



ТЕХНОЛОГИЯ ЖИДКОФАЗНОЙ ЭПИТАКСИИ ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ НА ОСНОВЕ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ

TECHNOLOGY OF LIQUID PHASE EPITAXY FOR POWER ELECTRONICS BASED ON MULTILAYER GAAS-(III-V) HETEROSTRUCTURE GROWTH

УДК 621.382

СОЛДАТЕНКОВ ФЕДОР ЮРЬЕВИЧ^{1,2}

f.soldatenkov@mail.ioffe.ru

КОЗЛОВ ВЛАДИМИР АЛЕКСЕЕВИЧ²

kozlov@fidtech.com

SOLDATENKOV FEDOR YU.^{1,2}

f.soldatenkov@mail.ioffe.ru

KOZLOV VLADIMIR A.²

kozlov@fidtech.com

¹ ФТИ им. А. Ф. Иоффе

194021, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

² ООО «Силовые Полупроводники»

195220, г. Санкт-Петербург, ул. Гжатская, 27

¹ Ioffe Institute

26 Politekhnicheskaya St., 194021, Saint-Petersburg

² Power Semiconductors Ltd

27 Gzhatskaya St., 195220, Saint-Petersburg

В работе рассмотрены особенности технологии изготовления методом жидкофазной эпитаксии высоковольтных гетероструктур на основе GaAs и его твердых растворов для приборов импульсной силовой и высокочастотной электроники с нано- и пикосекундными временами переключения и рабочими частотами коммутации до 10 МГц и выше.

Ключевые слова: арсенид галлия; жидкофазная эпитаксия; p-i-n-структуры с гетеропереходами; дислокации несоответствия; приборы импульсной силовой электроники.

The paper considers the main features of liquid-phase epitaxy method for high-voltage heterostructure growth on the base of GaAs solid solutions considered, as well as some examples of power and pulse power devices with subnanosecond switching speed and with switching frequency of 10MHz and above.

Keywords: gallium arsenide; liquid phase epitaxial growth; hetero-junction p-i-n-structure; misfit dislocation; pulsed power devices.

ВВЕДЕНИЕ

Основным материалом для изготовления коммерческих полупроводниковых приборов сегодня является кремний, благодаря его малой стоимости и очень высокому качеству. Однако для изготовления современных быстродействующих силовых приборов, способных эффективно работать на частотах уровня мегагерц и блокировать напряжения в сотни вольт и более, кремний, к сожалению, практически малоприменим. Высоковольтные кремниевые силовые приборы являются, как правило, биполярными приборами с p-n-переходами, так как высокочастотные кремниевые униполярные приборы с барьерами Шоттки не способны блокировать высокие напряжения. Кремниевым биполярным приборам свойственны большие значения времен переключения из проводящего состояния в блокирующее, которые лежат обычно в пределах от долей микросекунды до нескольких микросекунд. Такие большие значения времен выключения обусловлены необходимостью иметь высокие значения времен жизни неосновных носителей заряда $\tau_{\text{нас}}$ в слаболегированных слоях приборных кремниевых структур для снижения статических потерь энергии в проводящем состоянии до приемлемого уровня. При этом коммутационные потери при выключении кремниевых биполярных приборов существенно возрастают с повышением температуры кристалла прибора из-за сильной температурной зависимости $\tau_{\text{нас}}$ в кремнии.

При изготовлении быстродействующих силовых биполярных приборов для высокочастотных и высокотемпературных

применений желательнее использовать полупроводник с большей, чем у кремния шириной запрещенной зоны, большей подвижностью носителей заряда и большей электрической прочностью. Для этих целей в качестве реальной ближайшей практической замены кремнию сегодня рассматриваются такие полупроводники, как SiC и GaN. Благодаря большой ширине запрещенной зоны и высокой электрической прочности, именно эти полупроводники являются в настоящее время фаворитами в соревновании на замену кремния, и особенно для изготовления на их основе униполярных силовых приборов — диодов Шоттки и силовых МОП-транзисторов. Приборы на SiC и GaN с рабочими напряжениями до 1700 В и токами в десятки ампер сегодня доступны на рынке дискретных приборов силовой электроники и уже подтвердили свои эксплуатационные преимущества перед кремниевыми приборами в части быстродействия и эффективности использования при построении высокочастотных преобразователей. Следует отметить, что силовые приборы на основе SiC и GaN, тем не менее, пока не смогли занять той доли мирового рынка, которую им прогнозировали, ввиду их сравнительно высокой стоимости и проблем с качеством полупроводниковых структур большой площади. Высокотемпературные возможности силовых приборов на основе этих материалов также до сих пор не реализованы в полной мере и практически мало отличаются от последних поколений Si силовых приборов с рабочими напряжениями уровня 600 В, являющимися наиболее массовым продуктом. Силовые приборы на основе других

материалов, таких как алмаз, окись галлия, нитрид алюминия и другие, находятся пока только на начальных стадиях разработки.

В России к настоящему времени так пока и не появились сколь-либо серьезные промышленные производители отечественных SiC или GaN приборов силовой электроники ввиду пока еще очень слабого развития ростовой технологии и оборудования для производства структур приборного качества. Единичные отечественные производители силовых приборов на основе данных материалов используют сегодня полупроводниковые кристаллы силовых приборов зарубежного производства и практически осуществляют только их корпусирование. В то же время сегодня Россия является страной, которая предложила и продолжает развивать технологию производства силовых приборов на основе гетероструктур из арсенида галлия [1, 2]. В сравнении с кремнием, GaAs обладает большей шириной запрещенной зоны и значительно большей подвижностью электронов (также и в сравнении с GaN и SiC), относительно высокой электрической прочностью и относительно малыми временами жизни носителей заряда. Значительным преимуществом GaAs является то, что это прямозонный полупроводниковый материал, для которого возможно получение твердых растворов, позволяющих варьировать в широком диапазоне оптические и электрические параметры приборных слоев GaAs-(III-V) гетероэпитаксиальных структур и в широких пределах изменять электрические характеристики приборных структур. Кроме того, сегодня GaAs — это второй в ряду после кремния полупроводниковый материал очень высокого кристаллического совершенства и относительно малой стоимости, в отличие от SiC и GaN. Технология изготовления высоковольтных GaAs структур методом жидкофазной эпитаксии достаточно хорошо развита в России и была внедрена в производство еще во времена СССР. Сегодня эта технология вполне может стать в один ряд с технологиями производства приборов на основе широкозонных полупроводников и особенно в части производства, касающейся изготовления высокочастотных быстродействующих GaAs приборов силовой электроники и импульсной электроники, где GaAs, аналогично его позициям в СВЧ- и оптоэлектронике, может стать полупроводником номер один.

ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ GAAS P-I-N-СТРУКТУР МЕТОДОМ ЖИДКОФАЗНОЙ ЭПИТАКСИИ

Изготовление структур высоковольтных плавных p-i-n-переходов проводилось с использованием модифицированного метода жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) по технологии, основы которой были разработаны в ФТИ им. А. Ф. Иоффе [1] и развиты в дальнейшем в нескольких научно-технических организациях СССР. Эта технология проста в реализации, экономически эффективна и является, по нашему мнению, единственно возможной на сегодня технологией для получения высоковольтных GaAs p-n-переходов, способных блокировать напряжения до 2000 В, что подтверждено сегодня разработками ряда независимых компаний («Силовые Полупроводники», «Мега Эпитех», «Clifton AS», «Clifton GmbH», «Clausus OÜ»). Эпитаксиальные слои GaAs и твердых растворов $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с содержанием InAs до 6% и $\text{GaAs}_{1-y}\text{Sb}_y$ с содержанием GaSb до 5% выращивались на GaAs подложках ориентации (111) и (100), легированных цинком до $(2-10) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Используемые в работе ростовое оборудование и оснастка позволяли

выращивать эпитаксиальные слои на GaAs подложках диаметром 50 мм и 76 мм. Общее количество структур в одной партии ростового процесса может достигать 20 штук и более.

Эпитаксиальное выращивание слоев плавного слаболегированного p-n-перехода проводилось из ограниченного раствора-расплава In-Ga-As или Ga-As-Sb в атмосфере водорода в касетах-лодочках из кварца или графита при температурах начала кристаллизации 850–950 °С с последующим охлаждением, как правило, до комнатной температуры. Конечная толщина эпитаксиального слоя твердого раствора (при выращивании в лодочках из кварца) определялась соответствующим выбором начальной толщины слоя расплава между подложками GaAs, то есть толщины прокладок, установленных между подложками.

Содержание электрически активных дефектов в эпитаксиальных слоях при данном способе выращивания определяется содержанием остаточных (фоновых) примесей в расплаве и ростовой системе, температурой и длительностью предварительного отжига раствора-расплава, расходом водорода и его влажностью, а также зависит от режима кристаллизации эпитаксиальной пленки при принудительном охлаждении системы. При данном способе ЖФЭ выращивания структур с p-n-переходом возможно получение толстых слаболегированных i-слоев GaAs, GaAsSb или InGaAs с концентрацией свободных носителей порядка 10^{13} см^{-3} или менее. Типичное распределение концентрации свободных носителей заряда по толщине диодов с эпитаксиальными базовыми слоями GaAs, InGaAs или GaAsSb показано на рис. 1 (профиль распределения получен при послойном травлении структуры из вольт-емкостной зависимости барьера Шоттки).

Состав жидкой фазы для получения слоев твердого раствора нужного состава определялся из расчетов в модели квазирегулярного приближения. Толщина и состав гетероэпитаксиального слоя для получения наиболее быстродействующих диодов выбирались таким образом, чтобы превысить критические толщины начала релаксационного дефектообразования в псевдоморфных пленках и обеспечить контролируемое образование дислокаций несоответствия в базовых слоях прибора, но не допустить интенсивной пластической деформации данного слоя. Так, в работе [3] был экспериментально определен диапазон составов, удовлетворяющий данным требованиям для слоев твердого раствора $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, имеющих толщины от 50 до 65 мкм, — x от 1,5 до 3,3 мол.%. При таких толщинах и составах

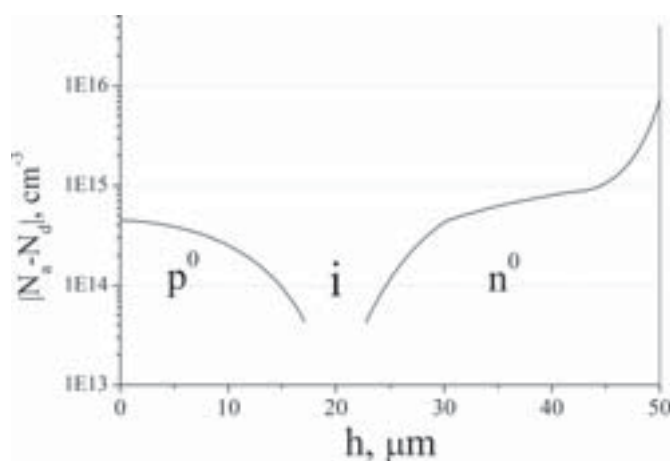


Рис. 1. Типичный профиль распределения свободных носителей заряда в активных слоях p-i-n-диода, выращенного на p⁺-GaAs подложке

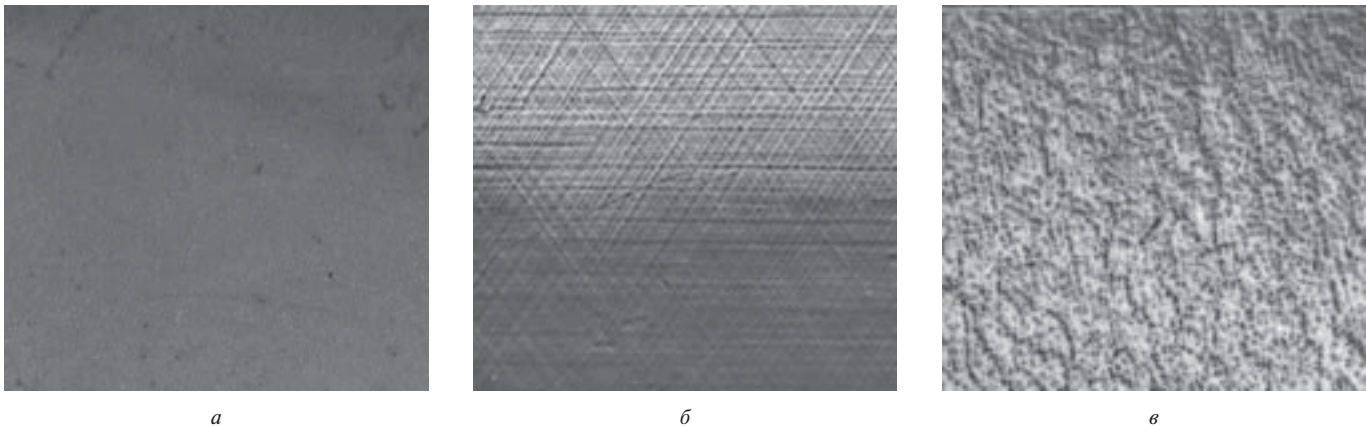


Рис. 2. Рентгеновские топограммы гомоэпитаксиальной GaAs p-i-n-структуры (а) и двух гетероэпитаксиальных $In_xGa_{1-x}As$ -GaAs (б, в) структур с одинаковыми по толщине базовыми слоями (50–65 мкм), но с различной степенью изовалентного легирования, т. е. с разными по составу x базовыми слоями: $x = 0$ (а); $x \sim 2\%$ (б); $x \sim 5\%$ (в). Метод Брэгга, $CuK\alpha$, отражения 422 (а); 422 (б); 331 (в)

твёрдого раствора $In_xGa_{1-x}As$ в эпитаксиальных слоях образуется регулярная квазиоднородная сетка линейных дислокаций несоответствия (рис. 2б), соответствующая ориентации подложки. Образование сетки дислокаций сопровождается существенным уменьшением эффективного времени жизни носителей заряда τ_{eff} вблизи p-n-перехода по мере роста ее плотности с увеличением степени изовалентного легирования x (рис. 3), что, соответственно, приводит к уменьшению времени восстановления блокирующих свойств диода t_{tr} при выключении.

Детальные исследования кристаллической структуры слаболегированных слоев в гетероструктурах $In_xGa_{1-x}As$ -GaAs ориентации (111) были проведены с использованием рентгеновского $CuK\alpha$ -излучения и рентгеновских методов регистрации обратного отражения с разной глубиной информационного слоя для асимметричных 422 и 331 отражений. Следует отметить, что увеличение степени изовалентного легирования выше некоторого порогового уровня $x_{кр}$ сопровождается перестройкой регулярной квазиоднородной сетки дислокаций в резко неоднородную ячеистую структуру (рис. 2в) с высокой плотностью дислокаций в областях стенок, что сопровождается резким снижением пробивных напряжений U_R для p-n-переходов на основе таких структур. В области значений x менее $x_{кр}$ величина U_R плавно снижается от уровня 800–1000 В при $x \sim 0$ –1% до значений 400–600 В при $x \sim 3,5\%$.

Взаимосвязь режимов эпитаксии слоев GaAs, обеспечивающих разную степень изовалентного легирования, с усредненной величиной времени жизни τ_{eff} и параметрами глубоких ловушек выявлялась на основе анализа спектров DLTS, измеренных по методике, представленной в работе [4]. В слоях GaAs-(III-V) с сеткой дислокаций несоответствия, помимо хорошо известных акцепторных ловушек HL2 и HL5, были обнаружены глубокие акцепторные и донорные уровни, которые, как мы полагаем, связаны с наличием дислокаций несоответствия. Данные уровни имеют большие сечения захвата носителей заряда и оказывают решающее влияние на величину времени жизни неравновесных носителей заряда в базовых слоях гетероструктур с регулярной квазиоднородной сеткой дислокаций. Детальный анализ дефектов с глубокими уровнями в таких структурах и влияние этих ловушек на генерационно-рекомбинационные процессы в гетероструктурах GaAs — A^3B^5 с изовалентным легированием требуют дополнительного исследования и станут темой отдельной публикации. Следует отметить, что при изготовлении

приборных структур современных силовых приборов обычно регулируется не только среднее значение τ_{eff} в базовых слоях приборной структуры, но применяются и специальные методы, обеспечивающие возможность получения неоднородных пространственных распределений времени жизни носителей заряда в кристаллах приборов. Наиболее распространенным методом создания таких профилей времени жизни сегодня является технология облучения приборных структур протонами или другими ионами высоких энергий. Данный метод имеет ряд несомненных достоинств [5] и основан на радиационных процессах создания точечных дефектов в локальных слоях приборных полупроводниковых структур практически после полного завершения всех ростовых процессов и пост-ростовых операций их изготовления. Технология протонного облучения и локального введения радиационных дефектов была также использована нами как метод точной коррекции и оптимизации статических и динамических характеристик приборных структур на основе GaAs для их наиболее эффективного использования в конкретных режимах работы электронных схем.

Сильнолегированные эмиттерные слои диодных структур p^+ -GaAs, легированные Te или Sn, выращивались в поршневых

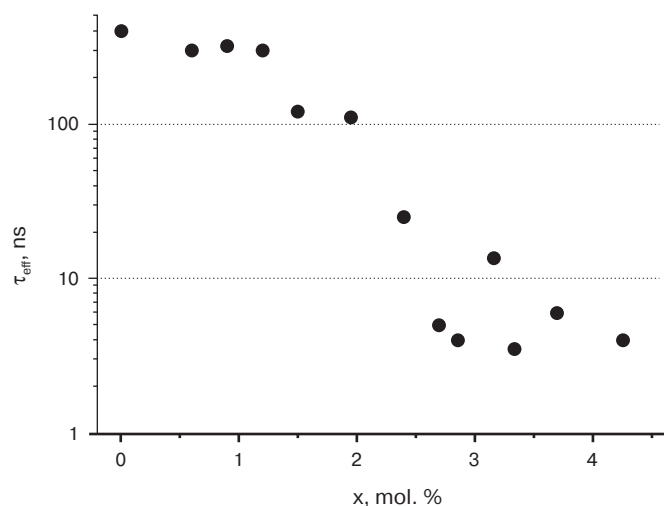


Рис. 3. Эффективные времена жизни ННЗ τ_{eff} в $In_xGa_{1-x}As$ p-i-n-структурах, выращенных на подложках p^+ -GaAs; x — состав пленки вблизи границы раздела слой-подложка



кассетах из графита, позволяющих формировать несколько слоев различного типа проводимости и состава в едином технологическом процессе. Изменение состава жидкой фазы, а, соответственно, и состава кристаллизующихся при выращивании из этой фазы кристаллических слоев, в таком методе осуществляется вытеснением одного расплава другим с помощью поршня без обнажения поверхности подложки. В ряде случаев для управления эффективностью инжекции из эмиттеров и мягкостью процесса обратного восстановления диодов при выращивании эмиттеров использовались твердые растворы AlGaAs [6].

Для формирования омических контактов к структурам обычно использовались многослойные контактные системы: на p^+ -GaAs последовательно наносили слои Cr, Ni и Au или Ti, Pt и Au, а на n^+ -GaAs — эвтектический сплав AuGe, Ni и Au, с последующим электрохимическим утолщением контактов золотом или серебром до 1,5–2,5 мкм. Чипы приборных структур изготавливали путем вытравливания меза-структур необходимой геометрии с помощью оптической литографии и глубокого жидкостного травления активных слоев приборных структур вплоть до подложки, на которой они выращивались. Для пассивации боковой поверхности вытравленных меза-структур диодов применялись различные способы химических обработок в жидких растворах: сульфидирование, азотирование или фторирование, а для стабилизации свойств поверхности диодов — нанесение диэлектрических покрытий толщиной от 0,03 до 0,2 мкм: нитрида кремния (путем нанесения методом низкотемпературного плазменно-активированного пиролиза силана), AlN (методом реактивного ионно-плазменного распыления) или Al_2O_3 (методом атомно-слоевого осаждения, ALD).

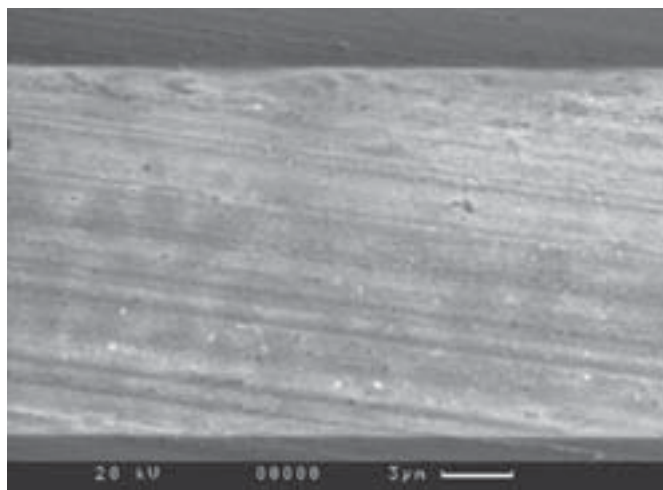
Сборка кристаллов арсенид галлиевых диодов на кристаллодержатели из нитрида алюминия или на металлизированные контактные площадки металло-керамических корпусов осуществлялась с применением технологии «синтеринга» — синтеза металлических пористых слоев серебра из пленочных материалов и паст, изготовленных на основе серебряных наночастиц со средним размером около 25 нм. Для данного процесса нами применялся режим сборки GaAs кристаллов с основанием при температурах в диапазоне 230–260 °С и с одновременно прикладываемым к кристаллу усилием в диапазоне давлений 2–5 МПа. Процесс

синтеринга обеспечивал соединение кристалла GaAs диода и контактной площадки основания, имеющих финишную металлизацию слоями золота или серебра (толщиной ~ 0,1 мкм), через слой чистого серебра. Толщина такого слоя составляла после завершения процесса синтеринга величину порядка 10 мкм (при исходной толщине сухой пленки 35 мкм и величине давления при сборке 5 МПа), а объемная доля пор находилась на уровне не более ~10–15%, что контролировалось методами электронной микроскопии (рис. 4). Синтезированные по данной технологии слои из серебра обеспечивали величину удельного электросопротивления на уровне $\sim (2-3) \cdot 10^{-6}$ Ом·см и величину теплопроводности синтезированной пленки серебра более 200 Вт/(м·К). Такой способ сборки кристаллов GaAs позволял минимизировать электрическое сопротивление кристалл-корпус, существенно снизить тепловое сопротивление переход-корпус (в том числе, и за счет возможности «флип-чип» монтажа кристалла, т.е. соединением перевернутого кристалла к основанию), повысить надежность и стойкость такой сборки к термоциклированию и обеспечить возможность работы кристалла при высоких температурах.

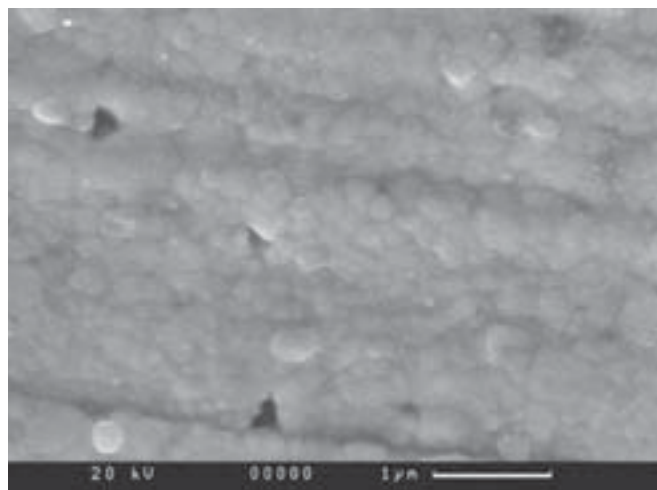
ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ДИОДНЫХ P-I-N-СТРУКТУР

К настоящему времени реализовано большое количество примеров изготовления силовых биполярных приборов ключевого типа, начиная от простейших диодных структур и заканчивая сложными фотонно-инжекционными тиристорами с электрическим и оптическим управлением, созданных методом жидкофазной эпитаксии [1, 2, 7, 8]. Ввиду того, что основу всех этих типов приборов составляют структуры с высоковольтным p-n-переходом, в данной работе мы остановимся для простоты на рассмотрении основных особенностей и характеристик приборов только с одним p-n-переходом, а также приведем возможные примеры нескольких типов диодов с нано- и пикосекундным быстродействием, разработанных на их основе для высокочастотной импульсной техники.

Ранее упоминалось, что гетероэпитаксиальные структуры выгодно отличаются от гомоэпитаксиальных тем, что позволяют



а



б

Рис. 4. Полученные на электронном микроскопе изображения сечения слоя серебра, синтезированного с применением материала «Argomax 8020» от компании «Alpha Assembly Solutions» (США), между чипом GaAs диода и металлизированным основанием (а) и в области реза через синтезированный слой Ag (б)

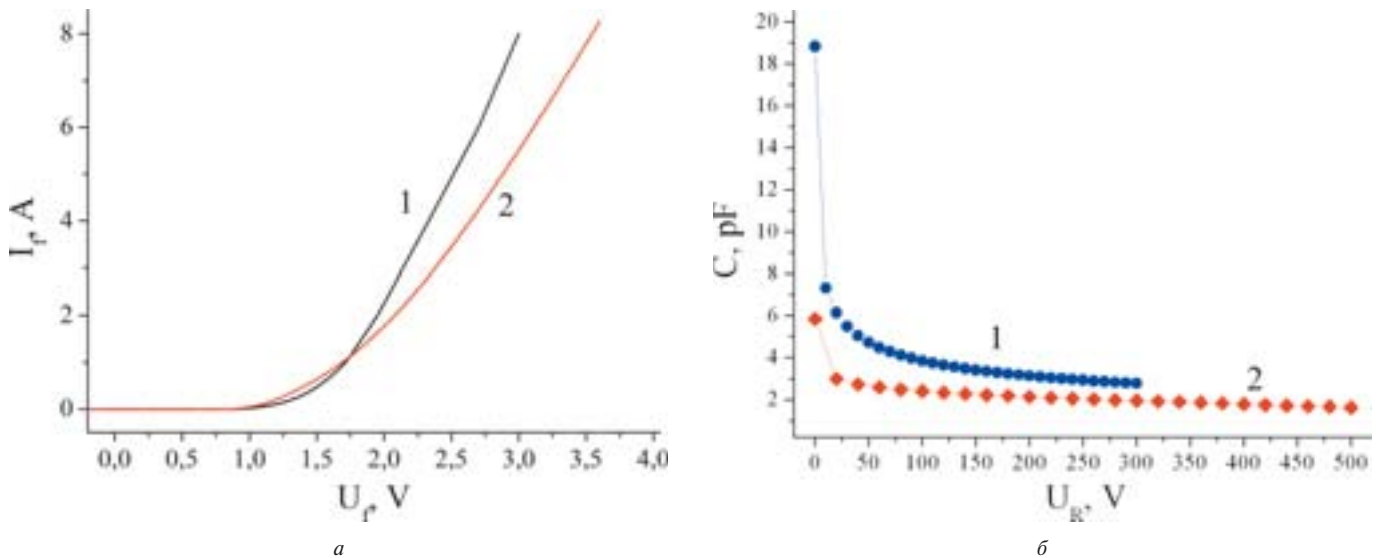


Рис. 5. а) Типичные зависимости величины падения напряжения U_f (а) и емкости C (б) гетероэпитаксиальных GaAs-(III-V) диодов с толщиной базового слоя около 40 мкм (1) и 80 мкм (2). Площадь диодов $S \sim 0,008 \text{ см}^2$

наиболее широко варьировать свойства слоев и характеристики приборов применительно к конкретным приборным приложениям. Блокирующие напряжения U_R гетероэпитаксиальных диодов с дислокациями несоответствия в базовых слоях, как правило, несколько меньше в сравнении с максимально возможными U_R для гомоэпитаксиальных GaAs p-i-n-диодов при одинаковых толщинах базовых слоев. Тем не менее, на сегодня гетероэпитаксиальные диоды перекрывают наиболее массовый сегмент рынка силовых диодов по напряжению и обеспечивают величину достижимых U_R до 800 В при наносекундном и субнаносекундном уровне быстродействия структур во время переключений.

Прямые падения напряжения U_f на GaAs-(III-V) диодных структурах с наносекундными временами τ_{eff} и рабочими напряжениями уровня до 600 В обычно имеют величину U_f не более 2 В при плотности тока 150 А/см^2 и $U_f < 3,0 \text{ В}$ при плотности тока порядка 10^3 А/см^2 (рис. 5а). Электрическая емкость таких диодов C весьма мала и слабо зависит от напряжения, что позволяет приборам с такими переходами работать на частотах в единицы и даже десятки МГц в вентильном режиме при сравнительно больших значениях площади диодных структур. Типичная емкость составляет $C_0 \sim (1-2) \cdot 10^3 \text{ пФ/см}^2$ без смещения и $C \sim (2-4) \cdot 10^2 \text{ пФ/см}^2$ при $U_R = 100-500 \text{ В}$ (рис. 5б).

Технологии изовалентного легирования для управления дефектообразованием во время эпитаксиального роста, а также методы протонного облучения для точной коррекции времени жизни в структурах после завершения ростовых процессов, позволяют изготавливать диоды на основе гетероструктур GaAs-(III-V), имеющих наносекундные значения τ_{eff} и времена восстановления блокирующих свойств диодов при переключении из проводящего состояния в блокирующее на уровне менее 10 нс. Данные технологии обеспечивают таким образом возможность изготовления высоковольтных биполярных диодов, имеющих наименьший из известных нам уровень удельного заряда выключения Q_{tr} и времени выключения t_{tr} , а также наименьшие статические и коммутационные потери при включении в классе существующих сегодня биполярных полупроводниковых диодов. По совокупности своих динамических характеристик такие диоды практически очень мало уступают диодам Шоттки на основе SiC или GaN.

GaAs диодные структуры реально способны работать при температурах кристалла вплоть до 250°C , так как ширина запрещенной зоны даже для материалов $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с уровнем x менее 5% достаточна для предотвращения перехода к собственной проводимости такого материала вплоть до температуры не менее 300°C . При этом с повышением температуры GaAs

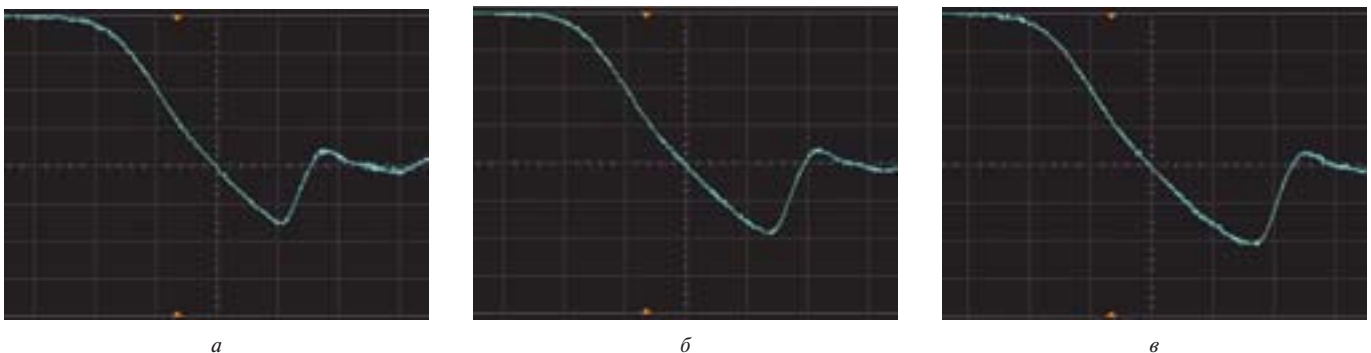


Рис. 6. Осциллограммы выключения GaAs-(III-V) диода при различных температурах кристалла: а) $T = 20^\circ\text{C}$, б) $T = 100^\circ\text{C}$, в) $T = 175^\circ\text{C}$. Горизонтальная развертка — 5 нс/дел; вертикальная развертка — 0,25 А/дел. Линия нулевого тока через диод проходит через горизонтальную ось в центре экрана, выше этой линии ток, протекающий через диод, идет в «прямом» направлении, ниже — в обратном

диодной структуры ее быстродействие, статические и коммутационные потери ухудшаются существенно медленнее в сравнении с кремниевыми диодами в связи со сравнительно слабыми температурными зависимостями времени жизни носителей заряда и термогенерационного тока в слое объемного заряда p-n-перехода. На рис. 6, для примера, приведены три осциллограммы тока через диодную GaAs p-i-n-структуру при трех значениях температуры GaAs-(III-V) кристалла в процессе выключения диода. Из осциллограмм видно, что время t_{rr} и заряд Q_{rr} обратного восстановления GaAs-(III-V) диодной структуры увеличиваются в пределах нескольких десятков процентов относительно исходного значения при повышении температуры кристалла до уровня 175 °С. Для кремниевых биполярных силовых диодов увеличение значений t_{rr} и Q_{rr} с ростом температуры происходит значительно сильнее (увеличение в 2–2,5 раза при нагреве до 170 °С). Следует также отметить, что температурную зависимость значений t_{rr} и Q_{rr} для диодов на основе GaAs можно корректировать подбором режимов эпитаксиального роста и соответствующим изменением состава ловушек с глубокими уровнями в слаболегированных эпитаксиальных слоях.

ПРИМЕРЫ ДИОДНЫХ СТРУКТУР, РАЗРАБОТАННЫХ ДЛЯ ИМПУЛЬСНЫХ И ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ

Гипербыстродействующие силовые эпитаксиальные GaAs диоды (Hyper Fast Recovery Epitaxial Diodes, H-FRED) с наносекундным быстродействием

Приборы этого типа широко используют при изготовлении высокочастотных преобразователей электроэнергии. Предельный частотный лимит для кремниевых биполярных FRED обычно не превышает уровня 500 кГц из-за больших значений t_{rr} и коммутационных потерь, а также большой величины удельной электрической емкости Si диодов. Мы разработали технологию изготовления гетероэпитаксиальных GaAs-(III-V) структур H-FRED диодов с наносекундными значениями времен включения t_{on} и выключения t_{off} (рис. 7) и отличающихся малыми значениями удельной емкости даже при нулевом смещении (C_0 менее 10 пФ/мм²). Такие диоды способны эффективно работать в вентильном режиме с рабочими напряжениями сети 220/380 В и на частотах вплоть до уровня ~10 МГц.

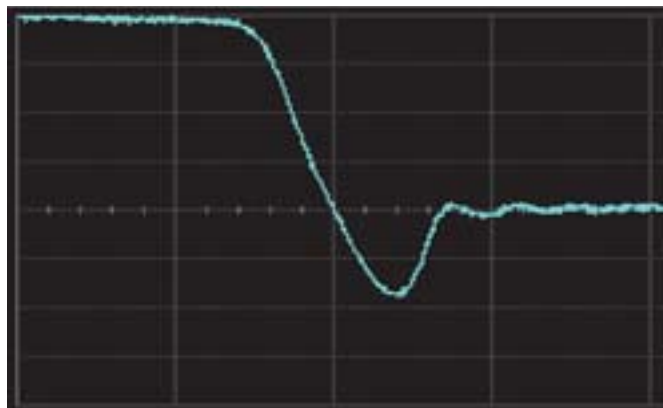


Рис. 7. Осциллограмма выключения GaAs-(III-V) гетероэпитаксиального диода с площадью p-n-перехода $S \sim 0,01 \text{ см}^2$ и $U_R = 400 \text{ В}$ ($I_f = 1,2 \text{ А}$, $dI/dt = -240 \text{ А/мкс}$, $U_r = 200 \text{ В}$). Горизонтальная развертка — 10 нс/дел; вертикальная развертка — 0,3 А/дел

Дрейфовые диоды с резким восстановлением (ДДРВ)

ДДРВ — ключевой диод специального типа, обычно использующийся как «ключ-размыкатель» (opening switch) для формирования коротких импульсов в цепях с индуктивными накопителями энергии [9]. Первые Si-ДДРВ были разработаны на кремнии для генерации электрических импульсов с наносекундными временами нарастания [10]. Наши исследования показали, что высоковольтные GaAs-ДДРВ могут переключаться в два раза быстрее Si-ДДРВ при одинаковом значении пробивного напряжения диода или иметь в два с лишним раза большую амплитуду формируемого таким ДДРВ импульса напряжения и в пять раз большую импульсную мощность при одинаковом с кремниевыми приборами быстродействии (см. рис. 8). GaAs ДДРВ в сравнении с кремниевыми способны работать на более высоких частотах генерации импульсов, вплоть до уровня в 100 МГц, при более высокой рабочей температуре перехода и при меньшем тепловом дрейфе динамических характеристик. Кроме того, данные приборы, изготовленные на основе GaAs, имеют существенно более широкий в сравнении с Si-ДДРВ динамический диапазон рабочих плотностей тока, при которых ДДРВ сохраняет высокое быстродействие. Данная разница объясняется тем, что в арсениде галлия скорость дрейфа носителей заряда имеет значение, близкое к насыщенной скорости дрейфа носителей в кремнии в существенно более широком диапазоне значений напряженности электрического поля.

GaAs диоды-обострители, работающие в режиме задержанного лавинного пробоя (GaAs Fast Ionization Devices, GaAs-FID)

GaAs-FID — это приборы с пикосекундными временами переключения, применяемые в качестве «ключей-замыкателей» (closing-switch) [10] для уменьшения длительности времен нарастания импульсов (рис. 9). Данный класс приборов работает на использовании явления задержанного лавинного пробоя p-n-перехода в условиях сильного динамического превышения предела статической электрической прочности полупроводника

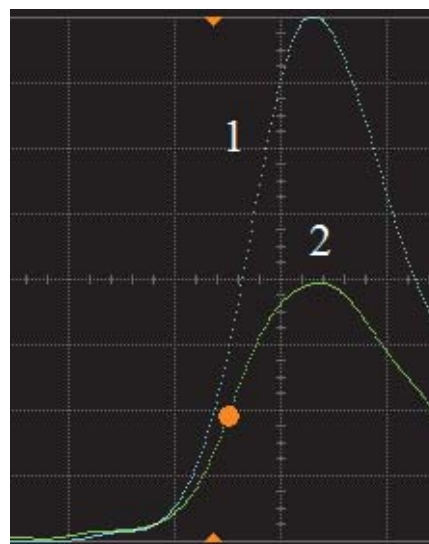


Рис. 8. Осциллограммы импульсов напряжения, генерируемые единственным GaAs-ДДРВ с амплитудой 450 В (кривая 1) и Si-ДДРВ с амплитудой 210 В (кривая 2). Приборы имеют примерно равный уровень быстродействия при переключении (чуть менее 200 пс), но разную импульсную мощность. Горизонтальная развертка — 200 пс/дел; вертикальная развертка — 50 В/дел

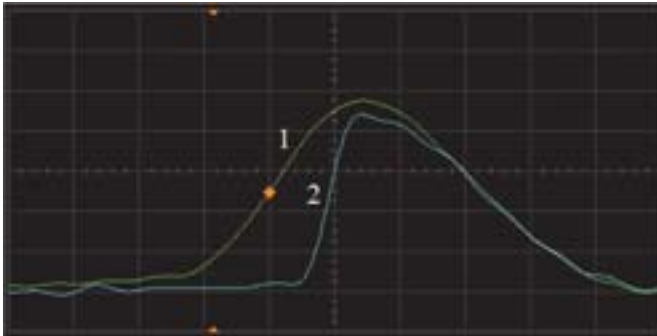


Рис. 9. Осциллограмма импульса напряжения, полученного с использованием GaAs-FID с блокирующим напряжением 450 В. 1 — импульс, подаваемый на GaAs-FID; 2 — «обостренный» импульс, формируемый после прохождения через GaAs-FID. Горизонтальная развертка — 200 нс/дел; вертикальная развертка — 200 В/дел

в электрическом поле. Переключение FID-диода в проводящее состояние происходит после сверхбыстрого пробега через базовые слои структуры (за времена быстрее времен пролета электронов, двигающихся с насыщенной скоростью дрейфа) волны ударной ионизации, оставляющей за собой плотную токопроводящую плазму неравновесных носителей заряда. В настоящее время технология изготовления структур GaAs-FID обеспечивает возможность производства приборов с рабочими напряжениями 300–1500 В и временами переключения менее 80 пс. Такие «обострители» на основе GaAs имеют в сравнении с кремниевыми приборами существенно меньшие потери в проводящем состоянии, т. е. меньшее значение электрического сопротивления после переключения, которое к тому же поддерживается значительно дольше, несмотря на рассасывание плазмы протекающим через GaAs-FID структуру током [11]. Это открывает возможность применения таких приборов в режимах, когда требуется «обострение» фронта сравнительно длинных наносекундных импульсов, что не могут обеспечить кремниевые диодные обострители.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основы технологии изготовления высоковольтных GaAs гетероэпитаксиальных структур методом жидкофазной эпитаксии достаточно хорошо развиты в России, что позволяет рассчитывать на реализацию в короткие сроки промышленного выпуска приборов силовой и импульсной электроники для высокочастотных и высокотемпературных применений. Это направление может составить отечественную альтернативу или, по крайней мере, сравнительно простое эффективное дополнение в дорожную карту развития технологий производства силовых приборов на основе широкозонных полупроводников. Особенно значима данная технология может быть в развитии отечественного производства новых высокочастотных быстродействующих приборов силовой и импульсной электроники с нано- и пикосекундным быстродействием, где GaAs, аналогично его позициям в СВЧ- и оптоэлектронике, может стать лидирующим полупроводниковым материалом.

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты:

1. Сформулированы принципы достижения малых времен жизни ННЗ и высокой блокирующей способности р-п-переходов на основе GaAs при выращивании высоковольтных гетероэпитаксиальных структур с применением метода

изовалентного легирования арсенида галлия в процессе жидкофазной эпитаксии.

2. Разработана технология изготовления и исследованы характеристики силовых импульсных GaAs диодов специальных типов, предназначенных для работы в импульсных устройствах с нано- и пикосекундным быстродействием на рабочих частотах в десятки МГц и при температурах кристаллов диодов до 250 °С.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ 16-08-00954-а).

ЛИТЕРАТУРА

- Алферов Ж. И., Корольков В. И., Никитин В. Г., Степанова М. Н., Третьяков Д. Н. Мощные быстродействующие диоды на основе арсенида галлия // — Письма в ЖТФ. — 1976. Т. 2. — Вып. 2. — С. 201–204.
- Солдатенков Ф. Ю., Данильченко В. Г., Корольков В. И. Управление временем жизни носителей заряда в высоковольтных р-и-п-диодах на основе гетероструктур InGaAs/GaAs // — ФТП. — 2007. Т. 41. — Вып. 2. — С. 217–220.
- Kozlov V. A., Soldatenkov F. Yu., Danilchenko V. G., Korolkov V. I. and Shulpina I. L. *Defect Engineering for Carrier Lifetime Control in High Voltage GaAs Power Diodes* // — Proc. of 25th Advanced Semiconductor Manufacturing Conference (ASMC-2014) (Saratoga Springs, USA, 19–21 May 2014). — 2014, pp. 139–144.
- Соболев М. М., Солдатенков Ф. Ю., Козлов В. А. Исследования глубоких уровней GaAs р-и-п-структур // — ФТП. — 2016. — Т. 50. — № 7. — С. 941–945.
- Козлов В. А., Козловский В. В. Легирование полупроводников радиационными дефектами при облучении протонами и альфа-частицами. Обзор // — ФТП. — 2001. — Т. 35. — № 7. — С. 769–795.
- Lebedeva N. M., Kozlov V. A., Soldatenkov F. Yu., Usikova A. A. *Effect of a Wideband Heteroepitaxial Emitter on Dynamics of Turn-off Switching of High-Voltage Power GaAs p-i-n-Diodes* // — Journal of Physics: Conference Series. — 2016, Vol. 690, — p. #012038-.
- Алферов Ж. И., Ефанов В. М., Задиранов Ю. М., Кардосысов А. Ф., Корольков В. И., Пономарев С. И., Рожков А. В. Электрически управляемые трехэлектродные высоковольтные переключатели субнаносекундного диапазона на основе многослойной GaAs-AlGaAs гетероструктуры // — Письма в ЖТФ. — 1986. — Т. 12. — № 21. — С. 1281–1285.
- Данильченко В. Г., Корольков В. И., Пономарев С. И., Солдатенков Ф. Ю. Тиристоры на основе гетероструктур GaAs-AlGaAs с полностью оптической связью // — ФТП. — 2011. — Т. 45. — № 4. — С. 524–527.
- Kozlov V. A., Smirnova I. A., Moryakova S. A., Kardo-Sysoev A. F. *New Generation of Drift Step Recovery Diodes (DSRD) for Subnanosecond Switching and High Repetition Rate Operation* // — Conf. Record of the 21st Power Modulator Symp., Hollywood, USA. — 2002, pp. 441–444.
- Kardo-Sysoev A. F. *New Semiconductor Devices for Generation of Nano- and Subnanosecond Pulses* // Chapter 9 in the book “Ultra-Wideband Radar Technology”, Ed. by D. Taylor. — CRC Press. — New York, NY, USA. — 2001, pp. 205–290.
- Brylevskiy V. I., Smirnova I. A., Rozhkov A. V., Brunkov P. N., Rodin P. B., Grekhov I. V. *Picosecond-Range Avalanche Switching of High-Voltage Diodes: Si Versus GaAs Structures* // — IEEE Transactions on Plasma Science. — 2016, Vol. 44. — No. 10, pp. 1941–1946.