличия в свойствах и параметрах кремниевых и германиевых выпрямительных диодов.
2	Каков принцип действия стабилитронов? Приведите вольт-амперную характеристику стабилитрона.
3	Каков принцип действия стабисторов? Приведите вольт-амперную характеристику стабистора.

Вариант	Вопрос
4	Каков принцип действия варикапов? Почему варикапы должны работать только при приложении к ним обратного постоянного напряжения смещения?
5	Приведите вольт-фарадную характеристику варикапа. Каковы основные параметры варикапов?
6	Каков принцип действия туннельного диода? Приведите вольт-амперную характеристику туннельного диода.
7	Каков принцип действия обращенного диода? Приведите вольт-амперную характеристику обращенного диодов
8	Высокочастотные и сверхвысокочастотные диоды Особенности их конструкции
9	Каков принцип действия импульсных диодов, диодов с накоплением заряда в области базы?

Рекомендуемая литература: [3], стр. 167 – 201; [4], стр. 157 – 187; [7], стр. 76 – 191; [8], стр. 103 – 115.

Полупроводниковым диодом называют нелинейный электронный прибор с двумя выводами. В зависимости от внутренней структуры, типа, количества и уровня легирования внутренних элементов диода и вольт-амперной характеристики свойства полупроводниковых диодов бывают различными. Полупроводниковые диоды могут отличаться друг от друга, например, по следующим признакам:

а) по применяемым исходным материалам (германиевые, кремниевые, на арсениде галлия и др.);

б) по структуре перехода (точечные и плоскостные);

в) по технологии изготовления (сплавные, диффузионные, эпитаксиальные и др.);

г) по функциональному назначению (выпрямительные, детекторные, импульсные и т. д.);

д) по частотному диапазону (низкочастотные, высокочастотные и сверхвысокочастотные);

е) по мощности рассеяния (маломощные, средней мощности и мощные);

ж) по конструктивному оформлению (стеклянные, металлические, металлокерамические, пластмассовые);

з) по физическим процессам, лежащим в основе работы (стабилитроны, туннельные, варикапы, светодиоды, фотодиоды и др.)

Выпрямительными называют диоды, предназначенные для выпрямления переменного тока. Основу выпрямительного диода составляет обычный электронно-дырочный переход. ВАХ выпрямительного диода имеет такой же вид, как и ВАХ p - n -перехода.

Варикап – это полупроводниковый диод, который используется в качестве электрически управляемой емкости.

В варикапах используется свойство барьерной емкости обратно-смещенного p - n -перехода изменять свою величину в зависимости от приложенного к нему напряжения.

Стабилитроном называется полупроводниковый диод, предназначенный для стабилизации уровня напряжения в схеме. Для этого используются приборы, у которых на вольт-амперной характеристике имеется участок со слабой зависимостью напряжения от проходящего тока.

Туннельным диодом называют полупроводниковый диод на основе p^+ - n^+ -перехода с сильнолегированными областями, на прямом участке вольт-амперной характеристики которого наблюдается n -образная зависимость тока от напряжения.

Задание № 10. Биполярные транзисторы. Дайте краткий ответ на вопрос своего варианта.

Таблица 10

Вариант	Вопрос
0	Что такое биполярный транзистор? Что называется эмиттером? Что называется коллектором? Что такое активная база, пассивная база?
1	Какой из $p-n$ -переходов транзистора обычно имеет большую площадь? В какой из областей транзистора больше атомов примеси, в области базы или в области эмиттера? Приведите три схемы включения транзистора.
2	Что такое активный режим транзистора? Что такое режим насыщения транзистора? Что такое режим отсечки?
3	В какой схеме включения транзистора можно получить усиление тока? Какая из схем включения транзистора обеспечивает максимальное усиление по мощности? В какой схеме включения транзистора можно получить усиление по напряжению?
4	Что такое модуляция толщины базы коллекторным напряжением?
5	Как объяснить вид входных статических ВАХ биполярных транзисторов в схеме с общей базой и с общим эмиттером?
6	Как объяснить вид выходных статических ВАХ биполярных транзисторов в схеме с общей базой и с общим эмиттером?

Вариант	Вопрос
7	Приведите малосигнальную эквивалентную схему замещения биполярного транзистора.
8	Какие существуют системы малосигнальных параметров транзисторов и в чем преимущества системы h - параметров?
9	Укажите зависимость коэффициента передачи тока от частоты. В какой схеме включения, с общей базой или общим эмиттером, коэффициент прямой передачи тока сильнее зависит от частоты? Что такое предельная частота? Что такое граничная частота? Какая частота называется максимальной частотой генерации транзистора?

Рекомендуемая литература: [3], стр. 202 – 244; [5], стр. 5 – 81; [7], стр. 11 – 101; [8], стр. 192 – 279.

Транзисторы по принципу действия делятся на **биполярные** (управляемые током), униполярные (управляемые электрическим полем или **полевые**) и **IGBT-транзисторы**. Аббревиатура IGBT – это сокращение названия Insulated gate bipolar transistor. В переводе это значит **биполярный транзистор с изолированным затвором (БТИЗ)**.

Биполярным транзистором называется полупроводниковый прибор с двумя электронно-дырочными переходами, предназначенный для усиления и генерирования электрических сигналов. Определение «**биполярный**» указывает на то, что работа транзистора связана с процессами, в которых принимают участие носители заряда двух сортов (электроны и дырки).

Биполярный транзистор (БТ) состоит из трех областей монокристаллического полупроводника с разным типом проводимости: *эмиттера*, *базы* и *коллектора*.

Область транзистора, основным назначением которой является инжекция носителей в базу, называют эмиттером (Э), а соответствующий переход – эмиттерным.

Область, основным назначением которой является экстракция носителей из базы, называют коллектором (К), а переход – коллекторным.

Область транзистора, расположенная между переходами, называется *базой* (Б).

Каждый из переходов транзистора можно включить либо в прямом, либо в обратном направлении. В зависимости от этого различают три режима работы транзистора:

- режим *отсечки* – оба *p-n*-перехода закрыты, при этом через транзистор обычно идет сравнительно небольшой ток;
- режим *насыщения* – оба *p-n*-перехода открыты;
- *активный* режим – один из *p-n*-переходов открыт, а другой закрыт. Если эмиттерный переход открыт, а коллекторный переход закрыт, то это *нормальный активный* режим. Если эмиттерный переход закрыт, а коллекторный переход открыт, то это *инверсный активный* режим.

Различают три схемы включения транзистора в зависимости от того, какой из электродов транзистора является общим для входного и выходного сигналов: с общей базой (ОБ); с общим эмиттером (ОЭ) и с общим коллектором (ОК).

Схема с общей базой не обладает усилительными свойствами по току, а обладает усилением по мощности и напряжению.

Схема с общим эмиттером обладает усилительными свойствами по току, по мощности и напряжению.

Схема с общим коллектором не обладает усилительными свойствами по напряжению, а обладает усилением по мощности и току

Задание № 11. Тиристоры. Дайте краткий ответ на вопрос своего варианта.

Таблица 11

Вариант	Вопрос
0	Что такое тиристор? Какие из областей изображенной на рис. 1 структуры носят название базы? Что называется эмиттером динистора? Что называется коллектором динистора?
1	Какие из переходов изображенной на рис. 1 структуры динистора смещены в прямом, а какие – в обратном направлении?
2	Приведите вольт-амперную характеристику динистора и объясните ее участки.
3	Чем объяснить малое значение тока динистора на участке OA его характеристики, приведенной на рис. 2? Чем объяснить малое значение тока динистора на участке OE его характеристики?
4	Каковы причины возрастания тока динистора при напряжениях, соответствующих участку AB его характеристики (рис. 2)?
5	Что является причиной появления на характеристике динистора участка BC с отрицательным внутренним сопротивлением?
6	Как смещены переходы динистора в режиме, соответствующем участку CD его характеристики (рис. 2)?
7	Какой точки на характеристике динистора соответствуют напряжение и ток включения, напряжения и ток удержания?

Вариант	Вопрос
8	Какими способами можно перевести тиристор из закрытого состояния в открытое?
9	Какими способами можно перевести тиристор из открытого состояния в закрытое?

Рекомендуемая литература: [3], стр. 245 – 261; [5], стр. 82 – 101; [7], стр. 280 – 300; [8], стр. 205 – 286.

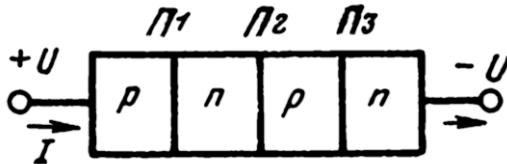


Рис. 1. Структура двухэлектродного тиристора (динистора)

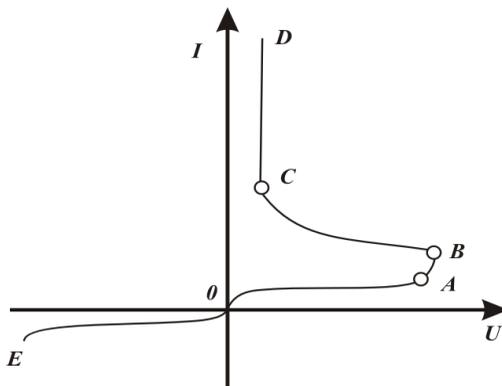


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика динистора

В настоящее время тиристоры являются основными приборами в мощных преобразователях электрической энергии, особенно, в преобразователях связанных с сетью переменного тока. Нужно знать разновидности тиристоров, их принципы действия, ВАХ и схемы включения. Основной способ включения тиристора – с помощью тока управления. Чем больше ток управления, тем при меньшем напряжении на аноде включается тиристор. Коэффициент передачи тиристора по току очень велик (тысячи) После включения тиристора ток управления можно прекратить, однако, тиристор будет удерживаться во включенном состоянии. Чтобы выключить тиристор, нужно уменьшить ток в цепи анода до очень малой величины или приложить к нему обратное напряжение. Обратите внимание на **параметры тиристор**ов, порядок их величин, зависимость допустимого тока от условий работы тиристора.

Задание № 12. Полевые транзисторы. Дайте краткий ответ на вопрос своего варианта.

Таблица 12

Вариант	Вопрос
0	Перечислите разновидности полевых транзисторов.
1	Какой из выводов в полевом транзисторе называется «затвором», «стоком», «исток»?
2	Расскажите о принципе работы полевого транзисторе с управляющим <i>p-n</i> -переходом. На чем основано управление током в полевом транзисторе с управляющим переходом?
3	Приведите характеристику передачи полевого транзистора с управляющим переходом. Дайте определение крутизны полевого транзистора.

Вариант	Вопрос
4	Приведите выходную характеристику полевого транзистора с управляющим переходом в схеме с общим истоком.
5	Какие типы МДП-транзисторов вам известны?
6	Расскажите о принципе работы МДП-транзисторов с индуцированным каналом.
7	Расскажите о принципе работы МДП-транзисторов с встроенным каналом.
8	Приведите выходную характеристику и характеристику передачи МДП-транзисторов с индуцированным каналом в схеме с общим истоком.
9	Приведите выходную характеристику и характеристику передачи МДП-транзисторов с встроенным каналом в схеме с общим истоком.

Рекомендуемая литература: [3], стр. 262 – 279; [5], стр. 102 – 167; [7], стр. 301 – 331; [8], стр. 286 – 357.

Во многих современных электронных цепях используются транзисторы, ток носителей которых течет по так называемому каналу, образованному внутри кремниевого кристалла. Этим током можно управлять, прикладывая электрическое поле. Такие приборы называют *полевыми транзисторами* (в англоязычной литературе применяют сокращение FET - Field Effect Transistor). В настоящее время эти транзисторы играют весьма важную роль, являясь элементами ИС, которые содержат на одном кристалле от тысяч до сотен тысяч полупро-

водниковых приборов. В свою очередь, на базе таких ИС создают компьютеры, микропроцессорные системы, устройства обработки сигналов и т.д.

Полевой транзистор (ПТ)– это полупроводниковый прибор, в котором изменение тока происходит под действием перпендикулярного току электрического поля, создаваемого входным сигналом. Протекание электрического тока в полевых транзисторах обусловлено носителями заряда только одного знака (электронами или дырками), поэтому такие транзисторы называют также **униполярными** в отличие от биполярных. По физическим эффектам, лежащим в основе управления носителями заряда, полевые транзисторы бывают трех видов: с управляющим *p-n*-переходом, с управляющим переходом металл полупроводник и со структурой металл–диэлектрик–полупроводник (МДП-транзисторы). Приборы этого типа в зарубежной литературе носят разные названия, в том числе MOSFET (Metal - Oxide - Semiconductor Field - Effectuated Transistor, то есть полевой транзистор металл - окисел - полупроводник), IGFET (Insulated-Gate Field - Effectuated Transistor, то есть полевой транзистор с изолированным затвором), MISFET (Metal - Insulator - Semiconductor Field - Effectuated Transistor, то есть полевой транзистор металл - изолятор - полупроводник), MOST (Metal - Oxide - Semiconductor Transistor, то есть полевой транзистор металл - окисел - полупроводник), JFET (Junction Field - Effectuated Transistor, то есть полевой транзистор с управляющим *p-n*-переходом), MESFET (Metal - Semiconductor Field - Effectuated Transistor, то есть полевой транзистор с управляющим переходом металл - полупроводник). В полевых транзисторах в качестве полупроводникового материала используют в основном кремний и арсенид галлия, в качестве металлов: алюминий, молибден, золото; в качестве диэлектрика оксид кремния SiO_2 в МОП-транзисторах или сложные структуры, например $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\text{SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4$ в МДП-транзисторах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Свистова Т.В. Вакуумная и плазменная электроника: учеб. пособие / Т.В. Свистова. Воронеж: ВГТУ, 2005. Ч. 1. 178 с.
2. Свистова Т.В. Вакуумная и плазменная электроника: учеб. пособие / Т.В. Свистова. Воронеж: ВГТУ, 2005. Ч. 2. 103 с.
3. Свистова Т.В. Приборы твердотельной электроники: учеб. пособие / Т.В. Свистова. Воронеж: ВГТУ, 2012. 294 с.
4. Свистова Т.В. Твердотельная электроника: учеб. пособие / Т.В. Свистова. Воронеж: ВГТУ, 2006. Ч. 1. 193 с.
5. Свистова Т.В. Твердотельная электроника: учеб. пособие / Т.В. Свистова. Воронеж: ВГТУ, 2006. Ч. 2. 173 с.
6. Сушков А.Д. Вакуумная электроника: Физико-технические основы: учеб. пособие / А.Д. Сушков СПб: Лань, 2004. 464 с.
7. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы: учебник для вузов / В.В. Пасынков, Л.К. Чиркин. СПб.: Лань, 2003. 480 с.
8. Тугов Н.М. Полупроводниковые приборы / Н.М. Тугов, Б.А. Глебов, Н.А. Чарыков. М.: Энергоатомиздат, 1990. 576 с.
9. Щука А.А. Электроника: учеб. пособие / под ред. А.С. Ситова. – СПб: БХВ-Петербург, 2005. – 800 с.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению контрольной работы № 1 по дисциплине
«Физические основы электроники»
для студентов направления подготовки бакалавров
210100 «Электроника и нанoeлектроника»,
профиля «Микроэлектроника и твердотельная электроника»
заочной формы обучения

Составитель
Свистова Тамара Витальевна

В авторской редакции

Подписано к изданию 29.04.2013
Объем данных 3,9 Мб.

ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный
технический университет»
394026 Воронеж, Московский просп., 14