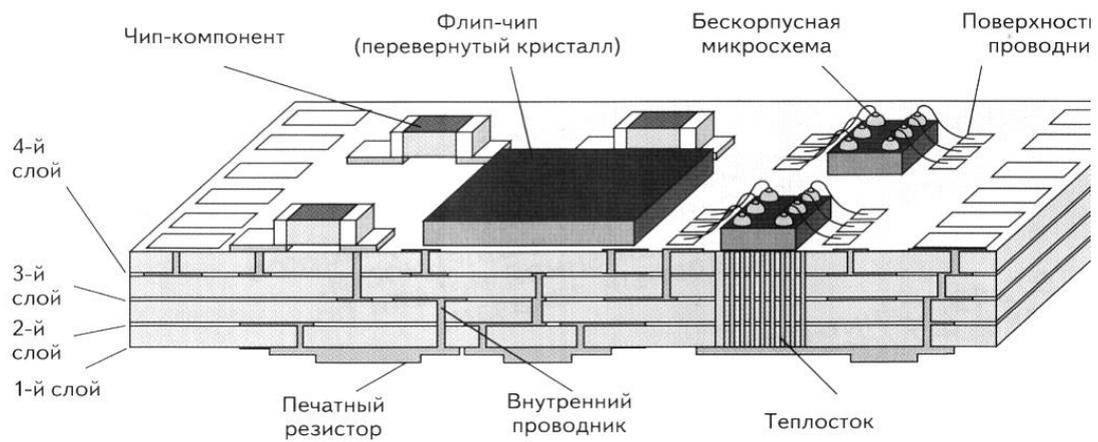


В.В. Зенин

ПРОЦЕССЫ СБОРКИ В ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА 3D-ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Учебное пособие



Воронеж 2011

ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный
технический университет»

В.В. Зенин

ПРОЦЕССЫ СБОРКИ В ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА
3D-ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Утверждено Редакционно-издательским советом
университета в качестве учебного пособия

Воронеж 2011

УДК 621.3.049.77.001

Зенин В.В. Процессы сборки в технологии производства 3D-изделий микроэлектроники / В.В. Зенин. Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2011. 143 с.

В учебном пособии рассмотрены материалы кристаллов, корпусов, печатных плат и теплоотводов, используемых в производстве полупроводниковых приборов и 3D-изделий. Применительно к пайке кристаллов к основаниям корпусов и микросварке внутренних выводов к контактными площадкам кристаллов и траверсам корпусов рассмотрено влияние конструктивно-технологических факторов на качество контактов. Приведены сведения о пайке изделий микроэлектроники с использованием бессвинцовых сплавов.

Издание соответствует требованиям Государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по направлению 210100 «Электроника и микроэлектроника», специальности 210104 «Микроэлектроника и твердотельная электроника», дисциплине «Перспективные технологические процессы и оборудование для производства полупроводниковых приборов».

Предназначено студентам очной формы обучения.

Учебное пособие подготовлено в электронном виде в текстовом редакторе MS WORD XP и содержится в файле «3D-технологии.rar».

Табл. 25. Ил. 36. Библиограф.: 71 назв.

Рецензенты: кафедра физики полупроводников и микроэлектроники Воронежского государственного университета (зав. кафедрой д-р физ.-мат. наук, проф. Е.Н. Бормонтов);
д-р. техн. наук, проф. М.И. Горлов

© Зенин В.В., 2011

© Оформление. ФГБОУ ВПО
«Воронежский государственный
технический университет», 2011

ВВЕДЕНИЕ

При решении вопроса о надежности микросоединений, наряду с выбором оптимальных способов и режимов монтажа, необходимо учитывать физико-механические свойства материалов и корпусов, качество пленочной металлизации контактных площадок кристалла и траверс корпусов.

В учебном пособии проанализированы физико-механические и технологические свойства (применительно к сборочным операциям) Si, GaAs и SiC. В настоящее время в качестве основного материала кристаллов в производстве полупроводниковых изделий (ППИ), в том числе и 3D-сборок, является кремний. Для создания токоведущих дорожек и контактных площадок кристаллов используется алюминиевая металлизация. Альтернативой алюминиевой металлизации является нанесение меди на планарную поверхность кристалла. Однако эта технология еще недостаточно отработана, чтобы использовать ее на всех предприятиях электронной промышленности.

Рассмотрены технологии формирования покрытий кристаллов и корпусов: золотое, серебряное, медное и гальваническое алюминирование. Проанализированы особенности пайки по золотым и серебряным покрытиям корпусов ППИ. Показана перспектива использования гальванического алюминирования корпусов в производстве радиационно-стойких ППИ. Приведены режимы электролиза алюминиевых пленок и зависимость свариваемости алюминиевой проволоки от структуры и толщины алюминиевой металлизации.

Несколько глав посвящено пайке изделий микроэлектроники с использованием бессвинцовых припоев, а также пайке полупроводниковых кристаллов с объемными выводами к основаниям корпусов методом «flip-chip». В главе 6 рассмотрены способы и устройства для отвода тепла ППИ. Показана эффективность использования в качестве теплоотвода пленок из поликристаллического алмаза. В главе 10 проведен анализ методов испытаний ППИ и 3D-сборок. Представлены виды тестирования качества микросоединений, разработанные компанией XYZTEC.

В некоторых главах использованы материалы статей, авторских свидетельств СССР и патентов РФ на изобретения, опубликованных в соавторстве с к.т.н. Новокрещеновой Е.П., к.т.н. Спиридоновым Б.А. и студентом-магистрантом Мухиным К.А., которым автор выражает глубокую благодарность.

Глава 1

МАТЕРИАЛЫ КРИСТАЛЛОВ, КОРПУСОВ, ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ И ТЕПЛОТВОДОВ: ФИЗКО-ХИМИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Основными конструктивными элементами микроэлектронной аппаратуры (МЭА) являются: полупроводниковые кристаллы, в поверхностном слое которых сформированы электрорадиоэлементы (ЭРЭ); подложки и платы, на которые монтируются ЭРЭ МЭА; электрические соединения, объединяющие ЭРЭ и элементы различного структурного уровня МЭА; корпусные ЭРЭ. Особенностью МЭА является то, что наряду с традиционными конструктивными материалами в ней находят широкое применение многослойные неоднородные материалы для монтажных плат и подложек, тонкопроволочные и тонкопленочные материалы для электромонтажных соединений, а также низкотемпературные припои, полимерные материалы и герметизирующие покрытия.

В качестве материала полупроводниковых кристаллов используют кремний, германий и арсенид галлия. Полупроводниковые кристаллы имеют прямоугольную или квадратную форму размерами от $0,7 \times 0,7$ до 10×10 (мм) и толщиной $0,2 - 0,3$ мм.

Кремний. Тонкопленочные многокристальные модули (МКМ) могут быть реализованы на различных подложках – керамических, металлических, кремниевых и т.д. Наиболее перспективным материалом, как считают многие специалисты, являются кремниевые подложки, на которых хорошо отработанными методами полупроводниковой технологии можно создавать многослойную систему межсоединений. Тонкопленочная технология на кремнии хорошо отработана, совместима с технологическим оборудованием производства кристаллов ИС и позволяет получать плотности межсоединений, сравнимые с плотностью межсоединений на кристаллах ИС.

Важнейшим преимуществом кремния перед другими материалами подложек МКМ является его полное согласование по ТКРЛ с кремниевыми кристаллами, монтируемыми на подложку. Кроме того, кремний имеет высокую теплопроводность, что способствует эффективному отводу тепла от кристаллов.

Арсенид галлия (GaAs). Ряд свойств GaAs делает его одним из наиболее важных полупроводниковых материалов в микроэлектронике. Достоинства GaAs в качестве базового материала для полупроводниковых приборов определяются особенностями его свойств. Важнейшим из них является высокая (в шесть раз большая, чем в кремнии) подвижность электронов в электрических полях низкой напряженности, что позволяет создать СВЧ приборы с улучшенными характеристиками. Другое достоинство GaAs заключается в большой ширине его запрещенной зоны, что является необходимым условием работоспособности структур при повышенных температурах. Сами же изделия имеют такие преимущества как небольшие размеры, малая масса, высокая надежность и воспроизводимость параметров, многофункциональность, возможность снижения стоимости аппаратуры. Однако имеются причины, затрудняющие практическую реализацию тех преимуществ, которые может дать применение GaAs в микроэлектронике. Определенный недостаток GaAs заключается в том, что он является двухкомпонентным соединением, в связи с чем приходится понижать температуры во время технологических процессов, в том числе и на сборочных операциях. Поверхность GaAs более восприимчива к воздействию различных химических веществ, используемых в технологических процессах, что требует в ряде случаев разработки нового подхода к реализации этих процессов. Кроме того, GaAs весьма хрупкий материал и подвержен разрушению при технологической обработке.

Свойства GaAs кристаллов в отношении низкой стойкости к температурным воздействиям весьма ограничивают выбор припоев. Для сборки кристаллов GaAs хорошо зарекомендовали себя низкотемпературные припои на основе серебра (ПСр ОСЗ-58), золота (ПЗЛО-78,5), висмута (42Sn68Bi) и индия (ПОИ-50).

Карбид кремния и его свойства. В последние годы ведутся исследования новых материалов для приборов силовой электроники – арсенида галлия, карбида кремния (SiC), III-нитридов. Самым перспективным является карбид кремния: пробивная напряженность электрического поля SiC существенно превышает соответствующие показатели у Si и GaAs, что приводит к значительному снижению сопротивления в открытом состоянии. Низкое удельное сопротивление в открытом состоянии в сочетании с высокой плотностью тока и теплопроводностью позволяет использовать очень маленькие по размерам кристаллы для силовых приборов.

Карбид кремния (SiC) – единственное бинарное соединение кремния и углерода, существующее в твердой фазе. SiC кристаллизуется в виде большого числа отличающихся по свойствам политипных модификаций, которые можно рассматривать как целый класс полупроводниковых материалов. Функциональные возможности SiC в полупроводниковой электронике очень велики: большая ширина запрещенной зоны (от 2,4 до 3,3 эВ) и высокая теплопроводность обеспечивают надежную работу SiC-приборов при температурах до 600-700 °С в условиях воздействия радиации.

SiC может иметь различные кристаллические структуры (рис. 1.1) – кубическую (3C-SiC), гексагональную (2H-SiC, 4H-SiC, 6H-SiC и nH-SiC), ромбоэдрическую (15R, 21R и др.). SiC имеет высокую твердость (9,2 – 9,3 по шкале Мооса) и по этому параметру уступает лишь алмазу и нитриду бора (BN). Установлено, что отношение SiC уменьшается от политипа к политипу с увеличением D (степени гексагональности) и составляет 1,046, 1,022 и 1,001 для политипов 3C, 6H и 4H соответственно. Изменение концентрации углеродных (VC) и кремниевых (VSi) вакансий влияет на характеристики контактов SiC с металлами. В табл. 1.1 приведены некоторые параметры SiC в сравнении с полупроводниковыми материалами, такими как Si, GaAs, GaN и алмаз.

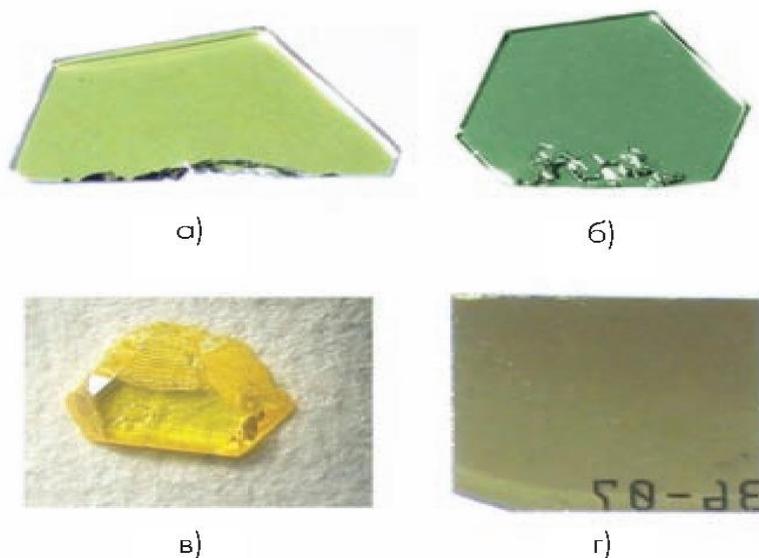


Рис. 1.1. Политипы SiC с различными кристаллическими структурами:

а - 15R-SiC; б - 6H-SiC; в - 3C-SiC; г - 4H-SiC

Таблица 1.1

Параметры некоторых полупроводниковых материалов

Материал	Ширина запрещенной зоны E_g , эВ	Критическая напряженность электрического поля $U_{проб}$, МВ/см	Подвижность электронов μ_e , $см^2/V \cdot с$	Дрейфовая скорость электронов при $V_{нас}$, см/с	Теплопроводность, Вт/(м·К ⁻¹)
Si	1,12	0,6	1500	$1 \cdot 10^7$	150
GaAs	1,42	0,6	8500	$8 \cdot 10^8$	50
GaN	3,39	3,3	1250	$2,5 \cdot 10^7$	130
3C-SiC	2,2	2	750	$2,5 \cdot 10^7$	500
4H-SiC	3,26	3	1100	$2 \cdot 10^7$	490
6H-SiC	3	3	370	$2 \cdot 10^7$	490
Алмаз	5,5	6	2200	$2,7 \cdot 10^7$	2000

По сравнению с Si у SiC в несколько раз выше пробивная напряженность электрического поля и в сотни раз ниже удельное сопротивление в открытом

состоянии. Поэтому он является «идеальным» материалом для производства силовых полупроводниковых приборов.

Влияние лазерного излучения на электрическую прочность и характеристики границы раздела системы SiC – диэлектрик анализировалось методами неразрушающего контроля по шумовым и вольт-фарадным характеристикам. В качестве подложек использовались монокристаллы 6H-SiC. На подложки наносились пленки SiO₂ термическим окислением SiC в сухом и влажном кислороде; окислением силана кислородом SiO₂; пленки нитрида кремния толщиной 0,2 мкм – методом реактивного катодного распыления кремния в атмосфере азота.

Структуры SiC – диэлектрик облучались импульсами лазера ($\lambda = 1,06$ мкм, $\tau = 0,8 \cdot 10^{-4}$ с, плотность энергии в импульсе составляла $E_p = 0,3-20$ Дж/см²). Установлено, что система SiC-диэлектрик подвержена воздействию лазерного излучения, что приводит к существенным перестройкам как в диэлектрических пленках, так и в области границы раздела. SiC, а также Al₂O₃, Si (111) в настоящее время используются в качестве подложек для выращивания эпитаксиальных слоев (ЭС) III-нитридов для СВЧ-приборов. Качество выращенных на них III-нитридных ЭС и приборов на их основе зависит от физических свойств подложек: теплопроводности, близости коэффициентов согласования по параметрам кристаллических решеток, температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) с III-нитридом и термостойкости. Кроме того, эти подложки достаточно хорошо обрабатываются под эпитаксию.

Область применения SiC. В настоящее время известно около 170 поли-типов SiC, по другим данным – 200. Несмотря на большое разнообразие кристаллических модификаций SiC, только две из них доступны для серийного изготовления полупроводниковых приборов – это 4H-SiC и 6H-SiC.

Для изготовления светоизлучающих диодов и фотоприемников перспективным материалом для эпитаксиальной технологии является пористый карбид кремния (ПКК). Слои ПКК получают путем анодирования SiC-пластин в кислотных или щелочных электролитах.

Рассмотрена технология формирования фотоприемных структур ультрафиолетового диапазона на основе диодов Шоттки (Au-ПКК). Установлено, что фотоэлектрические свойства структуры Au-ПКК обладают более высокой фоточувствительностью по сравнению со структурой Au-6H-SiC.

SiC рекомендуется использовать в качестве материала для полупроводниковых детекторов ядерных излучений. Для детекторов важное значение имеют свойства SiC, такие как высокая пороговая энергия образования дефектов (предпосылка радиационной стойкости), большая ширина запрещенной зоны. SiC-детекторы сохраняют работоспособность при температуре до 500 °C и обладают высокой химической стойкостью.

Известны результаты исследований радиационной стойкости детекторов на основе пленок SiC при облучении протонами с энергией 8 МэВ вплоть до доз $5 \cdot 10^{13}$ и $2 \cdot 10^{14}$ P/cm². Использовались две группы пленок: первая – со структурой политипа 6H-SiC толщиной 10 мкм, а вторая – имела структуру 4H-SiC толщиной 30 мкм. Пленки имели p-тип проводимости и были получены сублимационной эпитаксией на сильно легированных n⁺ - подложках.

Структуры со слоем политипа 6H-SiC проявили транзисторные свойства, а со слоем 4H-SiC – диодные. Установлено, что у структур транзисторного типа наблюдается более чем десятикратное усиление сигнала, которое сохраняется при облучении протонами с энергией 8 МэВ до дозы $5 \cdot 10^{13}$ см⁻² при значении разрешающей способности ≤ 10 %. В структурах «диодного» типа усиление сигнала не наблюдалось, но при максимальной дозе $2 \cdot 10^{14}$ см⁻² имелась группа образцов с разрешением примерно 3 %.

В табл. 1.2 приведены экспериментальные данные радиационной стойкости кристаллов SiC в датчиках давления. Установлены незначительные изменения параметров номинального сопротивления и начального разбаланса тензорезистивного моста, которые находятся в пределах погрешности измерения этих параметров на кристалле с помощью внешних зондов.

Таблица 1.2

Электрические параметры тензорезистивного моста на основе SiC до и после облучения нейтронами ($1,5 \cdot 10^{15}$ нейтр/см²)

№ образ- цов	До облучения		После облучения	
	R_T , Ом	ΔU_0 , мВ	R_T , Ом	ΔU_0 , мВ
1	443	15,2	444	15,5
2	295	16,7	296	16,3
3	260	14,1	261	13,8
4	247	23,2	246	23,7

Примечание. Контролируемые параметры: R_T – сопротивление одного из резисторов тензорезистивного моста, ΔU_0 – разбаланс моста

Предложены и исследованы карбидокремниевые зонды (пиролитические) для измерения температуры нагретых газовых потоков. Пиролитические зонды изготавливались из монокристаллического SiC методами эрозионного профилирования в жидкой среде. Использовались кристаллы 6H-SiC(N) без видимых макродефектов. После операции резки проводились химическое травление зондов в расплаве KOH при температуре 600 °C и последующая их установка на цилиндрические держатели из поликристаллического SiC.

Основное преимущество SiC-зондов заключается в том, что с ростом температуры уменьшается коэффициент теплопроводности материала, в результате этого снижается кондуктивный отвод теплового потока от излучающей площадки. Определены критические значения скорости потока воздуха, при которых происходит разрушение SiC-зондов. Классифицированы основные источники методической погрешности измерения температуры газового потока SiC-зондами.

Проводятся исследования по разработке и внедрению полупроводниковых источников света в системах общего освещения. В качестве материала

кристаллов светодиодов используется SiC. Высоковольтные выпрямители на основе SiC в бустерных преобразователях используются для увеличения выходной мощности и частоты коммутации.

Силициды металлов. Более половины всех элементов периодической системы реагируют с кремнием с образованием одного или более силицидов, в которых кремний является электроотрицательной составляющей. Силициды металлов привлекают к себе внимание из-за высокой проводимости металлического характера и высокой температурной стабильности. Применение силицидов с сопротивлением, в десятки раз меньшим сопротивления поликристаллического кремния, улучшает быстродействие интегральных схем.

Силициды металлов используются как материал для омических контактов и барьеров Шоттки, а также как материал металлизации. Преимущества использования силицидов при изготовлении интегральных схем по сравнению с металлами: высокая проводимость, температурная стабильность, устойчивость к электромиграции, возможность формирования силицидов на поликремнии.

Силициды получают взаимодействием металлической пленки с кремнием.

Стабильность и воспроизводимость свойств силицидов обусловлены тем, что образование силицида освобождает границу раздела силицид-кремний от несовершенств структуры поверхности и загрязнений. Формирование контактов силицид-кремний очищает границу раздела на атомарном уровне, предотвращая колебания контактных свойств, которые имеют место при загрязнении поверхности и наличии дефектов.

Применимость токопроводящей системы на основе силицидов определяется кроме низкого сопротивления легкостью формирования силицидов, легкостью получения требуемого рисунка на пленках, а также стабильностью свойств силицидов в технологическом процессе изготовления интегральных схем и их эксплуатации. Ниже приведены желательные свойства силицидов для интегральных схем:

- низкое сопротивление;
- легкость формирования;
- легкость травления по заданному рисунку;
- устойчивость в окислительных средах;
- низкие внутренние напряжения;
- механическая стабильность, хорошая адгезия;
- гладкость поверхности;
- стабильность в технологическом процессе, включающем высокотемпературный отжиг, окисление в сухой или увлажненной среде, геттерирование, пассивацию, металлизацию;
- отсутствие реакции с последним металлом и алюминием;
- отсутствие вносимых загрязнений на подложку или рабочую оснастку;
- хорошие характеристики интегральных схем и их безотказная работа;
- для силицидов в контактных окнах – низкое переходное сопротивление, минимальное проникновение в зону p-n перехода.

Из всех силицидов особый интерес представляют силициды тугоплавких металлов ($TiSi_2$, $TaSi_2$, WSi_2 , $ReSi_2$, $NbSi_2$), силициды группы железа ($CoSi_2$, $FeSi_2$, $NiSi_2$), металлов платиновой группы ($PtSi$, $IrSi_2$, $OsSi_2$, Pd_2Si). Удельное сопротивление большинства силицидов находится в интервале 0,2 – 0,5 мкОм·м (для $MoSi_2$ – 0,9 мкОм·м, для WSi_2 – 0,7 мкОм·м).

При образовании силицидов следует учесть избыточное наличие кремния и современные температурные условия производства интегральных схем (900 °С и выше), которые приводят к образованию силицидов, обогащенных кремнием. Это сужает выбор силицидов, которые можно разделить на две группы: силициды тугоплавких металлов и силициды благородных и полублагородных металлов. Силициды тугоплавких металлов подходят в качестве материала для электродов затворов. Силициды металлов платиновой группы являются хорошими материалами для изготовления контактов.

Когда металл реагирует с кремнием с образованием силицидов, происходит сильное изменение коэффициента отражения, обеспечивающее хороший оптический контраст. Поэтому силициды могут использоваться в качестве материалов для длительного хранения оптической информации.

В настоящее время лучшим материалом среди силицидов для применения в субмикронных и нанотехнологиях является CoSi_2 , в частности потому, что постоянные решеток Si и CoSi_2 практически совпадают. Низкое удельное сопротивление ($0,2 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$), низкое переходное сопротивление контакта к n- и p-кремнию, простота обработки, термодинамическая стабильность (при температуре до $900 \text{ }^\circ\text{C}$) привлекли внимание к данному силициду. Дополнительный интерес к материалу связан с возможностью эпитаксиального выращивания CoSi_2 на кремнии, при этом качество полученных эпитаксиальных слоев является наилучшим среди силицидов и других известных кристаллических материалов. Также получены удовлетворительные результаты по двойной гетероэпитаксии кремния на CoSi_2 на кремнии.

Композиционные материалы алмаз/карбид кремния. Известны композиционные материалы с высокотеплопроводной керамической матрицей из карбида кремния, армированной частицами алмаза. Это позволяет достичь высоких свойств по теплопроводности.

Получены беспористые материалы типа алмаз/карбид кремния за счет осуществления химических реакций в объеме заранее сформированной заготовки. Данный процесс осуществляется при давлении не выше атмосферного. При этом изменение размеров при преобразовании заготовки в конечный продукт не превышает $0,2 \%$, что позволяет получать изделия очень сложных форм. Данные материалы получили название «Скелетон-Д».

На рис. 1.2 представлена фотография, которая подтверждает отмеченные выше особенности. В структуре материалов отчетливо выделены три фазы – алмаз, карбид кремния и кремний.

Расчеты свойств этого материала показывают, что «Скелетон-Д» обладает высокой теплопроводностью, существенно превышающей теплопроводность меди. По этому принципу созданы сверхтеплопроводные составы.

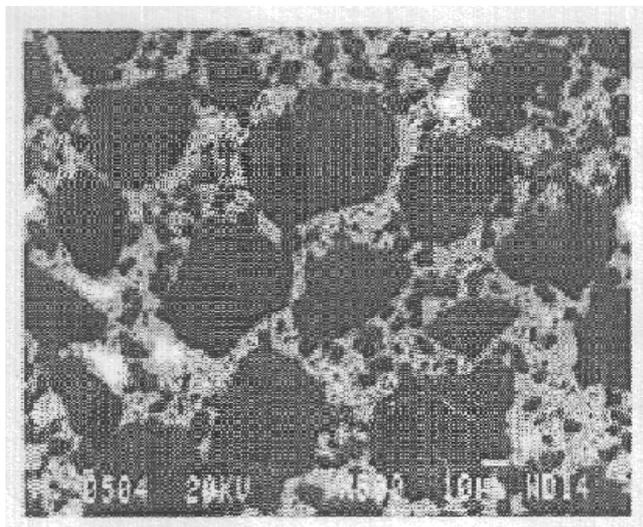


Рис. 1.2. Микроструктура сверхтеплопроводной керамики полученной из алмазных порошков двух зернистостей: 14/10 и 63/50 мкм

На фотографии видна хорошая взаимосвязь фаз материала: алмаза (черная), карбида кремния (серая) и кремния (белая).

Керамические подложки для автомобильной промышленности. Данные подложки представляют собой многослойный материал на основе стекло-керамики, содержащий серебряные или медные проводящие слои, необходимые для внутрисхемных соединений, и сырые керамические пленки на основе стекло-алюминиевой смеси.

Структура подложки LTCC-модуля показана на рис. 1.3. При изготовлении LTCC-материала используется сравнительно низкая температура спекания (около 900 °С), что ниже точки плавления материалов проводников Ag и Si и существенно ниже температуры обжига корундовой керамики (1500 °С). Разработанный компанией Murata материал LFC на основе боросиликатного

стекла отличается высокими экологическими показателями, при его производстве полностью исключено применение свинца и кадмия.



Рис. 1.3. Структура керамической подложки, изготовленной по методу низкотемпературного обжига

Сырые керамические пленки и связующие пасты, необходимые для производства структуры LFC, разработаны фирмой Mirata Manufacturing Co., Ltd, весь цикл их производства осуществляется Murata. Многослойная подложка изготавливается с помощью технологии трафаретной печати: сначала делаются сквозные отверстия в сырой керамической пленке, они заполняются серебряной пастой. Эти отверстия предназначены для соединения верхней и нижней пленки. Затем на каждом слое печатается шаблон, содержащий топологию проводящих проводников, после чего все слои соединяются в процессе обжига. Используя собственный метод безусадочного спекания под высоким давлением, Murata производит безусадочные подложки, отличающиеся хорошей плоскостностью и сверхвысокой точностью соблюдения линейных размеров.

Подложки для гибридных микросхем. Подложка является важным составным элементом гибридных микросхем. Она одновременно выполняет

несколько функций: представляет собой конструктивную основу, на которой формируются и монтируются элементы гибридной микросхемы; обеспечивает электрическую изоляцию элементов гибридной микросхемы, а также служит теплоотводящим элементом всей конструкции.

К материалу подложки независимо от конструкции и назначения микросхемы предъявляются следующие требования: высокое качество обработки рабочей поверхности; высокая механическая прочность; минимальная пористость; высокая теплопроводность; химическая стойкость; высокое удельное сопротивление; близость коэффициентов термического расширения подложки и наносимых на нее пленок; низкая стоимость исходного материала и технологии его обработки; высокие значения диэлектрической проницаемости (для микросхем, работающих в СВЧ-диапазоне).

Для изготовления подложек гибридных микросхем используются материалы: стекла электровакуумные С48-3 и С41-1, глазурь Г90011, керамические вакуумно-плотные материалы 22ХС, поликор, сапфирит, ситаллы СТ50-1, СТ-38-1 и СТ-32-1, сапфир, кварц и некоторые другие.

Из всех критериев выбора материала для подложек главным является высокий коэффициент теплопроводности. Данные о коэффициентах теплопроводности материалов, используемых в качестве кристаллов и корпусов в производстве ИЭТ, приведены в табл. 1.3 и 1.4.

Анализ физико-механических свойств материалов, указанных в табл. 1.3 и 1.4, указывает на перспективность использования нитрида алюминия (AlN) для подложек массовых интегральных микросхем. Подложки из AlN имеют высокий коэффициент пропускания для инфракрасного излучения (при $\lambda = 6$ мкм и толщине подложек 0,5 мм он равен 48 %). При напылении на подложки из AlN слоев Ti-Pd-Au, NiCr-Pd-Au и Ti₂N-NiCr-Pd-Au путем испарения или ионного распыления обеспечивается их высокая адгезия к подложке.

Таблица 1.3

Свойства материалов

Материал	Теплопроводность, Вт/м·К	Примечание
Алмаз	2000	Высокая стоимость
BN	1300	Высокая стоимость
SiC	490	Полупроводник
BeO	370	Высокая токсичность
AlN	320	Хороший диэлектрик
Si	160	Полупроводник
Al ₂ O ₃	20	Хороший диэлектрик

Подложки из AlN используются в качестве теплоотвода для кремниевых транзисторов, световых диодов на GaAlAs и лазерных диодов на InGaAsP. Эффективность отвода тепла сопоставима с эффективностью отвода тепла при использовании для этих же приборов подложек из BeO и алмаза.

В ГИС, для которых важна проблема отвода тепла и которые работают при значительных механических нагрузках, применяют двухслойные металлические подложки: алюминиевые, покрытые слоем анодного оксида или эмалированные стальные. Подложки для гибридных микросхем имеют квадратную и прямоугольную форму с размерами, мм: 60 × 48, 30 × 48, 30 × 24, 30 × 16, 20 × 16, 10 × 16, 10 × 12 и 5 × 6. Толщину подложек рекомендуется принимать равной 0,6; 1,0 и 1,6 мм с отклонениями до 0,06 мм.

Таблица 1.4

Электрофизические параметры материалов подложек

Параметр	Материал								
	Стекло		Ситалл СТ50-1	Плавленый кварц	Кремний	Керамика			
	С41-1	С48-3				Сапфир	22ХС (96 % Al ₂ O ₃)	Поликор	Глазурованная

1. Класс чистоты обработки поверхности	14	14	13 – 14	14			12	12 – 14	14	Высота микронеровностей до 0,45 мкм
2. ТКЛР при T = 20 –300 °С	$(41\pm 2)\cdot 10^{-7}$	$(48\pm 2)\cdot 10^{-7}$	$(50\pm 2)\cdot 10^{-7}$	$55\cdot 10^{-7}$		$80\cdot 10^{-7}$	$(60\pm 5)\cdot 10^{-7}$	$(70-75)\cdot 10^{-7}$	$(73-78)\cdot 10^{-7}$	$70\cdot 10^{-7}$
3. Коэффициент теплопроводности Вт/(м·°С)	1	1,5	1,5	7 – 15	140	33, 5	10	30 – 45	1,2 – 1,7	210
4. Диэлектрическая проницаемость при $f = 10^6$ Гц и T = 20 °С	7, 5	3,2 – 8	5 – 8,5	3,8		10, 6	10,3	10,5	13 – 16	6,4 – 9,5
5. Тангенс угла диэлектрических потерь при $f = 10^6$ Гц и T = 20 °С	$20\cdot 10^{-4}$		$20\cdot 10^{-4}$	–			$6\cdot 10^{-4}$	$10\cdot 10^{-4}$	$18\cdot 10^{-4}$	$16\cdot 10^{-4}$
6. Объемное сопротивление при T = 20 °С, Ом·см	10^{17}	10^{14}		10^{15}			–	–	–	10^{14}
7. Электрическая прочность, кВ/мм	40	40	–	–			50	–	50	20

В последнее время для изготовления гибридных БИС и микросборок применяют гибкие подложки из полимерных материалов, например, полиамидных пленок толщиной 40 - 50 мкм. Для этих пленок возможна двусторонняя обработка и вакуумное нанесение металлических пленок для создания двухслойной разводки, а также фототравление отверстий для создания металлизированных переходов между слоями.

Основные трудности при разработке печатных плат на металлических основаниях связаны с формированием на поверхности металлов диэлектрического разделительного слоя, обеспечивающего надежную электроизоляцию

токопроводящего рисунка схемы от металлической основы при достаточно высокой теплопроводности. Диэлектрические покрытия могут быть полимерные, оксидные или комбинированные.

На алюминиевых основаниях электроизоляционное анодирование проводится в растворе на основе щавелевой кислоты (50 г/л) в гальваностатическом режиме при 20 - 25 °С с последующим кипячением в дистиллированной воде в течение 30 мин. Анодные оксидные пленки на алюминии характеризуются достаточно высокими электроизоляционными свойствами, их теплопроводность на порядок выше теплопроводности органических полимерных материалов. Анодные оксидные покрытия отличаются также высокой равномерностью даже на сложно профилированных изделиях. В то же время данные оксидные покрытия склонны к растрескиванию при нагревании из-за большого различия температурных коэффициентов расширения алюминиевого основания и оксида и низкой эластичности последнего, что не позволяет удовлетворить высокие требования к электроизоляционным свойствам покрытия (напряжение пробоя более 2 кВ).

В процессе сборки интегральных микросхем, БИС и микросборок выполняют большое количество электрических соединений: контактных площадок кристалла с выводами корпуса (ИС, БИС); выводов кристалла и компонентов с внутренними контактными площадками платы (гибридные ИС (БИС)); периферийных контактных площадок платы с выводами корпуса (микросборки).

Для данных операций применяют проволочный или беспроволочный монтаж. Применение микронной алюминиевой проволоки наряду с экономией золота позволяет выпускать особо надежные полупроводниковые приборы и ИС.

Для сборки ГИС используются также лудящие пасты, представляющие собой смесь припойного порошка и флюс-связки. Использование паст позволяет автоматизировать процесс монтажа навесных компонентов на плату, что обеспечивает высокую производительность сборки в целом.

Лудящая паста применительно к автоматизированной сборке толстопленочных ГИС должна удовлетворять следующим требованиям: сохранять постоянное значение вязкости в процессе нанесения, отвечать условиям трафаретной печати, обеспечивать высокую прочность соединяемых элементов, не быть коррозионно-активной, не вызывать повреждений соединяемых элементов во время пайки и после нее, быть недорогой. Как показали исследования, наилучшими технологическими свойствами обладает лудящая паста на основе канифольсодержащего флюса и припоя ПОС61 с размером частиц 40 - 60 мкм.

Типы гибких печатных плат. Стандарты IЕС и IРС классифицируют их по типу конструкций следующим образом:

Тип 1. Односторонняя гибкая печатная плата, содержащая один проводящий слой, с упрочнениями или без них (рис. 1.4).

Тип 2. Двусторонняя гибкая печатная плата, содержащая два проводящих слоя и сквозные металлизированные отверстия, с упрочнениями или без них (рис. 1.5).

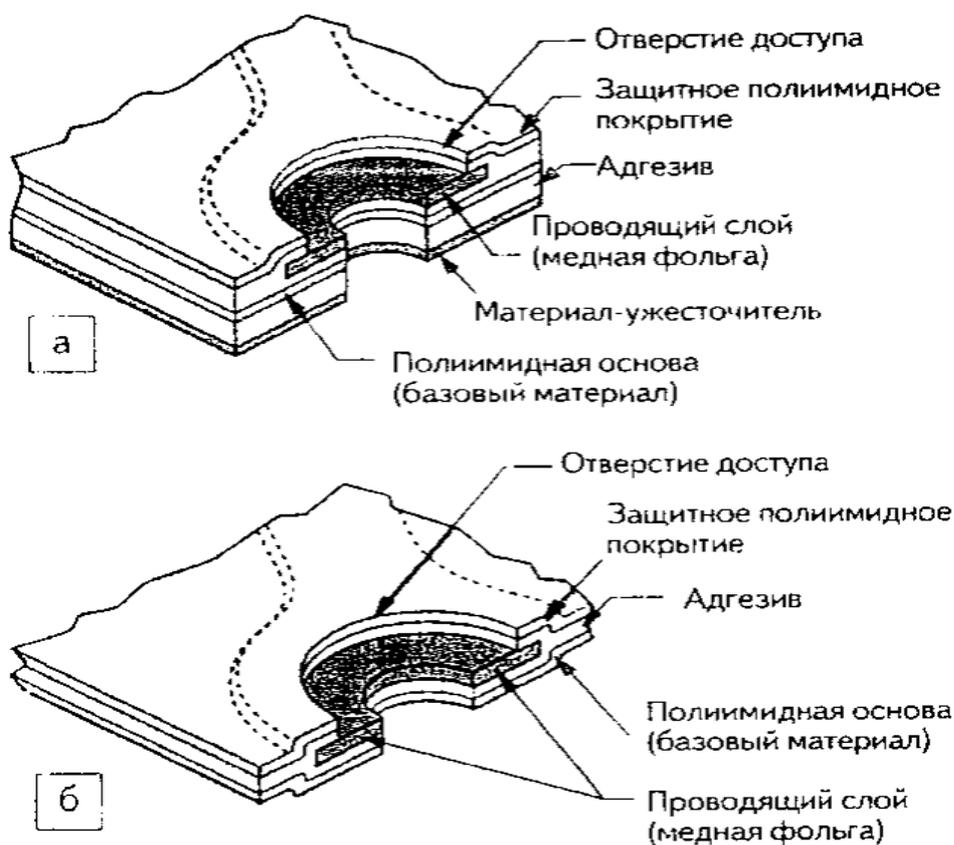


Рис. 1.4. Односторонняя гибкая печатная плата:
 а – с упрочнением; б – без упрочнения



Рис. 1.5. Двусторонняя гибкая печатная плата

Тип 3. Многослойная гибкая печатная плата, содержащая три и более проводящих слоя со сквозными металлизированными отверстиями, с упрочнениями или без них (рис. 1.6).

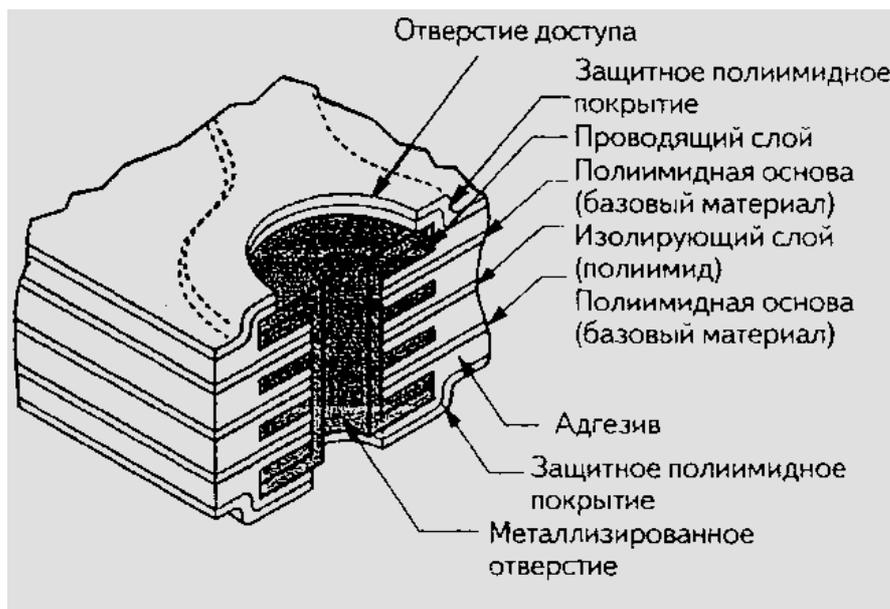


Рис. 1.6. Многослойная гибкая печатная плата

Тип 4. Гибко-жесткая печатная плата, содержащая три и более проводящих слоя со сквозными металлизированными отверстиями (рис. 1.7).



Рис. 1.7. Гибко-жесткая печатная плата

Разнообразие конструкций линий передач. В дополнение к преимуществам применения гибких плат в конструкциях линий передач необходимо отметить их свойство меньше искажать цифровые сигналы при больших длинах линий связи. Относительно малые значения диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь – только один из факторов меньшего ослабления сигнала, чем в других конструкциях линий, использующих жесткие диэлектрики.

Кроме того, что гибкие платы обеспечивают переход от одного устройства к другому без разъемов, создающих неоднородности в линии связи, их гибкость позволяет проектировать без ограничений такие экзотические конструкции, которые невозможно выполнить с использованием жестких материалов. Пример одной из таких конструкций показан на рис. 1.8.

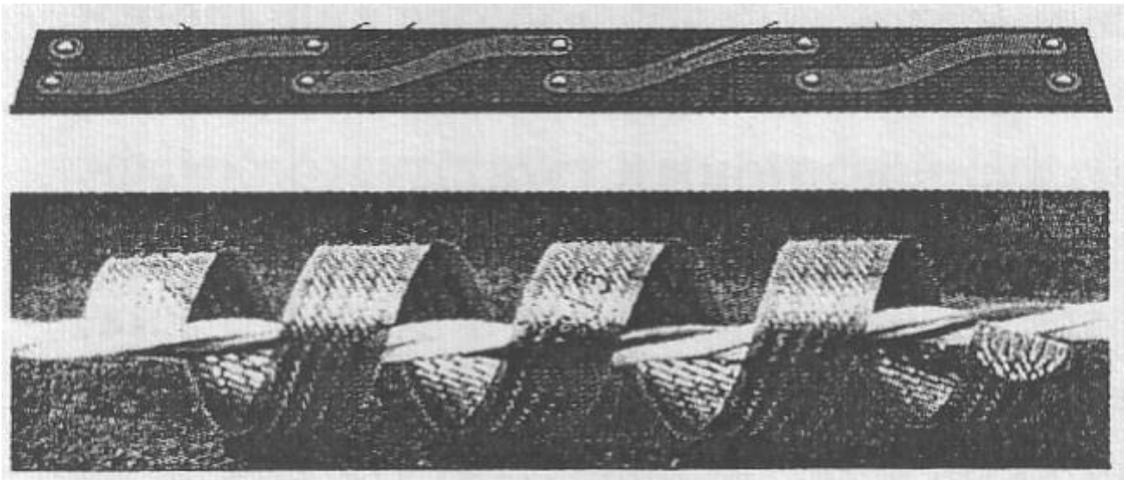


Рис. 1.8. Гибкие печатные платы предоставляют возможность создания необычных конструкций линий связи

Глава 2

АЛЮМИНИЕВАЯ МЕТАЛЛИЗАЦИЯ НА КРИСТАЛЛАХ И КОРПУСАХ ППИ

Производство ИС, особенно БИС и СБИС, ориентировано на использование автоматического сборочного оборудования производительностью до 15 тысяч соединений в час и более с электронными сканирующими устройствами и системами оптико-телевизионного контроля.

Широкое внедрение автоматического микросварочного оборудования при массовом производстве полупроводниковых приборов (ППИ) делает особо актуальной задачу повышения воспроизводимости качества микросоединений за счет ужесточения требований к физико-химическим свойствам и состоянию поверхности деталей, поступающих на операции сборки. Кроме различных конструктивно-технологических факторов на качество микросоединений оказывают существенное влияние пленочная металлизация на кристалле (толщина, состояние поверхности, структура и адгезия пленки с подложкой и др.).

В настоящее время проводятся работы, направленные на формирование межсоединений из медной металлизации вместо алюминиевой, что способствует увеличению быстродействия ППИ и повышению их стабильности в процессе эксплуатации.

Однако существующая технология производства медной системы металлизации не обеспечивает достаточной надежности межсоединений. Это связано с большой диффузионной подвижностью меди в различных материалах. Поэтому необходимо окружать медные межсоединения со всех сторон диффузионно-барьерным слоем.

Алюминий и его сплавы пока остаются основным материалом металлизации для БИС и СБИС. При этом ужесточились требования к металлизации: выдерживать высокие токи возбуждения и частоты синхронизации при уменьшении геометрических размеров (сечения металлизации), иметь низкое контактное сопротивление, обеспечивать высокое качество покрытия ступеньки

оксида и быть устойчивой к электромиграции.

Для СБИС с проектными нормами до 0,25 - 0,35 мкм алюминиевая металлизация будет являться основным проводниковым материалом для формирования многоуровневой коммутации с межслойной изоляцией как на основе SiO₂, так и других диэлектриков.

Алюминиевая металлизация характеризуется следующими основными достоинствами: хорошей адгезией к различным технологическим слоям, в том числе к Si и SiO₂; радиационной стойкостью; низким контактным сопротивлением; достаточно высокой устойчивостью к электромиграции; низким удельным сопротивлением; обеспечивает присоединение проволочных выводов различными методами сварки и др.

Вопросам применения алюминия и его сплавов в технологии металлизации ППИ посвящено большое количество публикаций как в отечественной, так и иностранной литературе. Проведен анализ различных методов получения пленок алюминия. Удельное сопротивление алюминиевых пленок толщиной около 1,0 мкм при комнатной температуре составляет 2,7 - 3,3 мкОм × см, что практически совпадает с объемным удельным сопротивлением металла (табл. 2.1).

Развитие технологии производства ППИ в настоящее время осуществляется в направлении уменьшения размеров приборов и увеличения плотности упаковки на кристалле и уровня интеграции схем, что вызывает необходимость уменьшения ширины металлических пленок, используемых в качестве межсоединений. Однако от ширины пленочной металлизации зависит среднее время наработки на отказ, обусловленное электродиффузией. С уменьшением ширины пленок уменьшается и среднее время отказа.

Исследования удельного электросопротивления пленок алюминия в зависимости от времени отжига свидетельствуют о более равновесной структуре и высокой термической стабильности пленок, получаемых электронно-лучевым и магнетронным напылением. Такие пленки характеризуются

существенно меньшими значениями контактного электросопротивления на границе Al – Si, чем термически напыленные пленки.

Заслуживают внимания исследования удельного сопротивления алюминиевой металлизации, полученной магнетронным, термическим и электронно-лучевым методами. Удельное сопротивление металлизации определяли после термообработки в атмосфере аргона при температуре 500 °С в течение 5 мин.

Таблица 2.1

Удельное сопротивление алюминиевой металлизации

Тип металлизации	Толщина слоя, мкм	Удельное сопротивление, мкОм × см
Алюминий (термический)	0,71	2,9
	1,07	2,87
Алюминий (электронно-лучевой)	1,25	2,88
	1,58	2,81
Алюминий (магнетронный)	0,93	3,33
	1,45	3,13
Алюминий + 1 % кремния (магнетронный)	0,97	3,34
	1,50	3,20
Алюминий + 2 % кремния (магнетронный)	1,00	3,40
	1,34	3,12
Алюминий + 4 % меди (магнетронный)	1,02	2,85
	1,57	2,66

Исследования показали, что сопротивление слоев алюминия и сплава Al-Si, нанесенных магнетронным методом, несколько выше, чем слоев металлизации, полученных термическим и электронно-лучевым методами (табл. 2.1).

Добавление второго элемента – эффективный и надежный способ увеличения электродиффузионного срока службы пленок. Зависимость медианного времени отказа проводников из Al от добавки другого металла при $I = 2 \cdot 10^6$ А/см² показана в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Зависимость медианного времени отказа проводников из Al от добавки другого металла при $I = 2 \cdot 10^6 \text{ A/cm}^2$

Сплав	МВО, ч
Al + 1,8 % Si	100 – 200
Al + 4 % Cu	2500
Al + 4 % Cu + 1,7 % Si	4000
Al + 1 % Ni	3000
Al + 2 % Mg	1000
Al + 4 % Cu + 2 % Mg	10000
Al + 4 % Cu + 2 % Ni + 1,5 % Mg	32000
Al + 2 % Au	55
Al + 2 % Ag	45

Из табл. 2.2 видно, что для алюминиевых пленок наиболее эффективны добавки Cu, Ni, Mg.

Приведен контроль стабильности алюминиевой металлизации к явлению электромиграции по резистометрическим измерениям и расчет гамма-процентного срока долговечности алюминиевой металлизации (Al + 1% Si толщиной $0,55 \pm 0,05$ мкм и Al+1% Si толщиной $1,2 \pm 0,12$ мкм), применяемый в ИС серий 1554ТБМ и 1594Т. Для первого типа металлизации ускоряющими факторами являлись температура окружающей среды $T = 100$ °С и ток $I = 20$ мА, для второго соответственно $T = 250$ °С и $I = 40$ мА. Получены величины γ -процентного ресурса для первого и второго типов металлизации, которые превышают установленную в ОТУ величину в 2,6 и 12,8 раз соответственно. Статистически получено, что не существует корреляции между величиной сопротивления металлизации до испытаний и времени наработки до отказа при температурах испытаний 200 и 250 °С.

Таким образом, электромиграцию в алюминиевой металлизации на кристаллах полупроводниковых приборов и ИС можно существенно уменьшить путем правильного конструирования приборов.

Повышение качества микросоединений, выполненных ТКС. При изготовлении ППИ в металлостеклянных корпусах широко используется метод ТКС алюминиевой проволокой внахлестку. Установлено, что термокомпрессионные соединения алюминиевой микропроволоки с алюминиевыми пленками, нанесенными в вакууме, имеют стабильность прочности ниже, чем соединения типа Al-Au на траверсах корпусов. Анализ характера разрушения микросоединений при натяжении микропроволоки под углом 90° к плоскости соединения показывает, что около 8 - 10 % микросварных соединений разрушаются по зоне сварки.

Исследования показали, что на качество микросоединений оказывают влияние структура и толщина оксидной пленки Al_2O_3 на поверхности алюминиевой металлизации контактных площадок. Известно, что естественный слой оксида имеет неравную толщину и сплошность, но хорошую адгезию к пленке алюминия. Данный слой состоит из аморфной смеси с небольшой примесью кристаллической фазы, он склонен к гидратации, т.е. содержит молекулы воды, которые находятся в твердом растворе в виде гидроксильных ионов.

При термообработке с целью улучшения адгезии алюминиевой пленки к поверхности ППИ и формирования омических контактов поверхностная часть оксидного слоя переходит из аморфной модификации в кристаллическую γ -фазу Al_2O_3 .

При ТКС под воздействием температуры и давления происходит пластическое течение свариваемых материалов, в результате которого на соединяемых поверхностях должны разрушаться, а затем и выноситься из зоны адсорбированные соединения и оксидные пленки. Однако аморфный слой оксида алюминия обладает высокой пластичностью и легко утоняется при механическом давлении, т.е. его сложно полностью удалить при пластической деформации. Поэтому было сделано предположение, что одним из основных

факторов, снижающих стабильность прочности термокомпрессионных соединений алюминиевых проводников с пленками алюминия, осажденными в вакууме, является наличие на поверхности пленки слоя оксида алюминия аморфной модификации. Оксидный слой на поверхности алюминиевого проводника разрушается легче, так как микропроволока при ТКС деформируется гораздо больше, чем пленка.

Для исследования влияния структуры оксида на пленке алюминия на качество соединений с алюминиевой микропроволокой были изготовлены три партии полупроводниковых кристаллов. Осаждение алюминия на полупроводниковые кристаллы всех партий осуществляли на установке вакуумного напыления УВН-73 в следующем режиме: остаточное давление в вакуумной камере $2 \cdot 10^{-3}$ Па, напряжение на электронно-лучевом испарителе 8 – 11 кВ, ток эмиссии 600 – 700 мА.

Различие для кристаллов всех партий заключалось в режимах охлаждения получаемых пленок. В первой партии охлаждение проводили в вакууме до температуры 100 °С, затем осуществляли напуск азота в подколпачный объем и охлаждение до комнатной температуры. Во второй партии охлаждение проводили так же, как в первой партии, но осуществляли напуск кислорода. Охлаждение третьей партии проводили отключением нагрева с одновременным напуском кислорода сразу после осаждения металла при температуре 150 ± 20 °С.

После фотолитографической гравировки по металлу все кристаллы подвергались термообработке в среде аргона при температуре 500 °С в течение 20 мин.

Для определения прочности микросоединений алюминиевых микропроводников с вакуумно-осажденными пленками алюминия ТКС проводили на установке типа НПВ-1А проволокой марки АК09ПМ35 в режимах, оптимальных для данных металлов. Для каждой партии кристаллов было сформировано по 100 сварных соединений. Контроль качества микросварных соединений проводился разрушающим методом – натяжением проволочного вывода под

углом 90° к поверхности подложки (рис. 2.1). Характер разрушения анализировался под микроскопом типа ММУ-3 при увеличении в 80 раз. По результатам измерений для каждой партии кристаллов были определены среднее значение разрушающих усилий P_{cp} и коэффициент вариации.

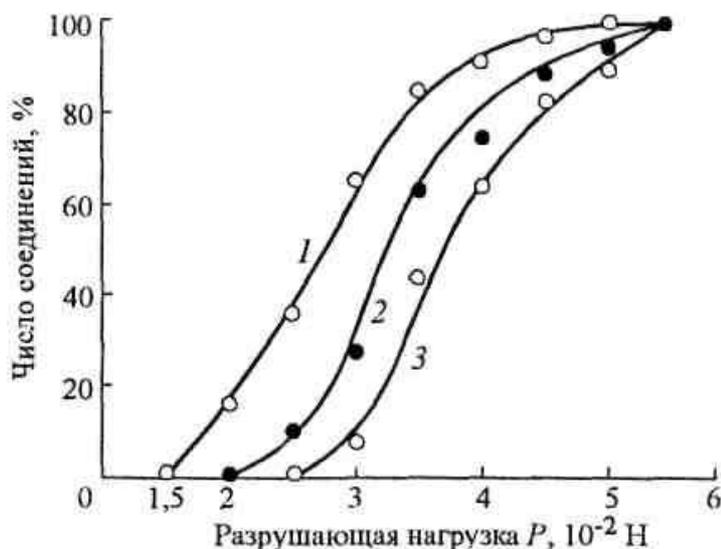


Рис. 2.1. Интегральное распределение прочности микросварных соединений алюминиевых микропроводников с различными вакуумно-осажденными пленками алюминия (номера кривых соответствуют номерам партий кристаллов)

$$K_v = \frac{\sigma}{P_{\text{ср}}} 100 \%,$$

где σ – среднее квадратичное отклонение усилий отрыва, Н.

Из табл. 2.3 видно, что средние значения усилий разрушения и их стабильность выше во второй и третьей партиях кристаллов, металлизация которых сформирована окислением в кислороде. Кроме того, в этих партиях отсутствуют разрушения сварных соединений в виде отслоения проволоки от пленки.

Таблица 2.3

Экспериментальные результаты контроля качества микросоединений

Номер партии кристаллов	$P_{cp}, 10^{-2} \text{ Н}$	$\sigma, \text{ Н}$	$K_v, \%$	Примечания
1	2,46	0,67	27,3	8 % разрушений в виде отслоения проволоки от пленки
2	3,2	0,75	23,4	Разрушения в виде отслоения проволоки от пленки отсутствуют
3	3,53	0,65	18,4	То же

Большая прочность микросоединений на кристаллах третьей партии по сравнению со второй, видимо, связана с отсутствием роста естественного оксида на воздухе после окисления в цикле осаждения металла, и поэтому в данном случае происходит более полный перевод оксида в кристаллическую модификацию. Для повышения качества микросоединений при ТКС рекомендуется сразу же после нанесения в вакууме пленок алюминия окислять их в чистом кислороде при температуре подложки 130 - 170 °С.

Соединения алюминиевой проволоки с гальваническим алюминием на корпусах ППИ (при ТКС). Рассмотрено влияние структуры и толщины алюминиевого покрытия на свариваемость с алюминиевой микропроволокой при ТКС. Для изготовления образцов были взяты кристаллодержатели из сплава ферроникель 42Н, на которые наносились пленки алюминия из электролита, содержащего бромид алюминия – 500 г/л, парафин – 5 г/л, ксилол – остальное. Электролиз проводился в герметизированном электролизере в атмосфере азота. В качестве анодов использовались пластины алюминия марки А99,99. Режим электролиза:

- катодная плотность тока $i_k = 0,5 - 5 \text{ А/дм}^2$;
- продолжительность электролиза $\tau = 15 - 30 \text{ мин.}$

После контроля морфологии поверхности на растровом электронном микроскопе проводилась имитация напайки кристаллов на основания корпусов ППИ: нагрев образцов до 450 °С и выдержка в течение двух минут.

Формирование микросварных соединений алюминиевой проволоки с алюминиевым покрытием осуществлялось на установке термокомпрессионной сварки типа НПВ-1А. Проволока марки АК09ПМ30 в исходном состоянии имела предел прочности $\sigma_B = 200 - 220$ МПа и относительное удлинение $\gamma = 3 - 4$ %. Для ТКС использовали следующие режимы: температура нагрева кристаллодержателя 350 ± 10 °С, давление сварочного инструмента на проволоку $2,0 \pm 0,1$ Н, время приложения давления при сварке $0,4 \pm 0,05$ с. Для сварки использовались режимы, рекомендуемые для пары алюминий-алюминий.

Для каждой группы образцов, полученных при определенном режиме электролиза, было выполнено по 100 сварных соединений.

Известно, что важнейшей характеристикой надежности микросоединений ППИ является стабильность прочности (усилие разрушения). Поэтому оценка свариваемости осуществлялась по среднему значению разрушающего усилия (P_{cp}) и коэффициенту вариации (K_v), характеризующему воспроизводимость качества микросоединений.

Контроль прочности соединений проводился разрушающим методом – натяжением проволочного вывода под углом 90° к плоскости сварного соединения. Характер разрушения анализировался под микроскопом типа ММУ-3 при увеличении $80\times$. При этом наблюдались два вида разрушений: обрыв по утоньшению проволоки в зоне сварки и частичное или полное отслаивание проволоки от покрытия. Соединения считались качественными, если при оценке прочности разрушающим методом обрывы проволоки происходили по «шейке» (участке перехода сварного соединения в проволоку).

По результатам измерений для каждой партии образцов были определены P_{cp} и K_v . Коэффициент вариации определялся по известной формуле

$$K_v = \sigma / P_{cp} \cdot 100,$$

где σ – среднее квадратичное отклонение усилий отрыва, сН.

Контроль структуры и толщины алюминиевых пленок показал, что величина зерна и толщина пленки определяются режимами электролиза – катодной плотностью тока и продолжительностью процесса. Пленки толщиной до 2 мкм, полученные при значениях $i_k = 0,5 \text{ А/дм}^2$ и $\tau = 15 - 30$ мин, имеют мелкозернистую структуру, но большое количество пор. С увеличением i_k свыше 2 А/дм^2 размер зерна увеличивается и на поверхности появляются дендриты, количество которых возрастает в местах с повышенной плотностью тока.

На кристаллодержателях, имеющих покрытие толщиной до 2 мкм, наблюдается локальное отслоение покрытия после проведения термообработки, имитирующей напайку кристаллов, что связано с окислением ферроникеля кристаллодержателей через поры в алюминиевом покрытии.

Полученные данные по качеству сварных соединений были обработаны с помощью методов математической статистики и сведены в 10 групп (табл. 2.4). На рис. 2.2 представлена зависимость качества сварных соединений от свойств покрытий.

Из рис. 2.3 и табл. 2.4 видно, что свариваемость алюминиевого покрытия, нанесенного на подложку из ферроникеля, зависит от структуры и толщины алюминиевой пленки. Максимальную прочность имеют сварные соединения алюминиевой микропровода с мелкозернистыми покрытиями толщиной 5 - 7 мкм, полученными при режиме электроосаждения: $i_k = 1 - 2 \text{ А/дм}^2$, $\tau = 30$ мин. Низкая прочность и высокий процент ($\sim 20 \%$)

Таблица 2.4

Оценка свариваемости алюминиевых покрытий

Номер группы	Плотность тока, А/дм^2	Время электролиза, мин	Толщина δ , мкм	Размер зерна F , мкм	P_{cp} , сН	K_v , %	Разрушение в виде отслоения проволоки

							от покрытия, %
1	0,5	15	1	1-2	0,4	42	20
2	0,5	30	2	1-2	0,7	34	17
3	1,0	15	2	1-2	1,4	26	5
4	1,0	30	5	1-2	4,3	12	Отслоений нет
5	2,0	15	3	2-3	1,4	22	3
6	2,0	30	7	2-3	3,8	15	Отслоений нет
7	3,0	15	4	4-5	1,2	32	10
8	3,0	30	10	4-5	1,9	27	8
9	5,0	15	6	5-7	1,1	37	28
10	5,0	30	14	5-7	0,7	40	35

разрушений в виде отслоения проволоки от покрытий меньших толщин связаны с загрязнениями поверхности покрытия оксидами железа и никеля, выходящими при нагревании через поры в покрытии, что приводит к уменьшению площади взаимодействия проволоки с покрытием при сварке.

Сварные соединения с пленками, полученными при значениях $i_k > 2$ А/дм², имеют более низкую прочность и большой разброс параметров.

При контроле качества соединений с покрытиями, полученными при $i_k > 3$ А/дм², наблюдалось до 10 % разрушений в виде отслоения проволоки от покрытия, а при $i_k = 5$ А/дм² число отслоений составило ~ 35 %. Это

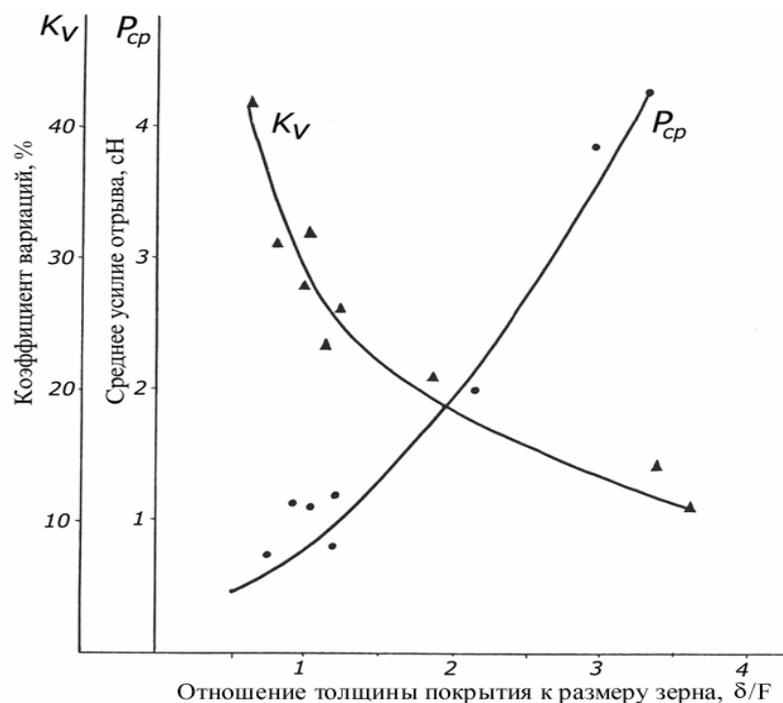


Рис. 2.2. Влияние свойств покрытий на качество микросварных соединений

связано с крупнозернистой и дендритной структурой поверхности алюминиевого покрытия (рис. 2.3, б), которая ухудшает условия вытеснения адсорбированных и оксидных пленок из зоны соединения при пластической деформации в процессе сварки, что приводит к уменьшению площади взаимодействия свариваемых металлов.

Таким образом, свариваемость алюминиевых покрытий, нанесенных гальваническим осаждением, зависит от их структуры и толщины. Оптимальные результаты для исследуемого электролита получены на покрытиях толщиной 5-7 мкм, величина зерна при этом не превышала 3 мкм и на поверхности отсутствовали дендриты.

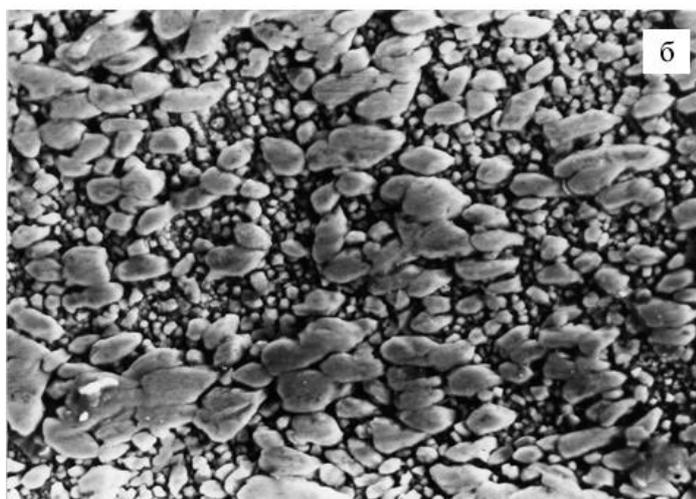
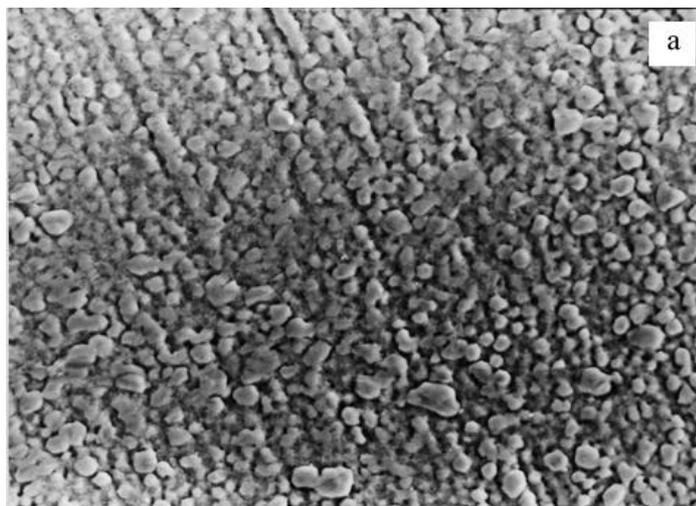


Рис. 2.3. Структура алюминиевых покрытий, характеризующихся хорошей (а) и неудовлетворительной (б) свариваемостью, 2000[×]

МЕТАЛЛИЗАЦИЯ КРИСТАЛЛОВ И КОРПУСОВ СЕРЕБРОМ, ЗОЛОТОМ И ДРУГИМИ МЕТАЛЛАМИ

В полупроводниковой микроэлектронике серебрение используется для создания функциональных покрытий с высокой электропроводностью и стабильной величиной переходного сопротивления в местах контактов. Серебряные покрытия, полученные из обычных электролитов, характеризуются малой твердостью и незначительной износостойкостью. Для улучшения этих параметров в электролит при серебрении вводят соли никеля или кобальта. В этом случае твердость покрытия повышается в 1,5, а износостойкость - почти в 3 раза.

Серебряное покрытие. Серебро обладает чрезвычайно высокой чувствительностью к окружающей воздушной среде. В атмосферных условиях происходит потемнение серебряного покрытия. Ионы серебра вступают в реакции с другими ионами с образованием труднорастворимых соединений, например сульфида серебра Ag_2S .

При нагреве Ag_2S в ампуле без доступа воздуха при температуре выше 350°C происходит частичная его диссоциация с образованием нитей серебра. В присутствии воздуха Ag_2S при нагреве окисляется до сульфата серебра (Ag_2SO_4). Сульфид серебра восстанавливается до металла водородом при температуре выше 200°C .

В атмосфере чистого сухого воздуха серебро не меняет внешний вид. Оптическими исследованиями установлено, что на воздухе поверхность серебра покрывается тонкой пленкой оксида толщиной до 1,2 нм. При нагревании серебра в атмосфере кислорода до $300 - 400^\circ\text{C}$ образуется более толстая пленка оксида Ag_2O , имеющая темно-бурый цвет. При избыточном давлении кислорода (до 20 МПа) и повышенных температурах серебро может окислиться полностью.

Основной трудностью сборочных операций по серебряному покрытию является наличие сульфидной пленки Ag_2S на поверхности. Влияние сульфида серебра (потускневшее серебро) на выводных рамках с серебряным покрытием на процессы пайки кристаллов и присоединение выводов рассматривалось ранее.

Пайка низкотемпературными припоями по серебряным покрытиям требует тщательной подготовки соединяемых деталей ППИ. Образование сульфидных пленок при хранении корпусов ППИ может привести к полной потере паяемости серебра.

Сульфид серебра Ag_2S может образовываться также и при непосредственном воздействии сероводорода на серебро. Известно, что Ag_2S может существовать в трех модификациях: α -модификации, устойчивой до температуры 110°C , β -модификации, устойчивой в интервале температур $90 - 175^\circ\text{C}$, и γ -модификации, образующейся при температурах, превышающих 175°C . Проводимость сульфида серебра резко меняется с температурой, при температуре 26°C она незначительна.

При понижении температуры электрическое сопротивление пленок Ag_2S увеличивается и они становятся электроизоляционными. Образование сульфидных пленок при хранении или запрессовке в пластмассу может привести к полной потере паяемости серебра оловянно-свинцовыми припоями.

При температуре 175°C и выше проявляется металлический характер проводимости. В силу этого контактная пара может удовлетворительно работать при повышенных температурах при наличии плотной и прочно сцепленной сульфидной пленки с поверхностью покрытия. В то же время следует помнить, что термообработка серебряных гальванических покрытий при температуре 400°C приводит к их отслаиванию от основы.

С точки зрения электропроводимости Ag_2S является полупроводником n-типа проводимости. Наивысшей проводимостью обладает Ag_2S в γ -модификации при температуре выше 178°C . Из фазовой диаграммы системы Ag-S видно, что при температуре выше 178°C происходит изменение в

структуре от α - Ag_2S к γ - Ag_2S . Этот переход сопровождается изменением внешнего вида потемневшего покрытия при нагреве. Возможно и протекание реакции



В некоторых полупроводниковых приборах используется серебро в качестве технологического покрытия коллекторной стороны кристалла и корпуса. В первом случае осуществляется напыление пленки серебра на пластины с кристаллами, во втором – нанесение серебряного покрытия на корпуса проводят гальваническим способом только на участки под пайку кристаллов и разварку внутренних выводов.

Следует отметить, что сведений о технологическом процессе сборки ПШИ в корпуса с серебряным покрытием траверс крайне мало.

Гальваническое золочение корпусов. Электролиты для осаждения золота можно разбить на две основные группы: цианистые и нецианистые. Нецианистые электролиты мало применяются в технологии осаждения золота. Цианистые электролиты делятся на три подгруппы: щелочные, нейтральные и кислые.

Щелочные электролиты работают при pH 11 - 11,5, температуре 55 – 65 °С и содержат 0,5 - 15 г/л золота, 15 - 90 г/л свободного цианистого калия и 50 - 100 г/л электропроводящей добавки.

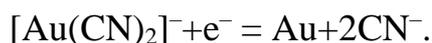
Золочение в нейтральных цианистых электролитах проводится с нерастворимыми анодами. Кислотность этих электролитов (pH 6,5 - 7,5) поддерживается добавлением фосфорной кислоты. Эти электролиты более производительны, так как выход по току в них близок к 100 %, в то время как у щелочных всего 70 - 80 %. Недостатком нейтральных электролитов является их нестабильность.

Кислые электролиты широко используются на операции золочения, обычно работают при pH 3 - 6. Кислотность в них поддерживается с помощью органических кислот (лимонной, винной, щавелевой и др.).

Электролиз ведут до выработки золота. Перед каждой загрузкой деталей в электролит добавляется необходимое количество золота для осаждения в виде концентрата. Добавка осуществляется в два приема. Электролиз ведут до начала вспенивания (выделения водорода) электролита, затем плотность тока снижают до 0,03 - 0,05 А/дм², что обеспечивает полноту осаждения всего золота. Эта технология практически исключает перерасход золота на детали, и отклонения от заданной толщины не выходят за пределы допустимых границ.

Металлизацию корпусов ППИ осуществляют гальваническим способом из электролитов на основе цианистых солей золота. В цианистых электролитах основным компонентом является анион $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$. Осаждение золота из цианистых щелочных электролитов протекает при большой катодной поляризации, обуславливающей их высокую рассеивающую способность и мелкокристаллическую структуру катодных осадков.

Выделение золота на катоде происходит в результате непосредственного восстановления цианоауратного комплекса



Практическое применение получил также железосинеродистый электролит, для изготовления которого можно использовать хлорное золото, получаемое в процессе анодного растворения высокопробного золота в соляной кислоте. Хлорное золото нейтрализуют раствором K_2CO_3 до прекращения выделения CO_2 . Затем растворы железосинеродистого и углекислого калия сливают вместе, нагревают до кипения и вводят горячий раствор хлорного золота. Полученный раствор кипятят 4 - 5 ч, фильтруют и вводят в него KCNS , после чего он готов к работе. Электролиз ведут при катодной плотности тока 0,2 - 0,3 А/дм² и температуре 30 - 60 °С (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Основные электролиты золочения

Компоненты электро- лита	Состав электролита (г/л)						
	1	2	3	4	5	6	7
Золото в перерасчете на металл	2,0	1,0	8,0	4,0	22,0	8,0	15- 30,0
Калий цианистый (сво- бодный)	15,0	0,1- 15	20,0	30,0	-	-	-
Калий двухзамещен- ный фосфат	15,0	15,0	20,0	30,0	-	30,0	-
Калий углекислый	-	-	20,0	30,0	-	-	-
Калий железистосине- родистый	-	-	-	-	200,0	-	-
Аммония цитрат	-	-	-	-	200,0	-	25- 50,0
pH	11- 11,5	10,0- 11,5	11,0- 11,5	11,0- 11,5	-	6,5- 7,5	5,0- 7,0

Как было отмечено ранее, при изготовлении ППИ одним из наиболее распространенных гальванических покрытий является чистое золото (99,9 %). В тоже время следует отметить, что золотое покрытие повышает себестоимость выпускаемых изделий. Кроме того, чистое золото имеет определенные недостатки, поэтому вместо чистого золота используют сплавы на основе этого металла. В электронной технике электролитические сплавы на основе золота находят широкое применение в производстве.

Эти сплавы используются для защиты от коррозии ППИ, эксплуатируемых в жестких климатических условиях, для обеспечения пайки узлов в качестве припоев, для пайки в атмосфере водорода. Электролитические сплавы используются вместо золота при покрытии контактов для обеспечения требуемого техническими условиями сопротивления и стабильности работы

контактов. Наиболее исследованы сплавы золото-никель и золото-кобальт, наиболее перспективным сплавом является золото-кадмий, который имеет высокую износостойкость, паяемость, низкое контактное сопротивление, мало изменяется при старении.

Напыление Au. Толщина пленок является важным параметром, определяющим тенденцию к изменению субструктуры. Повышение толщины связано с увеличением времени выдержки при температуре конденсации и с изменением влияния поверхности, на которую могут выходить точечные и закрепляться линейные, поверхностные и объёмные эффекты. Это явление оказывает влияние на микро– и макронапряжения в проводящих дорожках пленочных ППИ. Эти напряжения особенно опасны при формировании токопроводящих дорожек и контактных площадок для присоединения внутренних выводов. Удаление частиц пленок (методами фотолитографии) с положительными или отрицательными напряжениями нарушает локальное механическое равновесие, которое совместно с силами адгезии удерживало пленку от разрушения. Подтравливание деформированных участков на границе с подложкой может привести к локальному отслаиванию пленки вдоль границы дорожки. В табл. 3.2 приведены данные о растягивающих напряжениях в пленках золота толщиной 0,1 – 0,3 мкм.

Таблица 3.2

Растягивающие напряжения в пленках золота

Материал подложки	Температура подложки, °C	Напряжения, 10^7 Н/м ²
Кварц	20	10-20
Медь	20	8,5

В пленках золота отжиг всегда приводит к снижению напряжений.

Покрyтия для бессвинцовой пайки. При решении вопроса о надежности паяных соединений наряду с выбором оптимальных способов и режимов пайки необходимо учитывать состав и свойства паяемых покрытий. К покрытиям предъявляются следующие основные требования:

- они должны обеспечивать хорошую паяемость с полупроводниковыми кристаллами и свариваемость с внутренними выводами;
- сохранять способность к пайке и сварке при заданном сроке хранения; обеспечивать антикоррозионную защиту;
- не подвергаться иглообразованию при хранении и разрушению при температурах сборки, испытании и эксплуатации.
- обеспечивать минимальное переходное электрическое сопротивление;
- быть устойчивыми к тепловому удару при монтаже приборов на печатные платы пайкой, к химическим реагентам, используемым в процессе сборки;
- обеспечивать адгезию компаунда при герметизации прибора опрессовкой полимером.

В США, начиная с 2004 г. запрещено использование свинца в паяемых покрытиях. В качестве заменителей Sn-Pb покрытий используются следующие металлы и сплавы: чистые Sn, Sn-Bi, Sn-Ag, Sn-Cu, Sn-Zn, Sn-Ni, а также наносимые химическим путем Ag, многослойные Ni-Pd-Au, Ni-P/Au и Ni/Au покрытия. Для печатных плат с высокой плотностью элементов рекомендовано использовать Sn/Cu покрытие, осаждаемое из электролита состава, (г/л): 40Sn/0,5Cu (в виде метансульфоната), метансульфоновая кислота 200, органическая добавка 40 мл/л. Режимы осаждения: $J_k = 16-24 \text{ А/дм}^2$, $T = 35-42 \text{ }^\circ\text{C}$, $\tau = 1 \text{ мин}$.

Плавающее покрытие из не менее двух слоев металлов при расплавлении образующих эвтектический припой наносят на паяемую поверхность. Толщина покрытия 1-20 мкм. Рекомендуется наносить следующие сочетания металлов: 82,5Au/17,5Ni, 55Cu/45Sn и 79Au/17Cu/4Cd.

Анализ паяных поверхностей полупроводниковых кристаллов и оснований корпусов показал, что для пайки бессвинцовыми припоями в первую

очередь необходимо проанализировать следующие покрытия: цинковое, никелевое, никель – олово, серебряное, оловянное, цинк – олово и олово – висмут.

Цинковое покрытие. Цинк принадлежит к электроотрицательной группе металлов; его стандартный потенциал минус 0,763 В. Реагирует цинк с H_2S и сернистыми соединениями, образуя сернистый цинк. В сухом воздухе Zn почти не изменяется. Во влажном воздухе и в воде, содержащей CO_2 и O_2 , он покрывается пленкой, состоящей из $ZnCO_3$, которая защищает металл от дальнейшего разрушения. В условиях тропиков цинковое покрытие нестойко. Особо значительна скорость коррозии Zn в атмосфере промышленного города. Солевые пленки на цинке отличаются хорошей растворимостью, легко смываются влагой. Защитные свойства Zn покрытия определяются его толщиной и равномерностью осаждения.

Цинкование производят в простых (кислых, сернокислых, хлористых, борфтористоводородных) и сложных комплексных (цианистых, цинкатных, пирофосфатных, аммиакатных, аминокомплексных с различными органическими аддендами и др.) электролитах. В простых электролитах на катодный процесс при осаждении Zn оказывает влияние кислотность электролита. Практически применяют электролиты цинкования с pH 4-5. Органические вещества, вводимые в кислые электролиты цинкования в качестве добавок, улучшают структуру, внешний вид покрытий и равномерность распределения его на катодной поверхности.

Аноды для цинкования в кислых электролитах изготавливают, как правило, из чистого электролитического Zn (99,8-99,9 % Zn), который может содержать менее 0,03 % Pb; 0,02 Cd; 0,002 % Cu; 0,007 % Fe и 0,001 % Sn.

В качестве покрытий обратной поверхности кристаллов и оснований корпусов под пайку бессвинцовыми припоями заслуживает внимания осаждение сплава Zn-Sn. Данный сплав улучшает паяемость деталей в большей степени, чем Zn покрытия и несколько повышает их коррозионную стойкость. Основной состав электролита следующий, (г/л): ZnO (20-25), NaOH (100-120),

станнат натрия (0,4-0,5). Режимы осаждения: $T = 25-30\text{ }^{\circ}\text{C}$; $J_k = 1-1,5\text{ A/дм}^2$; аноды из цинка с присадкой 0,2-0,3 Sn.

Цинк во влажном воздухе покрывается пленкой, состоящей из карбоната цинка, тогда как в сухом воздухе цинк изменяется незначительно. Солевые пленки на цинке отличаются хорошей растворимостью, легко смываются влагой.

Олово–висмутовое покрытие. В технологии производства ППИ на сборочных операциях широко используется сплав олово-висмут как в виде покрытий, так и в виде припоев.

Покрытие сплавом Sn-Bi в некоторых случаях применяют вместо серебра. При соответствующих режимах электролиза покрытия сплавом Sn-Bi получают с мелкозернистой структурой и пониженной твердостью. Блестящие покрытия сплавов Sn-Bi наносятся на корпуса ППИ из меди и других металлов. Состав электролита (г/л): сернокислое олово 30-45; сернокислый висмут 0,5-1; серная кислота 120-140; смачиватель ОС-20 4-5; формалин (40 %) 5-10 (мл/л); лимеда Sn-2 5-10 (мл/л); температура электролита 18-25 °C; pH раствора 1-2; скорость осаждения 0,2-0,6 мкм/м при плотности тока 1,5-3 А/дм². Отношение поверхности катода к поверхности анода 1:1.

Покрытия сплавом Sn-Bi обладают высокой коррозионной стойкостью. Блестящие покрытия сплавом Sn-Bi имеют высокую коррозионную стойкость в камере морского тумана в течение 7 суток, в камере влаги в течение 10 и 30 суток. Коррозионная стойкость оценивалась визуальным подсчетом мест коррозионных поражений по десятибалльной системе (табл. 3.3).

Коррозионная стойкость покрытий сплавом Sn-Bi зависит от состава сплава, толщины, структуры и пористости осадков. Большой коррозионной стойкостью обладают покрытия с содержанием 0,4-0,9 % Bi. Рекомендуется

Таблица 3.3

Коррозионная стойкость покрытия Sn-Bi (в баллах)

Тип покрытия	Морской туман, 7 суток		Влага, 10 суток		Влага, 30 суток	
	Подслоя меди	Подслоя никеля	Подслоя меди	Подслоя никеля	Подслоя меди	Подслоя никеля
Sn-Bi блестящее (15 мкм)	8,6	9,1	9,2	9,9	7,7	7,9

применять для ППИ сложной конструкции из разнородных материалов покрытия толщиной 9-12 мкм, а для тропического варианта – толщиной 18-21 мкм. При этом на стальные и латунные детали предварительно наносят подслоя меди толщиной 4-6 мкм.

Покрытие составом Sn-Bi толщиной 9-12 мкм используется для коррозионной защиты деталей из меди и медных сплавов в жестких условиях эксплуатации.

Для защиты проводников печатных плат вместо серебрения применяется сплав Sn-Bi. Исследования показали, что в течение продолжительного времени сохраняется качественная пайка и исключается механическая и химическая зачистка проводников после травления.

Проводились исследования паяемости трех видов покрытий: оловянного, оловянно-свинцового и покрытия олово-висмут, нанесенных на медь и латунь по подслою никеля и меди. Установлено, что подслоя никеля способствует сохранению паяемости всех видов покрытий лучше, чем подслоя меди. Внешний вид оловянных и оловянно-свинцовых покрытий после 6-7 месяцев хранения ухудшился. При этом произошло потемнение покрытий и появились очаги коррозии. Внешний вид покрытий олово-висмут с подслоем никеля практически не изменился после годового складского хранения.

Для осаждения покрытий сплавом Sn-Bi разработано большое количество электролитов. Покрытия данными сплавами могут осаждаться в виде

матовых или блестящих осадков. Для широкого использования в производстве изделий микроэлектроники для осаждения сплава Sn-Bi рекомендуются электролиты с добавкой ОС-20 или двумя добавками ДДМ и ОС-20, позволяющие получать светлые, мелкозернистые, плотные осадки.

В сплавах системы Sn-Bi с увеличением доли висмута в олове прочность припоя возрастает, а пластичность снижается при одинаковых условиях. Припой Sn-Bi с массовой долей висмута 52-58 % имеют прочность 53-56 МПа. Такая концентрация висмута способствует измельчению структуры олова и задерживает рост зерен при длительной выдержке при повышенных температурах.

Припой на основе системы Sn-Bi с содержанием висмута 30-40 % имеют низкую пластичность. По этой причине из таких припоев получить ленту толщиной 0,05-0,2 мм без трещин при прокатке не удастся.

Температурный коэффициент линейного расширения эвтектического припоя (58Bi/42Sn) при температуре плавления составляет $16,2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. При этом электрическая проводимость составляет всего 4,5 % от электрической проводимости меди. Таким образом, данный припой целесообразно применять для пайки согласованных соединений с повышенной прочностью, но работающих при температуре не выше 80 °С.

В качестве припоя используется сплав тройной системы олово – индий – висмут. Эвтектический сплав (16,3Sn/54,02Bi/29,68In) имеет температуру плавления 81 °С.

Для герметизации корпусов ППИ пайкой без флюса используют припойную прокладку, содержащую 99-99,5 % Sn и 0,5-1,0 % Bi. При этом основание корпуса и крышки покрыты золотом, а нагрев осуществляется струей горячего инертного газа. Особенностью данного способа герметизации является то, что золотом покрывается часть крышки, входящая в зону шва. Это не только приводит к экономии золота, но и исключает растекание припоя по внешней и внутренней поверхности крышки. Толщина золотого покрытия на крышке составляет 1,5-2 мкм.

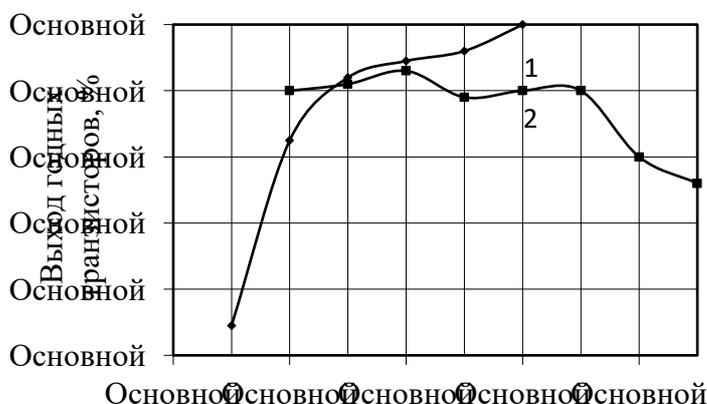
При сборке ППИ в металлокерамических корпусах возможна пайка без припойной прокладки за счет слоя припоя Sn-Bi, нанесенного на крышку. В данном случае слой припоя наносится в виде рамки или валика только по краю внутренней поверхности крышки. Толщина его должна быть не менее 0,15 мм. На основание корпуса тоже в виде кольца нанесено золото. Герметизация осуществляется струей нагретого газа, при этом слой припоя на крышке плавится, смачивает золото и герметизирует корпус без использования флюса.

Выбор метода подачи и оптимальной толщины припоя для соединения кристалла с ножкой. Исследовались два метода подачи припоя: использование припоя в виде прокладки и нанесение припоя на коллекторную сторону кристалла.

При первом методе припой прокатывается до определенной толщины, затем вырубается прокладки заданной геометрической формы, которые закладываются под кристалл при сборке в кассету. Достоинством данного метода является то, что облуживание ножки и присоединение кристалла выполняется за один процесс. По второму методу сборка производится без прокладки. В этом случае на коллекторной стороне пластины гальванически осаждается слой припоя Sn-Bi. Применение этого метода упрощает процесс сборки, кроме того, имеется возможность наносить покрытия любой толщины. Однако требуются дополнительные операции по защите активной стороны пластины перед облуживанием.

При первом методе подачи припоя для пайки кристалла материалом для прокладок служил припой ПОС-40. Исследовались прокладки различной толщины – от 20 до 90 мкм. При каждом значении толщины напаивалось по 20 кристаллов. Качество их присоединения к ножке оценивалось по выходу годных приборов при замере мощности рассеивания после сборки приборов. Для монтажа использовались облуженные выводы с толщиной припоя 9-10 мкм. Выход годных приборов зависит от толщины прокладки припоя (рисунок): если она составляет 40 мкм, то выход – максимальный (85 %), при толщине

90 мкм он уменьшается до 50 %. Это объясняется тем, что более толстый слой припоя под кристаллом ухудшает теплопроводность прибора при работе.



Влияние толщины и методов подачи припоя на качество соединений кристалла с ножкой: 1 – гальваническое облуживание коллекторной стороны кристалла; 2 – использование припоя в виде прокладок

При нанесении припоя на коллекторную сторону пластины активная область должна быть защищена. Методом гальванического лужения наносилось покрытие из сплава Sn-Bi. Скорость осаждения составляла 0,75 мкм/мин при плотности тока 1 А/дм². Толщина гальванического покрытия изменялась от 10 до 60 мкм через 10 мкм. Для каждого значения толщины покрытия изготавливалось по одной пластине. После разрезки пластин на кристаллы последние проверялись по электрическим параметрам и внешнему виду. Качество присоединения, как и в первом случае, оценивалось по выходу годных приборов при замере мощности рассеивания (рис. 3.1). Выход годных приборов изменяется от 64 % при толщине припоя 20 мкм до 100 % при толщине 60 мкм. При толщине припоя 50-60 мкм наблюдается наиболее равномерное его растекание по поверхности кристалла и ножки.

Таким образом, оптимальным методом подачи припоя под кристалл является гальваническое облуживание коллекторной стороны кристалла.

Оловянное покрытие. Некоторые зарубежные компании (например, Molex) считают, что лучшей заменой сплаву Pb-Sn является покрытие контактов печатных плат чистым оловом. Известно, что олово обладает химической устойчивостью и инертностью, а также высокой способностью к пайке. В то же время следует отметить, что олово обладает и недостатками: при воздействии низкой температуры возможно превращение β -олова, кристаллизующегося в тетрагональной системе и имеющего плотность $7,29 \text{ г/см}^3$, в α -олово, имеющего кубическую решетку с плотностью $5,77 \text{ г/см}^3$. Данное превращение сопровождается изменением объема и переходом контактного металла в порошкообразное состояние, которое называют «оловянной чумой». Кроме того, при хранении деталей и изделий, покрытых оловом, способность к пайке существенно снижается, что вызывает определенные трудности при сборке изделий на поточных линиях. Особо важно отметить, что даже белая модификация олова после двухлетнего хранения на 60 % теряет прочность спая. Покрытия из чистого олова обладают склонностью к образованию на поверхности нитевидных кристаллов («усов»), что ограничивает их применение для сборки.

С целью устранения недостатков, присущих оловянным покрытиям, проводят электрохимическое легирование олова другими металлами (никель, висмут, цинк, кобальт, сурьма и др.). Эти сплавы лишены недостатков, которыми обладает чистое олово, а кроме того, имеют определенные преимущества: сохраняют паяемость, повышенную коррозионную стойкость и другие специальные свойства.

Олово и его сплавы осаждаются в виде блестящих электролитических покрытий только в том случае, если в раствор при электролизе вводят специальные поверхностно-активные или коллоидные добавки, называемые блескообразующими. Органические соединения, добавляемые в электролиты, повышают катодную поляризацию, сближают потенциалы осаждаемых металлов, улучшают мелкокристалличность покрытия, его паяемость, увеличивают

блеск и рассеивающую способность, повышают качество покрытия и стабильность работы электролита.

Никелевое покрытие. Покрытия корпусов ППИ никелем и его сплавами широко используются в электронной промышленности. Основным недостатком никелевых покрытий является низкая теплостойкость, поэтому они применимы только при низкотемпературном монтаже элементов или при пайке в защитной среде. Для повышения теплостойкости никелевые покрытия легируют тугоплавкими металлами Co, W, Mo, Re и V. Практическое применение нашли никелевые покрытия, легированные до 1 % V. Легирование никеля бором существенно повышает температурную стойкость сплава даже при малой концентрации бора, а микротвердость и хрупкость покрытия уменьшаются путем отжига.

Основной целью никелирования является защита основного металла от коррозии и повышение поверхностной твердости. Для покрытия корпусов приборов (в случае пайки кристаллов в защитной среде) используется химическое никелирование. Химические никелевые покрытия намного тверже электрохимических. Повышенная твердость покрытий во многом зависит от содержания фосфора в осажденных никелевых сплавах и режимов осаждения.

Химическое никелирование осуществляется на медные корпуса из следующего раствора, (г/л): никель двуххлористый (20), натрий фосфорноватистокислый (25), кислота аминорусная (15), натрий уксуснокислый (10). Время осаждения покрытия толщиной 4 мкм составляет 40-50 мин при температуре раствора 82 - 85 °С.

Свойства покрытий существенным образом зависят от подготовки медных корпусов к операции никелирования. Авторами исследованы покрытия, которые наносились на медные основания корпусов без полирования и с предварительным электрохимическим полированием поверхности. Анализ микроструктуры никелевых покрытий медных корпусов показал, что на полированной медной основе структура покрытий более мелкозернистая, чем на неполированной.

Для повышения блеска, снижения внутренних напряжений в никелевых покрытиях и интенсификации процесса никелирования используют специальный электролит. Электролит состоит, (г/л): сернокислый никель (150-250), сернокислый магний (20-60), сернокислый натрий (5-15), борная кислота (25-35), бензолсульфамид (0,1-0,8), 2,2'-дипиридил (0,005-0,01), триэтил- α -метил-нафтилам-монит хлорид (0,002-0,02). Электроосаждение ведут при 40-55 °С, плотности тока 1-20 А/дм² и рН 4,0-5,5.

Вводимый в состав электролита бензолсульфамид способствует снижению внутренних напряжений, переводя их из напряжений растяжения в напряжения сжатия. Кроме того, повышается рассеивающая способность электролита. Введение в состав электролита бензолсульфамида положительно сказывается на качестве и свойствах покрытий, которые становятся более плотными, блестящими и не отслаиваются от подложки при деформации. Повышение содержания бензолсульфамида более 0,8 г/л приводит к росту внутренних напряжений сжатия, а его снижение до 0,1 г/л вызывает хрупкость покрытий.

Сплав никель – олово. Гальванические покрытия паяемых поверхностей кристалла и основания корпуса при сборке должны обладать не только хорошей смачиваемостью, но и высокой коррозионной стойкостью. Этим требованиям в полной мере отвечают сплавы никеля с оловом (Ni-Sn).

При осаждении сплава Ni-Sn необходимо строго соблюдать условия электроосаждения: температуру электролиза, соотношение концентраций компонентов электролита, плотность тока.

Для осаждения сплава Ni-Sn существует несколько типов электролитов. Наиболее широкое применение в промышленности получили фторидхлоридные электролиты как наиболее стабильные в работе и позволяющие получать покрытия с относительно высокими защитно-декоративными свойствами. Широко используется электролит следующего состава, (г/л): хлористый никель (200), хлористое олово (40), фтористый аммоний (60), ОС-20 (5). Температура электролита составляет 50 °С, а в качестве анода используется сплав никель – олово (30-50 % Ni).

Для нанесения сплавов Ni-Sn рекомендуется использовать электролит следующего состава, (г/л): хлористый никель (250-300), хлористое олово (40-50), фтористый аммоний (40-80), хлористый аммоний (60-100), 2, 4, 6-три-(морфолинометил)-фенол (0,05-0,2). Особенностью данного электролита является следующее: введение 2, 4, 6-три-(морфолинометил)-фенол обеспечивает повышение блеска и коррозионной стойкости покрытий.

С целью снижения внутренних напряжений и повышения защитно-декоративных свойств покрытий Ni-Sn электролит дополнительно содержит полиэтиленполиамин и N-ацетонитрилморфолина гидрохлорид при следующем соотношении компонентов, (г/л): хлористый никель (200-300), хлористое олово (40-50), фтористый аммоний (30-60), фтористый натрий (20-30), полиэтиленполиамид (2-30 мл/л), N-ацетонитрилморфолина гидрохлорид (0,03-0,15).

Исследования микроструктуры и химического состава поверхности покрытий из сплава 35Ni/65Sn, полученных из электролитов с добавкой ОС-20, показали следующие результаты: при температуре 50 °С получают крупнокристаллические покрытия, в которых массовая доля олова составляет 99,8 %. Отжиг покрытий в вакууме, соответствующий режимам пайки кристаллов к основаниям корпусов, приводит к увеличению массовой доли никеля в поверхностном слое до 8 %. Покрытия после отжига получают более плотными с включениями неправильной формы.

Объясняется это тем, что при температуре пайки электролитический сплав Ni-Sn переходит в интерметаллические соединения Ni_3Sn_2 и Ni_3Sn_4 , что способствует обогащению поверхностного слоя никелем. Кроме того, повышенное содержание никеля в поверхностном слое данного покрытия, очевидно, обусловлено различной сублимацией компонентов сплава, которая в большей степени присуща Sn.

Иммерсионное осаждение металлов. Иммерсионные процессы – это контактное восстановление металлов из их растворов на электроотрицательных поверхностях. При этом процессе происходит реакция замещения металла - основы на металлы из раствора. Для этого процесса достаточно погрузить

деталь в раствор из менее отрицательного металла и начнется процесс иммерсионного осаждения. Процесс прекращается после образования плотной пленки, так как прекращается контактный обмен. Этим методом получают тонкие покрытия (десятые доли микрометра). Несмотря на достаточно маленькую толщину, покрытия бывают сплошными, поскольку контактный процесс восстановления продолжается до тех пор, пока поверхность основы не закроется полностью.

В настоящее время в связи с переходом на бессвинцовую технологию многие производители стали применять чистое олово для покрытия выводов и контактных поверхностей компонентов. Иммерсионное олово (ImmSn) – технологическое покрытие, совместимое со всеми способами пайки, удовлетворяющее требованию RoSH и обеспечивающее высокую плоскостность контактных площадок платы.

Иммерсионное олово осаждается химическим способом на медную поверхность печатного рисунка путем реакции замещения.

Следует иметь в виду, что олово может существовать в двух модификациях: первая - обыкновенное серебристо белое олово, ковкий металл, который может вырастать и в виде больших монокристаллов. Белое олово образуется при температуре, превышающей $+13,2^{\circ}\text{C}$. Если температура опускается ниже 13°C , то атомы олова могут перестроиться и образовать кристаллы другой разновидности – хрупкого неметаллического серого олова.

Серьезным недостатком Sn является рост нитевидных кристаллов «усов».

«Оловянная чума» в контактах ППИ – явление достаточно редкое. Если применяются покрытия из совершенно чистого Sn, то после пайки они растворяются в припойном сплаве. При наличии примеси Sn уже не подвержено «оловянной чуме». Именно по этой причине спаянные оловом контакты не разрушаются.

Абсолютно чистое олово в покрытиях выводов компонентов, как правило, не применяется. Если добавит к олову, немного висмута, то можно предотвратить «оловянную чуму».

Иммерсионное олово широко используется при осаждении на поверхность отверстий печатных плат. Для этих целей между медью – основой и иммерсионным оловом вводят барьер из органического металла. Органический металл – чисто органическое соединение, не содержащее металлических добавок, проводит электрический ток, имеет потенциал «благородного металла» (серебро), обладает каталитическими свойствами, может быть окислено и восстановлено без вида изменений, полностью не растворима.

МЕДНАЯ МЕТАЛЛИЗАЦИЯ В КРЕМНИЕВЫХ СБИС

С развитием полупроводниковой технологии и уменьшением размеров элементов большое внимание уделяется проблеме задержки сигналов в соединительных линиях. В связи с этим, возникла необходимость замены алюминиевой металлизации на медную в производстве современных ИС, в первую очередь микропроцессоров с элементами субмикронных размеров. По сравнению с алюминием удельное сопротивление меди $1,7 \text{ мкОм}\cdot\text{см}$ даже при осаждении в узкие канавки ($2,8 \text{ мкОм}\cdot\text{см}$ у алюминия). Кроме того, медь обладает высокой устойчивостью к электромиграции по сравнению с алюминием.

Корпуса большинства полупроводниковых изделий изготавливают из холоднокатаной листовой меди. На поверхности таких листов присутствует наклепанный слой. Предел прочности меди разных марок составляет $220 - 260 \text{ МПа}$, предел текучести $40 - 60 \text{ МПа}$, относительное удлинение $46 - 40 \%$. В результате холодной пластической деформации медь наклепывается, и при достижении высокой степени деформации предел прочности достигает $400 - 450 \text{ МПа}$ при одновременном падении относительного удлинения до $2 - 4 \%$. Холодная пластическая деформация повышает электрическое сопротивление меди максимум на $3 - 5 \%$. В деформированной меди возникает текстура деформации. Из-за текстуры холоднокатаные листы меди обладают анизотропными механическими свойствами. Холодной обработкой с суммарной степенью деформации $40 - 70 \%$ можно практически вдвое повысить прочностные характеристики меди. Кроме того, дополнительное упрочнение происходит при штамповке корпусов из листового материала.

В процессе отжига в деформированной меди, как и в других металлах, происходит рекристаллизация. Рекристаллизация сильно деформированной технической меди начинается при $200 - 230 \text{ }^\circ\text{C}$, что соответствует $(0,18 - 0,21)$. В результате рекристаллизации волокнистая структура

сменяется полиэдрической с большим количеством двойников отжига. Разупрочнение меди начинается уже при температуре выше 150 °С. Оптимальные температуры рекристаллизационного отжига 500 – 600 °С. При более высоких температурах относительное удлинение меди сильно уменьшается из-за роста зерна и образования текстуры рекристаллизации. Текстура рекристаллизации приводит к анизотропии свойств отожженного листа. Степень анизотропии увеличивается с повышением температуры отжига.

Особенности формирования металлизации. Основные принципы создания схем с медной металлизацией представлены фирмами IBM, Motorola и Texas Instruments на декабрьской международной конференции по электронным приборам (IEDM) в 1997 г. Была представлена технология изготовления «медных схем» следующим образом. Первый уровень металлизации для формирования контактов к областям истока, стока и затвора – вольфрамовый. Этот барьерный металл предназначен для защиты активных областей прибора от диффузии меди, а также для улучшения адгезии меди к пластине. Часть вольфрамовых токопроводящих дорожек может быть очень малой длины. Остальная металлизация, в том числе и покрытия сквозных отверстий, - медная.

По данным исследовательской фирмы The Information Net work, в 2009 г. ускорился переход к использованию медных межсоединений в схемах памяти. Так, если общий объем продаж полупроводникового оборудования сократился более чем на 40 %, то тот же показатель для оборудования, непосредственно связанного с формированием медных межсоединений в процессе производства ППИ, - только на 8,7 %.

Массовое производство ДОЗУ с медной металлизацией вместо алюминиевой первой начала осуществлять корпорация Micron Technology уже в конце 2006 г. Через год эту технологию стала применять Elpida. Затем все основные изготовители ИС ЗУ во главе с корпорацией Samsung Electronics затратили значительные суммы для модернизации своих заводов по обработке пластин под «медные» процессы.

Переход от алюминиевой металлизации к медной достаточно сложный. При минимизации топологических элементов при увеличении объема меди в структуре требуется более тонкий слой барьерного металла и поддержание эффективного удельного сопротивления.

Анализ свойств ДБС в системе многослойной медной металлизации.

Основной проблемой перехода к медным межсоединениям в условиях миниатюризации полупроводниковых изделий, в частности, СБИС с элементами субмикронных размеров, является большая диффузионная подвижность Cu в различных материалах. Это вынуждает окружать медные межсоединения со всех сторон диффузионно-барьерным слоем (ДБС).

Для металлизации с проводящим слоем на основе меди известны ДБС на основе TiN, Ti-Si-N, TaN, Ta-Si-Ni, TiW, W₂N и др. Свойства ДБС для металлизации на основе меди приведены в таблице.

Выбор ДБС должен основываться на физико-химических представлениях о процессах, происходящих в гетерогенной системе, а именно: компоненты, входящие в состав ДБС, должны обладать как можно более высокой теплотой сублимации или низким давлением собственных паров; материал ДБС должен обладать более отрицательной теплотой образования. В качестве основы барьерного материала выбирают сплав Ta-W с добавлением в него азота, так как W и Ta образуют нитриды W₂N и TaN с теплотами образования – 5,7 и – 29,5 ккал/(г·ат) соответственно. Исследование пленок сплава Ta-W-N показали перспективность для использования его в системе металлизации СБИС субмикронного уровня. Пленки данного сплава имеют следующие свойства: достаточно низкое удельное сопротивление (260 мкОм·см); не имеют границ зерен; не взаимодействуют с медью; не только не пропускают через себя медь, но и выталкивают ее из объема на поверхность; сохраняют аморфное состояние в структуре Cu /W-Ta-Ni/Si до 700 °С.

Сравнительные свойства барьерных материалов для металлизации
на основе меди

Материал ДБС	Температурная стабильность $T_{\text{стаб}}$, °С	Удельное сопротивление ρ_v , мкОм·см
TaN (PVD)	700	~580
TaN (PVD)	600	~450
TaN (CVD)	550	~900
TaC (PVD)	600	210
TiN (PECVD)	500	200
Ti-Si-N (PVD)	600/650	215/590
W ₂ N (PVD)	600	~205

Примечание: в скобках указаны способы формирования ДБС.

При использовании медных токоведущих слоев (ТВС) наличие ДБС требуется не только в области контактного окна, но и на маскирующем SiO₂, поскольку медь быстро диффундирует через него даже при низких температурах.

В связи с вышеизложенным, технологам по сборке СБИС с медной металлизацией необходимо в первую очередь обратить внимание на систему Cu/W-Ta-Ni/Si. Для этого нужно провести анализ качества микросоединений алюминиевой, медной и золотой проволок с медной металлизацией, сформированных различными способами монтажа: ультразвуковая сварка (УЗС), сварка давлением с косвенным импульсным нагревом (СКИН); ультразвуковая сварка с косвенным импульсным нагревом (УЗССКИН); односторонняя контактная сварка; термокомпрессионная сварка (ТКС); сварка расщепленным электродом и пайка.

Стабильность структуры Cu/W-Ta-Ni/Si при температурах до 700 °С, структуры Cu/Ta-W-N/TiSi₂/Si до 800 °С, целесообразно апробировать на операции присоединения внутренних соединений в приборах на основе SiC. Известно, что приборы на основе SiC могут работать при температурах до 700 °С.

Известно, что SiC обладает высокими электрической и механической прочностью, температурной, химической и радиационной стойкостью. SiC рассматривается как перспективный материал для создания приборов для космической электроники, а также учета и контроля отработанного ядерного топлива и ядерных материалов.

Гальваническое меднение. В технологии изготовления печатных плат (ПП) процессы гальванической металлизации определяют их электрические параметры. Гальванический метод нанесения металлических покрытий является самым распространенным в технологии создания токопроводящих элементов схемы (медь) и защитных резистов. Гальванический слой меди определяет надежность ПП, на него в последствии осаждается металлический резист, поэтому от качества осажденной меди зависят защитные свойства резиста.

Металлизация отверстий на ПП должна выполняться медью и удовлетворять следующим требованиям: наличию сплошной металлизации; одинаковой толщине покрытия в отверстиях и на поверхности фольги; мелкозернистой структуре покрытия; отсутствию утолщений, включений; отсутствию избыточного нарастания металла на входе отверстия или на внешнем крае контактной площадки; отсутствию трещин в покрытии; минимальной толщине меди в отверстиях (20 - 25 мкм).

Актуальными вопросами в области электрохимического осаждения являются интенсификация процесса и получение осадков с наименьшими внутренними напряжениями, которые могут приводить к ухудшению адгезии металлопокрытия к основе, а иногда к его отслаиванию.

В задачу оптимизации режимов осаждения входят следующие технологии: получение осадков меди с наименьшими внутренними напряжениями при скорости осаждения не ниже 10 мкм/мин и заданном качестве покрытия. Использование реверсивного тока значительно увеличивает рабочую плотность тока и тем самым интенсифицирует процесс гальваноосаждения.

С целью получения более мелкокристаллического осадка и увеличения скорости осаждения в электролиты меднения вводят различные органические добавки. Применение этих добавок позволяет получить уменьшение зерна осадка (с 5 - 12 до 2 - 3 мкм) при одновременном увеличении его пластичности и уменьшении внутренних напряжений даже при толстослойном меднении.

Пластичность медных осадков при металлизации отверстий должна соотноситься с температурным расширением основания печатной пластины по оси z. Чтобы предотвратить расширение основания и гарантировать заданную прочность и пластичность медных осадков необходимо обеспечить соответствующую теплопроводность металлизации за счет увеличения ее толщины.

При пайке ППИ с медной металлизацией при контактировании меди и олова в зоне контакта образуются интерметаллические фазы. Данный процесс происходит как в жидком состоянии олова (при пайке), так и в твердом состоянии (при эксплуатации ППИ). В твердом состоянии состава медь-олово процесс протекает достаточно медленно, так как диффузия атомов металлов через кристаллическую структуру невысокая. Если же олово или сплав олова находятся в жидком состоянии, то образование и рост фаз происходят очень быстро. Естественно повышение температуры ведет к значительному увеличению скорости реакции.

Установлено, что скорость растворения меди зависит от температуры и времени пайки, а так же от сплава припоя. Известны микролегированные припои, которые сокращают скорость расплавления. К ним относятся бессвинцовые сплавы на основе Sn-Cu или Sn-Ag-Cu с различным содержанием меди и серебра, стабилизированных кобальтом. Статические и динамические испытания растворения медной металлизации при контакте со сплавом Sn95,5/Ag3,8/Cu0,7 при температуре пайки 320 °C, показали следующие результаты. Медный слой толщиной 30 мкм при контакте с вышеуказанным сплавом полностью растворился через 12 с. При использовании микролегированного бессвинцового припоя Flowtin TC на основе SnCu0,7 при той же

температуре пайке остаточная толщина слоя меди составила 10 мкм через 12 с., что достаточно для изготовления работоспособного паяного соединения.

Основным недостатком меди по сравнению с алюминием является низкая радиационная стойкость металлизации, контактных соединений и, в целом, ППИ. На вопросы применения меди или алюминия в радиационно-стойких ППИ в настоящее время, по нашему мнению, нет ответов. С этой целью необходимо проведение целого комплекса сравнительных исследований.

ПРИПОИ, В ТОМ ЧИСЛЕ БЕССВИНЦОВЫЕ

Директива Европейского Союза RoHS (Restriction of Hazardous Substances) ограничивает использование шести экологически опасных материалов, в том числе и свинца, в новом электрическом и электронном оборудовании после 1 июля 2006 года. Свинец (Pb) – один из опаснейших материалов, использование которых регулируется RoHS. Свинец представляет собой яд, накапливающийся на протяжении многих лет в тканях организма. Согласно данным австралийских служб по охране здоровья рабочих, 30 % попадающего на человека свинца адсорбируется кожными покровами, а 70 % оседает в легких. Внешними симптомами отравления являются головные боли и боли в суставах, однако оно вызывает и скрытые, более серьезные последствия в виде поражений почек и нервной системы, бесплодия и врожденных пороков.

Специалисты в области силовой электроники утверждают, что двумя самыми важными технологиями сверх автоматизированного XXI века будут компьютеры – «разум» и силовая электроника – «мускулы». Силовая электроника в последние годы интенсивно развивается. СПП в составе модулей обеспечивают коммутацию токов свыше 1000 А и напряжений до 5,5 кВ, при этом размеры чипов достигают размеров 16×16 мм. Быстрое и динамичное развитие силовой электроники в мире стало возможным благодаря прогрессу базы ее основных компонентов – СПП.

Анализ существующих бессвинцовых припоев. Анализ бессвинцовых припоев показал, что в их состав входят следующие металлы: Bi, In, Co, Cu, Au, Ni, Sn, Ag, Sb и Zn. В качестве флюсующих добавок в состав припоев иногда вводят Р. Для разработки новых припоев необходимо учитывать свойства металлов, входящих в их состав (табл. 5.1).

Физико-механические свойства металлов, входящих в состав
бессвинцовых припоев

№ п/п	Металл	Темпе- ратура плавления, °С	Коэффициент теплопровод- ности λ , Вт/м·К	Температурный коэффициент линейного рас- ширения, $\alpha \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	Удельное электрическое сопротивление, $\rho \times 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}$
1	Висмут	271,3	8,37	1,66	109 (при 0 °С)
2	Индий	156,2	88	3,3	8,2
3	Кобальт	1492	69,08	1,2	5,68
4	Медь	1083	395... 402	1,66	1,78
5	Золото	1063	310	1,4	2,42
6	Никель	1453	92	1,4	7,5
7	Олово	231,9	65,8	2,3	11,5
8	Серебро	960,8	418	1,9	1,66
9	Сурьма*	630,5	17,6	0,98	39,0
10	Цинк	419,5	110,9	3,97	5,9

*Sb иногда относят к полуметаллам

Краткий перечень свойств каждого из этих металлов:

Sn – относительно низкая температура плавления, многолетний опыт использования в качестве основного компонента припоя;

Cu – отличные перспективы поставки, растворяется в олове, в малых концентрациях не проявляет отрицательных свойств;

Ag – при содержании в малых концентрациях его высокая стоимость не препятствует широкому использованию припоя;

Sb – высокотоксична и не рассматривается как основной металл в сплавах (европейские ученые считают этот материал канцерогенным). Токсичность Sb не имеет однозначного трактования. Известно, что соли, оксиды и

металлоорганические соединения сурьмы, что присуще большинству элементов, являются наиболее токсичными формами элемента. Однако трехокись сурьмы не формируется при температуре ниже 630,5 °С.

Sb может повышать хрупкость паяного соединения при низких температурах, в то же время она улучшает сопротивление сплава термической усталости. По некоторым источникам информации наличие менее 1 % Sb не ухудшает паяемость и незначительно изменяет температуру плавления припоев.

Ag и Cu используются в бессвинцовых сплавах в малых количествах (в Европе уровень опасности этих материалов считается низким).

Cu и Zn – основные элементы, которые используются для приготовления припоев.

Bi – безвредный металл, применяемый в медицине. Однако сплавы с Bi теряют прочность из-за температурной усталости.

Для пайки различных изделий применяется большое количество известных припоев, в качестве которых используются как чистые металлы, так и сплавы, состоящие из двух, трех и более компонентов.

Разработка новых составов припоев определяется условиями эксплуатации конкретных ПШИ.

В табл. 5.2 приведены некоторые свойства металлов, введение которых позволяет во многих случаях обеспечить специальные свойства припоев.

Следует отметить одну особенность припоев, содержащих висмут. Эти сплавы не могут применяться в процессах, где присутствует свинец (покрытия платы или выводов компонентов).

При использовании технологии пайки бессвинцовыми припоями необходимо особое внимание уделять вопросу попадания свинца из паяемых покрытий в бессвинцовые припой. Установлено, что попадание свинца в бессвинцовые припой приводит к снижению их надежности. Если предприятие переходит на использование бессвинцовых припоев, то необходимо применять и бессвинцовые покрытия компонентов и печатных плат.

Таблица 5.2

Металлы и их свойства

Свойство	Металл, обладающий данным свойством
Особая легкоплавкость	In
Хорошая смачиваемость, в т.ч. неметаллов	In, Ti
Расширение при затвердевании	Bi
Высокая упругость испарения при давлении 100 кПа и низком вакууме	Bi, Sb, Zn
Особая пластичность	Au, Ag, Sn, Zn
Высокая теплопроводность	Au, Ag, Cu, Al

Как нами установлено из анализа литературных источников, только два бессвинцовых сплава достаточно исследованы с точки зрения их использования на операции пайки кристаллов в изделиях микроэлектроники.

Сплав – номинальный состав припоя, получивший название CASTIN, – 96,2Sn/2,5Ag/0,8Cu/0,5Sb, имеющий температуру плавления 215 – 217 °С. Сплав Sn/Ag/Cu в припое CASTIN легирован сурьмой, что заметно улучшает его свойства, а именно, в нем не растут кристаллы интерметаллических соединений при температуре до 125 °С. Известно, что в соответствии с требованиями военных стандартов Sb добавляется в количестве 0,2 – 0,5 % в оловянно-свинцовые припои для улучшения их стойкости при термоциклировании.

Термические и электрические свойства сплава CASTIN: коэффициент температуропроводности 35,82 мм²/с; удельная теплоемкость 218,99 Дж/(кг·К); коэффициент теплопроводности 57,26 Вт/(м·К); коэффициент электропроводности 1,21·10⁻⁷ Ом·м.

Показано, что сплав CASTIN является перспективным для замены оловянно-свинцовых припоев и может применяться для конвекционной пайки, пайки волной, ручным паяльником, для лужения выводов компонентов и проводников печатных плат.

У сплавов Sn/Ag более высокая смачиваемость по сравнению с Sn/Pb. Эвтектический сплав 96,5Sn/3,5Ag с температурой плавления 221 °С при

испытаниях на термоциклирование показал более высокую надежность по сравнению с Sn/Pb. Данный припой многие годы успешно применяется в специальной аппаратуре.

В процессе исследований по замене оловянно-свинцового припоя на сборочных операциях ПШИ рассматривались многие варианты. Оценка вариантов бессвинцовой технологии сборки по сравнению с оловянно-свинцовым сплавом проводилась по следующим критериям: способность к пайке, надежность паяных соединений, чувствительность к образованию нитевидных кристаллов, совместимость процессов пайки без свинца и пайки Sn-Pb припоем, переходное сопротивление контактов, коррозионное истирание, коэффициент трения, технология покрытия (гальванического или окунанием), стоимость отходов, затраты.

Следует отметить, что из множества бессвинцовых припоев, рекомендованных для сборки ПШИ, нет данных об использовании их в реальных технологиях сборки ПШИ. Кроме того, отсутствуют сведения о технологических свойствах припоев (смачиваемости и растекании по паяемым поверхностям кристалла и основания корпуса).

Разработка новых составов бессвинцовых припоев. Уже к концу 2001 г. выдано более ста патентов на сплавы различных составов для замены свинцовых припоев. Эти сплавы отличаются как по температуре плавления, так и по смачиваемости, прочности, стоимости. Каждый припой обладает уникальным сочетанием свойств, что затрудняет окончательный выбор.

Основной критерий при выборе припоя – это температура плавления. По данному параметру все припои разделяются на 4 группы: низкотемпературные ($T_{пл} < 180\text{ °C}$), с температурой плавления эвтектики 63Sn/37Pb (183 °C); со средней температурой плавления (200 – 230 °C) и высокотемпературные (230 – 350 °C).

Директива ROHS ограничивает применение опасных материалов в концентрациях, превышающих допустимые пределы, в том числе Pb не более 0,01

%. Эти ограничения установлены не от веса изделия, узла или компонента, а от каждого отдельного гомогенного материала.

Существующая реальность на рынке импортных электронных компонентов и активная деятельность изготовителей компонентов по переходу на бессвинцовые технологии заставят предприятия-производители ППИ принимать срочные меры по внедрению в производство данных технологий.

Анализ бессвинцовых припоев показал, что они, в основном, представляют собой двухкомпонентные сплавы. Для улучшения свойств припоев и получаемых с их помощью паяных соединений в эти сплавы вводят те или другие металлы. Поэтому для разработки новых составов бессвинцовых припоев представляет интерес рассмотрение диаграмм состояний двойных металлических систем.

Сплав олово-цинк представляет систему эвтектического типа без образования промежуточных фаз (рис. 5.1). Эвтектика образуется при температуре 198,5 °С и концентрации 85,1 % (ат.) Sn.

Растворимость Zn в Sn составляет

Температура, °С	25	156	199
Растворимость Zn, % (ат.)	0,36	>1,1	0,582

Эвтектический сплав, вес. % 58Bi/42Sn, имеет температуру плавления 139 °С (рис. 5.2). Растворимость Bi в Sn (вес. %) имеет следующие значения: 15,8; 11,6; 8,2; 5,25; 2,7 и 1,0 соответственно при 120; 100; 80; 60; 40 и 20 °С. Предполагается, что растворимость Sn в Bi при эвтектической температуре имеет 1,0 вес. %.

Согласно микроскопическим исследованиям растворимость Sb в Sn уменьшается от 10,5 вес.% при 246 °С до 7,9 вес. % при 225 °С и до 4,0 вес. % при 190 °С. При несколько более низкой температуре растворимость уменьшается до 2,2 – 2,8 вес. %.

Растворимость Sn в Sb в твердом состоянии оценивается величиной порядка 9,8 вес. % (рис. 5.3).

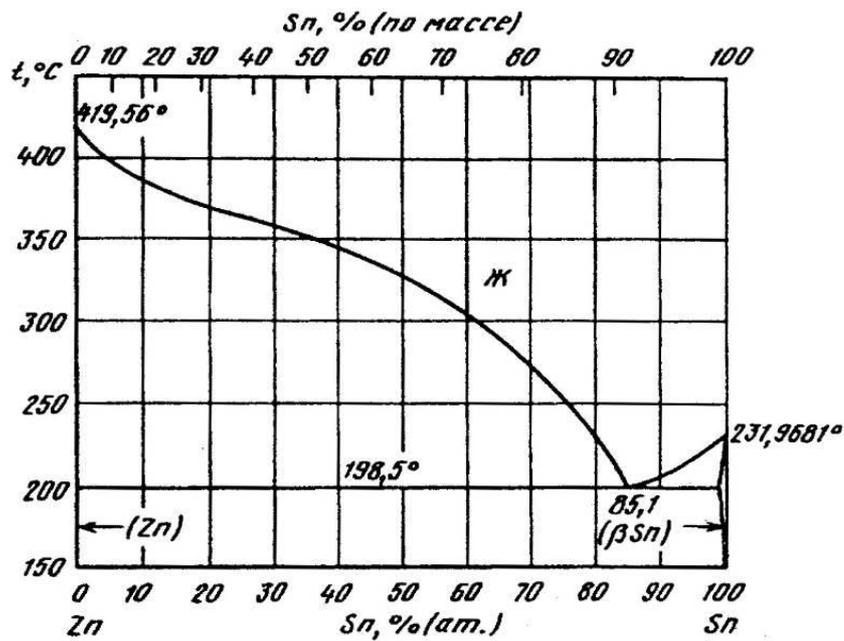


Рис. 5.1. Диаграмма состояния сплавов системы олово-цинк

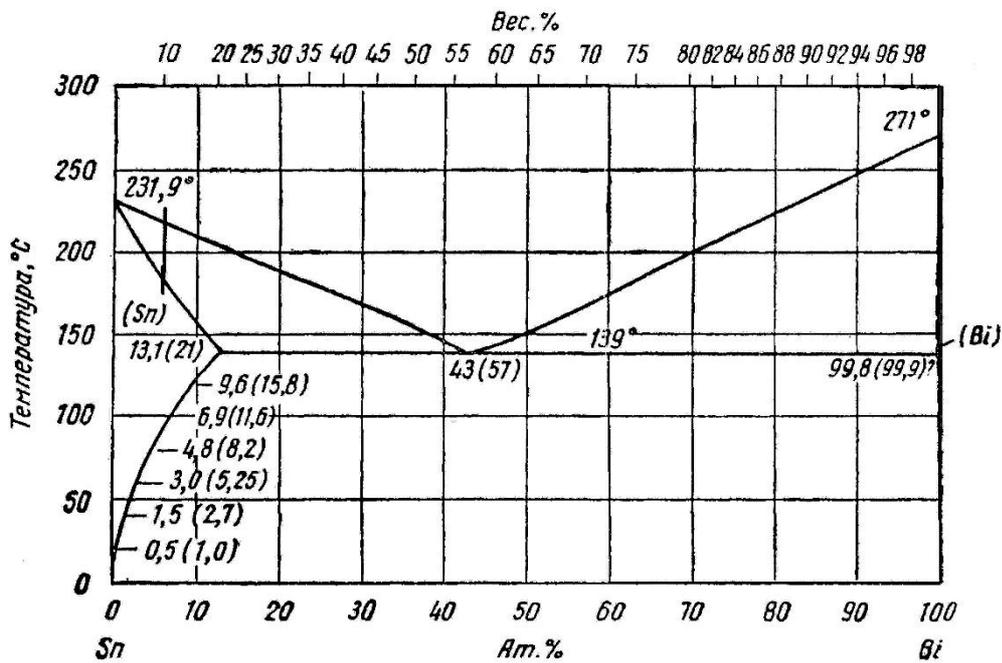


Рис. 5.2. Диаграмма состояния сплавов системы олово-висмут

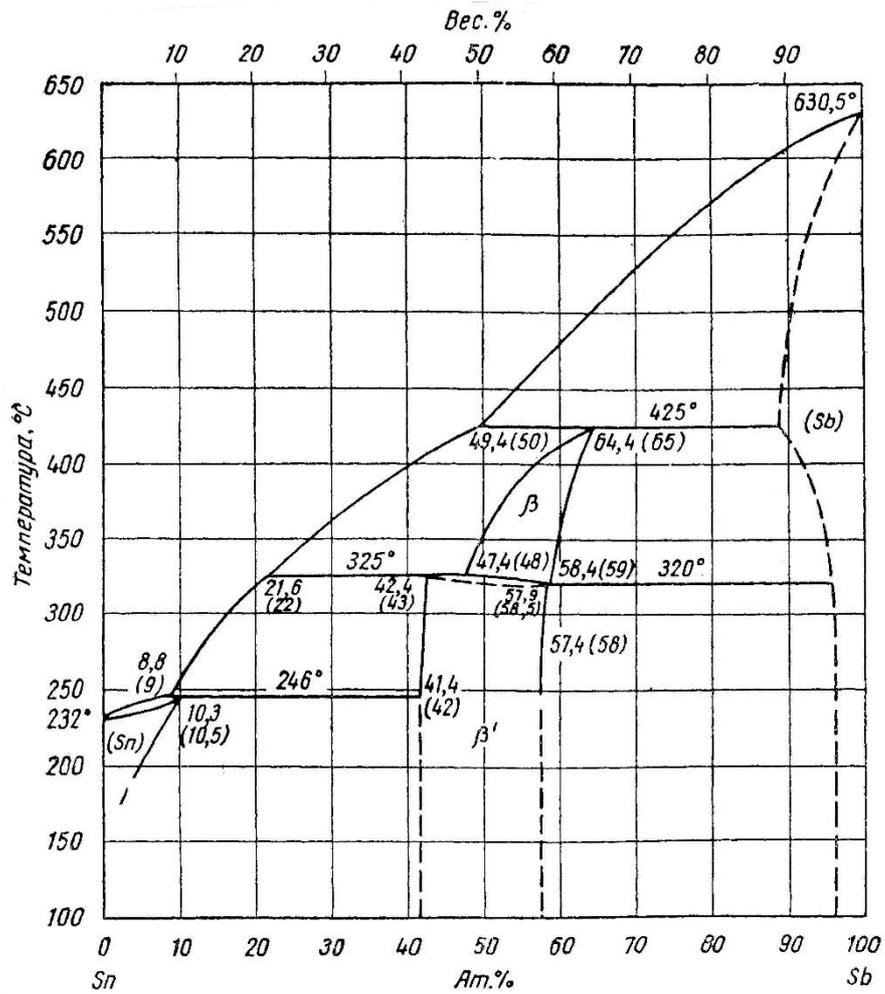


Рис. 5.3. Диаграмма состояния сплавов системы олово-сурьма

Как видно из диаграммы, Bi и Sb обладают взаимной растворимостью (рис. 5.4).

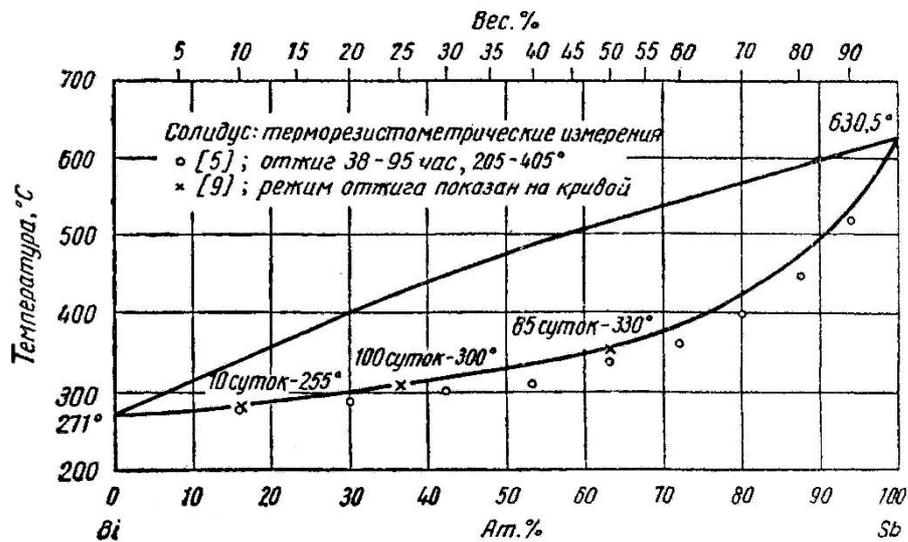


Рис. 5.4. Диаграмма состояния сплавов системы висмут-сурьма

На основе анализа диаграмм состояний двойных систем Al-Zn, Sn-Zn, Sn-Bi, Sn-Sb, Bi-Sb применительно к пайке кремниевых кристаллов к основаниям корпусов были разработаны и изготовлены три типа бессвинцовых припоев следующих составов (вес. %): 93Sn/2Ag/5Bi; 88Sn/10Bi/2Sb; 89Sn/5Bi/1Sb/5Zn.

По нашим сведениям, припой с таким сочетанием компонентов в промышленности в настоящее время не используются. Данные припои относятся к припоям со средней температурой плавления (200 – 240 °C), что позволяет использовать их при пайке кристаллов СПП.

В качестве основного компонента выбранных припоев используется Sn ввиду его высокой пластичности. Sn в составе различных припоев широко используется в производстве, в том числе при изготовлении изделий микроэлектроники.

Ag – обладает самым высоким коэффициентом теплопроводности по сравнению со всеми металлами, которые могут входить в состав различных припоев. В малых концентрациях Ag несущественно повышает себестоимость приборов.

Bi – безвредный металл. Кроме того, Bi и Sb обладают взаимной растворимостью, что способствует повышению качества припоев, в состав которых входят данные материалы.

Sb улучшает сопротивление сплава термической усталости. Наличие в сплаве около 1 % Sb не ухудшает паяемость и незначительно изменяет температуру плавления припоев. В небольшой концентрации Sb улучшает стойкость припоев при термоциклировании.

Основным положительным свойством Zn является его особая пластичность и образование низкотемпературной эвтектики с Sn.

Так как данные припои были изготовлены в лабораторных условиях, они подвергались рентгеноспектральному микроанализу на предмет соответствия заданным составам (по навескам компонентов и реальным, полученным после расплавления).

Для сравнения с разработанными новыми припоями проведен микроанализ припоя 95,5Sn/3,8Ag/0,7Cu, который изготавливается серийно на специализированном предприятии с соблюдением всех требований к металлургическим процессам. Данный припой, как утверждается в отечественной и зарубежной литературе, обладает хорошими паяемыми характеристиками и обеспечивает высокое качество паяных соединений в производстве изделий микроэлектроники.

Проведение рентгеноспектрального микроанализа необходимо с целью подтверждения процентного содержания исходных металлов и их чистоты. Известно, что примеси, входящие в состав исходных металлов, существенно влияют не только на смачивание и растекание припоя по паяемым поверхностям, но и на качество сформированных паяных соединений.

Рентгеноспектральный микроанализ разработанных и изготовленных бессвинцовых припоев показал, что количественный состав элементов, входящих в данные припои, незначительно изменился. Составы припоев по результатам микроанализа имеют следующие соотношения элементов (вес. %): 93,3Sn/1,4Ag/5,3Bi; 88,6Sn/10,4Bi/1,0Sb; 89,0Sn/5,3Bi/0,2Sb/5,5Zn.

Точность определения исходных элементов, входящих в состав разработанных припоев, составляет $\pm 0,4$ вес.%. Это заключение основано на результате микроанализа серийно изготавливаемого припоя состава (вес. %) 95,5Sn/3,8Ag/0,7Cu.

Бессвинцовые припои в технологии производства ППИ. В качестве бессвинцовых припоев рассматриваются сплавы на основе олова с добавлением в него Ag, Cu, Bi, Zn и других металлов. С точки зрения надежности считаются оптимальными сплавы Sn-Ag и Sn-Ag-Cu (95-96,6Sn/2,5-4,1Ag/0,9Cu). Эти припои рекомендуются многими исследователями для первоочередного изучения и внедрения. Основной их недостаток при пайке элементов на печатные платы – сравнительно высокая температура плавления около 220 °С, негативно влияющая на сами ППИ и на плату. Снизить температуру плавления этих припоев можно, добавляя в них Bi, Zn и другие металлы.

Рассматриваются варианты введения в составы Sn-Bi или Sn-Zn элементов, улучшающих технологические свойства данных припоев.

Хорошие результаты показал сплав 95,5Sn/4Ag/0,5Cu: высокая температура плавления (217 °C) делает его идеальным для пайки изделий, работающих при температуре ≤ 175 °C; при некоторых испытаниях он показал лучшую стойкость к переменным температурам, чем Sn-Ag припой.

Для пайки без свинца могут использоваться сплавы олова с медью, серебром, висмутом, индием, цинком. Сплав олова с висмутом с малым содержанием олова не намного дороже свинцового сплава, однако имеет низкую температуру плавления (138 °C).

Известен сплав для соединения элементов ППИ с получением повышенной стойкости к термической усталости: 81-92Sn/3-6Ag/0,1-2Cu.

Удовлетворительные результаты получены при использовании покрытий из Sn-Bi, Sn-Cu, Sn-Ag, Sn и Sn-Zn. Контактные шарики из Sn-Ag-Cu – сплава обеспечивают повышенную циклическую прочность по сравнению с Sn-Pb припоями. При сборке кристаллов больших размеров значительная разница в термических коэффициентах расширения между Si, медной рамкой и пластмассовым наполнителем приводит к появлению значительных напряжений и к разрушению пластмассы. Образование трещин по поверхности контакта между соединением и заливочной массой вызывается влажностью.

В качестве припоев рекомендуется использовать трех- и четырехкомпонентные сплавы: 55-60Ag/25-30Cu/20-26Zn; 44-48Ag/32-36Cu/18-22Sn; 15-20Ag/28-32Cu/51-54Cd; 40-45Ag/12-15Cu/29-33Cd/9-11Zn; 63-68Ag/12-16Cu/11-15Sn/6-9Zn. Однако из-за высокой температуры плавления данные припои на сборочных операциях ППИ, по всей видимости, не найдут широкого применения.

Высокими механическими свойствами обладает припой: 2-4Ag/0,5-2Zn/2-3Bi/Sn-остальное.

Для пайки ИС предложен Sn-Ag припой: 3-4Ag/2-6Bi/2-6In/Sn-остальное.

Для массового производства ППИ отдается предпочтение Sn-Ag-Cu-припоям, например, сплаву 95,5Sn/3,8Ag/0,7Cu с температурой плавления 217 °С. По своей надежности паяные соединения, выполненные этим припоем, не уступают свинцовистому припою 62Sn/36Pb/2Ag.

Припои, не содержащие свинец, представляют собой эвтектические сплавы типа олово – висмут, олово – индий, висмут – индий и др.

Ниже приведены (по данным отечественной научно-технической информации) составы и температуры плавления бессвинцовых припоев, которые могут быть использованы при пайке полупроводниковых кристаллов к основаниям корпусов и внутренних выводов к контактными площадкам кристалла и корпуса.

Индиевые припои. Эти припои обладают стойкостью к окислению, электро- и теплопроводны. В электронной технике применяются при пайке вакуумных соединений, стеклянных и кварцевых изделий (табл. 5.3).

Благодаря высокой пластичности индиевых припоев и хорошей смачивающей способности их металлов и неметаллических материалов они могут использоваться при пайке материалов с различными коэффициентами линейного расширения.

Таблица 5.3

Состав и температура плавления индиевых припоев

Состав припоя, %	Температура плавления, °С	Назначение
99In/1Cu	153	
97In/3Zn	143	
95In/5Al	151	
66In/34Bi	72	Пайка полупроводниковых материалов
52In/48Sn	120	Пайка стекла без флюса методом натирания
52,2In/46Sn/1,8Zn	108	
97In/3Ag	141	

Висмутовые припои. Припои на основе висмута недостаточно пластичны, имеют малую прочность и склонны к трещинообразованию. Висмутовые припои находят широкое применение (из-за низкой температуры плавления) при пайке автоматически действующих противопожарных установок и плавких предохранителей. Пайка этими припоями осуществляется с применением специальных флюсов. В некоторых случаях паяемые поверхности перед пайкой подвергаются лужению (табл. 5.4).

Таблица 5.4

Состав и температура плавления висмутовых припоев

Состав припоя, %	Температура плавления, °С
58Bi/25Sn/17In	79
58Bi/17Sn/25In	79
57Bi/43Sn	139
60Bi/40Sn	150
70Bi/30Sn	175
80Bi/20Sn	200
90Bi/10Sn	240

Припои на цинковой основе. Сплавы системы цинк – олово имеют высокую прочность и пластичность только при содержании более 30 % Sn. Припои на основе цинка характеризуются низкой пластичностью и прочностью, плохой растекаемостью и затеканием в зазор. Пластичность припоев можно повысить введением в них серебра (1 - 5 %) и меди (2 - 3 %), растекаемость – введением кадмия и олова. Цинковые припои в основном применяются для пайки алюминия и его сплавов.

Припои на основе олова. Данные припои уже широко применяют при пайке радиотехнической и электронной аппаратуры, работающей в различных климатических условиях. Двойные оловянно-цинковые припои находят широкое применение для низкотемпературной пайки изделий из алюминиевых и

магниевого сплава. Присадка цинка до 7 % в олово снижает температуру плавления сплава до 199 °С. Добавки кадмия снижают температуру плавления оловянно-цинкового припоя. Резко снижают температуру плавления оловянных припоев добавки индия и таллия. Для улучшения технологических свойств и повышения надежности паяных соединений в оловянно-цинковые припои иногда вводят небольшие добавки серебра и алюминия. Составы припоев на основе олова приведены в табл. 5.5.

Таблица 5.5

Состав и температура плавления припоев на основе олова

Состав припоя, %	Температура плавления, °С
90Sn/10Zn	210, $\sigma_B = 60$ МПа
80Sn/20Zn	280, $\sigma_B = 70$ МПа
70Sn/30Zn	315
60Sn/40Zn	345, $\sigma_B = 80$ МПа
91Sn/9Zn	199
70-80Sn/20-30Zn/1-2Ag	280
79Sn/21Bi	210
70Sn/30Bi	190
60Sn/40Bi	170
50Sn/50Bi	150
83-86Sn/7,5-8,5Ag/6-8Sb (ВПр6)	250
90,8-93,2Sn/4,5-5,5Ag/0,8-1,2Sb/1,5-2,5Cu (ВПр9)	240

Припои ВПр6 и ВПр9 могут применяться без всякой защиты при работе во всех климатических условиях.

При выборе способов, режимов пайки и типов припоев, применяемых при монтаже полупроводниковых приборов и ИС необходимо знать условия их эксплуатации. Значения предельных температур различных классов ППИ приведены в табл. 5.6.

Большое разнообразие типов полупроводниковых приборов и ИС в сущности отличаются размерами корпуса, кристалла и величинами электрических параметров.

Таблица 5.6

Температуры нагрева приборов

Диоды при:	T °C
$U_{обр} \leq 1600В$	190
$U_{обр} \leq 2800В$	175
$U_{обр} \leq 4000В$	150
Стабилитроны	140
Тиристоры:	
лавинные	140
нелавинные	125
быстродействующие	110
симисторы	125
Транзисторы:	
биполярные кремниевые	200
биполярные германиевые	85-100
полевые МДП	150
полевые с управляющим переходом	25-175
Оптопары:	100-120
приборы с зарядовой связью	110-140

При изготовлении ППИ с низкой себестоимостью должны использоваться групповые методы сборки в прецизионных кассетах. Основной способ

монтажа кристаллов к основанию корпусов – это пайка в конвейерных водородных печах или в вакууме.

Применение бессвинцовых припоев и покрытий естественно приведет к изменению технологии пайки и в целом сборочных процессов. Потребуется корректировка режимов пайки и, как следствие, доработка технологического оборудования. Необходимо проведение комплексных испытаний бессвинцовых паяных соединений на прочность, тепловое сопротивление, коррозионную стойкость, совместимость с материалами и покрытиями обратной стороны кристаллов и оснований корпусов ППИ.

Глава 6

СПОСОБЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ППИ И КОНСТРУКЦИИ ТЕПЛОТВОДОВ

Тепловая стабилизация является одним из необходимых условий для работы электронной аппаратуры, даже если она не будет функционировать в экстремальных условиях. Изменения температуры вызывают дрейф выходных параметров полупроводниковых приборов и интегральных схем, увеличение температуры может привести к тепловому пробое диодов и транзисторов, возникновению механических напряжений в элементах конструкции, отслаиванию и разрыву проводников, микротрещинам, окислению металлических поверхностей и др. Наиболее опасно повышение температуры в силовой электронике. С ростом температуры на каждые 10 °С время безотказной работы сокращается в среднем в два раза.

6.1. Способы охлаждения ППИ

Существуют две основные группы методов охлаждения ППИ: пассивные и активные. Для пассивных методов характерен естественный путь отвода тепла – конвекцией, теплопроводностью и излучением. В активных методах используется принудительный теплоотвод с применением вентиляторов, термоохладителей или омывающих жидкостей.

6.1.1. Механизмы теплопередачи

Теплопроводность твердых тел, жидкостей и газов подчиняется закону Фурье: плотность P теплового потока, Вт/м² - количество тепла, проходящего через единицу площади в единицу времени - пропорциональна градиенту температуры: $P = \lambda \text{ grad } T$, где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

Коэффициент теплопроводности λ твердых тел примерно на два порядка больше, чем λ жидкостей, и на четыре порядка больше, чем у газов. Поэтому теплопроводностью газов, а также и жидкостей, в сравнении с твердыми телами можно пренебречь.

Теплопередача *конвекцией* осуществляется в газах и жидкостях. Конвекция – это перенос тепла потоком жидкости или газа. Естественная конвекция возникает в поле силы тяжести при неравномерном нагреве газа или жидкости. Интенсивность конвекции зависит от разности температур, теплопроводности и вязкости среды. При вынужденной конвекции тепло переносится веществом, которое движется с помощью устройств: насосов, вентиляторов, мешалок.

Еще один механизм теплопередачи – *тепловое излучение*, плотность теплового потока при котором определяется законом Стефана-Больцмана: $P = \varepsilon \sigma_0 T^4$, где ε - испускательная способность нагретого тела (или коэффициент черноты), $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная Стефана-Больцмана, T - абсолютная температура, К. Для абсолютно черного тела $\varepsilon = 1$, для реальных (серых) тел $\varepsilon < 1$.

Теплопередача возрастает при увеличении площади S охлаждаемой поверхности, т.к. тепловой поток W – количество тепла, переносимого в единицу времени (рассеиваемая мощность), Вт: $W = P \cdot S$.

Самый простой способ охлаждения ППИ – пассивный теплоотвод с применением радиаторов. Он основан на явлениях теплопроводности материалов, естественной конвекции и теплового излучения.

6.1.2. Конструкции радиаторов

Размеры полупроводникового кристалла слишком малы, чтобы конвекции было достаточно для его охлаждения. При закреплении корпуса ППИ на радиаторе многократно увеличивается площадь охлаждаемой поверхности. За счет теплопроводности тепло от корпуса микросхемы передается металлическому радиатору. Далее теплоотдача (теплообмен между поверхностью тела и

окружающей средой) от радиатора осуществляется конвективным и лучистым теплообменом.

Сформулируем требования к радиатору: его материал должен иметь максимальную теплопроводность (медь, алюминий и др.), а конструкция должна обеспечивать максимальную площадь поверхности при относительно небольшом объеме. По конструкции различают пластинчатые, ребристо-пластинчатые, игольчатые (штырьковые) радиаторы – рис. 6.1. Для естественной конвекции лучшей является игольчатая конструкция. На рис. 6.2 показана различная форма ребер радиатора. В отличие от классической формы - а, усовершенствованные формы радиаторов - б и в предназначены для принудительного воздушного охлаждения. Оребренные радиаторы в сотни и даже в тысячи раз увеличивают площадь охлаждаемой поверхности.

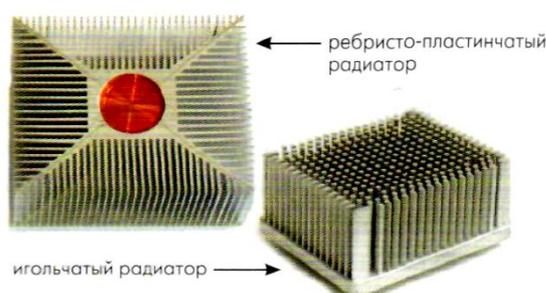


Рис.6.1. Конструкции радиаторов

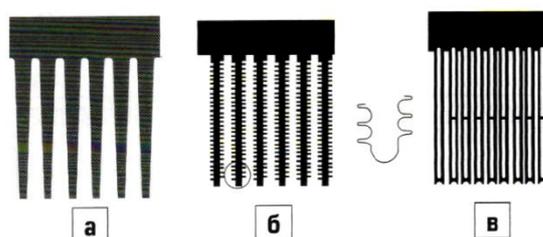


Рис. 6.2. Различные формы ребер радиатора: а – классическая;

б – двойного оребрения; в – комбинированная

Лучшее охлаждение дает принудительная конвекция, например, за счет обдува вентилятором. В настоящее время промышленностью выпускаются

миниатюрные вентиляторы, минимальные размеры которых составляют $15 \times 15 \times 6$ мм³ вентиляторы, смонтированные на радиаторе – кулеры (от англ. “cooler” – охладитель). К качеству поверхности радиатора предъявляются определенные требования: сторона, соприкасающаяся с полупроводниковым прибором, должна быть гладкой, она не должна отклоняться от плоскостности, т.к. только при таких условиях будет хороший контакт между деталями. Однако неровности и микропустоты все же остаются, заполняющий их воздух препятствует теплообмену. Для устранения воздуха из зазоров на соприкасающиеся поверхности наносят теплопроводящие пасты или приклеивают теплопроводящие пленки, но те и другие довольно дороги. При естественной конвекции максимальная длина участвующей в теплоотводе поверхности должна располагаться в вертикальной плоскости; ППИ, являющиеся источниками тепла, не должны возвышаться над охладителем. При принудительной конвекции маломощные ППИ должны располагаться в начале потока, а мощные – в конце.

При естественном воздушном теплоотводе примерно 70 % тепла отводится конвекцией, 30 % - излучением. В зависимости от температуры нагретого тела доля теплового излучения составляет от 2 % при 55 °С до 30 % при 150 °С, а при температурах свыше 600 °С тепловое излучение преобладает в воздушном теплоотводе. Принудительная конвекция снижает долю излучения до 2 – 7 %, при этом конструкция охладителя становится более компактной. Естественное воздушное охлаждение имеет низкий коэффициент теплообмена – до 10 Вт/(м²·К).

Рассеиваемая мощность современных ППИ достигает сотен ватт на квадратный сантиметр. Повышение степени интеграции неизбежно приводит к дальнейшему росту плотности тепловых потоков, так как при неизменной мощности ППИ уменьшается площадь излучения. Воздушные системы охлаждения практически исчерпали свой ресурс.

6.1.3. Принудительные системы охлаждения

На рис. 6.3 приведены зависимости рассеиваемой мощности от максимальной рабочей температуры прибора и требуемого объема рабочего тела охладителя для различных систем охлаждения. В табл. 6.1 дается сравнительная характеристика различных систем охлаждения, а на рис. 6.4 изображена зависимость стоимости охлаждающих систем от эффективности охлаждения. Наиболее эффективен метод жидкостного охлаждения, в особенности для ППИ силовой электроники с мощностью более 1 МВт.

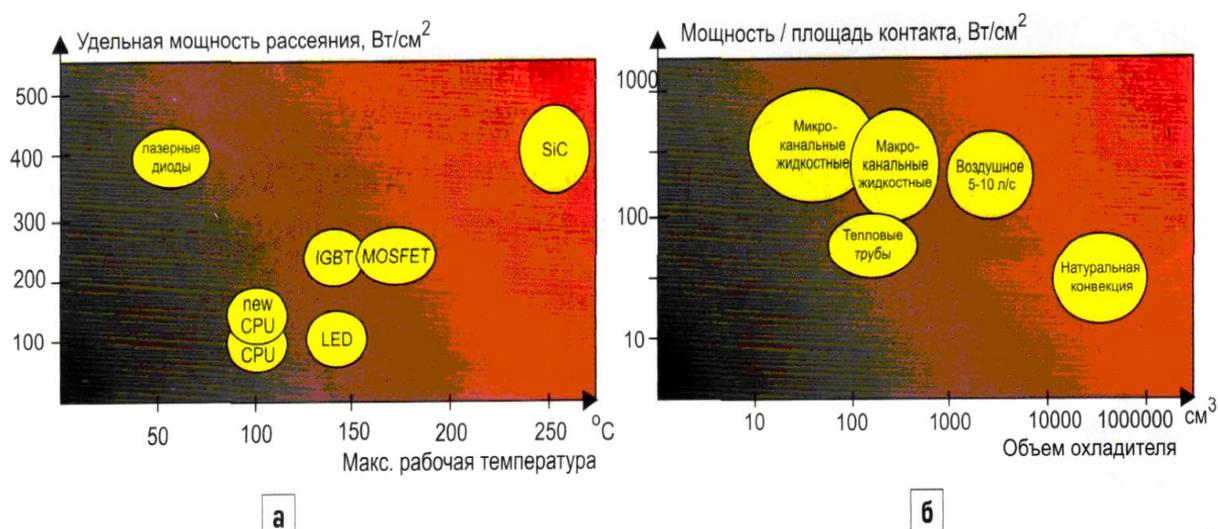


Рис. 6.3. Зависимости рассеиваемой мощности от максимальной рабочей температуры прибора (а) и требуемого объема рабочего тела охладителя (б) для различных систем охлаждения

Принудительное воздушное охлаждение не всегда позволяет добиться требуемой рабочей температуры ППИ по причине низкой теплоемкости и теплопроводности газов (в условиях принудительного охлаждения роль теплового излучения мала, так как на его долю приходится около 3 % отводимого тепла).

Таблица 6.1

Сравнительная характеристика систем охлаждения

Охлаждение	Преимущества	Недостатки	Применение
Принудительное воздушное	Низкая цена, отсутствие утечек	Большой объем, необходимо распределения тепла, высокое тепловое сопротивление, акустические шумы	Во всех областях электроники
Жидкостное	Малый объем, гибкая конфигурация, низкое тепловое сопротивление, малый уровень шумов	Необходим компрессор, возможность утечек, высокая цена	Лазерные диоды, силовая электроника
Тепловые трубы	Малый объем, низкое тепловое сопротивление, малый уровень шумов	Ограниченная теплоемкость, высокая цена, сложная конструкция	Компьютеры, силовая электроника, космос
Термоэлектрическое	Малый объем, низкое тепловое сопротивление	Ограниченная теплоемкость, низкая эффективность	Оптоэлектроника

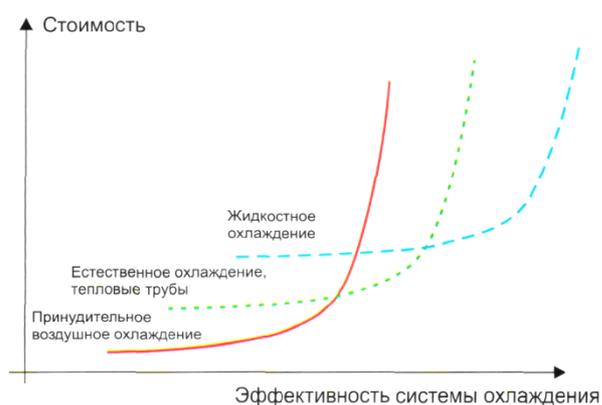


Рис. 6.4. Зависимость стоимости систем охлаждения от их эффективности

Жидкостное охлаждение. Известно, что теплоемкость жидкостей значительно выше, чем газов. Система жидкостного охлаждения работает

следующим образом: миниатюрный резервуар, объем которого меньше, чем у воздушного радиатора, закрепляется на поверхности ППИ, из него по шлангу с помощью помпы жидкость перекачивается в герметичный наружный радиатор, который может обдуваться наружным вентилятором. Эффективность охлаждения зависит от следующих факторов: 1) скорости охлаждающей жидкости, 2) состава охлаждающей жидкости, 3) наличия турбулентности, 4) количества каналов охлаждения в радиаторе, 5) материала радиатора (медь на 20 % лучше, чем алюминий).

Наиболее эффективно микроканальное охлаждение, в котором используются протравленные химическим методом тонкие медные листы, соединенные между собой по технологии DBC (Direct Bonding Copper). Керамика DBC представляет собой керамическую пластину с нанесенными медными шинами, керамика может быть либо из Al_2O_3 , либо из AlN , последний вариант предпочтительнее ввиду большего значения теплопроводности нитрида алюминия, отличие достигает 20 раз. По созданным в меди отверстиям в форме шестиугольных сот проходит охлаждающая жидкость.

Тепловые трубки. Особым типом жидкостного охлаждения являются тепловые трубки. Естественную конвекцию с применением тепловых труб целесообразно использовать при невозможности жидкостного охлаждения (по технологическим причинам) или охлаждения с применением вентилятора (в условиях очень грязной среды). Тепловая трубка (рис. 6.5) представляет собой тонкостенный металлический сосуд – 1, внутренние стенки которого выложены капиллярно-пористым материалом – фитилем – 2. Фитиль пропитан рабочей жидкостью. Внутренний объем – 3, свободный от фитиля, заполнен паром рабочей жидкости. Если один конец тепловой трубки подключить к источнику тепла с температурой T_1 , а другой – к приемнику – радиатору с температурой T_2 ($T_2 < T_1$), будет происходить интенсивный теплообмен. Количество отводимого тепла окажется во много раз больше, чем при использовании радиаторов из меди или серебра. Отсутствие насосов и помп делает этот метод

экономичным (нет шума и потребления энергии), однако малая длина трубок (до 30 см) снижает эффективность метода.

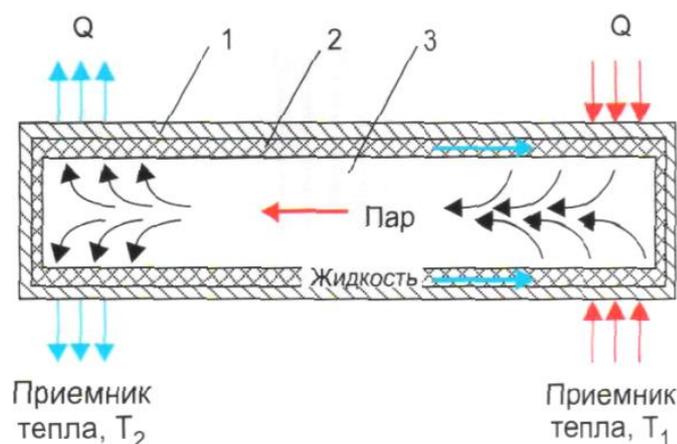


Рис. 6.5. Конструкция тепловой трубы

Обычно трубы встраивают в радиаторы кулеров.

Термоохладители. Современной технологией охлаждения является применение термоохладителей, действие которых основано на эффекте Пельтье. При протекании постоянного тока через цепь из двух разнородных проводников в местах контактов в зависимости от направления тока выделяется или поглощается тепло – рис. 6.6. Наиболее эффективен термоэлемент, составленный из двух полупроводников (n- и p-типа проводимости). На рис. 6.7 показан тепловой модуль. Для большей эффективности модули каскадируются. На горячую поверхность первого модуля устанавливается второй чуть большего размера и т.д. Таким образом можно получить пирамиду модулей, с помощью которой достигают $\Delta T = 70 - 75$ °C при температуре окружающей среды 25°C. Термоохладители выдерживают 200 тысяч часов работы (вентиляторы – 50 тысяч)

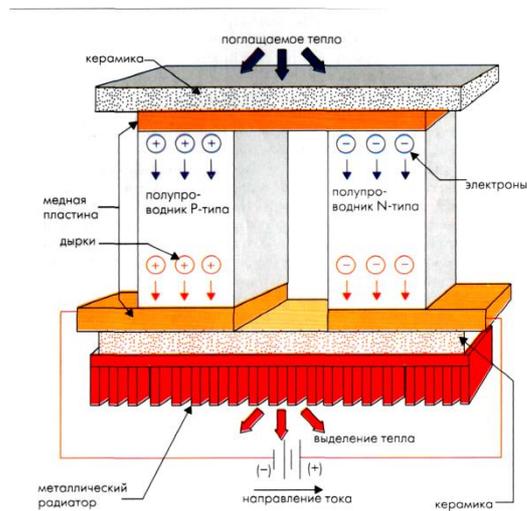


Рис. 6.6. Устройство термоэлемента Пельтье

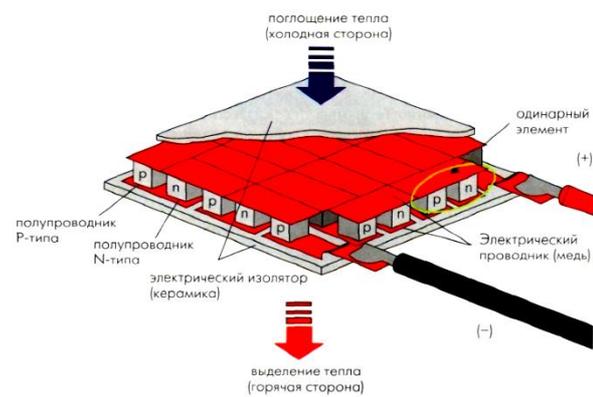


Рис. 6.7. Устройство термоэлектрического модуля

Преимущества и недостатки различных методов

Метод естественного охлаждения не требует затрат энергии, при его реализации ничего не движется, а следовательно, не ломается. Это обеспечивает его надежность и простоту. Недостаток - низкая эффективность охлаждения и большие габариты: на 1 Вт мощности требуется поверхность охлаждения 25 – 30 см².

Наиболее эффективная жидкостная система имеет следующие недостатки: возможность протечек; микронасос и вентилятор требуют потребления энергии; система занимает определенные габариты; все, что движется (вентилятор и насос), снижает надежность и является источником шума. Термоохладители надежны и бесшумны, имеют малые габариты, однако их недостатком является большое потребление энергии, термоохладитель сам является источником выделения тепла, для его работы требуются токи до десятков ампер, тогда как у жидкостных систем ток не превосходит 0,3 А.

Для сравнения мощность вентиляционных систем охлаждения составляет 0,5 – 2 Вт, термоэлектрических – до 100 Вт. Однако есть одно преимущество - высокая разность температур ΔT – ни одно устройство, по габаритам сравнимое с термомодулем, не дает такого охлаждения. Еще один недостаток: ему требуется охлаждение горячей стороны, только тогда достигается

хорошая разность температур. В результате на бесшумный, малогабаритный, надежный модуль устанавливают большой радиатор и мощный вентилятор, и все предыдущие преимущества пропадают (если требуется высокая степень охлаждения). Поэтому энергетически выгодно использовать термоохладители при небольших ΔT . С другой стороны, сильное охлаждение может снизить эффективность работы ППИ или вызвать конденсацию влаги. При высокой влажности (70 %) охлаждение от 25 до 18 °С вызывает выпадение росы. Широкое применение модулей Пельтье ожидается в ближайшем будущем, а сегодня основным методом охлаждения остается использование вентиляторов.

6.2. Тепловое сопротивление ППИ и пути его снижения

Тепловое сопротивление является характерной величиной для каждого типа ППИ и зависит от площади полупроводникового кристалла, площади, толщины и типа материалов между кристаллом и основанием корпуса, от технологии и качества изготовления, от пути передачи тепла от корпуса в окружающую среду.

6.2.1. Понятие теплового сопротивления

Эффективность передачи тепла от кристалла ППИ в окружающую среду характеризуется тепловым сопротивлением $R_T = \frac{T - T_0}{W}$, где T – температура кристалла, T_0 – температура окружающей среды, W – мощность ППИ. Рассеиваемая мощность $W = \alpha \cdot S \cdot \Delta T$, где α – коэффициент теплообмена, S – площадь поверхности, $\Delta T = T - T_0$.

Для оптимизации отвода тепла следует: 1) выбирать материал с максимальной теплопроводностью, 2) уменьшать зазоры между теплопроводящими поверхностями, 3) уменьшать контактные сопротивления между теплопроводящими поверхностями. Поэтому, чем больше границ раздела на пути отвода тепла, тем будет больше доля контактного теплового сопротивления.

Рассмотрим отвод тепла от приборов со сборкой «chip on board» (COB) – контактными площадками вверх и «flip-chip» (FC) - контактными площадками вниз – рис. 6.8. Отвод тепла в COB идет с нижней поверхности кристалла через спай припоя, через теплопроводящий элемент, второй спай припоя к подложке корпуса и далее во внешнюю среду. В корпусе FC отвод тепла идет с верхней поверхности кристалла через теплопроводящий материал и крышку корпуса во внешнюю среду. Основание корпуса COB и крышка корпуса FC для повышения теплоотдачи прикрепляются к радиатору, передающему тепло во внешнюю среду. Технология COB используется в силовой электронике: МОП-транзисторах, диодах, IGBT-транзисторах (биполярных транзисторах с изолированным затвором), мощных светодиодах и лазерных диодах. Технология FC – основа корпусов СБИС микропроцессоров, микросхем памяти.

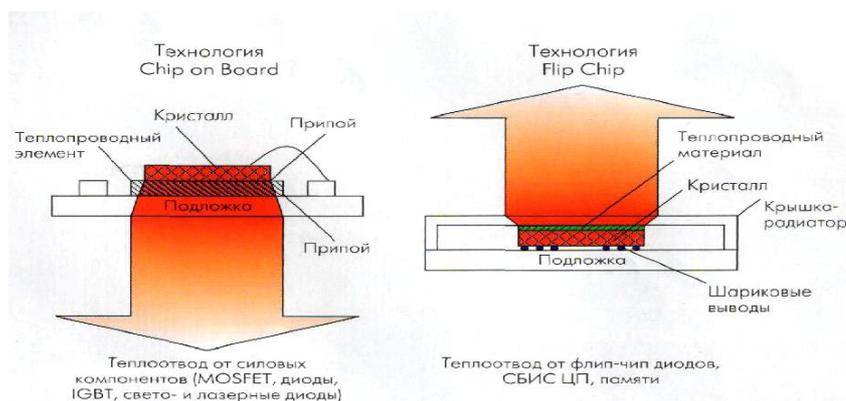


Рис. 6.8. Пути распространения тепла от кристаллов в корпусах COB (а) и FC (б)

Основной элемент отвода тепла от полупроводникового кристалла к корпусу – паяный участок кристалла с корпусом. Он не должен иметь зазоров и пустот. Источником тепла является р-п переход. Полное тепловое сопротивление ППИ складывается из тепловых сопротивлений кристалл – корпус R_{jc} , корпус – теплоотвод R_{cs} , теплоотвод – окружающая среда R_{so} : $R_T = R_{jc} + R_{cs} +$

R_{so} . Применение современных материалов позволяет уменьшить тепловое сопротивление кристалл - корпус на 30 – 50 %.

6.2.2. Отвод тепла в корпусах ПШИ

Для отвода тепла от кристалла к корпусу существуют различные способы и устройства. В первую очередь это выбор материала с высокой теплопроводностью - табл. 6.2.

Таблица 6.2

Коэффициенты теплопроводности материалов

Материал	Алмаз	Al	Сталь	Cu	SiC	Al ₂ O ₃	BeO	AlN
λ , Вт/(м·К)	2000	209	47	384	100 - 490	22 - 30	220 - 240	140 - 180

Использование для отвода тепла металлов (Cu, Al и др.) приводит к возникновению значительных механических напряжений вследствие большой разницы температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) металлов и Si (или SiO₂) - в 5 – 10 раз. Это может привести к выходу из строя приборов. Кроме того, теплоотводы из меди и алюминия в несколько раз превышают по размерам охлаждаемый элемент. Из-за разницы ТКЛР медь используется в паре с молибденом (ТКЛР меди $16,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, Si – $2,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, SiO₂ – $0,55 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, молибдена - $5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$).

Изолирующими теплоотводами являются керамика на основе BeO, керамика на основе AlN, природный и синтетический алмазы.

Производство BeO- керамики очень токсично, поэтому требуется поиск экологически чистых материалов с требуемыми свойствами. Керамика на основе AlN не выпускается отечественной промышленностью.

Использование алмаза как теплоотвода теоретически снижает тепловое сопротивление в 5 раз в сравнении с медью. Практическое использование

природного алмаза снизило тепловое сопротивление в 1,2 – 1,8 раза, синтетического – в 1,2 – 1,3 раза. Искусственные алмазы, созданные методом высокого давления, имеют незначительные размеры. Проблема получения алмазных поликристаллических пластин была решена при применении CVD-метода (Chemical Vapor Depositions). Он основан на разложении углеводородов в смеси с водородом и осаждением алмаза на нагретой подложке. Таким образом получают пластины диаметром до 300 мм. Монтаж кристалла на теплоотвод проводится эвтектическим сплавом Au-Ge при температуре 420°C. Теплоотвод с кристаллом монтируется на фланец корпуса из медного сплава МД-50. Для согласования ТКЛР между ними помещают пластичный материал – свинцово-индиевый припой ПСИН-12. Другой вариант конструкции – металлизация поверхности алмаза. Для адгезионного слоя используют Ti или Ta, для проводящего слоя металлизации – Ni и его сплавы. Для нанесения слоев используется ионно-лучевое и магнетронное распыление. Конструкция алмазного теплоотвода показана на рис. 6.9. Алмазоподобная пленка АПП нанесена на металлический хладопровод, TiC или Ti адгезионный слой толщиной 0,05 – 0,1 мкм, Ni или монель (Ni + 18 % Cu) - токопроводящий слой толщиной 0,3 – 0,8 мкм.

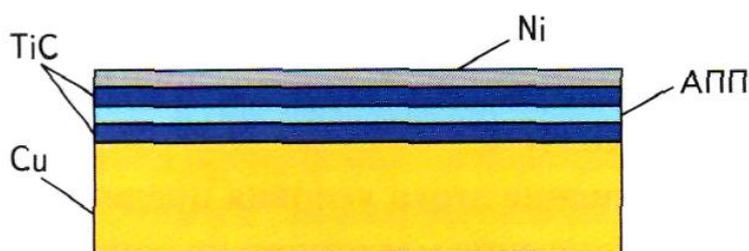


Рис. 6.9. Конструкция алмазного теплоотвода

Алмазы используются и в составе композиционных материалов: никелевое покрытие с алмазным порошком наносится на медный корпус прибора с помощью припоев.

Для отвода тепла от кристалла широко применяется DBC-керамика (Direct Bonded Copper). В качестве керамики чаще всего используется AlN.

Применение такой керамики снижает тепловое сопротивление вдвое – рис. 6.10. Комбинированная структура медь – керамика имеет ТКЛР, слегка превышающий его значение для керамики ($7,2 - 7,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). Это позволяет монтировать силовые ППИ напрямую, не используя компенсационных слоев. Технология производства DBC, использующая чистую медь, дает возможность получать интегрированные токовыводы.

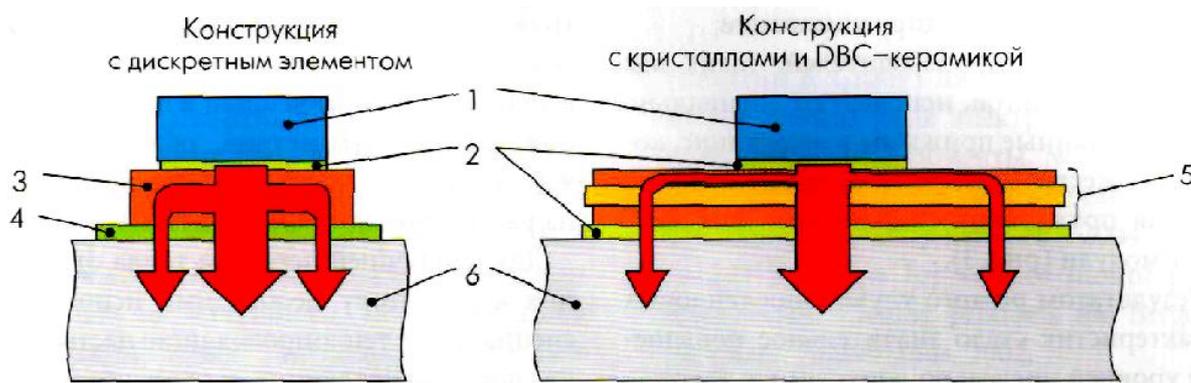


Рис. 6.10. Распределение тепла в конструкции с медным основанием и с DBC-керамикой: 1 – полупроводниковый кристалл; 2 – слой припоя; 3 – медное основание; 4 – изолятор из слюды; 5 - DBC-керамика (состоит из трех слоев); 6 – радиатор (основание силового модуля)

Технология получения переходных отверстий в сочетании с интегрированными токовыводами позволяет разрабатывать герметичные корпуса небольшого веса с улучшенными температурными показателями. Сопротивления в переходных отверстиях составляют значения менее 10^{-4} Ом , поэтому нет ограничений по силе тока. Многокристальные мощные модули с R_T менее 30 K/кВт имеют интегральный трехмерный теплоотвод жидкостного охлаждения, собранный по DBC-технологии.

6.2.3. Отвод тепла от корпуса во внешнюю среду

В приборах IGBT (биполярный транзистор с изолированным затвором) с изолированным корпусом с общей площадью поверхности 45 см^2 общее тепловое сопротивление кристалл – окружающая среда R_{jo} распределяется следующим образом: R_{jc} (кристалл – корпус) = 7 К/кВт , R_{cs} (корпус – теплоотвод) = 6 К/кВт , R_{so} (теплоотвод – окружающая среда) = $(10 - 35) \text{ К/кВт}$.

R_{so} зависит от способа охлаждения – минимальное значение для жидкостного, максимальное – для принудительного воздушного. 40 - 70 % теплового сопротивления приходится на контакт теплоотвод – окружающая среда. Естественно, что жидкостное охлаждение дает максимальный эффект, однако и его можно увеличить, используя микроканальное охлаждение. Тепловое сопротивление такого модуля составляет 36 % от сравнимого по мощности стандартного модуля с водяным охлаждением – рис. 6.11.

Использование наноразмерных покрытий (гранул ZnO поверх объемных Al и Cu) в системах микроканального охлаждения десятикратно увеличивает коэффициент теплопередачи. Механизм действия нанопокровов заключается в увеличении плотности центров парообразования и улучшением откачивающего действия капилляров.

Другая система охлаждения включает кремниевую пластину на основании из керамики BeO или AlN. Корпус устанавливается на радиатор, охлаждаемый протекающей жидкостью. В качестве охладителя используются парафины $C_{30}H_{62}$, $C_{32}H_{66}$, $C_{33}H_{68}$ (общая формула C_nH_{2n+2}), которые плавятся при температуре на $10 - 20 \text{ }^\circ\text{C}$ меньше критической для данного прибора.

Способ отвода тепла может влиять на выбор материала керамической подложки модуля. При воздушном охлаждении основная часть теплового сопротивления приходится на составляющую R_{SA} теплоотвод – окружающая среда – рис. 6.12. В этом случае переход на дорогой AlN дает небольшой выигрыш. При использовании жидкостного охлаждения вклад теплового сопротивления кристалл – теплоотвод R_{JS} увеличивается. В этом случае применение AlN существенно снизит температуру кристалла.

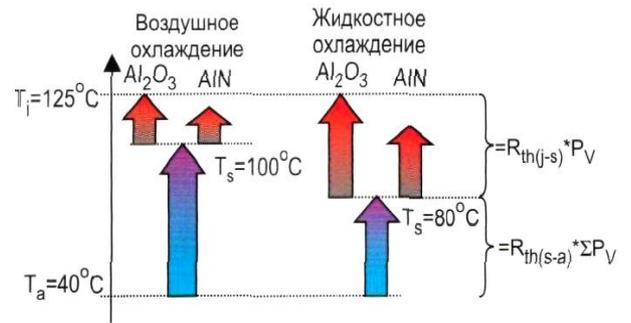
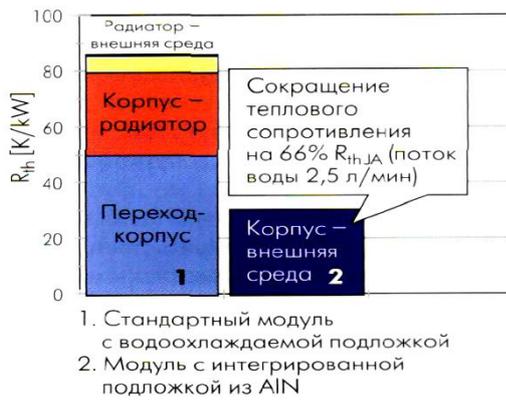


Рис. 6.11. Сравнительные значения тепловых сопротивлений силовых модулей различных конструкций

Рис. 6.12. Соотношение тепловых сопротивлений кристалл – корпус R_{JC} и корпус – теплоотвод R_{CS} при различных способах охлаждения

НАНЕСЕНИЕ ШАРИКОВЫХ ВЫВОДОВ НА КРИСТАЛЛЫ И ПЛАТЫ

Применение монтажа полупроводникового кристалла на основание корпуса или плату методом «flip-chip» позволяет полностью автоматизировать процесс сборки. Основу метода перевернутого кристалла составляют объемные столбиковые выводы, располагаемые на металлизированных контактных площадках кристаллов ППИ.

В настоящее время при сборке по технологии «flip-chip» используются в основном два варианта формирования объемных выводов на кристалле:

- изготовление столбиковых припойных выводов;
- получение шариковых выводов оплавлением проволоки.

Изготовление шариков припоя и размещение их на кристалле. Для изготовления шариков припоя диаметром 0,025 - 0,2 мм используется установка, которая содержит нагреватель, резервуар с жидким припоем, эжекторную камеру, эжектор с соплом, электронную схему управления эжектором, обеспечивающим выдачу сигналов с частотой 2 - 100 кГц. Для предохранения припоя от окисления в установке используется инертный рабочий газ. При работе на частоте 15 кГц и скорости газа 3,5 м/с получаются шарики припоя диаметром 0,08 - 0,1 мм, следующие один за другим с небольшим интервалом.

Для формирования на кристалле более 600 контактных выступов с использованием шариков из припоя диаметром 0,4 мм, а также свыше 500 контактных выступов из шариков диаметром 0,25 мм используется специальная автоматическая установка.

Формирование на контактных площадках кристалла припойных выступов, имеющих однородность по высоте, при невысокой стоимости и хорошей производительности осуществляется на специальной установке. Установка включает в себя держатель кристаллов, устройство нанесения на их площадки флюса, резервуар с шариками припоя диаметром 0,125 мм. На

перемещающемся вертикально и вращающемся рычаге закреплен вакуумный захват, рабочая поверхность которого имеет набор отверстий для удерживания шариков припоя. Расположение отверстий точно соответствует расположению контактных площадок на кристалле. Перенос шариков на кристалл осуществляется захватом из резервуара. При нагреве кристаллов до температуры плавления шариков припоя образуются припойные выступы.

Размещение и крепление на контактных площадках керамической подложки шариков из припоя осуществляется следующим способом: вначале шарики устанавливаются в лунках прецизионно обработанной графитовой пластины с помощью вакуума, подаваемого к лункам через сквозные отверстия; затем, используя маску из стальной фольги, на шарики сверху наносится паста из того же состава припоя; после этого производится совмещение пластины с подложкой с помощью юстировочной плиты. После удаления плиты подложка и пластина поступают в печь для пайки при заданной температуре. При этом припойная паста при расплавлении корректирует положение шариков относительно контактных площадок.

Захват и прецизионное размещение шариков припоя на контактных площадках подложки или кристалла ППИ осуществляются при помощи специального устройства. Устройство содержит рабочий столик, на котором располагается кассета с шариками, перемещающуюся вертикально монтажную головку, имеющую набор инструментов в виде вертикально смонтированных трубочек наружным диаметром 0,875 мм и внутренним диаметром 0,3 мм. Трубочки служат для захвата шариков припоя диаметром 0,76 мм с помощью вакуума.

Перенос токопроводящих шариков припоя на контактные площадки кристалла может осуществляться с помощью переводной пластины из кремния. Пластина имеет углубления трапециевидной в сечении формы, по расположению точно соответствующие позициям площадок на Si-пластине со структурами ППИ. После оксидирования поверхности переводной пластины в ее полости укладываются шарики припоя, а затем на нее сверху кладется

пластина с ППИ, площадки которых имеют золоченную поверхность с подслоями Ni, Cu и Cr. При нагреве сборки и расплавления припоя шарики переходят на контактные площадки ППИ в форме припойных выступов. Высокая точность переноса шариков припоя достигается применением одинакового материала пластин (Si), не приводящего к рассовмещению площадок и полостей при их совместном нагреве.

Монтаж шарика припоя на контактную площадку кристалла ИС подложки осуществляется с помощью специального инструмента в виде цилиндрического стержня со скошенной на угол 45° нижней частью. Инструмент изготовлен из W или Ti, WC, Al_2O_3 . На плоском рабочем торце инструмента имеется выемка, размеры которой определяют объем захватываемого припоя. Вдоль оси инструмента может быть капилляр для подвода энергии с целью подогрева шарика припоя. Инструмент также используется при реставрации ППИ и многокристалльных модулей.

Для формирования шариковых контактов на подложке, используемой для обращенного монтажа нескольких кристаллов ППИ, используется специальная пластина из несмачиваемого припоем материала, например алюминия, содержащая матрицу полусферических углублений, расположенных соответственно контактными площадкам на подложке. В углублениях пластины размещают шарики из припоя. Затем подложка накладывается на пластину с высокой точностью совмещения ее контактных площадок с шариками, которые присоединяются к ним термокомпрессионной сваркой или пайкой.

Известен способ планаризации шариковых припойных выводов, расположенных на установочной поверхности безвыводного матричного корпуса ИС. Выравнивание проводится пластиной с нагревателем, имеющей тщательно обработанную и несмачиваемую припоем поверхность. Подбором величины давления, времени и температуры обеспечивается размягчение припойных шариков и их выравнивание по высоте в процессе прижатия ИС к подложке.

Для повышения надежности бескорпусной ИС и уменьшения стоимости ее изготовления рекомендуется формировать шарики припоя не на кристалле, а на плате. Последовательность технологических операций заключается в следующем: нанесение на плату металлизации и получение контактных площадок; формирование маски из слоя фоторезиста; напыление барьерного слоя металла; нанесение припойной пасты способом трафаретной печати; удаление фоторезиста и оплавление пасты с образованием одинаковых по высоте шариков припоя.

Изготовление столбиковых припойных выводов. Контактные площадки, на которые наносят шариковые выводы из припоя, получают, используя две операции фотолитографии. Сначала на пластину Si с контактами в виде алюминиевой металлизации осаждается пленка несмачиваемого припоем металла (Cr, Ti, Zr и др.), затем наносится фоторезистивная маска, в окна которой осаждается пленка смачиваемого припоем металла (Cu, Co, Ni и др.) с подслоем из комбинации смачиваемого и несмачиваемого припоем металлов. После удаления первой фоторезистивной маски формируется маска с окнами больших размеров из толстого негативного фоторезиста. В эти окна гальванически или напылением осаждается припой. После удаления второй фотомаски проводится травление несмачиваемой припоем металлизации с использованием осажденного припоя в качестве маски. Пластина Si затем нагревается до температуры плавления припоя, который за счет капиллярных сил приобретает форму шариков на смачиваемом припоем участке контактной площадки.

Для исключения подтравливания столбиковых выводов на полупроводниковых кристаллах разработан способ, по которому на кристаллы в составе пластины с открытыми контактными площадками наносят слой первого фоторезиста, устойчивого к травителю, применяемому для удаления барьерного слоя металлизации. После вскрытия окон в нем на пластину напыляется барьерная многослойная металлизация, содержащая слой Ti или Cr, слой Cu или Pd, а затем слой Au. Затем на пластину наносится слой второго фоторезиста, в

котором над площадками вскрываются окна размером меньше окон в первом фоторезисте на удвоенную толщину барьерной металлизации. В этих окнах гальваническим способом наращивают золотые столбиковые выводы. После удаления второго фоторезиста последовательно снимаются металлизация вокруг выводов и слой первого фоторезиста.

Известен способ изготовления столбиковых выводов из припоя в технологии производства полупроводниковых приборов и ИС. На полупроводниковую пластину с контактными площадками осаждают несколько слоев металла, а затем – слой припоя через маску. После удаления маски часть слоев металла за пределами областей, покрытых припоем, стравливают в растворе, содержащем фосфорную и уксусную кислоты, перекись водорода и деионизованную воду, который не реагирует с припоем. Режимы травления: температура 70 °С, время – 1-10 мин. Столбики припоя, изготовленные на многослойном металлическом основании, состоящем из алюминия, сплава никель-ванадий и меди пригодны для монтажа методом перевернутого кристалла.

На полупроводниковых кристаллах контактные выступы можно получать без применения фотолитографии. В этом случае на всю полупроводниковую пластину со вскрытыми в защитном диэлектрическом слое на контактные Al площадки наносится барьерный слой Ti, Cr, Ni или нитридов Ti и Ta. Затем помещают пластину в вакуумную установку и проводят наращивание выступа из Au, In или припоев. Барьерный слой напыленного на поверхности пластины металла удаляется химическим способом. Скорость осаждения контактных столбиков около 105 мкм³/с, т. е. для получения 200 контактов с размерами 100×100×10 мкм требуется менее четырех минут.

Для монтажа кристаллов методом перевернутого кристалла разработана система металлизации, состоящая из слоя состава WSi_{0,4}N_{0,2} со слоем никеля, смачивающим припоем. Столбиковые выводы формируют последовательным осаждением слоев золота и олова в соотношении 80:20 (мас., %) для образования припоя эвтектического состава толщиной 10 мкм. Расплавление припоя

проводят в атмосфере формирующего газа путем импульсного нагрева до температуры 330 °С со скоростью 4 °С/с.

Образующиеся на первоначальном этапе нагрева фазы AuSn и Au₅Sn характеризуются взаимной диффузией в твердом состоянии. Дальнейший нагрев приводит к их расплавлению с образованием однородного эвтектического расплава, который при охлаждении образует столбиковые выводы гомогенного состава.

Изготовление полупроводниковых кристаллов с шариковыми выводами, имеющими повышенную надежность при меньшей стоимости, осуществляется по следующей технологии: после формирования окон, вскрываемых в защитном полиимидном слое над контактными площадками из Al, пластина Si погружается в расплавленный припой, содержащий, например, Pb и Sn. Облуживание площадок производится с наложением ультразвуковых колебаний, которые способствуют разрушению оксидных пленок Al. Таким образом получают шариковые выводы высотой до 30 мкм, на которые могут быть нанесены дополнительные выступы из сплава Pb-Sn высотой до 150 мкм. В припой при повторном лужении могут быть введены Ag или Cu, способствующие упрочнению выводов. По данной технологии разработана конструкция мощного полупроводникового прибора, сохраняющего постоянную прочность контактных соединений с корпусом после 1000 ч испытаний при температуре 125 °С.

Замена контактных выступов из сплава Pb-Sn на контакты из нескольких слоев Au позволила снизить стоимость ИС, повысить их надежность и обеспечить удовлетворительные параметры на частотах до 15 ГГц.

Для обеспечения защиты ППИ от электромагнитных полей, наводок и снижения их паразитных электропараметров разработана специальная конструкция столбиковых выводов. Выводы состоят из центрального выступа и соосно расположенного с ним ободка одинаковой высоты 15-30 мкм. При этом центральный выступ соединен с сигнальным проводником, проходящим в середине многослойной коммутационной структуры, а ободок – с верхним

заземленным слоем металлизации. Выводы изготавливаются из индиевого припоя, гальванически осажденного на тонкопленочную металлизацию из слоя Nb, защищенного барьерным слоем Pd и покрытого дополнительно слоем Au. Поверхность кристаллов, используемых при изготовлении многокристальных модулей с рабочими частотами 250 МГц, защищается тонкопленочным диэлектриком SiO₂.

Формирование столбиковых выводов на контактных площадках коммутационных подложек может производиться с помощью легкорастворимой полимерной пленки-носителя. Пленку с выводами получают литьем из раствора на основе алифатического мономера акрилата или акрилового полимера либо на основе стеариновых пластиков. В пленке пробиваются сквозные конические отверстия, которые заполняются припойной пастой или расплавленным припоем. После этого пленка совмещается с подложкой и происходит оплавление припоя. Эта операция может быть совмещена с монтажом компонентов. Затем пленка растворяется. Данный способ позволяет одновременно формировать с высокой точностью на подложках сотни и тысячи выводов.

Шариковые выводы на кристаллах ИС или на подложках формируют нанесением припойной пасты через маску-трафарет. Маска имеет трапециевидные отверстия, наклон стенок которых составляет угол менее 10°, а их площадь в нижней части равна или в 1,5 - 5 раз превышает площадь контактных площадок. Припойная паста готовится из порошка припоев Sn-Pb, Sn-Ag и др. с флюсом, состоящим из органической кислоты, высокомолекулярной добавки и растворителя. После нанесения маска удаляется, а припой оплавляется, образуя шариковые выводы, которые могут быть получены на обеих соединяемых поверхностях, при этом припой могут иметь различную температуру плавления.

Выводы полусферической формы высотой 20 - 25 мкм и диаметром 0,03 мм на кристаллах ИС получают также оплавлением припойной пасты. Для повышения прочности сцепления вывода с контактной площадкой кристалла на участке Si вытравливаются в плазме CF₄ или CF₆ с добавкой O₂

V-образные выемки. Затем осаждается защитный слой SiO_2 и слой Al , а для обеспечения паяемости площадок наносят слой Cu с подслоем Ti .

Для получения паяных выступов на кристалле поверхность пластины кремния со структурами ИС защищается пленкой полиимида, в которой вскрываются окна небольшого диаметра над контактными площадками. На пленке равномерно по всей площади кристалла формируются контакты большего диаметра намазыванием пасты через трафарет из тонкой стальной сетки. Нанесенная металлизация на пластине сушится при температуре около 165°C в течение 30 мин. Затем на контакты устанавливаются шарики из припоя, которые расплавляются нагревом пластины до температуры их плавления.

Разработан способ получения контактных столбиков на кристаллах ИС, на которых уже имеются алюминиевая металлизация и пассивирующий диэлектрик. Контактные столбики создают методом трафаретной печати, используя в качестве пасты эпоксидную смолу с серебряным наполнителем, которая после нагрева затвердевает. На поверхности кристалла создают опорный изолирующий слой толщиной равной высоте контактных столбиков. При сборке на плату методом перевернутого кристалла изолирующий слой заполняет промежуток между кристаллом и платой.

На рис. 7.1 приведена известная схема формирования припойных выводов на полупроводниковых кристаллах. По данной схеме на контактное основание высотой 3 - 5 мкм наносят двухслойное покрытие серебро – олово с суммарной толщиной 10, 20, 30, 40 мкм и проводят оплавление. В процессе сплавления припоя за счет капиллярных сил происходит изменение формы припойного вывода (уменьшается диаметр и увеличивается высота). Данный способ формирования припойных выводов не потерял актуальности и в настоящее время.

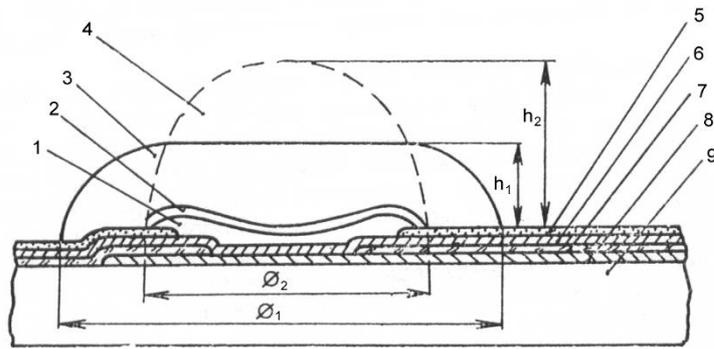


Рис. 7.1. Схема формирования припойного вывода: 1 – твердое основание вывода; 2 – слой Ag; 3 – слой Sn; 4 – сплав Ag-Sn; 5 – защитная маска фоторезиста; 6 – технологический подслои; 7 – SiO₂; 8 – Al; 9 – Si; h₁ – суммарная толщина слоев компонентов припоя; h₂ – высота вывода после сплавления припоя. Ø₁ и Ø₂ – диаметры вывода после нанесения слоев припоя и после сплавления припоя

По результатам замеров, изучению поперечных шлифов и электронной микроскопии установлено, что при общей высоте вывода, меньшей или равной диаметру основания, диаметр вывода равен последнему. Для более высоких выводов их диаметр приблизительно равен высоте. Разброс значений высот в пределах одного кристалла составляет ±1 мкм, в пределах одной пластины ±2,5 мкм, от пластины к пластине ±4 мкм. Хорошая воспроизводимость высот и диаметров выводов гарантирует надежное контактирование и отсутствие замыканий между соседними выводами в процессе монтажа кристаллов.

На рис. 7.2 приведена конструкция объемного столбикового вывода. Технологический процесс его изготовления включает следующие основные операции: нанесение поверх алюминиевой металлизации слоя защитного диэлектрика; вскрытие контактных окон меди с адгезионным и пассивирующим слоями; локальное гальваническое выращивание медного столбика при защите фоторезистом; гальваническое покрытие буферным слоем; снятие технологических слоев и горячее лужение завершающего процесса.

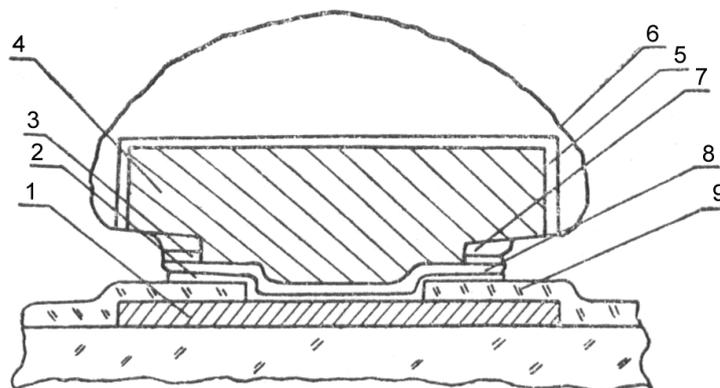


Рис. 7.2. Конструкция столбикового вывода полупроводниковой микросхемы: 1 – алюминиевая металлизация; 2 – адгезионный подслоя ванадия; 3 – пассивирующий слой ванадия; 4 – гальванический медный столбик; 5 – гальванический припой олово-висмут; 6 – припой ПОС-61; 7 – фоторезист; 8 – напыленный слой меди; 9 – пассивирующий оксид

Применяется способ изготовления контактных выступов из припоя на кристалле, включающий последовательное нанесение на кристалл слоя диэлектрика и слоя позитивного фоторезиста, вскрытие контактных площадок, напыление пленок Cr/Cu/Au, нанесение второго слоя фоторезиста, химическое осаждение в окна в нем припойного сплава или Sn, удаление двух слоев фоторезиста с частью металлизации между ними и плавления припоя.

Известен способ, суть которого заключается в том, что к контактным площадкам подложки, повернутой этими площадками вниз, подводят разъемную литниковую систему, состоящую из заливочной пластинки и подводящей формы, в каждой из которых выполнены соосные отверстия, сужающиеся к поверхности разъема пластинки и формы и расположенные напротив контактных площадок, к которым обращена пластинка. Затем к пластинке, прижатой вплотную к подложке, подводят форму и подают в отверстия последней расплав припоя, который по отверстиям в пластинке подтекает к контактным

площадкам; в этот период температура пластинки ниже температуры формы, но выше температуры ликвидуса припоя. После этого форму отводят от пластинки, и находящийся в отверстиях пластинки припой, смачивая контактные площадки, повисает на них, после чего отводят и пластинку. Таким образом, повисший на пластинках припой затвердевает в форме шариков или конусообразных столбиков.

Для создания контактных столбиков на кристалле ППИ его помещают на разогретый столик и выдерживают в течение некоторого времени. Затем на контактную площадку опускают тонкую проволоку припоя и выдерживают в таком положении до тех пор, пока нижняя часть проволоки не расплавится с образованием шарика. После этого проволоку поднимают и переносят на следующую контактную площадку. Когда шарики припоя нанесены на все контактные площадки кристалла, столик охлаждают и припой застывает, образуя контактные столбики. Данный способ реализуется при температуре нагрева столика выше температуры плавления припоя, а диаметр проволоки несколько меньше размера контактной площадки. Данные операции проводят в защитной среде.

Недостатком данного способа является большая трудоемкость для изготовления контактных столбиков на кристаллах БИС и СБИС, имеющих десятки и сотни контактных площадок. Кроме того, данным способом невозможно получать контактные столбики одинаковых размеров, что отрицательно скажется на последующей операции присоединения выводов к контактным столбикам кристалла. Более того, данным способом нецелесообразно формировать контактные столбики на площадках кристаллов в составе пластины из-за длительности данной технологической операции.

Одной из последних разработок в области изготовления столбиков припойных выводов на полупроводниковых кристаллах ИС, БИС и СБИС является способ, который реализуется следующим образом.

На столике 1 размещают кристалл 2 с контактными площадками 3 (рис. 7.3). К кристаллу вплотную прижимают пластину 4, конические

отверстия 5 в которой совмещают с контактными площадками 3. Затем отрезки проволоки припоя 6, каждый размером равный объему контактного столбика, размещают в конических отверстиях 5 пластины 4 на контактных площадках 3 кристалла 2. Затем осуществляют нагрев столика 1 до температуры расплавления припоя 6. После этого столик охлаждают и припой при кристаллизации образует контактные столбики 7 заданной формы (рис. 7.3, б).

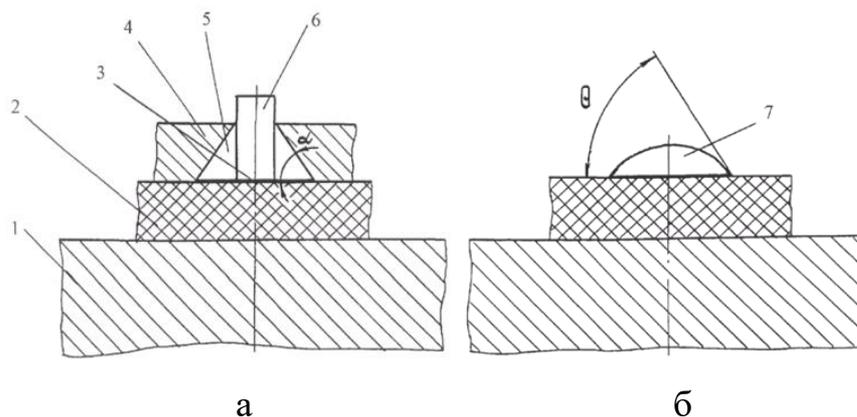


Рис. 7.3. Схема формирования столбиковых выводов: а – расположение отрезка проволоки припоя до расплавления; б – форма припойного столбика после расплавления: 1 – столик; 2 – полупроводниковый кристалл; 3 – контактная площадка кристалла; 4 – пластина; 5 – конические отверстия в пластине; 6 – проволока из припоя; 7 – припойных столбик

Использование отрезков проволоки из припоя с размерами, равными объему контактного столбика, позволяет формировать контактные столбики одинаковой формы.

Конические отверстия в пластине с углом конуса в отверстиях α , равным краевому углу смачивания припоем металла контактной площадки θ , способствуют центровке контактного столбика относительно контактной площадки, а также свободному отделению пластины 4 от кристалла с напаянными контактными столбиками 7 после охлаждения.

В случае, когда конические отверстия в пластине имеют угол конуса α меньше краевого угла смачивания припоем металла контактной площадки θ , расплавленный припой за счет капиллярного течения полностью заполнит нижнюю часть отверстия, что может привести к разрушению контактных столбиков при отделении пластины от кристалла после его охлаждения.

Если конические отверстия в пластине имеют угол конуса α больше краевого угла смачивания припоем металла контактной площадки θ , то припой при расплавлении может свободно растекаться по металлу контактной площадки, в результате чего контактные столбики при кристаллизации припоя будут иметь некоторое смещение относительно центра контактной площадки.

Таким образом, использование предлагаемого способа изготовления контактных столбиков на полупроводниковом кристалле обеспечивает по сравнению с существующими способами следующие преимущества: снижает трудоемкость изготовления контактных столбиков на полупроводниковом кристалле; позволяет получать контактные столбики одинаковой формы и объема.

Наиболее успешным методом обработки пластин при автоматизированном соединении на ленточном носителе является создание столбиков из золота, полученных электролитическим осаждением, или меди, покрытой золотом, на алюминиевых контактных площадках кристалла при его монтаже на одно-, двух- и трехслойной ленте (рис. 7.4). Критической стадией, влияющей на выход годных приборов, является селективное травление слоев, полученных методом вакуумного испарения или ионного распыления (рис. 7.4, е). При химическом травлении этих слоев травитель может проникать в пассивирующее покрытие и растворять легкокорродирующее алюминиевое межкомпонентное соединение. Для избежания связанных с этим явлением технологических потерь применяется несколько процессов, включая плазменное травление. Стоимость всех дополнительных процессов обработки пластин входит в стоимость годного кристалла на пластине. Это повышение стоимости кристалла и технологические потери из-за травления алюминия делают

процесс создания столбиков на пластине менее привлекательным, чем выполнение проволочного соединения.

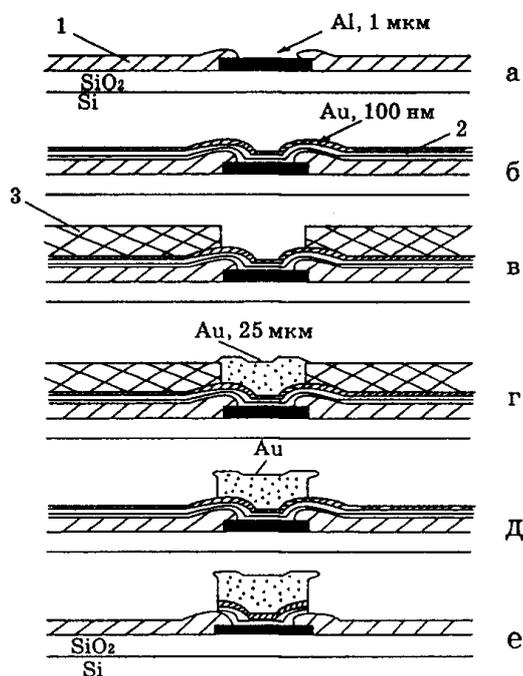


Рис. 7.4. Процесс формирования золотых столбиков на алюминиевой контактной площадке: 1 - оксид кремния 1 - 1,5 мкм; 2 - барьерный слой 100 нм; 3 - фоторезист 25 мкм; а – ионное травление; б – создание барьерного слоя; в – нанесение фоторезиста; г – осаждение слоя золота 25 мкм; д – снятие резиста; е – химическое травление

Формирование шариковых выводов оплавлением проволоки. При формировании контактных выступов с термокомпрессионным присоединением шарика из золотой проволоки к алюминиевой контактной площадке на кристалле на верхней части шарика остается заостренный выступ – след обрыва проволоки. Разработан способ формирования контактных выступов, улучшающий однородность их размеров и формы. Суть способа заключается в следующем: вначале выступ расплющивают с помощью формирующей иглы, которая

имеет плоскую или вогнутую рабочую поверхность, а затем шарик термически обрабатывают лазерным лучом.

Для формирования ОСВ на кристаллах в составе пластины диаметром до 150 мм разработана установка УФМ-1. Технические возможности установки позволяют получать контактные выступы из золотой проволоки с прочностью, обеспечивающей устойчивость выводов к воздействию технологических факторов сквозного разделения пластин на кристаллы.

Для образования шариковых выводов оплавлением проволоки могут также использоваться различные устройства. Способ и технология формирования шарика оплавлением золотой проволоки термозвуковой сваркой широко используется в настоящее время в производстве. Для этой цели в «ОКБТЭМ-СО» ГНПК ТМ «Планар» (г. Минск, Республика Беларусь) модифицировано ручное или автоматическое оборудование для термозвукового присоединения выводов при сборке ИС.

Глава 8

СПОСОБЫ ПОДГОТОВКИ К СВАРКЕ И ПАЙКЕ КРИСТАЛЛОВ, КОРПУСОВ И ПЛАТ

В производстве полупроводниковых изделий (ППИ) в качестве покрытий корпусов широко используют такие металлы как золото, серебро, никель и его сплавы и др.

Гальванические покрытия ППИ из чистого золота (99,9 %) обладают комплексом положительных свойств: высокой электропроводностью, низким контактным сопротивлением, хорошей смачиваемостью припоями, высокой коррозионной стойкостью, способностью к диффузионной сварке и др. Однако золотые покрытия имеют существенные недостатки: значительную пористость в покрытиях (особенно в тонких слоях); ослабление соединений при пайке вследствие растворения покрытий в припое; диффузию подслоя меди в покрытие. С целью устранения этих недостатков и снижения себестоимости производства ППИ золотые покрытия заменяются сплавами, имеющими свойства золота. Исследования показали, что наиболее перспективным сплавом является золото-кадмий, который имеет высокую износостойкость, паяемость, низкое контактное сопротивление, незначительно изменяется при старении. Наиболее важным преимуществом данного сплава по сравнению с другими является его способность выдерживать повышенные температуры в течение 1000 ч без изменения контактного сопротивления.

Подготовка корпусов с серебряным покрытием к сборочным операциям. Для очистки серебряных покрытий применяют различные методы: механические, химические и электрохимические.

Сульфидную пленку удаляют путем полирования или нагревания металла до 400 °С. При этой температуре Ag_2S разлагается.

Из механических методов наиболее простым является очистка покрытий, заключающаяся в легком полировании смесью, состоящей из 40 г

мыльной стружки, 60 г карбоната аммония, 100 г кизельгура (инфузорной земли), 60 г кремнистого мела (CaSiO_3) и 1 л воды.

Наиболее эффективными химическими методами обработки являются следующие:

1. Обработка поверхности в горячем щелочном растворе (10 %-ом растворе соды). По данной технологии обрабатываемые изделия погружают в раствор вместе с кусочками алюминия, выделяющийся при этом водород восстанавливает Ag_2S .

2. Сульфидная пленка Ag_2S растворяется в следующем растворе: 80 г тиомочевины, 10 г серной кислоты и 1 л воды. При pH 0,5 реакция протекает очень быстро.

Сульфидные пленки Ag_2S не растворяются существующими флюсами, поэтому посеребрённые изделия под пайку необходимо защищать, например, с помощью полиуретанового лака.

Для предохранения от потускнения серебряные изделия обрабатывают в течение 3–6 мин в растворе бихромата натрия (100 г/л), хромовой кислоты (0,5 г/л) или применяют катодную обработку в электролите состава, г/л: хромовая кислота - 50, серная кислота - 10. Время обработки 1-5 мин, напряжение 6 В, температура ванны 20-25 °С.

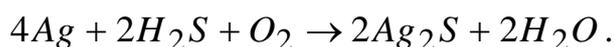
Повышение временной защиты покрытия серебром обеспечивают обработкой в растворе, содержащем 10-14 г/л бензотриазола, 30-50 мл/л этилового спирта и до 1 л воды, при 35-45 °С в течение 30 мин при обработке деталей из меди, титана и их сплавов и около 1 ч для деталей из алюминия и его сплавов. Утверждается, что при такой обработке не изменяются внешний вид покрытия и переходное сопротивление серебра.

Защитить поверхность контактов от образования Ag_2S при хранении их на складе или при очень малых электрических нагрузках можно нанося слой золота более 2,2 мкм. Применение защитных покрытий из золота экономически нецелесообразно, так как возможна коррозия через поры покрытия.

Таким образом, анализ способов подготовки к сборочным операциям корпусов с серебряным покрытием изделий микроэлектроники, показал, что существующие способы обладают рядом существенных недостатков.

В работе показано, что перспективным способом подготовки к сборочным операциям (в основном перед пайкой полупроводниковых кристаллов к основаниям корпусов) является отжиг корпусов с серебряным покрытием в кислороде при температуре 250 - 350 °С в течение 15 - 45 мин. Микроструктурным и рентгеноспектральным микроанализом установлено, что после отжига происходит удаление с поверхности покрытия сульфидной пленки Ag₂S и образование при этом оксидной пленки Ag₂O толщиной 500-600 Å. Образующаяся на поверхности серебряного покрытия пленка Ag₂O обеспечивает необходимое растекание припоев на основе олова и свинца при пайке.

В данной главе рассмотрены способы восстановления сульфида серебра. Известно, что серебро обладает большим сродством к ионам серы, что объясняет образование сульфида серебра даже с незначительным их количеством. Присутствие сероводорода в атмосфере активизирует образование на поверхности серебра сульфида серебра



Образование Ag₂S сопровождается потемнением поверхности серебра и увеличением электрического сопротивления. При низких температурах пленки Ag₂S фактически становятся электроизоляционными. Даже при комнатной температуре удельная электропроводность пленок сульфида серебра толщиной 60 мкм составляет всего 0,1÷0,6 Ом/м, что существенно повышает переходное сопротивление контактных пар, особенно при небольших напряжениях и токах.

Механическое удаление и химическое растворение сульфидной пленки, например, в азотной кислоте или в цианистых растворах не предотвращают процесса повторного образования Ag_2S .

С целью защиты серебра от воздействия серосодержащих соединений и потемнения поверхности рекомендованы различные способы, одним из которых является нанесение гальванических тонких пленок золота, палладия и родия (0,5-1,0 мкм). В образующейся системе серебряная основа – гальванопокрытие, токоведущими компонентами выступают верхние слои указанных металлов, серебро же не работает как контактный материал, а лишь ухудшает электрические свойства контактных металлов, диффундируя через поверхностные слои и образуя сульфидные и оксидные пленки.

Другим способом защиты является нанесение хроматных пленок, полученных из растворов CrO_3 , что сопровождается повышением переходного сопротивления покрытия в 50 раз, а из раствора хромата калия – в два раза. Неравномерные хроматные пленки дают большой разброс значений переходного сопротивления.

Для очистки поверхности серебра от сульфидных пленок может быть рекомендован метод термического водородного восстановления, который широко применяют для получения чистых металлов из их оксидов и солей. Например, серебро получают водородным восстановлением из хлорида серебра. Восстановление серебра водородом из сульфида серебра протекает в соответствии с реакцией



Однако из термодинамических расчетов следует, что эта реакция в стандартных условиях не идет, поскольку изменение свободной энергии Гиббса $\Delta G^0 > 0$ ($\Delta G^0 = 13,44$ кДж). Используя значения стандартных энтальпий и энтропий, участвующих в реакции веществ, можно рассчитать изменение энтальпии, энтропии и температуру равновесного состояния или начала реакции:

$$\Delta H_p^0 = \Delta H_{H_2S}^0 - \Delta H_{Ag_2S}^0 = -20,15 \text{ кДж} + 32,8 \text{ кДж} = 12,65 \text{ кДж}.$$

Видно, что $\Delta H > 0$, т.е. реакция эндотермическая.

$$\begin{aligned} \Delta S^0 &= (2S_{Ag}^0 + S_{H_2S}^0) - (S_{Ag_2S}^0 - S_{H_2}^0) = \\ &= (2 \cdot 42,69 + 205,64) - (144 - 130,6) = 16,42 \text{ Дж} / \text{К}. \end{aligned}$$

Температура равновесного состояния равна

$$T = \frac{\Delta H}{\Delta S} = \frac{12,65}{16,42 \cdot 10^{-3}} = 770,4 \text{ К} = 497,4^\circ \text{С}.$$

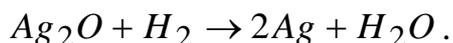
Таким образом, для проведения реакции восстановления сульфида серебра водородом необходимо повышать температуру от $497,4^\circ \text{С}$.

Очистить поверхность серебра от пленки Ag_2S можно и другим способом, например, в атмосфере кислорода:



Эта реакция может протекать даже в стандартных условиях, поскольку $\Delta G^0 < 0$ ($\Delta G^0 = -259,57$ кДж). С заметной скоростью она протекает при температуре $\sim 400^\circ \text{С}$. Однако в избытке кислорода серебро частично окисляется.

Для удаления оксидной пленки возможно восстановление серебра в водородной среде по реакции



Для этой реакции $\Delta G^0 < 0$ ($\Delta G^0 = -217,98$ кДж) в стандартных условиях.

На основании вышеизложенного можно заключить, что восстановление серебра из сульфида серебра целесообразно проводить в среде кислорода с последующим восстановлением оксидной пленки в водороде.

Таким образом, технология подготовки траверс корпусов с серебряным покрытием к операции разварки внутренних выводов должна включать две последовательно выполняемые операции:

1. Перед пайкой кристаллов на основания корпусов проводят отжиг корпусов в кислороде при температуре $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 30 мин.
2. Пайку кристаллов осуществляют в водородной конвейерной печи при температуре $390 \pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

После пайки кристаллов разварку алюминиевых выводов к контактными площадкам кристалла и траверсы корпуса проводят ультразвуковой сваркой.

Подготовка золотой фольги и позолоченных корпусов ППИ к сборочным операциям. Известно влияние обработки золотых пленок корпусов ППИ лазерным излучением неодимового ОКГ на механическую прочность и воспроизводимость качества ультразвуковой микросварки алюминиевой проволокой. Повышение качества микросварных соединений происходит за счет десорбции органических загрязнений и естественной оксидной пленки с поверхности золотого покрытия. Оптимальная мощность лазерной обработки золотых пленок $q = (1,85 - 2,75) \cdot 10^4\text{ Вт/см}^2$ позволяет существенно стабилизировать процесс микросварки и улучшить параметры соединений Al-Au.

Органические загрязнения и естественные оксидные пленки на поверхности соединяемых деталей как при пайке, так и при сварке существенно влияют на процесс образования и развития физического контакта в зоне соединения. Одним из методов подготовки позолоченных деталей к сборочным операциям является комплексное воздействие ультрафиолетового излучения с плотностью потока $1,2 \cdot 10^{-2}\text{ Вт/см}^2$ на длине волны $0,2537\text{ мкм}$ и озона (расход кислорода – $0,8\text{ л/мин}$) на поверхность золотых пленок. При облучении

ультрафиолетовым излучением и озоном золотых пленок в течение 6 ч толщина поверхностных органических пленок уменьшается с 1,2 до 0,4 нм.

Присоединение кристаллов кремниевых дискретных ППИ и ИС к корпусу может осуществляться следующим способом: размещают золотую фольгу между кристаллом и корпусом и соединяют их пайкой с образованием эвтектики золото – кремний. При этом поверхность фольги предварительно подвергают химическому травлению в растворе соляной кислоты при определенном режиме.

Основным недостатком данного способа является использование химического травления в растворе соляной кислоты. После этого золотая фольга подвергается промывке, а затем сушке при определенных режимах. Данная технология ухудшает экологию производства и не обеспечивает высокого качества очистки поверхности, так как у кислородных соединений золота преобладает кислотный характер, поэтому, например, пленка $\text{AuO}(\text{OH})$ практически не реагирует с разбавленными кислотами.

При пайке кристаллов площадью свыше 9 мм^2 между контактирующими поверхностями возникают локальные области непропаев. Данное явление приводит к неравномерности в распределении электрического тока по площади контакта, способствует увеличению теплового сопротивления соединения и, как следствие, к снижению надежности приборов в целом. Образование локальных участков непроплавки происходит в результате формирования на поверхности золотой фольги естественной оксидной пленки золота толщиной несколько десятков ангстрем. Оксидная пленка препятствует образованию физического контакта между соединяемыми поверхностями при пайке.

Для улучшения смачивания паяемой стороны кристалла на нее наносят золотое покрытие с подслоем из никеля, которое вжигают перед пайкой при температуре 400 - 420 °С. При пайке кристаллов больших размеров в зазор дополнительно вводят фольгу из золота толщиной около 20 мкм.

Режимы контактно-реактивной пайки полупроводниковых приборов и ИС с образованием эвтектики Si-Au приведены в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Режимы контактно-реактивной пайки

№ вар.	Au покрытие, мкм		Температура пайки, °С	Время при-тирки, с	Частота колебаний, Гц
	на кристалле	на корпусе			
1	Без покрытия	3 - 9	410 - 450	1 - 5	1 - 50 или 20 - 60
2	Au (1-2 мкм) с подслоем Ni (0,03 мкм)	3	430 - 450	2 - 3	1 - 4

Для активации соединяемых поверхностей, заключающейся в разрушении оксидных пленок, контактно-реактивную пайку выполняют также с ультразвуковым воздействием (амплитуда 0,05-0,8 мм) на кристалл, в результате чего кристалл получает возвратно-поступательное движение в горизонтальной плоскости и как бы притирается к корпусу, происходит контактное плавление кремния и золота, жидкий сплав перемешивается и процесс соединения кристалла с корпусом ускоряется. Жидкая фаза способствует диспергированию (измельчению) оксидных пленок и их удалению из зоны контакта.

В установках контактно-реактивной пайки столик, на котором подогреваются ножки (держатели), обычно нагревают до температуры 410 ± 10 °С. Оптимальным считается усилие 0,05 - 0,07 Н, прикладываемое к инструменту для контактно-реактивной пайки. Увеличение усилия приводит к образованию сколов и трещин в кристаллах.

Известны данные анализа качества посадки кристаллов ИС на эвтектику золото – кремний. В качестве подложки использовались золоченая лента и корпуса ИС. Средняя толщина золотого покрытия составляла 2,5 мкм. Для анализа качества соединений использовались рентгенотелевизионный микроскоп и металлография. На границе эвтектики с коваровым основанием

обнаружены интерметаллические соединения, образованные железом и кобальтом. На некоторых участках происходит внедрение этого сплава в эвтектику, что способствует ее охрупчиванию, а со временем разрушению соединения.

Повышение качества контакта между кремниевым кристаллом и позолоченной поверхностью корпуса ППИ достигается за счет использования микрорельефа в виде линии глубиной 0,8 - 1,0 мкм на обратной поверхности кристалла. С помощью такого рельефа при пайке происходит разрушение пленки естественного оксида на поверхности золота, что способствует уменьшению локальных непроплавленных областей при формировании эвтектики кремний – золото.

Для снижения в 1,5 раза теплового сопротивления кристалл – основание корпуса разработан способ монтажа кристаллов ИС больших размеров в керамический корпус пайкой с применением прокладки из эвтектического сплава золото – кремний. Площадь прокладки составляет 75 - 80 % от площади кристалла и помещается в нагретый корпус. Высокое качество спая обеспечивается многоступенчатым нагревом корпуса при температуре 80 - 421 °С, выдержкой сборки на позиции монтажа кристалла при температуре 490 °С с последующим пятиступенчатым охлаждением.

Остаточные механические напряжения в кристаллах при эвтектической пайке Si-Au. С увеличением размеров кристаллов серьезную проблему при монтаже эвтектической пайки представляют остаточные механические напряжения (ОМН), возникающие в кристалле и элементах конструкции корпуса из-за различия коэффициентов термического напряжения соединяемых материалов. ОМН при определенных условиях могут привести к механическому разрушению кристалла и эвтектического соединения Si-Au.

Предложен способ снижения ОМН в кристаллах путем повышения податливости паяного шва соединения за счет локальной металлизации монтажной площадки металлокерамических корпусов. Для экспериментов монтаж

кристаллов проводили на керамические подложки с размерами 38×20×0,7 мм, изготовленные из керамики ВК94-1, со сплошной и локально металлизированной монтажными площадками с размерами 10×10 мм. Толщина золотого покрытия монтажной площадки корпусов $(3 - 4) \cdot 10^{-3}$ мм. При локальной металлизации на монтажных площадках выполнялась ортогональная сетка неметаллизированных полос шириной 0,25 мм с шагом 1,7×1,7 мм; 1,37×1,37 мм; 1,15×1,15 мм и 0,74×0,74 мм.

Пайку кристаллов проводили на установке УПК-1 с применением золотой прокладки (ПЗл999,9) толщиной 0,016 мм в размер кристалла. Режимы пайки: температура 420 ± 20 °С с предварительным подогревом подложек до 100 - 120 °С, время – 8 с, сжимающее усилие на кристалл – 0,1 Н. Качество пайки оценивалось по площади смачивания обратной стороны кристаллов.

Хорошее смачивание (90-100 %) площади кристалла имели образцы, полученные при пайке кристаллов на подложки с шагом сетки 1,37×1,37 и 1,15×1,15 мм. Значения максимальных ОМН (в центре кристалла) при пайке кристаллов на различные монтажные площадки подложки приведены в табл. 8.2.

Таблица 8.2

Остаточные механические напряжения в кристаллах при пайке на различные монтажные площадки

Металлизация монтажной площадки	Максимальные ОМН, МПа			
	кристалл 2,99×5,38 мм	кристалл 4×4 мм	кристалл 3,32×7,16 мм	кристалл 5,1×5,1 мм
Сплошная	-51,3±13,9	-73,2±12,3	-56,8±7,7	-60,8±12,3
Локальная (шаг сетки 1,15×1,15 мм)	-37,5±5,6	-51,5±5,4	-33,1±11,5	-36,7±9,1

Из табл. 8.2 видно, что ОМН на поверхности кристалла являются сжимающими и возрастают от краев к центру. Локальная металлизация монтажных площадок металлокерамических корпусов способствует снижению ОМН в кристалле на 20 - 30 %.

Новый способ подготовки золотой прокладки к пайке. Применяется способ крепления полупроводникового кристалла к корпусу через золотую прокладку, которую предварительно шаржируют алмазным порошком с размером зерен 2 - 5 мкм. Давление на кристалл при пайке составляет 0,05 - 0,1 Н.

Для пайки кристаллов большой площади через золотую прокладку рекомендуется производить притирание элементов при температуре около 400 °С. Особенностью данного способа является то, что в центре прокладки на стороне, обращенной к монтируемому кристаллу, проходит полоса выступающего слоя толщиной 5 мкм из сплава Si-Au, занимающая более 70 % площади кристалла.

Оксид золота при взаимодействии с HCl диспропорционирует с образованием комплекса и свободного золота по реакции

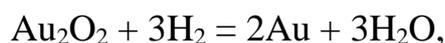


что не способствует повышению качества очистки поверхности.

Для повышения качества соединения кристалла с корпусом, снижения трудоемкости сборочных операций, улучшения качества очистки золотой фольги и экологии производства рекомендуется фольгу перед пайкой отжигать в вакууме при температуре 160 - 250 °С или в водороде в стандартных условиях (температура 25 °С, атмосферное давление 101 КПа).

Оксиды золота – твердые, амфотерные, не взаимодействующие с водой вещества, свободная энергия Гиббса $\Delta G_{\text{Au}_2\text{O}_3}^\circ$ составляет 78,7 кДж/моль. При 155 °С Au_2O_3 переходит в Au_2O .

Водородное восстановление золота из оксидов происходит по реакции



$$\Delta G^\circ_{\text{реакции}} = 3\Delta G^\circ_{\text{H}_2\text{O}} - \Delta G^\circ_{\text{Au}_2\text{O}_3} = 3(-228,6) - 78,7 = -764,5 \text{ кДж},$$

т. е. $\Delta G^\circ < 0$.



$$\Delta G^\circ_{\text{реакции}} = 2\Delta G^\circ_{\text{H}_2\text{O}} - \Delta G^\circ_{\text{AuO(OH)}} = 2(-228,6) + 350 = -107,2 \text{ кДж},$$

т. е. $\Delta G^\circ < 0$.

Так как свободная энергия Гиббса $\Delta G^\circ < 0$, то восстановление золота из оксидов может протекать в стандартных условиях.

Температура разложения (диссоциации) оксидов золота Au_2O_3 составляет 155-160 °С, а Au_2O – 250 °С. Наибольший эффект восстановления золота из оксидов достигается путем отжига золотой фольги или деталей ППИ с золотым покрытием в вакууме при температуре 160 - 250 °С.

Таким образом, использование предлагаемого способа присоединения кристаллов кремниевых дискретных ППИ и ИС к корпусу с образованием эвтектики кремний – золото обеспечивает по сравнению с существующими способами следующие преимущества: повышение качества соединения кристалла с корпусом; снижение трудоемкости сборочных операций; повышение качества очистки золотой фольги; улучшение экологии производства.

МЕТОДЫ СОВМЕЩЕНИЯ ШАРИКОВЫХ ВЫВОДОВ С КОНТАКТНЫМИ ПЛОЩАДКАМИ

Перенос токопроводящих шариков припоя на контактные площадки кристалла может осуществляться с помощью переводной пластины из кремния. Пластина имеет углубления трапециевидной в сечении формы, по расположению точно соответствующие позициям площадок на Si-пластине со структурами ППИ. После оксидирования поверхности переводной пластины в ее полости укладываются шарики припоя, а затем на нее сверху кладется пластина с ППИ, площадки которых имеют золоченую поверхность с подслоями Ni, Cu и Cr. При нагреве сборки и расплавления припоя шарики переходят на контактные площадки ППИ в форме припойных выступов. Высокая точность переноса шариков припоя достигается применением одинакового материала пластин (Si), не приводящего к рассовмещению площадок и полостей при их совместном нагреве.

Для формирования шариковых контактов на подложке, используемой для обращенного монтажа нескольких кристаллов ППИ, используется специальная пластина из несмачиваемого припоем материала, например алюминия, содержащая матрицу полусферических углублений, расположенных соответственно контактными площадкам на подложке. В углублениях пластины размещают шарики из припоя. Затем подложка накладывается на пластину с высокой точностью совмещения ее контактных площадок с шариками, которые присоединяются к ним термокомпрессионной сваркой или пайкой.

Формирование столбиковых выводов на контактных площадках коммутационных подложек может производиться с помощью легкорастворимой полимерной пленки-носителя. Пленку с выводами получают литьем из раствора на основе алифатического мономера акрилата или акрилового полимера либо

на основе стеариновых пластиков. В пленке пробиваются сквозные конические отверстия, которые заполняются припойной пастой или расплавленным припоем. После этого пленка совмещается с подложкой и происходит оплавление припоя. Эта операция может быть совмещена с монтажом компонентов. Затем пленка растворяется. Данный способ позволяет одновременно формировать с высокой точностью на подложках сотни и тысячи выводов.

Для получения паяных выступов на кристалле поверхность пластины кремния со структурами ИС защищается пленкой полиимида, в которой вскрываются окна небольшого диаметра над контактными площадками. На пленке равномерно по всей площади кристалла формируются контакты большего диаметра намазыванием пасты через трафарет из тонкой стальной сетки. Нанесенная металлизация на пластине сушится при температуре около 165 °С в течение 30 мин. Затем на контакты устанавливаются шарики из припоя, которые расплавляются нагревом пластины до температуры их плавления.

Для контроля положения столбиковых выводов в процессе монтажа методом «flip-chip» структуру на подложке освещают от двух независимых источников наклонными лучами. Положение определяют, контролируя ориентацию теней от выводов на поверхности подложки относительно направления падения света.

Разработан сверхминиатюрный процесс перевернутого монтажа полупроводниковых кристаллов на поверхность подложки. Данная технология предусматривает использование шариков припоя диаметром 0,01 мм, что позволяет уменьшить расстояние между контактами до 50 мкм. Процесс сборки применяется при наличии на поверхности подложки двухуровневой системы металлизации, что позволяет использовать кристаллы, содержащие до 3000 контактных площадок.

Установка и фиксация на подложке полупроводниковых кристаллов.

Для установки и фиксации полупроводниковых кристаллов в заданном

положении на подложке разработан специальный способ (А.с. СССР № 1518834). Суть данного способа заключается в следующем. На поверхность диэлектрической подложки 1 наносят схемные соединения, имеющие контактные площадки 2, предназначенные для присоединения полупроводниковых кристаллов 3 (рис. 9.1). Каждый из полупроводниковых кристаллов 3 помещают в углубление ячейки 4, которую выполняют из материала с магнитными свойствами. Ячейку 4 устанавливают на столик 5 горизонтального и вертикального перемещения, а кристалл удерживают в ячейке, например, с помощью вакуума.

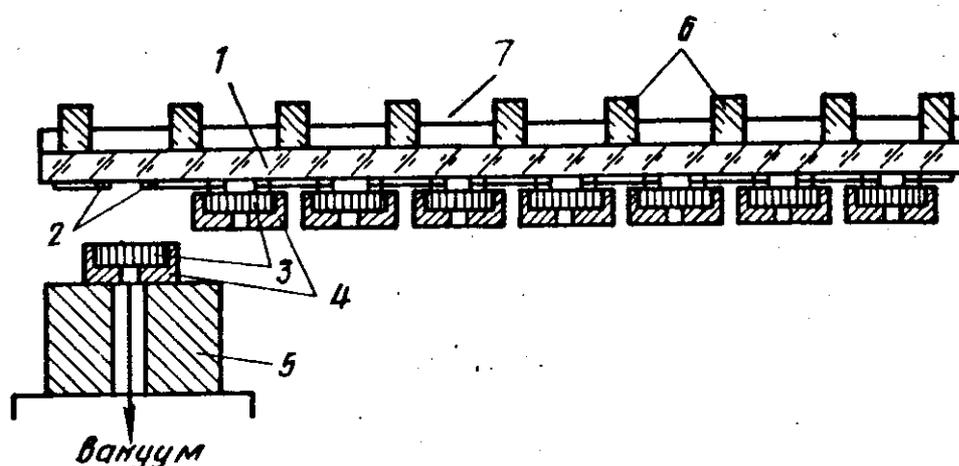


Рис. 9.1. Установка и фиксация на подложке полупроводниковых кристаллов:

- 1 – диэлектрическая подложка; 2 – контактные площадки;
- 3 – полупроводниковые кристаллы; 4 – ячейки с углублениями;
- 5 – столик; 6 – постоянные магниты; 7 – прокладки

Перемещая столик 5 в верхнее положение, осуществляют совмещение контактных площадок кристалла с контактными площадками 2 на подложке, ячейку 4 с находящимся в ее углублении кристаллом 3 предварительно крепят на подложке 1 постоянным магнитным полем, а потом отключают вакуум от столика 5.

Постоянное магнитное поле формируют следующим образом. На поверхность диэлектрической подложки 1 устанавливают постоянные магниты

б таким образом, что плоскость каждого последующего магнита, прилегающего к поверхности подложки 1, имеет противоположный полюс по отношению к плоскости предыдущего магнита, причем постоянные магниты б разделяют друг от друга прокладками 7, которые создают зазор между магнитами для установки кристаллов. Зазор между магнитами определяется габаритными размерами кристаллов.

Таким образом, предварительно крепят на подложке 1 последовательно один за другим все кристаллы. Жесткое присоединение всех кристаллов на подложке осуществляют путем термонагрева, после чего постоянные магниты б убирают. Термонагрев осуществляют инфракрасным излучением со стороны постоянных магнитов б.

В результате кратковременного ИК-нагрева осуществляются плавление соединяемых контактных площадок кристаллов и контактов подложки и их припайка.

Нагрев подложки с кристаллами благодаря кратковременному ИК-воздействию на подложку и перемещению подложки в зоне обработки исключает перегрев кристаллов.

С целью повышения надежности и производительности присоединение всех кристаллов осуществляется одновременно. Термонагрев ведется по всей поверхности диэлектрической подложки со стороны пластин из магнитного материала.

Способ совмещения и монтажа кремниевого кристалла на плату. Технология данного способа монтажа кремниевого кристалла на плату заключается в следующем (патент РФ на изобретение №2003204). Кристалл 1, имеющий область активных элементов 2, а также контактные площадки 3, сформированные на защитном слое 4, размещен на плате 5, имеющей токоведущие дорожки 6 с контактными площадками платы, сформированными на верхнем слое платы 5 (рис. 9.2).

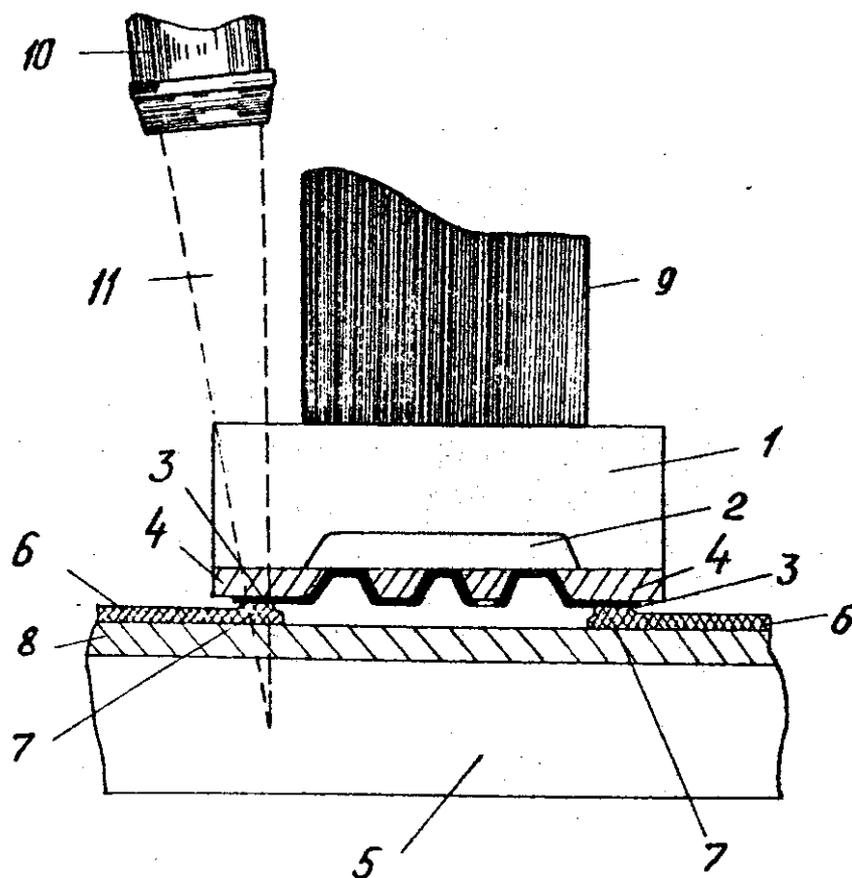


Рис. 9.2. Схема совмещения и монтажа кремниевого кристалла на плату:

1 – кристалл; 2 – активные элементы; 3 – контактные площадки;
 4 – защитный слой; 5 – плата; 6 – токоведущие дорожки; 7 – контактные площадки платы; 8 – верхний слой платы; 9 – контактный инструмент;
 10 – лазер; 11 – излучение лазера

Кристалл размещен так, что контактные площадки совмещены с соответствующими контактными площадками 7 и прижат к плате с определенным усилием штоком контактного инструмента 9. Механический прижим кристалла к плате с помощью штока монтажного инструмента должен обеспечивать механическое соединение всех контактных площадок и утолщений дорожек в местах контактирования.

Лазер 10 способен генерировать излучение 11, для которого материал кристалла прозрачен, а материал защитного слоя и материал верхнего слоя 8 платы непрозрачны и являются поглощающими.

Сварка расплавлением контактных площадок кристалла и контактных площадок платы производится путем облучения излучением лазера защитного слоя кристалла и верхнего слоя платы в областях, непосредственно прилегающих к свариваемым контактам. Поглощенное защитными слоями излучение трансформируется в тепло, которое за счет теплопередачи переходит контактными площадкам кристалла и контактными площадкам платы и расплавляет их. Следует отметить, что контактные площадки платы зеркально-симметричны контактными площадкам кристалла.

Шток монтажного инструмента, прижимающего кристалл к плате не должен препятствовать прохождению излучения в области сварки, но должен затенять от излучения область активных элементов. Для этого шток может иметь, например, квадратное или прямоугольное сечения.

Лазерное излучение фокусируют в зоне совмещения контактных площадок.

ВХОДНОЙ КОНТРОЛЬ КРИСТАЛЛОВ И КОРПУСОВ ПЕРЕД ОПЕРАЦИЕЙ СБОРКИ

Корпус служит для защиты полупроводникового кристалла от различных факторов окружающей среды, включая повышенную влажность, механические нагрузки, электромагнитные излучения, воздействие агрессивных химических веществ и т.д. Он должен обеспечивать коммутацию электрических сигналов и подвод электропитания к кристаллу, отводить выделяемое им тепло, допускать проверку электрических параметров схемы и применение высокопроизводительных, в том числе автоматизированных, процессов сборки ИМС и их монтажа в аппаратуру. Корпус ИМС должен сохранять ее работоспособность при повышенных (до 125 °С и более) и пониженных (до -60°С) температурах. Такие разнообразные функции корпусов довольно жестко регламентируют номенклатуру используемых материалов, а также основные конструктивно-технологические решения, которые лежат в основе их классификации.

Корпусы принято делить на керамические (металлокерамические), металлостеклянные, стеклокерамические и пластмассовые. Классификация корпусов ППИ представлена на рис. 10.1.

Типы корпусов имеют свои достоинства и недостатки (табл. 10.1). Принято считать, что наиболее надежными являются керамические корпуса, несколько уступают им металлостеклянные и стеклокерамические. По способу герметизации корпуса ППИ делят на сварные, паяные и герметизируемые стеклоприпоем.

Под пластмассовыми корпусами понимают такой способ сборки, когда кристалл монтируется на выводную рамку, а затем герметизируется заливкой жидкими компаундами или опрессовкой порошкообразными пресс-композициями. При этом корпус образует с кристаллом монолитное (без внутреннего воздушного объема) тело.



Рис. 10.1. Классификация корпусов ИМС

Таблица 10.1

Качественная оценка характеристик типов корпусов ППИ

Характеристика	Тип корпуса			
	керамический	металло-стеклянный	стеклокерамический	пластмассовый
Сопротивление тепловому удару	В	С	С	Н
Сопротивлению механическому удару	В	Н	С	С
Стойкость к химическим реагентам	В	С	Н	Н
Герметичность, м ³ ·Па/с	В	В	С	Н
Проводимость выводов	Н	В	В	С
Стоимость	Н	С	В	Н

Примечание: В, С, Н – высшая, средняя и низшая оценки, соответственно.

При разработке регулирующего воздействия, связанного с коррекцией методов или условий проведения отбраковочных испытаний, вырабатывае-

мых на основе информации о причинах отказов ИС, учитывается взаимосвязь между причинами отказов и видами отбраковочных испытаний, с помощью которых выявляются эти виды отказов, приведенных в табл. 10.2 и 10.3.

Таблица 10.2

Отбраковочные испытания для выявления отказов,
связанных с дефектами кристаллов

Вид отказов	Отжиг с целью стабилизации параметров	Термоциклирование или тепловой удар	Постоянное ускорение или механический удар	Режим С* и температура	Режим Д** и температура	Дефектоскопия
Загрязнение поверхности	X			X	X	
Инеродные частицы			X			X
Инверсионные каналы	X			X		
Несовершенство структуры кристалла	X	X			X	
Трещина на кристалле		X	X		X	
Точечные поры в оксиде		X		X	X	
Несовершенство структуры оксидной пленки		X			X	
Пробои в оксиде		X		X	X	
Дефекты пассивации		X			X	
Диффузионные аномалии				X	X	
Диффузионные включения				X	X	
Дефекты фотолитографии					X	
Открытые участки металлизации		X		X	X	
Замыкание металлизации		X		X	X	
Электромиграция					X	

Примечание. С* — статический режим, Д** — динамический режим.

Контроль кристаллов после разделения пластины. Одной из важнейшей при создании полупроводниковых приборов является операция нанесения на полупроводниковую пластину диэлектрических и металлических покрытий. Из-за разности коэффициентов линейных термических расширений металлических покрытий и кремниевой пластины металлические покрытия находятся в постоянном напряженном состоянии. Наличие напряжений приводит к прогибу кремниевых подложек, что затрудняет процессы литографии из-за наличия зазора между элементами схемы с фотошаблонами.

Напряжения в металлических покрытиях σ можно определить по прогибу пластины по известной формуле Стоуни

$$\sigma = \frac{1}{6} \frac{E}{1-\gamma} \frac{d^2}{t} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right),$$

где E – модуль Юнга кремниевых подложек; d – толщина подложки; γ – коэффициент Пуассона подложки; t – толщина металлического покрытия; R_1 и R_2 – радиусы кривизны подложки до и после осаждения металлического покрытия.

Радиус кривизны подложки рассчитывается после замера прогиба кремниевых полупроводниковых подложек по формуле

$$R = l^2 / 8 \sigma,$$

где l – расстояние между крайними точками измерений на подложке; σ – прогиб кремниевой подложки.

Разделение пластин на кристаллы производят созданием между кристаллами взаимно перпендикулярных разделительных канавок (резов) и последующей ломкой пластины.

Разделение пластин на кристаллы включает в себя две основные операции: скрайбирование и разламывание. В некоторых случаях перед скрайбированием осуществляют утонение пластин, что повышает процент выхода годных на данной операции.

Разделение пластин на кристаллы осуществляется следующими методами: алмазным резцом (скрайбером) при толщине реза не более 25 мкм; лазерным лучом; ультразвуковым скрайбером с мелкодисперсной абразивной суспензией; специальным травителем (селективное травление); резкой диском (глубина реза составляет не менее $2/3$ исходной толщины пластины); воздействием лазерного излучения. Наибольшее распространение получили алмазные и лазерные скрайберы.

Основным недостатком метода скрайбирования алмазным резцом является относительно невысокий выход годных кристаллов ИС, в том числе и по количеству неразделенных блоков кристаллов. Одной из причин данного дефекта является наличие пленочной металлизации на обратной стороне пластины. Кроме того, при разламывании проскрайбированных пластин на кристаллы в некоторых случаях происходит отслоение металлизации по краям кристаллов.

При изготовлении тонкопленочных структур для получения пленочных резисторов, конденсаторов, межсоединений и контактных площадок заданных размеров нанесение пленок производят методом свободной маски (трафарета), выполненной в виде тонкой металлической фольги с прорезями и отверстиями, очертания и расположения которых соответствует конфигурации пленочных элементов ППИ. Основным недостатком данного метода является то, что формирование пленочных элементов ППИ происходит на лицевой стороне кристаллов в составе пластин. При последующем разделении пластины на кристаллы возможно появление брака по причине отслоения пленок по периметру кристалла.

Трафареты должны иметь высокую точность размеров прорезей, прочными и упругими, обладать высокой чистотой поверхности и плоскостностью для плотного прилегания к полупроводниковой пластине.

Наиболее приемлемым материалом для изготовления масок (трафаретом) является молибденовая фольга толщиной 0,1 – 0,15 мм, которая выдерживает высокие температуры и не взаимодействует с пастой.

Металлические трафареты изготавливают любым известным способом: механическим фрезерованием, химическим и электрохимическим травлением, лазерным или электронным лучом и фотолитографией.

Пластина ориентируется относительно шаблона, например, по базовому срезу края пластины или по реперным точкам.

Новый способ повышения качества кристаллов при разделении пластины. В технологии производства полупроводниковых изделий широко применяется способ напыления пленочной металлизации на обратную поверхность кристаллов в составе пластины. После напыления проводят отжиг и разделение пластин на кристаллы. Предлагается с целью повышения качества металлизации на обратной стороне кристаллов после разделения пластины напыление осуществлять через трафарет, имеющий сквозные отверстия, формы и размеры которых идентичны размерам кристалла, а перемычки между отверстиями в трафарете соизмеримы с шириной разделительных дорожек между кристаллами лицевой стороны пластины (рис. 10.2).

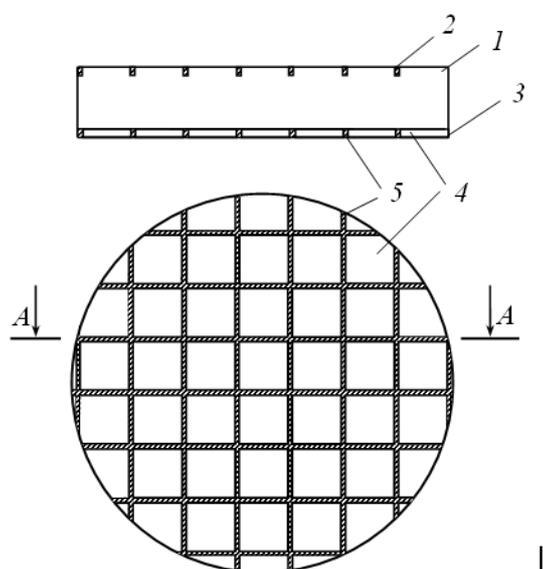


Рис. 10.2. Схема напыления пленочной металлизации на обратную поверхность кристаллов в составе пластины: 1 – кристаллы на пластине, 2 – разделительная дорожка между кристаллами; 3 – трафарет, 4 – отверстия в трафарете; 5 – перемычки между отверстиями в трафарете

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Надежность радиоэлектронной аппаратуры зависит от комплектующих изделий. При решении вопросов о надежности комплектующих изделий (полупроводниковых приборов, ИС и т.п.) в первую очередь необходимо рассматривать технологию сборки, так как в РЭА около 50 % всех отказов приходится на контактные соединения. Формирование качественных соединений в тех или иных полупроводниковых изделиях зависит от свойств материалов кристаллов и корпусов, покрытий контактных площадок. Большое значение при этом имеет правильный выбор способов и технологий подготовки к сборочным операциям кристаллов и корпусов, присоединяемых внутренних выводов.

В последние годы бурно развивается производство трехмерных ИС (3D-сборок). Вертикальное размещение кристаллов способствует многократному сокращению затрат на производство ИС по сравнению с традиционными 2D ИС при той же технологии производства. При монтаже одного типа 3D-сборки могут использоваться несколько технологий сборки, включая пайку, сварку и приклеивание.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карбид кремния в производстве приборов силовой электроники / В.В. Зенин, А.В. Строгонов, А.В. Кочергин и др. // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2009. Т.5. № 4. С. 107 - 111.
2. Кремниевые многокристалльные модули – приоритетные направления развития быстродействующей РЭА / А.С. Глухов, А.Н. Кастрюлев, В.М. Микитин и др. // Электронная промышленность. 1994. № 4 - 5. С. 61.
3. Конструирование гибких и гибко-жестких печатных плат / А. Медведев, Г. Мылов, П. Семенов и др. // Компоненты и технологии. 2008. № 6. С. 147 – 160.
4. Гибкие платы. Преимущества и применение / А. Медведев, Г. Мылов, Ю. Набатов и др. // Компоненты и технологии. 2007. № 9. С. 202 – 208.
5. Нака К. LFC – технология производства керамических подложек для автомобильной промышленности / К. Нака // Компоненты и технологии. 2007. № 5. С. 170 – 171.
6. Материалы для металлизации кремниевых СБИС / А.Г. Климовицкий, Д.Г. Громов, В.Л. Евдокимов и др. // Электронная промышленность. 2002. № 1. С. 60 - 66.
7. Горлов М.И. Контроль стабильности алюминиевой металлизации к явлению электромиграции по резистометрическим измерениям / М.И. Горлов, В.И. Плебанович, А.В. Строгонов // Микроэлектроника. 2006. Т. 35. № 4. С. 277 - 284.
8. Смолин В.К. Особенности применения алюминиевой металлизации в интегральных схемах / В.К. Смолин // Микроэлектроника. 2004. Т. 33. № 1. С. 10 - 16.
9. Красников Г.Я. Физико-технические основы обеспечения качества СБИС / Г.Я. Красников, Н.А. Зайцев. М., 1999. Ч. 2. 216 с.
10. Исследование микросварных соединений алюминиевой проволоки с алюминиевым гальваническим покрытием корпусов полупроводниковых

изделий / В. Зенин, А. Колычев, Б. Спиридонов и др. // Технологии в электронной промышленности. 2006. № 2. С. 52 - 54.

11. Покрытия кристаллов и корпусов ИЭТ для пайки бессвинцовыми припоями / В.В. Зенин, Ю.Л. Фоменко, А.В. Рягузов и др. // Шумовые и дегра-
дационные процессы в полупроводниковых приборах: материалы докл. между-
науч. науч.-техн. семинара. М., 2003. С. 283 – 288.

12. Тюхин А.А. Требования к покрытиям корпусов ИС и ПП в зарубеж-
ной технике / А.А. Тюхин, А.А. Чернышов, Л.И. Лындаева // Перспективные
покрытия электрических соединений и корпусов для ИС и ПП: сб. матер.
науч.-техн. семинара, 1991. С. 18 – 25.

13. Исследование процесса электроосаждения и структуры покрытий
сплавом олово-никель / В.В. Зенин, Б.А. Спиридонов, Н.Н. Березина и др. //
Технологии в электронной промышленности. 2007. № 7. С. 30 – 32.

14. Исследование алюминиевых гальванических покрытий корпусов по-
лупроводниковых изделий / В.В. Зенин, А.И. Колычев, Б.А. Спиридонов и др.
// Технологии в электронной промышленности. 2006. № 1. С. 66 – 69.

15. Медведев А. Иммерсионное олово. Прошлое и будущее / А. Медве-
дев, С. Шкундина // Технологии в электронной промышленности. 2010. № 3. С.
22 – 27.

16. Палатник Л.С. Материаловедение в микроэлектронике / Л.С. Палат-
ник, В.К. Сорокин. М.: Энергия, 1977. 280 с.

17. Григорьев В. Бессвинцовые технологии – требование времени или
прихоть законодателей от экологии? / В. Григорьев // Электронные компо-
ненты. 2001. № 6. С. 72 – 78.

18. Медведев А.М. Бессвинцовые технологии монтажной пайки. Что
нас ожидает? / А.М. Медведев // Электронные компоненты. 2004. № 11.
С. 5 – 8.

19. Готра З.Ю. Технология микроэлектронных устройств: справочник /
З.Ю. Готра. М.: Радио и связь, 1991. 528 с.

20. Технология СБИС / под ред. С. Зи. М., 1986. Кн. 1. 404 с.

21. Технология СБИС / под ред. С. Зи. М., 1987. Кн. 2. 453 с.
22. Тугов Н.М. Полупроводниковые приборы: учебник для вузов / Н.М.Тугов, Б.А. Глебов, Н.А. Чарыков; под ред. В.А. Лабунцева. М.: Энергоатомиздат, 1990. 576 с.
23. Бессвинцовые припои в технологии производства изделий микроэлектроники / В.В. Зенин, В.Н. Беляев, Ю.Е. Сегал и др. // Микроэлектроника. 2003. Т. 32. № 4. С. 310 – 320.
24. Шапиро Л. Внедрение европейской директивы ROHS / Л. Шапиро // Электронные компоненты. 2006. № 1. С. 9 – 12.
25. Щеголева И. Компания АІМ решает проблемы перехода на бессвинцовую пайку / И. Щеголева // Производство электроники: Технологии, оборудование, материалы. 2006. № 2. С. 1 – 3.
26. Пайка оплавлением: краткий справочник по бессвинцовой пайке: [Http://www.sovtest.ru](http://www.sovtest.ru).
27. Пайка без свинца. Bleifrei loten: Silber und Kupfer statt Blei. Krem-pelsauer. Elektor (BRD). 2000. № 5. Р. 14 – 15.
28. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник: в 3 т. / под общ. ред. Н.П. Лякишева. М.: Машиностроение, 2001. Т. 3. Кн. 2. 448 с.
29. Хансен М. Структуры двойных сплавов: справочник: В 2 т. / М. Хансен, К. Андерко; под ред. И.И. Новикова, И.Л. Рогельберга. М.: Металлургиздат, 1962. Т.1. 609 с.
30. Вихарев Л. Как нужно работать, чтобы не сгореть на работе, или Кратко о методах и средствах охлаждения РЭА / Л. Вихарев //Силовая электроника. 2005. № 4. С. 54 – 59.
31. Ланин В. Алмазные теплоотводы для изделия электроники повышенной мощности / В. Ланин, Е. Телеш //Силовая электроника. 2008. № 3 . С. 120 – 124.
32. Колпаков А. Охлаждение в системах высокой мощности / А. Колпаков //Силовая электроника. 2010. № 3. С. 62 – 66.

33. Шульц-Хардер Ю. В поисках идеального решения: жидкостное охлаждение в современных компактных корпусах высокой мощности / Ю. Шульц-Хардер, С. Валев // Силовая электроника. 2005. № 3. С. 92 – 95.

34. Исламгазина Л. Применение различных материалов, обеспечивающих оптимальные тепловые режимы силовых полупроводниковых приборов / Л. Исламгазина // Силовая электроника. 2005. № 3. С. 96 – 99.

35. Скоков С. Fiscer Elektronik – почему анодированные радиаторы дороже? / С. Скоков // Силовая электроника. 2005. № 3. С. 100 – 101.

36. Изолирующие теплоотводы на основе CVD-алмаза для силовой электроники / В.Б. Вяхирев, М.П. Духновский, А.К. Ратникова и др. // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2009. Вып. 3 (502). С. 37 – 40.

37. Линдер С. Силовые полупроводниковые приборы. Ч. 2. Технология корпусов и перспективные разработки / С. Линдер // АББ Ревю. 2007. № 1. С. 62 – 66.

38. Шульц-Хардер Ю. Медно-керамические подложки DBC: новые возможности, перспективы и проблемы создания нового поколения изделий силовой электроники / Ю. Шульц-Хардер, С. Валев // Компоненты и технологии. 2005. № 3. С. 72 – 75.

39. Большаков А. Теплопроводящие подложки Dow Corning / А. Большаков // Технологии в электронной промышленности. 2008. № 5. С. 54 – 56.

40. Способы охлаждения полупроводниковых изделий и конструкции теплоотводов / В.В. Зенин, Л.В. Квасова, Е.П. Новокрещенова и др. // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2007. Т. 3. № 10. С. 90 – 95.

41. Изготовление контактных выступов из припоя: Заявка 252436 Япония, МКИ Н 01 L 21/321. Заявл. 17.08.88. Оpubл. 22.02.90.

42. Способ создания столбиков припоя на подложке и литниковая система для осуществления способа: Заявка 2792861 Франция, МПК⁷ В 23 К 3/06, Н 05 К 3/34. Заявл. 30.04.99. Оpubл. 03.11.00.

43. Зенин В.В. Способ изготовления контактных столбиков на полупроводниковом кристалле / В.В. Зенин, В.Р. Беляев, Ю.Е. Сегал. Патент 2207660 RU, Н 01 L 23/48. Заявл. 27.12.01. Опубл. 27.06.03. Бюл. № 18.

44. Формирование контактных выступов. Заявка 212919 Япония, МКИ⁵ Н 01 L 21/321 / Мацумура Ясуо; Кансай Ниппон дэнки к. к. – № 63-164563; Заявл. 30.06.1988; Опубл. 17.01.1990 // Кокай токкё кохо. 1990. Сер. 7 (2). № 16. – С. 113 - 116.

45. Веревкин А. Т. Основные результаты опытно-экспериментальной эксплуатации установок формирования микровыводов (УФМ-1) и монтажа кристаллов (УМК-1) / А.Т. Веревкин // Прецизионное оборудование и технологии производства изделий микро- и радиоэлектроники: тез. докл. Минск, 2004. С. 80 – 81.

46. Головин В.М. Устройство для образования шарика при микросварке / В.М. Головин, И.Б. Петухов. Патент 1580692 RU, В 23 К 11/24. Заявл. 06.12.88. Опубл. 30.10.94. Бюл. № 20.

47. А.с. 1289004 СССР, В 23 К 11/24 // В 23 К 101:40. Устройство для образования шарика при микросварке / В.М. Головин, И.Б. Петухов, А.П. Рыздзевский и др. Заявл. 10.06.85. Опубл. 30.09.94. Бюл. № 18.

48. Емельянов В.А. Корпусирование интегральных схем / В.А. Емельянов. Минск: Полифакт, 1988. 360 с.

49. Система металлизации, состоящая из барьерного слоя силицида вольфрама со столбиковыми выводами из припоя Au/Sn эвтектического состава. Au-Sn solder bumps with tungsten silicide based barrier metallization schemes / W. Pittroff, T. Reiche, J. Barnikow et al. // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 67, № 16. – P. 2367 – 2369.

50. Невский А.Б. Особенности конструкции и применения бескорпусных полупроводниковых приборов со столбиковыми выводами из припоя / А.Б. Невский, С.К. Платонов, В.Н. Соколова // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника. 1976. Вып. 1. С. 89 - 91.

51. Воронов И.К. Исследование механизмов отказов столбиковых выводов в интегральных схемах / И.К. Воронов, Р.П. Сейсян // Электронная техника. Сер. 8. Управление качеством, стандартизация, метрология, испытания. 1982. Вып. 3. С. 51 - 55.

52. Создание контактного столбика: Заявка 1256154 Япония, МКИ⁴ Н 01 L 21/92. Заявл. 06.04.88. Оpubл. 12.10.89.

53. Способ изготовления полупроводниковых приборов с объемными выводами: Пат. 1251749 Россия, МКИ⁵ Н 01 L 21/02 / В.М. Панин, А.С. Бодунова, Л.М. Маркман и др. Заявл. 04.03.85. Оpubл. 15.08.94. Бюл. № 15.

54. Патент № 2194597 RU, С1 В 23 К 1/20. Способ подготовки к пайке изделий с серебряным покрытием / В.В. Зенин, Ю.Е. Сегал, В.Н. Беляев. Оpubл. 20.12.2002. Бюл. № 35.

55. Патент № 2274531 RU, С2 В 23 К 20/24. Способ подготовки к сварке изделий с серебряным покрытием / В.В. Зенин, Ю.Е. Сегал, Ю.Л. Фоменко, В.Я. Пьяных, Б.А. Спиридонов, В.А. Шарапов. Оpubл. 20.04.2006. Бюл. № 11.

56. Патент № 229825 RU, С2 Н 01 L 21/58. Способ присоединения кристаллов кремниевых дискретных полупроводниковых приборов и интегральных схем к корпусу с образованием эвтектики кремний – золото / В.В. Зенин, А.В. Рягузов, Б.А. Спиридонов, О.В. Хишко, Т.И. Шарапова. Оpubл. 27.04.2007. Бюл. № 12.

57. Буркат Г.К. Серебрение, золочение, палладирование и родирование / Г.К. Буркат. Л.: Машиностроение, 1984. 86 с.

58. Гальванические покрытия в машиностроении: справочник: в 2 т. / под ред. М.А. Шлугера. М.: Машиностроение, 1985. Т.1. 240 с.

59. Патент RU 2166000 С2 С 23 F 11/00, 11/14. Способ защиты от коррозии микросварных контактов алюминий-золото / В.В. Зенин, Б.А. Спиридонов, Ю.Е. Сегал и др. Заявл. 11.06.1999. Оpubл. 27.04.2001. Бюл. №12.

60. Зенин В.В. Пайка полупроводниковых кристаллов со столбиковыми выводами методом «flip-chip» / В.В. Зенин, Е.П. Новокрещенова, О.В. Хишко

// Вестник Воронежского государственного технического университета. 2007. Том. 3. № 4. С. 190 - 195.

61. Патент № 2003204 RU, Н 01 L 21/60. Способ монтажа кремниевого кристалла на плате / Е.С. Назаров; заявл. 12.12.1990; опубл. 15.11.1993; бюл. № 41 – 42. 4 с.

62. Патент № 1518834 SU, Н 01 L 21/60. Способ монтажа полупроводниковых кристаллов на диэлектрической подложке / А.В. Данилов, А.И. Перелыгин, С.П. Пеков; заявл. 09.07.1987; опубл. 30.10.1989; бюл. № 40. 3 с.

63. Горлов М.И. Технологические отбраковочные и диагностические испытания полупроводниковых изделий / М.И. Горлов, В.А. Емельянов, Д.Л. Ануфриев. – Минск.: Бел. Наука, 2006. – 367 с.

64. Измерения и контроль в микроэлектронике: учеб. пособие для вузов / Н.Д. Дубовой, В.И. Осокин, А.С. Очков и др.; под ред. А.А. Сазонова. М.: Высш. шк., 1984. 367 с.

65. Валентинова М. Воспоминание о будущем. Возврат к меди / М. Валентинова. // Электроника: Наука, технология, бизнес, 1999. № 4. С. 38 - 41.

66. Clarke P. Переход к медным межсоединениям в схемах памяти / P. Clarke // EE Times, 04/16/2010.

67. Исследование барьерных свойств сплава Ta-W-N в составе многослойной системы металлизации ИС / А.Г. Климовицкий, А.И. Мочалов, Д.Г. Громов и др. // Известия вузов. Электроника, 2003. № 5. С. 3 – 8.

68. Использование эффекта понижения температуры плавления тонких пленок меди в процессе заполнения канавок и контактных окон для технологии многоуровневой металлизации кремниевых ИС / Д.Г. Громов, А.Г. Климовицкий, А.И. Мочалов и др. // Известия вузов. Электроника, 2004. № 6. С. 3 – 8.

69. Капица М. Гальваническая металлизация в производстве печатных плат / М. Капица // Технологии в электронной промышленности, 2006. № 2. С. 20 – 24.

70. Meier H. Изменение свойств расплавления в статической и динамической ванне с припоем за счет использования микролегированных припоев / H Meier, W. Kruppa. // Технологии в электронной промышленности, 2010. № 2. С. 18 – 21.

71. Медведев А. Электронные компоненты и монтажные подложки. Постоянная интеграция / А. Медведев. // Компоненты и технология, 2006. № 12. С. 124 - 133.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Глава 1. МАТЕРИАЛЫ КРИСТАЛЛОВ, КОРПУСОВ, ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ И ТЕПЛОТВОДОВ: ФИЗКО- ХИМИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА	4
Глава 2. АЛЮМИНИЕВАЯ МЕТАЛЛИЗАЦИЯ НА КРИСТАЛЛАХ И КОРПУСАХ ППИ	24
Глава 3. МЕТАЛЛИЗАЦИЯ КРИСТАЛЛОВ И КОРПУСОВ СЕРЕБРОМ, ЗОЛОТОМ И ДРУГИМИ МЕТАЛЛАМИ	37
Глава 4. МЕДНАЯ МЕТАЛЛИЗАЦИЯ В КРЕМНИЕВЫХ СБИС	56
Глава 5. ПРИПОИ, В ТОМ ЧИСЛЕ БЕССВИНЦОВЫЕ	63
Глава 6. СПОСОБЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ППИ И КОНСТРУКЦИИ ТЕПЛОТВОДОВ	79
6.1. Способы охлаждения ППИ	79
6.1.1. Механизмы теплопередачи	79
6.1.2. Конструкции радиаторов	80
6.1.3. Принудительные системы охлаждения	83
6.2. Тепловое сопротивление ППИ и пути его снижения	88
6.2.1. Понятие теплового сопротивления	88
6.2.2. Отвод тепла в корпусах ППИ	90
6.2.3. Отвод тепла от корпуса во внешнюю среду	93
Глава 7. НАНЕСЕНИЕ ШАРИКОВЫХ ВЫВОДОВ НА КРИСТАЛЛЫ И ПЛАТЫ	95
Глава 8. СПОСОБЫ ПОДГОТОВКИ К СВАРКЕ И ПАЙКЕ КРИСТАЛЛОВ, КОРПУСОВ И ПЛАТ	110
Глава 9. МЕТОДЫ СОВМЕЩЕНИЯ ШАРИКОВЫХ ВЫВОДОВ С КОНТАКТНЫМИ ПЛОЩАДКАМИ	122
Глава 10. ВХОДНОЙ КОНТРОЛЬ КРИСТАЛЛОВ И КОРПУСОВ ПЕРЕД ОПЕРАЦИЕЙ СБОРКИ	128
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	134
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	135

Учебное издание

Зенин Виктор Васильевич

**ПРОЦЕССЫ СБОРКИ В ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА
3D-ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ**

В авторской редакции

Компьютерная верстка О.А. Ивановой

Подписано к изданию 07.12.2011.

Уч.-изд.л. 7,0.

ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет»

394026 Воронеж, Московский проспект, 14