

# Природа краевого пика электролюминесценции в режиме пробоя Si : (Er,O)-диодов

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

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

(Получена 16 октября 2001 г. Принята к печати 17 октября 2001 г.)

Исследована электролюминесценция в области длин волн 1.00–1.65 мкм в диодах на основе кремния, легированного эрбием и кислородом, Si : (Er,O), как в режиме пробоя  $p-n$ -перехода, так и в режиме прямого тока. Измерялась электролюминесценция при комнатной температуре с лицевой и обратной поверхностей диодов. В спектрах электролюминесценции некоторых диодов в режиме пробоя  $p-n$ -перехода наблюдался пик, соответствующий краю полосы поглощения кремния. Появление пика обусловлено инжекцией неосновных носителей заряда из металлического контакта в кремний и последующей межзонной излучательной рекомбинацией. Интенсивность зона-зонной рекомбинации эффективно возрастает после достижения определенной, зависящей от технологических условий, плотности тока. Пороговая плотность тока уменьшается с ростом температуры постимплантационного отжига Si : (Er,O)-диодов в диапазоне 900–1100°C.

## 1. Введение

Режим пробоя кремниевого диода используется для возбуждения электролюминесценции (ЭЛ) ионов редкоземельных элементов (Er, Ho) в области пространственного заряда  $p-n$ -перехода [1–6]. В диодах на основе кремния, легированного эрбием и кислородом, Si : (Er,O), [1–5] при некоторых технологиях их получения помимо пика с максимумом на длине волны  $\lambda \approx 1.54$  мкм, обусловленного излучательными переходами электронов между расщепленными в кристаллическом поле уровнями  $^4I_{13/2}$  и  $^4I_{15/2}$  ионов  $Er^{3+}$ , и относительно слабого и обычно мало зависящего от длины волны при  $\lambda \approx 1.2–1.6$  мкм излучения, обусловленного переходами "горячих" электронов внутри зоны проводимости кремния, в режиме пробоя мы обнаружили полосу ЭЛ в области зона-зонной рекомбинации кремния. Выявление причин появления этой полосы важно для понимания как механизмов возбуждения и девозбуждения ионов редкоземельных элементов в полупроводниковых диодах, так и физических процессов, происходящих в диодах в режиме пробоя.

Ранее появление в некоторых кремниевых диодах в режиме пробоя полосы ЭЛ в области зона-зонной рекомбинации отмечалось и другими исследователями [7,8]. Авторы [7] связывают ее возникновение с процессами ударной ионизации атомов.

В настоящей работе в результате исследований ЭЛ в Si : (Er,O)-диодах как в режиме пробоя, так и режиме прямого тока впервые экспериментально показано, что причиной появления полосы ЭЛ в области зона-зонной рекомбинации в кремнии может являться возникающая при пробое инжекция неосновных носителей заряда в кремний из металлического контакта. Рассмотрены некоторые технологические аспекты формирования кремниевых диодов с эффективной ЭЛ в области зона-зонной рекомбинации при комнатной температуре.

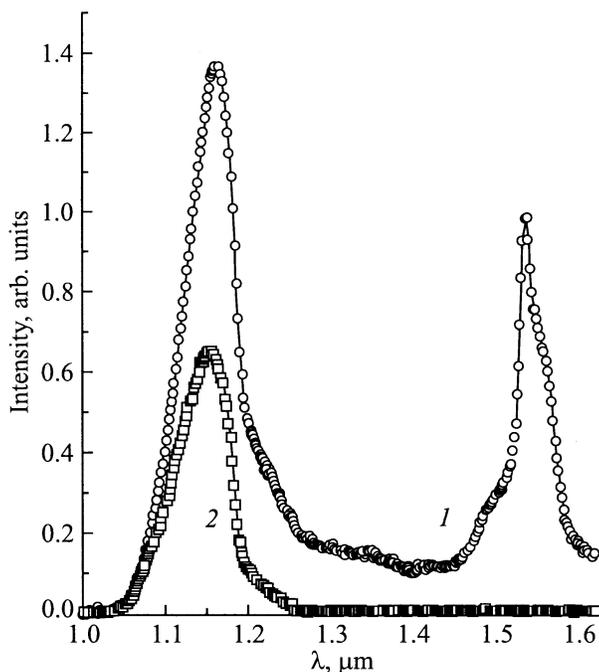
## 2. Экспериментальные условия

Имплантация ионов эрбия (с энергиями 2.0 и 1.6 МэВ, дозами  $3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ) и ионов кислорода (в энергиями 0.28 и 0.22 МэВ, дозами  $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ) проводилась в кремний  $n$ -типа проводимости, с удельным сопротивлением 0.5 Ом · см, выращенной по методу Чохральского, с лицевой стороны полированной пластины (толщиной 0.3 мм), ориентированной в плоскости (100). Имплантация сопровождалась аморфизацией приповерхностного слоя. Ионы бора (40 кэВ,  $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ) и фосфора (80 кэВ,  $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ) имплантировались с лицевой и обратной сторон пластин соответственно для создания сильно легированных  $p^+$ - и  $n^+$ -слоев. Проводился двухступенчатый отжиг в хлорсодержащей атмосфере [2]: сначала при температуре  $T_1 = 620^\circ\text{C}$  в течение 1 ч и затем при температуре  $T_2 = 700–1100^\circ\text{C}$  в течение 0.5 ч. Отжиг приводил к перекристаллизации аморфного слоя и образованию эрбийсодержащих оптически и электрически активных центров. Меза-диоды имели рабочую площадь  $S \approx 2 \times 2 \text{ мм}^2$ . Напряжение пробоя при комнатной температуре для диодов, подвергнутых отжигу при  $T_2 = 1000^\circ\text{C}$  составляло  $\sim 6.5$  В. На лицевую и обратную стороны диодов термическим испарением Al в вакууме наносились контактные площадки диаметром 1 мм. Электролюминесценция возбуждалась при комнатной температуре прямоугольными импульсами тока на частоте 32 Гц с длительностью импульсов 5 мс. Излучение диодных структур с непокрытой Al поверхности фокусировалось линзовой системой на входную щель монохроматора МДР-23 и на его выходе регистрировалось неохлаждаемым InGaAs-диодом (с разрешением 7 нм в диапазоне  $\lambda = 1.0–1.65$  мкм).

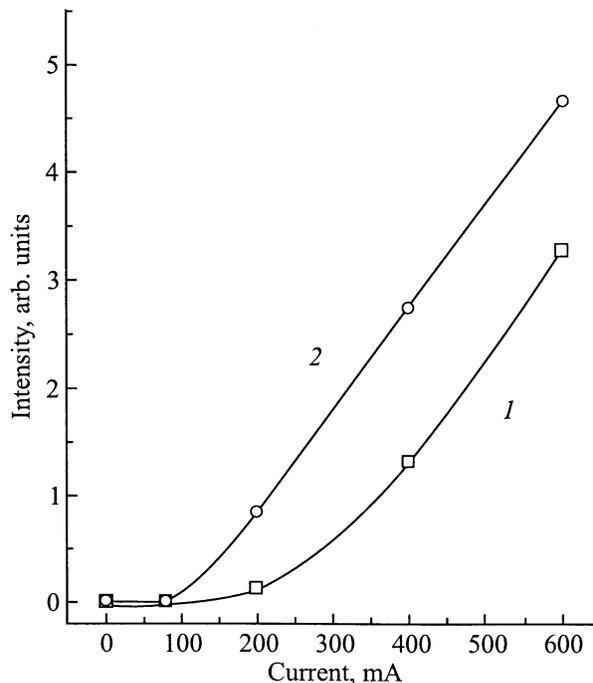
### 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Сначала рассмотрим результаты исследования образца, изготовленного с отжигом при  $T_2 = 1000^\circ\text{C}$ . На рис. 1 представлены измеренные при одинаковой величине тока спектры ЭЛ такого Si:(Er,O)-диода в режиме пробоя (кривая 1) и в режиме прямого тока (кривая 2). В режиме пробоя помимо ЭЛ ионов эрбия с максимумом на длине волны  $\lambda \approx 1.54$  мкм и полосы ЭЛ горячих носителей наблюдается пик с максимумом на длине волны  $\lambda \approx 1.16$  мкм. Подобный пик ЭЛ наблюдается и в режиме прямого тока (см. кривую 2 на рис. 1) и обычно связывается с зона-зонной (непрямой) излучательной рекомбинацией. Отметим, что в описываемом образце величина этого пика меньше при прямом смещении, чем при обратном, хотя в диодах, изготовленных по другим технологиям, это соотношение может быть и обратным. Зависимости интенсивности ЭЛ на  $\lambda = 1.16$  мкм от величины прямого и обратного тока представлены на рис. 2 кривыми 1 и 2 соответственно. Интенсивный рост ЭЛ начинается после достижения пороговой величины тока, различной для различных направлений тока. Наличие порогового тока, вероятно, объясняется наличием каналов безызлучательной рекомбинации, через которые практически полностью осуществляется рекомбинация при токах ниже пороговой величины.

Особенностью зона-зонного рекомбинационного излучения является то, что оно довольно значительно поглощается в кремниевой пластине. Поэтому, если генерация излучения происходит в основном вблизи одной



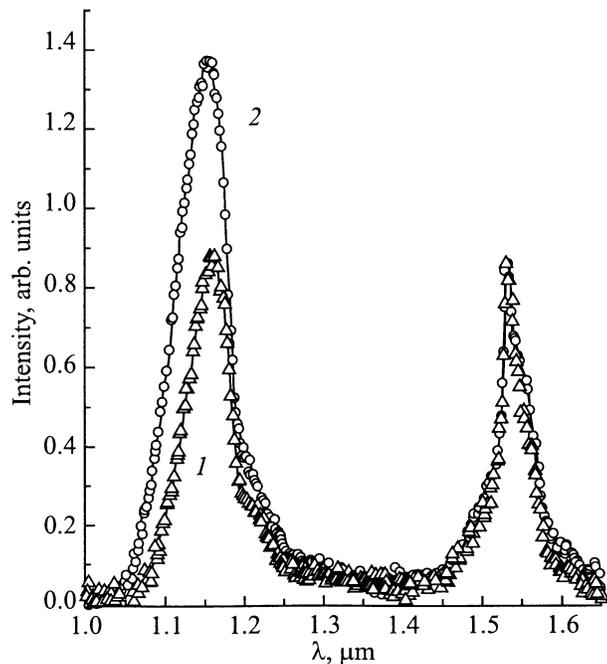
**Рис. 1.** Измеренные при одинаковой величине тока спектры электролюминесценции диода в режиме пробоя (1) и в режиме прямого тока (2).



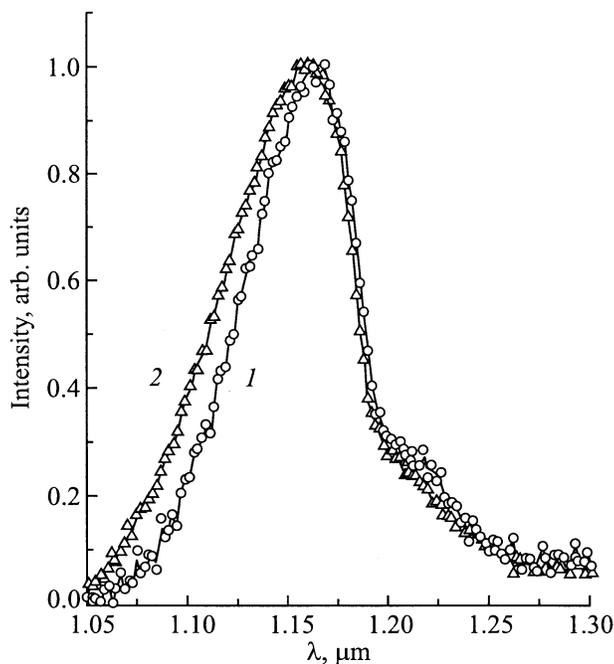
**Рис. 2.** Зависимости интенсивности электролюминесценции на длине волны  $\lambda = 1.16$  мкм от величины тока через диод при прямом смещении (1) и при пробое (2).

из поверхностей пластины, то при одном и том же токе можно ожидать существенных различий спектров ЭЛ, полученных при сборе излучения с лицевой и с обратной стороны пластины. Различия могут быть не только в максимальной интенсивности ЭЛ, но и в других характеристиках спектров, поскольку коэффициент поглощения кремния в этой области длин волн не постоянен, а резко возрастает в сторону более коротких длин волн.

На рис. 3 приведены измеренные при одном и том же токе в режиме пробоя спектры ЭЛ образца, полученные при сборе излучения с лицевой (кривая 1) и с обратной (кривая 2) стороны пластины. Поскольку поглощение излучения ионов эрбия ( $\lambda \approx 1.54$  мкм) на толщине пластины мало, при измерениях кривой 2 положение образца подстраивалось таким образом, чтобы интенсивность эрбиевой ЭЛ в максимуме точно совпала с ее интенсивностью на кривой 1. Такая юстировка обеспечивала и практическое совпадение интенсивностей "горячей" ЭЛ в диапазоне  $\lambda \approx 1.25-1.45$  мкм, которая также проявляется в области высокой прозрачности кремния. Как видно из рис. 3, при описанных условиях эксперимента интенсивность ЭЛ в области зона-зонной рекомбинации в режиме пробоя выше при наблюдении с обратной стороны пластины, чем с лицевой. Отметим также, что в таких же условиях эксперимента интенсивность ЭЛ в области зона-зонной рекомбинации в режиме прямого тока оказалась, напротив, выше при наблюдении с лицевой стороны пластины, чем с обратной. Эти результаты показывают, что максимум интенсивности излучения при



**Рис. 3.** Спектры электролюминесценции образца, полученные при сборе излучения с лицевой (1) и с обратной (2) стороны пластины при токе 400 мА в режиме пробоя.



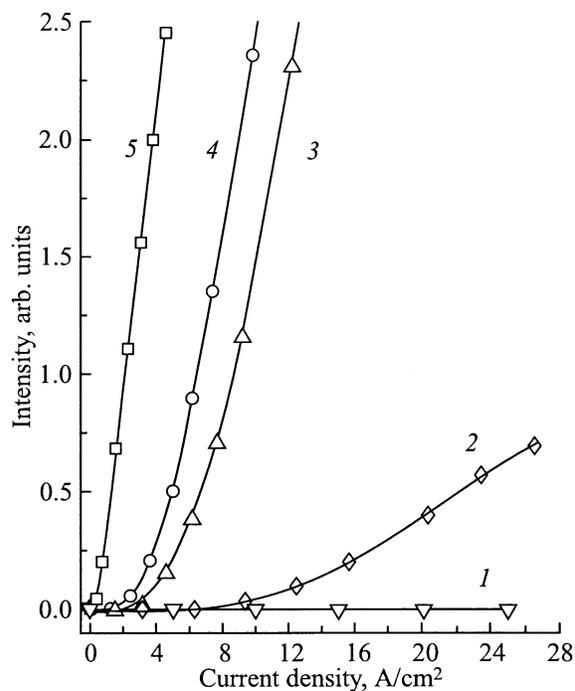
**Рис. 4.** Нормированные на максимальную интенсивность зависимости интенсивности электролюминесценции от длины волны, измеренные при токе пробоя 400 мА и сборе излучения с лицевой (1) и с обратной (2) стороны пластины.

рекомбинации неосновных носителей заряда значительно смещен к лицевой поверхности пластины — в случае прямого тока и к обратной — в режиме пробоя. Подтверждением последнего является и сравнение норми-

рованных на максимальную интенсивность спектров ЭЛ в области зона-зонного рекомбинационного излучения (см. рис. 4). Как видно из рис. 4, при наблюдении ЭЛ с лицевой стороны пластины спектр получается более узким за счет большего поглощения кремнием излучения в коротковолновой части спектра по сравнению с излучением, собираемым с обратной стороны пластины.

При пробое *p-n*-перехода возникающие в области пространственного заряда электроны поступают в *n*-область, а дырки — в *p*-область. Неравновесные основные носители либо уходят в металлические контакты, либо рекомбинируют с инжектируемыми этими контактами неосновными носителями. Во втором случае наблюдается генерация зона-зонного рекомбинационного излучения преимущественно вблизи обратной поверхности образца. Существенно, что для генерации излучения при этом не обязательно наличие процессов ударной ионизации.

При исследованиях ЭЛ в Si:(Er,O)-диодах, отличающихся от описанных выше по технологии только температурой второго отжига  $T_2$  (в диапазоне  $700 \leq T_2 \leq 1100^\circ\text{C}$ ), нами было замечено, что в режиме пробоя при плотностях тока  $j \lesssim 25 \text{ A/cm}^2$  пик зона-зонной рекомбинационной ЭЛ наблюдался только при  $T_2 \geq 950^\circ\text{C}$ , не наблюдался при  $T_2 \leq 900^\circ\text{C}$ , и технологическая воспроизводимость этого пика в отличие от пика эрбиевой ЭЛ была очень низкой. Низкая воспроизводимость может быть связана с условиями из-



**Рис. 5.** Зависимости максимальной интенсивности электролюминесценции в области зона-зонной рекомбинации от плотности прямого тока для Si:(Er,O)-диодов с различной температурой второго отжига  $T_2$ , °C 1 — 700, 800 и 900, 2 — 975, 3 — 1000, 4 — 1025, 5 — 1100.

готовления контактов металл–полупроводник, например, из-за различий параметров пленки собственного окисла на поверхности полупроводника, различий в степени загрязнения поверхности. Для выявления причин влияния температуры второго отжига на обсуждаемый эффект мы исследовали хорошо воспроизводимые технологически зависимости максимальной интенсивности зона-зонной ЭЛ от плотности прямого тока при различных  $T_2$ . Результаты представлены на рис. 5. Из рис. 5 видно, что в исследованном диапазоне плотностей тока зона-зонная рекомбинационная ЭЛ при  $T_2 \leq 900^\circ\text{C}$  практически не наблюдается. С увеличением температуры второго отжига до  $975^\circ\text{C}$  и выше пороговая плотность тока ( $j_{\text{th}}$ ), при которой начинает эффективно проявляться излучение в области зона-зонной рекомбинации, уже попадает в диапазон исследованных нами и представленных на рис. 5 плотностей тока. По мере увеличения температуры второго отжига величина  $j_{\text{th}}$  уменьшается. По аналогии с ЭЛ в режиме прямого тока можно предположить, что влияние температуры отжига  $T_2$  на появление ЭЛ в области зона-зонной излучательной рекомбинации при пробое может быть объяснено влиянием температуры отжига на пороговую плотность тока проявления ЭЛ вблизи обратной стороны кремниевой пластины.

#### 4. Заключение

В работе показано, что появление в спектре ЭЛ в режиме пробоя кремниевого диода полосы в области зона-зонной непрямой рекомбинации может быть связано с инжекцией в кремний неосновных носителей заряда из металлического контакта. Поэтому наличие процессов ударной ионизации для появления указанной полосы ЭЛ не является обязательным. Излучение в области зона-зонной рекомбинации начинает эффективно появляться после достижения определенной, зависящей от технологии, плотности тока. Эта пороговая плотность тока уменьшается с ростом температуры постимплантационного отжига Si:(Er,O)-диодов в диапазоне  $900\text{--}1100^\circ\text{C}$ .

Авторы благодарят Р.В. Тараканову за помощь при изготовлении образцов.

Работа частично поддержана INTAS (грант № 99-01872) и РФФИ-Бюро научно-технического сотрудничества Австрии (грант № 01-02-02000 БНТС\_а).

#### 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] A.M. Emel'yanov, N.A. Sobolev, A.N. Yakimenko. *Appl. Phys. Lett.*, **72**, 1223 (1998).
- [4] Н.А. Соболев, А.М. Емельянов, Ю.А. Николаев. *ФТП*, **34**, 1069 (2000).

- [5] А.М. Емельянов, Н.А. Соболев, М.А. Трищенко, П.Е. Хакуашев. *ФТП*, **34**, 965 (2000).
- [6] Н.А. Соболев, А.М. Емельянов, Ю.А. Николаев. *ФТП*, **33**, 931 (1999).
- [7] Л.А. Косяченко, М.П. Мазур. *ФТП*, **33**, 170 (1999).
- [8] Л.А. Косяченко, Е.Ф. Кухто, В.М. Складчук. *ФТП*, **18**, 426 (1984).

*Редактор Л.В. Шаронова*

#### Origin of the edge electroluminescence peak under breakdown regime of Si:(Er,O) diodes

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

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

**Abstract** The electroluminescence has been studied over  $1.00\text{--}1.65\ \mu\text{m}$  wavelength range in erbium- and oxygen-doped Si:(Er,O) diodes under both breakdown regime and forward current. The electroluminescence was measured on front and back surfaces of the diodes at room temperature. Under the breakdown regime of  $p\text{--}n$  junction, a peak corresponding to silicon band-gap edge has been observed in electroluminescence spectra of some diodes. The peak is related to the injection of minority carriers from metal contact into silicon and subsequent interband radiative recombination. The intensity of band-to-band recombination increases noticeably at a certain current density depending on the technological conditions. This threshold current density diminishes as temperature of post-implantation annealing of Si:(Er,O) diodes rises over a range of  $900\text{--}1100^\circ\text{C}$ .