

## Влияние температуры отжига на электролюминесценцию ионов эрбия в Si:(Er,O)-диодах: диоды с ориентацией подложки (111)

© Н.А. Соболев, А.М. Емельянов, Ю.А. Николаев

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

(Получена 30 марта 2001 г. Принята к печати 3 апреля 2001 г.)

Исследовано влияние температуры второго, активирующего образование оптически и электрически активных центров, отжига Si:(Er,O)-диодов с ориентацией (111) на электролюминесценцию ионов эрбия на длине волны  $\lambda \approx 1.54$  мкм. Легирование осуществлялось имплантацией ионов эрбия с энергиями 2.0, 1.6 МэВ дозами  $3 \cdot 10^{14}$  см $^{-2}$ , а также ионов кислорода с энергиями 0.28, 0.22 МэВ дозами  $3 \cdot 10^{15}$  см $^{-2}$ . При комнатной температуре интенсивность электролюминесценции в режиме пробоя возрастает с ростом температуры отжига от 700 до 950°C. При температурах отжига 975–1100°C электролюминесценция эрбия в режиме пробоя не наблюдается из-за возникновения микроплазм. Интенсивность инжекционной электролюминесценции при 80 К убывает с ростом температуры отжига от 700 до 1100°C.

Большой интерес к исследованиям полупроводниковых структур, легированных редкоземельными элементами (РЗЭ), обусловлен перспективами их использования в оптоэлектронике. В диодах, изготовленных на основе монокристаллического кремния, наблюдалось излучение трехвалентных ионов эрбия (максимум на длине волны  $\lambda \approx 1.54$  мкм) [1–7] и гольмия (максимум на длине волны  $\lambda \approx 1.96$  мкм) [8,9]. Максимальная интенсивность излучения ионов РЗЭ при комнатной температуре обычно достигается при подаче на диод обратного напряжения туннельного или лавинного пробоя. Интенсивность инжекционной люминесценции существенно ниже. Это связывают с различиями в механизмах возбуждения и девозбуждения электролюминесценции (ЭЛ) в режиме прямого тока и в режиме пробоя [1]. Расчеты, однако, показывают, что и в режиме пробоя концентрация излучающих ионов РЗЭ обычно на несколько порядков меньше концентрации введенных имплантацией ионов РЗЭ. В результате интенсивность созданных к настоящему времени светоизлучающих Si:(Er,O)- и Si:(Ho,O)-диодов даже при практически однородной плотности тока по площади  $p$ - $n$ -переходов [3,5] недостаточна для их широкого использования. Вводимые при имплантации ионы РЗЭ в основном не являются оптически активными. Кроме того, имплантация ионов РЗЭ в больших дозах ( $D \gtrsim 10^{14}$  см $^{-2}$ ) приводит к аморфизации кремния. Для твердофазной перекристаллизации аморфизованного таким образом слоя кремния обычно используется послеимплантационный отжиг при температуре  $T_1 = 620^\circ\text{C}$ , а для оптической активации введенных примесей — отжиг при более высокой температуре  $T_2$ . Практически во всех предшествующих работах по исследованию Si:(Er,O)-диодов  $T_2$  составляла 900°C. Выбор этой температуры был обусловлен перенесением на технологию светоизлучающих диодов результатов зависимости интенсивности фотолюминесценции от температуры отжига [10–12].

Цель настоящей работы состояла в исследовании влияния температуры отжига  $T_2$  на интенсивность ЭЛ

Si:(Er,O)-диодов, изготовленных на основе кремния ориентации (111) при дозах введенных имплантацией ионов эрбия  $D = 3 \cdot 10^{14}$  см $^{-2}$ .

### Экспериментальные условия

Ионы эрбия с энергиями  $E = 2.0, 1.6$  МэВ дозами  $D = 3 \cdot 10^{14}$  см $^{-2}$  и кислорода с энергиями  $E = 0.28, 0.22$  МэВ дозами  $D = 3 \cdot 10^{15}$  см $^{-2}$  имплантировались в (111)-ориентированные и полированные пластины кремния  $n$ -типа проводимости с удельным сопротивлением 5 Ом·см, выращенного по методу Чохральского. Выбор дозы имплантации ионов эрбия  $3 \cdot 10^{14}$  см $^{-2}$  обусловлен тем, что при выбранной нами технологии и  $T_2 = 900^\circ\text{C}$  ранее была достигнута максимальная интенсивность ЭЛ ионов эрбия [6]. Ионы бора ( $E = 40$  кэВ,  $D = 5 \cdot 10^{15}$  см $^{-2}$ ) и фосфора ( $E = 80$  кэВ,  $D = 1 \cdot 10^{15}$  см $^{-2}$ ) имплантировались в лицевую и обратную стороны пластины соответственно для создания сильно легированных  $p^+$ - и  $n^+$ -слоев. Отжиг при  $T_1 = 620^\circ\text{C}$  (1 ч) приводил к перекристаллизации аморфизованного слоя Si:(Er,O). Для образования эрбийсодержащих оптически и электрически активных центров применялся второй изохронный отжиг (в течение 0.5 ч) при  $T_2 = 700$ – $1100^\circ\text{C}$ . Меза-диоды с рабочей площадью  $S = 4.0$ – $4.5$  мм $^2$  изготавливались по обычной технологии [2–7]. Более половины рабочей площади  $p^+$ -слоев было свободно от металлизации. В этой части структур можно было наблюдать ЭЛ в видимой области спектра. Для наблюдения видимого свечения диоды в темноте помещались в поле зрения микроскопа МБС-9. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) диодов измерялись на частоте 32 Гц при длительности импульсов 0.5 мс. ЭЛ возбуждалась прямоугольными импульсами тока на частоте 32 Гц при длительности импульсов 2 или 5 мс. При измерении излучение диодных структур фокусировалось линзовой системой на входную щель монохроматора МДР-23 и на его выходе регистрировалось неохлаждаемым InGaAs-диодом (с разрешени-

ем 7 нм в диапазоне длин волн  $\lambda = 1.0\text{--}1.65$  мкм). При исследованиях ЭЛ в видимой области спектра на диоды подавалось импульсное напряжение, по форме соответствующее выпрямленному однофазным мостом синусоидальному напряжению с частотой 50 Гц.

## Экспериментальные результаты и обсуждение

Спектры ЭЛ при температуре  $T = 300$  К для диодов, смещенных в обратном направлении, показаны на рис. 1. Зависимости типа 1 на рис. 1 наблюдались в диодах, отожженных при  $T_2 = 700\text{--}950^\circ\text{C}$ , а типа 2 — при  $T_2 = 975\text{--}1100^\circ\text{C}$ . Для первого типа спектров помимо относительно слабого и почти не зависящего от  $\lambda$  излучения, обусловленного переходами "горячих" электронов внутри зоны проводимости кремния, (так называемая "горячая" ЭЛ [2]) наблюдаются пики с максимумом при  $\lambda = 1.538$  мкм, обусловленные излучательными переходами электронов между расщепленными в кристаллическом поле уровнями  $^4I_{13/2}$  и  $^4I_{15/2}$  ионов  $\text{Er}^{3+}$ . Для второго типа спектров характерно наличие практически только горячей ЭЛ. Интенсивность ЭЛ ионов  $\text{Er}^{3+}$  в максимуме возрастает с ростом обратного тока, достигая при насыщении значения  $I_{\text{Er}}$ . Зависимость  $I_{\text{Er}}$  от температуры  $T_2$  представлена на рис. 2. В температурном интервале  $700 \leq T_2 \leq 950^\circ\text{C}$  интенсивность  $I_{\text{Er}}$  с ростом температуры отжига возрастает. При более высоких температурах ( $975 \leq T_2 \leq 1100^\circ\text{C}$ ) ЭЛ эрбия практически отсутствует.

На рис. 3 представлены измеренные при 300 К обратные ветви ВАХ для ряда исследованных диодов. Величина напряжения пробоя  $p$ - $n$ -перехода ( $V_{\text{th}}$ ) определялась путем экстраполяции близкого к линейному участка

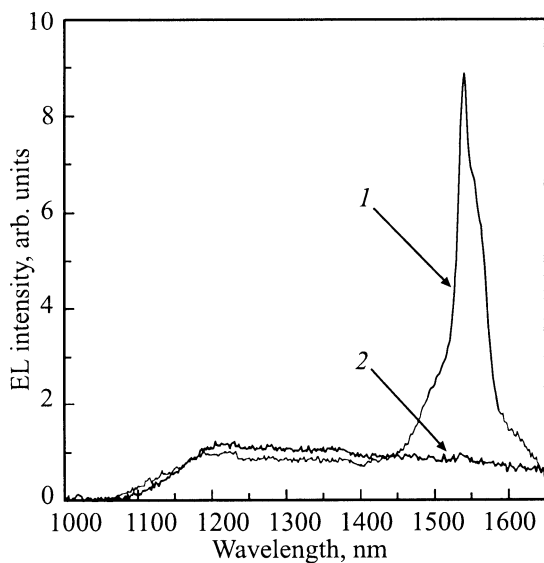


Рис. 1. Спектры электролюминесценции (EL) в режиме пробоя  $p$ - $n$ -структур, отожженных при  $T_2 = 950$  (1) и  $1000^\circ\text{C}$  (2).

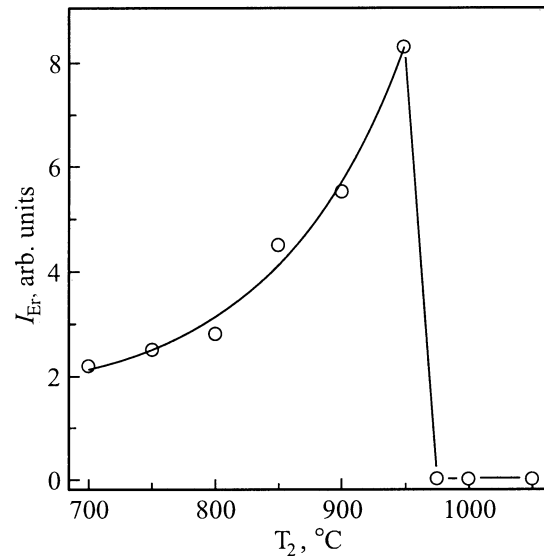


Рис. 2. Зависимость максимальной интенсивности электролюминесценции ионов  $\text{Er}^{3+}$  на длине волны  $\lambda = 1.538$  мкм в режиме пробоя от температуры второго отжига  $T_2$ .

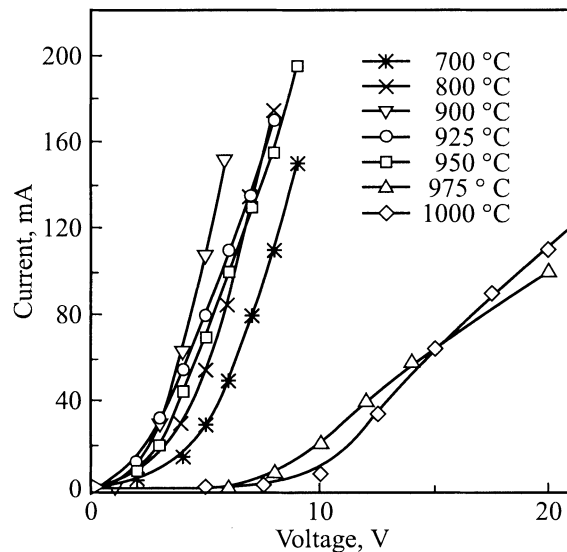
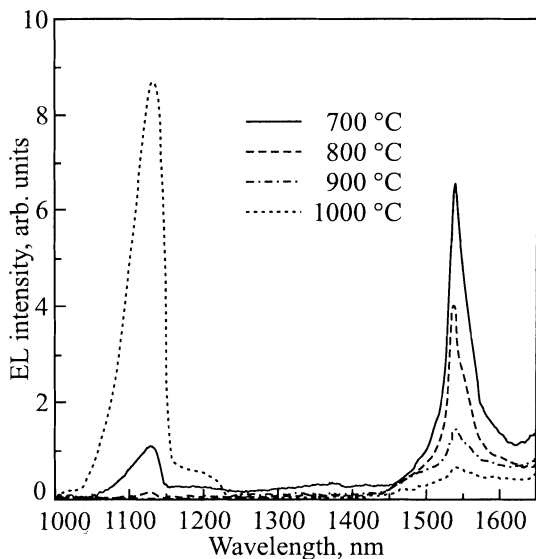
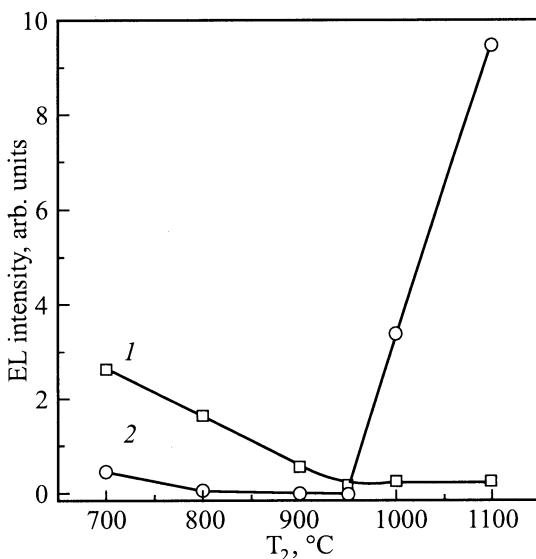


Рис. 3. Обратные ветви ВАХ диодных структур, различающихся температурой второго отжига  $T_2$ .

ВАХ при достаточно больших токах к нулевому току. С увеличением  $T_2$  значения  $V_{\text{th}}$  изменяются немонотонно: существенно уменьшаются при увеличении температуры отжига от  $700$  до  $900^\circ\text{C}$  и резко увеличиваются при  $T_2 \geq 975^\circ\text{C}$ . Наряду с увеличением  $V_{\text{th}}$  наблюдается значительное уменьшение наклона обратной ветви ВАХ, т.е. рост дифференциального сопротивления диода в режиме обратного смещения  $p$ - $n$ -перехода. Отметим, что на прямых ветвях ВАХ аналогичного увеличения дифференциального сопротивления при увеличении температуры отжига выше  $950^\circ\text{C}$  не наблюдается. В диодах, отожженных при  $T_2 \leq 950^\circ\text{C}$ , значение напряжения



**Рис. 4.** Спектры электролюминесценции (EL) образцов с различными температурами второго отжига  $T_2$  при плотности прямого тока  $\sim 10 \text{ A/cm}^2$  и температуре 80 К.



**Рис. 5.** Зависимости интенсивности электролюминесценции (EL) при 80 К и плотности прямого тока  $\sim 10 \text{ A/cm}^2$  от температуры второго отжига  $T_2$ : 1 —  $\lambda \approx 1.54 \text{ мкм}$ , 2 —  $\lambda \approx 1.13 \text{ мкм}$ .

пробоя не превышает 5 В, что характерно для туннельного механизма пробоя. При  $T_2 \geq 975^\circ\text{C}$  величина напряжения пробоя составляет не менее 7 В, т.е. соответствует области напряжений, присущих лавинному пробоя. В режиме пробоя и при плотностях тока до  $10 \text{ A/cm}^2$  мы не зарегистрировали визуально излучение в структурах, отожженных при  $T_2 \leq 950^\circ\text{C}$  и помещенных в темноте в поле зрения микроскопа. Если температура отжига  $T_2 \geq 975^\circ\text{C}$ , то при пробое в микроскоп наблюдается свечение отдельных микроплазм на незакрытой металлом части рабочей площади  $p-n$ -переходов. Таким

образом, практическое отсутствие сигнала ЭЛ ионов эрбия в диодах, отожженных при  $T_2 \geq 975^\circ\text{C}$ , по-видимому, связано с возникновением значительной неоднородности распределения обратного тока по площади  $p-n$ -перехода и, как следствие, значительным уменьшением количества оптически активных ионов, возбуждаемых в области объемного заряда  $p-n$ -перехода.

Во всех исследованных структурах в режиме прямого тока ЭЛ ионов эрбия при комнатной температуре не регистрируется по крайней мере при плотностях тока  $\sim 10 \text{ A/cm}^2$ . Спектры ЭЛ при  $T = 80 \text{ K}$  и плотности прямого тока  $\sim 10 \text{ A/cm}^2$  для ряда исследованных образцов с различными  $T_2$  представлены на рис. 4. В спектрах помимо пика эрбиевой ЭЛ с максимумом при  $\lambda \approx 1.54 \text{ мкм}$  наблюдается пик излучения экситонов с максимумом при  $\lambda \approx 1.13 \text{ мкм}$ , а также полоса излучения дефектов. Представленные на рис. 4 спектры измерены при токах, обеспечивающих максимальную интенсивность ЭЛ при  $\lambda \approx 1.54 \text{ мкм}$ . С ростом температуры отжига  $T_2$  интенсивность ЭЛ ионов эрбия уменьшается (см. рис. 4 и кривую 1 на рис. 5), и при  $T_2 = 1100^\circ\text{C}$  излучение  $\lambda \approx 1.54 \text{ мкм}$  обусловлено в основном ЭЛ дефектов. Зависимость  $I$  на рис. 5 качественно отличается от исследованных и опубликованных ранее [10–12] подобного рода зависимостей. Это различие обусловлено использованием в настоящей работе более высоких (аморфизирующих кремний) доз имплантации ионов эрбия и кислорода и кремниевых пластин с другой ориентацией, что приводит к другому спектру образующихся структурных дефектов и, возможно, электрически и оптически активных центров. Интенсивность экситонной линии при фиксированной плотности тока  $10 \text{ A/cm}^2$  изменяется в зависимости от  $T_2$  немонотонно (см. кривую 2 на рис. 5): убывает в диапазоне температур от 700 до  $950^\circ\text{C}$  и резко возрастает при  $T_2 > 950^\circ\text{C}$ . При  $T_2 > 950^\circ\text{C}$ , как отмечалось выше, наблюдались микроплазмы в режиме пробоя.

Согласно современным представлениям, для возбуждения как электролюминесценции при прямом токе, так и фотолюминесценции ионов эрбия в кремнии должны быть сформированы оптически и электрически активные центры, содержащие трехвалентные ионы  $\text{Er}^{3+}$  и имеющие в запрещенной зоне кремния уровни, способствующие передаче энергии от свободных носителей заряда ионам РЗЭ. В режиме пробоя  $p-n$ -перехода в легированной эрбием области объемного заряда образуются горячие носители, которые способны возбуждать ионы эрбия по ударному механизму. В этом случае возбуждение электронной подсистемы кристалла передается иону  $\text{Er}^{3+}$  непосредственно при столкновении горячего носителя с ионом РЗЭ. Соответственно различаются и механизмы девозбуждения ионов  $\text{Er}^{3+}$  в режимах прямого и обратного тока через диод. Различиями в механизмах возбуждения и девозбуждения ионов  $\text{Er}^{3+}$  и объясняется наблюдавшееся различие зависимостей интенсивности ЭЛ ионов эрбия от  $T_2$  в режиме прямого тока при 80 К и в режиме пробоя при 300 К.

## Заключение

Интенсивность ЭЛ ионов эрбия при 300 К в режиме пробоя  $p-n$ -перехода для использованных в работе режимов имплантации ионов эрбия, кислорода, фосфора и бора монотонно увеличивается при увеличении температуры второго отжига  $T_2$  от 700 до 950°C. При более высоких  $T_2$  (975–1100°C) ЭЛ ионов эрбия в режиме пробоя практически не наблюдается из-за возникновения микроплазм, вызывающих значительную неоднородность обратного тока по площади диода. Интенсивность ЭЛ ионов эрбия при 80 К в режиме прямого тока убывает с ростом температуры отжига  $T_2$ . Результаты работы показывают, что дальнейшее увеличение интенсивности ЭЛ ионов эрбия в Si:(Er,O)-диодах ориентации (111) при комнатной температуре может быть достигнуто при увеличении температуры отжига до  $T_2 \geq 975^\circ\text{C}$ , если удастся предотвратить возникновение микроплазм.

Авторы благодарят Е.О. Паршина и Р.В. Тараканову за помощь при изготовлении образцов.

Работа частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант 99-02-17750), INTAS (грант 99-01872) и РФФИ-Бюро научно-технического сотрудничества Австрии (грант 01-02-02000 БНТСа).

## Список литературы

- [1] G. Franzo, S. Coffa, F. Priolo, C. Spinella. *J. Appl. Phys.*, **81**, 2784 (1997).
- [2] N.A. Sobolev, A.M. Emel'yanov, K.F. Shtel'makh. *Appl. Phys. Lett.*, **71**, 1930 (1997).
- [3] 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).
- [4] A.M. Emel'yanov, N.A. Sobolev, A.N. Yakimenko. *Appl. Phys. Lett.*, **72**, 1223 (1998).
- [5] Н.А. Соболев, Ю.А. Николаев, А.М. Емельянов, К.Ф. Штельмах, А.Н. Якименко, М.А. Тришенков, П.Е. Хакуашев, М.И. Маковийчук, Е.О. Паршин. *Изв. РАН. Сер. физ.*, **63**, 388 (1999).
- [6] Н.А. Соболев, А.М. Емельянов, Ю.А. Николаев. *ФТП*, **34**, 1069 (2000).
- [7] А.М. Емельянов, Н.А. Соболев, М.А. Тришенков, П.Е. Хакуашев. *ФТП*, **34**, 965 (2000).
- [8] Н.А. Соболев, А.М. Емельянов, Ю.А. Николаев. *ФТП*, **33**, 931 (1999).
- [9] N.A. Sobolev, A.M. Emel'yanov, R.N. Kyutt, Yu.A. Nikolaev. *Sol. St. Phenomena*, **67–70**, 371 (1999).
- [10] J. Michel, J.I. 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).
- [11] Н.А. Соболев, М.С. Бреслер, О.Б. Гусев, И.М. Маковийчук, Е.О. Паршин, Е.И. Шек. *ФТП*, **28**, 1995 (1994).
- [12] N.A. Sobolev, O.V. Alexandrov, M.S. Bresler, O.B. Gusev, E.I. Shek, M.I. Makovijchuk, E.O. Parshin. *Mater. Sci. Forum*, **196–201**, 597 (1995).

Редактор Л.В. Шаронова

## Influence of annealing temperature on erbium ion electroluminescence in Si:(Er,O) diodes with (111) substrate orientation

N.A. Sobolev, A.M. Emelyanov, Yu.A. Nikolaev

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

**Abstract** A study has been made of the influence of temperature of the second annealing that promotes formation of optically and electrically active centers on the erbium ion electroluminescence at  $\lambda \cong 1.54 \mu\text{m}$  wavelength in (111) Si:(Er,O) diodes fabricated by implantation of erbium and oxygen ions at 2.0, 1.6 MeV and 0.28, 0.22 MeV energies and  $3 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  and  $3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  doses, respectively. The room temperature electroluminescence intensity under the breakdown regime increases with increasing annealing temperature from 700 to 950°C. After annealing in the range of 975–1100°C, erbium electroluminescence under the breakdown regime is not observed due to appearance of microplasmas. The injection electroluminescence intensity at 80 K decreases with increasing temperature from 700 to 1100°C.