

Светоизлучающие структуры Si:Er, полученные методом молекулярно-лучевой эпитаксии: влияние имплантации и отжига на люминесцентные свойства

© Н.А. Соболев, Д.В. Денисов, А.М. Емельянов, Е.И. Шек, Е.О. Паршин*

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

* Институт микроэлектроники и автоматики Российской академии наук,
150007 Ярославль, Россия

E-mail: nick@sobolev.ioffe.rssi.ru

Исследованы некоторые особенности, возникающие в спектрах фото- и электролюминесценции светоизлучающих структур на основе выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) слоев Si:Er. Для сравнения исследовались люминесцентные свойства слоев Si, имплантированных ионами Er и O. Температурное гашение интенсивности фотолюминесценции Er-содержащих центров в МЛЭ- и имплантационных слоях хорошо описывается одинаковыми функциональными зависимостями с равными значениями энергий активации, но с различающимися более чем на два порядка коэффициентами перед экспоненциальными членами. Показано, что интенсивность электролюминесценции ионов Er^{3+} может быть увеличена путем дополнительной имплантации ионов эрбия и кислорода в МЛЭ-светоизлучающие диодные структуры и последующего отжига. При этом Er-содержащие центры продолжают оставаться доминирующими в спектре люминесценции.

Работа частично поддержана INTAS (грант N 2001-0194), Российским фондом фундаментальных исследований (гранты № 02-02-16374 и 04-02-16935) и Отделением физических наук РАН в рамках Научной программы „Новые материалы и структуры“.

1. Введение

Для создания светоизлучающих структур на основе монокристаллических слоев Si:Er широко используются различные модификации метода молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Для повышения интенсивности люминесценции ионов Er^{3+} в растущий МЛЭ-слой одновременно вводят примеси-активаторы оптически активных центров: кислород, углерод или фтор. Введение этих примесей обычно осуществляется из газовой фазы через встроенный в ростовую камеру капилляр. В работе [1] нами был обнаружен эффект легирования МЛЭ-слоя Si:Er примесями кислорода и углерода без специального их введения в ростовую камеру. Цель настоящей работы состоит в исследовании влияния имплантации ионов кислорода и эрбия и последующего отжига на люминесцентные свойства светоизлучающих структур на основе МЛЭ-слоев Si:Er и сравнении их свойств со свойствами структур на основе имплантационных слоев Si:(Er,O).

2. Экспериментальные условия

МЛЭ-слои Si:Er получались в установке SUPRA-32 (RIBER) на полированных пластинах из выращенного методом Чохральского Si n -типа проводимости (n -Cz-Si) с (100) ориентацией поверхности и удельным сопротивлением $\rho = 4.5 \Omega \cdot \text{cm}$. Для получения потока Si использовался электронно-лучевой испаритель, мишенью в котором служил выращенный методом бестигельной зонной плавки Si n -типа проводимости (n -FZ-Si) с

удельным сопротивлением $\rho = 2 \Omega \cdot \text{cm}$. Поток атомов редкоземельного элемента создавался с помощью эффузионной ячейки, содержащей металлический Er. Эпитаксиальный рост проводился при постоянной температуре подложки 600°C , скорости осаждения, равной $0.6 \text{ \AA}/\text{s}$, и давлении остаточных газов в ростовой камере не выше $8 \cdot 10^{-9}$ Торг. Для максимального выравнивания исходной поверхности предварительно выращивался тонкий (100 \AA) буферный слой нелегированного Si. Температура источника эрбия составляла 785°C , что обеспечивало концентрацию эрбия $\approx 1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. Анализ динамики картин дифракции быстрых электронов на отражение показал, что при выбранных технологических условиях наблюдается двумерный характер роста слоев Si:Er. Более подробно технологические условия МЛЭ-роста описаны в [1]. Толщина слоев равнялась $1.1 \mu\text{m}$. МЛЭ-слои имели n -тип проводимости.

p - n -переходы получались при имплантации ионов бора с энергией $E = 40 \text{ keV}$ и дозой $D = 5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ в эпитаксиальные слои Si:Er. Имплантация ионов фосфора с $E = 80 \text{ keV}$ и $D = 1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ проводилась в обратную сторону n -подложек для создания сильнолегированного n^+ -слоя. Для отжига имплантационных дефектов и активации электрически активных центров проводились термообработки при 950°C в течение 0.5 h в хлорсодержащей атмосфере (ХСА), представляющей собой поток кислорода, содержащий $1 \text{ mol.}\%$ четыреххлористого углерода. Светодиодные меза-структуры с рабочей площадью 3 mm^2 изготавливались с помощью фотолитографии, напыления алюминия и химического травления поверхности p - n -перехода.

Исследовалось влияние дополнительной имплантации ионов кислорода с $E = 100 \text{ keV}$ и $D = 3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ в МЛЭ-слои Si:Er и последующего изохронного (в течение 0.5 h) отжига при 600–800°C в аргоне на фотолюминесценцию (ФЛ). Также изучалось влияние дополнительных имплантаций ионов эрбия с $E = 2$ и 1.6 MeV и $D = 1 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ и кислорода с $E = 280$ и 220 keV и $D = 1 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ в МЛЭ-слои Si:Er светодиодных структур и последующего двухстадийного отжига при 650 + 900°C в течение 0.5 h в ХСА на электролюминесценцию (ЭЛ).

Для более глубокого понимания процессов образования оптически и электрически активных центров и механизмов возбуждения-девозбуждения редкоземельных ионов в МЛЭ-слоях проводилось сравнение свойств слоев Si:Er, полученных методами МЛЭ и ионной имплантации. Имплантационные слои Si:Er формировались на подложках (100) *p*-Cz-Si. Ионы эрбия с энергией $E = 1.0 \text{ MeV}$ и дозой $D = 1 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ и с $E = 0.8 \text{ MeV}$ и $D = 1 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ имплантировались на установке High Voltage Engineering Europe K2MV при 300 K в подложки с $\rho = 1$ и $4.5 \Omega \cdot \text{cm}$ соответственно. Имплантированные образцы отжигались при температуре 620–900°C в течение 0.5 h в ХСА. После отжигов в имплантационных слоях наблюдалась $p \rightarrow n$ -конверсия типа проводимости. Концентрация электронов в них была примерно на порядок меньше, чем концентрация введенных ионов эрбия.

Измерение ФЛ и ЭЛ проводилось при температурах 78 и 80 K соответственно. ФЛ возбуждалась видимым излучением от галогенной лампы мощностью $\sim 50 \text{ mW}$, механически прерываемым с частотой 36 Hz. Инжекционная ЭЛ возбуждалась при приложении импульсов тока с частотой 33 Hz, амплитудой до 500 mA и длительностью 5 ms. Излучение от образца собиралось линзой и после прохождения через монохроматор МДР-23 регистрировалось InGaAs-фотоприемником, работающим при 300 K.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведены спектры ФЛ в имплантационной (YaII.7) и МЛЭ-(D133) структурах Si:Er. Образец YaII.7 был получен на подложке (100) *p*-Si с $\rho = 1 \Omega \cdot \text{cm}$ при имплантации ионов эрбия с $E = 1 \text{ MeV}$ и $D = 1 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ и отжиге в режиме 620°C/0.5h+900°C/0.5h в ХСА. Образец D133 исследовался после эпитаксиального роста без дополнительных отжигов. Видно, что структура оптически активных центров различна: в имплантационном образце доминируют Er-O-содержащие центры с длиной волны в максимуме излучения $\lambda_m = 1.537 \mu\text{m}$ [2], а в МЛЭ-образце — Er-C-содержащие центры с $\lambda_m = 1.542 \mu\text{m}$ [3,4]. Обычно считается, что доминирующие линии связаны с переходами ионов Er^{3+} из первого возбужденного ${}^4I_{13/2}$ в основное ${}^4I_{15/2}$ состояние. Интенсивности ФЛ Er-

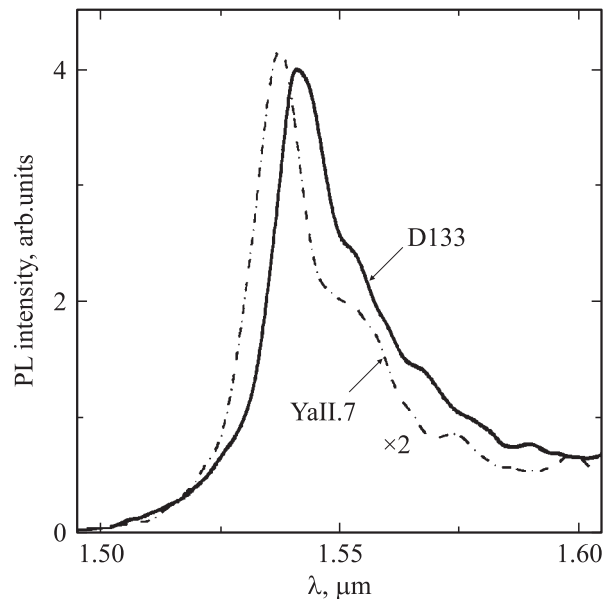


Рис. 1. Спектры ФЛ в имплантационной (YaII.7) и МЛЭ-(D133) структурах Si:Er.

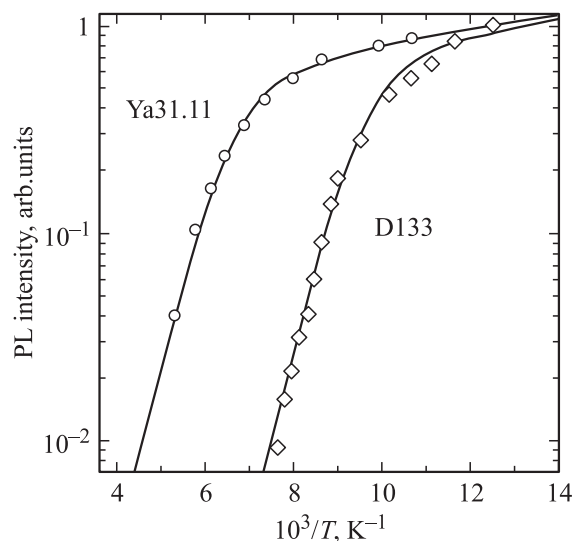


Рис. 2. Температурные зависимости интенсивности ФЛ ионов Er^{3+} для имплантационного (Ya31.11) и МЛЭ-(D133) образцов.

содержащих центров в приготовленных обоими методами структурах были одного порядка величины.

Температурные зависимости интенсивности ФЛ Er-содержащих центров для имплантационного (Ya31.11) и МЛЭ-(D133) образцов показаны на рис. 2. Образец Ya31.11 был получен на подложке (100) *p*-Si с $\rho = 4.5 \Omega \cdot \text{cm}$ при имплантации ионов эрбия с $E = 0.8 \text{ MeV}$ и $D = 1 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ и отжиге в режиме 900°C/0.5 h в ХСА. Температурное гашение интенсивности ФЛ Er-содержащих центров (PL) в имплантационной и МЛЭ-структурах соответственно хорошо описывается одинаковыми функциональными

зависимостями с равными значениями энергий активации, но с различающимися более чем на два порядка коэффициента перед экспоненциальными членами:

$$PL_{\text{impl}} = 1.4/[1 + 12 \exp(-E_1/kT) + 1.3 \cdot 10^6 \exp(-E_2/kT)], \quad (1)$$

$$PL_{\text{MBE}} = 1.6/[1 + 18 \exp(-E_1/kT) + 5.0 \cdot 10^8 \exp(-E_2/kT)], \quad (2)$$

где $E_1 = 22 \text{ meV}$ и $E_2 = 170 \text{ meV}$. Аналогичные зависимости температурного гашения интенсивности ФЛ Er-содержащих центров для имплантационных Si:Er и МЛЭ-образцов, а также ФЛ Ho-содержащих центров для имплантационных образцов Si:Ho наблюдались в работах [5–7].

Дополнительная имплантация ионов кислорода в МЛЭ-слои Si:Er и отжиг не приводят к увеличению интенсивности ФЛ Er-содержащих центров и изменению их структуры (рис. 3). Отжиг при 600°C практически не сопровождается изменениями в спектре ФЛ, в частности максимального значения интенсивности линии. Увеличение температуры отжига вызывает уменьшение интенсивности ФЛ (кривые 2 и 3 на рис. 3). Аналогичный эффект для МЛЭ-структур наблюдался в [6], тогда как дополнительная имплантация ионов кислорода в имплантационные слои Si:Er и последующий отжиг сопровождаются ростом интенсивности ФЛ Er-содержащих центров [8].

Несмотря на выпрямляющий характер вольт-амперных характеристик, режим развитого пробоя $p-n$ -перехода в МЛЭ-светодиодах реализовать не удалось (в отличие от имплантационных структур). Поэтому ЭЛ ионов Er^{3+} в МЛЭ-светодиодах наблюдался только при

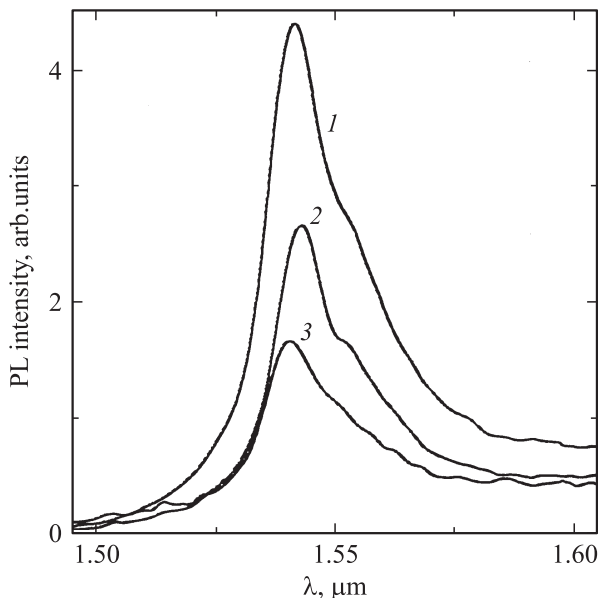


Рис. 3. Спектры ФЛ в МЛЭ-структурах Si:Er после имплантации ионов кислорода и отжига при 600°C (1), 700°C (2) и 800°C (3).

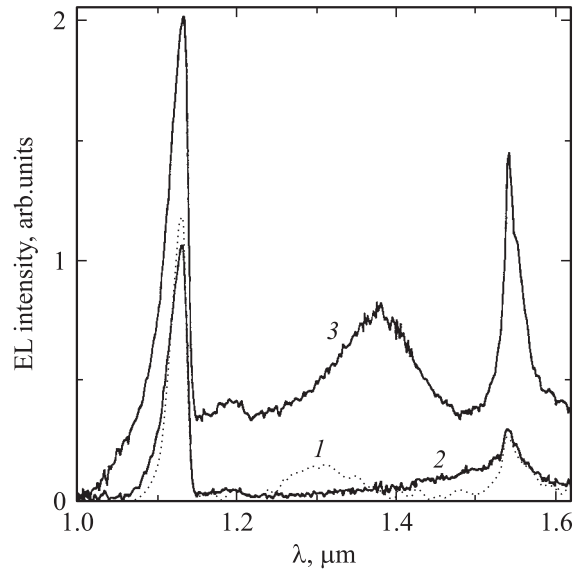


Рис. 4. Спектр ЭЛ диодных МЛЭ-структур до (1) и после имплантации ионов Er и O и отжига при 650°C (2) и 900°C (3).

прямом смещении (кривая 1 на рис. 4). Дополнительные имплантация ионов Er и O в них и двухстадийный отжиг в режиме $650^\circ\text{C}/0.5 \text{ h} + 900^\circ\text{C}/0.5 \text{ h}$ сопровождаются увеличением интенсивности ЭЛ ионов Er^{3+} и изменением спектра ЭЛ, обусловленным введенными дефектами, но не приводят к изменению структуры Er-C-содержащих центров (кривые 2 и 3 на рис. 4). Кривая 1 измерена при токе 300 мА, а кривые 2 и 3 — при 500 мА. При этом уже наблюдается насыщение интенсивности ЭЛ ионов Er^{3+} .

4. Заключение

Изучены особенности, возникающие в люминесцентных спектрах при формировании светоизлучающих структур Si:Er методом МЛЭ. Установлено, что дополнительные имплантации ионов Er и O в МЛЭ-светодиодные структуры и отжиг позволяют увеличить интенсивность ЭЛ ионов Er^{3+} , но не изменяют структуру доминирующих Er-C-содержащих центров.

Авторы выражают благодарность В.И. Вдовину, Ю.А. Николаеву и Р.В. Таракановой за исследование структурных дефектов методом просвечивающей электронной микроскопии, проведение некоторых постимплантационных отжигов и помощь в формировании светодиодных структур.

Список литературы

- [1] Н.А. Соболев, Д.В. Денисов, А.М. Емельянов, Е.И. Шек, Б.Я. Бер, А.П. Коварский, В.И. Сахаров, И.Т. Серенков, В.М. Устинов, Г.Э. Цырлин, Т.В. Котерева. ФТТ 47, 1 108 (2005).

- [2] Н.А. Соболев. ФТП **29**, 1153 (1995).
- [3] F. Priolo, S. Coffa, G. Franzo, C. Spinella, A. Carnera, B. Bellany. *J. Appl. Phys.* **74**, 8, 4936 (1993).
- [4] В.Г. Шенгуров, С.П. Светлов, В.Ю. Чалков, Е.А. Ускова, З.Ф. Красильник, Б.А. Андреев, М.В. Степихова. *Изв. РАН. Сер. физ.* **64**, 353 (2000).
- [5] J. Palm, F. Gan, B. Zheng, J. Michel, L.C. Kimerling. *Phys. Rev. B* **54**, 24, 17 603 (1996).
- [6] H. Efeoglu, J.H. Evans, T.E. Jackman, B. Hamilton, D.C. Houghton, J.M. Langer, A.R. Peaker, D. Perovic, I. Poole, N. Ravel, P. Hemment, C.W. Chen. *Sci. Technol.* **8**, 236 (1993).
- [7] N.A. Sobolev, A.M. Emel'yanov, R.N. Kyutt, Yu.A. Nikolaev. *Solid State Phenomena* **69–70**, 371 (1999).
- [8] N.A. Sobolev, A.M. Emel'yanov, Yu.A. Kudryavtsev, R.N. Kyutt, M.I. Makovijchuk, Yu.A. Nikolaev, E.O. Parshin, V.I. Sakharov, I.T. Serenkov, E.I. Shek, K.F. Shtel'makh. *Solid State Phenomena* **57–58**, 213 (1997).