

Арсенидгаллиевые быстродействующие импульсные диоды на основе гетероструктур

© В.Г. Данильченко, В.И. Корольков, Ф.Ю. Солдатенков[†]

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

(Получена 3 февраля 2009 г. Принята к печати 20 февраля 2009 г.)

Приведены результаты исследования переключающих свойств арсенидгаллиевых диодов на основе гетероструктур. Показано, что использование в базовой области градиента запрещенной зоны или широкозонной „стенки“ (резкий гетеропереход) позволяет управлять характером распределения инжектированных носителей и осуществлять их накопление вблизи $p-n$ -перехода, что приводит к более быстрому этапу восстановления обратного напряжения (60–70 пс). Для повышения рабочих напряжений рассмотрены структуры, в которых наряду с градиентом ширины запрещенной зоны использовался градиент примеси.

PACS: 73.40.Kp, 73.50.Gr, 81.15.Lm, 84.30.Jc, 85.30.De, 85.30.Kk

В современной электронике широко используются импульсные диоды. При работе диодов в быстродействующих импульсных схемах помимо высокого быстродействия желательным является обеспечить минимальные прямые падения напряжения, высокие рабочие температуры и низкие обратные токи при отрицательных смещениях. В диодах на основе $p-n$ -гомопереходов удовлетворить всем этим требованиям одновременно практически невозможно. В то же время в ряде случаев использование гетероструктур открывает новые возможности для разработки импульсных диодов.

Остановимся на одной из важнейших характеристик импульсных диодов — времени переключения, которое определяется эффектом накопления неравновесных носителей заряда (ННЗ) в базовой области.

При переключении диода с прямого напряжения на обратное существует две фазы восстановления обратного сопротивления — этап постоянного обратного тока и этап восстановления обратного напряжения. В импульсных схемах особенно важен второй этап переключения, управление которым осуществляется как за счет времени жизни ННЗ, так и за счет создания условий для накопления носителей вблизи $p-n$ -перехода. В частности, в так называемых диодах с накоплением заряда (ДНЗ) [1] используется электрическое поле градиента распределения примеси, препятствующее диффузии носителей в глубину базы. Из-за наличия градиента примеси, создающего тормозящее электрическое поле в базовой области, обратные напряжения в таких диодах невелики, а благодаря эффекту экранирования этого поля инжектированными носителями заряда диоды работают при низких уровнях инжекции.

Более эффективное управление распределением ННЗ можно реализовать в импульсных диодах на основе как резких, так и плавных гетероструктур. В данной работе рассмотрены переключающие характеристики диодов на основе двух типов гетероструктур, схематическое

изображение профиля зоны проводимости E_C которых дано на рис. 1, *a, b*.

В структурах первого типа, созданных на основе резкого одиночного гетероперехода, потенциальный барьер в зоне проводимости, лежащий на расстоянии $d \leq L_n$ (L_n — диффузионная длина электронов) от $p-n$ -перехода, препятствует прохождению ННЗ в глубину базы (эффект электронного ограничения).

Следует отметить, что для реализации быстрого переключения существенно пространственное ограничение только одного типа носителей. Поэтому были выбраны гетероструктуры $p^+(Al_xGa_{1-x}As)-p^0(GaAs)-n^+(GaAs)$, в которых большая часть разрывов зон на гетерогранице приходится на зону проводимости, и при $x \leq 0.15$ разрыв валентных зон $\Delta E_V \sim kT$ (T — температура, k — постоянная Больцмана).

Поскольку эффективность удаления ННЗ при переключении от прямого напряжения к обратному зависит от диффузионной длины ННЗ (электронов L_n , дырок L_p), толщина активной области d должна быть ограничена условием $d \leq L_n(L_p)$. Учитывая, что диффузионные длины в GaAs невелики (даже в нелегированном материале, с концентрацией свободных носителей заряда $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$, обычно не превышают 10–25 мкм), получить обратные рабочие напряжения более 200–300 В

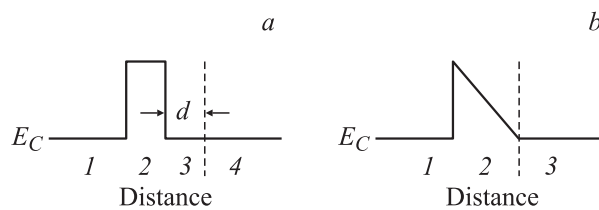


Рис. 1. Схематическое изображение профиля зоны проводимости E_C и геометрия исследуемых структур. *a* — резкая гетероструктура: 1 — $p^+(GaAs)$, 2 — $p^+(Al_xGa_{1-x}As)$, 3 — $p^0(GaAs)$, 4 — $n^+(GaAs)$; штриховая линия — граница $p-n$ -перехода; d — толщина базовой области. *b* — гетероструктура с базовой областью переменного состава: 1 — $p^+(GaAs)$, 2 — $p^0(Al_xGa_{1-x}As)$, 3 — $n^+(GaAs)$.

[†] E-mail: fsoldatenkov@mail.ioffe.ru

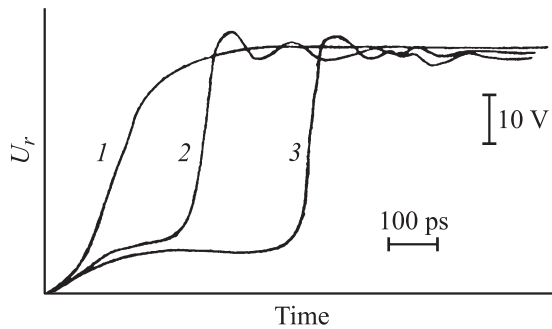


Рис. 2. Кривые восстановления во времени блокирующего напряжения U_r диодов на основе резкого одиночного гетероперехода при различных значениях прямого тока I_d , мА: 1 — 5, 2 — 30, 3 — 60.

диодах на основе резких гетеропереходов в настоящее время не представляется возможным.

Диоды на основе резкого одиночного гетероперехода (рис. 1, а) были получены МОС-гидридной эпитаксией (газофазной эпитаксией из металлоорганических соединений). Из-за сравнительно высокого уровня фонового легирования концентрация в активной области обычно составляла $(1-2) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, а напряжение пробоя не превышало 100 В. Для снижения влияния собственной емкости диодов изготавливались мезапланарные диоды с диаметром 150 мкм и толщиной активной области в пределах 3–10 мкм. В этом случае емкость при нулевом смещении не превышала 0.8–1.5 пФ.

В работе изучен самый распространенный процесс переключения из пропускного состояния в запертое. Восстановление блокирующего напряжения исследовалось как по стандартной методике путем подачи запирающего импульса на смещенный в пропускном направлении диод, так и в схеме формирователя коротких импульсов с крутыми перепадами [1].

Образцы помещались в коаксиально-полосковый держатель с волновым сопротивлением 50 Ом. Время нарастания запирающего импульса не превышало 300 пс. Амплитуда прямого тока изменялась в пределах 10–60 мА. Типичные кривые восстановления блокирующего напряжения U_r во времени при различных значениях прямого тока I_d приведены на рис. 2. Начальная „ступенька“ выходного сигнала обусловлена изменением падения напряжения на сопротивлении базы диода.

Обработка экспериментальных кривых показала, что „резкость восстановления“, равная отношению заряда переключения к инжектированному заряду, достигала величины 0.7–0.8, что свидетельствует о достаточно эффективной локализации инжектированных ННЗ вблизи $p-n$ -перехода. По мере удаления потенциального барьера от $p-n$ -перехода эта величина уменьшалась и соответственно росло время спада.

Эффект резкого восстановления блокирующего напряжения ($\sim 60-70$ пс) наблюдался при переключении тока плотностью несколько сотен А/см², когда в обычных

ДНЗ тормозящее поле, созданное неравномерным распределением примеси, практически исчезает.

Интересно отметить, что использование аналогичной геометрии структуры на основе InP–InGaAs не приводило к быстрому выключению из-за большого разрыва в валентной зоне, который препятствовал уходу дырок из активной области.

В настоящее время $p-n$ -переходы на основе GaAs с напряжением пробоя $U_r \geq 1.0$ кВ удается получать только жидкофазной эпитаксией (ЖФЭ) [2]. Поэтому для повышения мощности импульсных диодов при их изготовлении использовались две модификации жидкофазной эпитаксии. Наиболее высокие обратные напряжения и малые времена жизни ННЗ, $10^{-8}-10^{-9}$ с, были получены в структурах, в которых наряду с небольшим градиентом ширины запрещенной зоны был и градиент примеси [3].

Для этих целей на подложках GaAs в качестве базовых областей диодов выращивались твердые растворы $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с содержанием InAs до 6% или $\text{GaAs}_{1-y}\text{Sb}_y$ с содержанием GaSb до 4%. Процессы выращивания проводились из ограниченного раствора–расплава In–Ga–As или Ga–As–Sb в атмосфере водорода в кварцевой cassette сливного типа при температурах начала кристаллизации 800–900 °С.

Управление градиентом ширины запрещенной зоны, характером распределения примеси и временем жизни ННЗ в базовой области осуществлялось выбором состава жидкой фазы и толщины базовых слоев, температурно-временного режима и расхода водорода во время проведения процесса выращивания. Данная методика позволяет получать плавные переходы $p^+-p^0-i-n^0-n^+$ с концентрацией носителей заряда в i -слое $\sim (10^{13}-10^{14}) \text{ см}^{-3}$ и напряжением пробоя до 1000 В. Была установлена следующая закономерность (рис. 3 и 4): с увеличением содержания InAs или GaSb в базовых слоях (при фиксированных толщинах) наблюдалось существенное, до единиц наносекунд, уменьшение эффективного времени жизни носителей заряда τ_{eff} .

Наилучшим сочетанием быстродействия и высокого обратного напряжения ($U_r = 400-500$ В) обладали диоды с базовыми областями $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с максимальным содержанием InAs $x = 2.2-2.8$ мол% и диоды с базовыми областями $\text{GaAs}_{1-y}\text{Sb}_y$ с максимальным содержанием GaSb $y = 2.5-3.5$ мол%. В пропускном направлении при постоянном токе 0.5 А прямые падения напряжения в них не превышали 2.5 В, а времена восстановления блокирующего напряжения $\sim (300-400)$ В были не более 10^{-9} с.

Кроме того, для проверки влияния „стенки“ (рис. 1, а) в диодах большой мощности ($U_r = 250-300$ В) методом ЖФЭ были изготовлены структуры типа $n^+(\text{GaAs})-n^0(\text{GaAs})-p^+(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As})-p^+(\text{GaAs})$ с толщинами базовой области ~ 15 мкм. Для снижения уровня фоновых примесей в базовом слое применяли малые, до 0.05 ат%, добавки редкоземельных элементов (Yb, Sc, Er, Y) в расплав, что позволяло получать

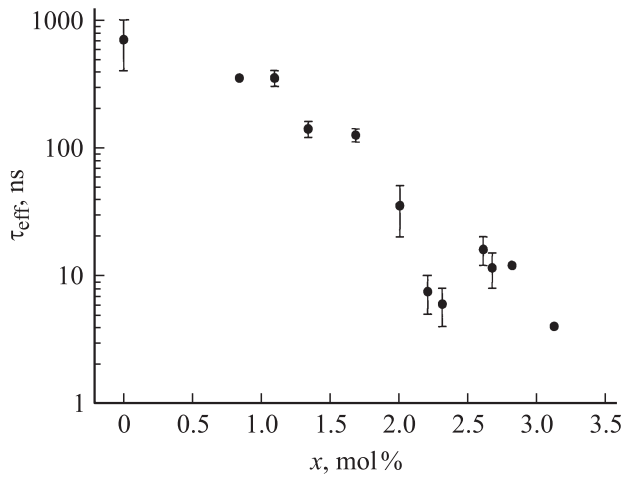


Рис. 3. Эффективные времена жизни ННЗ τ_{eff} в $p-i-n$ -структурах на основе $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, выращенных на подложках GaAs. x — содержание InAs в пленке вблизи границы раздела слой-подложка.

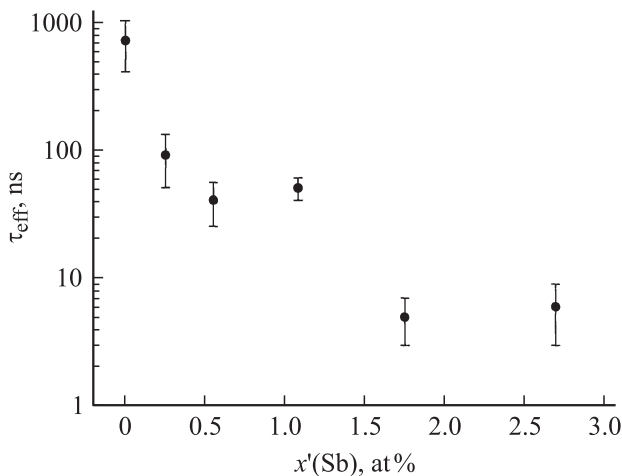


Рис. 4. Эффективные времена жизни ННЗ τ_{eff} в $p-i-n$ -структурах на основе $\text{Ga}_x\text{As}_{1-x}\text{Sb}_y$, выращенных на подложках GaAs. $x'(Sb)$ — содержание сурьмы в жидкой фазе.

базовые области с концентрацией свободных носителей заряда $(1-5) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Такие диоды площадью $(1-3) \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$ обладали временем жизни неосновных носителей от 150 до 600 нс, тогда как времена восстановления обратных напряжений $\sim 200 \text{ В}$ составляли $\sim 10^{-9} \text{ с}$ и менее.

Таким образом, в данной работе показано, что для повышения быстродействия импульсных диодов весьма эффективным оказалось использование резких или плавных гетероструктур в базовой области диода, позволяющих управлять характером распределения ННЗ в базе.

Следует заметить, что для выбора оптимальной структуры диода (градиент ширины запрещенной зоны E_g , расстояние до широкозонной „стенки“ от $p-n$ -перехода) необходимо численное решение особенностей нестационарных процессов в гетеродиодах с учетом индуктив-

ности монтажа и полосы пропускания измерительного тракта.

Список литературы

- [1] С.А. Ерёмин, Д.К. Мокеев, Ю.Р. Носов. *Полупроводниковые диоды с накоплением заряда и их применение* (М., Сов. радио, 1966) с. 151.
- [2] Ж.И. Алфёров, В.И. Корольков, В.Г. Никитин, М.Н. Степанова, Д.Н. Третьяков. *Письма ЖТФ*, **2** (2), 201 (1976).
- [3] Ф.Ю. Солдатенков, В.Г. Данильченко, В.И. Корольков. *ФТП*, **41** (2), 217 (2007).

Редактор Л.В. Шаронова

Gallium arsenide fast pulse diodes on the base of heterostructures

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

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

Abstract The article gives the results of the switching properties investigation of the gallium arsenide diodes on the base of the heterostructures. It was demonstrated that using the gradient of the band gap in the base region or wideband „wall“ in abrupt heterojunction allows to control the distribution of the injected carriers and to occur the carriers accumulation near the $p-n$ junction that cause the more fast recovery stage of the reverse voltage (60–70 ps). The high voltage fast diode structures with gradient of the band gap and with gradient of impurities were studied.