

# Управление временем жизни носителей заряда в высоковольтных $p-i-n$ -диодах на основе гетероструктур $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$

© Ф.Ю. Солдатенков<sup>¶</sup>, В.Г. Данильченко, В.И. Корольков

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 11 мая 2006 г. Принята к печати 19 мая 2006 г.)

На примере гетероструктур  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  изучена возможность управления эффективным временем жизни неравновесных носителей заряда посредством контролируемого рассогласования по параметру решетки сопрягаемых материалов гетероструктуры. Установлена связь между соотношением толщины и состава слабо легированных слоев твердого раствора  $\text{InGaAs}$  и временем жизни неравновесных носителей заряда, что позволяет управлять временем жизни неравновесных носителей заряда в пределах от единиц наносекунд до микросекунды без существенного изменения концентрации подвижных носителей заряда. На основе проведенных исследований изготовлены импульсные  $p^+-p^0-\pi-n^0-n^+$ -диоды, блокирующие напряжения до 500 В, коммутирующие токи  $\gtrsim 10$  А при временах переключения, не превышающих 10 нс.

PACS: 68.55.Ln, 73.40.Kp, 73.50.Gr, 81.15.Gh, 85.30.De, 85.30.Kk

## 1. Введение

Во многих типах полупроводниковых приборов, и особенно в приборах мощной импульсной техники, для повышения быстродействия требуется уменьшать времена жизни неравновесных носителей заряда (ННЗ) в базовых слоях прибора без потери рабочих блокирующих напряжений и заметного роста прямых падений. Разработанная ранее технология формирования высоковольтных  $p-i-n$ -структур на основе  $\text{GaAs}$  с контролируемым распределением остаточных примесей [1] не позволяет одновременно повышать их быстродействие и увеличивать обратные напряжения.

Ранее предпринимались попытки повысить быстродействие таких структур различными способами, которые характеризуются созданием дополнительных эффективных центров рекомбинации в слабо легированных частях структуры: 1) при облучении  $\gamma$ -квантами  $p-i-n$ -диодов [2]; 2) за счет контролируемого введения паров воды в водород в ростовую камеру во время эпитаксии [3,4]; 3) в результате замены водорода на аргон во время проведения ростового процесса [5]. В последнем случае происходит изменение спектра глубоководных ловушек в слоях слабо легированного  $\text{GaAs}$ , а именно — доминирование дефекта  $EL2$ , что приводит к резкому, на порядок, уменьшению эффективных времен жизни ННЗ. Однако, несмотря на определенные успехи при применении перечисленных приемов, достигнутые результаты по быстродействию данных диодов (времена выключения — 30–80 нс) не вполне удовлетворяют потребностям современной электроники.

Известен еще один способ изменения ансамбля собственных дефектов в эпитаксиальных пленках — изовалентное легирование. При постепенном увеличении содержания изовалентных примесей в слоях сначала происходит улучшение кристаллического состояния эпитаксиальных пленок и, как правило, уменьшение содержа-

ния электрически активных глубоководных центров в них [6]. Затем, по мере увеличения концентрации изовалентного компонента в упругодеформированных слоях, наблюдается постепенное увеличение концентрации и появление новых электрически активных глубоководных дефектов. Так, в эпитаксиальных слоях твердых растворов на основе  $\text{GaAs}$  нередко обнаруживают дефекты  $EL2$ , имеющие большие сечения захвата носителей заряда [7]. При дальнейшем увеличении рассогласования по параметру решетки слоя и подложки и достижении так называемых критических напряжений происходит частичная релаксация упругих напряжений с образованием дислокаций несоответствия (ДН). При некоторых еще больших значениях рассогласования происходит интенсивная пластическая деформация слоя твердого раствора, при этом остаточные внутренние напряжения достигают своего максимального значения, а плотность ДН — резко возрастает.

Появление ДН в слоях стимулирует генерацию дополнительных дефектов и соответственно глубоководных ловушек. Из ряда работ (например, [8]) следует, что за появление дополнительных дефектов  $EL2$  в  $\text{GaAs}$  могут быть ответственны дислокации или сложные образования дефектов, возникающие в результате пластической деформации. Кроме того, такие избыточные дополнительные дефекты как ДН могут иметь свойства ловушек для носителей заряда (хотя их поведение несколько отличается от одиночных ловушек). Например, появление электронной ловушки с энергией  $E_C - 0.68$  эВ в пластически деформированном  $\text{GaAs}$  связывалось с  $60^\circ$  дислокациями [9]. Аналогичные результаты представлены в работах по изучению гетероструктур  $\text{GaAsSb}/\text{GaAs}$  [10] и  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  [11].

Влияние решеточного рассогласования в приборных структурах на параметры быстродействия приборов на их основе изучено недостаточно. В данной работе изучена возможность уменьшения эффективного времени жизни ННЗ путем контролируемого создания собствен-

<sup>¶</sup> E-mail: F.Soldatenkov@mail.ioffe.ru

ных дефектов в базовых слоях полупроводниковых приборов, возникающих из-за рассогласования по параметру решетки сопрягаемых материалов гетероструктуры, при сохранении значений блокирующих напряжений и прямых падений высоковольтных переходов.

## 2. Изготовление образцов и экспериментальные результаты

Методом жидкофазной эпитаксии были выращены эпитаксиальные слои твердого раствора  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  с содержанием InAs до 5% на подложках GaAs. Толщины слоев варьировались от 10 до 85 мкм. Использовались подложки GaAs  $p$ -типа проводимости, легированные цинком до концентрации  $(1-5) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , ориентированные в плоскостях  $\langle 100 \rangle$ ,  $\langle 111 \rangle \text{A}$  и  $\langle 111 \rangle \text{B}$ . Эпитаксиальное выращивание проводилось из ограниченного раствора-расплава In-Ga-As в атмосфере водорода, в кварцевой кассете сливного типа, от температур начала кристаллизации 800–900°C до комнатной температуры. Состав жидкой фазы для получения слоев твердого раствора нужного состава определялся из расчетов по модели квазирегулярного приближения (необходимые для расчета параметры модели — в работе [2]) с учетом упругих напряжений, возникающих из-за решеточного рассогласования слоя и подложки [12,13]. Толщина эпитаксиального слоя выбранного состава задавалась высотой расплава между подложками GaAs, т.е. толщиной прокладки между ними.

Содержание электрически активных дефектов в эпитаксиальных слоях при данном способе выращивания зависит от содержания остаточных (фоновых) примесей в расплаве и ростовой системе, от температуры и длительности предварительного отжига раствора-расплава, расхода водорода, его влажности и режима кристаллизации пленки при принудительном охлаждении системы. Температурно-временной режим и расход водорода (с содержанием паров воды  $\lesssim 3 \text{ млн}^{-1} (\text{ppm})$  и кислорода  $\lesssim 1 \text{ млн}^{-1}$ ) во время проведения процесса выращивания подбирались так, чтобы эпитаксиальный

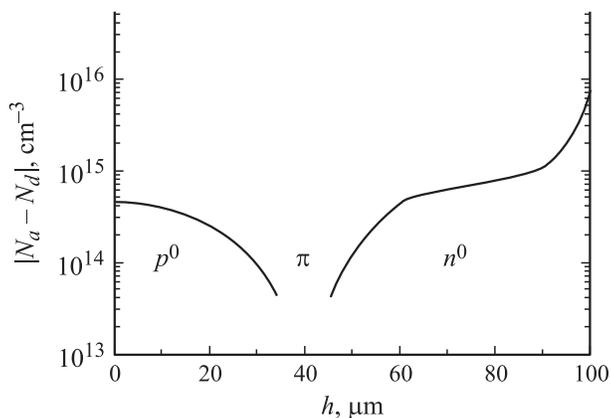


Рис. 1. Концентрационный профиль распределения свободных носителей заряда в структуре с плавным  $p^0-\pi-n^0$ -переходом.

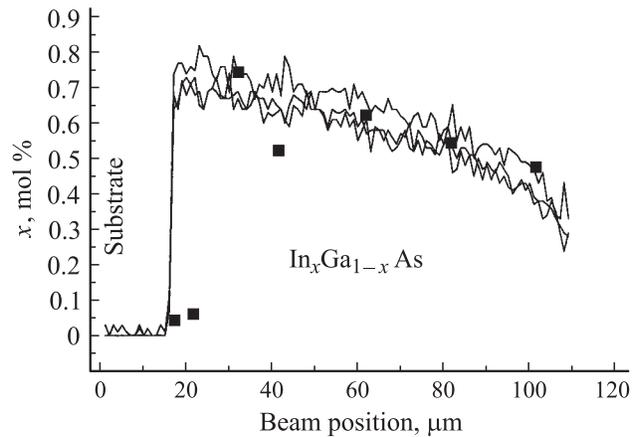


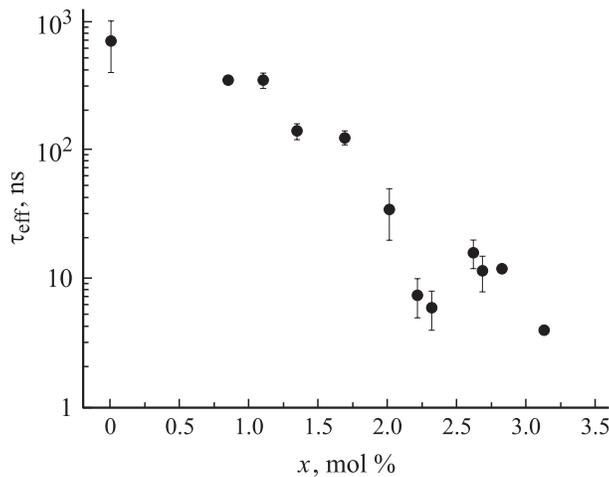
Рис. 2. Распределение InAs по толщине слоя  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ . Линия — непрерывное сканирование, точки — локальный анализ химического состава слоя.

слой твердого раствора представлял собой плавный  $p^0-\pi-n^0$ -переход с концентрацией свободных носителей заряда в  $\pi$ -слое около  $10^{13}-10^{14} \text{ см}^{-3}$  и менее. На рис. 1 представлено типичное распределение свободных носителей заряда в  $p^0-\pi-n^0$ -структуре, полученное при послойном травлении из вольт-фарадной зависимости барьера Шоттки.

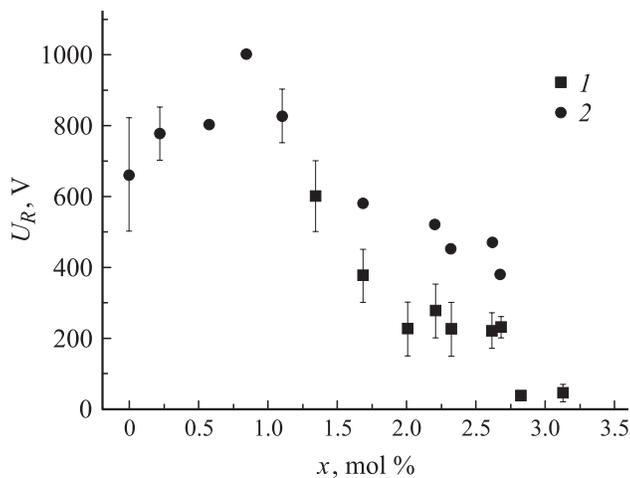
Содержание InAs в эпитаксиальных слоях твердого раствора определялось по данным рентгеноспектрального микроанализа на установке „Comebax“. Проводилось непрерывное сканирование (по трем каналам) и точечный (локальный по координате) анализ химического состава образцов. На рис. 2 показано распределение InAs по толщине одного из слоев твердого раствора  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ .

Толщина и состав гетероэпитаксиального слоя для получения наиболее быстрых диодов выбирались таким образом, чтобы превысить критические толщины начала релаксационного дефектообразования в псевдоморфных пленках, т.е. обеспечить генерацию достаточного количества эффективных рекомбинационных центров в базовых слоях прибора; при этом важно было не допустить интенсивной пластической деформации данного слоя. Критические толщины слоев рассчитывались в модели баланса энергий [14].

Эффективное время жизни НЗ ( $\tau_{\text{eff}}$ ) в базовых областях определялось путем измерения времени рассасывания накопленного заряда при подаче на диод импульса запирающего напряжения (метод Лэкса). Значения  $\tau_{\text{eff}}$  находились из длительности фазы высокой обратной проводимости  $t_1$  („полочки“) для модели переключения плоскостных диодов в цепи с ограничивающим сопротивлением [15]. Условия, при которых значения  $t_1 \approx \tau_{\text{eff}}$ ; длительность импульсов прямого тока значительно превышает времена  $\tau_{\text{eff}}$ ; выбирается отношение амплитуды прямого тока к обратному  $I_f/I_r \geq 5-6$ ; исследуются диоды с широкой базой  $W (W/L_d > 3$ , где  $L_d$  — диффузионная длина носителей).



**Рис. 3.** Эффективные времена жизни неравновесных носителей заряда  $\tau_{\text{eff}}$  в  $p-i-n$ -структурах на основе  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , выращенных на подложках GaAs. Величина  $x$  характеризует состав пленки вблизи границы слой-подложка.



**Рис. 4.** Зависимость блокирующего напряжения  $U_R$  от состава  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  при токах утечки  $I_R \leq 0.1$  мА. 1 — выколотые из эпитаксиальных пластин образцы площадью от 0.01 до 0.1  $\text{cm}^2$ ; 2 — образцы с вытравленной меза-структурой площадью  $S = 7 \cdot 10^{-3}$   $\text{cm}^2$ .

Измеренные таким образом  $\tau_{\text{eff}}$  для структур с различным содержанием In в базовых областях, сравнимых по толщине, приведены на рис. 3. Происходит резкое уменьшение эффективного времени жизни, наблюдаемое при превышении расчетных значений критических толщин начала пластической деформации  $h_c$ . Соответственно уменьшаются и времена восстановления диодов, причем длительность спада обратного тока до уровня 0.1 уменьшается от нескольких сотен до единиц наносекунд.

Необходимо отметить, что измерение наносекундных интервалов всегда связано со схемными искажениями осциллограмм переключения. В нашем случае общее время перепада подаваемых импульсов составляло 3–4 нс, максимальная амплитуда прямого то-

ка  $\sim 10$  А, сопротивление нагрузки в цепи диода составляло единицы Ом. Этим можно объяснить отсутствие ярко выраженной „полочки“ в случае наиболее быстрых диодов.

Увеличение отношения  $I_f/I_r$  в диапазоне прямых токов  $I_f$ , соответствующих высокому уровню инжекции, показало некоторое уменьшение длительности „полочки“ (фазы высокой обратной проводимости), что может быть связано с уменьшением инжекционной эффективности эмиттеров.

На рис. 4 представлены результаты измерений блокирующего напряжения  $U_R$  для исследуемой группы образцов  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ . Резкий спад  $U_R$  для слоев с большим содержанием InAs при  $x \gtrsim 2.7$  мол%, т. е. при величине несоответствия периодов решетки на границе слой-подложка  $f \gtrsim 1.9 \cdot 10^{-3}$  мы связываем с началом так называемой интенсивной пластической деформации.

В пропускном направлении при постоянном токе 0.5 А прямые падения напряжения на диодах с малым временем  $\tau_{\text{eff}}$  не превышали 2.5 В. Емкость диодов слабо зависела от напряжения в диапазоне 0–200 В и составляла  $C(U = 0 \text{ В}) \approx 1 \cdot 10^3$  пФ/ $\text{cm}^2$  и  $C(U = 200 \text{ В}) \approx 4 \cdot 10^2$  пФ/ $\text{cm}^2$ .

### 3. Заключение

В результате проведенных исследований:

а) изучена возможность уменьшения эффективных времен жизни НЗ путем контролируемого рассогласования по параметру решетки сопрягаемых материалов приборных гетероструктур;

б) опробована система  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ , однако предложенный подход можно использовать в приборах на основе других гетеросистем, и не только на основе соединений  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ , а также систем, полученных другими методами эпитаксиального выращивания;

в) найдены оптимальные соотношения толщин и составов базовых слоев твердого раствора  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , позволяющие существенно повысить быстродействие высоковольтных диодов;

г) изготовлены высоковольтные  $p-i-n$ -диоды, превосходящие по своему быстродействию (по времени выключения) существующие мировые аналоги, в том числе GaAs- и SiC-диоды Шоттки, выпускаемые ведущими фирмами-производителями [16].

Авторы признательны В.В. Третьякову за определение состава эпитаксиальных пленок и Н.Д. Ильинской за помощь в изготовлении образцов.

### Список литературы

- [1] Ж.И. Алфёров, В.И. Корольков, В.Г. Никитин, М.Н. Степанова, Д.Н. Третьяков. Письма ЖТФ, **2** (2), 201 (1976).
- [2] В.Г. Данильченко, В.И. Корольков, Ю.Н. Лузин, С.И. Пономарёв, А.В. Рожков, Г.И. Цвилёв. Электрон. техн., сер. Электровакуумные и газоразрядные приборы, вып. 5 (88), 30 (1981).

- [3] Л.Я. Золотаревский. Автореф. канд. дисс. (НИИ ТЭЗ им. М.И. Калинина, Таллин, 1984).
- [4] G. Achkinazi, M. Leibovich, B. Meyler, M. Nathan, L. Zolotarevski, O. Zolotarevski. USA Pat. № 5733815, опубликован 31.03.1998.
- [5] Л.С. Берман, В.Г. Данильченко, В.И. Корольков, Ф.Ю. Солдатенков. ФТП, **34** (5), 558 (2000).
- [6] V.V. Chaldyshev, S.V. Novikov. In: *Semiconductor technology: Processing and novel fabrication techniques*, ed. by M. Levinshtein, M. Shur (John Wiley & Song, Inc., 1997) p. 165.
- [7] J.C. Bourgoin, H.J. von Bardeleben, D. Stievenard. J. Appl. Phys., **64** (9), R65 (1988).
- [8] M. Skowronski, J. Lagowski, M. Mil'shtein, C.H. Kang, F.P. Dabkowski, A. Hennel, and H.C. Gatos. J. Appl. Phys., **62** (9), 3791 (1987).
- [9] T. Wosinski. J. Appl. Phys., **65** (4), 1566 (1989).
- [10] T. Wosinski, O. Yastrubchak, A. Makosa, T. Figielski. J. Phys.: Condens. Mater., **12**, 10 153 (2000).
- [11] G.P. Watson, D.G. Ast, T.L. Anderson, B. Pathangey, Y. Hayakawa. J. Appl. Phys., **71** (7), 3399 (1992).
- [12] Ф.Ю. Солдатенков. Автореф. канд. дисс. (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, СПб., 2001).
- [13] Ф.Ю. Солдатенков, В.П. Улин, А.А. Яковенко, О.М. Фёдорова, С.Г. Конников, В.И. Корольков. Письма ЖТФ, **25** (21), 15 (1999).
- [14] R. People, J.C. Bean. Appl. Phys. Lett., **47** (3), 322 (1985); Appl. Phys. Lett., **49** (4), 229 (1986).
- [15] Ю.Р. Носов. *Физические основы работы полупроводниковых диодов в импульсном режиме* (М., Наука, 1968) с. 263.
- [16] А. Полищук. Компоненты и технологии, вып. 5, 6 (2004); <http://www.ixysrf.com/pdf/briefs/250vGaAsDiodeBrief.pdf>

Редактор Т.А. Полянская

## Carrier lifetime control in high-voltage $p-i-n$ diodes on the base of the $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ heterostructures

F.Yu. Soldatenkov, V.G. Danil'chenko, V.I. Korol'kov

Ioffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St.Petersburg, Russia

**Abstract** As an example of the InGaAs/GaAs heterostructures the possibility of control of the effective lifetime of nonequilibrium charge carriers (NCC) by means of a controllable mismatch on a lattice parameter of conjugated heterostructure materials is studied. A connection between the thickness and compound relation of light-doped InGaAs layers and NCC lifetime is established, that allows to change the NCC lifetime from units of nanosecond up to microsecond without essential change in the concentration of mobile charge carriers. On the basis of the carried out research were made pulse  $p^+-p^0-\pi-n^0-n^+$  diodes with blocking voltages up to 500 V, switching currents about 10 A at a reverse recovery time which are not exceeding 10 ns.