

Конструктивно-технологическая оптимизация параметров диодов Шоттки

В статье изложены результаты оптимизации конструктивно-технологических исполнений и параметров быстродействующих диодов Шоттки, обеспечивающие стабильные характеристики качества изделий.

Владимир Ланин

vlanin@bsuir.by

Ярослав Соловьев

jsolovjov@transistor.com.by

Анатолий Керенцев

akerentsev@transistor.com.by

Диоды Шоттки находят широкое применение в выходных каскадах импульсных источников питания и DC/DC-конверторов, используемых в системах электропитания компьютеров, серверов систем связи и передачи данных. В системных блоках питания диоды Шоттки используются для выпрямления тока каналов +3,3 и +5 В при величине выходных токов в десятки ампер. Серьезное внимание к вопросам быстродействия выпрямителей и снижения их энергетических потерь позволит увеличить КПД источников питания и повысить надежность работы силовых транзисторов первичной части блока питания. Использование диодов Шоттки в схемах управляемых преобразователей энергии электропривода обеспечивает минимальное напряжение прямого восстановления диода при выключении силовых ключей, а также переключение силовых ключей с малыми коммутационными потерями и помехами. Благодаря этому возможно задавать высокую частоту коммутации, уменьшать количество вспомогательных компонентов, а также их размеры, массу и стоимость [1].

Барьер Шоттки также имеет меньшую электрическую емкость перехода, что позволяет заметно повысить рабочую частоту диода. Это свойство используется в интегральных микросхемах, где диодами Шоттки шунтируют переходы транзисторов логических элементов. В силовой электронике малая емкость перехода (т. е. короткое время восстановления) позволяет создавать выпрямители, работающие на частотах в сотни килогерц и выше. Благодаря хорошим временным характеристикам и малым емкостям перехода выпрямители на диодах Шоттки отличаются от традиционных диодных выпрямителей пониженным уровнем помех, что делает их наиболее предпочтительными для применения в импульсных блоках питания электронной аппаратуры.

Параметры диодов Шоттки

Довольно большой обратный ток и величина максимально допустимого обратного напряжения не более 200 В ограничивают применение кремниевых диодов Шоттки. Поэтому для увеличения допустимого обратного напряжения перспективно использо-

вание карбида кремния и арсенида галлия с шириной запрещенной зоны больше, чем у кремния, а также последовательное включение кристаллов.

Так, например, серию арсенид-галлиевых диодов Шоттки на напряжения 150–250 В производит фирма IXYS, а карбид-кремниевые диоды Шоттки с допустимыми значениями обратного напряжения 300–600 В — фирма Infineon Technologies. Созданы лабораторные образцы диодов Шоттки, выдерживающие обратные напряжения не менее 1,5 кВ [2]. При этом карбид-кремниевые и арсенид-галлиевые диоды Шоттки имеют не только более высокое допустимое обратное напряжение, но и меньший обратный ток, чем кремниевые приборы.

Изменением высоты барьера Шоттки ϕ_B можно получать наилучшее соотношение между прямым напряжением и обратным током. Параметр ϕ_B входит в выражение для прямого напряжения V_F в качестве отдельного слагаемого и экспоненциально влияет на величину обратного тока I_r .

$$V_F(I_F) = I_F R_{ser} + n\phi_{Bn} + \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_F}{SA^{**}T^2}\right),$$

$$I_r = SA^{**}T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_B}{kT}\right),$$

где I_F — прямой ток, R_{ser} — последовательное сопротивление объема полупроводника и омического контакта, I_r — обратный ток, S — площадь контакта Шоттки, A^{**} — модифицированная эффективная постоянная Ричардсона, T — абсолютная температура, q — элементарный заряд, k — постоянная Больцмана, ϕ_B — высота барьера Шоттки, n — коэффициент неидеальности прямой ВАХ.

Следует иметь в виду, что в области обратных напряжений вблизи U_{max} обратный ток контакта металл-кремний суммируется с током p - n -перехода охранного кольца с учетом лавинного умножения носителей заряда. Поэтому диоды Шоттки с высоким барьером обычно имеют более высокие значения максимально допустимого обратного напряжения и максимально допустимой температуры перехода, чем приборы с низким барьером (рис. 1).

Электрические свойства диодов Шоттки, прежде всего, определяются высотой потенциального барье-

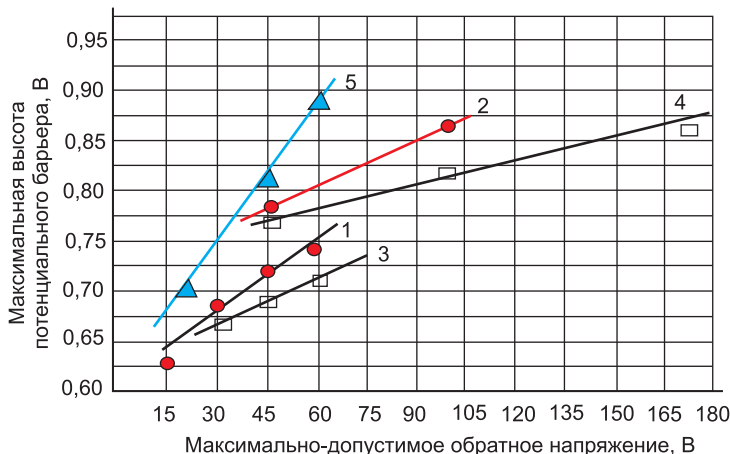


Рис. 1. Электрические характеристики диодов Шоттки при максимально допустимой температуре перехода: 1, 3, 5 – +150 °С; 2, 4 – +175 °С разных изготовителей (1, 2 – STMicroelectronics; 3, 4 – International Rectifier; 5 – Philips)

ра на границе раздела металл–полупроводник и поэтому зависят от выбора контактного металла. Среди наиболее распространенных в настоящее время — такие тугоплавкие переходные металлы, как Mo, V, Pd, Pt. При этом следует учесть, что в процессе формирования контакта металл–полупроводник вследствие протекания твердофазных реакций на границе раздела при термообработке происходит формирование переходного слоя соответствующего силицида, который, по существу, и определяет электрические свойства барьера Шоттки, например его высоту [3].

Контакт на основе силицида платины обеспечивает получение наиболее высокого энергетического барьера, что предопределяет такие свойства диодов Шоттки, как малые токи утечки, высокие пробивные напряжения, ши-

рокий диапазон рабочих температур, помехозащищенность, временная стабильность.

Особенности конструкции

Простейшая конструкция диода Шоттки с параллельными контактами, границы которых находятся на поверхности эпитаксиального слоя, представлена на рис. 2 [4]. Для предотвращения снижения максимально допустимого обратного напряжения V_{rmax} из-за увеличения обратного тока на границах параллельных контактов предложена конструкция с дополнительными *p-n*-переходами и использованием смыкания области обеднения (рис. 2б) [5]. Также существуют конструкции диодов Шоттки с параллельными контактами и канавками в кремнии, причем либо на дне

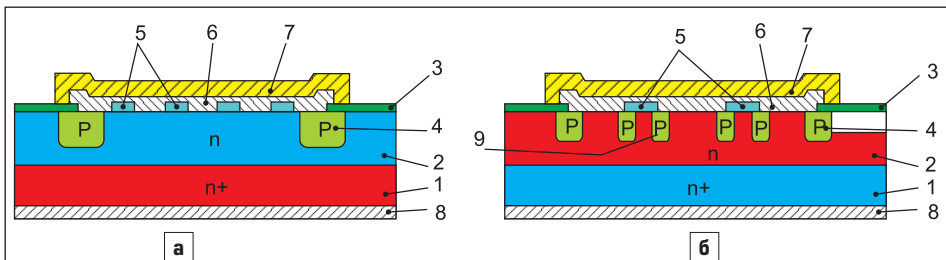


Рис. 2. Структура диодов Шоттки: а) с параллельными контактами; б) с дополнительными *p-n*-переходами. 1 — подложка; 2 — эпитаксиальный слой; 3 — слой SiO₂; 4 — охрannое кольцо; 5 — контакт с меньшей высотой барьера; 6 — контакт с большей высотой барьера; 7 — металлизация анода; 8 — металлизация катода, 9 — дополнительные *p-n*-переходы

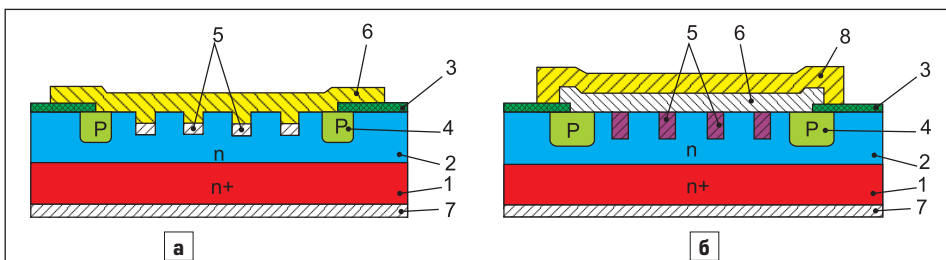


Рис. 3. Структура диодов Шоттки с параллельными контактами и канавками в кремнии. 1 — подложка; 2 — эпитаксиальный слой; 3 — слой SiO₂; 4 — охрannое кольцо; 5 — контакт с большей высотой барьера; 6 — контакт с меньшей высотой барьера; 7 — металлизация катода, 8 — металлизация анода

канавки располагается материал с большей высотой барьера (рис. 3а) [6], либо вся канавка заполняется таким материалом (рис. 3б) [7].

Однако диоды Шоттки с параллельными контактами характеризуются следующим недостатком: нанесение второго материала контакта требует предварительной обработки открытой поверхности кремния, во время которой происходит ее загрязнение металлическими примесями первого материала контакта.

В современных системных блоках питания компьютеров диоды Шоттки применяют, как правило, в виде диодных сборок (диодные полумосты), что повышает технологичность и компактность устройств, а также улучшает условия охлаждения диодов. Диодные сборки выпускаются, в основном, в трех типах корпусов (рис. 4): ТО-220 (менее мощные сборки с рабочими токами до 20–25 А), ТО-247 (более мощные сборки с рабочими токами 30–40 А), ТО-3Р (мощные сборки) и ТО-263 (для поверхностного монтажа).

Выбор вариантов технологического процесса

Современный уровень электрических параметров полупроводниковых приборов обуславливается технологией их изготовления.

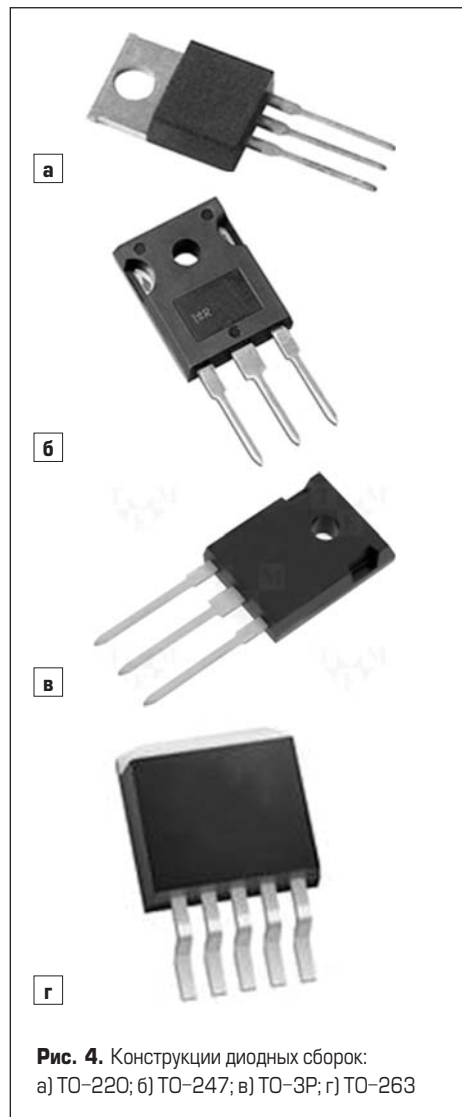


Рис. 4. Конструкции диодных сборок: а) ТО-220; б) ТО-247; в) ТО-3Р; г) ТО-263

Использование того или иного метода при создании приборов диктуется соображениями, связанными с техническими и экономическими показателями, а также надежностью приборов [8]. Процесс изготовления мощных быстродействующих диодов с такими параметрами, как прямой ток 2×5 А, обратный ток < 100 мкА, обратное напряжение 100 В и прямое напряжение $\leq 0,7$ В, в пластмассовом корпусе КТ-9 и КТ-90 включает следующие технологические операции: механическая обработка полупроводниковых пластин с последующей химической обработкой их поверхности; формирование в пластине областей с заданными свойствами; разделение пластин на кристаллы; монтаж кристалла в корпус и герметизация; электрические измерения и испытания приборов.

Для создания контакта в структуре диода получили распространение следующие методы: напыление металлизации в вакууме; диффузия золота; радиационная технология. Формирование диодов на основе контакта металл – полупроводник и при помощи радиационной технологии весьма выгодно отличается от других методов, поскольку позволяет регулировать времена жизни неосновных носителей заряда в базовых слоях полупроводниковых структур, в том числе и после сборки в корпус; обеспечивает хорошую воспроизводимость параметров приборов и высокую однородность распределения времен жизни неосновных носителей заряда по площади полупроводниковой структуры.

Пластину, прошедшую цикл технологических обработок, механически разделяют на отдельные кристаллы. Кристаллы со структурами помещают на кристаллодержатель, материал которого должен иметь высокую теплопроводность. В качестве материала кристаллодержателя чаще применяют медь, так как она обладает хорошей тепло- и электропроводностью, высокими пластическими свойствами и легко поддается механической обработке.

При выборе способа монтажа кристалла учитывают конструктивные особенности диода, его электрические характеристики, тип корпуса. Пайка в газовой среде по сравнению с другими технологиями имеет ряд преимуществ: не требует применения флюса и очистки ножек с напаянными кристаллами; позволяет механизировать и автоматизировать технологический процесс, а также выполнять одновременную пайку партии деталей; достигается хороший электрический и тепловой контакт между кристаллом полупроводника и кристаллодержателем корпуса, причем площадь контактного соединения может быть достаточно большой для приборов большой мощности.

Для того чтобы кристалл полупроводникового материала, содержащий *p-n*-переход, превратился в диод, необходимо к нему присоединить выводы. Наиболее распространены методы присоединения выводов пайкой и микросваркой. Так как применяемые при пайке флюсы загрязняют поверхность полупроводника, что приводит к ухудшению электрических параметров приборов, то присоединение выводов чаще выполняют ультра-

звуковой (УЗ) микросваркой ввиду ее достоинств: свариваемые детали не нагреваются, время сварки малое, флюсы и припой отсутствуют. Материалом для выводов служит алюминиевая, золотая или медная проволока. Выводы из проволоки АКП-250 пластичны, хорошо проводят теплоту и электрический ток, имеют низкое сопротивление в контакте с металлическими пленками.

После того как полупроводниковый кристалл ориентирован и закреплен на основании корпуса и к его контактным площадкам присоединены выводы, его необходимо защитить от влияния окружающей среды и уменьшения вредного воздействия герметизирующих органических материалов. При выборе защитного покрытия необходимо исходить из эксплуатационных требований, которые предъявляются к полупроводниковому диоду. Выбор в качестве покрытия компаунда ККП-2 обусловлен его высокой механической прочностью, влагостойкостью после отверждения, высокими диэлектрическими свойствами, хорошей адгезией ко всем конструкционным материалам.

Надежность диода при работе в аппаратуре и хранении в значительной степени зависит от герметичности корпуса. Исполнение диодов в металlostеклянном корпусе позволяет упростить технологию герметизации и повысить надежность. Металlostеклянный КТ-9 позволяет реализовать сборку двух диодов в одном корпусе. Герметизация корпуса КТ-9 осуществляется контактной сваркой, а корпуса КТ-90 — трансферным прессованием.

Для обеспечения паяемости на внешние выводы наносят покрытие сплавом олово-висмут (99,5 Sn) толщиной не менее 6 мкм. После сборки изделия проходят ряд испытаний (термовыдержка, термоциклирование), разбраковку по электрическим параметрам и визуальный контроль.

Качество мощных диодныхборок характеризуется достигнутым уровнем электрических параметров, надежностью микросварных соединений, а также способностью корпуса выдерживать длительные термообработки при повышенных температурах без нарушения герметичности. При этом качество диодныхборок формируется на таких основных операциях, как пайка кристаллов, присоединение проволочных выводов УЗ-сваркой, герметизация приборов контактной сваркой. Уровень быстродействия диодных структур в основном определяется конструктивным исполнением активной структуры: для диодных структур на основе контакта металл – полупроводник уровень быстродействия достигает $1-100 \times 10^{-12}$ с (порядка 10 пс), а для биполярных диффузионных структур он на три порядка хуже и составляет примерно $1-100 \times 10^{-9}$ с (порядка 100 нс). В этом случае важно знать поведение таких диодных структур при выполнении различных сборочных операций.

Оптимизация конструктивно-технологических факторов сборки проводилась по следующему алгоритму:

- Приборы собирались в металlostеклянном корпусе КТ-9 и на рамке выводной с никелевым покрытием толщиной 6–9 мкм.

- Для сборки использовались активные одноданные структуры двух конструктивно-технологических исполнений: на основе контакта металл – полупроводник и биполярных диффузионных структур, прошедших стадию радиационной обработки.
- Для всех вариантов проволочные выводы АОЦПоМ-250 присоединялись на автомате ЭМ-4340М.
- Пайка кристаллов выполнялась легкоплавкими припоями типа ПОС-40, ПСр-2,5 в конвейерной водородной печи при температурах $+300...+420$ °С.
- Проводились отбраковочные технологические операции, в том числе 100%-ный контроль герметичности на выявление брака по малым и большим течам, а также термоциклирование и длительные термотренировки с последующим контролем герметичности и электропараметров.

Для резки пластин на модули использовался автомат дисковой резки ЭМ-2005, в котором основание модуля резки выполнено из гранита на амортизаторах; имеются обратные связи по положению координат *X, Y, Z*; есть бесконтактная система отслеживания глубины резания и износа лезвия диска; зона резания закрытая; расширенная память процессора.

Пайка кристаллов мощных диодов в корпусе ТО-220 велась в конвейерной водородной печи ЖК-4007 с использованием специальной кассеты, состоящей из основания, трафарета и прижима. Режим пайки: первая зона — $+260...+280$ °С; вторая зона — $+360...+380$ °С; скорость ленты — 60 ± 20 мм/мин. Расход водорода — $2-3$ м³/ч, азота — $1,6-1,8$ м³/ч. Контроль качества пайки осуществлялся визуальным осмотром паяного шва по периметру кристалла с помощью микроскопа типа МБС 9 при увеличении $16 \times$.

Разварка межсоединений кристалла с внешними выводами рамки выводной выполнялась алюминиевой проволокой 250 мкм на автомате сварки ЭМ-4020Б. Для упрочнения алюминия и повышения пластичности в состав проволоки введено до 0,5% цинка, что обеспечило ее эластичность и необходимые прочностные характеристики: разрывное удлинение $0,23-0,25$ Н, относительное удлинение $5-15\%$. Процесс УЗ-разварки характеризуется следующими параметрами: мощность $2-9$ отн. ед, длительность $1-9$ отн. ед., давление микросварного инструмента $0,21-0,22$ Н.

В полуавтоматическом режиме работы автомата сварки ЭМ-4020Б коррекцию на положение кристалла относительно инструмента вводит оператор, который совмещает визир сначала с первой, а затем со второй, наиболее удаленной от первой, контактной площадкой. Воспроизводимость позиционирования сварочного инструмента по заданным координатам $\pm 0,25$ мкм. На рис. 5 представлена схема ориентации кристалла.

Циклограмму сварки можно перепрограммировать цифровым заданием скоростей и положения участка циклограммы. Запись координат точек сварки проводится путем обучения с помощью визирного перекрестия на экране видеоконтрольного устройства.

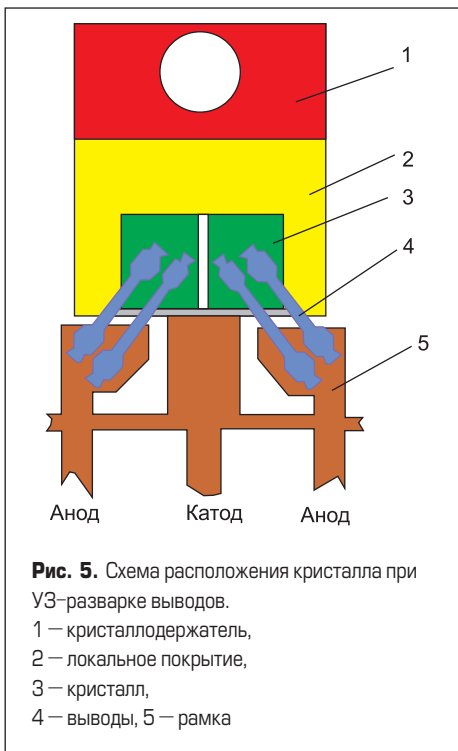


Рис. 5. Схема расположения кристалла при УЗ-разварке выводов.
1 – кристаллодержатель,
2 – локальное покрытие,
3 – кристалл,
4 – выводы, 5 – рамка

Введение коррекции на неточное положение корпуса выполняется оператором в полуавтоматическом режиме. Датчик касания на основе УЗ-преобразователя позволяет избежать динамического воздействия инструмента на кристалл. При срабатывании датчика скорость движения инструмента замедляется, и он мягко прижимает проволоку к контактной площадке. Это дает возможность вести сварку на больших скоростях без выколов кремния под сварной точкой на контактной площадке.

Качество микросварных соединений по внешнему виду проверялось при 16-кратном увеличении на микроскопе МБС-9. Размер микросварного соединения должен быть: 1,5–2 диаметра проволоки по ширине; 2–2,5 диаметра проволоки по длине. Прочность микросварных перемычек на разрыв должна быть не хуже 50% от прочности проволоки (не менее 0,5 Н), а разрыв соединения происходит по проволоке. Не допускаются такие дефекты, как:

- разворот кристалла более $\pm 5^\circ$;

Таблица. Результаты измерений параметров диодов типа КД642АС

Доза облучения, $\times 10^{15}$ эл/см ²	τ_r , нс	$I_{обр}$, мкА при $U_{обр} = 220$ В	$U_{пр}$, В	Накопленный заряд, нКл
0	630	0,05	0,918	66,3
1	192	0,014	0,919	20,1
2	152	0,0095	0,920	14,1
4	101	0,005	0,922	4,16

- смещение за пределы контактной площадки на кристалле более $1/4$ размера сварной точки;
- смещение в пределах площадки, ограниченной размером 2,0 \times 4,0 мм;
- пересечение проволочных выводов;
- контакт с проволокой кристалла или кристаллодержателя;
- смещение сварных точек более чем на половину площади;
- наличие посторонних частиц на кристалле.

Термовыдержка собранной арматуры проводилась в камерах тепла типа КТ-0,5, КТС-М при температуре +150 °С в течение 12 ч, что позволило уменьшить напряженно-деформированное состояние напаянного кристалла и микросварных соединений [9], а также снизить содержание влаги на кристалле и элементах корпуса.

Предварительная защита кристалла осуществлялась компаундом ККП-2. Он наносился на поверхность кристалла для защиты от воздействий окружающей среды, а также для повышения механической прочности микросварных соединений. Покрытие, обволакивая поверхность кристалла, создает демпферный слой, защищающий кристалл от механического воздействия со стороны пластмассового корпуса из-за различия ТКЛР. Собранная арматура выдерживалась под вытяжкой в течение 30–60 мин для удаления растворителей, а затем в лотках конвейерной вертикальной печи осуществлялась сушка компаунда при температуре +125...+150 °С и времени выдержки в каждой зоне 10–15 мин.

Для герметизации была применена машина контактной сварки МРН-140001 УХЛ4. Затем приборы подвергались термообработке при +150(± 5) °С в течение 48 ч и термоциклированию с переменной температур в диапазоне –60...+125(± 5) °С по пять циклов с 30-минутной выдержкой. Показатель герметичности по скорости утечки гелия составлял не более 5×10^{-4} мм рт. ст/с. Разбраковка приборов осуществлялась по электрическим параметрам $I_{обр}$, $U_{пр}$, $U_{проб}$.

Влияние технологии сборки на параметры диодов

В процессе сборки диодов Шоттки, а также быстродействующих диодов, изготовленных с использованием радиационно-технологических процессов, в водородной печи отмечена невоспроизводимость выхода годных из-за появления брака по электропараметрам из-за $I_{обр} > N$ и $U_{проб} < N$.

С целью оптимизации температуры пайки кристаллов диодов Шоттки пластины с диффузионными диодными структурами облучали быстрыми электронами с энергией 4 МэВ на линейном электронном ускорителе флюенсами $1-4 \times 10^{15}$ эл/см. После облучения пластин, механического разделения на отдельные кристаллы и сборки кристаллов в корпус КТ-9 измерялись электрические и динамические параметры диодов для разных флюенсов облучения (таблица). В результате радиационного воздействия в выходном диапазоне токов на диодах практически не изменились обратные токи и прямое напряжение, однако произошло значительное снижение времени задержки включения приборов и величины накопленного заряда. На рис. 6 представлена зависимость быстродействия диффузионных диодов от флюенса электронов.

Основными радиационными дефектами, образующимися в кремнии при облучении быстрыми электронами, являются: А-центры (вакансия + атом кислорода); Е-центры (вакансия + атом фосфора); дивакансии и др.

Пайка кристаллов осуществлялась в конвейерной водородной печи в касетах с заранее вложенным в них припоем ПОС-10 при температуре напайки +300...+420 °С. На рис. 7 представлены зависимости времени обратного восстановления и выхода годных приборов от температуры пайки. При более высоких температурах пайки происходит существен-

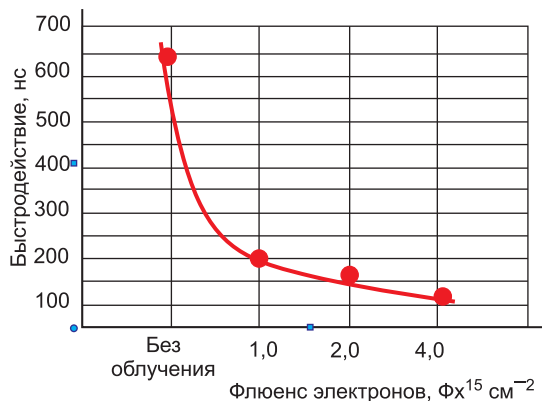


Рис. 6. Зависимость быстродействия диодов от флюенса электронов

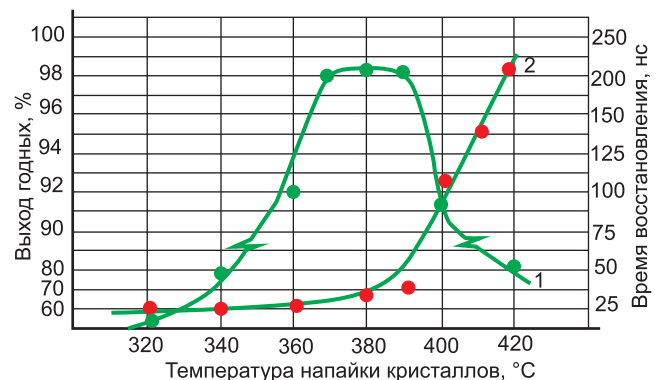
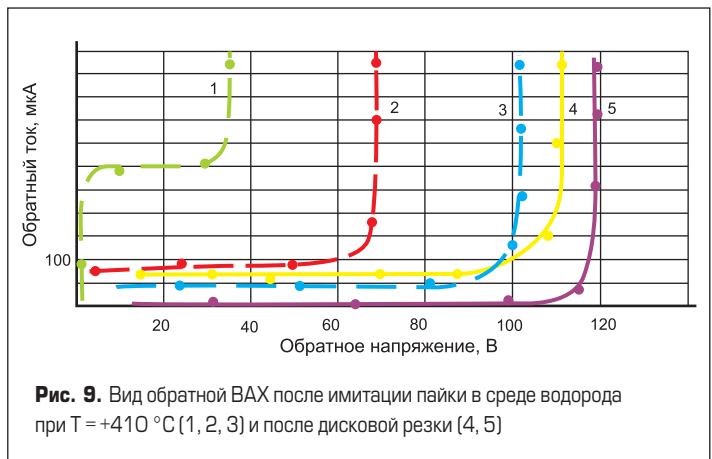
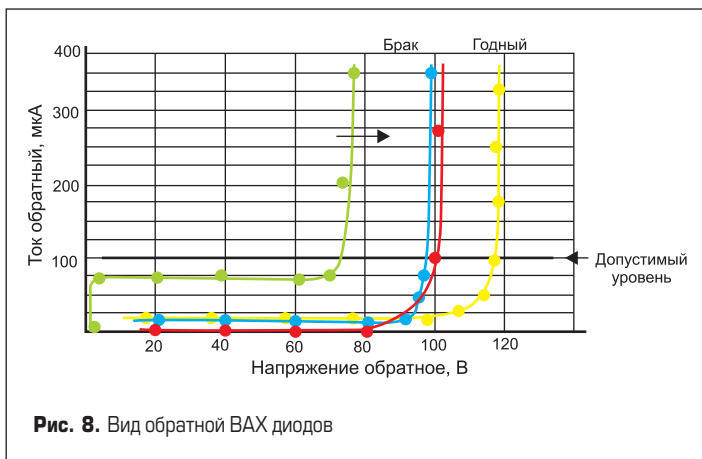


Рис. 7. Зависимости выхода годных [1] и время восстановления заряда диода [2] от температуры пайки кристаллов



ное возрастание времени обратного восстановления. Это объясняется уменьшением рекомбинационно-активных центров породы в результате отжига. Энергия активации отжига радиационных дефектов равна 1,3 эВ, что соответствует дефекту типа А-центра. Выход годных по быстрдействию приборов достигает 95%.

При температурах менее +360 °С отмечается повышенный уровень теплового сопротивления, так как качество пайки является неудовлетворительным из-за плохого растекания припоя под кристаллом. При этом время восстановления достаточно малое и начинает возрастать только при температурах выше +390 °С в результате отжига радиационных дефектов (рис. 7).

Таким образом, для диффузионных диодов с радиационной обработкой температура пайки кристаллов не должна превышать +390 °С, а для обеспечения требуемого уровня теплового сопротивления температура напайки не должна быть менее +360 °С.

В процессе сборки диодов Шоттки в корпусе КТ-9 установлено, что вид ВАХ и уровень пробивного напряжения не изменились после пайки кристаллов при T = +350...+360 °С, а после пайки кристаллов при T = +400 °С на 50–80% диодных структур отмечается снижение пробивного напряжения со 118 до 20–90 В. Распределение приборов по уровню теплового сопротивления имеет малый разброс, а максимальное значение теплового сопротивления в 2,25 раза меньше допустимого уровня (норма не более 2,8 °С/Вт).

Для выявления наличия генерации носителей заряда в области пространственного обеднения проведен анализ ВАХ диодов на измерителе характеристик ППП Л2-56. До и после разгерметизации вид ВАХ не изменился (рис. 8). Вид ВАХ забракованных приборов указывает на изначальное присутствие заряда в окисле и/или на границе раздела Si-SiO₂, что вызывает появление канальной проводимости, приводящей к поверхностному пробоем [8].

После снятия защитного компаунда ККП-2 растворением в дибутилфталате два прибора из 10 штук восстановились, и значение обратного тока у них стало 50–80 мкА при норме ≤100 мкА. Для остальных восьми вид ВАХ и уровень обратного тока не изменились. Отрицательное влияние защитного компа-

унда на уровень обратного тока может быть связано с генерацией дополнительного заряда в системе Si-SiO₂ в результате возникновения механических деформаций активной структуры [9] за счет значительного различия в КТЛР кремния и ККП-2 (для Si — 3×10⁻⁶ 1/°С; для ККП-2 — 35×10⁻⁶ 1/°С). Это состояние усугубляется тем, что толщина компаунда на кристалле имеет переменную величину: максимальную толщину в области микросварных проволочных соединений и минимальную — на периферии кристалла.

Выборочным контролем по внешнему виду дефектов дисковой резки не выявлено (только на 30% кристаллов имеются сколы, доходящие до границы окисла, а на остальных сколы очень мелкие). ВАХ кристаллов имеют стандартный вид для годного прибора — утечки менее 80 мкА, пробой четкий. После имитации процесса пайки кристаллов в водородной печи ЖК-4007АА при T = +410 °С (кристалл размещался на ножке КТ-9 без припойной прокладки) ВАХ резко ухудшилась и стала соответствовать ВАХ для приборов, забракованных на оп. «Классификация». При этом отмечалось снижение пробивного напряжения со 118 В до 100–30 В (рис. 9). После обработки кристаллов в среде кислорода при T = +300 °С (3 ч) пробивное напряжение восстановилось до исходного состояния.

Было исследовано влияние температуры пайки кристалла и газовой среды на изменение ВАХ и уровень обратного тока. Напайка кристаллов проводилась в водородной печи

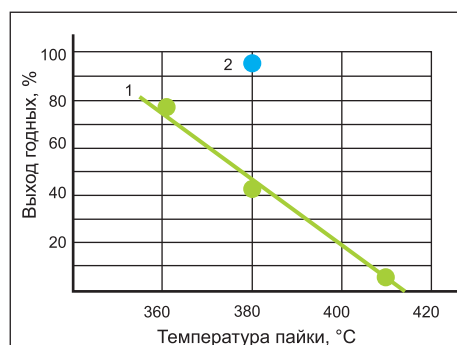


Рис. 10. Влияние температуры напайки кристаллов и газовой среды на выход годных: 1 — печь ЖК-4007АА, среда водород; 2 — автомат ЭМ-4085-03, среда воздух

ЖК-4007АА при температурах +360...+410 °С и на автомате ЭМ-4085-03 в среде воздух + азот при +380 °С на рамку выводную (корпус ТО-220).

По графику на рис. 10 видно, что пайка кристаллов диодов Шоттки при +380 °С в среде воздух + азот на автомате ЭМ-4085-03 (время в зоне не более 1 мин) обеспечивает выход годных на уровне 95%. Однако длительная выдержка активной структуры в среде водорода при температуре более +360 °С (время в зоне примерно 10 мин) приводит к уменьшению выхода годных из-за снижения пробивного напряжения. В этом случае водород при высокой температуре частично диссоциирует на атомарный и, проникая сквозь SiO₂, захватывается ненасыщенными электронными связями, формируя при этом дополнительный подвижный заряд в SiO₂ и на границе раздела Si-SiO₂.

Отмечено, что значение пробивного напряжения возрастает, как правило, до исходного уровня после разогрева электрической мощностью на Л2-56. Это явление указывает на то, что после разогрева происходит рассасывание подвижных зарядов на границе раздела

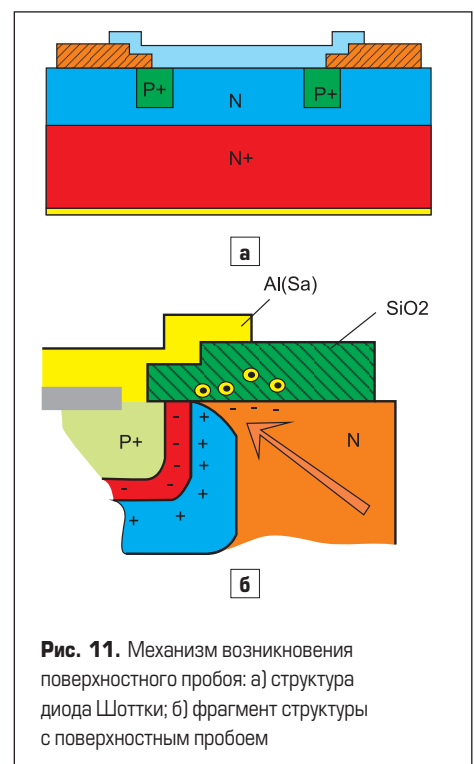


Рис. 11. Механизм возникновения поверхностного пробоя: а) структура диода Шоттки; б) фрагмент структуры с поверхностным пробоем

Si-SiO₂. Механизм возникновения обратимого поверхностного пробоя изложен ниже.

Избыточный положительный заряд на поверхности способствует увеличению концентрации электронов под окисной пленкой, что вызывает сужение обедненной области (*p-n*-переход) у поверхности [10]. В структуре с обогащенной носителями приповерхностной областью при приложении обратного напряжения возрастает напряженность электрического поля в месте сужения *p-n*-перехода (показано стрелкой на рис. 11), что приводит к поверхностному пробую при меньших напряжениях.

Таким образом, основной вид дефектных изделий при измерении электропараметров обусловлен браком по $I_{обр}$ и $U_{проб}$. При этом причиной такого брака является накопление положительных зарядов (протоны водорода) в SiO₂ и на границе раздела Si-SiO₂ в процессе пайки кристаллов в водороде при температурах более +380 °С, приводящее к росту напряженности электрического поля в месте сужения *p-n*-перехода и появлению поверхностного пробоя. Это подтверждается тем, что пайка кристаллов при +380 °С на автомате ЭМ-4085-03 в среде воздух + азот не приводит

к ухудшению обратных токов из-за дополнительного накопления заряда в окисле, поэтому выход годных составляет 95%.

Проведенные исследования позволили оценить влияние условия формирования паяного соединения под кристаллом на уровень электрических и тепловых параметров при выполнении пайки кристаллов в различных технологических режимах, а также на уровень быстродействия биполярных диффузионных структур. Для повышения качества сборки диодов и достижения требуемого уровня выхода годных необходимо проведение работ по оптимизации процесса монтажа кристаллов на припой.

Литература

1. Попов С. Диоды Шоттки для преобразовательной техники // Электронные компоненты. 2002. № 8.
2. Singh R., Ryu S. H., Palmour W., Hefner A., Lai J. 1500V, 4A, 4H-SiC JBS diodes // Proceeding ISPSD 2000. Toulouse. 2000.
3. Родерик Э. Х. Контакты металл-полупроводник / Пер. с англ. М.: Радио и связь. 1982.
4. Пат. № 2000022178 (Япония) Schottky barrier diode / К. Michimaro, Т. Takafumi, Y. Akio, S. Tadaaki // МПК Н 01L 29/872. 2000.
5. Пат. № 5371400 (США) Semiconductor diode structure / К. Sarukai // МПК Н 01L 29/48. 1994.
6. Пат. 5262668 (США) Schottky barrier rectifier including Schottky barrier regions of different barrier height / L. Tu Shang-bui, J. Baliga Bantval // МПК Н 01L 29/48. 1993.
7. Пат. 2000031505 (Япония) Schottky barrier diode / К. Michimaro, Т. Takafumi, Y. Akio, S. Tadaaki // МПК Н 01L 29/872. 2000.
8. Чернышев А. А. Основы надежности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. М.: Радио и связь. 1988.
9. Захаров Н. П., Багдасарян А. В. Механические явления в интегральных структурах. М.: Радио и связь. 1992.
10. Рубцевич И. И., Соловьев Я. А., Глухманчук В. В., Ланин В. Л., Керенцев А. Ф. Влияние токовой тренировки на стабильность параметров диодов Шоттки // Современные информационные и электронные технологии: труды 11 Международной научно-практ. конф. Т. 2. Одесса. 2010.