

ТЕХНОЛОГИЯ НАНОРАЗМЕРНЫХ СЛОЕВ МЕТАЛЛОВ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ НАДЕЖНОГО КОНТАКТА К СТОКОВОЙ ОБЛАСТИ КРЕМНИЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

© 2020 г. Т. А. Исмаилов^а, А. Р. Шахмаева^{а, *}, Б. А. Шангереева^а

^аДагестанский государственный технический университет,
просп. И. Шамиля, 70, г. Махачкала, Республика Дагестан, 367010 Россия

*e-mail: fpk12@mail.ru

Поступила в редакцию 29.03.2020 г.

После доработки 27.04.2020 г.

Принята к публикации 01.06.2020 г.

Описана технология монтажа кристалла полупроводникового прибора. Представлена технология применения припоя при посадке кристалла полупроводникового прибора. Рассмотрен вопрос использования свинцовых припоев для пайки кремниевых кристаллов. Рассмотрены способы формирования многослойной металлизации обратной стороны кристалла и выбрана наиболее оптимальная технология. Проведена проверка параметров надежности присоединения кристалла к корпусу транзистора.

DOI: 10.31857/S054412692006006X

ВВЕДЕНИЕ

Силовые полупроводниковые приборы широко применяются в ракетно-космической технике, гражданской и военной авиации, атомной промышленности, медицинской технике и системах связи и навигации, в том числе в условиях радиационного воздействия. Надежность в эксплуатации таких силовых полупроводниковых приборов определяется теплоэлектрическим состоянием, формирующимся на стадии присоединения кристалла к корпусу, помимо иных факторов. Операция посадки кристаллов в корпуса – наиболее ответственная в технологическом процессе сборки, так как должна обеспечивать требуемое расположение кристалла, прочное механическое соединение, надежный электрический контакт и хороший теплоотвод. При посадке кристалла иногда могут образоваться скрытые дефекты (сколы, пустоты, микротрещины), которые приводят к появлению участков с аномально высоким тепловым сопротивлением и к последующему выходу из строя при влиянии дестабилизирующего фактора проникающей радиации. В дорогостоящей и сложной аппаратуре отказ одного из приборов может привести к непредсказуемым последствиям. Если площадь дефектов достаточно мала относительно площади кристалла и не оказывает влияние на активную структуру транзистора, то для основной части изделий характерен низкий уровень теплового сопротивления. Но при длительной эксплуатации в экстремальных или неблагоприятных условиях надежность этих изделий суще-

ственно снизится из-за потенциального развития дефектов до активной структуры. Уровень остаточных термических напряжений зависит от качества присоединения кристаллов на припой.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

В силовой электронике распространены следующие способы монтажа кристаллов на подложку: пайка припоями, пайка эвтектическими сплавами, приклеивание токопроводящими клеями на органической основе, с помощью легкоплавких или тугоплавких стекол. Цель каждого способа – максимальный отвод тепла, высокая механическая прочность соединения, малое сопротивление контакта [1].

Посадка кристалла на эвтектические сплавы помимо технологических трудностей имеет следующие недостатки: высокие температуры, золотое покрытие, значительные механические напряжения, что приводит к сколам кристаллов и снижению надежности приборов, отслаивание кристаллов из-за неполного образования эвтектики по всей площади, образованием и кротрещин и растрескивание кристаллов после пайки и термокомпрессионной разварки выводов.

Из всех перечисленных способов пайка считается единственным способом, обеспечивающим электрические и тепловые характеристики силовых полупроводниковых приборов, так как припой обладает лучшей теплопроводностью и электропроводностью, чем стекла и клеи. Если кри-

сталлы приборов имеют значительную мощность рассеяния (более 0.5 Вт), то между подложкой кристалла и посадочной площадкой выводной рамки необходимо создать токопроводящий электрический контакт с незначительным электрическим и тепловым сопротивлением, что достигается использованием методов пайки. Для тех приборов, в которых мощность рассеяния кристалла невелика, а электрическое сопротивление между подложкой кристалла и рамкой незначительно влияет на работу устройства, кристалл приклеивают на токопроводящую композицию. Качество пайки кристалла во многом зависит от месторасположения припоя перед пайкой. При размещении прокладки припоя непосредственно под кристаллом существует вероятность того, что в процессе пайки оксидные пленки и загрязнения на поверхности прокладки при расплавлении останутся в зоне шва, что ухудшает смачиваемость припоем поверхности кристалла, приводит к образованию не припоев, нарушает сплошь шва и, в конечном итоге, ведет к ухудшению теплопроводности шва и снижению надежности полупроводниковых изделий [2]. В качестве припоя используется обычно золото. У золота существует ряд недостатков: дороговизна, его не рекомендуется использовать в радиационно-стойких полупроводниковых приборах военного и космического применения.

Заменителем золота является свинец и его сплавы. Свинец обладает высокой пластичностью в интервале температур ($-200...+250^{\circ}\text{C}$), малой химической активностью к полупроводникам и металлам, химической стойкостью к окислительным средам, относительно высокой температурой плавления (327°C), радиационной стойкостью, невысокой стоимостью. Это позволяет на его основе создать широкий ряд припоев, которые находят все большее распространение в полупроводниковой технике [3]. Пайка припоями на основе свинца используется путем приложения вибрации и давления к паяемым изделиям, как это принято при использовании в качестве припоя золота.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для проведения исследования использовалась импортная линия по производству мощных транзисторов, в состав которой входит автомат фирмы ЭСЭК по пайке кремниевых кристаллов сплавом на основе свинца с добавкой 5% олова. Припой из сплава ПОС-5 (припой оловянно-свинцовый) использовался в виде проволоки диаметром 0.8 мм для применения в технологии монтажа кристаллов полупроводниковых приборов.

Для прочного, надежного монтажа полупроводникового кристалла требуется создание на пластине структуры в виде адгезивной пленки, барьерного слоя, защитного слоя, и слоя, хорошо взаимодействующего с припоем. Самой высокой

адгезией к стекловидным материалам обладают переходные металлы. К ним относятся железо, титан, хром, молибден. Адгезия еще увеличивается при напылении на подогретую подложку. Однако материал напыляемой пленки не должен диффундировать внутрь полупроводника. Переходные металлы имеют высокое удельное сопротивление и поэтому применяются лишь для создания надежной металлизации поверхности полупроводника. Каждый материал выполняет свою функцию, это могут быть и барьерные, адгезионные, защитные, припойные и т.д.

После металлизации можно проводить посадку кристалла, однако в случае одновременного присутствия примесей нескольких металлов, даже и благородных, коррозия паяного соединения развивается значительно быстрее, приводя к разрушению контакта без всякого воздействия агрессивных сред. Взаимодействие припоя с основной предупреждает барьерный слой никеля. По подслою никеля хорошо работают покрытие золота и серебра [4]. Неблагоприятные условия хранения, загрязненность способствует быстрой потере паяемости у большинства покрытий. Устойчивостью к атмосферному воздействию обладают покрытия оловом, сплавом золото-никель. Однако, целесообразность применения под пайку деталей с золотым покрытием весьма сомнительна.

На границе припой–золото на деталях могут появляться зоны хрупкого покрытия, разрушающегося при эксплуатации приборов. Применение золота в таком случае также повышает трудоемкость и стоимость процесса производства транзистора [5].

Серебряные покрытия обладают свойством растворяться в припое с образованием Ag_3Sn , и нет данных, что Ag_3Sn может вызывать хрупкость или преждевременные отказы паяных соединений.

Были проведены экспериментальные работы для получения качественных и надежных параметров и характеристик изготавливаемых полупроводниковых приборов – мощных транзисторов КТ-829, и анализ полученных технологических режимов напыления металлов на обратную сторону пластин приводит к определенным числовым значениям толщин каждого слоя – наиболее оптимальным с точки зрения качества монтажа кристалла.

Хром является первым слоем многослойной металлизации обратной стороны пластин. Его используют, чтобы получить хорошую механическую адгезию с кремнием. Толщина пленки хрома составляет $500 \pm 100 \text{ \AA}$. Пленка хрома (Cr) не должна иметь толщину менее 300 \AA , в противном случае возможна неравномерность толщины пленки на различных участках пластины и по периферии, однако наращивание пленки более 700 \AA ухудшает электрические и теплопроводные

Таблица 1. Режимы напыления четырех металлов (Cr–Ni–Sn–Ag)

Слой	Толщина, Å	Максимальная мощность катодов: Cr– 2 кВт, Ni– 10 кВт, Sn– 2 кВт, Ag– 4 кВт		Скорость движения полета, мм/мин
		задаваемая, Вт	% от макс.	
Хром (Cr)	500–700	600	30	0.1
Никель (Ni)	5000–6000	4500	45	0.08
Олово (Sn)	500–1000	600	30	0.2
Серебро (Ag)	4000–5000	1500	37.5	0.1

характеристики кремниевых транзисторных структур КТ-829.

Пленки никеля, используемые для покрытия обратной стороны пластин, характеризуются высоким уровнем механических напряжений. Для получения хорошей адгезии наносимой пленки необходимо выполнение требований по высокой чистоте обрабатываемых поверхностей пластин относительно углеводородных загрязнений на границах раздела кремний–хром, пленка хрома–пленка никеля. Кроме того, для выполнения условия хорошей смачиваемости на границе пленка никеля–пленка олова, необходима высокая чистота этой границы. Это условия является наиболее критичным в процессе нанесения четырехслойной металлизации.

Пленка никеля (Ni) должна иметь толщину 5000 Å, потому что после расплавления верхних слоев припой контактирует с никелем и требуется запас толщины для хорошей взаимной диффузии никеля и припоя. Для напыления никеля требуется низкий вакуум порядка 10^{-5} Па, так как никель хорошо окисляется при обычном давлении. И если никель окислился, то его восстановить невозможно.

Толщина слоя олова должна быть в пределах 500–1000 Å. Олово напыляют для того, чтобы не окислялась пленка никеля при проникновении кислорода через пленку серебра. После посадки кристалла и серебра, и олово будут расплавлены, и припой будет контактировать с никелем.

Толщина пленки серебра лежит в пределах 4000–10000 Å.

Данное сочетание напыляемых слоев обеспечивает получение надежного омического контакта к коллекторной области при посадке кристалла на основание корпуса, которое приводит к уменьшению сопротивления омического перехода, что увеличивает процент выхода годных приборов.

Анализ экспериментальных результатов показал, что для создания надежного омического контакта и отвода тепла от коллекторного перехода силовых полупроводниковых транзисторов на обратной стороне пластин необходимо сформировать металлизацию за один технологический цикл, состоящую из четырех слоев. Толщины

пленок металлов должны соответствовать значениям, приведенным в табл. 1.

Контроль толщины пленки металла проводился на установке Alpha-Step.

Данные были получены на установке магнетронного распыления LEYBOLDAGZ-600. Основными контролируруемыми параметрами при проведении экспериментов на определение оптимальных технологических режимов на получение заданных толщин являются: мощность катода, скорость движения полета, давление вакуума в камере.

Толщина напыляемой пленки зависит от задаваемых значений мощности и скорости движения полета.

Время предварительной очистки пластин в блоке травления плазмы составляло 1 мин. Расход аргона – 185–220 см/ч, давление вакуума в камере 5×10^{-3} м бар.

На установке были установлены катоды, рассчитанные согласно техническому описанию, мощности которых соответствуют данным приведенным в табл. 1.

Нагрузка катода на полную мощность нежелательна из причины долговечности оборудования, поэтому значение мощности ограничиваем до 50% для катодов из хрома, никеля, серебра и до 85% для катода из никеля, в связи с большой величиной толщины пленки никеля.

Согласно полученным данным толщина пленки металла зависит от задаваемых значений мощности катода и скорости движения полета и чем больше мощность катода и меньше скорость движения полета, тем толщина пленки возрастает и наоборот, чем меньше мощность катода и больше скорость движения полета, тем толщина пленки металла уменьшается.

Нам необходимо выбрать тот интервал значений, при которых значение мощности не превышало бы 50% от максимально возможной из соотношений долговечности оборудования и такое значение скорости движения полета при которых получаем качественное напыление при минимальных затратах времени на процесс.

Исходя из изложенного в табл. 1 представлены оптимальные режимы напыления четырех металлов (Cr–Ni–Sn–Ag) с определенными толщинами

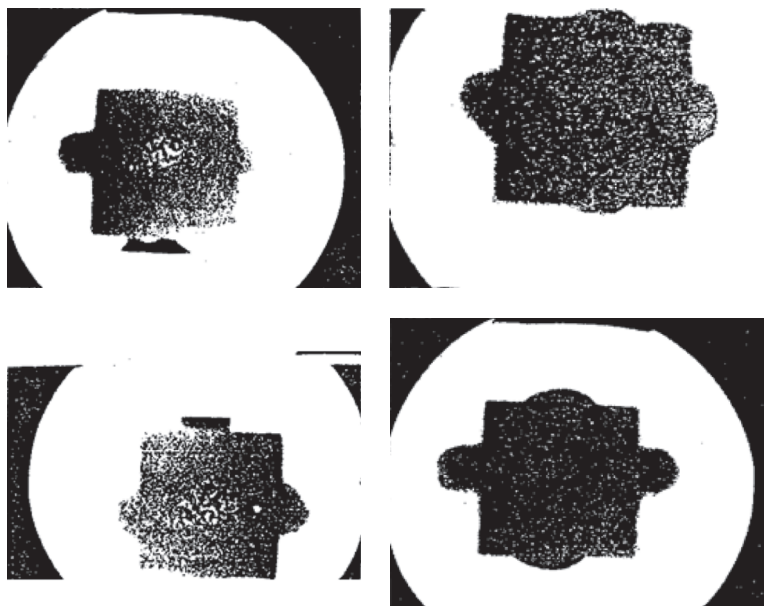


Рис. 1. Базовая технология (а), новая технология (б).

в едином технологическом цикле на установке LEYBOLDAGZ-600 для формирования контакта к коллекторной области при изготовлении кристаллов силовых транзисторов.

Для проверки адгезии четырехслойной металлизации обратной стороны пластин применялся наиболее распространенный метод контроля — процарапывание металлической иглой. Контроль адгезии четырехслойной металлизации показал отличное качество адгезии, игла проскальзывала по поверхности контролируемой пластины.

РЕЗУЛЬТАТЫ

При посадке кристалла на основании корпуса в процессе сборки кристаллов транзистора, качество посадки контролировалось методом отрыва с определенным усилием и визуально под микроскопом. При проведении контроля посадки кристалла с четырехслойной металлизацией кристалл не отрывается от основания при приложении соответствующего усилия и при приложении большего усилия разламывается сам кремний. Это объясняет то, что посадка кристалла на основание качественная. При визуальном контроле под микроскопом со всех сторон кристалла по периметру проступает припой на 0.5–1.0 мм от края, что показывает удовлетворительное распределение припоя по всей площади кристалла. Кроме того, контроль площади распределения припоя по основанию кристалла с помощью рентгеновского микроскопа показал 100% распределение припойного слоя по площади кристалла без пор (рис. 1а), что улучшает тепловые свойства прибора. Контроль посадки кристаллов на основании по

базовой технологии показывает неравномерное распределение припоя по площади кристалла с содержанием пузырей, пор (рис. 1б). Образование пор, пузырей при посадке кристалла можно объяснить окислением никеля, последнего слоя металлизации.

При проведении серии экспериментов было выявлено, что смачиваемость поверхности контактной площадки припоем хорошая, качество посадки удовлетворительное и сопоставимо с качеством посадки импортным припоем.

По результатам экспериментов были изготовлены опытные образцы транзисторов КТ-829, выход годных на выборочном замере составил 89.8%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исмаилов Т.А., Шахмаева А.Р. Транзисторные структуры силовой электроники. СПб.: Политехника, 2011. 125 с.
2. Лашко С.В., Лашко Н.Ф. Пайка металлов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1988.
3. Аносов В.С., Гомзинов Д.В., Пашков М.В., Сейдман Л.А., Тычкин Р.И., Фомин В.М. Исследование технологии монтажа кремниевых кристаллов мощных транзисторов в позолоченные и никелированные корпуса с помощью сплава ПСр-2.5 // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 2016. № 4. С. 4–10.
4. Черняев В.Н. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров: Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь. 1987, 464 с.
5. Аносов В.С., Гомзинов Д.В., Ичетовкин М.И., Сейдман Л.А., Тычкин Р.И. Исследование процессов пайки кремниевых кристаллов мощных транзисторов в их корпуса // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2017. Т. 20. № 1. С. 51–59.