

## ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ КРЕМНИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО ЭРБИЕМ

© М.С.Бреслер, О.Б.Гусев, Б.П.Затарченя, П.Е.Пак, Н.А.Соболев,  
Е.И.Шек, И.Н.Ясневич, М.И.Маковийчук\*, Е.О.Паршин\*

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

\*Институт микроэлектроники Российской академии наук,  
150007 Ярославль, Россия

(Получена 15 июня 1995 г. Принята к печати 15 сентября 1995 г.)

Исследована электролюминесценция фотодиодов из кремния, легированного эрбием методом ионной имплантации, при прямом смещении  $p-n$ -перехода. Обнаружена корреляция между интенсивностями электролюминесценции свободных экситонов и ионов эрбия в зависимости от тока накачки. Из анализа экспериментальных результатов предложена модель возбуждения  $f$ -оболочки оптически активных ионов эрбия, основанная на предположении, что возбуждение ионов эрбия происходит через связывание (захват) свободных экситонов на нейтральный донорный уровень, образованный эрбий-кислородным комплексом с последующим оже-возбуждением  $f$ -оболочки эрбия при рекомбинации связанного экситона. Предложенная модель позволяет описать полученные экспериментальные результаты.

### Введение

Исследование кремния, легированного эрбием, вызывает в последнее время значительный интерес в связи с предполагаемой возможностью использования этого материала в светодиодах, интегрируемых в кремниевую электронику и излучающих на длине волны 1.54 мкм, отвечающей минимуму поглощения в волоконно-оптических линиях связи на плавленом кварце [1].

Впервые электролюминесценция кремния, легированного эрбием, наблюдалась при 77 К Энненом и др. [2]. Недавно появилось сообщение о получении электролюминесценции кремния, легированного эрбием, не только при температуре жидкого азота, но и при комнатной температуре [3,4]. Вместе с тем механизм передачи возбуждения от матрицы кремния ионам эрбия до настоящего времени остается неясным.

В работе [5], посвященной фотолюминесценции, было указано на возможность возбуждения ионов эрбия через экситоны. Прямым доказательством этого процесса было бы наблюдение взаимосвязи между

интенсивностью люминесценции свободных экситонов и ионов эрбия с изменением уровня накачки. Однако по фотолюминесценции установить связь между люминесценцией ионов эрбия и свободных экситонов затруднительно, так как рекомбинация свободных экситонов происходит не только в области имплантации эрбия, но и в неимплантированном объеме кремниевой матрицы из-за большой диффузионной длины свободных экситонов.

В то же время при электролюминесценции в  $p-n$ -структуре при  $T = 77\text{ К}$  в  $n$ -области (области имплантации эрбия) электроны находятся на глубоких нейтральных донорных уровнях, образованных эрбиевыми комплексами, ниже зоны проводимости на  $\sim 170 \div 200\text{ мэВ}$  [1]. В этом случае ток через  $p-n$ -переход в основном определяется дырками, и, следовательно, свободные экситоны генерируются и рекомбинируют в  $n$ -области (области имплантации эрбия). Поэтому для выяснения механизма возбуждения представляет интерес исследование токовой зависимости интенсивностей линий электролюминесценции (ЭЛ) ионов эрбия и свободных экситонов в структурах, отличающихся концентрацией оптически активных центров  $\text{Er}$ .

### Методика эксперимента

В качестве исходного материала для получения светодиодных структур с разной концентрацией оптически активных центров использовались полированные пластины легированного бором  $p\text{-Si}$ , выращенного методом Чохральского, с удельным сопротивлением  $4\text{ Ом} \cdot \text{см}$ . Светоизлучающий слой формировался при совместной имплантации эрбия и кислорода с несколькими энергиями на установке High Voltage Engineering Europe В2К. Введение эрбия осуществлялось из металлического источника. В структуру 1 имплантировались только ионы эрбия с энергией  $1\text{ МэВ}$  и дозой  $1 \cdot 10^{13}\text{ см}^{-2}$ , в структуру 2 — ионы эрбия с энергиями  $0.8, 1.2, 1.6$  и  $2\text{ МэВ}$  и дозой  $1 \cdot 10^{13}\text{ см}^{-2}$ , а также ионы кислорода с энергиями  $0.1, 0.16$  и  $0.25\text{ МэВ}$  и дозой  $1 \cdot 10^{14}\text{ см}^{-2}$ . Температура кремниевых пластин в процессе облучения не превышала  $60^\circ\text{C}$ . В результате в структуре 2 формировались идентичные концентрационные профили эрбия и кислорода, но концентрация последнего была примерно на порядок выше. Для устранения радиационных дефектов и активации оптически и электрически активных центров проводился постимплантационный отжиг структур в хлорсодержащей атмосфере при  $900^\circ\text{C}$  в течение 30 мин. После отжига в области имплантации эрбия происходит конверсия типа проводимости  $p \rightarrow n$ . Максимальная концентрация электронов в структурах 1 и 2 составляла  $6 \cdot 10^{16}$  и  $1.5 \cdot 10^{17}\text{ см}^{-3}$  соответственно. Считая, что концентрация оптически активных центров составляет 10% от концентрации электрически активных центров, мы приняли для сравнения с расчетами значения концентрации  $0.5 \cdot 10^{16}$  и  $1.5 \cdot 10^{16}\text{ см}^{-3}$  для структур 1 и 2 соответственно.

На эти структуры наносились омические контакты напылением алюминия. Мезаподобный краевой контур диодных структур формировался в процессе химического травления в травителе  $\text{SP4}$ . Площадь приборной структуры (металлизированного  $n^+$ -слоя) составляла  $7\text{ мм}^2$ . Вольт-амперная характеристика диодной структуры на основе  $\text{Si:Er}$  имела ярко выраженный выпрямляющий характер.

ЭлектрOLUMИнесценция возбуждалась при приложении в прямом направлении импульсов тока прямоугольной формы частотой 25 Гц. Излучение собиралось с боковой поверхности меза-диода, находившегося в жидком азоте ( $T = 77$  К), и анализировалось двойным решеточным спектрометром ДФС-12 с фокусным расстоянием 822 мм. В качестве приемника использовался охлаждаемый германиевый фотодиод, сигнал с которого регистрировался по схеме импульсного синхронного детектирования.

### Экспериментальные результаты

На рис. 1, *a, b* представлены две серии спектров ЭЛ ( $I_{EL}$  — интенсивность) светодиодов Si:Er, для структур 1 и 2, измеренных при двух токах возбуждения. При малом токе возбуждения,  $\sim 10$  мА, в спектрах ЭЛ доминирует одна линия с длиной волны  $\lambda = 1.537$  мкм, отвечающая переходу между  $f$ -состояниями иона Er. Плечо этой линии при  $\sim 1.550$  мкм соответствует второму наиболее сильному переходу между состояниями эрбия  ${}^4I_{13/2} - {}^4I_{15/2}$ , но структура спектра иона Er не разрешается полностью при 77 К.

С увеличением плотности тока кроме линии эрбия в спектрах появляется линия фоновонного повторения свободного экситона в кремнии (линия  $\lambda = 1.124$  мкм). Широкая полоса люминесценции, наблюдаемая в спектре образца 2, связана с наличием дефектов, по-видимому, не полностью устраненных при отжиге. Отметим, что спектры, приведенные на рис. 1, получены без поправки на спектральную зависимость схемы регистрации.

На рис. 2 показаны зависимости интенсивности излучения  $I_{EL}$  структур 1 и 2 с длинами волн  $\lambda = 1.537$  мкм (линия эрбия) и  $\lambda = 1.124$  мкм (линия свободного экситона) от тока  $J$  через диод. Как видно из рисунка, интенсивность линии эрбия для структуры 1 с меньшей концентрацией оптически активных центров насыщается на уровне, в 4 раза меньшем, чем для структуры 2. Это примерно соответствует отношению концентраций оптически активных центров в этих двух структурах.

Из рис. 2 также видно, что при малых токах интенсивность экситонной линии для обеих структур слабо зависит от тока накачки и

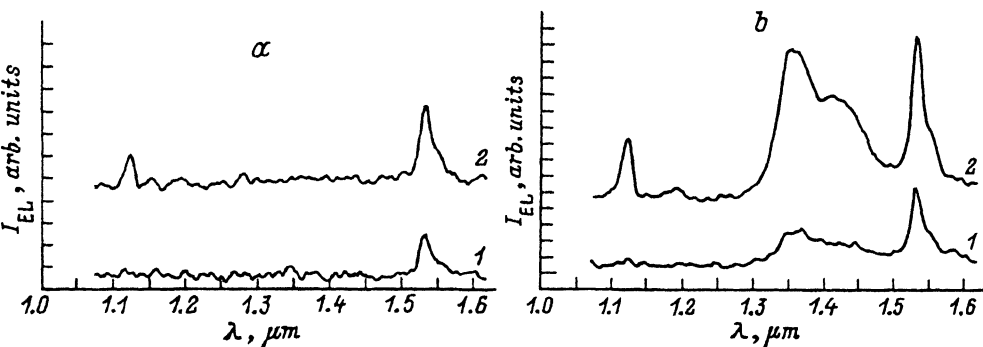


Рис. 1. Спектры электролюминесценции структур 1 (*a*) и 2 (*b*) при токе 10 (1) и 50 (2) мА.

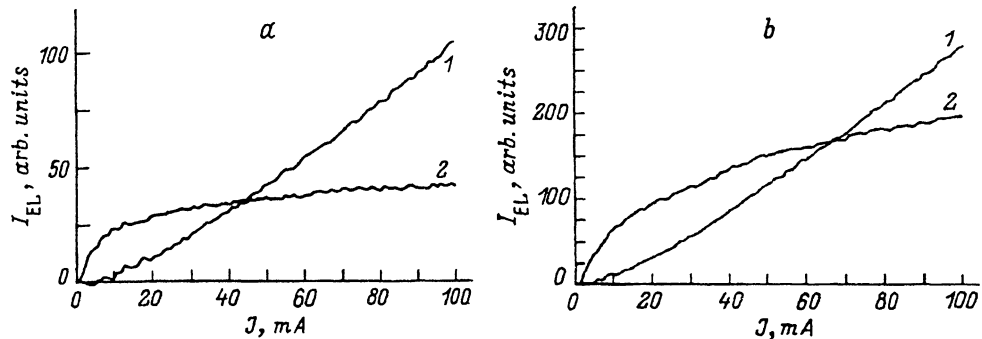


Рис. 2. Зависимости интенсивности электролюминесценции  $I_{EL}$  свободных экситонов (1) и ионов эрбия (2) от тока  $J$  для структур 1 (a) и 2 (b).

только после насыщения линии эрбия наступает линейный рост линии свободного экситона. Полученные нами экспериментальные результаты несомненно указывают на то, что возбуждение оптически активных ионов эрбия происходит через свободные экситоны.

### Теоретическая модель

Предположение о возбуждении ионов эрбия экситонами уже рассматривалось в работе [5], в которой была написана соответствующая система кинетических уравнений. Однако авторы этой работы не исследовали взаимосвязь между интенсивностью люминесценции свободных экситонов и ионов эрбия. Для объяснения этой наблюдавшейся нами взаимосвязи мы предположили, что излучательная рекомбинация свободных экситонов контролируется связыванием их на эрбиевом центре. Таким образом, в кинетическом уравнении для экситонов необходимо учесть этот процесс. Мы покажем, что в этом случае полученное решение системы кинетических уравнений объясняет наши результаты.

При оптическом или электрическом возбуждении в кремнии рождаются электронно-дырочные пары, которые могут рекомбинировать через различные каналы, из которых мы учтем только квадратичную рекомбинацию

$$\frac{dn}{dt} = G - anp - bnp, \quad (1)$$

где  $G$  — скорость генерации электронно-дырочных пар, а два квадратичных члена описывают связывание электронов и дырок в экситоны (первый член) и квадратичную безызлучательную рекомбинацию. Известно, что  $a \ll b$  (различие может достигать нескольких порядков величины, что приводит к низкому квантовому выходу люминесценции кремния). Экспериментальные результаты показывают, что при большой концентрации носителей в кремнии скорость рекомбинации отклоняется от линейной и при концентрации  $n > 10^{16} \div 10^{17} \text{ см}^{-3}$  описывается квадратичной зависимостью [6]. Механизм такого поведения скорости рекомбинации в кремнии обсуждался в литературе [7].

Изменение числа свободных экситонов описывается уравнением

$$\frac{dn_x}{dt} = anp - \frac{n_x}{\tau_x} - \frac{n_x}{\tau^*} \left( 1 - \frac{N_{Er}^*}{N_{Er}} \right), \quad (2)$$

где  $\tau_x$  — время жизни экситона (в принципе как излучательное, так и безызлучательное),  $N_{Er}$  — полная концентрация оптически активных ионов эрбия,  $N_{Er}^*$  — концентрация возбужденных ионов эрбия. Третий член этого уравнения описывает связывание свободного экситона с нейтральным дефектом, содержащим ион эрбия. При этом  $\tau^*$  является временем захвата свободного экситона на этот эрбиевый центр и, следовательно, пропорционально концентрации ионов эрбия:  $1/\tau^* = cN_{Er}$ , где  $c$  — коэффициент захвата. Множитель в скобках описывает процесс насыщения возбужденных ионов эрбия, который в нашей модели одновременно закрывает возможность захвата свободного экситона на эрбиевый центр.

При этом мы полагаем, что время жизни возбужденных ионов эрбия  $\tau_d$  велико по сравнению с  $\tau^*$ , и рекомбинация связанного экситона происходит в результате оже-процесса, приводящего к возбуждению  $f$ -оболочки иона эрбия. Избыточная энергия при этом скорее всего передается третьему носителю, имеющемуся в комплексе «связанный экситон-нейтральный эрбиевый центр».

Третье кинетическое уравнение описывает возбуждение и девозбуждение  $f$ -электронов ионов эрбия  $Er^{+3}$ :

$$\frac{dN_{Er}^*}{dt} = \frac{n_x}{\tau^*} \left( 1 - \frac{N_{Er}^*}{N_{Er}} \right) - \frac{N_{Er}^*}{\tau_d}, \quad (3)$$

где  $\tau_d$  — время девозбуждения иона эрбия (учитывающее как излучательные, так и безызлучательные переходы).

Система (1)–(3) представляет собой систему кинетических уравнений работы [5] со следующим дополнением: в уравнение для экситонов (2) включен член, который процесс взаимодействия экситонов с ионами эрбия формально представляет как непосредственное взаимодействие свободных экситонов с ионами редкоземельного элемента.

В стационарном случае легко находится решение системы:

$$n_x = \frac{1}{2} \left\{ N_0 - N_{eff} \left( 1 + \frac{\tau_x}{\tau^*} \right) + \left[ N_0^2 + 2N_0 N_{eff} \left( 1 - \frac{\tau_x}{\tau^*} \right) + N_{eff}^2 \left( 1 + \frac{\tau_x}{\tau^*} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}, \quad (4)$$

$$N_{Er}^* = N_{Er} \frac{n_x}{n_x + N_{eff}}. \quad (5)$$

Здесь

$$N_0 = G \frac{a}{a+b} \tau_x \equiv G^* \tau_x, \quad N_{eff} = N_{Er} \frac{\tau^*}{\tau_d}.$$

При слабых уровнях накачки  $N_0 \ll N_{eff}$  и  $n_x \ll N_{eff}$ . В этом случае

$$n_x \simeq G^* \tau^*, \quad (6)$$

$$N_{Er}^* \simeq G^* \tau_d. \quad (7)$$

При больших уровнях накачки  $N_0 \gg N_{eff}$  и  $n_x \gg N_{eff}$ , тогда

$$n_x \simeq G^* \tau_x, \quad (8)$$

$$N_{Er}^* \simeq N_{Er}, \quad (9)$$

т. е. наступает насыщение возбужденных ионов эрбия.

Интенсивность люминесценции экситонов есть  $I_x = n_x / \tau_x^r$ , люминесценции эрбия  $I_{Er} = N_{Er}^* / \tau_d^r$ , где  $\tau_x^r$  и  $\tau_d^r$  — времена излучательной рекомбинации для экситонов и ионов эрбия соответственно.

Таким образом, при низких уровнях возбуждения интенсивность люминесценции экситонов пропорциональна уровню накачки с коэффициентом  $\tau^* / \tau_x^r \ll 1$  (если скорость захвата и рекомбинации экситонов на ионах эрбия достаточно велика); интенсивность люминесценции ионов эрбия пропорциональна уровню накачки.

При высоких уровнях возбуждения интенсивность люминесценции экситонов пропорциональна уровню накачки с коэффициентом  $\tau_x / \tau_x^r < 1$ , т. е. значительно большим, чем в случае малых уровней возбуждения; интенсивность люминесценции ионов эрбия насыщается и не зависит от уровня возбуждения.

### Обсуждение результатов

Для описания полученных экспериментальных результатов мы оценили времена  $\tau^*$  и  $\tau_d$ , входящие в уравнения (4), (5). Согласно (6) и (8), отношение наклонов зависимости интенсивности электролюминесценции свободного экситона от уровня накачки (рис. 2) дает отношение времен  $\tau_x$  и  $\tau^*$  (по нашим оценкам  $\tau_x / \tau^* \simeq 10$ ). Времена безызлучательной ( $\tau_x$ ) и излучательной ( $\tau_x^r$ ) рекомбинации из литературных данных составляют  $\sim 1$  и  $\sim 10$  мкс. Тогда  $\tau^*$  можно принять равным  $\sim 0.1$  мкс. Определение  $\tau_d$  по измерению сдвига фазы люминесценции эрбия относительно люминесценции свободного экситона при синхронном детектировании дало  $\sim 0.1$  мс, что соответствует, например, данным [8], полученным при 77 К.

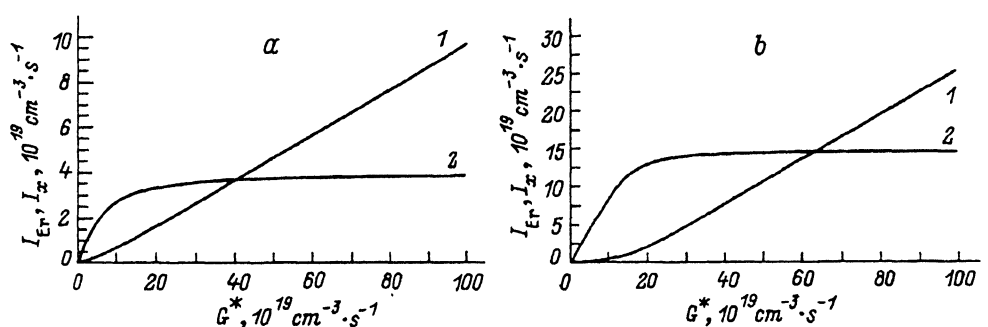


Рис. 3. Расчетные зависимости интенсивности электролюминесценции свободных экситонов  $I_x$  (1) и ионов эрбия  $I_{Er}$  (2) от уровня накачки. *a* — структура 1;  $N_{Er} = 0.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ,  $\tau_x = 1 \text{ мкс}$ ,  $\tau_x^r = 10 \text{ мкс}$ ,  $\tau_d = 0.1 \text{ мс}$ ,  $c = 3 \cdot 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$ . *b* — структура 2;  $N_{Er} = 1.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ,  $\tau_x = 3 \text{ мкс}$ ,  $\tau_x^r = 10 \text{ мкс}$ ,  $\tau_d = 0.1 \text{ мс}$ ,  $c = 3 \cdot 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$ .

На рис. 3 показаны зависимости интенсивности линий ЭЛ обеих исследованных структур от уровня накачки. Как видно из сравнения с экспериментальными зависимостями, предложённая модель хорошо описывает полученные результаты.

В рамках нашей модели возбуждение ионов эрбия происходит благодаря оже-процессу с участием экситонов, связанных на нейтральных эрбиевых дефектах. Известно, что в результате имплантации и постимплантационного отжига в кремнии образуются донорные центры с энергией ионизации  $170 \div 200$  мэВ [1,9]. Если считать, что именно эти донорные центры и есть нейтральные эрбиевые центры нашей модели, то повышение температуры выше азотной должно приводить к ионизации этих центров. Так как свободные экситоны не захватываются на заряженные центры, по предложенному нами механизму экситонного возбуждения люминесценция эрбия подавляется с повышением температуры, что соответствует наблюдаемому температурному гашению люминесценции ионов эрбия [8,9].

### Заключение

Таким образом, мы показали, что измерение интенсивности электролюминесценции свободных экситонов и ионов эрбия в зависимости от тока накачки для образцов с различной концентрацией оптически активных эрбиевых центров даёт важную информацию о механизме возбуждения эрбия.

Предложенная модель оже-возбуждения  $f$ -оболочек ионов эрбия экситонами, связанными на нейтральных донорах, позволяет объяснить корреляцию в интенсивностях электролюминесценции свободных экситонов и ионов эрбия в зависимости от тока накачки и температурную зависимость интенсивности люминесценции ионов эрбия [8,9].

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 95 02-04163-а) и гранта AFOSR F49620-94-1-0390.

### Список литературы

- [1] *Rare Earth Doped Semiconductors* [Mater. Res. Soc. Symp. Proc., ed. by G.S.Pomrenke et al. (1993), v. 301].
- [2] H. Ennen, G. Pomrenke, A. Axmann, K. Eisele, W. Haydl, J. Schneider. *Appl. Phys. Lett.*, **46**, 381 (1985).
- [3] G. Franzo, F. Priolo, S. Coffa, A. Polman, A. Carnera. *Appl. Phys. Lett.*, **64**, 2235 (1994).
- [4] B. Zheng, J. Michel, F.Y.G. Ren, L.C. Kimerling, D.C. Jacobson, J.M. Poate. *Appl. Phys. Lett.*, **64**, 2842 (1994).
- [5] S. Coffa, F. Priolo, G. Franzo, V. Bellani, A. Carnera, S. Spinella. *Phys. Rev. B*, **48**, 11782 (1993).
- [6] M.S. Tyagi, R. van Overstaeten. *Sol. St. Electron.*, **26**, 577 (1983).
- [7] V.N. Abakumov, V.I. Perel, I.N. Yassievich. *Nonradiative Recombination in Semiconductors* (Amsterdam, 1991) p. 223.
- [8] S. Coffa, G. Franzo, F. Priolo, R. Serna. *Phys. Rev. B*, **49**, 16313 (1994).
- [9] J. Michel, J.L. 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).

## Electroluminescence of erbium-doped silicon

*M.S.Bresler, O.B.Gusev, B.P.Zakharchenya, P.E.Pak, N.A.Sobolev, E.I.Shek, I.N.Yassievich, M.I.Makoviichuk, E.O.Parshin*

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

Electroluminescence of photodiodes fabricated of erbium-implanted silicon is studied under a direct bias of  $p-n$  junction. Correlation between electroluminescence intensities for free excitons and erbium ions was found as a function of the pumping current. A model of the  $f$ -shell excitation of optically active erbium ions is proposed basing on the assumption that the excitation of erbium ions occurs via capture of free excitons on a neutral-donor level that has been formed by an erbium-oxygen complex with subsequent Auger-excitation of  $f$ -shell of an erbium ion during the bound exciton recombination. The model proposed permits to describe experimental results obtained.

---