

# Туннельные светодиоды на основе Si:(Er, O) с малыми временами нарастания электролюминесценции ионов Er<sup>3+</sup> в режиме пробоя

© А.М. Емельянов, Н.А. Соболев, М.А. Тришенков\*, П.Е. Хакушев\*

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

\* НПО "Орион",

111123 Москва, Россия

(Получена 9 февраля 2000 г. Принята к печати 14 февраля 2000 г.)

Изготовлены туннельные светодиоды на основе Si:(Er, O), в которых в режиме пробоя наблюдается минимальная из зарегистрированных постоянная времени нарастания интенсивности электролюминесценции ионов эрбия. Это обусловлено образованием Er-содержащих центров с эффективным сечением возбуждения ионов эрбия  $\sim 7 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$  и временем жизни возбужденного состояния  $\sim 17 \text{ мкс}$ . Впервые при комнатной температуре измерено время жизни в первом возбужденном состоянии ионов эрбия после выключения обратного тока, связанное с оже-передачей энергии свободным электронам в электронейтральной области диода.

## 1. Введение

Исследования легированных редкоземельными элементами полупроводниковых структур направлены на создание светоизлучающих приборов для оптоэлектроники и волоконно-оптических линий связи. К настоящему времени в монокристаллическом кремнии наблюдалась и исследована электролюминесценция (ЭЛ), связанная с редкоземельными элементами: в Si:Er на длине волны  $\lambda \approx 1.54 \text{ мкм}$ , обусловленная переходами электронов с первого возбужденного состояния  $^4I_{13/2}$  в основное состояние  $^4I_{15/2}$  ионов Er<sup>3+</sup> [1–4], и в Si:Ho на длине волны  $\lambda \approx 1.96 \text{ мкм}$ , связанная с переходами электронов с первого возбужденного состояния  $^5I_7$  в основное состояние  $^5I_8$  ионов Ho<sup>3+</sup> [5]. Наибольшая интенсивность ЭЛ в светодиодах при комнатной температуре обычно наблюдается при подаче обратного напряжения. Для практического использования легированных эрбием и гольмием диодов, работающих в режиме пробоя, необходимо решить две основные проблемы — повышение интенсивности ЭЛ и быстродействия. Повышение интенсивности может быть достигнуто за счет увеличения плотности способных возбудиться редкоземельных ионов.

Кинетика нарастания интенсивности ЭЛ редкоземельных ионов при протекании через светодиод тока плотностью  $j$  характеризуется постоянной времени  $\tau_{\text{он}}$ , которая может быть связана с эффективным сечением возбуждения ионов  $\sigma$  и временем их жизни в первом возбужденном состоянии  $\tau$  соотношением [2]

$$1/\tau_{\text{он}}(j) = \sigma j/q + 1/\tau, \quad (1)$$

где  $q$  — заряд электрона. В исследованных ранее светодиодах на основе Si:(Er, O), работающих в режиме туннельного пробоя,  $\sigma \approx 6 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2$  и  $\tau \approx 100 \text{ мкс}$  [2]. Интенсивность ЭЛ ионов эрбия в таких диодах практически насыщается при  $j \approx 200 \text{ А/см}^2$ . Из-за малых значений  $\sigma$  при такой плотности тока значения  $\tau_{\text{он}}$

относительно велики ( $\sim 12 \text{ мкс}$ ). При  $j = 50 \text{ А/см}^2$   $\tau_{\text{он}}$  еще больше ( $\sim 34 \text{ мкс}$ ). В Si:(Er, O)-светодиодах, работающих в режиме лавинного пробоя,  $\sigma \approx 2 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$  и  $\tau \approx 380 \text{ мкс}$  [4]. Образование Er-содержащих центров с большими значениями  $\sigma$  позволяет в этом случае при  $j = 50 \text{ А/см}^2$  достичь значений  $\tau_{\text{он}} \approx 15 \text{ мкс}$ .

В работах [1–3] было показано, что за счет оже-девозбуждения ионов эрбия с передачей энергии свободным носителям заряда в Si:(Er, O)-светодиодах при работе в режиме как прямого, так и обратного смещения могут быть получены весьма малые времена спада интенсивности ЭЛ ионов эрбия  $\tau_{\text{оф}}$ . Однако для диодов, работающих в режиме туннельного [2] или лавинного [6] пробоя, экспериментальные значения  $\tau_{\text{оф}}$  составляли  $\sim 10 \text{ мкс}$  и определялись быстродействием регистрирующей системы.

В настоящей работе описана технология и измерены при комнатной температуре характеристики работающих в режиме туннельного пробоя Si:(Er, O)-светодиодов, в которых наблюдались минимальные из зарегистрированных при фиксированных значениях плотности тока постоянные времени нарастания интенсивности ЭЛ ионов эрбия. Впервые измерена постоянная времени спада интенсивности ЭЛ при комнатной температуре, обусловленная передачей энергии от возбужденных ионов эрбия свободным электронам.

## 2. Экспериментальные условия

Импламентация ионов эрбия (с энергиями  $E = 2.0$  и  $1.6 \text{ МэВ}$  и дозами  $D = 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ) и ионов кислорода (с энергиями  $E = 0.28$  и  $0.22 \text{ МэВ}$  и дозами  $D = 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ) в полированные пластины кремния  $n$ -типа проводимости с удельным сопротивлением  $5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , выращенного по методу Чохральского в направлении  $\langle 111 \rangle$ , сопровождалась аморфизацией приповерхностного слоя. Ионы бора ( $E = 40 \text{ кэВ}$ ,  $D = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ) и фосфора ( $E = 80 \text{ кэВ}$ ,

$D = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ) имплантировались в лицевую и обратную стороны пластины соответственно для создания сильно легированных  $p^+$ - и  $n^+$ -слоев. Отжиг в режиме  $620^\circ\text{C}/1 \text{ ч} + 900^\circ\text{C}/0.5 \text{ ч}$  приводил к перекристаллизации аморфного слоя и образованию Er-содержащих оптически и электрически активных центров. По данным вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС) в результате имплантации и отжигов формировался легированный эрбием слой кремния, который имел практически постоянную концентрацию эрбия  $\sim 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  на расстоянии  $0.5\text{--}0.8 \text{ мкм}$  от поверхности полупроводника. Концентрация электрически активных центров определялась из вольт-фарядных измерений и составляла  $\sim 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . По данным ВИМС концентрация атомов бора в максимуме достигала  $\sim 3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . Мезадиоды с рабочей площадью  $S = 2.3 \text{ мм}^2$  изготавливались по обычной технологии [4]. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) диодов измерялись на частоте  $32 \text{ Гц}$  при длительности импульсов  $0.5 \text{ мс}$ . ЭЛ возбуждалась прямоугольными импульсами тока длительностью  $180 \text{ мкс--}5 \text{ мс}$  (с фронтами менее  $0.1 \text{ мкс}$ ) на частоте  $30 \text{ Гц}$ . При измерении спектров ЭЛ излучение диодных структур фокусировалось линзовой системой на входную щель монохроматора МДР-23 и на его выходе регистрировалось неохлаждаемым InGaAs-диодом (с разрешением  $7 \text{ нм}$  в диапазоне длин волн  $\lambda = 1.0\text{--}1.65 \text{ мкм}$ ). Для измерения кинетики нарастания и спада интенсивности ЭЛ использовался более быстродействующий, но менее чувствительный, чем при измерении спектральных характеристик, усилитель фототока диода. Для компенсации потери чувствительности в этом случае излучение направлялось на широкополосный фильтр, пропускающий на фотоприемник весь спектр излучения ионов эрбия, относящийся к переходам электронов с первого возбужденного состояния в основное. Время реакции светорегистрирующей системы  $\tau_{\text{resp}}$  на световой импульс с временами нарастания и спада интенсивности  $\tau_{\text{light}} \leq 0.1 \text{ мкс}$  в этом случае не превышало  $1.5 \text{ мкс}$ .

### 3. Экспериментальные результаты и обсуждение

Обратная ветвь ВАХ диодной структуры при разных температурах показана на рис. 1. Увеличение при понижении температуры напряжения пробоя, полученного экстраполяцией линейного участка ВАХ, характерно для туннельных диодов. Однако величина напряжения пробоя при  $300 \text{ К}$  ( $\sim 4.2 \text{ В}$ ) свидетельствует, что определенный вклад в формирование обратного тока могут вносить носители заряда, возникающие в результате лавинного умножения [7]. Спектры ЭЛ при  $300 \text{ К}$  для диодов в режиме обратного смещения при различных токах показаны на рис. 2. Помимо пика с максимумом при  $\lambda = 1.538 \text{ мкм}$ , обусловленного излучательными переходами электронов между расщепленными в кристаллическом поле уровнями  $^4I_{13/2}$  и  $^4I_{15/2}$  ионов  $\text{Er}^{3+}$ ,

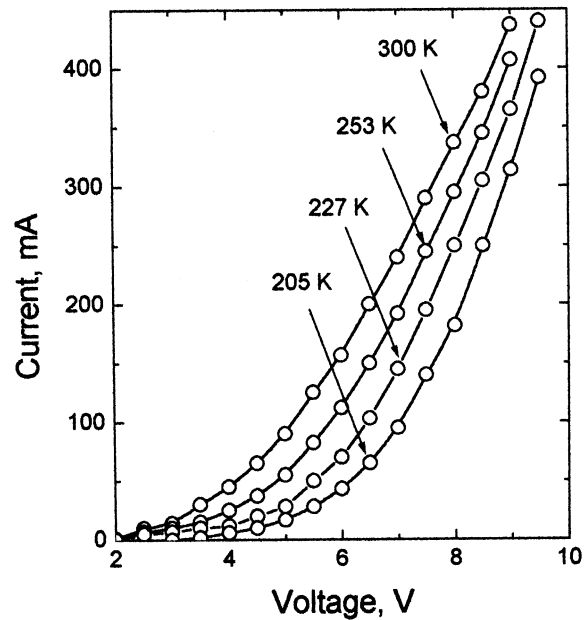


Рис. 1. Обратные ВАХ диода при различных температурах.

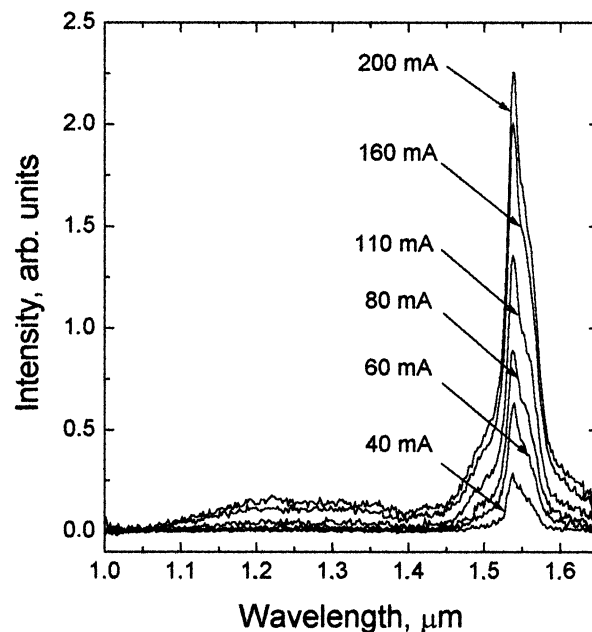


Рис. 2. Спектры электролюминесценции светодиода при различных обратных токах и  $300 \text{ К}$ .

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].

Зависимости интенсивности эрбиевой ЭЛ при  $\lambda = 1.538 \text{ мкм}$  и горячей ЭЛ при  $\lambda = 1.45 \text{ мкм}$  от обратного тока в диодной структуре при  $300 \text{ К}$  представлены на рис. 3. ЭЛ ионов эрбия возникает при

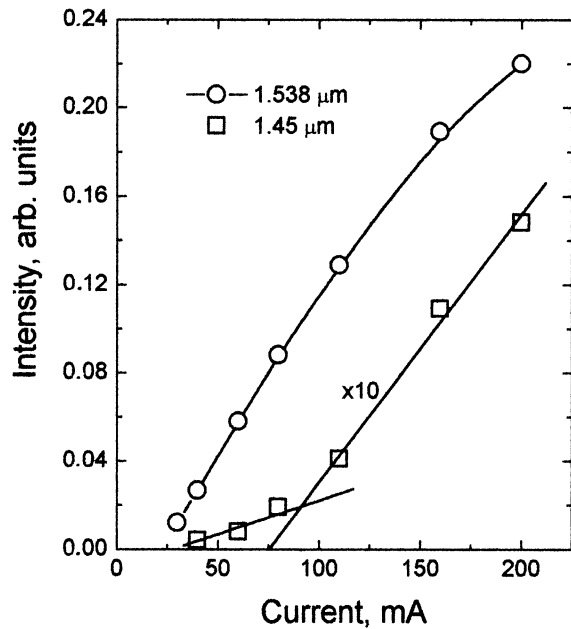


Рис. 3. Зависимости интенсивности электролюминесценции на длинах волн  $\lambda = 1.538$  и  $1.45$  мкм от обратного тока при 300 К.

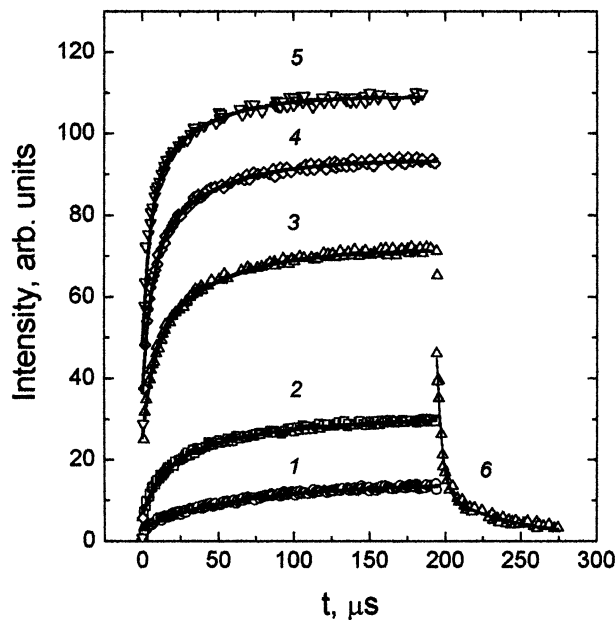


Рис. 4. Кинетика нарастания (1–5) и спада (6) электролюминесценции при различных обратных токах, А: 1 — 0.1; 2 — 0.2; 3, 6 — 0.4; 4 — 0.6; 5 — 0.8. Сплошные линии — аппроксимация экспериментальных данных формулой (5) для 1–5 и формулой (6) для 6.

токе  $\sim 25$  мА. Интенсивность ЭЛ горячих носителей может быть описана двумя прямыми линиями с пороговыми значениями тока  $j_{th1}S \approx 25$  мА (появление ЭЛ горячих носителей) и  $j_{th2}S \approx 75$  мА (начало ее интенсивного роста).

На рис. 4 представлены кинетики нарастания интенсивности ЭЛ при различных величинах амплитуды импульсов тока прямоугольной формы и спада интенсивности ЭЛ после пропускания тока с амплитудой 0.4 А. При наличии одного типа центров кинетика нарастания интенсивности ЭЛ ионов эрбия обычно хорошо описывается выражением [2,4]

$$I_{Er} = I_{Er}^m [1 - \exp(-t/\tau_{on})], \quad (2)$$

$$1/\tau_{on} = \sigma(j - j_{th})/q + 1/\tau, \quad (3)$$

где  $I_{Er}^m$  — максимальное значение интенсивности ЭЛ при фиксированном значении плотности тока,  $t$  — время после подачи импульса тока. При наличии ЭЛ горячих носителей измеряемая интенсивность ЭЛ ( $I$ ) определяется следующим выражением:

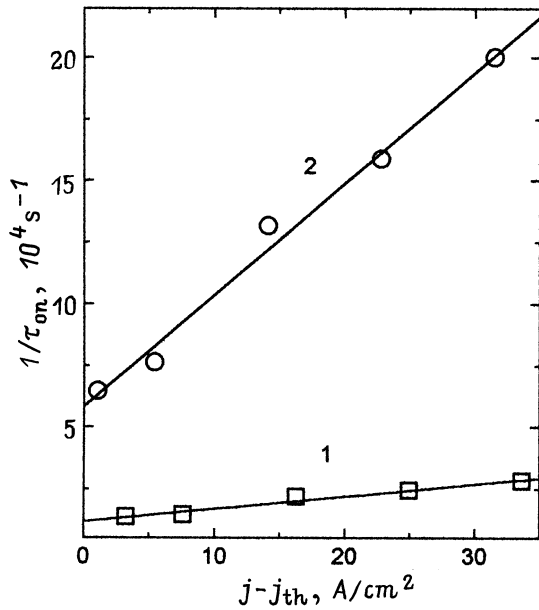
$$I = I_{Si} + I_{Er}^m [1 - \exp(-t/\tau_{on})], \quad (4)$$

где  $I_{Si}$  — интенсивность ЭЛ горячих носителей, которая при наших экспериментальных условиях и временах  $t \geq 1.5$  мкс не зависит от времени, поскольку время установления ЭЛ горячих носителей меньше 200 нс [9]. Представленные на рис. 4 экспериментальные зависимости неудовлетворительно описываются уравнением (4), но хорошо аппроксимируются выражением

$$I(t) = I_{Si} + I_{Er}^{m1} [1 - \exp(-t/\tau_{on1})] + I_{Er}^{m2} [1 - \exp(-t/\tau_{on2})], \quad (5)$$

т.е. в рамках представлений о наличии в образце двух типов независимо возбуждаемых Er-содержащих центров с различными временами нарастания интенсивности ЭЛ ( $\tau_{on1}$  и  $\tau_{on2}$ ), каждое из которых описывается формулой (3), и различными максимальными значениями интенсивности  $I_{Er}^{m1}$  и  $I_{Er}^{m2}$ . При этом оказалось, что два Er-содержащих центра возбуждаются при разных значениях порогового тока ( $j_{th1}S \approx 25$  мА и  $j_{th2}S \approx 75$  мА), а  $I_{Er}^{m2} \approx 2I_{Er}^{m1}$  в условиях, когда  $I_{Er}^{m1}$  и  $I_{Er}^{m2}$  практически перестают зависеть от  $j$ .

На рис. 5 приведены расчетные значения  $1/\tau_{on}$ , обратной постоянной времени нарастания интенсивности ЭЛ, для двух типов центров при различных значениях обратного тока. Аппроксимация данных рис. 5 формулой (3) дает значения  $\sigma_1 \approx 8 \cdot 10^{-17}$  см<sup>2</sup>,  $\tau_1 \approx 85$  мкс и  $\sigma_2 \approx 7 \cdot 10^{-16}$  см<sup>2</sup>,  $\tau_2 \approx 17$  мкс. ЭЛ ионов эрбия для 1-го типа центров появляется одновременно с ЭЛ горячих носителей, а значения  $\sigma_1$  и  $\tau_1$  близки к значениям для центров, наблюдавшихся в туннельных диодах в [2] ( $\sigma = 6 \cdot 10^{-17}$  см<sup>2</sup> и  $\tau = 100$  мкс), для которых был определен ударный механизм возбуждения ЭЛ ионов эрбия [10]. Это свидетельствует, что возбуждение центров 1-го типа происходит горячими носителями по ударному механизму. Интенсивный рост ЭЛ горячих носителей и появление ЭЛ



**Рис. 5.** Зависимости величины, обратной постоянной времени нарастания интенсивности электролюминесценции, от разности рабочей и пороговой плотностей тока для центров 1-го (1) и 2-го (2) типов.

ионов эрбия в центрах 2-го типа при  $j \geq j_{th2}$ , по-видимому, связаны с появлением лавинного умножения носителей заряда в  $p-n$ -переходе. Можно предположить два механизма возбуждения ионов эрбия в этих центрах: ударное возбуждение горячими электронами, появившимися в верхней подзоне  $\Delta_2$  зоны проводимости, и оже-возбуждение в результате рекомбинации электронов и дырок, возникающих при лавинном умножении. Отметим, что относительно малое время жизни ионов  $\text{Er}^{3+}$  в возбужденном состоянии ( $\tau \sim 25$  мкс при температуре  $\sim 160$  К) для центров, находящихся в области пространственного заряда обратно-смещенного  $p-n$ -перехода, ранее наблюдалось в [1]. Поскольку центры 2-го типа характеризуются наибольшими значениями  $\sigma$  и минимальными значениями  $\tau$  из зарегистрированных в обратно смещенных  $p-n$ -переходах, в исследованных нами диодах имеет место минимальное время нарастания интенсивности ЭЛ этих центров при фиксированной плотности тока. Так, при  $j = 50$  А/см<sup>2</sup>  $\tau_{он} \approx 4$  мкс, что значительно меньше приведенных выше значений для ранее исследованных туннельных и лавинных диодов.

Кинетика спада интенсивности ЭЛ ионов эрбия после выключения обратного тока хорошо описывается выражением

$$I(t) = I_{Er1} \exp(-t/\tau_1) + I_{Er2} \exp(-t/\tau_2) + I_{Er3} \exp(-t/\tau_3), \quad (6)$$

где  $\tau_3 \approx 3$  мкс. Оказалось, что  $I_{Er3} \approx 2(I_{Er1} + I_{Er2})$ . Два первых члена в (6) описывают процесс девозбуждения

ионов эрбия, оставшихся в области пространственного заряда  $p-n$ -перехода при выключении тока. Появление третьего компонента спада интенсивности ЭЛ ионов эрбия обусловлено их девозбуждением в электронейтральной области. Наиболее вероятным механизмом девозбуждения ионов является их оже-взаимодействие со свободными электронами [1,2]. Константа этого процесса определяется выражением

$$C_A = 1/n\tau_3, \quad (7)$$

где  $n$  — концентрация свободных электронов в электронейтральной области. В нашем случае  $C_A \approx 3 \cdot 10^{-13}$  см<sup>3</sup> · с<sup>-1</sup>, что достаточно хорошо согласуется с данными для оже-константы, полученными в [1,2], и подтверждает доминирующую роль оже-механизма девозбуждения.

## 4. Заключение

Изготовлены работающие в режиме пробоя  $p-n$ -перехода туннельные Si:(Er,O)-светодиоды, в которых наблюдалось образование Er-содержащих центров с максимальными эффективными сечениями возбуждения ионов эрбия и минимальными временами их жизни в возбужденном состоянии. Получено снижение в несколько раз постоянной времени нарастания интенсивности эрбиевой ЭЛ по сравнению с ранее достигнутыми значениями при тех же плотностях тока. Использование светорегистрирующей системы с временем реакции  $\tau_{resp} \leq 1.5$  мкс позволило впервые измерить постоянную времени спада ЭЛ ионов эрбия, определяемую процессом их оже-деввозбуждения с передачей энергии свободным электронам.

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] J. Palm, F. Gan, B. Zheng, J. Michel, L.C. Kimerling. Phys. Rev. B, **54**, 17 603 (1996).
- [2] S. Coffa, G. Franzo, F. Priolo. Appl. Phys. Lett., **69**, 2077 (1996).
- [3] F. Priolo, G. Franzo, S. Coffa, A. Carnera. Phys. Rev. B, **57**, 4443 (1998).
- [4] N.A. Sobolev, Yu.A. Nikolaev, A.M. Emel'yanov, K.F. Shtel'makh, P.E. Khakuashev, M.A. Trishenkov. J. Luminesc., **80**, 315 (1999).
- [5] Н.А. Соболев, А.М. Емельянов, Ю.А. Николаев. ФТП, **33**, 931 (1999).
- [6] 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).
- [7] С. Зи. Физика полупроводниковых приборов [Пер. с англ. под ред. Р.А. Суриса] (М., Мир, 1984).

- [8] F.G. Chynoweth, K.G. McKay. Phys. Rev., **102**, 369 (1956).  
[9] W.-X. Ni, C.-X. Du, K.B. Joelsson, G. Pozina, G.V. Hansson. J. Luminesc., **80**, 309 (1999).  
[10] S. Coffa, G. Franzo, F. Priolo, A. Pacelli, A. Lacita. Appl. Phys. Lett., **73**, 93 (1998).

*Редактор Л.В. Шаронова*

### **Tunneling Si:(Er,O) light emitting diodes with short times of an increase of Er<sup>3+</sup> ion electroluminescence intensity at breakdown regime**

A.M. Emel'yanov, N.A. Sobolev, M.A. Trishenkov\*, P.E. Khakushev\*

Ioffe Physicotechnical Institute,  
194021 St. Petersburg, Russia

\* Scientific and Manufacturing Enterprise "Orion",  
111123 Moscow, Russia

**Abstract** Tunneling Si:(Er, O) light emitting diodes have been fabricated in which the shortest time constant peculiar to gaining erbium ion electroluminescence intensity was observed in breakdown regime. It occurs due to formation of Er-containing centers with the effective cross-section for excitation of erbium ions equal to  $\sim 7 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^2$  and the lifetime of the Er<sup>3+</sup> ions in the first excited state equal to  $\sim 17 \mu\text{s}$ . The lifetime associated with the Auger energy transfer to free electrons in the electroneutral region of semiconductors after turning off the reverse current was for the first time measured at room temperature.