

ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный
технический университет»

Кафедра полупроводниковой электроники и наноэлектроники

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ по дисциплине

«Проблемы силовой электроники»

для студентов направления

16.04.10 «Техническая физика» (магистерская программа
подготовки «Физика и техника полупроводников»)
очной формы обучения

Воронеж 2014

Составители: д-р техн. наук В.В. Зенин,
аспирант А.И. Землянский

УДК 621.382

Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине “Проблемы силовой электроники” для студентов направления 16.04.10 «Техническая физика» (магистерская программа подготовки «Физика и техника полупроводников») очной формы обучения / ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет»; сост. В.В. Зенин, А.И. Землянский. Воронеж, 2014. 27 с.

В методических указаниях рассмотрены вопросы формирования паяных соединений кристалл-корпус и внутренних соединений между кристаллом и корпусом.

Методические указания предназначены для студентов-магистрантов первого курса магистерской программы «Физика и техника полупроводников» очной формы обучения.

Методические указания подготовлены в электронном виде в текстовом редакторе MS Word 2003 и содержатся в файле СилЭлЛаб.doc.

Табл. 8. Ил.7. Библиогр.: 17 назв.

Рецензент д-р техн. наук, проф. М.И. Горлов

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

Издается по решению редакционно-издательского совета Воронежского государственного технического университета

© ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный
технический университет», 2014

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ОЦЕНКА СМАЧИВАНИЯ И РАСТЕКАНИЯ ПРИПОЯ ПО ПАЯЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Введение. Качество паяных соединений, в том числе и полупроводниковых кристаллов с основаниями корпусов, зависит от способности соединяемых поверхностей при режимах пайки смачиваться припоем. Смачиваемость является первой стадией физико-химического взаимодействия припоя с паяемой поверхностью изделия. Известно, что смачиваемость и растекание припоя непосредственно связаны с краевым углом смачивания θ . Этот угол между поверхностями припоя и паяемым материалом на практике используется для оценки режимов и условий пайки.

Процесс смачивания является контактным металлургическим процессом взаимодействия припоя с поверхностью паяемого материала. Развитие этого процесса зависит как от состояния поверхности контактирующих материалов, характера развивающихся в их контакте процессов взаимодействия, так и режимов пайки.

Смачиваемость паяемого материала расплавленным припоем, находящимся в динамическом состоянии (при пайке погружением или волной припоя), более правильно оценивать не по углу смачивания или площади растекания, а по силе, действующей на образец при его погружении и смачивании припоем. При пайке погружением или волной припоя (особенно при поверхностном монтаже компонентов) важнейшей характеристикой является скорость смачивания.

Растекание расплавленного припоя по паяемой поверхности определяется соотношением сил адгезии припоя к паяемой поверхности и когезии, характеризуемой силами связи между частицами припоя. Наибольшее влияние оказывает характер взаимодействия на границе покрытие – припой, вязкость расплава припоя, его жидкотекучесть. При растекании припоя по поверхности происходит как растворение покрытия припоем, так и насыщение припоя материалами покрытия. Растекание припоя при смачивании, как правило, происходит в две стадии. Первая стадия, которая происходит доли секунды, соответствует быстрому растеканию припоя под действием сил поверхностного натяжения. Форма капли припоя соответствует схеме равновесия жидкого металла на идеально гладкой поверхности. Вторая стадия происходит тогда, когда от жидкой капли припоя растекаются потоки жидкого металла по границам зерен паяемой поверхности. Известно, что если металлы, входящие в состав припоев, имеют различное давление насыщенного пара при температуре пайки, то, по всей видимости, при смачивании имеют место оба указанных механизма.

Смачиваемость покрытий припоем относится к технологическим факторам, позволяющим проводить экспресс-анализ пайки, как способа соединения элементов. Эксплуатационным параметром, позволяющим прогнозировать длительность хранения и эксплуатации изделий в заданных условиях, является прочность паяных соединений.

Оценка смачивания и растекания припоя. При пайке одновременно протекают ограниченные во времени и достаточно сложные процессы взаимодействия: паяемый металл – припой – атмосфера (флюс), состояние равновесия которых, как правило, не достигается.

Большую роль при растекании играет слой припоя, непосредственно прилегающий к покрытию. Этот слой называют «пристеночным слоем», так как его свойства (скорость движения, плотность и термодинамические параметры) существенно отличаются от свойств припоя, расположенного над ним (рис.1).

Для выбора оптимального типа припоя, способа обработки поверхности паяемого материала и режимов пайки необходимо проведение исследований смачиваемости припоев паяемых поверхностей применительно к пайке конкретных изделий.

Исследование смачиваемости можно осуществлять по методу “лежащей капли”. В этом случае для определения величины краевого угла θ пользуются промежуточной величиной-коэффициентом растекаемости K_p , который рассчитывается по формуле $K_p = ((D-H)/D) \cdot 100 \%$,

где D – диаметр сферической капли припоя, мм;

H – высота капли после ее растекания по подложке, мм.

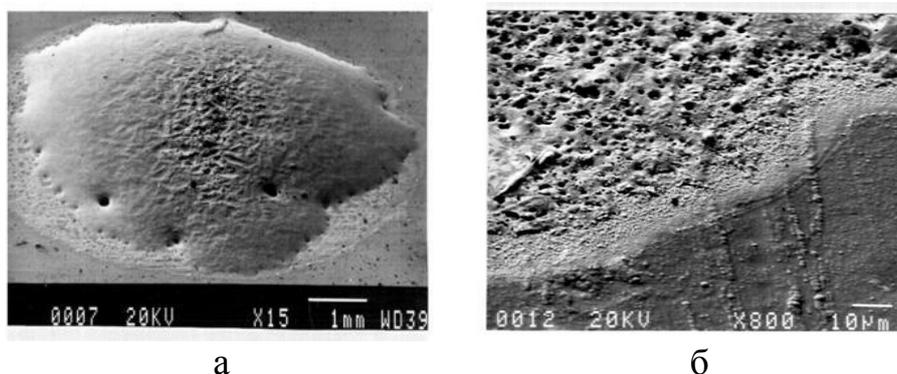


Рис.1. Внешний вид растекания навески припоя ПОС61 диаметром 8,0 мм и толщиной 0,3 мм по различным покрытиям корпуса: а – серебро гальваническое; б – никель химический на границе с припоем

Величину D для сферической капли определяют из выражения

$$D = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot P}{\pi \cdot \gamma}},$$

где P – вес исследуемой навески припоя, г;

γ – удельный вес припоя, г/см³.

Величину H с достаточной точностью измеряют индикатором капли припоя, застывшей на подложке после расплавления. Для измерения высоты капли припоя разработан прибор, в основу которого положен принцип бесконтактного измерения с помощью индуктивного преобразователя.

Зная K_p , с помощью графика определяют соответствующее значение краевых углов θ .

Оценку паяемости покрытий можно провести по растеканию навески припоя согласно ГОСТ 9.302-88. В этом случае коэффициент растекания припоя K_p определяют по формуле

$$K_p = S_p / S_o \times 100\%,$$

где S_p – площадь, занятая припоем после расплавления и растекания, мм²;

S_o – площадь, занятая навеской припоя в исходном состоянии, мм².

По данному ГОСТ исследуемая навеска припоя имеет следующие размеры: диаметр 8 мм и толщину 0,3 мм.

Для практического использования разработана следующая шкала растекаемости припоя по паяемой поверхности в зависимости от краевого угла смачивания (см. таблицу).

Оценка смачивания поверхности припоем

Краевой угол смачивания θ , град	Качество смачивания	Коэффициент растекания K_p , %
> 70	Очень плохое	около 60
70-55	Плохое, удовлетворительное	60-70
55-40	Достаточное	70-80
40-30	Хорошее	80-85
30-20	Очень хорошее	85-90
20-10	Отличное	95-100
10-0	Идеальное	> 100

На рис. 2 представлены поперечные шлифы различных припоев, расплавленных на золотом технологическом покрытии.

Из рис.2 видно, что все припои хорошо смачивают золотое покрытие. В тоже время растекание припоев ПОСК50-18 и ПОИ50 несколько хуже по сравнению с оловянно-свинцовыми припоями.

При анализе качества паяных соединений кристалла с корпусом ППИ навеску припоя для исследований можно выбирать исходя из задаваемого объема припоя в паяном шве.

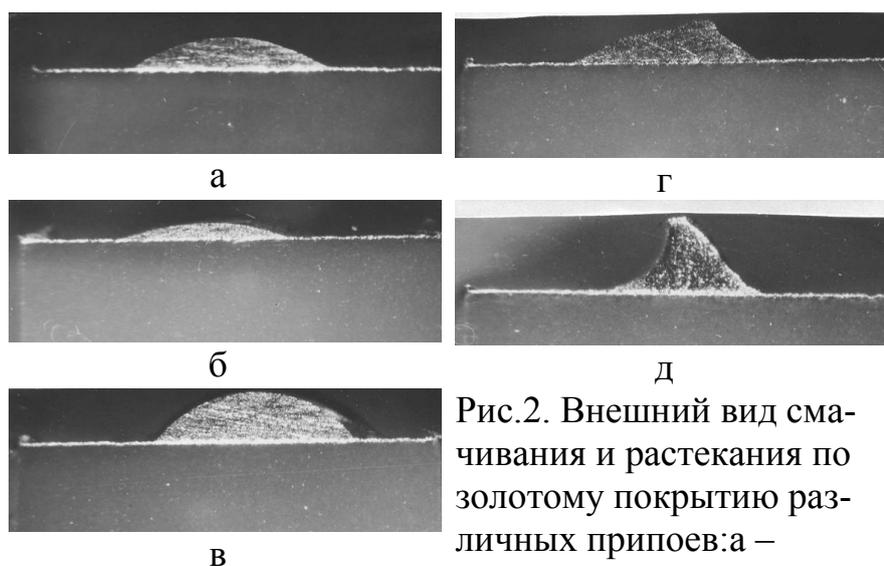


Рис.2. Внешний вид смачивания и растекания по золотому покрытию различных припоев: а – ПОС61; б – ПОС61М; в – ПСрОС3-58; г – ПОСК50-18; д – ПОИ50

Определение времени заполнения зазора между кристаллом и корпусом при капиллярной пайке. Качество пайки во многом зависит от места расположения припоя перед пайкой. Возможно традиционное расположение прокладки припоя непосредственно под кристаллом, однако в процессе пайки оксидные пленки и загрязнения на поверхности прокладки при расплавлении остаются в зоне шва, что ухудшает смачиваемость припоем поверхности кристалла и корпуса, нарушает сплошность шва, а это приводит к ухудшению теплопроводности шва и снижению надежности ППИ.

Для улучшения смачивания припоем паяемой поверхности кристалла и основания корпуса широко используют капиллярный эффект заполнения зазора припоем в процессе пайки кристалла. Перед пайкой в непосредственном касании одной из боковых граней кристалла располагается навеска припоя в виде шарика (рис.3). Детали фиксируются относительно корпуса специальной кассетой. Кассету со сборками помещают в конвейерную водородную печь, где при температуре пайки происходит расплавление припоя, который за счет капиллярных сил заполняет микрозазор между кристаллом и основанием корпуса, смачивает эти поверхности и при кристаллизации образуется паяный шов. Характерной особенностью этого процесса является то, что оксидные пленки и загрязнения остаются за пределами паяного шва - в месте первоначального расположения навески припоя.

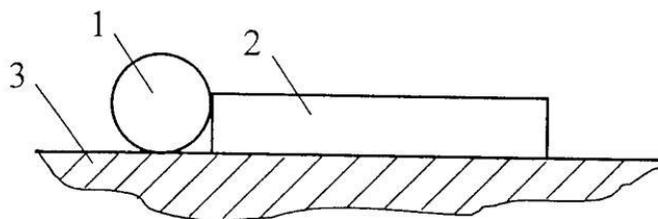


Рис.3. Схема пайки кристалла: 1-припой, 2-кристалл, 3-основание корпуса

При исследовании процесса заполнения капиллярных зазоров при пайке рассматривают движение потока жидкости (припоя) с пуазейлевским профилем скоростей под действием добавочного капиллярного давления, которое связывают с равновесным краевым углом смачивания и геометрией капилляра.

Экспериментальными исследованиями установлено, что прямой зависимости между растеканием и течением припоя в зазоре нет. Некоторые припои хорошо растекаются по поверхности, но не затекают в капиллярный зазор и наоборот. Это связано с процессами взаимодействия расплавленного припоя с паяемым металлом. Известно, что в капиллярном зазоре жидкий припой интенсивно насыщается компонентами паяемого металла, что изменяет поверхностное натяжение расплава. На различие в процессах растекания припоя по поверхности и течения припоя в зазоре может влиять наличие в расплаве отдельных кристаллов и кристаллических образований. При размерах включений в расплаве, превышающих величину капиллярного зазора, течения припоя в зазоре не будет.

Рассмотрим перемещение жидкого припоя в горизонтальном капиллярном зазоре (рис.4). При ограниченном смачивании припоем поверхности капиллярное давление в зазоре P_k выражается через краевой угол смачивания

$$P_k = \frac{2\sigma_{1,2} \cos\theta}{h},$$

где $\sigma_{1,2}$ – поверхностное натяжение между припоем и газовой средой; h – величина зазора; θ – краевой угол смачивания.

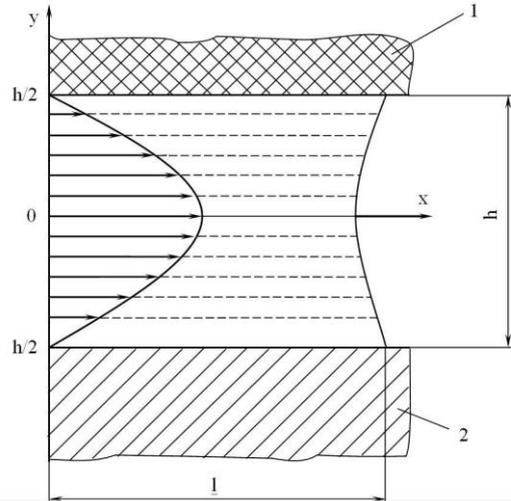


Рис.4. Схема для расчета времени заполнения горизонтального капиллярного зазора h при пайке кристалла к корпусу: 1 – кристалл; 2 – корпус

В предположении ламинарного течения припоя в зазоре (согласно Пуазейлю жидкость у стенок покоится) имеет место параболическое распределение скорости потока припоя по толщине. Для средней скорости потока время t заполнения припоем горизонтального зазора длиной l может быть определено по формуле

$$t = \frac{3\eta l^2}{h \cos\theta \sigma_{1,2}},$$

где l – длина заполняемого зазора; h – величина зазора; η - вязкость припоя.

При перемещении жидкого припоя в капиллярном зазоре при ограниченном смачивании энергетический коэффициент растекания K_p определяется из выражения

$$K_p = 2\sigma_{1,2} \cos\theta.$$

K_p зависит от соотношения сил адгезии припоя с паяемой поверхностью и сил когезии между частицами припоя.

Подставляя K_p в формулу времени заполнения припоем горизонтального зазора получим

$$t = \frac{6\eta l^2}{h K_p}.$$

Это выражение справедливо для динамической теории течения расплавов. Согласно этой теории, скорость течения расплавленного припоя зависит от длины шва и величины зазора, разности давлений на входе и выходе из зазора, а также от вязкости припоя. Динамическая теория исходит из условия непрерывного течения в капиллярном зазоре припоя, не учитывая наличия взаимодействия припоя с металлами паяемых поверхностей. Поэтому время заполнения капиллярного зазора значительно отличается от результатов, получаемых экспериментально.

Для определения фактического времени заполнения припоем соединительного зазора при пайке кристалла к корпусу необходима разработка специальной установки, позволяющей контролировать данный параметр в реальных условиях.

Пример конкретного применения расчета. Требуется рассчитать время заполнения капиллярного зазора припоем ПОС40 при пайке кристалла к основанию кор-

пуса. Размер кремниевого кристалла 5,1x5,6 мм. Покрытия паяемых поверхностей: кристалла – напыленное серебро, а корпуса - химический никель.

Исходные данные для расчета:

1. Поверхностное натяжение припоя ПОС40 $\sigma_{1,2}$ ($474 \cdot 10^{-5}$ Н/см).
2. Динамическая вязкость припоя ПОС 40 при температуре 280 °С η (0,0229 Н с/м²).
3. Величину зазора h выбираем в интервале от 0,05 до 0,2 мм.

Для расчетов удобнее пользоваться формулой

$$t = \frac{3\eta l^2}{h \cos\theta \sigma_{1,2}},$$

т.к. угол растекания припоя θ легко определяется при экспериментальных исследованиях.

Экспериментальные исследования растекания припоя ПОС40 по паяемым поверхностям проводили в вакууме и водороде. Расплавление припоя осуществляли на режимах пайки кристаллов к основаниям корпусов. Для исследований в вакууме припой ПОС40 имел форму шарика диаметром 1,0 мм, а для исследований в водороде - круг диаметром 8 мм и толщиной 0,3 мм.

Анализ формы навески припоя после расплавления показал во всех случаях идеальное растекание по поверхности. Однако угол смачивания при нагреве в вакууме $\theta=0^\circ$, а при нагреве в водороде $\theta=3-5^\circ$.

Зная значения θ определяем время заполнения зазора припоем ПОС40 при пайке кристалла к основанию корпуса в вакууме и водороде.

Расчетом установлено, что время заполнения капиллярного зазора при пайке припоем ПОС40 кристалла к основанию корпуса в вакууме несколько меньше, чем в водороде (рис.5).

Как видно из рис.5, время заполнения зазора между кристаллом и основанием корпуса припоем, полностью смачивающим соединяемые поверхности, составляет сотые доли секунды. В реальных условиях это время зависит от технологии подготовки соединяемых поверхностей и припоя под пайку, а также от металлургического взаимодействия припоя с контактируемыми поверхностями в процессе пайки.

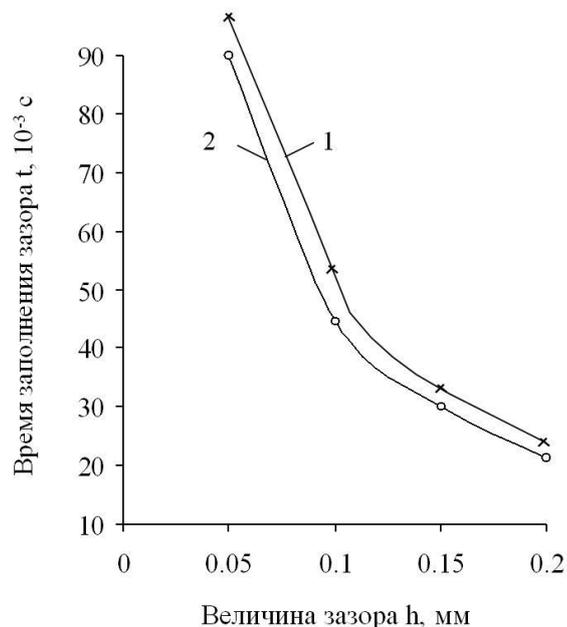


Рис.5. Время заполнения горизонтального капиллярного зазора припоем ПОС40 между кристаллом и корпусом при различных способах пайки: 1 – пайка в водороде; 2 – пайка в вакууме

Таким образом, время пайки кристаллов к основаниям корпусов ППИ можно существенно сократить, применяя импульсный нагрев соединяемых элементов. А для интенсификации процессов взаимодействия припоя с поверхностями кристалла и основания корпуса необходимо подвергать одну из соединяемых деталей воздействию ультразвуковых или низкочастотных колебаний.

Способы и устройства для определения течения припоя по паяемой поверхности. Скорость течения припоя по паяемой поверхности можно определять по способу, по которому припой помещают между излучающим и принимающим волноводами ультразвуковых колебаний. По относительному изменению энергии колебаний в единицу времени судят о скорости течения припоя по паяемой поверхности.

Определение смачивающей способности расплавов металлов возможно с помощью устройства, содержащего вертикально установленные пластины из исследуемого материала (металла) с температурой плавления выше температуры плавления расплава. При этом с целью проведения экспресс-анализа, пластины расположены под углом одна к другой. Собранные таким образом пластины помещаются основанием в емкость с исследуемым расплавом металла. После затвердевания отделяют исследуемый металл от наружных стенок пластины, а пластины разрезают по основанию. Поверхность, оставшаяся после разреза, шлифуется, полируется и травится. На месте разреза испытуемый металл образует картину зависимости высоты поднятия припоя по толщине щели, образованной пластинами.

Управлять площадью растекания припоя по поверхности твердого тела можно, используя способ, при котором твердое тело с припоем размещают в постоянном магнитном поле и подают электрический ток. С целью получения требуемой площади растекания припоя и увеличения прочности паяных соединений электрический ток пропускают через твердое тело с припоем в направлении, перпендикулярном направлению внешнего магнитного поля.

Для определения физико-химических характеристик растекания веществ и поверхностной диффузии существуют различные способы. Знание процесса и характера заполнения капиллярных зазоров при пайке позволяет разрабатывать более точные методы расчета основных параметров конструкций паяных соединений и режимов пайки.

Известна конструкция образца для исследования процесса заполнения капиллярных зазоров припоем, содержащая две прилегающие одна к другой пластины, на контактирующей поверхности одной из которых выполнены каналы, причем с целью подавления эффекта повышения капиллярного давления в углах каналов (по краям) выполнены углубления.

Для изучения и оценки растекаемости припоя по паяемой поверхности в условиях вакуума, в восстановительных и защитных средах рекомендуется использовать специальную установку.

По материалам зарубежной научно-технической информации можно отметить следующие способы оценки смачиваемости припоев. Например, известен способ, при котором погружение образца в расплав припоя осуществляется со скоростью, превышающей скорость смачивания. С помощью датчиков регистрируется изменение силы, действующей на образец во времени. Высота мениска h определяется выражением

$$h = \sqrt{\frac{2\sigma}{g\rho} (1 - \sin \theta)},$$

где σ – поверхностное натяжение; ρ – плотность припоя; θ – краевой угол; g – ускорение свободного падения.

Параметрами смачивания являются: сила смачивания, время смачивания и другие характеристики. Показано, что основными критериями оценки паяемости служат усилие и краевой угол смачивания. Данные параметры можно контролировать с помощью менискографа путем совместной корреляции вышеуказанных критериев.

Известны способ и устройство для исследований паяемости материалов путем определения краевого угла смачивания. Суть метода заключается в том, что световой луч с помощью оптического устройства, направляется на поверхность мениска, образующегося между твердой и жидкой поверхностями. Лучи, отраженные от поверхности раздела фаз, регистрируются оптическими сенсорами, которые автоматически производят отсчет краевого угла смачивания.

Для оценки паяемости измерением краевого угла смачивания разработана специальная установка. Принцип контроля основан на отражении лазерного луча от поверхности припоя и измерение угла отражения, который зависит от радиуса кривизны вогнутого мениска. Луч лазера перемещается по мениску с шагом 3,125 мкм. Минимальные и максимальные скорости перемещения равны 15,625 и 1000 мкм/с. При этом методе измерения не учитывается возможное оплавление поверхностных слоев в направлении подъема припоя.

Паяемость покрытий припоями зависит от состояния их поверхностей. Состояние поверхности перед пайкой может быть проконтролировано с помощью оптической и электронной микроскопии, а также рентгеноспектральным анализом. Установлена паяемость припоя, взятого в виде шарика в зависимости от состояния поверхности медных проводов.

Оценку паяемости определяют также по изменению величины усилия смачивания при погружении образца в ванну с жидким припоем. Утверждается, что такая оценка паяемости является наиболее объективной, особенно при использовании процесса пайки в радиоэлектронике, например, при изготовлении ИС. Для этих целей разработаны специализированные установки, позволяющие преобразовывать усилия смачивания в электрический сигнал, который автоматически регистрируется электронным самописцем в виде диаграммы. Расшифровка диаграмм позволяет определить следующие временные характеристики: прогрев образца в расплавленном припое до начала смачивания, полное смачивание и общее время смачивания. Кроме того, определяется усилие выталкивания (дисмачивания) образца, погруженного в расплавленный припой, и усилие вытягивания образца с момента начала и до завершения процесса смачивания. Разработанная оценка паяемости, как отмечают авторы данной работы, является наиболее объективной и позволяет значительно снизить трудоемкость при выполнении экспериментальных работ.

Построена модель кинетики смачивания подложки каплей припоя, содержащего компонент, диффундирующий в смачиваемую плоскую гладкую подложку и химически реагирующий с ней. Отмечается, что при модифицировании управляющих параметров (например, коэффициента диффузии) наблюдается переход от нелинейных (диффузионных) характеристик к линейным (при реакции).

На основе статической механической модели изучены поверхностные свойства Sn-Pb, Bi-Sn и Bi-Pb – жидких сплавов. Установлена взаимосвязь между снижением поверхностного натяжения Sn-Pb – сплавов и увеличением содержания Pb. Снижение поверхностного натяжения Bi-Sn – сплавов наблюдается при повышенном содержании Bi в данном сплаве.

При монтаже, а особенно при эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры, платы с навесными элементами в некоторых случаях приходится перепаявать. Такая операция может влиять на пайку элементов к платам, на образование интерметаллических переходных слоев и, как правило, на механическую прочность паяных соединений. Параметры паяных соединений в этом случае можно определить по свойству смачиваемости. С этой целью образцы припоев заданной формы помещаются на подложку и подвергаются многократному нагреву до плавления с последующим охлаждением до комнатной температуры. При этом измеряется угол смачивания для расплавленной и застывшей капли припоя.

При анализе растекания припоев по различным покрытиям необходимо обращать внимание на подготовку покрытий перед проведением экспериментов. На некоторых образцах могут наблюдаться участки не смачиваемые припоем, что свидетельствует о плохом качестве подготовки поверхности перед пайкой (рис.1, а).

1. Цель работы:

1.1. Провести исследования влияния марки припоя и паяемых поверхностей на смачивание и растекание припоя.

1.2. Определить коэффициенты растекания припоев на основе олова и свинца на паяемых поверхностях кристалла и основания корпуса.

2. Методика проведения работы:

2.1. Необходимое оборудование и материалы:

- Печь для пайки кристаллов к основаниям корпусов.

- Образцы кристаллов и корпусов со следующими покрытиями: серебро гальваническое, никель химический и сплавы никель-олово с органической добавкой ОС-20.

- Навески припоев ПОС40, ПОС61, ПСр2,5.

- Микроскоп

- Штангенциркуль.

3. Порядок проведения работы:

3.1. Исследование смачивания и растекания припоя:

- Паяемые поверхности подвергаются предварительной обработке.

- Навески припоев размещают на паяемых поверхностях и помещают в печь, предварительно нагретую до температуры пайки кристаллов к основаниям корпусов. Для экспериментов используется по 10 навесок каждого типа припоя.

- После извлечения образцов из печи проводят осмотр внешнего вида поверхности кристалла и корпуса, замеряют площадь припоя.

- По формуле определяют коэффициент растекания K .

3.2 Результаты измерений заносят в таблицу.

Растекание припоев по покрытиям кристалла и корпуса

Марка припоя	Тип покрытия	Коэффициент растекания, K

4. Содержание отчета:

В отчете необходимо отразить следующие данные:

1. Особенности оценки смачивания и растекания припоя по паяемой поверхности.

2. Схему для расчета времени заполнения горизонтального капиллярного зазора h при пайке кристалла к корпусу.

3. График расчета времени заполнения горизонтального капиллярного зазора припоем ПОС40 между кристаллом и корпусом при различных способах пайки.

4. Основные способы и устройства для определения течения припоя по паяемой поверхности.

5. Результаты измерений коэффициентов растекания K .

6. Выводы о влиянии паяемой поверхности и марки на смачивание и растекание припоя.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Справочник по пайке / под ред. С.Н. Лоцманова, И.Е. Петрунина, В.П. Фролова. М.: Машиностроение, 1975. 407 с.

2. Лашко С.В. Пайка металлов / С.В. Лашко, Н.Ф. Лашко. 4-е изд. перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1988. 376 с.

3. Найдич Ю.В. О методике определения степени смачивания твердых тел металлическими расплавами / Ю.В. Найдич, В.С. Журавлев // В кн.: Адгезия расплавов. Киев: Наукова думка, 1974. 174 с.

4. Говард Г. Манко. Пайка и припои. М.: Машиностроение, 1968. 304с.

5. Оценка паяемости гальванических покрытий токопроводящих элементов электронной аппаратуры / В.А. Емельянов, В.Л. Ланин, Л.К. Кушнер, А.А. Хмыль // Электронная техника. Сер.7. Технология, организация производства и оборудование, 1990. Вып.3. С. 68–71.
6. Лакедемонский А.В. Справочник паяльщика / А.В. Лакедемонский, В.Е. Хряпин. М.: Машиностроение, 1967. 328 с.
7. Бадьянов Б.Н. Особенности заполнения капиллярных зазоров при пайке / Б.Н. Бадьянов, В.И. Титов. //Автоматическая сварка. 1985. № 2. С. 61–63.
8. Петрунин И.Е. Металловедение пайки / И.Е. Петрунин, И.Ю. Макарова, А.С. Екатова. М.: Металлургия, 1976. 264 с.
9. Долгов Ю.С. Вопросы формирования паяного шва / Ю.С. Долгов, Ю.Ф. Сидохин. М.: Машиностроение, 1973. 136 с.
10. Таблицы физических величин: справочник / под ред. акад. И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ПРОЧНОСТЬ СОЕДИНЕНИЙ КРИСТАЛЛОВ С ОСНОВАНИЯМИ КОРПУСОВ СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Введение

В технологии производства полупроводниковых изделий (ППИ) наиболее трудоемкими являются сборочные операции. Из общей стоимости изготовления (ППИ) на монтажно-сборочные работы приходится около 65 %. Эти затраты являются вполне обоснованными, так как от качества выполнения этих работ во многом зависит надежность готовых изделий. Выбор способа монтажа полупроводниковых кристаллов во многом зависит от требований, предъявляемых к соединению кристалл-корпус, а также от вида микросварки, применяемой для крепления выводов на кристалле и корпусе, и режимов герметизации ППИ.

Независимо от способов крепления кристаллов ППИ на подложки или основания корпусов должно обеспечиваться заданное расположение контактных площадок кристалла относительно контактных площадок корпуса. Погрешность совмещения не должна превышать 25 мкм. Поэтому установку кристалла выполняют с помощью манипулятора, а контроль точности совмещения осуществляют при помощи микроскопа с высоким разрешением.

В производстве ППИ применяется способ механических испытаний готовых схем в корпусах. По данному способу схемы помещаются в центрифуги, дающие ускорение в 20000 g, что позволяет выявлять кристаллы с низким качеством присоединения к корпусу. Основным недостатком данного способа является трудоемкость испытаний, использование дорогостоящего оборудования, что приводит к повышению себестоимости выпускаемых изделий. Кроме того, данный способ контроля качества присоединения кристаллов к корпусам не учитывает размеры и физико-механические свойства кристалла.

Проводятся испытания качества крепления кристаллов, в состав которых входят термоудар, воздействие постоянных и переменных ускорений, испытания на срез и др. Данный комплекс испытаний очень трудоемкий и может использоваться только на опытных образцах при отработке новых способов и технологий монтажа кристаллов к корпусам.

Качество паяных соединений контролируют, например, с помощью холестерических жидких кристаллов – веществ, изменяющих свой цвет под воздействием температуры. Участки изменения цвета соответствуют расположению дефектов монтажа полупроводникового кристалла. После испытаний жидкий кристалл удаляется с поверхности – стирается или прополаскивается в этиловом спирте.

Обнаружение дефектов монтажа кристаллов пайкой возможно с помощью инфракрасного излучения. Направляя на исследуемую поверхность радиометр, можно на телевизионном экране наблюдать термограмму. Характер дефектов и место их расположения определяют сравнением термограммы с эталонным образцом.

Известен способ контроля качества паяных соединений путем измерения параметра, непосредственно зависящего от структуры паяного соединения (термоэлек-

трический контроль паяного соединения). Однако этот способ рекомендуется использовать при контроле и испытаниях радиоэлектронного оборудования различного назначения, преимущественно соединений выводов интегральных микросхем и других компонентов в печатных узлах.

К неразрушающим методам, широко используемым в практике, можно отнести рентгенографическое исследование и контроль теплового сопротивления кристалл-корпус. Рентгеновские методы осуществляются с помощью рентгеноскопии (наблюдение теневого рентгеновского изображения на экране) и рентгенографии (получение теневого изображения на рентгеновской пленке). Обработанная рентгеновская пленка с изображением контролируемых участков изделий называется рентгенограммой.

Следует отметить, что высокоточное рентгеновское оборудование дорого и поэтому малодоступно небольшим предприятиям в качестве повседневного рабочего инструмента контроля качества. Этот метод целесообразно использовать на этапе разработки технологии сборки новых изделий или на стадии серийного производства с целью управляемости технологическим процессом монтажа кристаллов к основаниям корпусов.

Определение теплового сопротивления является одним из методов контроля правильности выбора конструкции или технологического процесса изготовления ППИ. Известно, что одной из наиболее существенных причин отказов силовых полупроводниковых приборов (СПП) является повышенное тепловое сопротивление кристалл-корпус, приводящее к выходу приборов из строя вследствие теплового пробоя. Например, простое увеличение на 10°C рабочей температуры может привести к увеличению в два раза тока смещения транзистора и к уменьшению в два раза среднего срока службы чувствительного операционного усилителя.

При изготовлении ППИ качество паяных соединений кристаллов проверяют, измеряя тепловое сопротивление между кристаллом и корпусом и сравнивают его с тепловым сопротивлением эталонного прибора. Разница значений более 20 % свидетельствует о низком качестве пайки (наличие воздушных прослоек, оксидных пленок, непропаи и т.п.). Повышение теплового сопротивления кристалл-корпус обусловлено, в основном, низким качеством присоединения кристалла. Участки локального повышения температуры кристалла могут привести к отказу, так как развитие теплового пробоя способствует ускорению протекания диффузионных процессов на границе раздела металлическая пленка - полупроводник.

В последние годы при пайке кристаллов к основаниям корпусов стремятся получить площадь спаивания не менее 95 % от площади кристалла. Этот вопрос является дискуссионным, т.к. некоторые ППИ могут быть годными по электрическим параметрам, в том числе по мощности рассеивания и тепловому сопротивлению кристалл-корпус ($R_{\text{T кр-к}}$), но имеющие площадь спаивания до 80 % от площади кристалла.

Четкой зависимости температуры нагрева кристалла от площади спаивания нет. Анализ рентгенограмм показал, что качество паяных соединений кристаллов с основаниями корпусов зависит от способов пайки. Непропаи в паяных швах, полученных при одних и тех же режимах пайки, могут быть на различных участках: в центре кристалла, по углам, периметру и т.п. Поэтому оценку качества пайки кристалла к основанию корпуса целесообразно осуществлять путем замера теплового сопротивления с одновременным анализом рентгенограмм паяных швов исследуемых прибо-

ров. Это необходимо проводить при отработке новой технологии пайки кристаллов и установлении критериев качества для серийного производства ППИ.

В технологии производства ППИ при оценке качества монтажа кристалла к основанию корпуса используют также разрушающий метод, заключающийся в том, что кристалл с помощью специального приспособления механически отделяют от монтажной поверхности корпуса (рисунок). При этом методе кристалл подвергается сжатию, а соединение кристалл-корпус – срезу. Испытания на сдвиг кристаллов проводят по методике, изложенной в ОСТ 11.073.013-2008 (часть 1, с.39). При этом определяют прочность соединения кристалла с поверхностью, а в случае сдвига кристалла с основания корпуса, исследуют состояние поверхности паяемых сторон кристалла и корпуса на предмет наличия пор, зон объемного взаимодействия контактируемых участков.

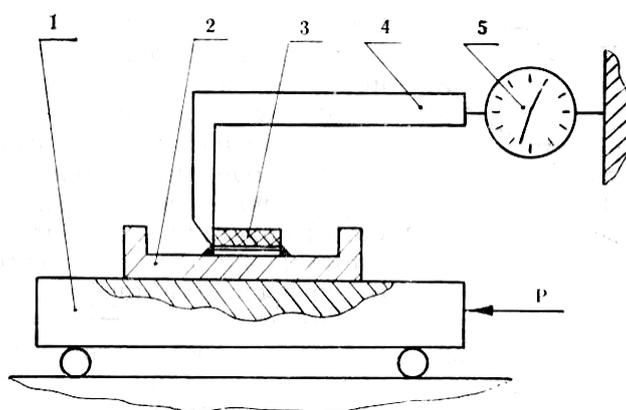


Схема контроля прочности присоединения кристалла: 1 – подвижная каретка; 2 – корпус прибора; 3 – кристалл; 4 – зацеп; 5 – динамометр

При отработке новой технологии присоединения кристаллов к основаниям корпусов необходимо проводить исследования качества соединений по поперечным шлифам. Под микроскопом при необходимом увеличении можно зафиксировать не только наличие непропаев и различных включений в шве, но и оценить качество адгезии пленочной металлизации с кристаллом и основанием корпуса.

Следует отметить, что разрушающий метод занимает много времени, кроме того, происходит разрушение прибора.

Оценка прочности соединения кристалла с основанием корпуса

В электронной промышленности широко используется способ оценки прочности крепления кристалла к держателю (табл.1). Однако в данном способе не учитывается толщина кристалла, что не позволяет использовать максимально допустимое усилие сдвига кристалла, исключая его разрушение. Кроме того, не берется во внимание возможное наличие пустот (непропаев) в паяном шве.

Таблица 1

Зависимость минимально-допустимого усилия сдвига от площади кристалла
(ОСТ 11 073.013-2008, часть 1, стр. 39)

Площадь кристалла, мм ²	До 0,5	> 0,5 до 1,0	> 1,0 до 1,5	> 1,5 до 2,0	> 2,0 до 2,5	> 2,5 до 3,0	> 3,0 до 3,5	> 3,5
Минимально-допустимое усилие сдвига, кгс	0,2 (0,1)	0,6 (0,3)	1,0 (0,5)	1,4 (0,7)	1,6 (0,8)	1,8 (0,9)	2,2 (1,1)	2,5 (1,25)

Примечание: значения в скобках приведены для проверки прочности крепления кристаллов, посаженных на клей.

Пример расчета

По ОСТ 11 073.013-2008 проведем оценку прочности соединения кристалла с основанием корпуса. Определим максимально допустимое усилие сдвига кремниевого кристалла площадью 3,24 мм² (1,8 мм x 1,8 мм) и толщиной 0,3 мм с основания корпуса. Кристалл присоединяется к основанию корпуса пайкой с использованием припоя ПОС40. Допускаемое напряжение для кремния при сжатии $[\sigma]_{сж} = 9,47$ кгс/мм², а допускаемое напряжение в паяном шве на срез $[\tau]_{ср} = 3,9$ кгс/мм².

При работе элемента паяной конструкции на сжатие расчетным значением прочности P' паяного соединения будет

$$P' = [\sigma]_{сж} F,$$

где $[\sigma]_{сж}$ – допускаемое напряжение для основного материала (кристалла) при сжатии, кгс/мм²;

F – площадь поперечного сечения кристалла в направлении действия усилия сжатия, мм².

Подставляя значения $[\sigma]_{сж} = 9,47$ кгс/мм², размеры кристалла 1,8 мм и 0,3 мм, получаем $P' = 5,11$ кгс. Т.е. кристалл при данном усилии сдвига не будет разрушаться.

В табл. 2 приведены значения прочности P' паяного соединения (усилия сдвига) для кристаллов размером 1,8 мм x 1,8 мм при толщине от 0,3 до 0,6 мм.

Таблица 2

Зависимость прочности P' (усилие сдвига) от толщины кристалла.

Толщина кристалла, мм	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6
Площадь поперечного сечения кристалла в направлении действия усилия сжатия, мм ² .	0,54	0,63	0,72	0,81	0,9	0,99	1,08
Прочность P' (усилие сдвига), кгс	5,11	5,97	6,82	7,67	8,52	9,38	10,23

Из табл. 3 видно, что только кристалл толщиной 0,6 мм будет разрушаться при сдвиге с усилием 10,23 кгс, т.е. больше допускаемого напряжения при сжатии ($[\sigma]_{сж} = 9,47$ кгс/мм²).

Соединение кристалла с основанием корпуса относится к нахлесточному соединению. Для данного типа соединения расчет прочности P кристалла с корпусом определяется по формуле $P = [\tau']_{\text{ср}} b l$,

где $[\tau']_{\text{ср}}$ – допускаемое напряжение в паяном шве на срез, кгс/мм²;

b – ширина шва, мм;

l – длина шва (нахлестки), мм.

Для припоя ПОС40 $[\tau']_{\text{ср}} = 3,9$ (размеры кристалла $b = 1,8$ и $l = 1,8$).

Подставляя эти значения в формулу прочности (при отсутствии непропаев в паяном шве, т.е. когда площадь паяного шва равна площади кристалла), получим $P = 12,64$ кгс.

В табл. 3 приведены значения усилия сдвига кристалла $3,24 \text{ мм}^2$ при различных значениях площади паяного шва.

Таблица 3

Прочность соединения кристалла с корпусом P (усилие сдвига) при различных значениях площади паяного шва.

Площадь паяного шва в % от площади кристалла, мм	100	75	70	50	25	17,3
Прочность соединения кристалла с корпусом P (усилие сдвига), кгс	12,64	9,48	8,85	6,32	3,16	2,19

Расчеты показывают, что кремниевый кристалл площадью $3,24 \text{ мм}^2$ выдерживает при сдвиге минимально-допустимое усилие $2,2$ кгс. Однако площадь паяного соединения (спая) составляет около 17% от площади кристалла. То есть, кристаллы с площадью непропаев в паяном шве 83% будут считаться годными на операции контроля прочности паяных соединений кристалла с корпусом (по ОСТ 11 073.013-2008).

Из табл. 4 видно, что соединение кристалла с корпусом выдерживает усилие сдвига величиной $8,85$ кгс без разрушения, при этом площадь непропаев (пустот) в паяном шве составляет 30% от площади кристалла. В этом случае усилие сдвига не приведет к разрушению кристалла, т.к. меньше $[\sigma]_{\text{сж}}$.

Цель работы

1. Ознакомиться с приспособлением для оценки прочности присоединения кристалла с основанием корпуса.

2. Экспериментально оценить прочность соединений кристаллов с основанием корпусов.

3. Построит номограммы максимально-допустимых усилий сдвига кремниевых кристаллов в зависимости от их геометрических размеров и площади спаев в паяном шве.

Примечание: 1) Площадь кристаллов от $0,5$ до $0,6 \text{ мм}^2$;

2) Толщина кристаллов от $0,3$ до $0,6 \text{ мм}$;

3) Площадь спаев в паяном шве, в %: $17,3; 25; 50; 70; 75; 100$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тилл У. Интегральные схемы: Материалы, приборы, изготовление: пер. с англ./ У.Тилл, Д. Лаксон– М.: Мир, 1985.
2. Неразрушающий контроль элементов и узлов радиоэлектронной аппаратуры / под ред. Б.Е. Бердичевского. – М.: Сов. Радио, 1976.
3. 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.
4. Онегин Е.Е. Автоматическая сборка ИС. Технологический процесс. Оборудование. Управление. Техническое зрение. Привод: справ. пособие. / Е.Е. Онегин, В.А. Зенькович, Л.Г. Битно - Мн.: Вышш. шк., 1990.
5. ОСТ 11 073.013-2008 (Микросхемы интегральные. Методы испытаний), часть 1. С.39.
6. Парфенов А.Н. Введение в теорию прочности паяных соединений / А.Н. Парфенов // Технологии в электронной промышленности. 2008. №3.
7. Зенин В.В. Особенности оценки прочности соединения кристалла с основанием корпуса / В.В. Зенин, А.В. Кочергин // Технологии в электронной промышленности. 2009. №7. С. 58-61.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПАЙКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КРИСТАЛЛОВ К ОСНОВАНИЯМ КОРПУСОВ СПП

Введение. Операции монтажа кристаллов к основаниям корпусов относятся к наиболее важным и ответственным в технологическом процессе сборки. Зона присоединения кристалла к основанию корпуса является существенным источником возникновения отказов полупроводниковых изделий.

Основным требованием к процессу пайки кристаллов маломощных транзисторов и ИС является обеспечение достаточной механической прочности присоединения кристалла к основанию корпуса и горизонтальности лицевой стороны кристалла (параллельности её поверхности ножки). Для мощных приборов качество этого процесса определяется ещё и площадью образования неразъемного соединения металл-полупроводник.

Качество паяных соединений контролируется различными методами. Так, качество монтажа кристаллов пайкой проверяют с помощью холестерических жидких кристаллов – веществ, изменяющих свой цвет под действием температуры. Участки изменения цвета соответствуют расположению дефектов монтажа полупроводникового кристалла. После испытания жидкий кристалл удаляется с поверхности – стирается или прополаскивается в этиловом спирте.

Обнаружение дефектов монтажа кристаллов пайкой возможно с помощью инфракрасного излучения. Направляя на исследуемую поверхность радиометр, можно на телевизионном экране наблюдать термограмму. Характер дефектов и место их расположения определяют сравнением термограммы с эталонным образцом.

В технологии производства полупроводниковых ИЭТ при оценке качества монтажа кристалла к ножке или основанию корпуса иногда используют разрушающий метод, заключающийся в том, что кристалл с помощью специального приспособления механически отделяют от монтажной поверхности. Испытания на сдвиг кристаллов проводят по методике, изложенной в ОСТ 11.073.013-83. При этом определяют прочность соединения кристалла с поверхностью, а также исследуют состояние поверхности коллекторной стороны кристалла и монтажной площадки на предмет наличия пор, зон объёмного взаимодействия контактируемых участков.

Следует отметить, что разрушающий метод имеет следующие недостатки: происходит разрушение прибора, он занимает много времени и не даёт количественной оценки качества соединения кристалла с монтажной площадкой корпуса неразрушающим методом, широко используемым в практике, можно отнести рентгенографические исследование и проверку теплового сопротивления.

Одним из наиболее эффективных методов неразрушающего контроля паяных соединений является рентгеновский, в частности его рентгенотелевизионный вариант. Рентгеновские методы осуществляются с помощью рентгеноскопии (наблюдение теневого рентгеновского изображения на экране) и рентгенографии (получение теневого изображения на рентгеновской плёнке). Обработанная рентгеновская плёнка с изображением контролируемых участков изделий называется рентгенограммой.

Следует отметить, что высокоточное рентгеновское оборудование исключительно дорого и поэтому малодоступно небольшим предприятиям в качестве повседневного рабочего инструмента контроля качества.

В производстве полупроводниковых ИЭТ используют 4 основных метода измерения теплового сопротивления: оптический, химический, физический и электрический. Оптический метод заключается в инфракрасном сканировании поверхности полупроводниковой пластины; химический представляет собой процесс измерения, состоящий в нанесении на поверхность полупроводниковой пластины тонкого слоя иницирующего температуру вещества (жидкого кристалла); при физическом монтируют термопару (или датчик температуры) непосредственно на поверхность полупроводниковой пластины; электрический состоит в использовании предварительно прокалиброванного и чувствительного к температуре параметра испытываемого прибора. Широкое применение на практике нашли только оптический и электрический методы измерения температуры перехода.

При электрическом методе теплое сопротивление полупроводниковой прибора определяется путём использования последовательности импульсов напряжения и так как для нагрева прибора, так и для измерения перепада температуры перехода. Чувствительным к температуре является такой параметр, как падение напряжения на открытом диоде, через который пропускается небольшой ток постоянной величины.

Известные методы теплового сопротивления и температуры в полупроводниковом приборе можно разделить на две основные группы.

В первой группе используются импульсный режим измерения избранного температурно-зависимого параметра. При этом измеряемый прибор разогревается за счёт подаваемой мощности в течение времени, составляющего основную долю периода, разогревающий режим снимается и на прибор подаётся измерительный режим. В течение этого времени измеряется температурно-зависимый параметр, а по предварительно снятой градуировочной кривой (зависимость параметра от температуры) определяется температура.

Во второй группе измерение температурно-зависимого параметра осуществляется в непрерывном режиме, то есть в том же, в котором задаётся мощность, разогревающая измеряемый полупроводниковый прибор.

В последние годы при пайке кристаллов к основаниям корпусов стремятся получить площадь спаивания не менее 95 % от площади кристалла. Это обстоятельство предъявляет высокие требования к технологии и оборудованию для пайки кристаллов. В то же время известно, что некоторые полупроводниковые приборы при площади спаивания 10-15% от площади кристалла по всем электрическим параметрам, в том числе и по мощности рассеивания, находятся в пределах допустимых значений.

1. Цель работы

1. Изучить методы контроля качества пайки полупроводниковых кристаллов к основаниям корпусов.

2. По рентгенограммам провести оценку влияния способов пайки кристаллов на качество паяных соединений.

2. Методика проведения работы

2.1. Назначение

Испытания проводят на этапе разработки технологии сборки новых изделий, а также на стадии серийного производства полупроводниковых приборов с целью управляемости технологическим процессом пайки кристаллов к основанию корпуса. Оценку качества пайки кристалла с основанием корпуса осуществляют путём замера теплового сопротивления паяного шва с одновременным анализом рентгенограмм паяных швов исследуемых приборов.

2.2. Оборудование и материалы

Для оценки качества пайки кристалла с основанием корпуса необходимы:

1. Установка рентгеновского контроля типа РУП-150/300. Режимы просвечивания – ток 6 мА, напряжение 160 кВ. При просвечивании используют плёнку Р5.

2. Прибор для измерения теплового сопротивления.

2.3. Проведение оценки качества пайки

Контролю подвергаются полупроводниковые приборы, прошедшие все стадии технологических испытаний. Тепловое сопротивление приборов определяется прибором по известной методике. Например, на транзисторах типа КТ8232А1 используется встроенный диод, поэтому для определения температуры нагрева кристалла оценивается прямое падение напряжения диода $\Delta U_{пр. д.}$. После снятия зависимости $\Delta U_{пр. д.}$ определяют кривизну снижения S напряжения по формуле

$$S = \frac{\Delta U_{пр. д.}}{\Delta T} = 1,95 \text{ mU}^{\circ}\text{C},$$

где ΔT – температура нагрева кристалла, определяемая из выражения

$$\Delta T = -\Delta U_{пр. д.}$$

Отсюда реальная температура нагрева кристалла $T_{кр}$ составит

$$T_{кр} = \Delta T + T_{ср},$$

Где $T_{ср}$ – температура среды.

После данных измерений приборы подвергаются рентгеновскому контролю. По полученным рентгенограммам проводят оценку спая кристалла с корпусом. Рассчитывают не только площадь спая кристалла с корпусом, но и распределение пустот по площади кристалла.

Приборы считаются годными, если дефекты равномерно распределены по паяному шву, а общая площадь спая доходит до 85-90% от площади кристалла. При этом ΔU не должно превышать 200 мВ.

3. Составление отчёта

В отчёте необходимо отразить следующее:

1. Особенности контроля качества пайки кристаллов к основаниям корпусов.

2. Методы и оборудование для контроля пайки кристаллов к основаниям корпусов.

3. Результаты анализа рентгенограмм паяных соединений, полученных различными способами пайки.

4. Результаты замеров теплового сопротивления приборов.

5. Выводы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

АНАЛИЗ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА МИКРОСОЕДИНЕНИЙ В ИЗДЕЛИЯХ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

Введение. Для отраслей промышленности занимающихся изготовлением ИЭТ, одним из наиболее важных вопросов является обеспечение качества и надежности проволочного монтажа, т.к. в настоящее время от 35% до 70% отказов связано с низким качеством присоединения внутренних выводов. Поэтому при разработках технологических процессов очень важно в зависимости от применяемого метода сборки правильно выбрать методы управления процессом микросварки и контроля качества полученных соединений.

Оценка прочности микросоединений в полупроводниковых приборах и ИС. При контроле прочности микросоединений статистическими и динамическими испытаниями необходимо учитывать расположение контактных площадок на разных уровнях. Установлено, что при испытаниях на растяжение важную роль играет угол отрыва проволочной перемычки, т.к. при малых углах измеренная прочность сварного соединения оказывается в несколько раз меньше действительной величины.

В производстве полупроводниковых изделий используется способ контроля прочности микросоединений между кристаллом и корпусом натяжением крючком проволочной перемычки. При этом для 100% контроля качества испытание должно быть неразрушающим. Возникает необходимость определить взаимосвязь между приложенным к перемычке усилием и действительным значением прочности сварного соединения в зависимости от физических свойств металла, геометрической формы и размеров перемычки.

На рис.1 представлена схема контроля прочности микросоединений. Приложенная к перемычке сила F связана с усилием натяжения проволоки со стороны кристалла (F_k) и траверсы (F_t) соотношениями

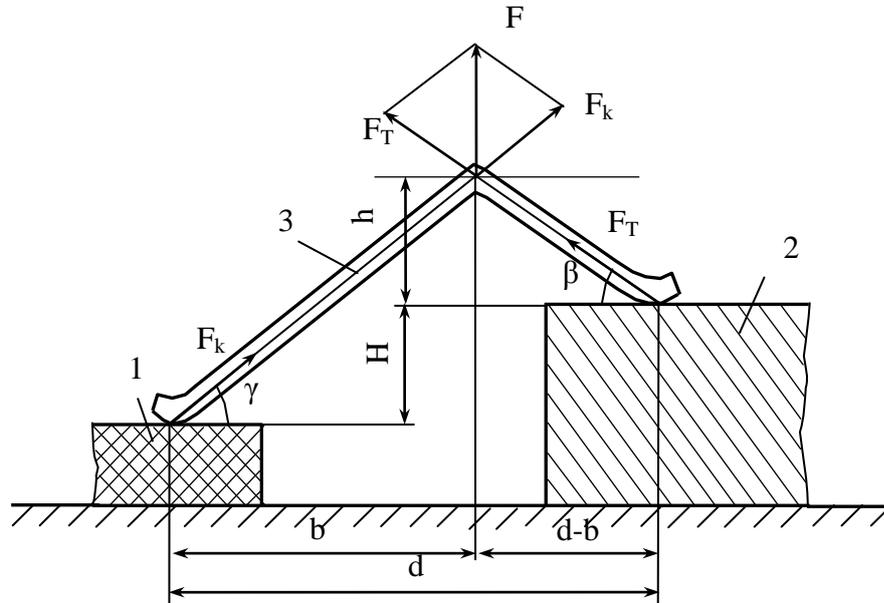


Рис. 1. Схема контроля прочности микросоединений натяжением проволоочной перемычки: 1 – кристалл; 2 – траверса; 3 – проволоочная перемычка

$$F_k = F \frac{\cos(\beta)}{\sin(\beta+\gamma)}, \quad (1)$$

$$F_T = F \frac{\cos(\gamma)}{\sin(\beta+\gamma)}, \quad (2)$$

Где β, γ – углы, образованные между плоскостью соединения и проволоки, град.

В процессе испытания для того, чтобы усилия действующие на оба сварных соединения были равны, необходимо равенство углов подъема ветвей вывода ($\beta = \gamma$). В этом случае усилия напряжения проволоки

$$F_T = F_k = \frac{F}{2\sin\gamma}, \quad (3)$$

В момент равенства сил F_T и F_k крючок занимает вполне определенное положение b на перемычке в зависимости от d, h, H . Размер b исходя из всех этих условий определяют по формуле

$$b = \frac{d(h+H)}{2h+H}, \quad (4)$$

где d – расстояние между сварными соединениями, мм; h – высота перемычки, мм; H – разновысотность кристалла и траверсы, мм.

Значение $b = 0.5d$, если микросоединения находятся на одном уровне. В случае если одно микросоединение находится выше другого, точка приложения усилия к перемычке при равенстве сил натяжения ветвей смещается в сторону более высокой точки присоединения вывода ($b > 0.5d$), т.е. к траверсе.

Длина L перемычки через геометрические размеры соединения составляет

$$L = \sqrt{b^2 + (H+h)^2} + \sqrt{h^2 + (d+b)^2}, \quad (5)$$

Подставляя выражение (4) в формулу (5) получим высоту перемычки

$$h = 0.5 \sqrt{L^2 - d^2} - 0.5H, \quad (6)$$

Выражения (4) и (6) позволяют определить точные координаты места приложения к перемычке контрольного усилия при равенстве сил натяжения ветвей.

Угол подъема ветвей γ рассчитывают по формуле

$$\sin \gamma = (2h + H)/L, \quad (7)$$

Максимальное усилие натяжения ветвей через механические свойства материала проволочного вывода определяется из выражения

$$F_k = F_t = [\sigma_{\text{доп}}] * S, \quad (8)$$

где $[\sigma_{\text{доп}}]$ – допустимое напряжение в микросварном соединении, МПа; S – площадь поперечного сечения микросоединения, мм².

По приведенным формулам проведены расчеты геометрических размеров микросоединений, координат места приложения нагрузки, усилия натяжения ветвей и усилия приложенного к перемычке. Результаты расчетов при равенстве сил натяжения проволоки со стороны кристалла и траверсы для микросоединений выполненных алюминиевой проволокой диаметром 0,03 мм ($[\sigma_{\text{доп}}] = 283$ МПа), приведены в табл.1.

Таблица 1

Значение величины усилия F в зависимости от геометрических размеров перемычки

Разность высот между кристаллом и корпусом $H = 0,3$					Разность высот между кристаллом и корпусом $H = 0,1$				
d, мм	h, мм	b, мм	L, мм	F, Н	d, мм	h, мм	b, мм	L, мм	F, Н
2,0	0,596	1,201	2,484	0,024	2,0	0,585	1,079	2,369	0,022
2,2	0,599	1,320	2,662	0,023	2,2	0,600	1,185	2,556	0,021
2,4	0,611	1,436	2,842	0,022	2,4	0,615	1,290	2,711	0,020
2,6	0,624	1,552	3,026	0,021	2,6	0,631	1,395	2,935	0,019
2,8	0,636	1,667	3,212	0,020	2,8	0,645	1,501	3,426	0,018
3,0	0,649	1,782	3,399	0,019	3,0	0,661	1,605	3,319	0,017
3,2	0,661	1,896	3,588	0,018	3,2	0,671	1,711	3,512	0,016
3,4	0,673	2,010	3,778	0,017	3,4	0,687	1,815	3,766	0,016
3,6	0,685	2,132	3,969	0,017	3,6	0,701	1,920	3,901	0,015
3,8	0,697	2,236	4,161	0,016	3,8	0,711	2,025	4,096	0,015
4,0	0,709	2,349	4,354	0,016	4,0	0,720	2,130	4,292	0,014

В этом случае силы натяжения выводы определяются по формулам

$$F_T = F \left[\frac{b\sqrt{h^2+(d-b)^2}}{hb-(d-b)(h+H)} \right], \quad (9)$$

$$F_k = F \left[\frac{(d-b)\sqrt{(h+H)^2+b^2}}{hb-(d-b)(h+H)} \right], \quad (10)$$

При испытаниях трудно обеспечить высокую точность ориентации крючка относительно перемычки, поэтому в расчетах необходимо учитывать погрешность позиционирования (рис. 2).

Расстояние b до точки приложения усилия в исследуемом приборе с учетом погрешности позиционирования вычисляется по формуле

$$b_{1,2} = b_{\text{опт}} \pm \frac{b_{\text{опт}} \delta}{100\%}, \quad (11)$$

где $b_{\text{опт}}$ - оптимальное значение b для случая равенства сил, действующих на микросоединения на кристалле и корпусе, мм; δ - погрешность позиционирования, %.

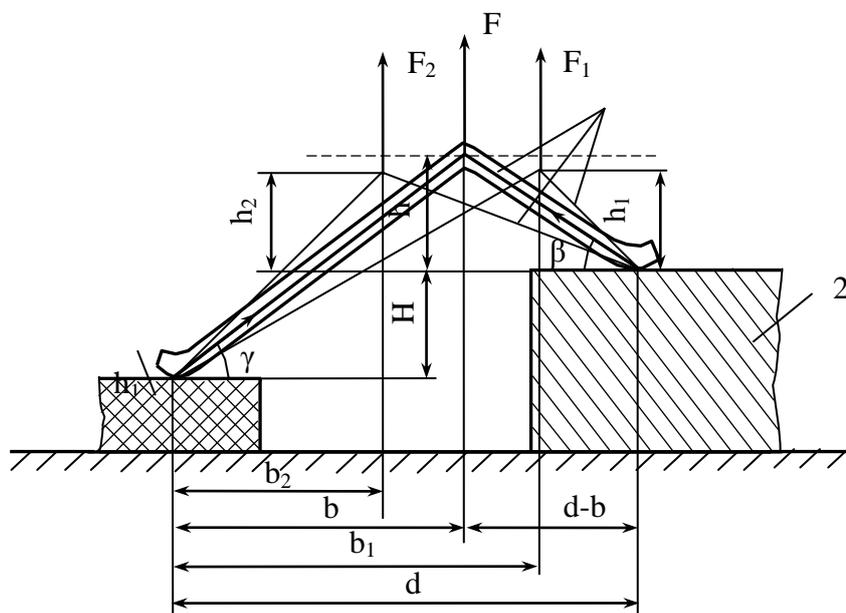


Рис. 2. Схема усилия, действующего на проволочную перемычку в зависимости от места приложения нагрузки: 1 – кристалл; 2 – траверса; 3 – проволочная перемычка

По формуле (6) рассчитывают высоту перемычки, а затем по выражениям (9) и (10) усилия натяжения ветвей и величину контрольного усилия, которое нужно приложить к перемычке. Результаты расчетов приведены в табл. 2 (при $\delta = 10\%$).

Из табл. 2 видно, что в случае смещения точки приложения нагрузки к траверсе усилия, действующие на сварные соединения и траверсы, будут равны при $b = 3,4$ мм и $L = 3,778$ мм. Если нагрузка смещена к кристаллу, то $F_k = F_T = 0,02$ Н при $d = 3,8$ мм и $L = 4,161$ мм.

Таблица 2

Зависимость прочности микросоединений ИЭТ от места приложения механической силы к проволочной перемычке диаметром 0,03 мм (при $H = 0,3$ мм, $\delta = 10\%$)

d, мм		2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8
L, мм		2,48	2,66	2,84	3,02	3,21	3,39	3,58	3,77	3,97	4,16
Точка приложения смещения к траверсе	b_1 , мм	1,32	1,45	1,58	1,71	1,83	1,96	2,09	2,21	2,34	2,46
	h_1 , мм	0,53	0,52	0,51	0,49	0,48	0,46	0,44	0,42	0,39	0,37
	F_k , Н	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,02	0,02	0,02
	F_T , Н	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02

	$F_1, \text{ Н}$	0,022	0,021	0,019	0,018	0,017	0,015	0,014	0,013	0,012	0,01
Точка приложения смещения к кристаллу	$b_2, \text{ мм}$	1,08	1,19	1,29	1,39	1,50	1,60	1,71	1,81	1,91	2,01
	$h_2, \text{ мм}$	0,48	0,46	0,43	0,4	0,36	0,33	0,28	0,24	0,19	0,14
	$F_{k2}, \text{ Н}$	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	$F_{T2}, \text{ Н}$	0,018	0,018	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,02
	$F_2, \text{ Н}$	0,02	0,019	0,017	0,015	0,013	0,011	0,01	0,009	0,007	0,006

Оценка прочности микроскопических соединений в силовых полупроводниковых приборах. По предложенной методике проведены расчеты геометрических размеров микросоединения, координат места приложения нагрузки, усилия натяжения ветвей и усилия, приложенного к перемычке, для диода Шотки в корпусе типа ТО-220. Конструктивные размеры прибора: $d = 5,6 \text{ мм}$; $H = 1,55 \text{ мм}$. Результаты расчетов для микросоединений, выполненных алюминиевой проволокой марки А995 диаметром $0,25 \text{ мм}$ ($\sigma_{\text{доп}} = 71,2 \text{ МПа}$), при равенстве усилий действующих со стороны кристалла и траверсы, приведены в табл. 3. Максимальное допустимое усилие натяжения ветвей по формуле (8) $F_{\text{доп}} = 3,49 \text{ Н}$.

Таблица 3

Значения величины усилия F в зависимости от геометрических размеров перемычки

$L, \text{ мм}$	$b, \text{ мм}$	$h, \text{ мм}$	$F, \text{ Н}$
6,2	4,432	0,555	2,995
6,066	4,661	0,391	2,683
5,992	4,863	0,291	2,484
5,946	4,972	0,224	2,345
5,92	5,06	0,185	2,264
5,896	5,154	0,147	2,183

Установлено, что при точки приложения нагрузки к микросоединению сила, действующая на это соединение, увеличивается (табл. 4).

Таблица 4

Зависимость прочности микросоединений диодов Шоттки от места приложения механической силы к проволочной перемычке диаметром 0,25

мм

L, мм	Точка приложения смещения к траверсе					Точка приложения смещения к кристаллу				
	b ₁ , мм	h ₁ , мм	F _k , Н	F _T , Н	F ₁ , Н	b ₂ , мм	h ₂ , мм	F _k , Н	F _T , Н	F ₂ , Н
6,2	4,65	0,55	4,21	0,55	3,31	3,49	3,12	3,49	3,36	2,79
6,07	4,89	0,38	4,43	0,38	3,3	3,49	2,87	3,49	3,37	2,45
5,99	5,08	0,28	4,59	0,28	3,26	3,49	2,77	3,49	3,37	2,21
5,95	5,22	0,21	4,72	0,22	3,21	3,49	2,74	3,49	3,37	2,03
5,92	5,31	0,17	4,81	0,18	3,14	3,49	2,77	3,49	3,36	1,91
5,89	5,41	0,13	4,9	0,14	3,0	3,49	2,88	3,49	3,36	1,78

Контроль качества приварки внутренних выводов. Визуальный контроль качества приварки внутренних выводов производится, как правило в два этапа. На первом этапе при значительном оптическом увеличении просматривается место соединения с целью отбраковки по следующим видам дефектов: смещение точки соединения, недожатие, пережатие. На втором этапе при меньшем оптическом увеличении оценивается качество внутренних соединений по отсутствию избыточных петель и недопустимых натяжений проводников, соединяющих контактные площадки кристалла с траверсами внешних выводов. Данный контроль является неразрушающим и проводится на 100% сборок.

Оценка прочности соединения, т.е. определение усилия разрушения, устанавливается методом испытаний соединений на отрыв. При этом величина усилия отрыва должна быть для качественного соединения больше минимального значения, указанного в технологической или конструкторской документации. (табл. 5).

Таблица 5

Данные по минимальной прочности соединения в зависимости от диаметра и тапа проволоки

Диаметр выводы, мкм	Минимальная прочность соединения сН (ГС) для	
	Al	Au
Менее 27	Устанавливают в ТУ	
27	2,5	3,5
30	3,0	4,0
40	4,0	5,0
50	5,0	7,0
60	8,0	11,0
Более 60	Устанавливают в ТУ	

Данный разрушающий метод используется выборочно для оценок каждой установки присоединения внутренних выводов. Принято дважды в смену (в начале рабочей смены и после перерыва) оценивать правильность выбора режима сварки путем обрыва у одной – двух ИС внутренних выводов. Считается, что соединения качественные, т.е. режим присоединения на установке удовлетворяет качеству, если

усилие отрыва вывода больше минимально установленной величины, а на контактной площадке в месте отрыва вывода наблюдается участок диффузионного проникновения металла вывода в металл контактной площадки, т.е. наличие ядра сварки.

Заключение. Таким образом, на величину усилия натяжения проволоки большое влияние оказывают геометрические размеры проволочной перемычки и точка приложения механической силы к перемычке. Силы натяжения проволоки со стороны кристалла и траверсы могут существенно отличаться и превышать усилия, приложенные к перемычке, и приближаться к допустимым значениям прочности микросоединений. С увеличением длины и высоты перемычки усилие которое нужно приложить к перемычке увеличивается.

Это необходимо учитывать при проведении контроля прочности микросварных соединений изделий электронной техники.

Варианты задания

$H = 0,1$ мм и $H = 0,3$ мм.

Вар.	d, мм	h, мм	Вар.	d, мм	h, мм	Вар.	d, мм	h, мм
1	2,0	0,50	6	3,0	0,60	11	4,0	0,70
2	2,2	0,52	7	3,2	0,62	12	4,2	0,72
3	2,4	0,54	8	3,4	0,64	13	4,4	0,74
4	2,6	0,56	9	3,6	0,66	14	4,6	0,76
5	2,8	0,58	10	3,8	0,68	15	4,8	0,78

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ по дисциплине

“Проблемы силовой электроники”

для студентов направления

16.04.10 «Техническая физика» (магистерская программа
подготовки «Физика и техника полупроводников»)
очной формы обучения

Составители:

Зенин Виктор Васильевич

Землянский Александр Иванович

В авторской редакции

Компьютерный набор А.И. Землянского

Подписано к изданию 12.12.2014.

Уч.-изд. л. 3,6.

ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный
технический университет»

394026 Воронеж, Московский просп., 14