

Фотолюминесценция в кремнии, имплантированном ионами эрбия при повышенной температуре

© Н.А. Соболев[¶], А.Е. Калядин, И.Е. Шек, В.И. Сахаров, И.Т. Серенков, В.И. Вдовин*,
Е.О. Паршин⁺, М.И. Маковийчук⁺

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

* Научно-исследовательский институт физики им. В.А. Фока Санкт-Петербургского университета,
198504 Санкт-Петербург, Россия

⁺ Ярославский филиал Физико-технологического института Российской академии наук,
150007 Ярославль, Россия

(Получена 30 декабря 2010 г. Принята к печати 14 января 2011 г.)

Исследованы спектры фотолюминесценции в кремнии *n*-типа проводимости после имплантации ионов эрбия при 600°C и ионов кислорода при комнатной температуре и последующих отжигов при 1100°C в хлорсодержащей атмосфере. В зависимости от длительности отжигов в спектрах фотолюминесценции при 80 К доминируют линии люминесценции ионов Er^{3+} или дислокационной люминесценции. Обнаруженный при этой температуре коротковолновый сдвиг линии дислокационной люминесценции обусловлен проведением имплантации ионов эрбия при повышенной температуре. При комнатной температуре в спектрах наблюдаются линии эрбиевой и дислокационной люминесценции, но доминируют линии красовой люминесценции.

Разработка светодиодов на основе монокристаллического кремния с использованием излучения ионов Er^{3+} на длине волны $\lambda \approx 1.54 \mu\text{м}$ [1] или так называемой дислокационной люминесценции ($\sim 1.6 \mu\text{м}$ при 300 К) [2] представляет значительный интерес для развивающейся кремниевой оптоэлектроники. Материалы для приборов с излучением обоих типов могут быть получены с помощью метода ионной имплантации. Максимальные интенсивности люминесценции ионов эрбия и дислокационной люминесценции были достигнуты после совместной имплантации ионов эрбия и кислорода при комнатной температуре и последующих отжигов при температурах, соответственно, 900 и 1100°C [3,4]. При этом было обнаружено, что атмосфера отжига при 1100°C кардинально влияет на дефектную структуру образцов и спектры люминесценции: при отжиге в инертной атмосфере, позволяющей снизить степень пересыщения кремния собственными межузельными атомами, протяженные структурные дефекты не образуются, а в спектрах наблюдаются только линии излучения ионов Er^{3+} , тогда как при отжиге в окислительной атмосфере, приводящей к повышению степени пересыщения кремния собственными межузельными атомами, образуются протяженные дефекты и появляются линии дислокационной люминесценции [5]. Хорошо известно, что изменение условий имплантации, например, температуры подложки, может приводить к значительным изменениям структурных, электрофизических и люминесцентных свойств образцов [6]. В работе исследованы особенности спектров фотолюминесценции (ФЛ), обусловленные имплантацией ионов Er в подложки кремния, предварительно нагретые до высоких температур.

Ионы эрбия с энергиями 2.0 и 1.6 МэВ и дозой $1 \cdot 10^{14} \text{см}^{-2}$ (превышающими порог аморфизации кремния при комнатной температуре) имплантировались при 600°C в пластины *n*-Cz-Si(100) с удельным сопротивлением 0.5 Ом·см. Дополнительная имплантация ионов кислорода (0.29 и 0.23 МэВ и $1 \cdot 10^{15} \text{см}^{-2}$) осуществлялась при комнатной температуре. Последующие изотермические отжиги проводили при 1100°C в течение 0.5, 1 и 1.5 ч в хлорсодержащей атмосфере, представляющей собой поток кислорода, содержащий 1 мол% четыреххлористого углерода. Структурные свойства имплантированных слоев исследовались с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ, микроскоп JEM 200CX) и обратного рассеяния протонов с энергией 230 кэВ (полупроводниковый детектор с энергетическим разрешением $\sim 3.5 \text{кэВ}$ регистрировал протоны, рассеянные на угол 170°). ФЛ возбуждалась твердотельным лазером на длине волны 532 нм (диаметр луча $\sim 2 \text{мм}$ и интенсивность $\sim 0.1 \text{Вт}$) и регистрировалась при 80 и 300 К с помощью автоматизированного монохроматора МДР-25 и InGaAs-фотоприемника.

Методом обычной ПЭМ на поперечных срезах имплантированных образцов наблюдался слой с высокой плотностью микродефектов, расплавающийся на глубине от 500 до 900 нм от поверхности пластины. На картинах дифракции прошедших электронов от имплантированного слоя наблюдаются четкие рефлексы от кремниевой матрицы, что указывает на отсутствие аморфизации и преципитации в этом слое. Микродефекты имели точечный контраст, не позволяющий идентифицировать их природу. На электронно-микроскопических изображениях высокого разрешения наблюдался контраст, типичный для {311}-дефектов, размеры которых не превышали 100 нм [7].

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

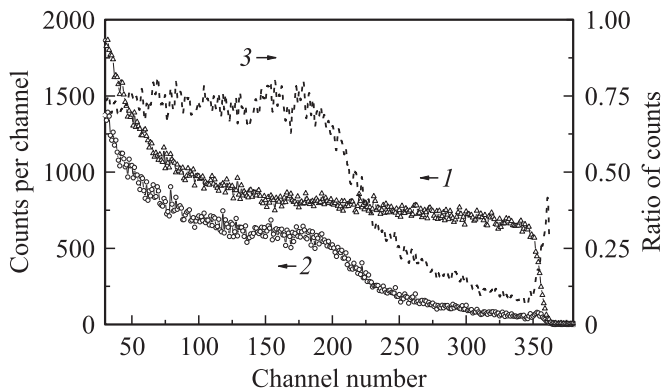


Рис. 1. Спектры MEIS, измеренные в случайном режиме (1) и режиме каналирования (2), а также отношение амплитуд сигналов MEIS в режимах каналирования и случайном (3) для образца после имплантации ионов эрбия и кислорода.

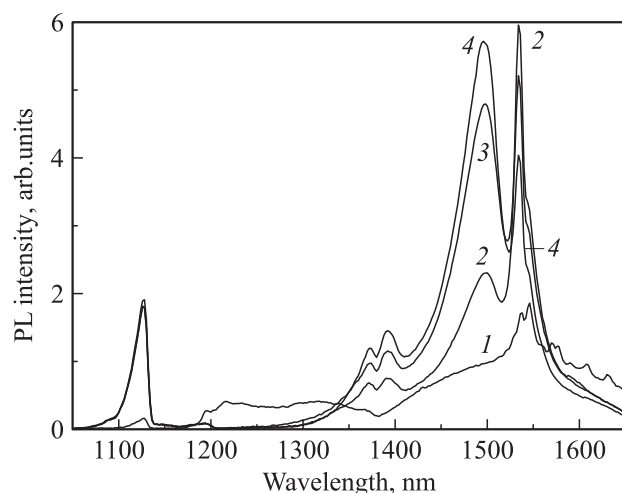


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции при 80 К образцов после имплантации ионов эрбия и кислорода (1) и отожженных при 1100°С в течение 0.5 (2), 1 (3) и 1.5 ч (4).

Спектры рассеяния ионов средних энергий (MEIS) в образце после дополнительной имплантации ионов кислорода при комнатной температуре, измеренные в случайном режиме и режиме каналирования, приведены на рис. 1 (кривые 1 и 2 соответственно). Анализ спектров показывает, что аморфизации имплантированного слоя не произошло: уровень имплантированных нарушений, характеризующийся отношением интенсивностей, измеренных в режиме каналирования и случайном режиме (кривая 3), существенно меньше единицы. Расчет профиля концентрации введенных дефектов (в предположении, что точечные дефекты вносят определяющий вклад в увеличение интенсивности, измеренной в режиме каналирования) показал, что максимум радиационных дефектов находится на глубине 400–550 нм.

Спектры ФЛ образцов при 80 К приведены на рис. 2. Спектры не были скорректированы с учетом спектральной характеристики фотоприемника и оптическо-

го тракта, в частности появление минимума в области 1.38 мкм обусловлено поглощением на парах воды. После имплантации в спектрах ФЛ доминируют две линии с длинами волн 1.537 и 1.546 мкм, принадлежащие содержащим ионы Er^{3+} центрам. Ранее сформированные эрбийсодержащих центров в процессе имплантации ионов Er при повышенной (300°С) температуре не было обнаружено [8]. Также наблюдается широкая полоса 1.19–1.53 мкм, обусловленная дефектами, и слабая краевая люминесценция (свободных экситонов) с максимумом при ~1.13 мкм. В зависимости от длительности отжига в спектрах ФЛ при 80 К доминируют линии с длиной волны в максимуме 1.535 и 1.500 мкм. Положение первой линии и ее полуширина (~10 нм) свидетельствуют, что она принадлежит центру, сформированному с участием ионов Er^{3+} [9]. Уменьшение интенсивности этой линии с увеличением времени отжига, по-видимому, связано с частичным отжигом эрбийсодержащего центра в условиях пересыщения кремния собственными межузельными атомами [10]. Анализ спектров ФЛ позволяет предположить, что линия 1.50 мкм принадлежит центру, сформированному с участием дефектов. Ранее нами наблюдалось образование так называемой линии дислокационной люминесценции D1 при имплантации ионов эрбия в кремний при комнатной температуре с неаморфизирующими дозами и последующими отжигами при 1100°С в хлорсодержащей атмосфере [5]. Максимум этой линии наблюдался при 1.54 мкм, а ее интенсивность возрастала с временем отжига, как и в случае рассматриваемой линии 1.50 мкм. Согласно существующим представлениям, положение D1 линии сильно зависит как от технологических методов и условий изготовления образцов, определяющих морфологию дефектной структуры и примесное окружение дислокаций, так и от режимов измерения люминесценции (в частности, температуры измерения и уровня возбуждения) и может изменяться в диапазоне 1.45–1.65 мкм [11,12]. Например, увеличение концентрации кислорода в однооснодеформированных образцах приводило к смещению максимума линии на 25 нм в коротковолновую область спектра [11]. Поэтому можно ожидать, что повышение температуры подложки при имплантации ионов Er не приводит к изменению природы центров, формирующихся с участием протяженных дефектов, но вызывает смещение максимума данной линии. Полуширина экспериментально регистрируемой нами линии (≥ 35 нм) также соответствует значениям, характерным для линий дислокационной люминесценции для образцов, изготовленных разными методами [4,11].

При комнатной температуре в спектрах ФЛ отожженных образцов (рис. 3) доминируют линии краевой люминесценции, а также хорошо видны линии с максимумами при 1.535 и 1.6 мкм. Термостабильность положения линии 1.535 мкм при увеличении температуры от 80 до 300 К указывает на ее принадлежность центру, содержащему ионы Er^{3+} [9]. Положение максимума линии с длиной волны 1.6 мкм практически

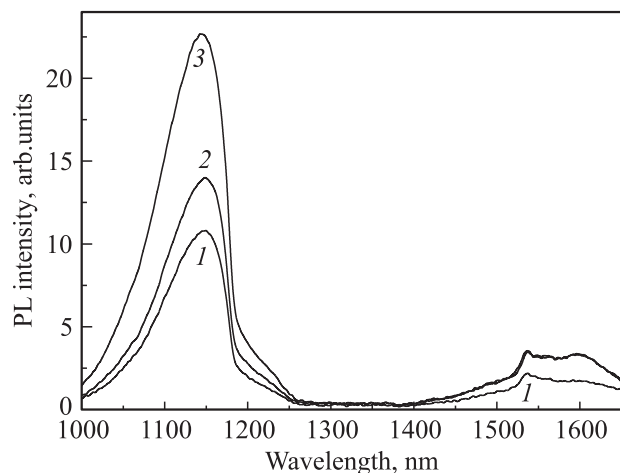


Рис. 3. Спектры фотолюминесценции при 300 К образцов, отожженных при 1100°C в течение 0.5 (1), 1 (2) и 1.5 ч (3).

совпадает с положением пиков люминесценции в светодиодах, изготовленных методами одноосной деформации [12], лазерной перекристаллизации [13] и имплантации ионов Er и O при комнатной температуре [4], и позволяет считать, что она принадлежит центру дислокационной люминесценции. Проведение имплантации ионов Er при повышенной температуре по сравнению с имплантацией при комнатной температуре [4] сопровождается рядом особенностей в спектрах люминесценции образцов. Во-первых, повышение температуры имплантации вызывает образование более термостабильных Er-содержащих центров, которые „выживают“ при 300 К, и интенсивность соответствующих им линий соизмерима с интенсивностью линий дислокационной люминесценции. Во-вторых, при 300 К интенсивность краевой люминесценции лишь в ~ 7 раз превышает интенсивность люминесценции в области ~ 1.6 мкм, тогда как при „холодной“ имплантации это отношение достигало ~ 250 раз.

Таким образом, высокотемпературный отжиг в окислительной атмосфере кремния, имплантированного последовательно ионами Er при 600°C и ионами O при комнатной температуре, сопровождается образованием люминесцентных центров, связанных с ионами Er^{3+} и протяженными структурными дефектами. Увеличение температуры имплантации ионов Er вызывает характерные особенности в спектрах ФЛ по сравнению со спектрами образцов, имплантированных при комнатной температуре. В частности, в спектрах люминесценции при 80 К изменяется положение линии, обусловленной центрами, сформированными с участием протяженных дефектов, а содержащий ионы Er^{3+} центр „выживает“ при комнатной температуре.

Авторы благодарят Н.Д. Захарова за проведение изменений методом ПЭМ высокого разрешения.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 10-02-01010).

Список литературы

- [1] A.J. Kenyon. *Semicond. Sci. Technol.*, **20**, R65 (2005).
- [2] Н.А. Соболев. *ФТП*, **44**, 3 (2010).
- [3] S. Coffa, G. Franzo, F. Priolo. *MRS Bulletin*, **23**, 25 (1998).
- [4] Н.А. Соболев, А.М. Емельянов, В.В. Забродский, Н.В. Забродская, В.Л. Суханов, Е.И. Шек. *ФТП*, **41**, 635 (2007).
- [5] 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).
- [6] E. Rimini. *Ion Implantation: Basics to Device Fabrication* (Kluwer Academic Publishers, Boston, 1995).
- [7] S. Takeda. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **30**, L639 (1991).
- [8] F. Priolo, S. Coffa, G. Franzo, C. Spinella, A. Camera, B. Bellany. *J. Appl. Phys.*, **74**, 4936 (1993).
- [9] J. Michel, J.L. Benton, R.F. Ferrante, D.C. Jacobson, D.J. Eaglesham, E.A. Fitzgerald, Y.-H. Xie, J.M. Poate, L.C. Kimerling. *J. Appl. Phys.*, **70**, 2672 (1991).
- [10] Н.А. Соболев, М.С. Бреслер, О.Б. Гусев, М.И. Миковичук, Е.О. Паршин, Е.И. Шек. *ФТП*, **28**, 1995 (1994).
- [11] Э.А. Штейнман. *ФТТ*, **47**, 9 (2005).
- [12] V. Kveder, M. Badylevich, W. Schröter, M. Seibt, E. Steinman, A. Izotov. *Phys. Status Solidi A*, **202**, 901 (2005).
- [13] E.O. Sveinbjornsson, J. Weber. *Appl. Phys. Lett.*, **69**, 2686 (1996).

Редактор Л.В. Беляков

Photoluminescence in silicon implanted by erbium ions at high temperature

N.A. Sobolev, A.E. Kalyadin, E.I. Shek, V.I. Sakharov, I.T. Serenkov, V.I. Vdovin*, E.O. Parshin⁺, M.I. Makoviichuk⁺

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

* Fok Institute of Physics,
St. Petersburg State University,
198504 St. Petersburg, Russia

⁺ The Yaroslavl Branch of Institute
of Physics and Technology,
Russian Academy of Sciences,
150007 Yaroslavl, Russia

Abstract Photoluminescence has been studied in *n*-Si implanted by erbium ions at 600°C and oxygen ions at room temperature and annealed at 1100°C in a chlorine containing atmosphere. In dependence on an annealing duration, a luminescence line of Er^{3+} ions or a dislocation-related luminescence line dominate in the photoluminescence spectra at 80 K. Observed at this temperature, a short-wave shift of the dislocation-related luminescence line is due to the performance of erbium ion implantation at a high temperature. At room temperature, the erbium- and dislocation-related luminescence lines are observed in the spectra but the near-band-edge lines dominate.