

Электролюминесцентные свойства светодиодов на основе p -Si, подвергнутых деформации

© Н.А. Соболев[†], А.М. Емельянов, Е.И. Шек, О.В. Феклисова*, Е.Б. Якимов*

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

* Институт проблем технологии микроэлектроники Российской академии наук,
142432 Черноголовка, Россия

(Получена 21 февраля 2005 г. Принята к печати 14 марта 2005 г.)

Исследована электролюминесценция в светодиодах, деформированных методом четырехточечного изгиба при 700°C, в диапазоне длин волн 1.0–1.65 мкм при токах до 400 мА. Светодиоды изготовлены имплантацией ионов В и Р в пластины кремния p -типа проводимости, выращенного методами бестигельной зонной плавки (FZ -Si) и Чохральского (Cz -Si) с последующим отжигом при 700 и 1100°C. Интенсивность дислокационной электролюминесценции выше в светодиодах на основе FZ -Si. Низкотемпературный постимплантационный отжиг способствует увеличению интенсивности дислокационной электролюминесценции по сравнению с высокотемпературным. Трансформация спектров излучения в зависимости от тока в светодиодах на основе FZ -Si хорошо описывается 8 гауссовыми линиями. Положения максимумов этих линий не зависят от тока и равны 1.22, 1.244, 1.26, 1.316, 1.38, 1.42, 1.52 и 1.544 мкм. Исследованы зависимости интегральной интенсивности и ширины линий от тока.

1. Введение

Необходимость создания светодиодов на основе кремния обусловлена нуждами оптоэлектроники, и поэтому количество исследований в этом направлении возрастает [1]. Представляется перспективным создание светодиодов на основе монокристаллического кремния с электролюминесценцией (ЭЛ), обусловленной введением дислокаций (так называемой дислокационной ЭЛ). До недавнего времени квантовая эффективность ЭЛ в таких структурах составляла 10^{-3} % [2,3]. В 2004 г. появилось сообщение о получении светодиодов с внешней квантовой эффективностью дислокационной ЭЛ на уровне ~ 0.1 % [4]. Учитывая, что механизм ЭЛ еще не достаточно хорошо понят, а также многообразие методов создания светодиодов с дислокационной ЭЛ (одноосное сжатие [2,4], деформация методом изгиба [5], лазерная перекристаллизация [3], имплантация редкоземельных ионов и высокотемпературный отжиг в условиях пересыщения кремния собственными точечными дефектами [6,7]), можно ожидать и дальнейшего увеличения эффективности. Подавляющее количество публикаций посвящено исследованию дислокационной фотолюминесценции (ФЛ), что существенно ограничивает объем получаемой информации, в частности, ограничивает возможности исследования влияния уровня возбуждения на трансформацию спектров люминесценции. Авторы работы [5], для того чтобы выявить спектр связанных с деформацией методом изгиба линий ФЛ, использовали различные исходные образцы (различные ориентация пластин, тип легирующей примеси и концентрация кислорода), варьировали условия деформации и последующих отжигов. В нашей предшествующей работе [8] практически идентичные линии были идентифицированы

в спектрах ЭЛ светодиодов, изготовленных имплантацией ионов бора и фосфора в выращенный методом бестигельной зонной плавки кремний n -типа проводимости (n - FZ -Si) с ориентацией поверхности (100) и деформированных методом четырехточечного изгиба. Цель настоящей работы заключалась в исследовании влияния деформации на ЭЛ светодиодов, сформированных в кремнии p -типа проводимости методом ионной имплантации и последующего отжига.

2. Экспериментальные условия

Для создания n^+ - p -переходов ионы фосфора с энергией $E = 75$ кэВ и дозой $\Phi = 1 \cdot 10^{15}$ см $^{-2}$ имплантировали в кремниевые пластины p -типа проводимости с ориентацией поверхности (100), выращенные методом Чохральского (Cz -Si), с удельным сопротивлением $\rho = 15$ Ом · см (образцы #5), и FZ -Si с $\rho = 100$ Ом · см (образцы #10). Толщины пластин были 400 и 310 мкм соответственно. Для получения омического контакта ионы бора с $E = 40$ кэВ и $\Phi = 1 \cdot 10^{15}$ см $^{-2}$ имплантировались в обратную сторону пластин. Изохронные (20 мин) постимплантационные отжиги проводились в атмосфере аргона при температурах 700 и 1100°C. Образцы, отожженные при меньшей температуре 700°C (#5-700 и #10-700) содержали протяженные структурные дефекты (дефекты {311}, так называемые god-like defects, петли Франка и совершенные призматические дислокационные петли), а в отожженных при более высокой температуре 1100°C образцах (#5-1100 и #10-1100) протяженные структурные дефекты отсутствовали [9]. Чтобы ввести дислокации, прямоугольные образцы размером $\sim 4 \times 15$ мм 2 деформировались методом четырехточечного изгиба в установке с сапфировым держателем образца при температуре 700°C в течение

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

30 мин при нагрузке 3.5 кг/мм². Поверхность с n^+ - p -переходом была стороной растяжения. Плотность дислокаций после деформации достигала значений $\sim 10^6$ см⁻². Светодиоды с мезаподобным краевым контуром были изготовлены по обычной технологии с использованием напыления алюминия на обе поверхности образцов. Диаметр n^+ - p -переходов равнялся 0.8 мм.

Электролюминесценция исследовалась в области максимальной деформации во всех образцах при 80 К и амплитуде импульсов прямого тока до 400 мА. Длительность импульсов изменялась в диапазоне 1–5 мс, а частота следования составляла 33 Гц. Монохроматор МДР-23 с разрешением 7 нм, InGaAs-фотодиод и селективный нановольтметр использовались для измерения спектров ЭЛ в диапазоне длин волн 1.0–1.65 мкм. Все спектральные характеристики, приведенные в статье, откорректированы на спектральные отклики фотодиода и всего оптического тракта.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены спектры всех исследованных образцов при токе 200 мА. Во всех образцах наблюдается дислокационная ЭЛ в диапазоне длин волн 1.2–1.6 мкм. Интенсивность дислокационной ЭЛ выше в светодиодах на основе FZ -Si, чем в светодиодах на основе Cz -Si, приготовленных в тех же экспериментальных условиях. Аналогичный результат наблюдался для интенсивности дислокационной ФЛ в деформированных пластинах FZ -Si и Cz -Si p -типа проводимости в [10] и интенсивности дислокационной ЭЛ в деформированных светодиодах на основе FZ -Si и Cz -Si n -типа проводимости [8]. Интенсивность дислокационной ЭЛ выше в светодиодах, прошедших постимплантационный отжиг при более низких температурах и содержащих протяженные структурные дефекты (#5-700 и #10-700) по сравнению со светодиодами, отожженными при более высокой температуре и не содержащими протяженные структурные дефекты (#5-1100 и #10-1100). Аналогичное влияние температуры постимплантационного отжига на интенсивность дислокационной ЭЛ наблюдалось для светодиодов на основе FZ -Si и Cz -Si n -типа проводимости [8].

Спектры ЭЛ для образца #10-700, измеренные при различных уровнях возбуждающего тока, представлены на рис. 2. Хорошо известные дислокационные люминесцентные линии $D1$, $D2$, $D3$ и $D4$ (их позиции показаны вертикальными пунктирными линиями) доминируют при низких токах. Пики краевой люминесценции наблюдаются при токах ≥ 40 мА. Несимметричное уширение линий $D1$ и $D2$ наблюдается с увеличением тока. Аналогичная трансформация спектров дислокационной ФЛ обычно связывается с появлением дополнительных люминесцентных линий [5]. Трансформация спектров ЭЛ в зависимости от тока хорошо описывается при разложении спектра на 8 гауссовых кривых, длины волн максимумов которых получены в [8] и равны 1.22, 1.244, 1.26, 1.316,

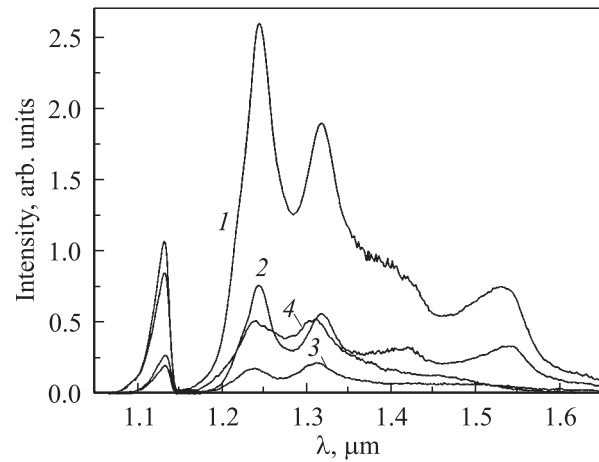


Рис. 1. Спектры ЭЛ в образцах #10-700 (1), #10-1100 (2), #5-1100 (3) и #5-700 (4), измеренные при токе 200 мА.

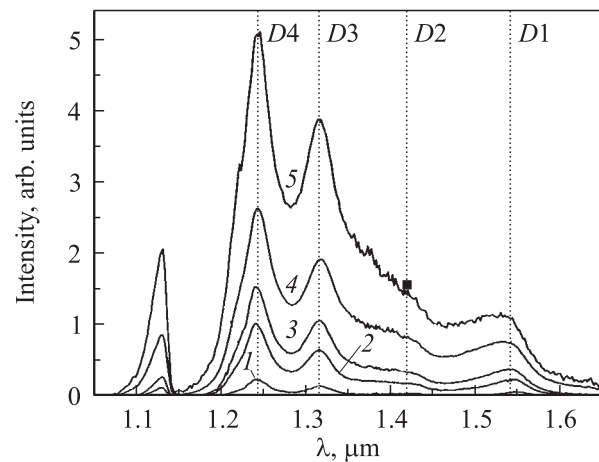


Рис. 2. Спектры ЭЛ светодиода #10-700, измеренные при токах 10 (1), 40 (2), 80 (3), 200 (4) и 400 (5) мА.

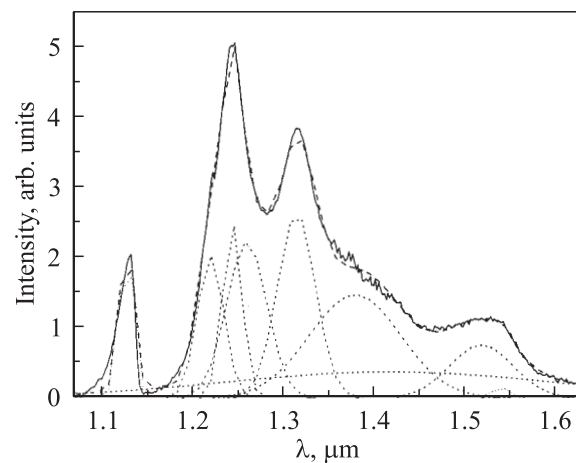


Рис. 3. Разложение спектра ЭЛ образца #10-700, измеренного при токе 400 мА. Сплошная линия — экспериментальная кривая, пунктирные кривые — гауссианы, положение максимумов которых указано в тексте, штриховая — суммарная аппроксимирующая кривая.

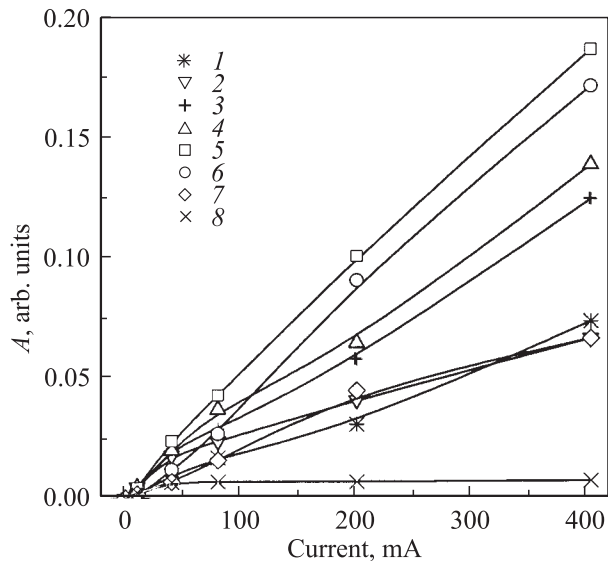


Рис. 4. Зависимость от тока интегральной интенсивности ЭЛ для гауссовых линий 1.22 (1), 1.244 (2), 1.26 (3), 1.316 (4), 1.38 (5), 1.42 (6), 1.52 (7) и 1.544 (8) мкм. Образец #10-700.

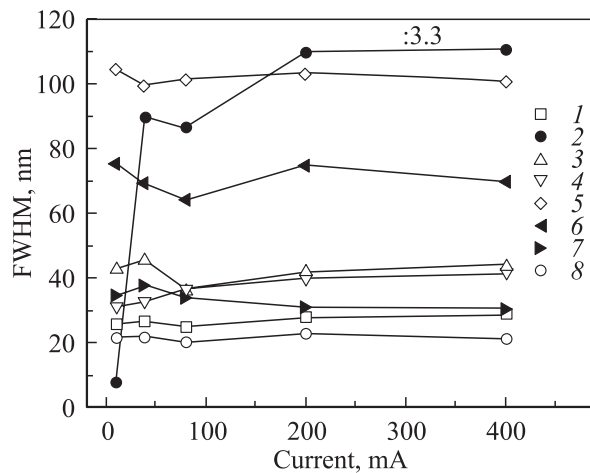


Рис. 5. Зависимость от тока ширины гауссовых линий 1.22 (1), 1.244 (2), 1.26 (3), 1.316 (4), 1.38 (5), 1.52 (6), 1.544 (7) и 1.42 (8) мкм. Образец #10-700.

1.38, 1.42, 1.52 и 1.544 мкм. Пример такого разложения спектра дислокационной ЭЛ для образца #10-700 при токе 400 мА показан на рис. 3. На рис. 4 и 5 приведены зависимости от тока интегральной интенсивности ЭЛ (A) и ширины (FWHM) для каждой линии в светодиоде #10-700. Интегральная интенсивность рассчитывалась как произведение интенсивности в максимуме кривой на ширину.

Аналогичные закономерности наблюдаются для светодиода на основе *p*-*FZ*-Si, отожженного при более высокой температуре (#10-1100): с ростом тока происходит несимметричное уширение линий $D1$ и $D2$, а трансформацию спектров ЭЛ в зависимости от тока можно описать 8 гауссовыми кривыми, положения

максимумов которых не зависят от тока и совпадают с приведенными выше для светодиода #10-700. Важно отметить, что, за исключением линий 1.22 и 1.26 мкм, все другие указанные линии наблюдались в спектрах ФЛ деформируемых образцов в работе [5]. Положения максимумов пиков совпадали в пределах экспериментальной погрешности, несмотря на существенные отличия в технологии приготовления образцов, условиях возбуждения люминесценции и температуры измерения ФЛ. Для получения полного набора люминесцентных линий авторам [5] пришлось приготовить несколько образцов в различных экспериментальных условиях, тогда как в каждом нашем светодиоде на основе *FZ*-Si наблюдаются все линии.

Полученные данные по токовым зависимостям интегральной интенсивности и ширины линий в исследуемых в настоящей работе светодиодах #10 на основе *p*-*FZ*-Si можно сравнить с исследованным нами в [8] *n*-*FZ*-Si-светодиодом. В нем доминировала линия 1.38 мкм с FWHM \approx (40–90) нм, второй по интенсивности была линия 1.52 мкм с FWHM \approx (65–85) нм. Отметим еще две линии: 1.42 мкм с FWHM \approx (30–50) нм и 1.542 мкм с FWHM \approx 20 нм. В светодиоде #10-700 на основе *p*-*FZ*-Si также доминирует линия 1.38 мкм с практически тем же значением ширины (см. рис. 4 и 5). Однако при больших токах второй по интенсивности уже является линия 1.42 мкм с существенно увеличенной шириной (FWHM \approx 365 нм). Значения ширины линий 1.52 и 1.544 мкм практически совпадают в светодиодах на основе как *n*-, так и *p*-*FZ*-Si. В светодиоде #10-1100 на основе *p*-*FZ*-Si также доминирует линия 1.38 мкм с практически тем же значением ширины (соответствующие рисунки для этого образца не приводятся). Второй по интенсивности при больших токах является линия 1.544 мкм, но с существенно большим значением ширины (FWHM \approx 118 нм). Две упомянутые линии 1.52 и 1.42 мкм характеризуются практически неизменными по сравнению с *n*-*FZ*-Si-светодиодом значениями ширины. Обнаруженный эффект увеличения ширины линий 1.42 и 1.544 мкм, по-видимому, обусловлен различиями в спектрах структурных дефектов и электрически активных центров, образовавшихся в светодиодах в результате взаимодействия ростовых, имплантационных и деформационных дефектов и примесных атомов, содержащихся в исходном кремнии и проникающих в него в процессе термообработок. Существенное влияние также может оказывать изменение зарядового состояния имеющихся центров. В спектрах ЭЛ светодиодов на основе *p*-*Cz*-Si, отожженных при обеих использованных температурах и подвергнутых деформации, доминируют пики $D3$ и $D4$ на фоне широкой полосы ЭЛ (см. рис. 1), результаты разложения которой на пики неоднозначны. Образование широкой полосы, по-видимому, связано с атомами кислорода, присутствующими в *Cz*-Si в высокой концентрации. Ранее эффект появления уширенных дислокационных линий в *Cz*-Si с высокой концентрацией кислорода наблюдался в спектрах ФЛ в [5,10].

4. Заключение

Исследованы спектры дислокационной ЭЛ в светодиодах, изготовленных методом ионной имплантации из *FZ-Si* и *Cz-Si* *p*-типа проводимости и деформированных методом четырехточечного изгиба. Выявлено влияние на интенсивность дислокационной ЭЛ способа выращивания кремния, температуры постимплантационного отжига и тока через светодиод. Для светодиодов на основе *FZ-Si* при низких токах доминируют связанные с образованием дислокаций хорошо известные линии *D1–D4*. При увеличении тока происходит уширение линий *D1* и *D2*.

Изменение спектров ЭЛ в зависимости от тока хорошо описывается 8 гауссовыми линиями, положение которых не зависит от тока. Исследованы зависимости интегральной интенсивности ЭЛ и ширины линий от тока.

Работа частично поддержана INTAS (грант № 01-0194), РФФИ (грант № 04-02-16935) и программой ОФН РАН „Новые материалы и структуры“.

Список литературы

- [1] L. Pavesi. *J. Phys.: Condens. Matter*, **15**, R1169 (2003).
- [2] V.V. Kveder, E.A. Steinman, S.A. Shevchenko, H.G. Grimmeiss. *Phys. Rev. B*, **51**, 10 520 (1995).
- [3] E.O. Sveinbjornsson, J. Weber. *Appl. Phys. Lett.*, **69**, 2686 (1996).
- [4] V. Kveder, V. Badylevich, E. Steinman, A. Izotov, M. Zeibt, W. Schreter. *Appl. Phys. Lett.*, **84**, 2106 (2004).
- [5] S. Pizzini, E. Leonti, S. Binetti, M. Acciarri, A. Le Donne, B. Pichaud. *Sol. St. Phenomena*, **95/96**, 273 (2004).
- [6] 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).
- [7] А.М. Емельянов, Е.И. Шек. *ФТТ*, **46**, 1751 (2004).
- [8] N.A. Sobolev, A.M. Emel'yanov, E.I. Shek, O.V. Feklisova, E.B. Yakimov, T.V. Kotereva. *Phys. Status Solidi C* (2005) (в печати).
- [9] N.A. Sobolev, A.M. Emel'yanov, E.I. Shek, V.I. Vdovin. *Physica B*, **340–342**, 1031 (2003).
- [10] M. Acciarri, S. Binetti, O.V. Feklisova, E.A. Steinman, E.B. Yakimov. *Sol. St. Phenomena*, **95/96**, 453 (2004).

Редактор Л.В. Шаронова

Electroluminescence properties of deformed light-emitting diodes based on *p*-Si

N.A. Sobolev, A.M. Emel'yanov, E.I. Shek, O.V. Feklisova*, E.B. Yakimov*

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

* The Institute of Microelectronics Technology
and High Purity Materials,
Russian Academy of Sciences,
142432 Chernogolovka, Russia

Abstract Electroluminescence in the wavelength range of 1.0–1.65 μm at currents up to 400 mA has been studied in light-emitting diodes after a four-point bending at 700°C. Light-emitting diodes were fabricated by the implantation of B and P ions into Si substrates of the *p*-type conductivity, grown by the float-zone (*FZ-Si*) and Czochralski (*Cz-Si*) techniques with subsequent annealing in argon at 700 and 1100°C. An intensity of dislocation-related electroluminescence is higher in *FZ-Si* samples as compared to *Cz-Si* ones. A low temperature postimplantation annealing shows an increase in a dislocation-related electroluminescence intensity as compared to that after a high temperature annealing. The transformation of electroluminescence spectra as a function of the current is satisfactorily described by the 8 Gaussian lines in the light-emitting diodes based on *FZ-Si*. Positions of the line maxima are current independent and equal to 1.22, 1.244, 1.26, 1.316, 1.38, 1.42, 1.52 and 1.544 μm . The current dependencies of the electroluminescence line integrated intensity and the full width at the half maximum of the lines have been studied.