

Управление длиной волны излучения квантовых ям InGaAs/GaAs и лазерных структур на их основе с помощью протонного облучения

© С.А. Ахлестина, В.К. Васильев, О.В. Вихрова[¶], Ю.А. Данилов, Б.Н. Звонков, С.М. Некоркин

Научно-исследовательский физико-технический институт
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,
603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 8 апреля 2010 г. Принята к печати 15 апреля 2010 г.)

Исследованы особенности управления длиной волны излучения лазерных гетероструктур с напряженными квантовыми ямами InGaAs/GaAs посредством облучения протонами средних энергий (до 150 кэВ). Установлено, что облучение ионами H^+ и последующий термический отжиг при температуре 700°C позволяют уменьшить длину волны излучения квантовых ям. С ростом дозы ионов от 10^{15} до 10^{16} см^{-2} величина изменения длины волны увеличивается до 20 нм. При этом начиная с дозы 10^{15} см^{-2} наблюдается значительное уменьшение интенсивности излучения. Определены оптимальные дозы ионов H^+ ($6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$) и температура отжига (700°C) для модифицирования лазерных структур InGaAs/GaAs/InGaP и показано, что в этом случае можно получить сдвиг $\sim 8\text{--}10$ нм длины волны лазерного излучения с малыми потерями интенсивности при сохранении качества поверхности лазерных структур. Наблюдаемый „синий“ сдвиг обусловлен стимулированными имплантацией процессами перемешивания атомов Ga и In на границах раздела InGaAs/GaAs.

1. Введение

Модифицирование светоизлучающих свойств квантово-размерных структур путем имплантации протонов и последующего термического отжига считается одним из перспективных приемов создания современных оптоэлектронных интегральных схем. Так, в работах [1,2] показано, что облучение протонами и последующий термический отжиг могут быть использованы для увеличения энергии основного перехода в структурах с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs. В результате в спектрах фотолюминесценции наблюдались очень большие энергетические сдвиги (до 160 нм для дозы $4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$) [1]. Возникновение данного эффекта связывают с усилением диффузионных процессов перемешивания атомов Ga–Al на границе GaAs/GaAlAs благодаря возникновению таких точечных дефектов, как вакансии Ga. Увеличение энергии основного перехода является следствием изменения формы квантовой ямы, когда большая доля атомов Al диффундирует в яму. В работе [2] имплантация протонов в сочетании с термическим отжигом была использована для селективного перемешивания слоев и изменения длины волны излучения лазеров GaAs/AlGaAs с квантовыми ямами.

Влияние имплантации ионов As^+ и термического отжига на фотолюминесценцию лазерных структур InGaAs/GaAs/AlGaAs с квантовыми ямами исследовалось в [3]. Как известно, существует целый ряд недостатков перемешивания, вызванного имплантацией тяжелых ионов, а именно: необходимость использования значительно больших по величине энергий ионов (до 10 МэВ) для создания дефектов на типичных для полупроводниковых лазеров глубинах залегания активной области

(~ 1 мкм); плохое восстановление интенсивности излучения структур после термического отжига; насыщение энергетического сдвига с ростом дозы из-за процессов формирования протяженных дефектов и больших нарушенных кластеров, приводящих к ограничению образования точечных дефектов.

Результаты облучения протонами структур с квантовыми ямами InGaAs/GaAs обсуждались в [4]. Авторами ставилась цель получить максимально большие изменения длины волны излучения, поэтому использовались только большие дозы H^+ (от 10^{15} до $4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$) и высокие температуры отжига (900°C). Длина волны излучения после имплантационного модифицирования уменьшалась на 30–45 нм, но при этом интенсивность излучения квантовых ям снижалась в 5–10 раз. Именно из-за последнего фактора исследования по управлению путем протонного облучения длиной волны излучения лазерных диодов с квантовыми ямами InGaAs/GaAs авторами [4] не проводились.

Наш интерес к имплантационному модифицированию структур с квантовыми ямами InGaAs/GaAs в первую очередь обусловлен исследованиями по созданию двухполосных полупроводниковых лазеров InGaAs/GaAs/InGaP, предназначенных для генерации когерентного излучения среднего и дальнего ИК диапазонов в результате смешения излучаемых мод за счет квадратичной оптической нелинейности полупроводника [5]. Кроме того, важное значение имеет создание двухполосного полупроводникового лазера, адаптированного для работы с внешним диэлектрическим волноводом на основе GaP [6]. Реализация такой конструкции позволит получить генерацию разностной моды на длине волны от 60 до 200 мкм. Для получения двухполосного излучения на одном чипе часть активной области, содержащей кванто-

[¶] E-mail: vikhrova@nifti.unn.ru

вые ямы InGaAs/GaAs, можно подвергнуть модификации путем протонного облучения. При этом регистрация вышеуказанной разностной моды возможна при сдвиге линии генерации модифицированной области порядка 5 нм с наименьшей потерей интенсивности. Достижение таких значений смещения длины волны лазерного излучения может быть реализовано с использованием значительно меньших по сравнению с [4] доз протонов и температур отжига, благодаря чему интенсивность излучения имплантационно-модифицированных областей должна уменьшиться незначительно. В работе [7] нами была показана такая возможность изменения длины волны излучения лазерной структуры InGaAs/GaAs/InGaP. Настоящая работа посвящена более подробному исследованию особенностей данного способа управления длиной волны излучения гетероструктур с напряженными квантовыми ямами InGaAs/GaAs.

2. Методика эксперимента

Исследуемые гетероструктуры InGaAs/GaAs и лазерные структуры InGaAs/GaAs/InGaP формировались методом МОС-гидридной эпитаксии при 650°C на подложках *n*-GaAs (100). Гетероструктуры InGaAs/GaAs типа А содержали три квантовые ямы шириной 10–12 нм с различным содержанием индия (11, 16 и 23 ат%), разделенные спейсерными слоями GaAs толщиной ~ 0.4 мкм. Имплантация ионов H⁺ с энергией 120 и 150 кэВ осуществлялась при комнатной температуре мишени. Расчеты распределений дефектов в ионно-имплантированных гетероструктурах выполнены с помощью программы TRIM [8].

На рис. 1 показана схема структуры типа А с тремя квантовыми ямами и профили распределения дефектов для двух указанных выше энергий протонов. Приведены значения расчетной плотности (с размерностью [см⁻¹]), т.е. количества дефектов, созданных одним ионом на единице длины его пробега. Расчет распределений дефектов проведен при значениях пороговой энергии смещения атомов из узлов кристаллической решетки 9 эВ (для Ga) и 10 эВ (для As). Для получения концентрации дефектов расчетную величину плотности необходимо умножить на дозу ионов. Поскольку в процессе ионно-имплантационного перемешивания определяющую роль играют вакансии галлия, распределение именно V_{Ga} приведено на рис. 1. Как известно, моноэнергетическая имплантация ионов приводит к существенному различию концентраций дефектов в разных частях профиля их распределения, поэтому мы использовали последовательное облучение образцов структур А (в которых квантовые ямы отстоят друг от друга на значительные расстояния) протонами с энергиями 120 и 150 кэВ. Конкретные дозы имплантации указаны в подписи к рис. 1. Следует отметить, что реальная концентрация V_{Ga} ниже расчетной величины, поскольку при использовании программы TRIM учитываются только первич-

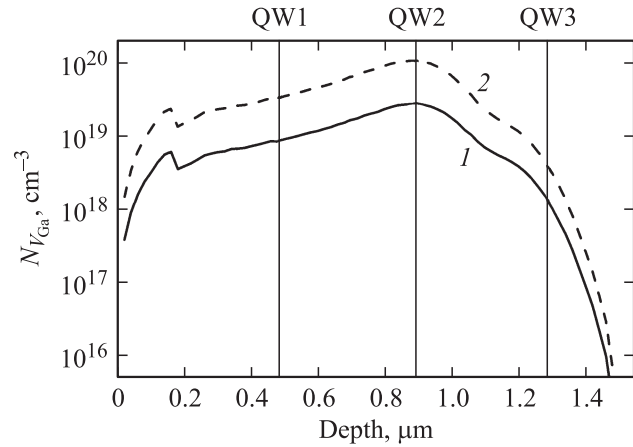


Рис. 1. Распределения первичных вакансий галлия в структурах типа А при имплантации протонов с энергией 120 и 150 кэВ: 1 — дозы ионов равны соответственно $5 \cdot 10^{13}$ и 10^{13} см⁻²; 2 — $2 \cdot 10^{14}$ и $3 \cdot 10^{13}$ см⁻².

ные процессы, а процессы рекомбинации вакансий с межузельными атомами и антиструктурными дефектами могут происходить даже при комнатной температуре в процессе ионной имплантации.

Далее исходные (контрольные) и модифицированные облучением образцы структур подвергались изохронному термическому отжигу при 450–750°C в течение 15 мин в потоке азота. Спектры фотолюминесценции образцов структур и спектральные характеристики лазеров исследовались при 77 К. Для возбуждения люминесцентного излучения использовался He–Ne-лазер мощностью 30 мВт.

3. Результаты эксперимента и обсуждение

На рис. 2 показаны спектры фотолюминесценции структур типа А до и после имплантации и отжига. В результате имплантации протонов интенсивность фотолюминесценции значительно (на несколько порядков величины) снижается, как следствие введения высокой концентрации радиационных дефектов. После термического отжига наблюдалось восстановление интенсивности излучения. В частности, после отжига при 550°C интенсивность пиков фотолюминесценции становится на ~ 2 порядка величины ниже интенсивности фотолюминесценции исходной структуры. При этом сдвига положений пиков не наблюдалось. Практически полное восстановление интенсивности излучения и увеличения энергий основного перехода в квантовых ямах наблюдались в результате отжига при 700°C. Оказалось также, что величина сдвига пиков фотолюминесценции зависит от дозы ионов. Суммируя результаты исследования структур типа А, можно утверждать, что облучение протонами и последующий термический отжиг при температуре 700°C позволяют уменьшить длину

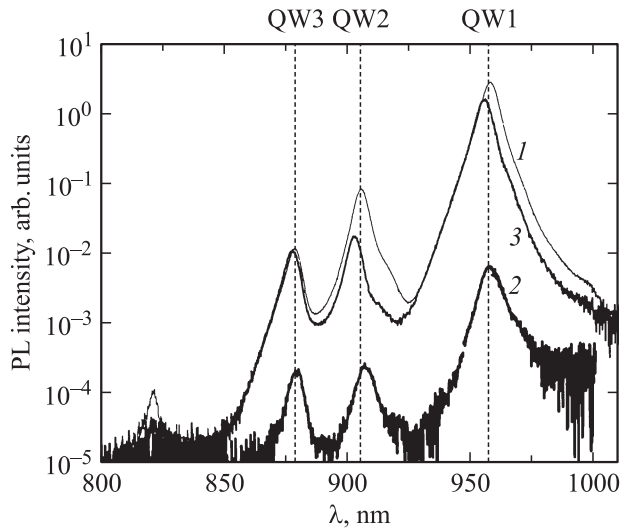


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции структур типа А: 1 — исходная (неимплантированная) структура; 2 — имплантированная протонами с энергией 120 и 150 кэВ и дозой ионов $2 \cdot 10^{14}$ и $3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ соответственно после отжига при 550°C , 3 — после отжига при 700°C .

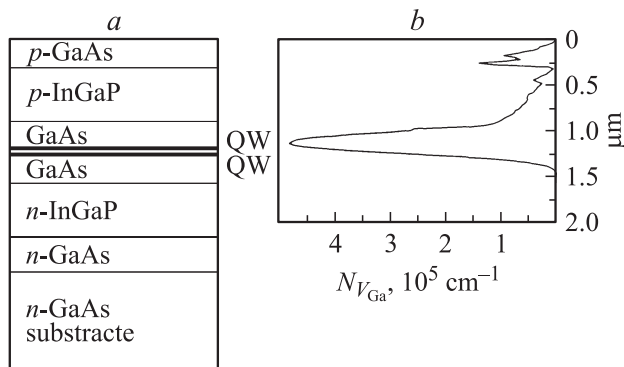


Рис. 3. Схема поперечного сечения структур типа В (а) и расчетное распределение вакансий галлия по глубине в них при имплантации протонов с энергией 150 кэВ (b).

волны излучения квантовых ям в структурах на величину от 5 до 20 нм с ростом суммарной дозы от $6 \cdot 10^{13}$ до 10^{16} см^{-2} , при этом значительное уменьшение интенсивности наблюдается начиная с дозы 10^{15} см^{-2} . Отжиг при 750°C не вызывает значительных изменений в спектрах фотолюминесценции контрольных структур, но приводит к деградации поверхности. „Синий“ сдвиг, наблюдаемый для имплантированных и отожженных структур, можно объяснить процессами атомного перемешивания на границе раздела InGaAs/GaAs, возникающего в процессе отжига благодаря стимулированной вакансиями галлия взаимодиффузии атомов Ga и In. Следует отметить, что в рассматриваемом нами диапазоне изменения доз облучения ионами H^+ не было выявлено зависимости величины сдвига от содержания

индия в квантовой яме. При дозах облучения 10^{15} см^{-2} и выше такая зависимость наблюдалась [4], и авторы связывали ее с присутствием дефектов в напряженной квантовой яме вблизи критической толщины и сегрегацией индия.

На основе полученных данных была определена оптимальная доза ионов H^+ ($6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$) с энергией 150 кэВ для имплантационного модифицирования лазерных структур InGaAs/GaAs/InGaP (структуры типа В). Исследуемые лазерные структуры имели активную область с двумя напряженными InGaAs-квантовыми ямами шириной $\sim 8 \text{ нм}$, разделенными 70 нм слоем GaAs. Толщины контактного слоя p-GaAs, ограничивающих (InGaP) и волноводных (GaAs) слоев составляли 0,27, 0,7 и 0,37 мкм соответственно. После нанесения омических контактов структуры раскалывались на чипы с размерами $1.0 \times 0.25 \text{ мм}$ (1,0 мм — длина резонатора). На рис. 3 показана схема поперечного сечения структур типа В и расчетное распределение вакансий галлия по глубине.

Спектры излучения, полученного при непрерывной накачке, для полосковых лазеров, изготовленных из структур типа В, как исходных, так и имплантированных протонами и отожженных, представлены на рис. 4, а и b соответственно. Видно, что выбранные режимы имплантации и отжига позволили получить сдвиг длины волны лазерного излучения модифицированных областей на $\sim 8 \text{ нм}$ с малыми потерями интенсивности. Следует отметить, что имплантационное модифицирование образцов приводит к увеличению порогового тока. Дифференциальная квантовая эффективность при этом изменяется слабо, как можно видеть из сравнения соответствующих кривых на рис. 4, а и b.

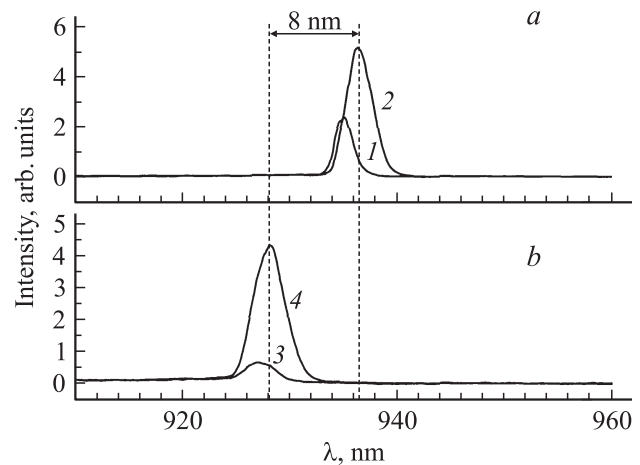


Рис. 4. Спектры излучения лазеров, измеренные при 77 К и непрерывной накачке: а — исходная структура типа В, кривые 1 и 2 соответствуют токам накачки 0,5 и 1,7 А соответственно; b — облученная ионами H^+ (энергия 150 кэВ и доза $6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$) и отожженная при 700°C в течение 15 мин, кривые 3 и 4 соответствуют токам накачки 1 и 2 А соответственно.

О подобных проявлениях влияния оставшихся после отжига дефектов сообщается и для лазеров GaAs/AlGaAs [2]. Вероятно, подобные нежелательные эффекты могут быть сведены к минимуму дальнейшим усовершенствованием процессов облучения протонами и термического отжига.

4. Заключение

Таким образом, в процессе выполнения данной работы были исследованы особенности управления длиной волны излучения гетероструктур с напряженными квантовыми ямами InGaAs/GaAs путем протонного облучения и последующего термического отжига. Установлены зависимости величины наблюдаемого „синего“ сдвига пиков фотолюминесценции квантовых ям от дозы имплантации и температуры отжига и определены оптимальные условия облучения протонами (доза $6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ с энергией 150 кэВ) и отжига (700°C в течение 15 мин в потоке азота) для изменения длины волны излучения лазерных гетероструктур InGaAs/GaAs/InGaP. Показано, что модифицированные согласно выбранным режимам имплантации и отжига лазерные структуры демонстрируют сдвиг длины волны лазерного излучения на ~ 8 нм с малыми потерями интенсивности.

Следовательно, можно полагать, что в дальнейшем данный прием имплантации может быть применен для получения двухполосного излучения на одном чипе и создания двухполосных полупроводниковых лазеров InGaAs/GaAs/InGaP с генерацией когерентного излучения среднего и дальнего инфракрасных диапазонов.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 08-02-00548а, 10-02-00371а, 09-02-97025 р_поволжье_а и 08-02-97038 р_поволжье_а, АВЦП „Развитие потенциала высшей школы“ 2.2.2.2/4297 и программы фундаментальных исследований президиума РАН № 27 „Основы фундаментальных исследований нанотехнологий и наноматериалов“.

Список литературы

- [1] H.H. Tan, J.S. Williams, C. Jagadish, P.T. Burke, M. Gal. *Appl. Phys. Lett.*, **68**, 2401 (1996).
- [2] H.H. Tan, C. Jagadish. *Appl. Phys. Lett.*, **71**, 2680 (1997).
- [3] P.J. Poole, S. Charbonneau, G.C. Aers, T.E. Jackman, M. Buchanan, M. Dion, R.D. Goldberg, I.V. Mitchell. *J. Appl. Phys.*, **78**, 2367 (1995).
- [4] L. Fu, H.H. Tan, M.B. Johnston, M. Gal, C. Jagadish. *J. Appl. Phys.*, **85**, 6786 (1999).
- [5] B.N. Zvonkov, A.A. Biryukov, A.V. Ershov, S.M. Nekorkin, V.Ya. Aleshkin, V.I. Gavrilenko, A.A. Dubinov, K.V. Marmeyanin, S.V. Morozov, A.A. Belyanin, V.V. Kocharovskiy, V.I.V. Kocharovskiy. *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 021 122 (2008).
- [6] В.Я. Алешкин, А.А. Афоненко, А.А. Дубинов. *ЖТФ*, **76** (9), 98 (2006).

- [7] С.А. Ахлестина, В.К. Васильев, О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, Б.Н. Звонков, С.М. Некоркин. *Письма ЖФТ*, **36** (4), 81 (2010).
- [8] J.F. Ziegler, J.P. Biersack, U. Littmark. *The stopping and ranges of ions in solids* (N.Y., Pergamon Press, 1985).

Редактор Т.А. Полянская

Emission wavelength control for InGaAs/GaAs quantum wells and laser structures on their basis by means of proton irradiation

S.A. Akhlestina, V.K. Vasil'ev, O.V. Vikhrova, Yu.A. Danilov, B.N. Zvonkov, S.M. Nekorkin

Physicotechnical Research Institute, Lobachevsky Nizhny Novgorod State University, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract Features of controlling the wavelength of emission from laser heterostructures with strained InGaAs/GaAs quantum wells by an irradiation of medium-energy (up to 150 keV) protons are investigated. It is established, that an irradiation by H^+ ions and the subsequent thermal annealing at temperature 700°C allow to reduce the wavelength of emission from quantum wells. With rise of ion dose from 10^{13} up to 10^{16} cm^{-2} the value of change of wavelength increases up to 20 nm. Since a dose of 10^{15} cm^{-2} , the significant reduction of intensity of emission is observed. The optimum dose ($6 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$) of H^+ ions and annealing temperature (700°C) for modifying InGaAs/GaAs/InGaP laser structures are established. It is shown, that in this case it is possible to receive the shift of wavelength of laser emission ~ 8 –10 nm with small losses of intensity at preservation of high quality of laser structure surface. The observed „blue“ shift is conditioned by the irradiation-induced intermixing the In and Ga atoms at the InGaAs/GaAs interface.