

Высокоомные структуры GaAs-AlGaAs для силовой электроники

Крюков В. Л.¹, Крюков Е. В.², Леви А. В.³

¹ООО «МеГаЭпитех» 248033, Россия, г. Калуга, 2й Академический проезд, д. 25
mega_epitech@elmatgroup.ru

²ООО «Эпиком» 248033, Россия, г. Калуга, 2й Академический проезд, д. 25
evgenii.kryukov@mail.ru

³ООО «Мега СМ» 124460, г. Москва, Зеленоград, Панфиловский проспект, д. 8, стр. 13
mega_sm@epitaxy.ru

Аннотация

Рассмотрены особенности конструкции высокоомных p-i-n структур на основе системы GaAs-AlGaAs и способ их выращивания методом жидкофазной эпитаксии, позволяющие реализовать силовые диоды, существенно превосходящие по совокупности основных параметров лучшие кремниевые аналоги.

Ключевые слова: силовая электроника; жидкофазная эпитаксия; p-i-n диод; соединения A³B⁵.

Интенсивное внедрение во всем мире энергосберегающих технологий предъявляет к устройствам и приборам силовой электроники все более жесткие требования, выполнить которые, используя традиционную электронно компонентную базу (ЭКБ), не всегда представляется возможным. Базовый материал современной электроники — кремний для целого ряда применений исчерпал свои возможности. Кремниевые диоды UFRED обладают низкой стоимостью, широким диапазоном рабочих токов и напряжений, относительно хорошей динамикой, высокой технологичностью, но имеют сильно выраженную зависимость переходной (переключающей) характеристики от температуры, что снижает их потребительские свойства и область применения. Наличие неоптимального процесса обратного восстановления у кремниевых диодов вызывает потери переключения, которые приводят к значительному росту мощности, рассеиваемой прибором на высоких частотах [1]. Поэтому в настоящее время расширяется применение более широкозонных материалов, которые позволяют преодолеть ограничения кремниевых приборов, в том числе, к арсениду галлия и к системе твердых растворов на его основе GaAs-AlGaAs.

Свойства арсенида галлия, такие как прямозонная структура, высокая подвижность электронов, малое время жизни неосновных носителей заряда, высокое кристаллическое совершенство, возможность формирования гетерокомпозиций в системе GaAs-AlGaAs позволяют реализовать целый ряд уникальных приборов. Технология получения GaAs хорошо отработана и широко применяется в современной электронике. Кристаллы GaAs производятся на стандартном оборудовании и имеют высокий процент выхода годных изделий, обеспечивая необходимый для промышленного применения уровень надежности. Вследствие превосходства технических характеристик и высоких экономических показателей GaAs приборы обладают потенциалом быстрого вытеснения кремниевых аналогов из высокочастотного сегмента силовых приборов. Тем не менее, в настоящее время, арсенид галлия как материал силовой электроники не получил пристального внимания разработчиков в силу отсутствия надежного промышленного метода получения высокоомного эпитаксиального материала, способного обеспечить высокие пробивные напряжения. Для получения высоких значений пробивного напряжения, улучшенных частотных характеристик, малых потерь при переключении необходима эпитаксиальная p-i-n структура на основе системы GaAs-AlGaAs, имеющая протяженные слои с низкой концентрацией примеси и высокой подвижностью носителей [2].

Для получения таких p-i-n структур наиболее подходит метод жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ), сочетающий в себе низкую себестоимость технологического процесса, простоту оборудования, возможность выращивания многослойных композиций, а также широкие возможности управления свойствами структуры за счет подбора легирующих компонентов и параметров технологического процесса. Основы технологии получения высокоомных p-i-n структур на основе арсенида галлия были заложены в разработках ФТИ им. А.Ф.Иоффе [3]. Особенности технологии заключались в применении кварцевой ростовой оснастки и специально увлажненного водорода при проведении технологического процесса. В рамках этих работ была показана принципиальная возможность получения высоковольтных быстроредействующих GaAs p-i-n структур и силовых диодов на их основе, существенно превосходящих по совокупности основных параметров лучшие кремниевые аналоги. Однако, до массового промышленного применения данная технология так и не была доведена, что связано с рядом технических ограничений, характерных для кварцевой оснастки. Принципиальной проблемой рассмотренной технологии является невозможность получения в одном технологическом цикле нескольких эпитаксиальных слоев, т.к. кварцевое ростовое устройство не предполагает смену растворов-расплавов. Это не позволяет в одном эпитаксиальном процессе реализовать конечную многослойную структуру с буферным и контактными слоями, что, в свою очередь, вызывает необходимость использования двух- или трехстадийной эпитаксии, которая неоправдана как экономически, так и с точки зрения структурного совершенства получаемой эпитаксиальной композиции. Прерывание процесса эпитаксии всегда приводит к дополнительным дефектам на межстадийной границе раздела.

Преодолеть рассмотренные ограничения позволяет применение высокопроизводительного ростового графитового устройства прокачного типа, с помощью которого за счет последовательной смены растворов-расплавов в рамках одного эпитаксиального процесса можно выращивать готовую многослойную полупроводниковую структуру GaAs или же гетероструктуру GaAs-AlGaAs. В этом случае стандартная конструкция р-і-п гетероструктуры на основе системы GaAs-AlGaAs включает в себя три эпитаксиальных слоя.

1) Буферный р-слой — значительно снижает влияние структурных дефектов и примесей в исходных подложках арсенида галлия на параметры конечной р-і-п структуры.

2) Базовый р'-і-п' слой — содержит протяженную і-область высокоомного арсенида галлия с концентрацией носителей менее $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и толщиной до нескольких десятков микрон. Этот слой формируется из одного раствора-расплава в процессе эпитаксиального выращивания, когда в ходе снижения температуры в выбранном интервале роста происходит инверсия типа проводимости. Фактически базовый слой представляет собой последовательность трех разных областей с р-, і- и п- проводимостью.

3) Контактный п⁺- слой — обеспечивает омический контакт к структуре при изготовлении конечного прибора.

Базовая конструкция структуры и параметры эпитаксиальных слоев представлены на рисунке 1 и в таблице 1.

1
2
3
4
5
6

Рисунок 1 - Базовая конструкция р-і-п структуры на основе GaAs-AlGaAs. Номера слоев соответствуют данным таблицы 1.

Таблица 1 - Параметры эпитаксиальных областей GaAs-GaAlAs р-і-п структур

№ п/п	Тип эпитаксиальной области	Концентрация носителей, см^{-3}	Толщина области, мкм
1	Сильнолегированный п ⁺ -слой GaAs (AlGaAs)	$n=1 \div 5 \cdot 10^{18}$	5-7
2	Слаболегированный п'-слой GaAs	$n=1 \cdot 10^{13} \div 5 \cdot 10^{15}$	15-20
3	Высокоомный і-слой GaAs	$n < 5 \cdot 10^{13}$	25-50
4	Слаболегированный р'-слой GaAs	$p=1 \cdot 10^{13} \div 10^{15}$	15-25
5	Буферный р-слой GaAs	$p=1 \div 7 \cdot 10^{16}$	3-5
6	Сильнолегированная р ⁺ -подложка GaAs	$p=0,8 \div 2 \cdot 10^{19}$	280-320

Основными проблемами получения высокоомных структур GaAs из графитовой оснастки является загрязнение углеродом и пористость графита. Первую проблему решает применение оригинального метода [4], основанного на легировании специальными окислами, которые активно взаимодействуют с фоновыми примесями раствора-расплава, переводя их в неактивное состояние. В результате появляется возможность выращивать в графитовой оснастке эпитаксиальные слои с крайне низкой концентрацией фоновых примесей, и, соответственно, протяженные высокоомные области. Проблема пористости графита связана с захватом примесей в поры и их высвобождением в ходе следующего эпитаксиального процесса. Минимизировать этот нежелательный эффект позволяет специальная программа промежуточных отжигов в вакууме и среде водорода.

На рисунке 2 показан профиль легирования в базовом р'-і-п'-слое, отличительной особенностью которого является плавное изменение концентрации носителей в слаболегированных р'- и п'-областях. Ключевые параметры р-і-п структуры (обратное напряжение, быстродействие, «мягкость» процесса обратного восстановления, температурная зависимость ВАХ) во многом определяются параметрами отдельных областей базового р'-і-п'-слоя (толщина, уровень легирования и градиент концентрации носителей заряда), которые можно эффективно регулировать заданием требуемых технологических режимов.

Уровень обратного пробивного напряжения определяется толщиной высокоомной і-области. Зависимость имеет линейный характер и представлена на рисунке 3.

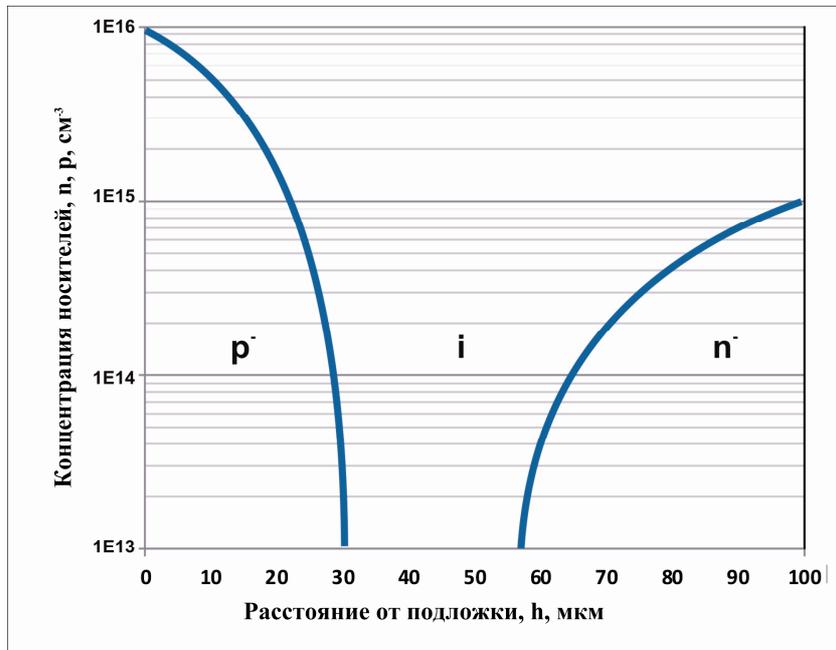


Рисунок 2 – Распределение концентрации носителей в р-і-п структуре

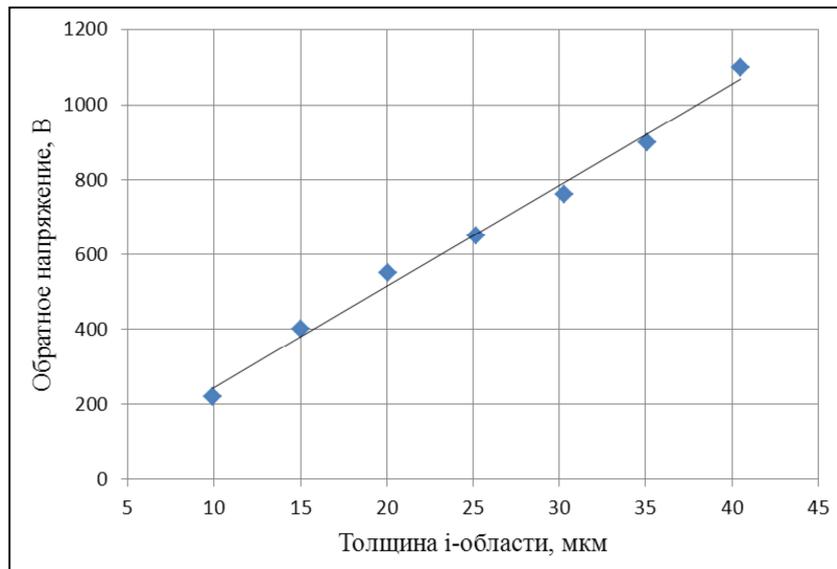


Рисунок 3 - Зависимость обратного напряжения от толщины і-области

Прямое падение напряжения при плотности тока 150 А/см^2 с ростом толщины і-области повышается незначительно и также по линейному закону. График зависимости приведен на рисунке 4.

Быстродействие р-і-п структур в основном определяется толщиной слаболегированной р-области. Увеличение протяженности этой области всегда приводит к росту времени обратного восстановления. Данные представлены на рисунке 5.

Особенностью рассматриваемых р-і-п структур на основе GaAs является «нестандартное» распределение внутреннего поля в базовой области при обратном смещении. Для определения положения и протяженности і-слоя, а также распределения поля в объеме структуры использовался метод измерения наведенного тока (НТ) электронным пучком при сканировании скола структуры. При этом измерение сигнала НТ проводилось при различных напряжениях обратной полярности, приложенных к образцу. Измерения проводились на установке электронно-зондового микроанализа «САМЕСА».

На рисунке 6 приведены измерения НТ на полученных р-і-п-структурах при напряжениях обратного смещения в диапазоне 0-160 В. В отсутствии смещения в распределении поля наблюдается один максимум. Этот максимум соответствует положению р-п перехода. Исходя из положения и формы этого максимума, можно утверждать, что р-область не протяженная и имеет большой градиент концентрации примеси. Со стороны п-области поле распространяется практически на всю ее длину. Это говорит о том, что вся п-область содержит небольшой градиент концентрации донорной примеси. При приложении обратного смещения появляется второй максимум. Появление второго максимума обуславливает появление і-области

как таковой, т.е. области, обеднённой носителями заряда. При увеличении напряжения обратного смещения наблюдается сильное смещение n-i перехода в сторону положительного электрода. Тогда как положение p-i перехода не меняется. При напряжении обратного смещения 160 В толщина i-области достигает 40 мкм при общей толщине структуры 100 мкм. В работе [5] проводились аналогичные исследования p-i-n-структур с помощью оптического метода наблюдения электрического поля, использующего эффект Франца-Келдыша. При небольших напряжениях обратного смещения (<60 В) авторы также наблюдали два максимума в распределении электрического поля в объеме структуры. При больших напряжениях в распределении поля наблюдался один широкий максимум. В данной работе, напряжения, при которых наблюдается один максимум, не были достигнуты. Такое поведение внутреннего поля при обратном смещении мы связываем с особенностями профиля распределения носителей заряда в базовой области в стационарном состоянии, где наблюдается изменение градиента концентрации в зависимости от координаты.

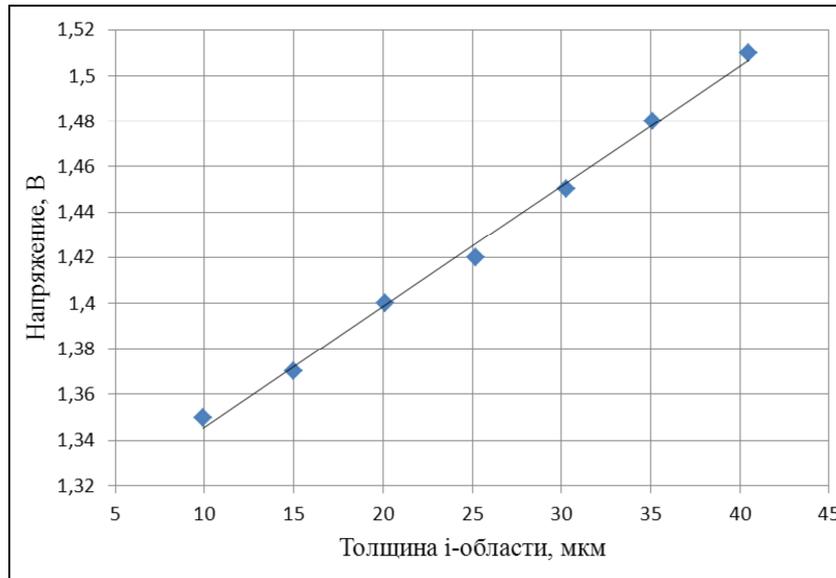


Рисунок 4 - Зависимость прямого падения напряжения на диоде при плотности тока 150 А/см^2 от толщины i-области

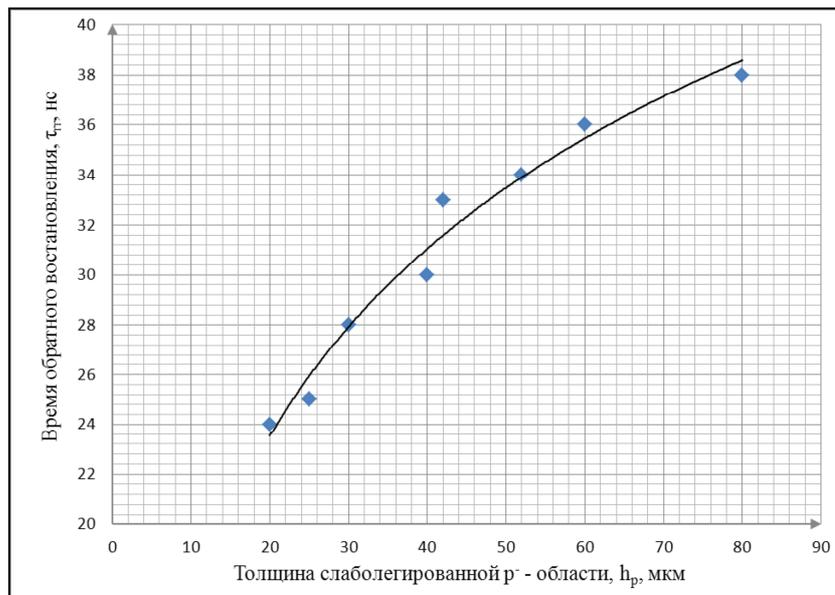


Рисунок 5 - Зависимость времени обратного восстановления ($I_{пр}=0,5 \text{ А}$, $dI_{пр}/dt=200 \text{ А/мкс}$, $U_{обр}=40 \text{ В}$)

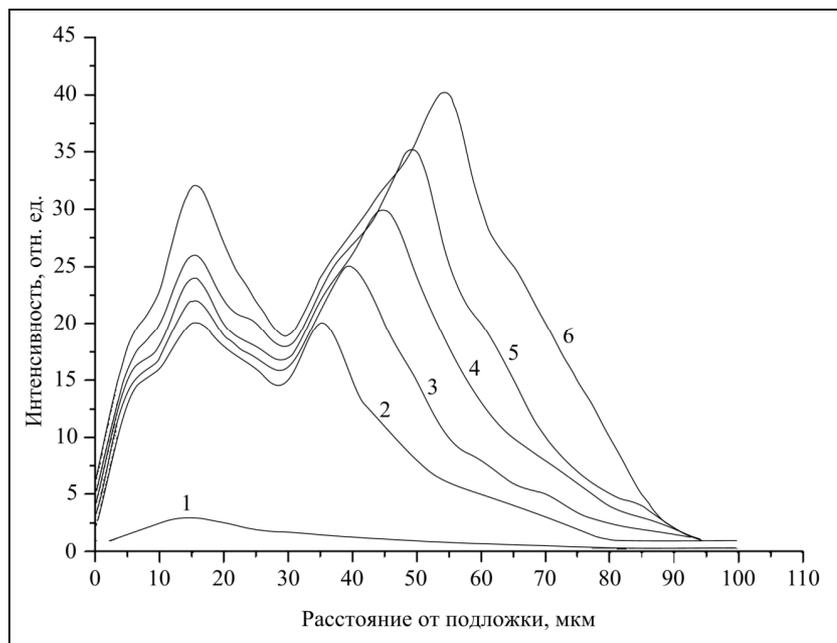


Рисунок 6 - Профиль наведенного тока по толщине r-i-n-структуры GaAs-AlGaAs при различных напряжениях обратного смещения

На основе результатов проведенных исследований разработана устойчивая промышленная технология выращивания r-i-n структур в системе GaAs-AlGaAs с напряжением пробоя 600-1200 В. Электрофизические параметры r-i-n структур позволили изготовить опытные партии силовых диодов со следующими основными характеристиками:

- прямой рабочий ток, I_f – 1-50 А;
- прямое падение напряжения, U_f – 1,3-1,8 В;
- обратное рабочее напряжения, U_r – 400-1200 В;
- время обратного восстановления, t_{tr} – 20-70 нс, при независимости характеристики обратного восстановления от рабочей температуры;
- максимальная рабочая температура кристалла – до 250 °С.

Заклучение

Исследованы особенности конструкции и технологии получения высокоомных r-i-n структур в системе GaAs-AlGaAs методом жидкофазной эпитаксии. Стандартная конструкция r-i-n структуры включает в себя три эпитаксиальных слоя: буферный слой p-типа, базовый r-i-n слой, содержащий протяженную i-область высокоомного арсенида галлия и контактный p⁺- слой. Показано, что ключевые параметры конечной r-i-n структуры (обратное напряжение, быстродействие, «мягкость» процесса обратного восстановления, температурная зависимость ВАХ) во многом определяются параметрами отдельных областей базового r-i-n слоя (толщина, уровень легирования и градиент концентрации носителей заряда), которые можно эффективно регулировать заданием требуемых технологических режимов. На основе результатов проведенных исследований разработана устойчивая промышленная технология выращивания r-i-n структур в системе GaAs-AlGaAs с напряжением пробоя 600-1200 В.

Литература

1. Войтович В.Е. Si, GaAs, SiC, GaN — силовая электроника. Сравнение, новые возможности /Войтович В.Е., Гордеев А.И., Думаневич А.Н. // Силовая электроника — 2010 — №5 — С.4-10
2. Крюков В.Л. Перспективная технология получения высоковольтных r-i-n-структур GaAs-GaAlAs для силовой электроники/ Крюков В.Л. [и др.] // Научно-технические ведомости СПбГПУ — 2014 — № 2 — С. 42-46
3. Алферов Ж.И. Мощные быстродействующие диоды на основе арсенида галлия / Алферов Ж.И. [и др.] // Письма ЖТФ — 1976 — Т. 2 — Вып. 2 — С. 201-205
4. Патент РФ 2012110151/28, 19.03.2012
Крюков В.Л., Крюков Е.В., Меерович Л.А., Стрельченко С.С., Титивкин К.А. Способ изготовления полупроводниковой r-i-n структуры на основе соединений GaAs-GaAlAs методом жидкофазной эпитаксии // Патент РФ 2488911. 2013. Бюл. №21
5. Ильинский А.Б. Стационарное распределение поля и пространственного заряда в объеме i-слоя r-i-n структуры на основе GaAs / Ильинский А.Б., Куценко А.Б., Мельников М.Б. // Физика и техника полупроводников — 1994 — Т. 28 — Вып. 1 — С. 150-160