

Исследование безызлучательной рекомбинации в кремниевых светодиодах с краевой люминесценцией методом наведенного тока (EBIC)

© Е.Б. Якимов, Н.А. Соболев*[†]

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

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

(Получена 8 февраля 2010 г. Принята к печати 16 февраля 2010 г.)

Кремниевые светодиодные структуры с краевой люминесценцией исследованы методом наведенного тока. Структуры были изготовлены методом ионной имплантации и отличались температурой заключительной стадии постимплантационного отжига (950 и 1000°C). Увеличение температуры отжига сопровождается увеличением диффузионной длины неосновных носителей заряда в области светодиода, где и имеет место краевая люминесценция, от 1–2 до 25–35 мкм и уменьшением неоднородности распределения центров безызлучательной рекомбинации в этой области в латеральном направлении, параллельном плоскости p – n -перехода, что и приводит к наблюдавшемуся существенному росту интенсивности краевой люминесценции.

В настоящее время проводятся интенсивные исследования, направленные на разработку светодиодных структур на основе кремния с люминесценцией в области 1.1–1.6 мкм для развивающейся кремниевой оптоэлектроники [1,2]. Светодиоды с краевой люминесценцией представляют значительный интерес, поскольку в них достигнута рекордная внешняя квантовая эффективность электролюминесценции при комнатной температуре $\sim 1\%$ [3]. Основные усилия при исследовании таких структур были направлены на изучение излучательной рекомбинации, в то время как исследованию безызлучательной рекомбинации уделялось недостаточно внимания [3–7]. Недавно в нашей работе [8] было обнаружено, что в светодиодах, изготовленных по имплантационной технологии, интенсивность краевой люминесценции сильно зависит от температуры постимплантационного отжига. Было высказано предположение, что этот эффект обусловлен формированием электрически активных центров безызлучательной рекомбинации. Для их исследования хорошо подходит метод наведенного электронным пучком тока (electron beam induced current, EBIC) [9,10]. В настоящей работе с помощью этого метода изучено влияние температуры постимплантационного отжига на безызлучательную рекомбинацию в изготовленных методом ионной имплантации кремниевых светодиодах с краевой люминесценцией.

Исследуемые в данной работе образцы были изготовлены по разработанной для изготовления светодиодных структур технологии, которая была описана в работе [8] и заключается в следующем. На первом этапе проводилась имплантация ионов эрбия с энергиями 2.0, 1.6 МэВ, дозами $3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ и кислорода с энергиями 0.28, 0.22 МэВ, дозами $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ в (111)-ориентированные полированные пластины кремния n -типа проводимости с удельным сопротивлением

5 Ом·см, выращенного по методу Чохральского. Далее ионы бора (40 кэВ, $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$) и фосфора (80 кэВ, $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$) имплантировались в лицевую и обратную стороны пластины соответственно для создания сильно легированных p^+ - и n^+ -слоев. Постимплантационный отжиг проводился в две стадии. На первой стадии во время отжига при 620°C в течение 1 ч происходила перекристаллизация аморфизованного при имплантации ионов эрбия слоя. Во время второго отжига при 950 или 1000°C в течение 0.5 ч формировались оптически и электрически активные центры. При проведении исследований методом EBIC использовались прижимные контакты к сильно легированным слоям кремния. В работе [8] из аналогичных структур были изготовлены мезодиоды с рабочей площадью $\sim 4 \text{ мм}^2$ с применением обычной технологии, включающей фотолитографию, напыление металлических контактов и формирование краевого контура светодиодов. Исследование инжекционной люминесценции в таких структурах при плотности прямого тока $\sim 10 \text{ А/см}^2$ и температуре 80 К показало, что при увеличении температуры второго отжига от 950 до 1000°C интенсивность краевой люминесценции возрастает на несколько порядков [8]. Измерения наведенного электронным пучком тока проводились на сканирующем электронном микроскопе JSM-840 (JEOL) при комнатной температуре и энергии электронного пучка, изменяющейся в диапазоне 8–37 кэВ.

Для получения изображений в режиме наведенного тока в латеральном направлении, параллельном плоскости p – n -перехода, электронный пучок с разной энергией проходил через сильно легированный p^+ -слой в n -область, в которой имеет место краевая люминесценция. Два типичных изображения в режиме наведенного тока при энергии электронного пучка 15 кэВ, что соответствует глубине его проникновения $\sim 2 \text{ мкм}$, показаны на рис. 1 для образцов, отожженных при 950 и 1000°C.

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

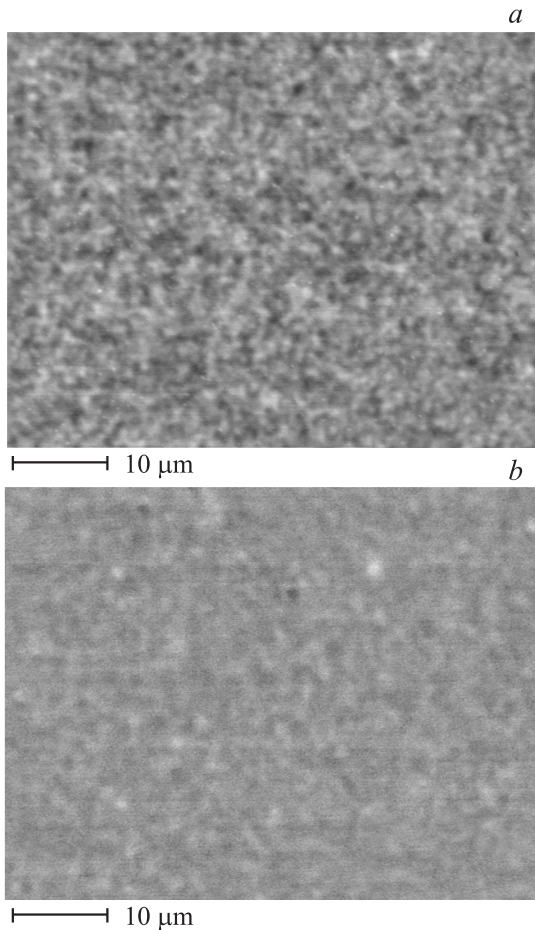


Рис. 1. Изображения отожженных при температурах 950 (а) и 1000°C (b) образцов в режиме наведенного тока при энергии электронного пучка 15 кэВ.

Средний сигнал на образце, отожженном при 1000°C, примерно в 4 раза выше, чем после отжига при 950°C, что указывает на существенное различие в скорости безызлучательной рекомбинации в этих образцах. Более того, хорошо видно, что повышение температуры отжига приводит к более однородному распределению центров безызлучательной рекомбинации по площади. Так, относительное изменение сигнала на изображении в режиме наведенного тока для образца, отожженного при 950°C, достигает 15%, в то время как для образца, отожженного при 1000°C, это изменение составляет 5%. Таким образом, с повышением температуры отжига контраст (различие тока в светлых и темных областях по отношению к среднему току) уменьшился в 3 раза.

Измеренные зависимости эффективности собирания неравновесных носителей заряда β от энергии пучка для диодов, отожженных при двух температурах, приведены на рис. 2. Эффективность собирания β рассчитывалась, согласно [10], как $\beta = I_c E_i / I_b E_b \eta$, где I_c — измеряемый наведенный ток, E_i — средняя энергия, необходимая

для рождения электронно-дырочной пары (3.6 эВ для кремния), I_b — ток электронного пучка, E_b — энергия электронного пучка, η — доля энергии пучка, поглощенной образцом (~ 0.9 для Si). Линиями показаны результаты моделирования экспериментальных зависимостей. При моделировании использовались выражения, приведенные в работе [11] для нормальной геометрии. Эффективность, равная 1, соответствует бездефектному p - n -переходу. В образце, отожженном при 1000°C, n -область достаточно совершенна (диффузионная длина превышает 35 мкм — значение, которое еще можно определить таким методом), а в p -области рекомбинация существенна в обоих типах образцов, что скорее всего связано с высокой концентрацией легирующей примеси бора в этом слое. Поэтому при малых энергиях электронов часть носителей гибнет, а при больших энергиях пучка, когда значительная часть неравновесных носителей заряда рождается в n -области, эффективность их собирания приближается к 1. Экспериментальные данные хорошо аппроксимируются рассчитанной зависимостью со следующими параметрами: глубина p - n -перехода 750 нм, диффузионная длина неосновных носителей в n -области (если считать ее однородной) ≥ 35 мкм, диффузионная длина в p -области < 1 мкм (или скорость поверхностной рекомбинации велика), рекомбинацией в области пространственного заряда p - n -перехода можно пренебречь (практически все неравновесные носители заряда, достигающие в результате диффузии области объемного заряда p - n -перехода, дают вклад в измеряемый ток).

В p -области образца, отожженного при 950°C, как и для предыдущего образца, имеет место существенная рекомбинация носителей заряда, однако в этом случае скорость рекомбинации в n -области также достаточно велика. Поэтому после максимума эффективность собирания падает с энергией, что соответствует достаточно малой диффузионной длине в n -области вблизи p - n -перехода. Экспериментальные зависимости достаточно

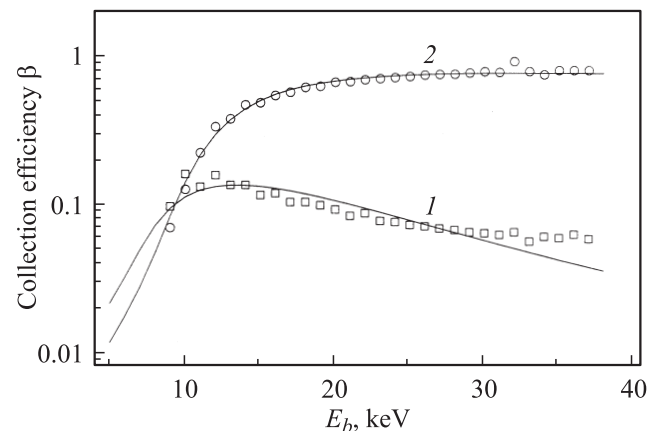


Рис. 2. Зависимости эффективности собирания неравновесных носителей заряда от энергии электронного пучка для диодов, отожженных при температурах 950 (1) и 1000°C (2).

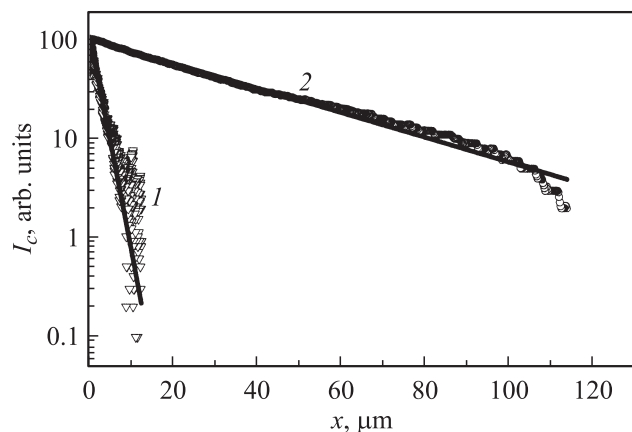


Рис. 3. Измеренные на сколах образцов профили спада наведенного тока для диодов, отожженных при температурах 950 (1) и 1000°C (2), в зависимости от расстояния x до p - n -перехода.

хорошо аппроксимируются кривой, рассчитанной со следующими параметрами: глубина p - n -перехода 450 нм, диффузионная длина в n -области ~ 1 мкм, диффузионная длина в p -области < 1 мкм (или велика скорость поверхностной рекомбинации), примерно 75% от числа носителей заряда, продиффундировавших до области объемного заряда p - n -перехода, гибнет в ней (т.е. в области пространственного заряда очень много центров безызлучательной рекомбинации). При относительно больших энергиях пучка наблюдается расхождение между экспериментальной и рассчитанной зависимостями, по-видимому, из-за того, что в n -области диффузионная длина увеличивается с глубиной и ее нельзя считать однородной.

На рис. 3 приведены профили спада наведенного тока для образцов, отожженных при разных температурах, в зависимости от расстояния до p - n -перехода, измеренные на сколах образцов. Видно, что спад можно достаточно хорошо описать одной экспонентой с эффективной диффузионной длиной 35 и 2 мкм для образцов, отожженных при 1000 и 950°C соответственно. Полученные значения диффузионной длины в случае образца, отожженного при 950°C, несколько больше, чем при измерении зависимости эффективности собирания носителей заряда от энергии пучка, поскольку они определяются на большем расстоянии от p - n -перехода.

Полученные при анализе измерений методом ЕВИС результаты позволяют объяснить столь резкое увеличение интенсивности краевой люминесценции при увеличении температуры отжига светодиодов. По мере повышения температуры отжига происходит не только более эффективный отжиг центров безызлучательной рекомбинации, но также увеличивается глубина p - n -перехода, т.е. та часть n -области, в которой имеет место краевая люминесценция, отодвигается от нару-

шенного имплантацией слоя в глубь образца. При этом скорость безызлучательной рекомбинации в этой области существенно снижается и возрастает латеральная однородность распределения центров безызлучательной рекомбинации. Для выяснения природы центров, вызывающих сигнал наведенного тока, необходимо проведение дополнительных исследований.

Таким образом, проведенные исследования показали, что обнаруженное ранее увеличение интенсивности краевой люминесценции в изготовленных методом ионной имплантации кремниевых светодиодных структурах при увеличении температуры постимплантационного отжига обусловлено уменьшением скорости безызлучательной рекомбинации неравновесных носителей заряда в излучающей области. В частности, диффузионная длина неосновных носителей в n -области, где и формируется краевая люминесценция, с ростом температуры отжига от 950 до 1000°C увеличивается от 1–2 до 25–35 мкм. При этом уменьшается и неоднородность латерального распределения центров безызлучательной рекомбинации в n -области.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 07-02-01462).

Список литературы

- [1] L. Pavesi. *J. Phys.: Condens. Matter*, **15**, R1169 (2003).
- [2] A.J. Kenyon. *Sem. Sci. Technol.*, **20**, R65 (2005).
- [3] M.A. Green, J. Zhao, A. Wang, P.J. Reece, M. Gal. *Nature*, **412**, 805 (2001).
- [4] Wai Lek Ng, M.A. Lourenco, R.M. Gwilliam, S. Ledain, G. Shao, K.P. Homemood. *Nature*, **410**, 192 (2001).
- [5] Th. Dittrich, V.Yu. Timoshenko, J. Rappich, L. Tsybeskov. *J. Appl. Phys.*, **90**, 2310 (2001).
- [6] А.М. Емельянов, Н.А. Соболев, Е.И. Шек. *ФТТ*, **46**, 44 (2004).
- [7] N.A. Sobolev. In: *Advances in Light Emitting Materials*, ed. by H.G. Grimmeiss, B. Monemar, and M. Kittler (Trans. Tech., Switzerland, 2008) [*Mater. Sci. Forum*, **590**, 79 (2008)].
- [8] Н.А. Соболев, А.М. Емельянов, Ю.А. Николаев. *ФТП*, **35**, 1224 (2001).
- [9] H.J. Leamy. *J. Appl. Phys.*, **53**, R51 (1982).
- [10] Е.Б. Якимов. *Изв. РАН. Сер. физ.*, **56** (3), 31 (1992).
- [11] Е.Б. Якимов. *Завод. лаб.*, **68** (1), 63 (2002).

Редактор Л.В. Шаронова

EBIC investigation of nonradiative recombination in Si-based diodes with near-band-edge luminescence

*E.B. Yakimov, N.A. Sobolev**

Institute of Microelectronics Technology,
142432 Chernogolovka, Russia

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

Abstract Si-based light-emitting diode structures with near-band-edge luminescence have been investigated by the EBIC method. The structures were fabricated by the ion implantation technique and differed by a temperature of the last postimplantation annealing stage (950 and 1000°C). The annealing temperature increase is followed by the increase of the minority carrier diffusion length from 1–2 to 25–35 μm in the light-emitting diode area, in which near-band-edge luminescence occurs, and by decrease of nonuniformity of a nonradiative recombination center distribution in the same area in the lateral direction parallel to the $p-n$ -junction plane, as a result, leading to the observed essential enhancement of the near-band-edge luminescence intensity.