

**Ф.Ю. Солдатенков<sup>1,2</sup>, В.А. Козлов<sup>2,3</sup>, М.Ф. Кудояров<sup>1,4</sup>**

<sup>1</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе

<sup>2</sup>ООО «Силовые Полупроводники»

<sup>3</sup>ЗАО «ФИД-технология»

<sup>4</sup>ООО «Центр Радиационных Технологий»

## **Применение протонного облучения для точной коррекции динамических характеристик сверх-быстродействующих высокочастотных силовых GaAs-A<sub>3</sub>B<sub>5</sub> p-i-n диодов**

*Рассмотрены основные аспекты влияния протонного облучения на скорость восстановления блокирующей способности и мягкость переключения силовых GaAs-A<sub>3</sub>B<sub>5</sub> p-i-n диодов, а также на их вольт-амперные характеристики. Приведены характеристики переключения сверх-быстродействующих силовых высокочастотных гетероэпитаксиальных p-i-n диодов.*

**Ключевые слова:** высокочастотный силовой p-i-n диод, протонное облучение, жидкофазная эпитаксия, гетероструктуры InGaAs/GaAs и GaAsSb/GaAs, время жизни носителей заряда, дрейфовый диод с резким восстановлением.

### **Введение**

Ранее в работах [1-4] были 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 при изовалентном легировании слабелегированных слоев GaAs. Было показано, что при изовалентном легировании можно значительно (до 100 раз) уменьшить эффективное время жизни  $\tau_{eff}$  в базовых слоях гетероэпитаксиальных p-i-n диодов в сравнении с гомоэпитаксиальными GaAs p-i-n диодами. Соответственно с уменьшением  $\tau_{eff}$  также могут быть снижены времена восстановления блокирующей способности диодов от значений в несколько сотен наносекунд до единиц наносекунд. Такие диоды могут быть востребованы как в высокочастотной силовой технике, так и в импульсной силовой, в частности, в качестве обострителей импульсов – дрейфовых диодов с резким восстановлением (ДДРВ) [4].

В данной работе рассмотрена возможность применения протонного облучения гетероэпитаксиальных GaAs-A<sub>3</sub>B<sub>5</sub> p-i-n диодов для контролируемого создания дополнительных рекомбинационных дефектов в объеме и на границах эпитаксиальных слоев, улучшающих динамические характеристики переключения диодов без существенного ухудшения их вольтамперных характеристик. Технология облучения приборных структур протонами или другими ионами высоких энергий имеет ряд несомненных достоинств (см. [5]) и основана 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. Радиационная технология управления дефектами широко используется для коррекции характеристик силовых Si приборов [6]. Для GaAs диодов эта технология также применима, однако технология «протонного» модифицирования для управления временем жизни в силовых приборах из

бинарных (а тем более тройных) соединений является существенно более сложной в сравнении с модификацией кремниевых приборов, что требует длительных и более трудоемких исследований. Отметим то, что протонное облучение диодных структур может использоваться как для уменьшения времени жизни неравновесных носителей заряда в базовых слоях (и времени восстановления диодов), так и для управления степенью мягкости восстановления блокирующих свойств диода при выключении  $K$  (коэффициент  $K$  – отношение длительности фазы высокой обратной проводимости к длительности фазы восстановления обратного сопротивления), в пределах значений  $K$  от 0.1 до 10, и более. Так, для эффективного применения данных структур в импульсной силовой технике важно более «мягкое», а для ДДРВ – более «жесткое» переключение (при малых значениях  $K$ ). В последнем случае, например, полезно создавать дополнительные рекомбинационные дефекты на границе слаболегированный слой – сильнолегированный эмиттер.

### *Изготовление образцов*

Эпитаксиальные слои твердого раствора  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  и  $\text{GaAs}_{1-y}\text{Sb}_y$  (с  $x$  и  $y$  – до 5%) выращивались на подложках GaAs методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) по технологии, основы которой были разработаны в ФТИ им. А.Ф.Иоффе. В работе использовались подложки p-GaAs ориентации (111) и (100), легированные цинком до  $(2-10) \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . 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 или Ga-As-Sb в атмосфере водорода в кассетах-лодочках из кварца или графита при температурах начала кристаллизации 900 °С 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 p-i-n структур возможно получение толстых  $i$ -слоев слаболегированного GaAs, InGaAs или GaAsSb с концентрацией свободных носителей  $n \sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  или менее, что обеспечивает возможность достижения блокирующим диодом напряжений  $U_b$  до 2000 В. Типичное распределение концентрации свободных носителей заряда по толщине p-i-n структур GaAs, InGaAs и GaAsSb, а также описание методики изготовления таких структур представлены в [1]. Режимы процессов роста, состав и толщины слоев были подобраны таким образом, чтобы обеспечить наносекундные значения  $\tau_{eff}$  в области p-n перехода диодных структур.

Тестовые образцы диодов (чипы) имели форму меза-структур, которые получали с помощью оптической литографии путем химического травления активных слоев до подложки. При формировании контактных площадок обычно применялась двухслойная литография с использованием LOR резистов (lift-off photoresist), аналогично [7,8], что позволяло осаждать утолщенный (до 2-3 мкм) многослойный контакт в ходе единого процесса напыления. На

тыльную сторону  $p^+$ -GaAs подложки наносили многослойный контакт Cr-Ni-Au или Cr-Ni-Ag, а на эмиттерный слой  $n^+$ -GaAs – AuGe-Ni-Au, AuGe-Ni-Ag, или Ti-Ge-Pt-Au [9].

После изготовления чипов часть из них подвергалась облучению протонами со стороны  $n^+$ -эмиттера на изохронном циклотроне У-120 ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН. Параметры облучения были выбраны следующими – энергия протонов  $E = 3,5$  МэВ (при этом глубина пробега протонов по нашим расчетам составляла около 75 мкм) и доза облучения  $\Phi = 7 \cdot 10^{10}$  прот./см<sup>2</sup>. При таких параметрах облучения «слой повышенной рекомбинации» (слой, в котором сосредоточены дополнительные рекомбинационные дефекты, возникающие в результате облучения протонами) предположительно располагался в  $p^0$ -слое диодной структуры.

### Экспериментальные результаты

На рисунках 1 представлены осциллограммы выключения одного из GaAs-A3B5  $p$ - $i$ - $n$  диодов до (кривая 1 голубого цвета) и после протонного облучения (кривая 2 зеленого цвета), а на рисунке 2 – прямые вольт-амперные характеристики этого диода до (кривая 1 черного цвета) и после протонного облучения (кривая 2 красного цвета).

Как видно из этих рисунков, время восстановления блокирующей способности данных диодов уменьшилось после облучения приблизительно в два раза, и достигло значений 7,5 нс (заряд обратного восстановления, соответственно, уменьшился более чем в два раза), а напряжение в прямом направлении  $U_f$  увеличилось с 3,0 В до 3,5 В при токе 8 А (что соответствовало плотности тока  $j = 1250$  А/см<sup>2</sup>). Диоды с такими характеристиками переключения хорошо работают также в качестве ДДРВ (рис. 3, подробнее см. [4]). В дальнейшем для управления мягкостью процесса выключения гетероэпитаксиальных  $p$ - $i$ - $n$  диодов с помощью протонного облучения потребуется провести дополнительные исследования.

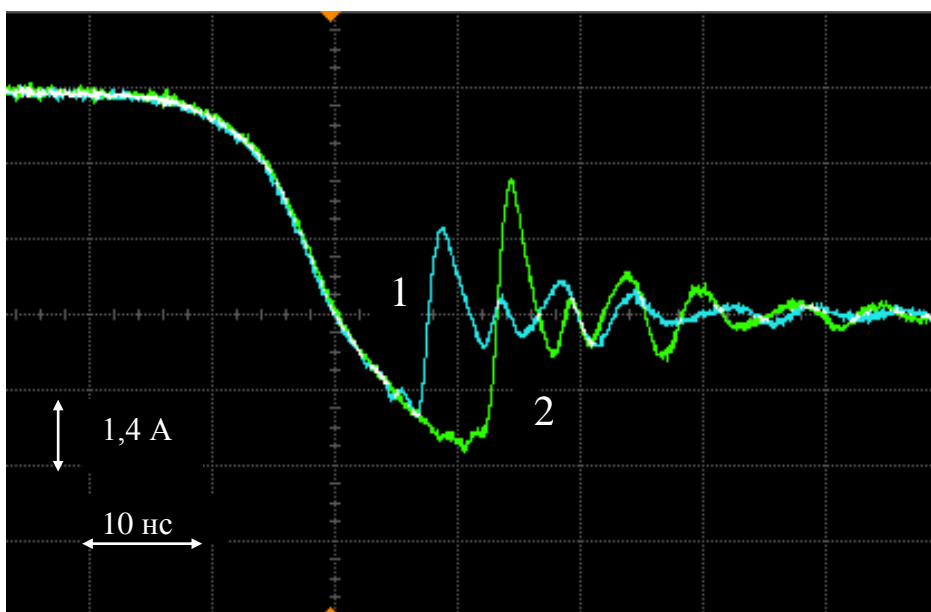


Рисунок 1.

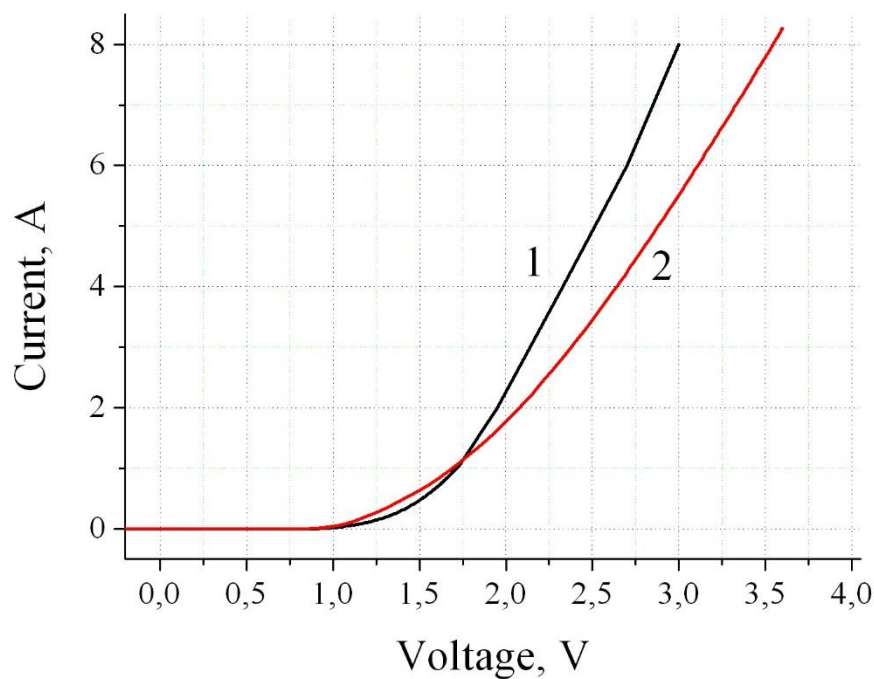


Рисунок 2.

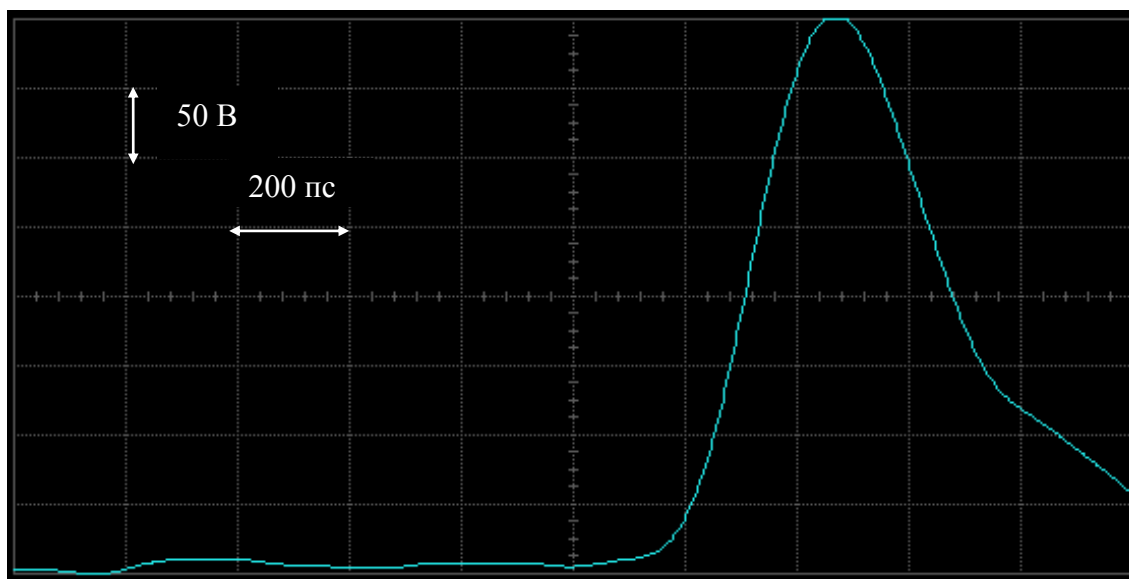


Рисунок 3.

По совокупности своих динамических характеристик GaAs-A<sub>3</sub>B<sub>5</sub> p-i-n диоды очень мало уступают диодам Шоттки на основе SiC (лучшими по своим характеристикам в этом классе приборов, имеющихся на мировом рынке), особенно при высоких плотностях тока, при этом способны работать на частотах уровня единиц мегагерц при температурах кристалла вплоть до 250 °C с меньшими потерями, и имеют существенно большую область безопасной работы в сравнении с диодам Шоттки на основе SiC – сравнительные характеристики переключения SiC диодов Шоттки и GaAs-A<sub>3</sub>B<sub>5</sub> p-i-n диодов приведены в [4].

## Заклучение

Показана возможность коррекции динамических характеристик сверх-быстродействующих высокочастотных GaAs-A<sub>3</sub>B<sub>5</sub> p-i-n диодов с помощью облучения протонами без существенного ухудшения их вольт-амперных характеристик. Уже первые эксперименты позволили добиться двукратного уменьшения времени восстановления даже у одних из самых быстродействующих диодов.

Методика протонного облучения позволяет регулировать скорость восстановления блокирующей способности и мягкость переключения, помогает повысить воспроизводимость технологии изготовления сверх-быстродействующих высокочастотных силовых GaAs-A<sub>3</sub>B<sub>5</sub> p-i-n диодов, блокирующих напряжения до 600-800 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 200 А/см<sup>2</sup>, что по совокупности характеристик превосходят все существующие на мировом рынке аналоги, включая SiC и GaN диоды Шоттки.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, соглашение № 14-29-00178.

## Библиографический список

1. Солдатенков Ф.Ю. Управление временем жизни носителей заряда в высоковольтных p-i-n диодах на основе гетероструктур In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>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. 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. 24.10.2005; опубл. 20.04.2007, Бюл. № 11. – 11 с.
4. Kozlov V.A. Defect Engineering for Carrier Lifetime Control in High Voltage GaAs Power Diodes / Kozlov V.A., Soldatenkov F.Yu., Danilchenko V.G., Korolkov V.I. and Shulpina I.L. // – Proc. of 25th Advanced Semiconductor Manufacturing Conference (ASMC-2014) (Saratoga Springs, USA, 19-21 May 2014). – 2014. – p. 139-144.
5. Козлов В.А. Легирование полупроводников радиационными дефектами при облучении протонами и α-частицами. Обзор. / В.А. Козлов, В.В. Козловский // – ФТП. – 2001. – Т.35. – Вып.7. – С. 769-795.
6. Hazdra P. Axial lifetime control in silicon power diodes by irradiation with protons, alphas, low- and high- energy electrons / P. Hazdra, J. Vobecký, H. Dorschner, K. Brand // – Microelectronics Journal. – Vol. 35. – pp. 249-257.
7. Солдатенков Ф.Ю. Снижение омических потерь и повышение мощности фотоэлектрических преобразователей на основе антимида галлия / Солдатенков Ф.Ю., Сорокина С.В., Тимошина Н.Х., Хвостиков В.П., Задиранов Ю.М., Растегаева М.Г., Усикова А.А. // – ФТП. – 2011. – Т.45. – Вып.9. – С. 1266-1273.
8. Пат. № 2428766 Российской Федерации, МПК Н 01 L 31/0224. Способ формирования контакта для наногетероструктуры фотоэлектрического преобразователя на основе арсенида галлия / Андреев В.М., Калужный Н.А., Лантратов В.М., Солдатенков Ф.Ю., Усикова А.А.; заявитель и патентообладатель ФТИ им. А.Ф. Иоффе. – № 2010120933/28; заявл. 24.05.2010; опубл. 10.09.2011, Бюл. № 25. – 13 с.
9. Пат. № 2391741 Российской Федерации, МПК Н 01 L 21/28. Способ формирования многослойного омического контакта фотоэлектрического преобразователя / Андреев В.М., Солдатенков Ф.Ю., Ильинская Н.Д., Усикова А.А.; заявитель и патентообладатель ФТИ им. А.Ф. Иоффе. – № 2009112108/28; заявл. 01.04.09; опубл. 10.06.2010, Бюл. № 16. – 14 с.