

Кремниевые светодиоды с дислокационной люминесценцией при комнатной температуре, изготовленные имплантацией ионов эрбия и газофазного осаждения поликристаллических слоев кремния, сильно легированных бором и фосфором

© Н.А. Соболев[¶], А.М. Емельянов, В.В. Забродский, Н.В. Забродская, В.Л. Суханов, Е.И. Шек

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

(Получена 17 октября 2006 г. Принята к печати 31 октября 2006 г.)

Изготовлены светодиоды, в которых оптически активные центры образуются при имплантации в кремний ионов эрбия и последующем высокотемпературном отжиге в окисляющей атмосфере, а p - n -переход и омический контакт формируются путем газофазного осаждения поликристаллических слоев кремния, легированных бором и фосфором соответственно. Исследованы люминесцентные свойства светодиодов. Применение поликристаллических слоев позволяет избежать потерь в толще светоизлучающего слоя Si:Er, которые неизбежны при использовании традиционных методов ионной имплантации и диффузии. При 80 К трансформация спектров электролюминесценции в области дислокационной люминесценции в зависимости от тока хорошо описывается при разложении спектра на три гауссовы кривые, положения максимумов которых и их ширины не зависят от тока, а амплитуды линейно возрастают с током. При 300 К в области дислокационной люминесценции наблюдается один максимум с длиной волны ~ 1.6 мкм.

PACS: 61.72.Tt, 78.60.Fi, 85.60.Jb

1. Введение

Развитие кремниевой оптоэлектроники сдерживается отсутствием эффективных источников света, совместимых с кремниевой технологией. Для создания светодиодов (СД) представляется перспективным использование так называемой дислокационной люминесценции на длинах волн $\lambda = 1.4$ – 1.6 мкм, возникающей в монокристаллическом Si с большой плотностью дислокаций, поскольку, с одной стороны, для этих длин волн уже созданы волноводы, фотоприемники и модуляторы, а с другой, — наблюдалась электролюминесценция (ЭЛ) при комнатной температуре с внешней квантовой эффективностью $\sim 0.1\%$ [1]. Дислокационная люминесценция наблюдалась в Si при деформации методом одноосного сжатия [1] или изгиба [2], релаксации выращенных на его поверхности эпитаксиальных слоев SiGe [3], лазерной перекристаллизации [4], жидкофазной эпитаксии [5], формировании кислородных преципитатов [6] и высокотемпературном отжиге в окислительной атмосфере после имплантации ионов эрбия с дозами как ниже, так и выше порога аморфизации Si [7,8]. Достоинство последнего метода по сравнению с наиболее широко используемым методом одноосной деформации Si заключается в его совместимости с промышленной микроэлектронной технологией, высокой однородностью распределения дислокаций по площади пластин большого диаметра и наличием меньшего количества люминесцентных линий. Недостаток метода заключается в малой толщине приповерхностного оптически активного слоя (~ 1 мкм для редкоземельных ионов с энерги-

ей ~ 2 МэВ). Формирование p - n -перехода традиционными методами ионной имплантации или диффузии приводит к значительным потерям в толще излучающего слоя. Цель настоящей работы заключалась в создании СД с сильно легированными p^+ - и n^+ -слоями поликристаллического кремния и исследовании их люминесцентных свойств.

2. Экспериментальные условия

Ионы Er с энергиями 1.2 и 0.8 МэВ и дозами $1 \cdot 10^{13}$ см⁻² имплантировались в пластину кремния n -типа проводимости, выращенного методом Чохральского, n -Cz-Si, толщиной ~ 410 мкм с удельным сопротивлением 15 Ом·см и ориентацией поверхности $\langle 100 \rangle$. Отжиг проводился в хлорсодержащей атмосфере при 1100°C в течение 1 ч. Хлорсодержащая атмосфера представляла собой поток кислорода, насыщенный парами четыреххлористого углерода с концентрацией 1 мол% [7]. Для создания p - n -перехода со стороны имплантации ионов эрбия вскрывались окна диаметром 0.1 мм в слое SiO₂ и в них газофазным методом при 850°C осаждался сильно легированный бором до концентрации $\sim 10^{21}$ см⁻³ p^+ -слой поликристаллического кремния. Для получения омического контакта на обратную сторону пластины после удаления слоя SiO₂ при 800°C наносился слой поликристаллического кремния, легированного фосфором до концентрации $\sim 10^{21}$ см⁻³. Сверху поликристаллического кремния на лицевой и обратной сторонах пластины формировались контакты нанесением алюминия.

Спектры ЭЛ измерялись на автоматизированном спектрометре на основе монохроматора МДР-23 и неохла-

[¶] E-mail: nick@sobolev.ioffe.rssi.ru

ждаемого фотодиода InGaAs с разрешением 7 нм при 80 и 300 К. При измерении спектров ЭЛ излучение с лицевой поверхности (за краем электрода) фокусировалось на входную щель монохроматора. ЭЛ возбуждалась прямоугольными импульсами тока с длительностью 5 мс, амплитудой до 30 мА и частотой 32 Гц. Спектры были скорректированы с учетом спектральной характеристики фотоприемника и всего оптического тракта.

3. Результаты и обсуждение

Спектр ЭЛ образца при 80 К и токе 30 мА представлен на рис. 1. В спектре в области 1.3–1.65 мкм наблюдаются два пика, связанные с введением дислокаций, а также пики краевой люминесценции в области 1.1–1.2 мкм. Анализ спектра в области дислокационной люминесценции показывает, что два несимметричных пика хорошо описываются при разложении спектра на три гауссовы кривые (штриховые линии на рис. 1), положения максимумов которых равны 1.513, 1.506 и 1.408 мкм, а ширины на половине интенсивности (FWHM) равны 23, 60 и 88 нм соответственно.

Изменение спектров дислокационной ЭЛ в диапазоне токов 4–30 мА при 80 К показано на рис. 2. Трансформация спектров ЭЛ в области дислокационной люминесценции в зависимости от тока хорошо описывается при разложении спектра на три определенных выше гауссовы кривые, положения максимумов которых практически не зависят от тока. Из рис. 3 и 4 видно, что величины FWHM также практически не зависят от тока, а их амплитуды линейно, но с различающимися коэффициентами, возрастают с током.

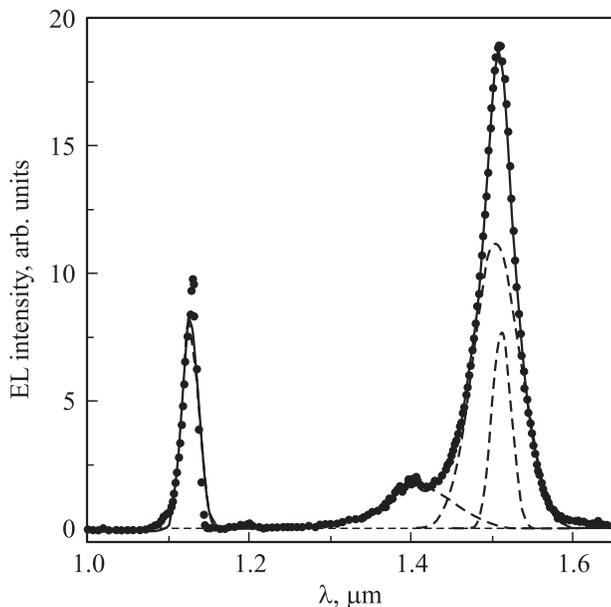


Рис. 1. Спектр электролюминесценции (EL) при температуре 80 К и токе 30 мА. Штриховые линии — аппроксимация спектра тремя гауссовыми кривыми.

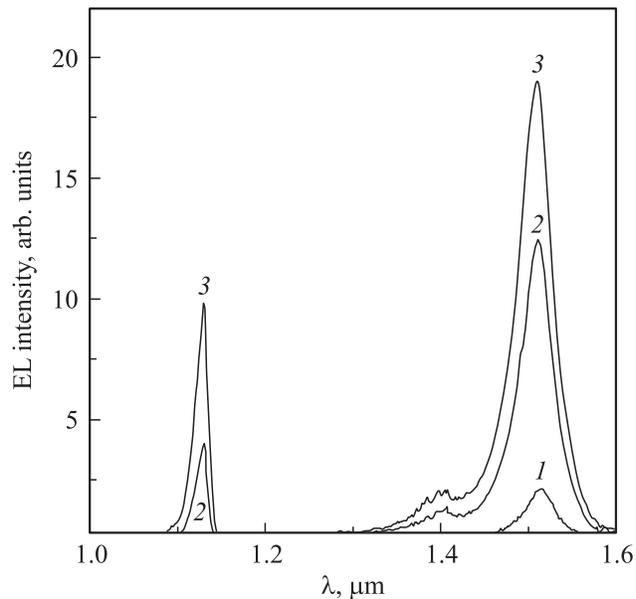


Рис. 2. Спектры электролюминесценции (EL) при температуре 80 К и токах 4 (1), 20 (2), 30 мА (3).

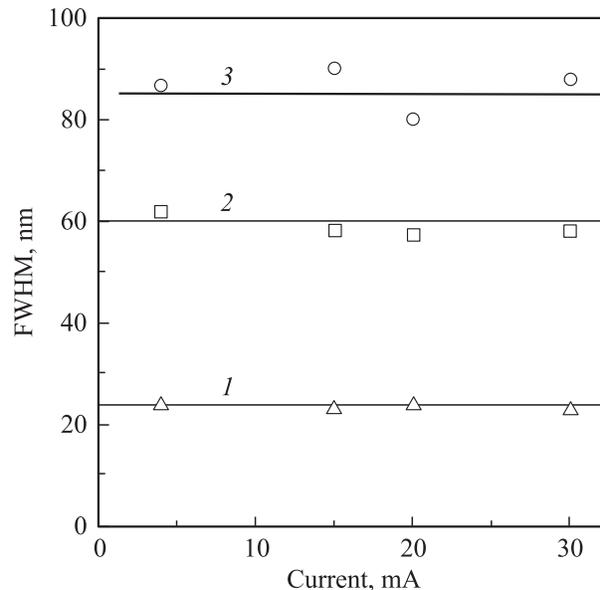


Рис. 3. Зависимости ширины гауссовых линий FWHM с максимумами на длинах волн 1.513 (1), 1.506 (2), 1.408 мкм (3) от тока при 80 К.

На рис. 5 (кривая 1) представлен спектр ЭЛ, измеренный при токе 20 мА и температуре 80 К. При увеличении температуры до 300 К в исследованной области спектра остаются пики краевой и дислокационной ЭЛ и происходит их уширение (см. рис. 5, кривая 2). Однако при этом в области дислокационной люминесценции наблюдается один максимум с длиной волны ~ 1.6 мкм. Положение максимума дислокационного пика при 300 К практически совпадает с положением пиков в СД, полученных методами одноосной деформации [1], лазерной перекри-

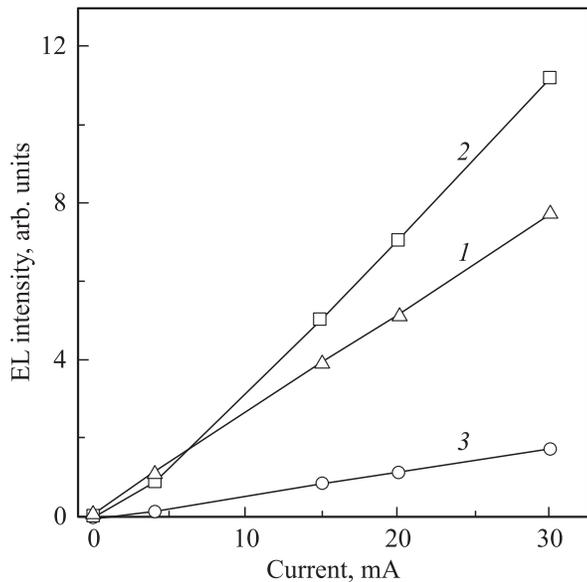


Рис. 4. Зависимости амплитуды гауссовых линий с максимумами на длинах волн 1.513 (1), 1.506 (2), 1.408 мкм (3) от тока при 80 К.

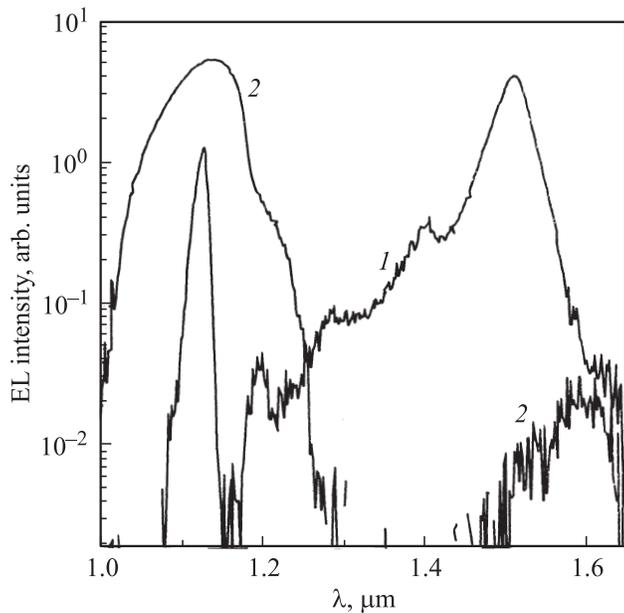


Рис. 5. Спектры электролюминесценции (EL) при температурах 80 (1), 300 К (2) и токе 20 мА.

сталлизации [4], а также высокотемпературного отжига имплантированных ионами эрбия и кислорода слоев и формирования сильно легированных p^+ - и n^+ -слоев имплантацией В и Р [9].

4. Заключение

Изготовлены СД, в которых оптически активные центры образуются при имплантации ионов эрбия и последующем высокотемпературном отжиге в окисляю-

щей атмосфере, а p - n -переход и омический контакт с противоположной стороны формируются путем газофазного осаждения поликристаллических слоев кремния, легированных бором и фосфором соответственно. Исследованы люминесцентные свойства СД. Применение поликристаллических слоев позволяет избежать потерь в толще Si:Er светоизлучающего слоя, которые неизбежны при использовании традиционных методов ионной имплантации и диффузии. При 80 К трансформация спектров ЭЛ в области дислокационной люминесценции в зависимости от тока хорошо описывается при разложении спектра на три гауссовы кривые, положения максимумов которых и их ширины не зависят от тока, а амплитуды линейно возрастают с током. При 300 К в области дислокационной люминесценции наблюдается один максимум с длиной волны ~ 1.6 мкм.

Авторы выражают благодарность Е.О. Паршину за проведение имплантации. Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 04-02-16935).

Список литературы

- [1] V. Kveder, V. Badylevich, E. Steinman, A. Izotov, M. Zeibt, W. Schreter. *Appl. Phys. Lett.*, **84**, 2106 (2004).
- [2] N.A. Sobolev, A.M. Emel'yanov, E.I. Shek, O.V. Feklisova, E.B. Yakimov, T.V. Kotereva. *Phys. Status Solidi C*, **2**, 1842 (2005).
- [3] S. Fukatsu, Y. Mera, M. Inoue, K. Maeda, H. Akiyama, H. Sakaki. *Appl. Phys. Lett.*, **68**, 1889 (1996).
- [4] E.O. Sveinbjornsson, J. Weber. *Appl. Phys. Lett.*, **69**, 2686 (1996).
- [5] S. Binetti, M. Donghi, S. Pizzini, A. Castaldini, A. Cavallini, F. Fraboni, N.A. Sobolev. *Sol. St. Phenomena*, **57–58**, 197 (1997).
- [6] S. Pizzini, E. Leonti, S. Binetti, M. Acciarri, A. Le Donne, B. Pichaud. *Sol. St. Phenomena*, **95–96**, 273 (2004).
- [7] N.A. Sobolev, O.B. Gusev, E.I. Shek, V.I. Vdovin, T.G. Yugova, A.M. Emel'yanov. *Appl. Phys. Lett.*, **72**, 3326 (1998).
- [8] N.A. Sobolev, A.M. Emel'yanov, E.I. Shek, V.I. Sakharov, I.T. Serenkov, Yu.A. Nikolaev, V.I. Vdovin, T.G. Yugova, M.I. Makovijchuk, E.O. Parshin, S. Pizzini. *Mater. Sci. Eng.*, **B91–92**, 167 (2002).
- [9] А.М. Емельянов, Е.И. Шек. *ФТТ*, **46**, 1751 (2004).

Редактор Л.В. Шаронова

**Silicon light-emitting diodes
with dislocation-related luminescence
at room temperature prepared by Erbium
ion implantation and gaseous-phase
evaporation of polycrystalline silicon
layers heavy doped with boron and
phosphorus**

*N.A. Sobolev, A.M. Emel'yanov, V.V. Zabrodskii,
N.V. Zabrodskaya, V.L. Sukhanov, E.I. Shek*

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

Abstract Light-emitting diodes with optically active centers induced due to erbium ion implantation and subsequent high temperature annealing in an oxidizing medium as well as a $p-n$ junction and an ohmic contact prepared by gaseous-phase evaporation of polycrystalline silicon layers doped with boron and phosphorus, respectively, have been fabricated and their properties have been studied. The application of the polycrystalline layers gives us a possibility to prevent Si:Er light-emitting layer thickness losses which are inevitable when using conventional ion implantation and diffusion techniques. At the temperature 80 K, the transformation of electroluminescence spectra in the area of the dislocation-related luminescence in dependence on the current is precisely described by the three Gaussian lines. Energies of line maxima and a full width at a half maximum of the lines are current independent and their amplitudes linearly increase with the current. At 300 K, only one maximum with a wavelength of $\sim 1.6 \mu\text{m}$ is observed in the area of the dislocation-related luminescence.