

**Ф.Ю.Солдатенков^{1,2}, В.А. Козлов^{2,3}, М.М. Соболев¹,
И.Л. Шульпина¹, В.Г. Данильченко¹, В.И. Корольков¹**

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе

² ООО «Силовые Полупроводники»

³ ЗАО «ФИД-технология»

Метод создания дополнительных собственных рекомбинационных дефектов в базовых слоях высоковольтных GaAs pin-диодов для повышения их быстродействия

Рассмотрены физические основы техники контролируемого дефектообразования на гетерограницах и в объеме эпитаксиальных GaAs слоев при их изовалентном легировании. Приводятся результаты исследования собственных дефектов и их перестройки в зависимости от режимов изовалентного легирования при эпитаксиальном росте. Рассмотрены основные аспекты влияния дефектов на время жизни носителей заряда, а также на блокируемое диодными структурами напряжение. Приведены характеристики переключения быстродействующих силовых гетероэпитаксиальных pin-диодов.

Ключевые слова: силовой pin-диод, гетероструктуры InGaAs/GaAs, изовалентное легирование, кристаллические дефекты, время жизни носителей заряда

В данной работе представлены основные результаты по исследованию и разработке методов контроля величины и профилей распределения времени жизни носителей заряда с применением техники управления собственными структурными дефектами, возникающими в кристаллах в процессе эпитаксиального роста гетероструктур. Данная техника основана на применении метода изовалентного легирования GaAs для управления временем жизни неравновесных носителей заряда в диодах на основе гетеропереходов GaAs–AlB5. Впервые данный подход к управлению временем жизни в силовых диодах был предложен и апробирован нами на примере гетероструктур InGaAs/GaAs в работе [1] и развит также применительно к другим GaAs–AlB5 системам, в частности, для GaAsSb/GaAs гетероструктур [2].

Изготовление образцов

Эпитаксиальные слои твердого раствора $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с содержанием InAs x до 5% выращивались на подложках GaAs методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) – самого простого, эффективного и, пожалуй, единственно на сегодня возможного способа получения высоковольтных GaAs p-n переходов, способных блокировать напряжения U_b до 2000 В. В работе использовались подложки p-GaAs ориентации (111), легированные цинком до $(2\cdot 10)^{\cdot}10^{18} \text{ см}^{-3}$. Используемые в работе ростовое оборудование и оснастка позволяют выращивать эпитаксиальные слои на GaAs подложках диаметром 50 мм и 76 мм. Эпитаксиальное выращивание проводилось из ограниченного раствора-расплава In-Ga-As в атмосфере водорода в кассетах-лодочках из кварца или графита при температурах начала кристаллизации 900°C с последующим охлаждением до комнатной температуры.

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 плёнки при принудительном охлаждении системы. При таком способе выращивания р-і-п структур возможно получение толстых і-слоев слаболегированного GaAs или InGaAs с концентрацией свободных носителей $n \sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ или менее, что обеспечивает возможность достижения U_b до 2000 В. Типичное распределение концентрации свободных носителей заряда по толщине GaAs или InGaAs р-і-п структур и описание методики изготовления таких структур представлены в [1]. Для корректного сравнения результатов нами исследовались р-і-п структуры с разным уровнем изовалентного легирования, но имеющих примерно одинаковый уровень толщин базовых слоёв, лежащих в узком диапазоне величин – от 50 до 65 мкм.

Измерительные методики и экспериментальные результаты

В выращенных гетероэпитаксиальных слоях $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ изучалось изменение времени жизни неосновных носителей заряда, спектра глубокоуровневых ловушек и кристаллической структуры слоев в зависимости от состава слоя твердого раствора x .

Эффективное время жизни неосновных носителей заряда в базовых областях (τ_{eff}) определялось из расчетных оценок, выполненных на основе измерений времени рассасывания заряда, накопленного в базовых слоях, при смене полярности приложенного к диоду напряжения (так называемый метод Лэкса [3]) или из измерения динамики спада напряжения после инжекционной электродвижущей силы (так называемый метод Госсика [4]). Определенные таким образом значения τ_{eff} для структур с различным содержанием InAs в базовых областях, приведены на рис. 1, а. Из рисунка видно, что при изовалентном снижены от значений в несколько сотен наносекунд до единиц наносекунд.

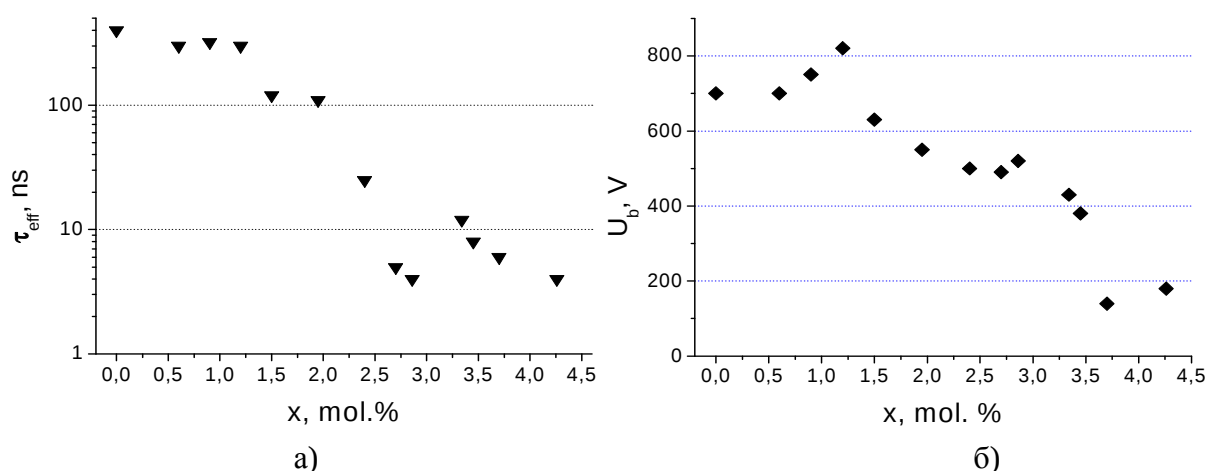


Рисунок 1

легировании можно значительно (до 100 раз) уменьшить эффективное время жизни в базовых слоях гетероэпитаксиальных ріп-диодов в сравнении с гомоэпитаксиальными GaAs ріп-диодами. Такое снижение τ_{eff} наблюдается при превышении расчетных значений

критических толщин начала пластической деформации h_c (расчет описан в [5]). Соответственно с уменьшением τ_{eff} времена восстановления диодов также могут быть

На рис. 1, (б) представлена зависимость блокируемых напряжений U_b от состава слоёв $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ при токах утечки $I_R \leq 0,1$ мА и площади образцов $\sim 0,02$ мм²; измерения проводились при комнатной температуре.

Для исследования кристаллической структуры эпитаксиальных слоев в GaAs-A3B5 гетероструктурах применялся рентгеновский топографический метод обратного отражения [6]. Использовалось $\text{CuK}\alpha$ -излучение и асимметричные отражения (422, 533, 331) с разной глубиной информационного слоя при сканировании образца и фоточувствительного регистрирующего элемента. В исследованных слоях приборных структур с разным уровнем изовалентного легирования наблюдалась дислокационная структура двух видов – сетка прямолинейных дислокаций несоответствия (рис. 2 (а), состав $x \sim 2$ мол. %) и сетка дислокаций с «ячеистым» типом структуры (рис. 2 (б), состав $x \sim 5$ мол. %). При этом было выяснено, что появление однородной сетки дислокаций несоответствия с симметрией в плоскости (111), показанной на рис. 2 (а), типично для слоев $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ в диапазоне составов x от 1,5 мол. % до 3 мол. % для указанного выше диапазона толщин слоев $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ от 50 до 65 мкм. Типичное значение плотности дислокаций для таких сеток составляет величину порядка 100 см^{-1} . С появлением и развитием структурных дефектов такого типа мы связываем наблюдаемые эффекты резкого уменьшения времени жизни τ_{eff} (рис. 1, а) и плавного снижения блокируемых диодными InGaAs/GaAs гетероструктурами напряжений U_b (рис. 1, б), что обусловлено постепенным увеличением плотности дислокационной сетки при повышении x до ~ 3 мол. %.

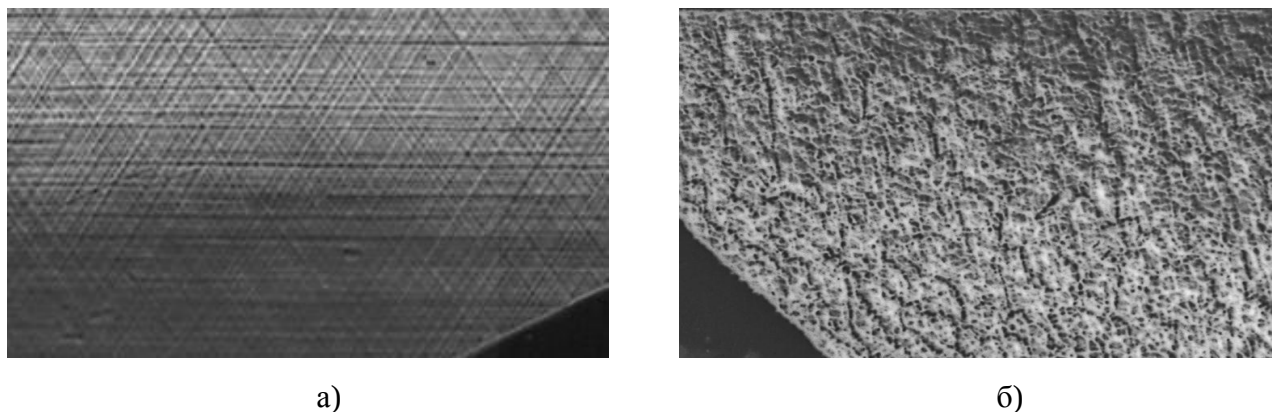


Рисунок 2

При выращивании слоёв $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с ещё большим составом x (то есть при большем рассогласовании по параметру решётки слоя и подложки) вместо линейной сетки прямолинейных дислокаций в эпитаксиальных слоях формируется дислокационная структура «ячеистого» типа (рис. 2, б) с разным размером ячеек и плотностью их границ. Типичная плотность дислокаций в пределах границ «ячеистых» сеток такого типа изменяется в зависимости от толщины и состава слоев в диапазоне от 10^6 до 10^7 см^{-2} , а размер ячеек – в пределах от 100 до 50 мкм.

Резкое скачкообразное уменьшение U_b для гетероструктур диодов с большим содержанием InAs (рис. 1, (б), $x > 3,5$ мол. %) качественным переходом от равномерной сетки прямолинейных дислокаций с симметрией в плоскости (111) к «ячеистой» дислокационной структуре с очень высокой плотностью дислокаций на границах ячеистых сеток и образованием фигур роста на поверхности эпитаксиального слоя.

Глубокоуровневые ловушки в базовых слоях GaAs и InGaAs pin-диодов исследовались методом нестационарной спектроскопии глубоких уровней (НСГУ, DLTS). В гомоэпитаксиальных GaAs pin-диодах обнаружены две дырочные ловушки – А (HL5) и В (HL2), наличие которых характерно для слаболегированных слоев GaAs (в том числе, для GaAs pin-структур) «хорошего» кристаллического совершенства, выращенных методом ЖФЭ в атмосфере водорода [7, 8]. В гетероэпитаксиальных InGaAs слоях с таким составом, при котором происходит частичное снятие упругих напряжений с образованием сетки линейных дислокаций, были обнаружены ловушки, которые предварительно можно идентифицировать как дырочную ловушку HL2 и две электронные ловушки, аналогичные ловушкам I1 (близка к EL2) и I4, возникающим в слоях GaAs, облученных электронами дозой 1 МэВ [9]. Полученные результаты по концентрациям ловушек и их сечениям захвата носителей заряда не позволяют пока объяснить столь значительное уменьшение времени жизни носителей, обнаруженное в гетероэпитаксиальных слоях, поэтому вопрос о выявлении преобладающего механизма рекомбинации носителей в наших структурах требует дальнейшего изучения.

Применение методов управления ростовым дефектообразованием при изготовлении силовых GaAs pin-диодов

На основе выполненных исследований мы применили технологию изовалентного легирования для управления дефектообразованием при изготовлении быстродействующих диодов на основе гетероструктур InGaAs/GaAs. Режимы процессов роста, состав и толщина слоя были подобраны таким образом, чтобы обеспечить наносекундные значения τ_{eff} в области p-n перехода диодной структуры.

На рис. 3 (а) для сравнения представлены типичные осциллограммы динамики выключения для гетероэпитаксиального InGaAs/GaAs и гомоэпитаксиального GaAs диодов (кривая 1 и 2, соответственно). Сравнительные испытания таких приборных структур показали, что технология роста гетероструктур с контролируемым дефектообразованием при изовалентном легировании позволяет изготавливать диоды, имеющие наименьший уровень накопленного заряда и времени выключения τ_{rr} , наименьшие коммутационные потери при включении и выключении в классе биполярных диодов на основе Si и GaAs. По совокупности своих динамических характеристик такие диоды (кривая 1 на рис. 3, б) очень мало уступают диодам Шоттки на основе SiC (кривая 2 на рис. 3, б), при этом способны работать на частотах уровня единиц мегагерц при температурах кристалла вплоть до 250 °С с меньшими потерями и имеют существенно большую область безопасной работы в сравнении с диодами Шоттки на основе SiC.

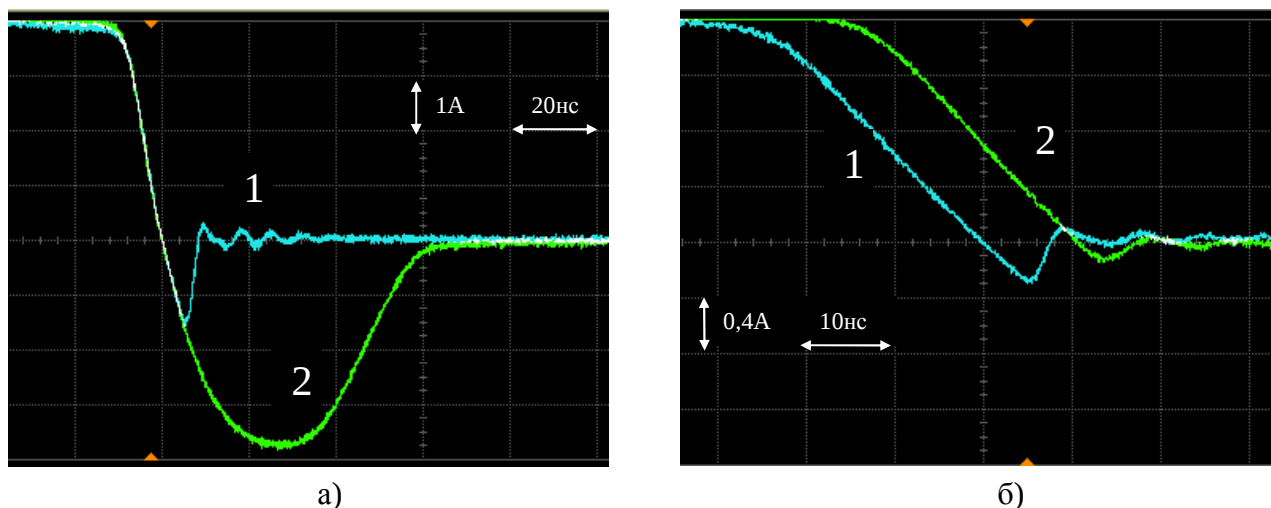


Рисунок 3

Прямые падения напряжения U_f для InGaAs/GaAs диодов с наносекундными временами τ_{eff} имеют величину U_f порядка 2 В при плотности тока 150 А/см². Емкость диодов слабо зависит от напряжения и составляет $C_0 \sim (10-20)$ пФ/мм² без смещения и $C_{200V} \sim (3-8)$ пФ/мм² при $U_b = 200$ В.

Закключение

Показано, что контролируемое создание ансамбля собственных рекомбинационных дефектов посредством оптимизации уровня рассогласования по параметру решетки в гетероструктурах типа GaAs-A3B5, а также оптимизация толщины эпитаксиального слоя твердого раствора на GaAs подложке позволяет уменьшать время жизни неравновесных носителей заряда до единиц наносекунд без существенного ухудшения вольт-амперных характеристик.

Изготовлены диоды, блокирующие напряжения 600 В с наносекундным быстродействием, которые могут переключать мощности до 10 кВт с временами выключения менее 10 нс при $U_f \leq 2$ В и плотности тока 150 А/см². По совокупности характеристик полученные приборы превосходят все существующие на мировом рынке аналоги, включая SiC и GaN диоды Шоттки.

Библиографический список

1. Солдатенков Ф.Ю. Управление временем жизни носителей заряда в высоковольтных р-і-п диодах на основе гетероструктур In_xGa_{1-x}As/GaAs / Ф.Ю.Солдатенков, В.Г.Данильченко, В.И.Корольков // – ФТП. – 2007. – Т.41. – Вып.2. – С. 217-220.
2. Данильченко В.Г. Арсенидгаллиевые быстродействующие диоды на основе гетероструктур /В.Г.Данильченко, В.И.Корольков, Ф.Ю.Солдатенков // – ФТП. – 2009. – Т.43. – Вып.8. – С. 1093-1095.
3. Lax B. Transient response of a P-N junction / B. Lax, S.F. Neustadter // – J.Appl.Phys. – 1954. – Vol. 25. – №9. – pp. 1148-1154.
4. Gossik B.R. About recovery characteristics of semiconductor rectifiers / B.R. Gossik // – J.Appl.Phys. – 1956. – Vol. 27. – №7. – pp. 905-910.
5. Пат. № 2297690 Российской Федерации, МПК Н 01 L 21/208. Способ изготовления полупроводниковой гетероструктуры на основе соединений АЗВ5 методом жидкофазной эпитаксии /

Солдатенков Ф.Ю.; заявитель и патентообладатель ФТИ им. А.Ф. Иоффе. – № 2005132805/28; заявл. 24.10.05; опубл. 20.04.07, Бюл. № 11. – 11 с.

6. Shulpina I.L. Detection of dislocations in strongly absorbing crystals by projection X-ray topography in back reflection / I.L. Shulpina, T.S. Argunova // – Phys. D: Appl.Phys. – 1995. – Vol. 28. – №4A. – pp. A47-A49.

7. Соболев М.М. Механизм компенсации в многослойных структурах на основе нелегированного GaAs, выращенного из раствора-расплава Ga / М.М. Соболев, П.Н. Брунков, С.Г. Конников, М.Н. Степанова, В.Г. Никитин, В.П. Улин, А.Ш. Долбая, Т.Д. Камушадзе, Р.М. Майсурадзе // – ФТП. – 1989. – Т.23. – Вып.6. – С. 1058-1065.

8. Берман Л.С. Глубокоуровневые центры в нелегированных слоях p-GaAs, выращенных методом жидкофазной эпитаксии / Л.С. Берман, В.Г. Данильченко, В.И. Корольков, Ф.Ю. Солдатенков // – ФТП. – 2000. – Т.34. – Вып.5. – С. 558-561.

9. Stievenard D. Defects introduced by high temperature electron irradiation in n-GaAs / D. Stievenard, J.C. Bourgoin, D. Pons // – Physica B+C – 1982. – Vol. 116. – №1-3. – pp. 394-397.