

06;07

Изменение длины волны излучения InGaAs/GaAs/InGaP лазеров посредством ионной имплантации

© 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, Нижний Новгород
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород
E-mail: vikhrova@nifti.unn.ru

Поступило в Редакцию 21 сентября 2009 г.

Исследована возможность управления длиной волны излучения лазерной структуры InGaAs/GaAs/InGaP с напряженными квантовыми ямами посредством имплантации протонов и последующего термического отжига. Показано, что выбор энергии протонов связан с расположением квантовых ям в структуре (150 keV для глубины $\approx 1.3 \mu\text{m}$). Использование дозы ионов $6 \cdot 10^{14} \text{cm}^{-2}$ и отжига при 700°C позволяет уменьшить длину волны излучения модифицированной области лазера на 8–10 nm с минимальной потерей интенсивности. Наблюдаемый эффект может быть использован для получения двухполосного излучения на одном чипе и иметь широкое применение при разработке оптоэлектронных схем.

В настоящее время проводятся исследования по созданию двухполосных полупроводниковых InGaAs/GaAs/InGaP лазеров, предназначенных для генерации когерентного излучения среднего и дальнего ИК-диапазонов в результате смешения излучаемых мод за счет квадратичной оптической нелинейности полупроводника [1]. Большой интерес представляет создание двухполосного полупроводникового лазера, адаптированного для работы с внешним диэлектрическим волноводом на основе GaP [2]. Реализация такой конструкции позволит получить генерацию разностной моды на длине волны от 60 до $200 \mu\text{m}$. Для получения двухполосного излучения на одном чипе можно часть активной области, содержащей квантовые ямы (КЯ) InGaAs/GaAs, подвергнуть модификации путем ионной имплантации. При этом для

вышеуказанной разностной моды необходимо добиться сдвига линии генерации модифицированной области порядка 5 nm с наименьшей потерей интенсивности.

Как было показано в [3,4], облучение протонами и последующий термический отжиг могут быть использованы для увеличения энергии основного перехода в лазерных структурах с ненапряженными КЯ GaAs/AlGaAs. В итоге в спектрах фотолюминесценции (ФЛ) наблюдались большие энергетические сдвиги (до 160 nm для дозы $4 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$) [3]. Возникновение эффекта связывают с усилением диффузионного перемешивания атомов Ga и Al на гетерогранице GaAs/GaAlAs благодаря возникновению вакансий Ga. Увеличение энергии основного перехода является следствием изменения формы КЯ.

Влияние перемешивания на границе раздела InGaAs/GaAs, возникающего вследствие облучения тяжелыми ионами As^+ и последующего термического отжига, на ФЛ свойства InGaAs/GaAs/AlGaAs лазерных структур с напряженными квантовыми ямами исследовалось в [5]. Техника перемешивания имплантацией тяжелых ионов обладает некоторыми отрицательными особенностями [4]: а) необходимостью высоких энергий до 10 MeV для создания дефектов на типичных для полупроводниковых лазеров глубинах залегания активной области ($\sim 1 \mu\text{m}$); б) неполным восстановлением интенсивности излучения структур после термического отжига; в) насыщением энергетического сдвига с ростом дозы из-за формирования протяженных дефектов и больших кластеров нарушений, ограничивающих образование точечных дефектов.

В данной работе сообщается о получении контролируемого сдвига длины волны излучения лазерной структуры InGaAs/GaAs/InGaP с напряженными квантовыми ямами путем имплантации протонов средних энергий и последующего термического отжига.

Исследуемая InGaAs/GaAs/InGaP лазерная структура с широким GaAs-волноводом была выращена методом МОС-гидридной эпитаксии при 650°C на подложке n^+ -GaAs (100). Активная область структуры содержала две напряженные InGaAs квантовые ямы шириной $\sim 8 \text{ nm}$, разделенные 70-nm слоем GaAs. Толщина контактного слоя p -GaAs (рис. 1) составляла $0.27 \mu\text{m}$. Ограничивающие слои InGaP имели толщину $0.7 \mu\text{m}$, GaAs волноводные слои — $0.37 \mu\text{m}$. Имплантация H^+ с энергией 120 и 150 keV (доза — $6 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$) осуществлялась при комнатной температуре мишени. Плотность ионного тока не превышала $3 \mu\text{A/cm}^2$. Далее исходные (контрольные) и модифицированные

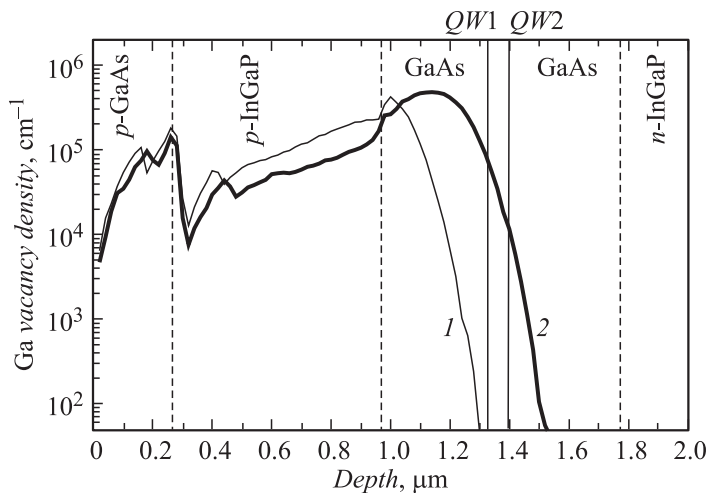


Рис. 1. Рассчитанные с помощью программы TRIM профили концентраций вакансий Ga в лазерной структуре с двумя квантовыми ямами InGaAs/GaAs для протонов с энергиями 120 keV (кривая 1) и 150 keV (кривая 2).

облучением образцы лазерной структуры подвергались термическому отжигу при 700°C в течение 15 min в потоке азота. Обычно при имплантационной обработке структур энергия ионов выбирается таким образом, чтобы максимум распределения дефектов располагался глубже модифицируемого слоя [6]. В нашем случае выбор энергии H⁺ был обусловлен, с одной стороны, значительной толщиной волноводного и ограничивающего слоев, необходимых для оптимального функционирования лазера, и, с другой стороны, максимальным ускоряющим напряжением (150 kV) установки, имеющейся в распоряжении. С учетом указанных ограничений определение энергии H⁺ осуществлялось на основе расчетов распределений дефектов в ионно-имплантированной гетероструктуре с помощью программы TRIM [7]. На рис. 1 показаны распределения вакансий галлия при энергиях протонов 120 и 150 keV. Видно, что при энергии 120 keV дефекты не достигают активной области лазерной структуры. Выбор оптимальной дозы H⁺ и температуры отжига (T_a) для получения необходимого сдвига длины волны излучения модифицированных областей с малыми потерями интенсивности

и сохранения первоначального качества неимплантированных областей был обусловлен результатами предварительных исследований влияния дозы H^+ и T_a на спектры ФЛ подобных структур с квантовыми ямами InGaAs/GaAs различного состава. Было установлено: 1) сдвиг положения пика ФЛ от КЯ монотонно увеличивается до 20 nm с ростом дозы до 10^{16} cm^{-2} , но при этом значительно уменьшается его интенсивность; 2) отжиг при 750°C не вызывает значительных изменений в спектрах ФЛ контрольных структур, но приводит к деградации поверхности. Спектры ФЛ образцов лазерной структуры и спектральные характеристики лазеров исследовались при 77 К. Для возбуждения излучения использовался He–Ne-лазер мощностью 30 mW. После нанесения омических контактов структура раскалялась на чипы размером $1.0 \times 0.25 \text{ mm}$ (1.0 mm — длина резонатора).

Облучение протонами с энергией 120 keV дозой до $6 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ не приводит к изменению спектров ФЛ имплантированных структур в отличие от имплантации с энергией 150 keV. На рис. 2 представлены спектральные зависимости фотолюминесценции исходного и имплантированного протонами с энергией 150 keV и дозой $6 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ образцов InGaAs/GaAs/InGaP лазерной структуры. Оба образца подвергались термическому отжигу в течение 15 min при 700°C . Как видно из представленных данных, выбранные нами режимы имплантации и отжига привели к возникновению сдвига длины волны люминесцентного излучения на 10 nm и уменьшению интенсивности люминесценции лишь в 3 раза (вследствие оставшихся после отжига дефектов, создающих центры безызлучательной рекомбинации). При этом ширина пика на полувысоте практически не изменилась. Наблюдаемый „синий“ сдвиг, как и в случае GaAs/AlGaAs лазерной структуры, можно объяснить процессами атомного перемешивания на границе раздела InGaAs/GaAs. В случае облучения протонами средних энергий перемешиванием в каскадах столкновений непосредственно в процессе имплантации можно пренебречь в отличие от облучения, например, тяжелыми ионами As^+ . Перемешивание в облученных участках InGaAs/GaAs структуры достигается в процессе отжига вследствие стимулированной радиационными дефектами (главным образом, вакансиями галлия V_{Ga}) взаимодиффузии атомов Ga и In. Оценка расчетной концентрации V_{Ga} в области КЯ составляет для выбранных энергии и дозы протонов величину $\approx 2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ (получена как произведение дозы ионов на плотность вакансий, образованных одним ионом на единице длины

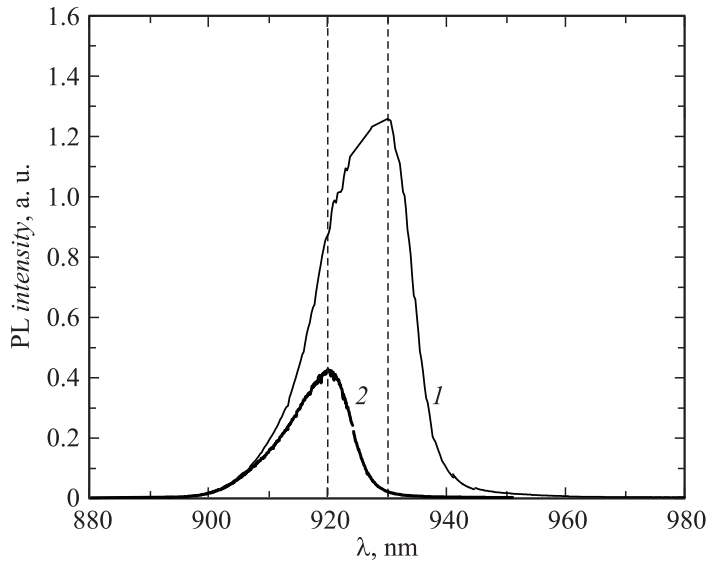


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции исходного (1) и имплантированного протонами (2) образцов лазерной гетероструктуры с квантовыми ямами InGaAs/GaAs. Были реализованы следующие условия имплантации — энергия 150 keV, доза $6 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ и последующего термического отжига — 15 min в потоке азота при 700°C . Температура измерений составляла 77 K.

пробега — рис. 1, кривая 2). В результате атомы Ga и In на границе раздела слоев меняются местами. Сдвиг длины волны является следствием изменения формы КЯ. Теоретическое моделирование показало, что замена квадратной формы ямы на профиль функции ошибок увеличивает энергию перехода квантовой ямы и, таким образом, приводит к „синему“ сдвигу [3]. Неполное восстановление интенсивности ФЛ после отжига, как и неполное восстановление электрических свойств облученных аналогичных структур [8], может быть обусловлено формированием при имплантации термически устойчивых антиструктурных дефектов (As_{Ga} и Ga_{As}), являющихся в полупроводниках типа GaAs глубокими центрами, которые играют роль компенсирующих центров и центров безызлучательной рекомбинации.

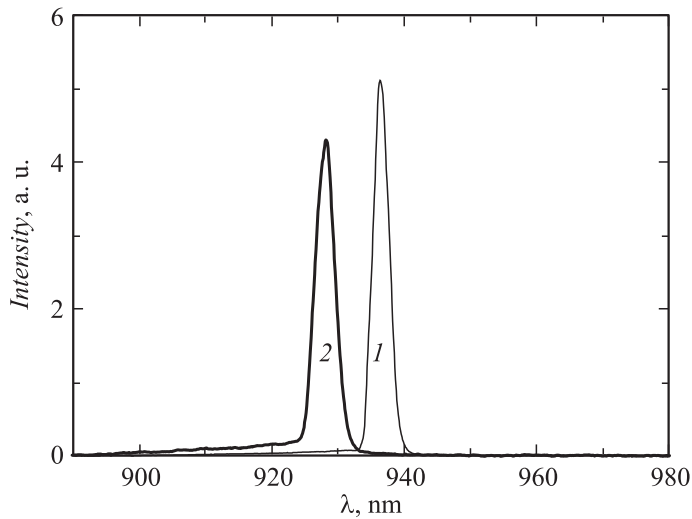


Рис. 3. Спектральные характеристики исходного (1) и имплантированного (2) лазеров, измеренные при 77 К и непрерывной накачке. Ток накачки в случае (1) составлял 1.7 А, в случае (2) — 2 А.

На рис. 3 представлены спектральные характеристики излучения, полученного при непрерывной накачке, для исходного лазера (кривая 1) и лазера, имплантированного протонами (энергия 150 keV и доза $6 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$) и отожженного при 700°C в течение 15 min (кривая 2). Для модифицированного облучением образца наблюдается смещение линии генерации на 8 nm в область меньшей длины волны, что достаточно хорошо согласуется с поведением спектров ФЛ. Следует отметить, что изменение длины волны сопровождается небольшим уменьшением интенсивности излучения и требует увеличения тока накачки от 1.7 до 2 А. О подобных проявлениях деградиационных процессов сообщается и для лазеров GaAs/AlGaAs [4]. Мы полагаем, что такие нежелательные процессы могут быть сведены к минимуму дальнейшим усовершенствованием процесса облучения протонами и термического отжига.

Таким образом, было установлено, что сочетание выбранных условий имплантации протонов и термического отжига позволит создавать

для модифицированной области лазера контролируемый сдвиг длины волны излучения величиной 8–10 nm с незначительной потерей интенсивности излучения.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 07-02-00486а, 08-02-00548а, 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] Zvonkov B.N., Biryukov A.A., Ershov A.V., Nekorkin S.M., Aleshkin V.Ya., Gavrilenko V.I., Dubinov A.A., Maremyanin K.V., Morozov S.V., Belyanin A.A., Kocharovskiy V.V., Kocharovskiy V.I. // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 92. P. 021122.
- [2] Аleshkin B.Я., Афоненко А.А., Дубинов А.А. // ЖТФ. 2006. Т. 76. В. 9. С. 98–100.
- [3] Tan H.H., Williams J.S., Jagadish C., Burke P.T., Gal M. // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 68. P. 2401–2403.
- [4] Tan H.H., Jagadish C. // Appl. Phys. Lett. 1997. V. 71. P. 2680–2682.
- [5] Poole P.J., Charbonneau S., Aers G.C., Jackman T.T., Buchanan M., Dion M., Goldberg R.D., Mitchell I.V. // J. Appl. Phys. 1995. V. 78. P. 2367–2371.
- [6] de Souza J.P., Danilov I., Boudinov H. // J. Appl. Phys. 1997. V. 81. P. 650–655.
- [7] Ziegler J.F., Biersack J.P., Littmark U. The Stopping and Range of Ions in Solids. Pergamon Press, Oxford, 1985. V. 1.
- [8] Danilov I., Pataro L.L., de Castro M.P.P., do Nascimento G.C., Frateschi N.C. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B. 2001. V. 175–177. P. 782–786.