

# Влияние дозы имплантации ионов эрбия на характеристики (111) Si:Er:O-светодиодных структур, работающих в режиме пробоя $p-n$ -перехода

© Н.А. Соболев<sup>¶</sup>, А.М. Емельянов, Ю.А. Николаев

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

(Получена 29 февраля 2000 г. Принята к печати 1 марта 2000 г.)

Исследованы характеристики Si:Er:O-светодиодных структур, изготовленных методом ионной имплантации на (111)-ориентированных монокристаллических подложках кремния и работающих в режимах как лавинного, так и туннельного пробоя  $p-n$ -перехода. Интенсивность электролюминесценции ионов  $\text{Er}^{3+}$  немонотонно зависит от концентрации введенных ионов редкоземельного элемента. В некоторых туннельных диодах обнаружен эффект возгорания интенсивности электролюминесценции ионов  $\text{Er}^{3+}$  при увеличении температуры.

## Введение

Интерес к монокристаллическому кремнию, легированному редкоземельным элементом эрбием, обусловлен перспективой его применения при изготовлении светоизлучающих структур в оптоэлектронике. Электролюминесценция (ЭЛ) на длине волны  $\lambda \sim 1.54$  мкм обусловлена переходами электронов с первого возбужденного состояния  ${}^4I_{13/2}$  в основное состояние  ${}^4I_{15/2}$  ионов  $\text{Er}^{3+}$ . Максимальная интенсивность ЭЛ при комнатной температуре достигается в монокристаллическом кремнии, легированном эрбием и кислородом, в режиме пробоя  $p-n$ -перехода. Обширные исследования свойств светодиодов были выполнены на Si:Er:O-образцах с ориентацией подложки (100) [1,2]. Нами недавно было показано, что интенсивная ЭЛ ионов  $\text{Er}^{3+}$  при комнатной температуре может быть получена на образцах с ориентацией (111) в режиме лавинного пробоя [3–5]. Цель настоящей работы заключалась в исследовании влияния дозы имплантации ионов эрбия в (111)-ориентированные подложки кремния на характеристики светодиодных структур.

## Экспериментальные условия

В качестве подложек использовались полированные пластины кремния  $n$ -типа проводимости с удельным сопротивлением 5 Ом·см, выращенного по методу Чохральского в направлении (111). Для создания оптически активного слоя проводилась совместная имплантация ионов эрбия с энергиями 2.0 и 1.6 МэВ и дозами  $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  (образец 3.1),  $3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  (образец 3.2),  $9 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  (образец 3.3) и кислорода (0.28 и 0.22 МэВ,  $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  (3.1),  $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  (3.2),  $9 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  (3.3)), которая сопровождалась аморфизацией проповерхностного слоя кремния. Используемые энергии обеспечивали совпадение проецированных пробегов ионов Er и O. Для формирования сильно легированных  $p^+$  и  $n^+$ -слоев

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 пластин соответственно. Все имплантации проводились при комнатной температуре. Отжиг образцов проводился в хлорсодержащей атмосфере в наиболее широко используемом температурно-временном режиме  $620^\circ\text{C}/1 \text{ ч}$  и  $900^\circ\text{C}/0.5 \text{ ч}$  [1–5]. Первая низкотемпературная стадия отжига сопровождалась перекристаллизацией аморфного слоя по механизму твердофазной эпитаксии. На втором этапе отжига происходило образование эрбийсодержащих оптически и электрически активных центров. Светодиоды с мезаподобным краевым контуром и рабочей площадью  $S = 2.3 \text{ мм}^2$  изготавливались с применением напыления титана и золота, фотолитографии и химического травления [5]. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) диодов измерялись на частоте 32 Гц с длительностью импульсов 0.5 мс. ЭЛ возбуждалась прямоугольными импульсами тока на частоте 30 Гц с длительностью импульсов 1–5 мс. Излучение диодных структур фокусировалось линзовой системой на входную щель монохроматора МДР-23, и на его выходе спектр ЭЛ регистрировался InGaAs неохлаждаемым диодом (с разрешением 7 нм в диапазоне  $\lambda = 1.0\text{--}1.65$  мкм).

## Экспериментальные результаты

Концентрационные профили примесей Er и В, измеренные методом вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС), приведены на рис. 1. В результате имплантации и отжига формировались слои  $n$ -типа проводимости с практически постоянной на расстоянии 0.5–0.8 мкм от поверхности образца и увеличивающейся с ростом дозы имплантации концентрацией атомов эрбия  $\sim 4 \cdot 10^{18}$ ,  $1 \cdot 10^{19}$  и  $4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . На концентрационных профилях эрбия в области 0.8–1.1 мкм от поверхности наблюдаются провалы. Их образование обусловлено изменением коэффициента сегрегации на движущейся в процессе твердофазной эпитаксиальной перекристаллизации границе аморфный слой–монокристалл [6].

<sup>¶</sup> E-mail: nick@sobolev.ioffe.rssi.ru

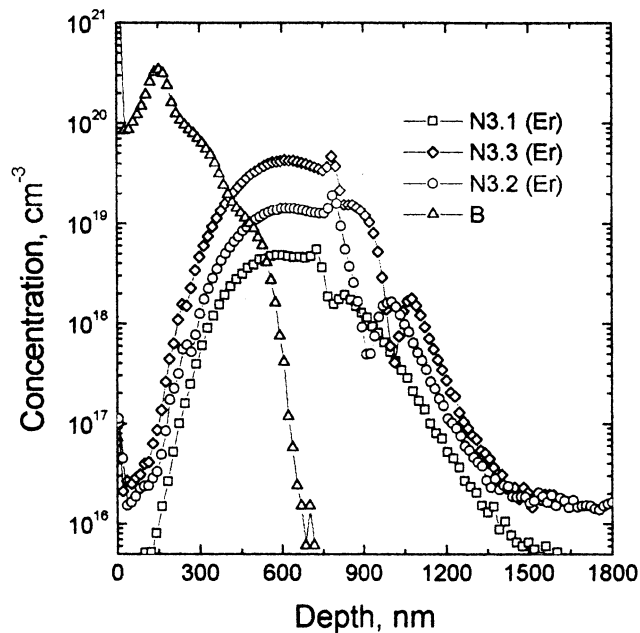


Рис. 1. Данные ВИМС. В — распределение бора, Er — распределение эрбия.

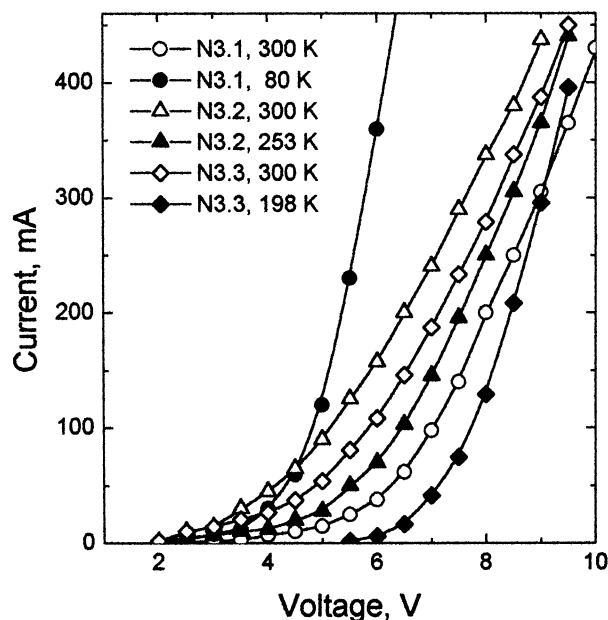


Рис. 2. Обратные ветви ВАХ диодов, измеренные при различных температурах.

Обратные ветви ВАХ для диодных структур с разными дозами при различных температурах показаны на рис. 2. Для образца с минимальной дозой имплантации величина экстраполированного напряжения пробоя при 300 К ( $\sim 6.2$  В) и его уменьшение при понижении температуры свидетельствуют, что имеет место лавинный пробой. Напротив, наблюдавшееся для обоих образцов с большими дозами увеличение экстраполированного напряжения

пробоя при понижении температуры характерно для туннельных диодов [7]. Интересно отметить, что увеличение концентрации введенных ионов Er и O в образце 3.3 по сравнению с образцом 3.2 сопровождается увеличением экстраполированного напряжения пробоя при комнатной температуре от  $\sim 4.2$  до  $\sim 5.2$  В.

Спектры ЭЛ диодов, измеренные при 300 К и обратном токе 300 мА, приведены на рис. 3. В спектрах помимо пика с максимумом при  $\lambda = 1.538$  мкм, связанного с излучательными переходами электронов между расщепленными в кристаллическом поле уровнями  $^4I_{13/2}$  и  $^4I_{15/2}$  ионов  $\text{Er}^{3+}$ , в области прозрачности кремния наблюдается относительно слабое и почти не зависящее от  $\lambda$  излучение, обусловленное переходами "горячих" электронов внутри зоны проводимости кремния (так называемая "горячая" ЭЛ) [8]. Для лавинных диодов 3.1 интенсивный рост ЭЛ ионов  $\text{Er}^{3+}$  и горячей ЭЛ начинается при значении обратного тока  $\leq 10$  мА. Для туннельных диодов 3.2 и 3.3 пороговые значения токов, при которых начинает значительно расти ЭЛ ионов эрбия ( $\sim 25$  мА в 3.2 и  $\sim 200$  мА в 3.3), были меньше пороговых значений токов, при которых начинается интенсивный рост горячей ЭЛ ( $\sim 75$  и  $\sim 500$  мА соответственно).

Зависимости интенсивности ЭЛ ионов эрбия на длине волны  $\lambda = 1.538$  мкм от плотности обратного тока  $j$  для исследованных диодов представлены на рис. 4. Максимальная интенсивность ЭЛ как при 300 К, так и при 80 К наблюдается в туннельных диодах типа 3.2. Однако плотность тока, при которой практически достигается насыщение зависимости интенсивности ЭЛ от плотности тока, как и в ранее исследованных туннельных диодах с (100) ориентацией Si [1], примерно на порядок величины больше, чем в лавинных диодах. Туннельные

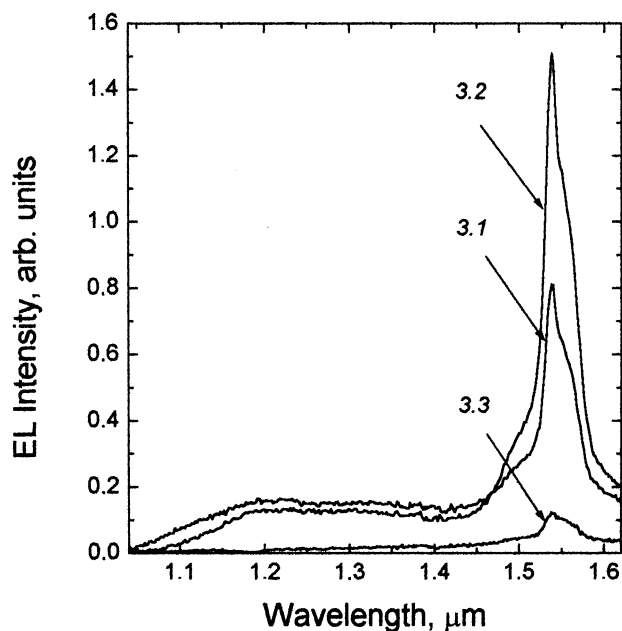


Рис. 3. Спектры ЭЛ исследованных образцов при  $j = 13 \text{ A/cm}^2$  и 300 К.

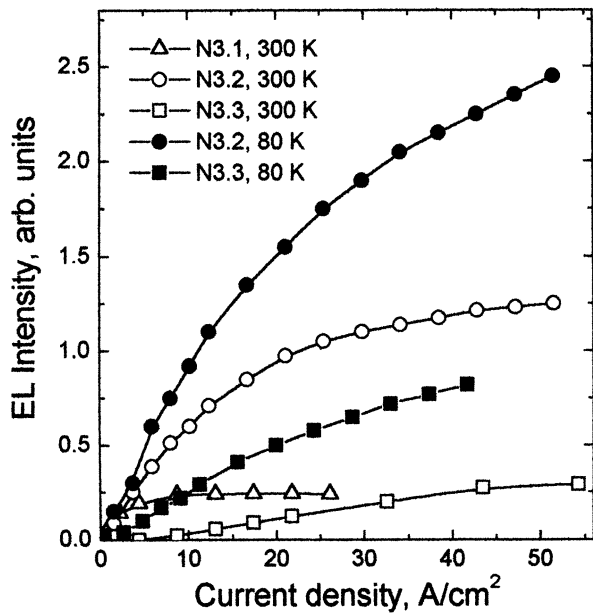


Рис. 4. Зависимости интенсивности ЭЛ ионов эрбия исследованных образцов от плотности обратного тока при 300 и 80 К.

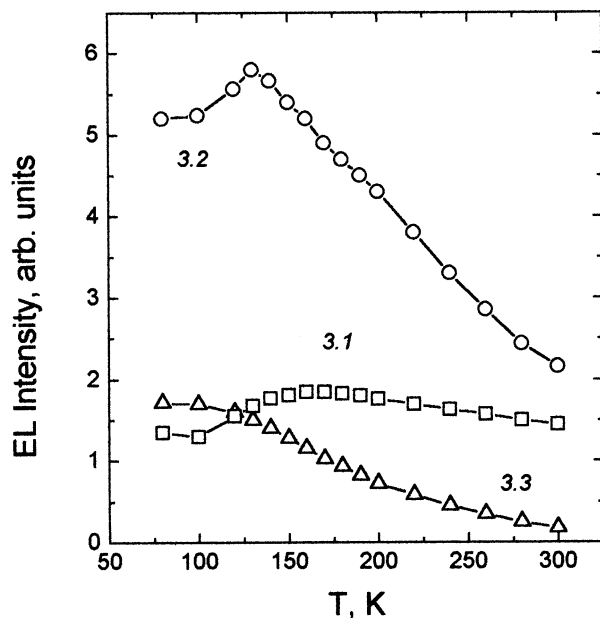


Рис. 5. Температурные зависимости интенсивности ЭЛ на  $\lambda = 1.538 \mu\text{m}$  для исследованных структур при токе 0.3 А (измерения выполнялись при нагреве образца.)

диоды типа 3.3, несмотря на большую концентрацию введенного эрбия, характеризуются меньшей интенсивностью излучения, чем диоды 3.2. Кроме того, пороговые токи начала ЭЛ ионов эрбия и горячей ЭЛ в этих диодах значительно выше, чем в 3.2. Для возбуждения ЭЛ ионов эрбия по ударному механизму в режиме туннельного пробоя нужны горячие носители заряда с энергией не менее чем  $\sim 0.8 \text{ эВ}$  [1]. Кроме того, согласно совре-

менным представлениям [8], интенсивная горячая ЭЛ в исследованной нами области  $\lambda$  обусловлена излучательными переходами электронов между второй  $\Delta_2$  и первой  $\Delta_1$  подзонами зоны проводимости. Поэтому большая величина порогового тока в диодах 3.3 может быть обусловлена недостаточным разогревом носителей заряда в электрическом поле  $p-n$ -перехода. Одной из возможных причин меньшей интенсивности ЭЛ в образце 3.3 по сравнению с 3.2 является большая дефектность легированного эрбием слоя кремния, приводящая, например, к неоднородному протеканию тока через  $p-n$ -переход или появлению дополнительных каналов безызлучательной рекомбинации.

Для исследованных в настоящей работе (111) Si:Er:O-туннельных светодиодов интенсивность ЭЛ на  $\lambda = 1.538 \mu\text{m}$  при 80 К существенно выше, чем при 300 К (рис. 4). Температурные зависимости интенсивности эрбиевой ЭЛ для исследованных диодов приведены на рис. 5. Для светодиодов типа 3.3 имеет место монотонное уменьшение интенсивности ЭЛ с ростом температуры. Такой (обычный) характер температурных зависимостей ранее наблюдался для (100) Si:Er:O-туннельных [9] и (100) Si:Er:O-лавинных [10] светодиодов. Для образцов 3.1 и 3.2 имеются участки немонотонного изменения (возгорания) интенсивности ЭЛ с ростом температуры. Для (111) Si:Er:O-лавинных диодов этот эффект был нами обнаружен ранее [3], и было показано, что он может быть связан с заполнением при низких температурах дырочных ловушек в активной области  $p-n$ -перехода, приводящим к изменению характеристик пробоя. По-видимому, с этой же причиной может быть связан и эффект возгорания ЭЛ, обнаруженный в данной работе в (111) Si:Er:O-туннельном диоде 3.2.

Целый ряд обнаруженных в настоящей работе особенностей в характеристиках (111) Si:Er:O-светодиодных структур при увеличении дозы имплантируемых ионов, по-видимому, обусловлен процессами образования структурных дефектов в процессе постимплантационных отжига. Как показали предварительные исследования методом просвечивающей электронной микроскопии [11], в рабочей области (111) Si:Er:O-лавинных светодиодных структур образуются два типа структурных дефектов — микродвойники и непрямолинейные дислокации с плотностью, превышающей  $10^{10} \text{ см}^{-2}$ . Можно ожидать, что увеличение дозы имплантации ионов Er и O сопровождается не только увеличением концентрации этих протяженных дефектов, но и их значительной трансформацией, вызывающей немонотонное изменение электрических и оптических свойств светодиодных структур.

### Заключение

Установлено, что при формировании на (111)-ориентированных подложках кремния Si:Er:O-светодиодных структур, работающих в режиме пробоя  $p-n$ -перехода, интенсивность эрбиевой ЭЛ немонотонно зависит от

концентрации введенных редкоземельных ионов. В некоторых туннельных диодах, как ранее в лавинных образцах, обнаружен эффект температурного возгорания интенсивности эрбиевой ЭЛ. Полученные экспериментальные результаты указывают на существенную роль структурных дефектов, образующихся в процессе твердофазной эпитаксиальной перекристаллизации аморфизованных при имплантации ионов эрбия слоев кремния на электрические и оптические свойства Si:Er:O-светодиодов.

Авторы благодарны Т.М. Мельниковой, Е.О. Паршину и А.В. Шестакову за помощь в изготовлении образцов.

Работа частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант 99-02-17750).

## Список литературы

- [1] S. Coffa, G. Franzo, F. Priolo. Appl. Phys. Lett., **69**, 2077 (1996).
- [2] S. Coffa, G. Franzo, F. Priolo, A. Pacelli, A. Lacita. Appl. Phys. Lett., **73**, 93 (1998).
- [3] A.M. Emel'yanov, N.A. Sobolev, A.N. Yakimenko. Appl. Phys. Lett., **72**, 1223 (1998).
- [4] N.A. Sobolev, A.M. Emel'yanov, S.V. Gastev, P.E. Khakuashev, Yu.A. Nikolaev, M.A. Trishenkov. MRS Symp. Proc., **486**, 139 (1998).
- [5] N.A. Sobolev, Yu.A. Nikolaev, A.M. Emel'yanov, K.F. Shtel'makh, P.E. Khakuashev, M.A. Trishenkov. J. Luminecs, **80**, 315 (1999).
- [6] О.В. Александров, Ю.А. Николаев, Н.А. Соболев. ФТП, **34**, 3 (2000).
- [7] С.Зи. *Физика полупроводниковых приборов*. [Пер с англ. под ред. Р.А. Сурица (М., Мир, 1984)].
- [8] J. Bude, N. Sano, A.Yoshii. Phys. Rev. B, **45**, 5848 (1992).
- [9] G. Franzo, F. Priolo, S. Coffa, A. Polman, A.Carnera. Appl. Phys. Lett., **64**, 2235 (1994)
- [10] N.A. Sobolev, A.M. Emel'yanov, K.F. Shtel'makh. Appl. Phys. Lett., **71**, 1930 (1997)
- [11] Н.А. Соболев, А.М. Емельянов, Ю.А. Николаев, В.И. Вдовин. ФТП, **33**, 660 (1999).

Редактор В.В. Чалдышев

## The influence of the erbium ion implantation dose on the characteristics of (111) Si:Er:O light emitting diodes working under regime of $p-n$ -junction breakdown

N.A. Sobolev, A.M. Emel'yanov, Yu.A. Nikolaev

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

**Abstract** The characteristics of Si:Er:O light emitting diodes fabricated by ion implantation on the (111)-oriented single crystal silicon substrates and working under regimes of avalanche or tunnel breakdown of  $p-n$ -junction have been studied. The  $\text{Er}^{3+}$  ion electroluminescence intensity depends nonmonotonically on the concentration of rare earth ions implanted. An effect of an increase in the intensity with temperature rise has been observed in some tunneling diodes.