

# Температурная зависимость электролюминесценции ионов Er в туннельных диодах на основе (111)-Si:(Er, O)

© А.М. Емельянов, Н.А. Соболев

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

(Получена 13 мая 2003 г. Принята к печати 18 июня 2003 г.)

В диапазоне температур 80–300 К в режиме пробоя исследованы электролюминесценция и вольт-амперные характеристики туннельных диодов, полученных имплантацией ионов эрбия, кислорода и бора в (111) *n*-Si и последующим отжигом. Наблюдавшийся эффект температурного возгорания интенсивности электролюминесценции ионов эрбия обусловлен термическим опустошением ловушек, захвативших дырки в *n*-области диода при низких температурах, которое приводит к изменению характеристик пробоя. Показано, что часть ловушек при низких температурах сохраняет захваченный положительный заряд и после снятия с диода напряжения. Это обуславливает своеобразный эффект памяти в исследованных структурах.

## 1. Введение

Исследования полупроводниковых структур, легированных редкоземельными элементами, направлены на создание электролюминесцентных источников и приемников излучения для оптоэлектроники и волоконно-оптических линий связи. Интенсивность электролюминесценции (ЭЛ), связанной с ионами Er<sup>3+</sup> на длине волны  $\lambda \approx 1.54$  мкм в диодах на основе Si, легированного эрбием и кислородом, при комнатной температуре обычно максимальна в режиме электрического пробоя *p*–*n*-перехода. Как при туннельном [1], так и лавинном [2,3] механизме пробоя Si:(Er, O)-диодов с ориентацией Si(100), при увеличении температуры от жидкого азота до комнатной наблюдается уменьшение интенсивности ЭЛ, связанной с ионами эрбия, в максимуме соответствующей полосы излучения. Это обычно связано с ростом доли безызлучательных переходов между уровнями ионов Er<sup>3+</sup> из первого возбужденного состояния  $^4I_{13/2}$  в основное  $^4I_{15/2}$ , а также с уширением линий электролюминесценции, соответствующих этим переходам. В диодах на основе Si:(Er, O) с ориентацией Si(111), которые при комнатной температуре проявляют лавинный механизм пробоя, температурные зависимости интенсивности ЭЛ, связанной с ионами эрбия, в указанном температурном интервале содержат участки роста (температурного возгорания) ЭЛ [3–5]. Впервые этот эффект был подробно описан и объяснен в работе [4]. Было показано, что температурному участку возгорания интенсивности ЭЛ эрбия соответствует участок резкого температурного роста обратного напряжения на диоде при фиксированном токе в режиме пробоя. По изменению знака производной температурной зависимости этого напряжения сделан вывод о том, что участок температурного возгорания ЭЛ соответствует переходу от туннельного (при более низких температурах) к лавинному механизму пробоя. Изменение механизма пробоя было объяснено захватом дырок на ловушки в обедненном *n*-слое *p*–*n*-перехода при достаточно низких температурах. При изменении

температуры от 300 до 80 К наблюдалось и связанное с описанными явлениями аномальное уменьшение интенсивности ЭЛ, а также уменьшение эффективности возбуждения ионов эрбия.

Наличие участка возгорания ЭЛ на температурной зависимости интенсивности ЭЛ ионов эрбия недавно отмечено и в (111)-Si:(Er, O)-диодах, проявляющих при комнатной температуре туннельный механизм пробоя [6]. Более детальному исследованию этого эффекта посвящена данная работа. В ней впервые измерены параметры, характеризующие кинетику заполнения ловушек для дырок в таких структурах, и обнаружено участие в эффекте температурного возгорания ЭЛ ловушек, сохраняющих захваченный на них положительный заряд и после снятия с диода электрического напряжения.

## 2. Экспериментальные условия

Главное отличие исследованных в настоящей работе туннельных светоизлучающих диодов на основе (111)-Si:(Er, O) от ранее детально изученных лавинных (111)-Si:(Er, O)-диодов [4] заключается в более высоких (в 3 раза) дозах имплантации ионов эрбия и кислорода. Имплантация ионов эрбия (с энергиями 2.0 и 1.6 МэВ и дозами  $3 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup>) и кислорода (0.28 и 0.22 МэВ,  $3 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup>) в полированные пластины кремния *n*-типа проводимости с удельным сопротивлением 5 Ом·см, выращенного по методу Чохральского в направлении  $\langle 111 \rangle$ , сопровождалась аморфизацией приповерхностного слоя. Ионы бора (40 кэВ,  $5 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup>) и фосфора (80 кэВ,  $10^{15}$  см<sup>-2</sup>) имплантировались в лицевую и обратную стороны пластины соответственно для создания сильно легированных *p*<sup>+</sup>- и *n*<sup>+</sup>-слоев. Последовательные отжиги при 620°C в течение 1 ч и 900°C в течение 0.5 ч приводили к перекристаллизации аморфного слоя и образованию эрбийсодержащих 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  $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$  на расстоянии 0.5–0.8 мкм от поверхности полупроводника. Концентрация электрически активных центров определялась из вольт-фарадных характеристик и составляла  $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . По данным ВИМС, концентрация атомов бора в максимуме достигала  $\sim 3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . Мезадиоды изготавливались с рабочей площадью  $S = 2.3 \text{ мм}^2$ . Вольт-амперные характеристики (ВАХ) диодов измерялись на частоте 32 Гц с длительностью импульсов 0.5 мс. ЭЛ возбуждалась прямоугольными импульсами тока длительностью 2–5 мс с периодом следования 30 мс. Исследуемые структуры закреплялись на массивном медном цилиндре. Температура образцов определялась с помощью термопары, также закрепленной на этом цилиндре. 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 нм в диапазоне  $\lambda = 1.0\text{--}1.65 \text{ мкм}$ ).

### 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Спектры ЭЛ при температурах 300 и 80 К для диода, смещенного в обратном направлении при токе 300 мА, показаны на рис. 1. Помимо пиков с максимумом при  $\lambda = 1.538 \text{ мкм}$ , обусловленных 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) [7]. Зависимость интенсивности ЭЛ эрбия от

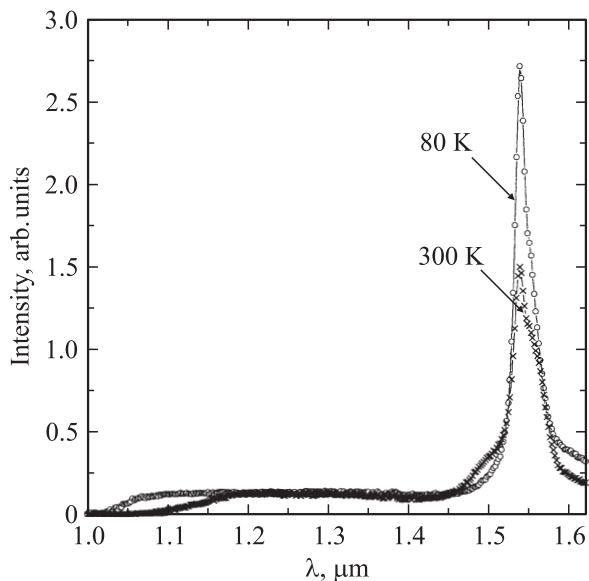


Рис. 1. Спектры электролюминесценции светоизлучающих диодов при температурах 80 и 300 К и токе 300 мА.

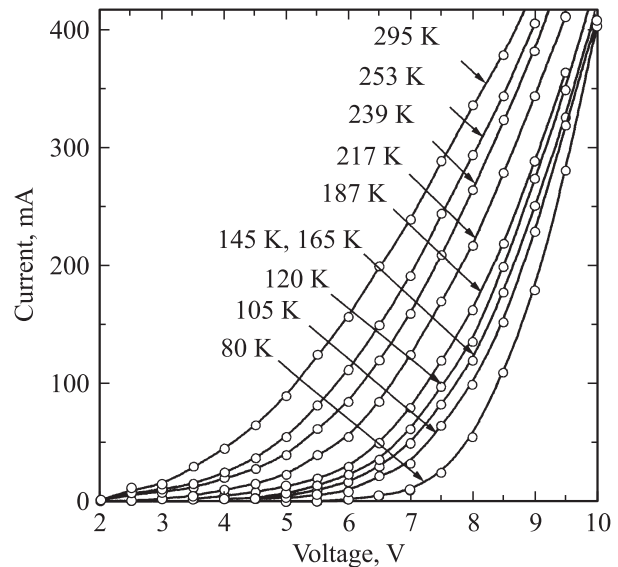


Рис. 2. Измеренная при различных температурах обратная ветвь вольт-амперной характеристики светоизлучающего диода.

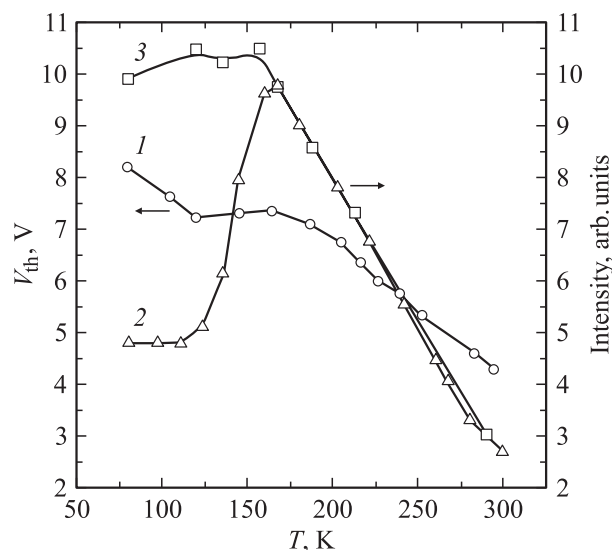
плотности тока для исследованных в настоящей работе диодов при 300 и 80 К приведены в [6]. В отличие от лавинных (111)-Si:(Er, O)-диодов [4] интенсивность ЭЛ эрбия при 80 К в них выше, чем при 300 К, причем это соотношение сохраняется в широком диапазоне токов вплоть до практического насыщения зависимостей интенсивности ЭЛ от плотности тока. Отметим также, что практическое насыщение зависимостей ЭЛ при 80 и 300 К достигается при близких значениях плотности тока в отличие от (111)-Si:(Er, O)-диодов, имевших при 300 К лавинный механизм пробоя [4].

Обратная ветвь ВАХ диодной структуры при разных температурах показана на рис. 2. Представленные зависимости были получены при увеличении температуры образца после выдержки его под обратным импульсным током 100 мА в течение нескольких минут при 80 К. Увеличение напряжения пробоя при понижении температуры характерно для туннельных диодов. Однако величина напряжения пробоя  $V_{th}$  (напряжения, полученного линейной экстраполяцией зависимостей на рис. 2 при больших токах к нулевым значениям тока) в диапазоне температур от 80 до 300 К изменяется немонотонно (см. кривую  $I$  на рис. 3). При увеличении температуры от 120 до 165 К наблюдается небольшой рост напряжения пробоя. Температурная зависимость интенсивности ЭЛ эрбия на длине волны  $\lambda = 1.538 \text{ мкм}$ , измеренная одновременно с измерениями ВАХ при токе 100 мА, представлена кривой 2 на рис. 3. Из сравнения кривых  $I$  и 2 на рис. 3 видно, что участку увеличения с ростом температуры напряжения пробоя соответствует участок температурного возгорания интенсивности ЭЛ. В этом исследованные нами диоды подобны ранее исследованным, лавинным при комнатной температуре,

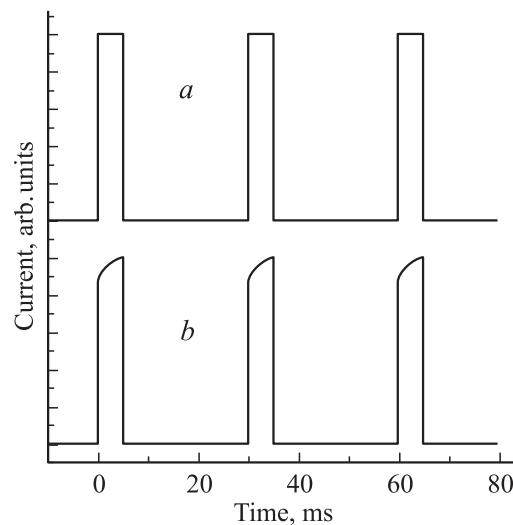
светоизлучающим (111)-Si:(Er, O)-диодам [4]. Наиболее существенное качественное отличие состоит в том, что исследованные в настоящей работе светоизлучающие диоды как при температурах ниже участка температурного возгорания интенсивности ЭЛ, так и выше его имеют температурную зависимость напряжения пробоя, характерную для туннельного механизма пробоя (напряжение пробоя при понижении температуры возрастает). Представленные экспериментальные результаты дают основание полагать, что, как и в работе [4], эффект температурного возгорания ЭЛ эрбия обусловлен термическим опустошением заполненных при низких температурах ловушек для дырок, которое приводит к изменению характеристик пробоя, таких как ширина области пространственного заряда, пространственное и энергетическое распределение горячих носителей заряда. Изменение характеристик пробоя в свою очередь вызывает изменение интенсивности ЭЛ.

Все проведенные исследования температурных зависимостей ЭЛ эрбия в обратно смещенных (111)-Si:(Er, O)-диодах выполнялись в условиях подачи на них импульсного напряжения. Таким образом, в промежутках между импульсами тока, вызывающими ЭЛ, напряжение на диоде отсутствовало. Поэтому можно предположить два возможных механизма заполнения ловушек для дырок:

- 1) ловушки быстро заполняются дырками при протекании каждого импульса тока и опустошаются в отсутствии напряжения,
- 2) ловушки заполняются дырками, возможно, в течение не одного, а определенного количества импульсов



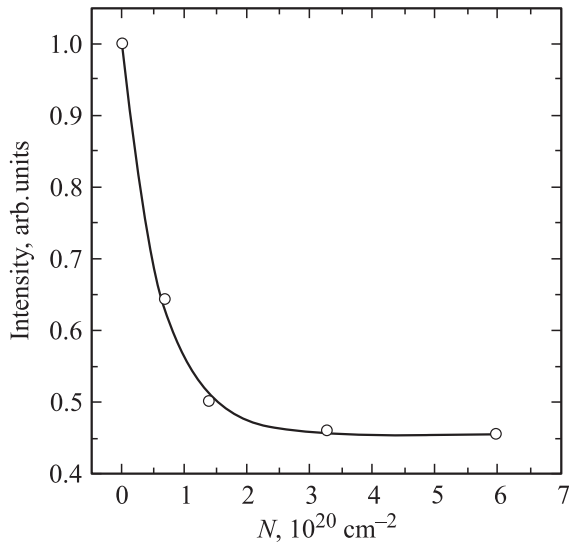
**Рис. 3.** 1 — зависимость напряжения пробоя диодов ( $V_{th}$ ) от температуры. 2, 3 — зависимости интенсивности электролюминесценции ионов эрбия на длине волны  $\lambda = 1.538$  мкм от температуры при обратном токе 100 мА. 2 — после выдержки образца перед измерениями в течение нескольких минут при 80 К и 100 мА. 3 — через 2 с после включения тока.



**Рис. 4.** Форма импульсов обратного тока при подаче на диод прямоугольных импульсов напряжения: *a* — при температурах 170–300 К, *b* — при 80 К. Амплитуда импульсов тока 100 мА. Постоянная времени нарастания и спада напряжения  $\sim 1$  мкс.

тока, и длительное время остаются заполненными при отсутствии внешнего напряжения.

Первая ситуация может иметь место, например, если ловушки находятся в той части области пространственного заряда  $p-n$ -перехода, которая становится электронейтральной после снятия внешнего напряжения. Вторая ситуация может быть, например, если ловушки расположены в той части области пространственного заряда  $p-n$ -перехода, обедненной основными носителями заряда (электронами) в которой сохраняется и после снятия внешнего напряжения. Как показали результаты описанных далее экспериментов, в исследованных нами диодах имеют место оба этих механизма. При наличии первого из них заполнение дырочных ловушек в  $n$ -слое  $p-n$ -перехода должно приводить к эффекту возрастания тока после приложения к диоду каждого импульса напряжения прямоугольной формы, поскольку оно обуславливает уменьшение напряжения пробоя и сдвиг ВАХ в область меньших напряжений. Если время возрастания тока существенно превосходит время нарастания напряжения на диоде, то этот эффект несложно зарегистрировать экспериментально. В наших экспериментах постоянная времени нарастания импульсов постоянного напряжения составляла  $\sim 1$  мкс, и в процессе измерений кривой 2 на рис. 3 при температурах 170–300 К форма импульсов тока амплитудой 100 мА при временах  $> 1$  мкс практически повторяла форму импульсов напряжения (см. рис. 4, *a*). При температурах же, соответствующих эффекту возгорания ЭЛ и более низких, действительно наблюдался существенный рост тока в течение нескольких миллисекунд, который для 80 К и амплитуды тока 100 мА представлен на рис. 4, *b*.



**Рис. 5.** Зависимость интенсивности электролюминесценции эрбия на длине волны  $\lambda = 1.538$  мкм от плотности носителей заряда, прошедших через  $p$ - $n$ -переход, при обратном токе 100 мА и температуре 80 К. Началу отсчета плотности носителей соответствует время протекания обратного тока с амплитудой импульсов 100 мА и длительностью 5 мс, равное 2 с.

Еще раз подчеркнем, что описанные выше эксперименты по измерению ЭЛ при пониженных температурах проводились после выдержки образцов при 80 К и обратном импульсном токе 100 мА в течение нескольких минут. Если образец охлаждать без подачи напряжения, а измерения ЭЛ производить через  $\sim 2$  с после приложения импульсного напряжения, то при том же токе зависимость интенсивности ЭЛ от температуры описывается не кривой 2, а кривой 3 на рис. 3. Эта зависимость отличается от зависимости 2 только в области температур, соответствующих эффекту температурного возгорания ЭЛ, и при еще более низких температурах. На зависимости 3 отсутствует хорошо выраженный эффект температурного возгорания ЭЛ. Таким образом, результаты экспериментов показывают, что в исследованных структурах присутствуют ловушки дырок, время заполнения которых при 80 К и токе 100 мА значительно превосходит максимальную использованную нами длительность импульсов тока (5 мс). Эти ловушки практически не опустошаются за время отсутствия напряжения в промежутках между импульсами, и главным образом именно они определяют эффект температурного возгорания ЭЛ.

При 80 К, обратном токе 100 мА, длительности импульсов тока 5 мс и периоде следования 30 мс уменьшение интенсивности ЭЛ завершалось за время порядка нескольких десятков секунд (менее 1 мин). На рис. 5 представлена зависимость интенсивности ЭЛ эрбия от плотности носителей заряда  $N$ , прошедших через  $p$ - $n$ -переход при 80 К и обратном импульсном токе 100 мА. Началу отсчета соответствует время выдержки

под импульсным током  $t \approx 2$  с ( $N \approx 9 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ ), малое по сравнению со временем установления равновесного значения интенсивности ЭЛ, которое, как видно из рис. 5, практически достигалось при  $N \approx 3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$ . Интенсивность электролюминесценции падает более чем в 2 раза по сравнению с той, которая имеет место при  $t = 2$  с. Полученные данные показывают, что исследованные диодные структуры при достаточно низких температурах проявляют своеобразный эффект памяти: после пропускания тока и снятия напряжения они сохраняют информацию о токовом воздействии. Для стирания этой информации достаточно нагреть структуру до температуры более высокой, чем область температурного возгорания интенсивности ЭЛ. Возможно, формирование ловушек связано с образованием в кремнии  $\text{SiO}_2$ -подобных преципитатов [8].

Представления об уменьшении напряжения пробоя  $p$ - $n$ -перехода в результате захвата дырок на ловушки и в отсутствие быстрого опустошения ловушек после снятия напряжения могут лежать в основе альтернативного, к предложенному в [9], объяснения эффекта так называемой „задержанной“ ЭЛ ионов эрбия в режиме обратного тока в селективно-легированных эрбием методом молекулярно-лучевой эпитаксии кремниевых диодах. Действительно, предположим, что при пропускании прямого тока в исследованных в [9] структурах происходило заполнение дырочных ловушек с указанными свойствами. Тогда при изменении полярности приложенного к диоду напряжения с прямого на обратное значительные величины обратного тока и интенсивности ЭЛ ионов эрбия могут наблюдаться при обратных напряжениях, меньших напряжения пробоя в равновесных (до заполнения дырочных ловушек) условиях. Это будет иметь место до тех пор, пока не произойдет опустошения дырочных ловушек и напряжение пробоя  $p$ - $n$ -перехода соответственно не увеличится. Насколько можно понять из представленного в [9] описания, именно такой эффект и наблюдался в этой работе. Сами авторы [9] объясняют обнаруженный ими эффект захватом электронов на ловушки при пропускании прямого тока и возбуждением ЭЛ ионов эрбия электронами с ловушек, опустошающихся в режиме обратного напряжения. Интересно отметить, что авторы [9] указывают на наличие в исследованных ими структурах  $\text{SiO}_2$ -подобных преципитатов. Это косвенно подтверждает высказанную выше гипотезу о том, что образование дырочных ловушек может быть связано с формированием такого рода дефектов.

#### 4. Заключение

Представленные экспериментальные результаты подтверждают ранее высказанное предположение о том, что эффект температурного возгорания интенсивности ЭЛ ионов эрбия в светоизлучающих в режиме туннельного пробоя диодах на основе (111)-Si:(Er, O) обусловлен термическим опустошением ловушек в  $n$ -слое, захватив-

ших дырки при низкой температуре, которое изменяет характеристики пробоя. Впервые показано, что в таких структурах формируются ловушки для дырок, которые сохраняют захваченный положительный заряд и после снятия с диода напряжения. Именно эти ловушки в основном и определяют эффект температурного возгорания интенсивности ЭЛ и своеобразный эффект памяти в исследованных структурах при низких температурах. На основании полученных результатов предложено альтернативное объяснение эффекта так называемой „задержанной“ ЭЛ ионов эрбия в селективно-легированных эрбием кремниевых диодах.

Работа частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 02-02-16374), INTAS (грант No 2001-0194) и Отделением физических наук РАН в рамках научной программы „Новые материалы и структуры“.

## Список литературы

- [1] G. Franzo, F. Priolo, S. Coffa, A. Carnera. *Appl. Phys. Lett.*, **64**, 2235 (1994).
- [2] N.A. Sobolev, A.M. Emel'yanov, K.F. Shtel'makh. *Appl. Phys. Lett.*, **71**, 1930 (1997).
- [3] Н.А. Соболев, А.М. Емельянов, Ю.А. Николаев, В.И. Вдовин. *ФТП*, **33**, 660 (1999).
- [4] A.M. Emel'yanov, N.A. Sobolev, A.N. Yakimenko. *Appl. Phys. Lett.*, **72**, 1223 (1998).
- [5] Н.А. Соболев, А.М. Емельянов, Ю.А. Николаев, В.И. Вдовин, А.Н. Якименко. *Изв. АН. Сер. физ.*, **64**, 348 (2000).
- [6] Н.А. Соболев, А.М. Емельянов, Ю.А. Николаев. *ФТП*, **34**, 1069 (2000).
- [7] J. Bude, N. Sano, A. Yoshii. *Phys. Rev. B*, **45**, 5848 (1992).
- [8] W. Jantsch, S. Lanzerstorfer, L. Palmetshofer, M. Stepikhova, H. Preier. *J. Luminesc.*, **80**, 9 (1999).
- [9] Б.А. Андреев, З.Ф. Красильник, Д.И. Крыжков, В.П. Кузнецов, W. Jantsch. *Матер. совещ. „Нанофотоника“* (Н. Новгород, 17–20 марта 2003) с. 330.

Редактор Т.А. Полянская

## Temperature dependence of electroluminescence of Er ions in tunneling (111)-Si:(Er, O) diodes

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

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

**Abstract** Electroluminescence (EL) at the breakdown regime and current-voltage characteristics in tunneling diodes prepared by implantation of erbium, oxygen, and boron ions into (111)*n*-Si and subsequent annealing have been studied over the temperature range of 80–300 K. Observed effect of a temperature enhancement of an EL intensity of Er ions is related to thermal releasing traps which captured holes in *n*-area of the diode at low temperatures. The trap releasing changes the breakdown characteristics. It was shown that a part of traps held a captured positive charge at low temperatures after turning off the voltage. It is responsible for a peculiar effect of memory in the investigated structures.