

Влияние ориентации кремниевой подложки на свойства лавинных Si:Er:O-светоизлучающих структур

© Н.А. Соболев, А.М. Емельянов*, Ю.А. Николаев, В.И. Вдовин†

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

* Санкт-Петербургский государственный технический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия

† Институт химических проблем микроэлектроники,
109017 Москва, Россия

(Получена 28 декабря 1998 г. Принята к печати 29 декабря 1998 г.)

Рассмотрено влияние ориентации кремния на структурные и люминесцентные свойства лавинных светодиодов, изготовленных методом соимплантации эрбия и кислорода и последующей твердофазной эпитаксиальной кристаллизации аморфизованного слоя. Люминесцентные свойства обусловлены формированием различных структурных дефектов в процессе твердофазной эпитаксиальной кристаллизации: в (100) Si:Er:O-слоях образуются V-образные дислокации и преципитаты эрбия, а в (111) Si:Er:O-слоях наблюдаются более крупные структурные дефекты-двойники и увеличение концентрации дислокаций более чем на 4 порядка по сравнению с ориентацией (100). Проведено также сравнение люминесцентных свойств лавинных и туннельных светодиодов. В отличие от туннельных диодов в лавинных диодах эрбиевые ионы возбуждаются во всей области объемного заряда, а эффективное сечение возбуждения ионов Er^{3+} и время их жизни в возбужденном состоянии в 3–4 раза выше.

В основе функционирования Si:Er:O-светодиодов лежат излучательные переходы с первого возбужденного состояния ($^4I_{13/2}$) в основное состояние ($^4I_{15/2}$) во внутренней 4f-оболочке ионов Er^{3+} . При этих переходах возникает узкая линия люминесценции на длине волны ~ 1.54 мкм, положение которой в спектре практически не зависит от температуры. Технология Si:Er:O-светодиодов включает формирование электрически и оптически активного слоя кремния, легированного эрбием и кислородом. Электролюминесценция (ЭЛ) ионов Er^{3+} при комнатной температуре наблюдалась при подаче на Si:Er:O-диоды как прямого [1–5], так и обратного [3–12] напряжения. Максимальная интенсивность ЭЛ при комнатной температуре достигается обычно в режиме пробоя p - n -перехода, т.е. при подаче обратного напряжения [3–12]. В этом случае ЭЛ ионов эрбия наблюдалась как при туннельном [3–6], так и при лавинном [7–12] пробое. Цель настоящей работы заключается в исследовании влияния ориентации подложки кремния на свойства лавинных Si:Er:O-светодиодов и сравнении свойств лавинных и туннельных светодиодов.

Экспериментальные условия

В пластины Si n -типа проводимости с удельным сопротивлением 20 Ом·см, ориентации (100) и 5 Ом·см, ориентации (111) проводилась имплантация ионов эрбия с энергиями 2.0 и 1.6 МэВ и дозами $1 \cdot 10^{14}$ см $^{-2}$, а также кислорода (0.28 и 0.22 МэВ, $1 \cdot 10^{15}$ см $^{-2}$). Отжиг при 620°C/1 ч + 900°C/0.5 ч привел к перекристаллизации образовавшегося в результате имплантации аморфного слоя и созданию содержащих эрбий электрически и оптически активных центров. P - n -переходы формировались

в результате имплантации бора (40 кэВ и $5 \cdot 10^{15}$ см $^{-2}$) и послеимплантационного отжига (900°C/0.5 ч). Светодиоды с мезаподобным краевым контуром структуры имели рабочую площадь p - n -перехода $S = 5.5$ мм 2 . Исследовались спектры ЭЛ, времена нарастания и спада интенсивности эрбиевой ЭЛ при подаче на диод прямоугольных импульсов тока и температурная зависимость интенсивности Er^{3+} ЭЛ. Технология и методика измерения люминесцентных характеристик лавинных Si:Er:O-светодиодов были ранее подробно описаны нами в [7–12]. Структурные дефекты исследовались методом просвечивающей электронной микроскопии. Анализ работ по исследованию Si:Er:O-светодиодов структур, работающих в режиме туннельного пробоя [3–6], показывает, что принципиальное отличие от описанной выше технологии лавинных диодов заключается в более высоких дозах имплантации в туннельных диодах (не менее чем 10^{15} см $^{-2}$ для Er и 10^{16} см $^{-2}$ для O соответственно). Это приводило к большей концентрации донорных центров в оптически активном слое Si. Можно отметить также, что исследования туннельных диодов проводились только для ориентации Si (100). Характеристики туннельных диодов взяты из публикаций других исследователей.

Экспериментальные результаты и обсуждение

На рис. 1 представлен спектр ЭЛ лавинного Si:Er:O-светодиода для ориентации Si (111), измеренный при комнатной температуре и плотности обратного тока $j = 6.3$ А/см 2 в области длин волн $\lambda \sim 1.1$ – 1.65 мкм. В спектре ЭЛ помимо острого пика

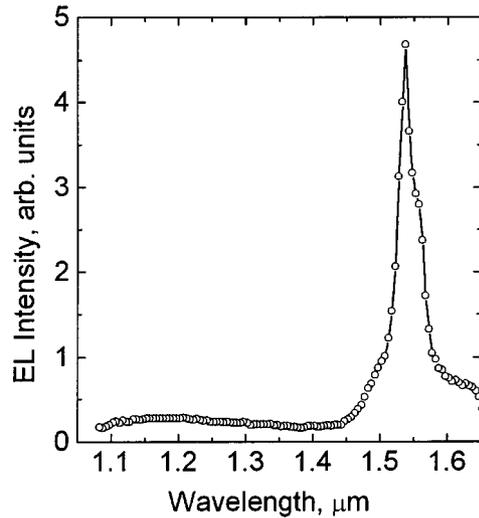


Рис. 1. Спектр ЭЛ лавинного Si:Er:O-диода, полученный при комнатной температуре и плотности обратного тока $j = 6.3 \text{ A/cm}^2$.

с максимумом при $\lambda = 1.538 \text{ мкм}$, обусловленного переходами электронов из возбужденного состояния $^4I_{13/2}$ в основное состояние $^4I_{15/2}$ ионов эрбия, наблюдается почти не зависящее от λ в области прозрачности кремния излучение, которое обычно связывают с переходами горячих электронов внутри зоны проводимости [13,14]. Ряд исследований, проведенных в последнее десятилетие [15–18], показывает, что это излучение в основном обусловлено прямыми переходами электронов между верхней и нижней подзонами зоны проводимости Si $\Delta_2 \rightarrow \Delta_1$. Принципиальных различий спектров для лавинных диодов с ориентацией Si (111) и (100), а также для туннельных диодов, описанных в литературе, не наблюдалось.

На рис. 2 приведены температурные зависимости интенсивности ЭЛ на $\lambda = 1.538 \text{ мкм}$ светодиодов для двух ориентаций подложки. Для (100) образцов наблюдается обычная зависимость, когда увеличение температуры измерения люминесценции сопровождается падением интенсивности ЭЛ (так называемое температурное гашение люминесценции). В случае (111) ориентации подложки наблюдается увеличение ("возгорание") интенсивности ЭЛ. В результате интенсивность ЭЛ при комнатной температуре выше, чем при температуре жидкого азота. Впервые этот эффект наблюдался нами в работе [8]. Более детальные исследования такой аномальной температурной зависимости эрбиевой ЭЛ показали, что этот эффект обусловлен появлением в области объемного заряда $p-n$ -перехода высокой концентрации дырочных ловушек в нижней половине запрещенной зоны кремния [9].

Проведенные нами исследования дефектности Si:Er:O-светодиодающих слоев для (111) и (100) ориентаций Si дали следующие результаты. В

Si:Er:O-образцах с ориентацией (100) были обнаружены V-образные (так называемые hairpin) дислокации с плотностью $\approx 10^6 \text{ см}^{-2}$ и преципитаты эрбия пластинообразной формы (с диаметром $\sim 20 \text{ нм}$ и толщиной $\sim 1 \text{ нм}$). В Si:Er:O-структурах с ориентацией (111) наблюдались дислокации с плотностью $> 10^{10} \text{ см}^{-2}$ и двойники неправильной формы с эффективными размерами 10–350 нм. Таким образом, в Si:Er:O-диодах с ориентацией (111) присутствуют более крупные структурные дефекты (двойники), а концентрация дислокаций выше на 4 порядка, чем в диодах с ориентацией (100). По-видимому, эти структурные дефекты и отвечают за появление аномальной температурной зависимости ЭЛ эрбия.

Отметим также, что, несмотря на значительно более высокую концентрацию дефектов, лавинные светодиоды с (111) ориентацией значительно превосходят диоды с ориентацией (100), прежде всего по однородности распределения излучения по площади $p-n$ -перехода [12]. Как следствие, люминесцентные параметры лавинных (111) Si:Er:O-светодиодающих диодов хорошо воспроизводятся, тогда как при (100) ориентации наблюдается значительный разброс люминесцентных параметров даже в пределах одной технологической партии диодов.

Важными характеристиками светоизлучающих структур являются эффективное сечение возбуждения люминесценции (σ) и время жизни возбужденного состояния (τ) светоизлучающих центров. Эти параметры определяются из зависимости времени нарастания интенсивности ЭЛ от амплитуды прямоугольного импульса обратного тока, прикладываемого к $p-n$ -переходу. Методика расчета σ и τ в Si:Er:O-светодиодах в предположении ударного механизма возбуждения ЭЛ эрбия описана в [5,6]. Использование этой методики применительно к туннельным Si:Er:O-диодам в режи-

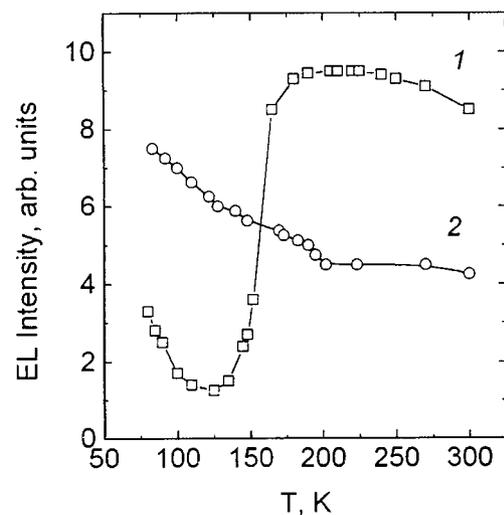


Рис. 2. Зависимости интенсивности ЭЛ лавинных Si:Er:O-диодов на $\lambda = 1.538 \text{ мкм}$ от температуры для (111) (1) и (100) (2) ориентаций Si ($j = 4.5 \text{ A/cm}^2$).

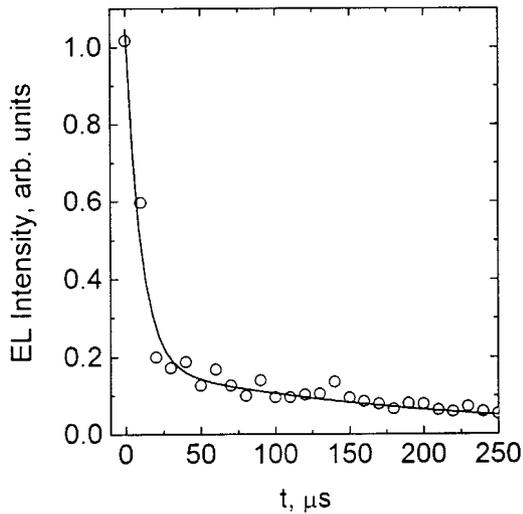


Рис. 3. Зависимость интенсивности ЭЛ на $\lambda \sim 1.54$ мкм от времени (t), прошедшего после переключения лавинного Si:Er:O-диода из режима обратного смещения с $j = 6.3$ А/см² в режим с $j = 0$.

ме пробоя при комнатной температуре дало значения $\sigma = 6 \cdot 10^{-17}$ см² и $\tau = 100$ мкс [5,6]. В наших лавинных Si:Er:O-диодах при (111) ориентации определенные аналогичным образом значения σ и τ составили соответственно $2.3 \cdot 10^{-16}$ см и 280–390 мкс [10,11]. Отметим, что величины σ и τ в лавинных диодах в 3–4 раза больше, чем в туннельных. Полученные значения произведения $\sigma\tau$ в лавинных Si:Er:O-диодах примерно на порядок превосходят значения $\sigma\tau$ в туннельных диодах. В результате этого насыщение интенсивности эрбиевой ЭЛ достигается при плотностях тока в лавинных диодах на порядок меньших, чем в туннельных [9–12].

Исследование кинетики спада эрбиевой ЭЛ после выключения обратного тока как в туннельных [5,19], так и в лавинных [12] Si:Er:O-светодиодах показало наличие постоянной времени спада менее 10 мкс, определяемой быстрым действием регистрирующей аппаратуры. Такие малые времена спада ЭЛ были объяснены следующей моделью [5,20]. Возбужденные в области объемного заряда p - n -перехода ионы Er³⁺ после выключения обратного тока оказываются в квазинейтральной области с высокой концентрацией свободных носителей заряда и быстро девозбуждаются за счет оже-рекомбинации с участием этих носителей. Оценки показывают, что в этом случае постоянная времени спада ЭЛ может составлять 10–100 нс [21].

Исследования кинетики спада ЭЛ в различных режимах привели авторов работы [19] к выводу о том, что в туннельных Si:Er:O-светодиодах возбуждаются только ионы эрбия, расположенные на краю области объемного заряда. Кинетика спада ЭЛ в исследованных нами лавинных Si:Er:O-диодах помимо быстрого компонента с $\tau < 10$ мкс (рис. 3) включает и медленный с $\tau \cong 300$ мкс (постоянная времени реакции регистриру-

ющего устройства составляла ~ 5 мкс). Это показывает, что в лавинных диодах возбуждаются ионы эрбия во всей области объемного заряда, включая область, непосредственно примыкающую к плоскости p - n -перехода.

Заключение

Таким образом, представленные результаты демонстрируют, что значительное влияние на ЭЛ характеристики лавинных Si:Er:O-светодиодов оказывает не только концентрация введенных электрически и оптически активных центров, но и ориентация кремния.

Работа выполнена при частичной поддержке INTAS–RFBR (грант 95-0531)

Список литературы

- [1] F.Y.G. Ren, J. Michel, Q. Sun-Paduan, B. Zheng, H. Kitagawa, D.S. Jacobson, J.M. Poate, L.C. Kimerling. MRS Symp. Proc. **301**, 87 (1993).
- [2] B. Zheng, J. Michel, F.Y.G. Ren, L.C. Kimerling, D.S. Jacobson, J.M. Poate. Appl. Phys. Lett., **64**, 2842 (1994).
- [3] G. Franzo, F. Priolo, S. Coffa, A. Polman, A. Carnera. Appl. Phys. Lett., **64**, 2235 (1994).
- [4] S. Coffa, F. Priolo, G. Franzo, A. Polman, S. Libertino, M. Saggio, A. Carnera. Nucl. Instrum. Meth., **B106**, 386 (1995).
- [5] G. Franzo, S. Coffa, F. Priolo, C. Spinella. J. Appl. Phys., **81**, 2784 (1997).
- [6] S. Coffa, G. Franzo, F. Priolo. Appl. Phys. Lett., **69**, 2077 (1996).
- [7] N.A. Sobolev, A.M. Emel'yanov, K.F. Shtel'makh. Appl. Phys. Lett., **71**, 1930 (1997).
- [8] N.A. Sobolev, A.M. Emel'yanov, Yu.A. Nikolaev, K.F. Shtel'makh, Yu.A. Kudryavtsev, V.I. Sakharov, I.T. Serenkov, M.I. Makovijchuk, E.O. Parshin. Mater. Sci. Forum, **258–263**, 1527 (1997) (19th Int. Conf. on Defects in Semicond., Aveiro, Portugal, July 21–25, 1997).
- [9] A.M. Emel'yanov, N.A. Sobolev, A.N. Yakimenko. Appl. Phys. Lett., **72**, 1223 (1998).
- [10] Н.А. Соболев, Ю.А. Николаев, А.М. Емельянов, К.Ф. Штельмах, А.Н. Якименко, М.И. Маковийчук, Е.О. Паршин. Матер. Всерос. совещ. "Наноструктуры на основе кремния и германия" (Н. Новгород, 10–13 марта 1998) с. 89.
- [11] N.A. Sobolev, Yu.A. Nikolaev, A.M. Emel'yanov, K.F. Shtel'makh, P.E. Khakuashev, M.A. Trishenkov. J. of Luminesc., **80**, 315 (1998).
- [12] 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).
- [13] A.G. Chynoweth, K.G. McKay. Phys. Rev., **102**, 369 (1956).
- [14] Л.А. Косяченко, Е.Ф. Кухто, В.М. Склярчук. ФТП, **18**, 426 (1984).
- [15] J. Bude, N. Sano, A. Yoshii. Phys. Rev. B, **45**, 5848 (1992).
- [16] L. Carbone, R. Brunetti, A. Lacaita, M. Fischetti. Semicond. Sci. Technol., **9**, 674 (1994).
- [17] T. Puritis, J. Kaupz. Proc. 21st Int. Conf. on Microelectronics (NIS, Yugoslavia, Sept. 14–17, 1997) v. 1, p. 161.

- [18] E. Cartier, J.C. Tsang, M.V. Fischetti, D.A. Buchanan. *Microelectron. Engin.*, **39**, 103 (1997).
- [19] S. Coffa, G. Franzo, F. Priolo, A. Pacelli, A. Lacaita. *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 93 (1998).
- [20] J. Palm, F. Gan, B. Zheng, J. Michel, L.C. Kimerling. *Phys. Rev. B*, **54**, 17 603 (1996).
- [21] F. Priolo, G. Franzo, S. Coffa, A. Carnera. *Phys. Rev. B*, **57**, 4443 (1998).

Редактор В.В. Чалдышев

Influence of the silicon wafer orientation on structural and luminescence properties of avalanche Si:Er:O light emitting structures

N.A. Sobolev, A.M. Emel'yanov*, Yu.A. Nikolaev, V.I. Vdovin†

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

* St.Petersburg State Technical University,
195251 St.Petersburg, Russia

† Institute for Chemical Problems of Microelectronics,
109017 Moscow, Russia

Abstract The influence of the silicon wafer orientation on structural and luminescent properties of avalanche light-emitting diodes, fabricated by coimplantation of erbium and oxygen and subsequent solid phase epitaxial (SPE) crystallization of amorphous layer have been considered. Distinctions in luminescent properties are the consequence of formation different structural defects in the process of SPE crystallization: in the (100) Si:Er:O layers are formed V-like dislocations and erbium precipitates, and in the (111) Si:Er:O layers are observed more pronounced structural defects such as twins alongside with the increase of dislocation density by more than 4 orders as compared with (100) orientation. A comparison of luminescent properties of the avalanche and tunnel light-emitting diodes has also been performed. Unlike tunnel diodes, in avalanche ones erbium ion excitation takes place in the whole space-charge layer and the effective excitation cross section of ions Er^{3+} and their lifetime in the excited state are 3–4 times higher.

Fax: (812) 2471017 (Sobolev)

E-mail: Nick@Sobolev.ioffe.rssi.ru