

Влияние облучения ионами He^+ на спектры фоточувствительности гетероструктур с квантовыми ямами и точками $\text{In}(\text{Ga})\text{As}/\text{GaAs}$

© А.П. Горшков[¶], И.А. Карпович, Е.Д. Павлова, Н.С. Волкова

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
603600 Нижний Новгород, Россия

(Получена 15 апреля 2012 г. Принята к печати 25 апреля 2012 г.)

Исследовано влияние ионной имплантации He^+ на спектры фоточувствительности гетероструктур с квантовыми ямами $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ и квантовыми точками InAs/GaAs , выращенных методом газофазной МОС-гидридной эпитаксии.

1. Введение

Низкотемпературное образование дефектов при различных технологических операциях на поверхности квантово-размерных гетероструктур (КРС) (окислении и травлении поверхности, нанесении на поверхность химически активных металлов, имплантации ионов и др.) может сильно влиять на их оптоэлектронные свойства [1]. В свою очередь напряженные квантово-размерные слои могут оказывать влияние на процессы дефектообразования: генерацию, миграцию и комплексообразование дефектов в КРС [2]. В связи с этим исследование дефектообразования при различных обработках поверхности КРС и его влияния на оптоэлектронные свойства КРС представляет значительный теоретический и практический интерес.

В работе исследовано влияние поверхностного дефектообразования при облучении ионами He^+ гетероструктур с квантовыми ямами (КЯ) $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ и квантовыми точками (КТ) InAs/GaAs на фотоэлектрические спектры структур. Поскольку сам гелий как примесь обычно электрически неактивен в полупроводниках, изменения оптоэлектронных свойств КРС при имплантации ионов гелия обусловлены образованием собственных дефектов при торможении ионов: вакансий в подрешетках Ga и As, межузельных атомов, антиструктурных дефектов и других дефектных комплексов.

2. Методика

КРС выращивались на поверхности (100) $n\text{-GaAs}$ методом газофазной МОС-гидридной эпитаксии [3]. Сначала при температуре 650°C выращивался буферный слой $n\text{-GaAs}$ толщиной 0.5 мкм с концентрацией электронов $\sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$. В структурах с КЯ затем при этой же температуре выращивались три КЯ $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ с возрастающей шириной 4, 6 и 8 нм, отделенные друг от друга спейсерными слоями GaAs толщиной 30 нм. Третий слой КЯ зарастивался покровным слоем GaAs толщиной ~ 30 нм.

В структурах с КТ одиночный слой КТ InAs номинальной толщины около 5 монослоев наносился на

буферный слой при температуре 520°C и легировался примесью-сурфактантом — висмутом [3], что позволяло получать более однородные слои КТ, которые имели высоту ~ 5 нм и поверхностную концентрацию $\sim 10^{10} \text{ см}^{-2}$ [4]. Слой КТ покрывался слоем GaAs толщиной 30 нм.

Энергетический спектр КРС изучался методом спектроскопии фототока в барьере Шоттки. Перед нанесением блокирующего контакта (Au) структуры облучались ионами He^+ с энергией 15 кэВ (структура с КЯ) и 10 кэВ (структура с КТ) и дозами от 10^{10} до 10^{12} см^{-2} . Расчеты профиля распределения радиационных дефектов проводились с помощью программы TRIM [5]. Для предотвращения каналирования ионов образцы устанавливали на платформу под углом 10° к направлению падения пучка ионов. При энергии ионов 15 кэВ максимум профиля распределения первичных дефектов находился на расстоянии ~ 100 нм от поверхности.

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены спектры фоточувствительности КРС с КЯ при 77 К при освещении со стороны подложки до и после имплантации ионов гелия. На спектре необлученной структуры (рис. 1, кривая 1) хорошо выделяются три ступенчатые полосы фоточувствительности от КЯ с характерными экситонными пиками на краях двух более широких ям. Уже при дозе имплантации 10^{10} см^{-2} фоточувствительность в области первой от поверхности КЯ-3 (8 нм) уменьшается почти на 2 порядка (рис. 1, кривая 2). Дальнейшее увеличение дозы приводит к практически полному подавлению фоточувствительности от всех КЯ (рис. 1, кривые 3, 4).

Фототок в барьере Шоттки в области поглощения КЯ возникает в результате эмиссии генерированных в КЯ неравновесных электронов и дырок из КЯ и их разделения в электрическом поле барьера с последующей рекомбинацией в матрице КРС и в металлическом электроде. Вероятность эмиссии пар w_e характеризуется эмиссионным временем жизни τ_e ($w_e \propto 1/\tau_e$). Конкурирующим с эмиссией процессом, подавляющим фоточувствительность, является излучательная и безызлуча-

[¶] E-mail: gorshkovap@phys.unn.ru

тельная рекомбинация неравновесных пар в самой КЯ, которая характеризуется эффективным рекомбинационным временем жизни пар τ_r . Фоточувствительность S_{ph} пропорциональна квантовой эффективности эмиссии носителей из КЯ:

$$\eta_e = \frac{1}{\tau_e / (1/\tau_r + 1/\tau_e)}. \quad (1)$$

Подавление фоточувствительности от КЯ при имплантации ионов гелия естественно объясняется образованием дефектов в КЯ, являющихся эффективными центрами рекомбинации. В результате рекомбинационное время жизни неравновесных носителей, генерированных в КЯ, τ_r становится много меньше эмиссионного времени жизни τ_e и, согласно (1), фоточувствительность $S_{ph} \sim \tau_r / \tau_e$ должна уменьшаться с увеличением концентрации та-

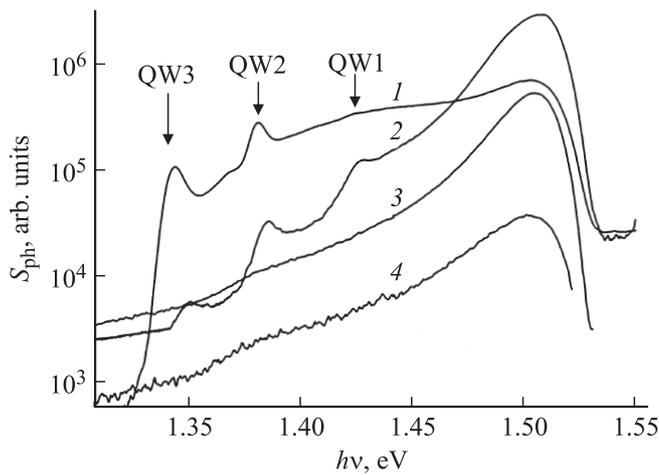


Рис. 1. Влияние имплантации ионов гелия с энергией 15 кэВ на спектр фоточувствительности структуры с квантовыми ямами при 77 К. Доза облучения, см⁻²: 1 — 0, 2 — 10¹⁰, 3 — 10¹¹, 4 — 10¹².

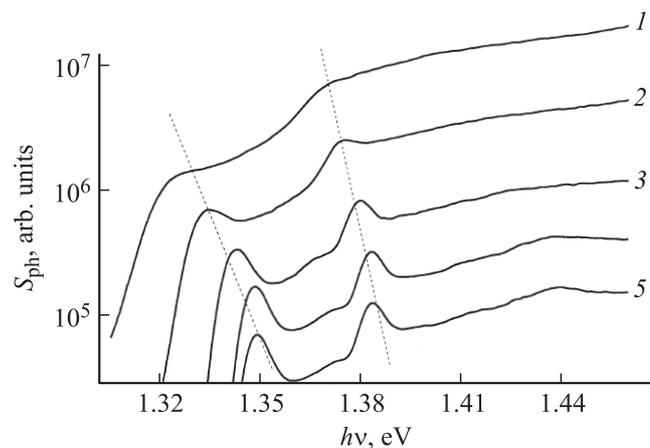


Рис. 2. Влияние электрического поля на спектры фоточувствительности необлученной структуры с квантовыми ямами при 77 К. Напряжение смещения V, В: 1 — -1, 2 — -0.5, 3 — 0, 4 — 0.5, 5 — 0.6.

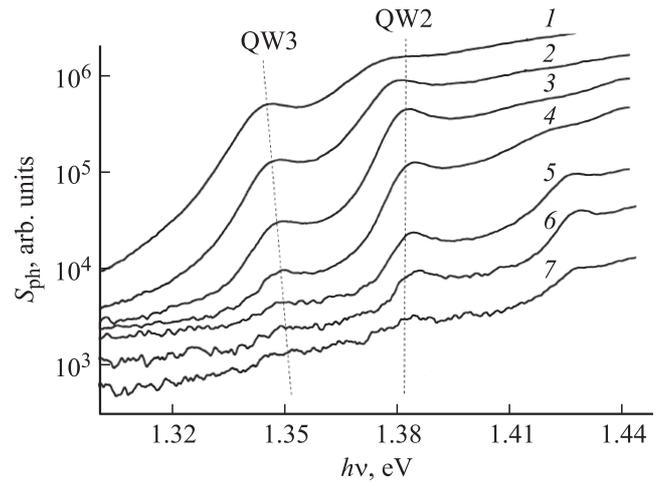


Рис. 3. Влияние электрического поля на спектры фоточувствительности имплантированной структуры с квантовыми ямами (доза имплантации 10¹⁰ см⁻²) при 77 К. Напряжение смещения V, В: 1 — -1.8, 2 — -1.5, 3 — -1, 4 — -0.5, 5 — 0, 6 — 0.2, 7 — 0.4.

ких центров. Остаточная фоточувствительность в области 1.3–1.5 эВ имеет примесную природу и обусловлена биографическими и наведенными имплантацией дефектами в объеме КРС.

До имплантации на структуре с КЯ при 77 К наблюдался ярко выраженный квантово-размерный эффект Штарка, проявляющийся в красном смещении экситонного пика на ~25 мэВ в КЯ-3 и ~15 мэВ в КЯ-2 и в уширении пиков при изменении напряжения на барьере от прямого смещения +0.6 В до обратного смещения -1.0 В (рис. 2). После имплантации при дозе 10¹⁰ см⁻² (рис. 3) смещение экситонного пика в КЯ-3 уменьшается до ~5 мэВ, а в КЯ-2 практически исчезает.

Образование нечувствительных к электрическому полю, т.е. не поляризующихся, экситонов наблюдалось ранее на подобных структурах в [6,7]. Они были названы аномальными экситонами. Было показано, что их образованию способствует введение дефектов в структуру путем анодного окисления поверхности КРС и δ-легирования КРС Mn, и высказано предположение, что аномальные экситоны связаны на примесных донорно-акцепторных парах (D⁺-A⁻), концентрация которых увеличивается в результате дефектообразования. Можно предположить, что образование неполяризующихся экситонов в имплантированной структуре имеет такую же природу.

Подобное изменение спектров фоточувствительности при 300 К наблюдалось и при имплантации ионов гелия в структуры с одиночным слоем КТ (рис. 4). На спектре необлученной структуры видны два пика фоточувствительности от КТ при энергии фотонов ~0.95 и 1.05 эВ и полоса фоточувствительности от КЯ смачивающего слоя при ~1.3 эВ. При облучении происходит уменьшение фоточувствительности от КТ (рис. 4, кривая 2) вплоть до

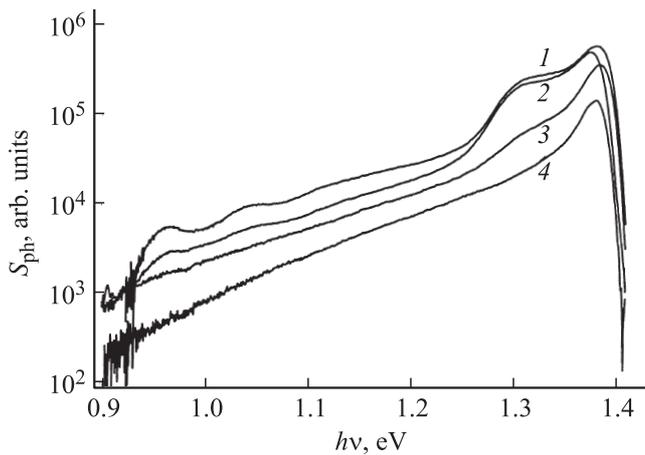


Рис. 4. Влияние имплантации ионов гелия с энергией 10 кэВ на спектр фоточувствительности структуры с квантовыми точками при 300 К. Доза облучения, см^{-2} : 1 — 0, 2 — 10^{10} , 3 — 10^{11} , 4 — 10^{12} .

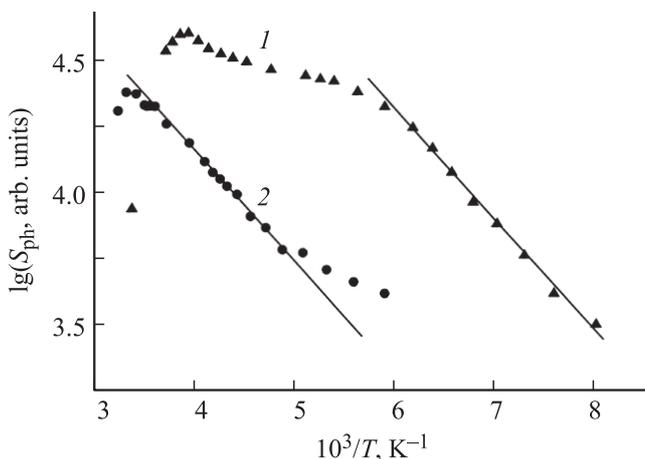


Рис. 5. Влияние имплантации ионов гелия с энергией 10 кэВ и дозой 10^{10} см^{-2} на температурную зависимость фотоувствительности в области основного перехода в квантовой точке: 1 — до имплантации, 2 — после имплантации.

полного ее исчезновения при дозе облучения 10^{11} см^{-2} (рис. 4, кривая 3). Полоса фотоувствительности от КЯ смачивающего слоя оказывается менее чувствительной к дефектообразованию, чем полоса от КТ. Она исчезает только при дозе 10^{12} см^{-2} (кривая 4). Это объясняется тем, что эмиссионное время жизни фотовозбужденных носителей в КЯ τ_e из-за меньшей высоты эмиссионного барьера много меньше, чем в КТ, и неравенство $\tau_r \ll \tau_e$ достигается при более высокой концентрации дефектов.

Уменьшение фотоувствительности, а также интенсивности фотолуминесценции от КТ, обусловленное образованием дефектов в КТ и возникновением в них эффективного канала безызлучательной рекомбинации, приводит к изменению температурной зависимо-

сти фотоувствительности в области низких температур (рис. 5). На температурной зависимости фотоувствительности от КТ необлученной структуры (рис. 5, кривая 1) можно выделить 3 участка. При низких температурах (ниже $\sim 170 \text{ К}$) наблюдается экспоненциальный рост фотоувствительности с повышением температуры, свидетельствующий о доминировании термического механизма эмиссии носителей из КТ, при котором $1/\tau_e \propto \exp(-E_a/kT)$, где E_a — энергия активации процесса эмиссии, зависящая от высоты и формы эмиссионного барьера. При расположении КТ вблизи вершины барьера Шоттки в КРС n -типа фотоувствительность, вероятно, определяется эмиссией электронов. В этом интервале температур реализуется условие $\tau_r \ll \tau_e$, и если τ_r слабо зависит от температуры, то $S_{\text{ph}} \propto \tau_r/\tau_e \propto \exp(-E_a/kT)$. Энергия активации эмиссии $E_a \approx 80 \text{ мэВ}$ меньше высоты эмиссионного барьера для электронов в КТ $\chi_e > 200 \text{ мэВ}$. Поскольку КТ находятся в области электрического поля $\sim 10^4 \text{ В/см}$ барьера Шоттки, неравенство $E_a < \chi_e$ может быть связано с реализацией механизма термоактивированной туннельной эмиссии электронов из КТ через промежуточный уровень возбуждения [8]. В интервале температур 170–250 К $\tau_e \ll \tau_r$, квантовая эффективность $\eta_e \approx 1$ и S_{ph} почти не зависит от температуры. При температурах выше 250 К, по-видимому, становится эффективным новый механизм безызлучательной рекомбинации, при котором τ_r и, следовательно, фотоувствительность сильно уменьшаются с ростом температуры. В этой области наблюдается сильное температурное гашение фотолуминесценции от КТ.

После облучения происходит сдвиг экспоненциального участка температурной зависимости S_{ph} к более высоким температурам (рис. 5, кривая 2), обусловленный уменьшением рекомбинационного времени жизни τ_r примерно на порядок. Энергия активации при этом существенно не изменяется.

4. Заключение

Проведенные исследования показали, что при облучении ионами He^+ поверхности квантово-размерных гетероструктур InGaAs/GaAs происходит подавление фотоувствительности от квантово-размерных слоев квантовых точек (КТ) и квантовых ям (КЯ), смещение экспоненциального участка температурной зависимости фотоувствительности от КТ к более высоким температурам, уменьшение поляризуемости экситонов в КЯ. Эти изменения связываются с образованием дефектов в квантово-размерных слоях, являющихся центрами рекомбинации.

Авторы выражают благодарность Б.Н. Звонкову за выращивание структур и Ю.А. Дудину за облучение структур.

Список литературы

- [1] И.А. Карпович, А.В. Аншон, Н.В. Байдусь и др. ФТП, **28**, 104 (1994).
- [2] Y.C. Chen, J. Singh. J. Appl. Phys., **74**, 3800 (1993).
- [3] Б.Н. Звонков, И.А. Карпович, Н.В. Байдусь и др. ФТП, **35**, 92 (2001).
- [4] I.A. Karpovich, N.V. Baidus, B.N. Zvonkov, D.O. Filatov. Phys. Low-Dim. Structur., **3/4**, 341 (2001).
- [5] J.F. Ziegler, J.P. Biersack, M.D. Ziegler. SRIM *The Stopping and Range of Ions in Matter* (2010) p. 300.
- [6] А.П. Горшков, И.А. Карпович, А.В. Кудрин. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, **5**, 25 (2006).
- [7] А.П. Горшков, И.А. Карпович, Е.Д. Павлова, И.Л. Калентьева. ФТП, **46**, 194 (2012).
- [8] А.А. Гуткин, П.Н. Брунков, А.Ю. Егоров и др. ФТП, **42**, 1122 (2008).

Редактор Т.А. Полянская

Influence of He^+ ions implantation on the photosensitivity spectrum of In(Ga)As/GaAs quantum wells and dots structures

A.P. Gorshkov, I.A. Karpovich, E.D. Pavlova,
N.S. Volkova

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,
603600 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract Influence of He^+ ions implantation on the photosensitivity spectrum of In(Ga)As/GaAs quantum wells and dots structures grown by vapor-phase epitaxy has been investigated.