

# Эффективное сечение возбуждения и время жизни ионов $\text{Er}^{3+}$ в светодиодах на основе $\text{Si}:\text{Er}$ , полученных методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии

© Д.Ю. Ремизов, В.Б. Шмагин, А.В. Антонов, В.П. Кузнецов, З.Ф. Красильник

Институт физики микроструктур Российской академии наук,  
603950 Нижний Новгород, Россия

E-mail: remizov@ipm.sci-nnov.ru

Методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии получены электролюминесцентные диодные структуры на основе  $\text{Si}:\text{Er}$ , эффективно излучающие в диапазоне  $1.5\ \mu\text{m}$  в режиме пробоя  $p-n$ -перехода при комнатной температуре. Для структур, излучающих в режиме смешанного пробоя и обнаруживающих максимальные интенсивность и эффективность возбуждения электролюминесценции ионов  $\text{Er}^{3+}$ , определены эффективное сечение возбуждения ионов  $\text{Er}^{3+}$  горячими носителями, разогреваемыми электрическим полем обратно смещенного  $p-n$ -перехода, и время жизни ионов  $\text{Er}^{3+}$  в первом возбужденном состоянии  $^4I_{13/2}$ .

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№ 02-02-16773, 04-02-17120), INTAS (N 03-51-6468).

Сублимационная молекулярно-лучевая эпитаксия (СМЛЭ), позволяющая удачно сочетать высокую скорость роста с кристаллическим совершенством выращиваемых слоев [1], зарекомендовала себя в последние годы как оригинальный и весьма перспективный метод получения светоизлучающих структур на основе кремния, легированного эрбием. Методом СМЛЭ на основе  $\text{Si}:\text{Er}$  получены однородно легированные светоизлучающие структуры с толщиной слоя  $\text{Si}:\text{Er}$  до  $4\ \mu\text{m}$ , многослойные периодические структуры  $\dots\text{Si}/\text{Si}:\text{Er}/\text{Si}\dots$ , обнаруживающие высокую квантовую эффективность и интенсивную фотолюминесценцию в диапазоне  $\lambda \sim 1.5\ \mu\text{m}$ , электролюминесцентные диодные структуры, эффективно излучающие в режиме пробоя  $p-n$ -перехода при комнатной температуре [2–5].

Ранее на примере серии светоизлучающих диодов  $\text{Si}:\text{Er}/\text{Si}$ , полученных методом СМЛЭ, мы исследовали влияние механизма пробоя области пространственного заряда (ОПЗ) на электролюминесцентные свойства диода и показали, что диоды, работающие в режиме пробоя, близком к смешанному ( $U_{\text{br}}^{77} \approx U_{\text{br}}^{300}$ , где  $U_{\text{br}}^{77}$  и  $U_{\text{br}}^{300}$  — напряжения пробоя при температурах 77 и 300 К соответственно), проявляют максимальные интенсивность и эффективность возбуждения электролюминесценции (ЭЛ) ионов  $\text{Er}^{3+}$  при комнатной температуре в отличие от диодов, работающих в режимах ярко выраженного туннельного ( $U_{\text{br}}^{77} > U_{\text{br}}^{300}$ ) или лавинного ( $U_{\text{br}}^{77} < U_{\text{br}}^{300}$ ) пробоя [5]. В настоящей работе приведены первые результаты исследования кинетики нарастания интенсивности ЭЛ ионов  $\text{Er}^{3+}$  в СМЛЭ-диодах, работающих в режиме пробоя, близком к смешанному с незначительным преобладанием туннельной компоненты в токе пробоя, определены эффективное сечение возбуждения и время жизни ионов  $\text{Er}^{3+}$  в первом возбужденном состоянии  $^4I_{13/2}$ .

## 1. Методика эксперимента

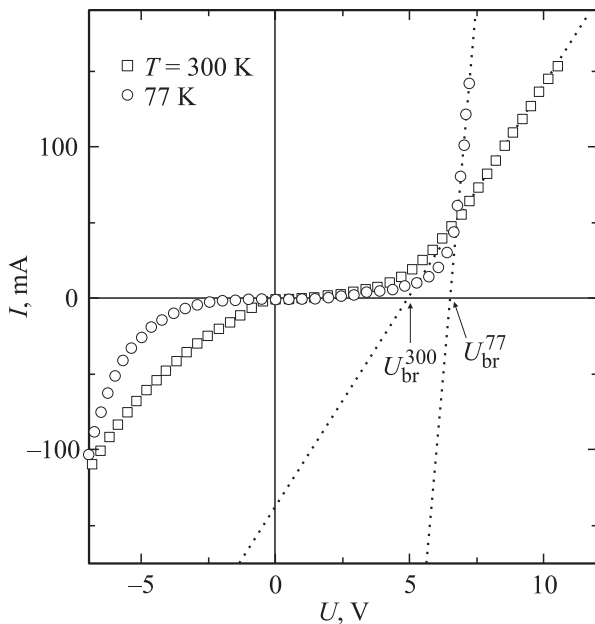
Светоизлучающие диодные структуры, исследованные в настоящей работе, выращены методом СМЛЭ на подложках  $p\text{-Si}:\text{B}$  с ориентацией (100) и удельным сопротивлением  $15\ \Omega \cdot \text{cm}$  с подслоем  $p^+\text{-Si}$  толщиной  $0.1\ \mu\text{m}$  и концентрацией носителей  $5 \cdot 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$ . Толщина слоя  $n\text{-Si}:\text{Er}$  составляла  $\sim 1\ \mu\text{m}$ , концентрация носителей  $\sim (4-7) \cdot 10^{17}\ \text{cm}^{-3}$ , температура роста  $\sim 520^\circ\text{C}$ , концентрация  $\text{Er} \sim (1-2) \cdot 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$ . Светодиоды изготавливались по стандартной меза-технологии, площадь мезы составляла  $2.5\ \text{mm}^2$ , 70% ее площади было свободно для выхода излучения.

Спектры ЭЛ регистрировались с помощью дифракционного монохроматора МДР-23 и ИК-фотоприемника  $\text{InGaAs}$ , охлаждаемого до температуры жидкого азота, в диапазоне  $1.0-1.6\ \mu\text{m}$  с разрешением 6 nm. Для возбуждения и регистрации спектров ЭЛ использовались импульсная модуляция тока накачки (длительность импульса 4 ms, частота повторения  $\sim 40\ \text{Hz}$ , амплитуда до 500 mA) и методика синхронного накопления сигнала. Временные измерения проводились с использованием цифрового осциллографа BORDO 110 с полосой пропускания 0–200 MHz и более быстрого ИК-фотоприемника  $\text{InGaAs}$  с временем отклика  $\sim 15\ \mu\text{s}$ , работающего при комнатной температуре. Полоса пропускания оптического тракта при проведении временных измерений формировалась с коротковолновой стороны оптическим интерференционным фильтром с полосой пропускания  $1.5-2.5\ \mu\text{m}$ , с длинноволновой стороны — полосой пропускания фотоприемника  $\text{InGaAs}$ . Вольт-амперные характеристики (ВАХ) диодов измерялись в импульсном режиме. Напряжение пробоя  $U_{\text{br}}$  определялось экстраполяцией прямолинейного участка обратной ветви ВАХ до пересечения с осью напряжений.

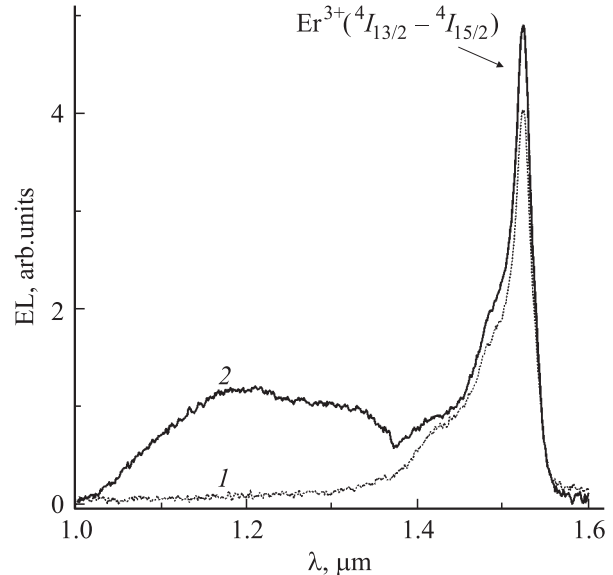
## 2. Результаты эксперимента и их обсуждение

На рис. 1 и 2 приведены ВАХ и спектр ЭЛ одного из СМЛЭ-диодов. Напряжения пробоя составляли  $U_{br}^{300} \approx 5.0$  В и  $U_{br}^{77} \approx 6.6$  В, что дает нам основание констатировать механизм пробоя, близкий к смешанному со слабым преобладанием туннельной компоненты в токе пробоя. Разный наклон обратных ветвей ВАХ диода при  $T = 77$  и 300 К обусловлен температурной зависимостью подвижности носителей в подложке. Спектр ЭЛ типичен для диодов со смешанным характером пробоя и представлен достаточно узкой линией эрбиевой ЭЛ (переход  ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$  в  $4f$ -оболочке иона  $\text{Er}^{3+}$ ) и широкой полосой так называемой „горячей“ ЭЛ, представляющей собой внутризонную излучательную релаксацию носителей, разогреваемых в электрическом поле ОПЗ [6]. Сравнение спектров ЭЛ, записанных с использованием и без использования оптического фильтра, показывает, что фильтр эффективно вырезает полосу горячей ЭЛ. Применение фильтра позволило нам при проведении временных измерений отказаться от монохроматора и тем самым заметно увеличить отношение сигнал/шум в регистрируемом сигнале.

Эффективное сечение возбуждения и время жизни ионов  $\text{Er}^{3+}$  в возбужденном состоянии определялись из измерений кинетики нарастания интенсивности ЭЛ ионов  $\text{Er}^{3+}$  при импульсной модуляции тока накачки. В рамках двухуровневой модели уравнение баланса (1), определяющее процессы возбуждения и девозбуждения



**Рис. 1.** Вольт-амперные характеристики СМЛЭ-диода Si:Er/Si при температурах 77 и 300 К. Пунктирные линии — экстраполяция прямолинейных участков обратных ветвей ВАХ до пересечения их с осью напряжений. Стрелками показаны напряжения пробоя.



**Рис. 2.** Спектры электролюминесценции СМЛЭ-диода Si:Er/Si, зарегистрированные в режиме пробоя  $p$ - $n$ -перехода с использованием (1) и без использования (2) оптического фильтра. Температура 300 К. Плотность тока накачки  $8 \text{ A/cm}^2$ . Указана идентификация перехода в  $4f$ -оболочке иона  $\text{Er}^{3+}$ .

ионов  $\text{Er}^{3+}$ , и его решение (2), описывающее нарастание интенсивности ЭЛ при включении тока накачки, могут быть записаны в следующем виде [7]:

$$\frac{dN^*}{dt} = \frac{\sigma j}{q} (N - N^*) - \frac{N^*}{\tau}, \quad (1)$$

$$N^* = N \frac{\sigma \tau j / q}{1 + \sigma \tau j / q} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\text{on}}}\right) \right], \quad (2)$$

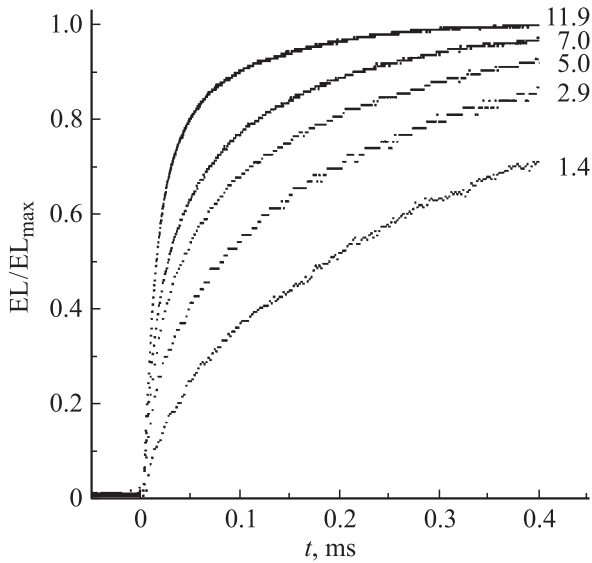
где  $N$  и  $N^*$  — полная концентрация ионов  $\text{Er}^{3+}$  и их концентрация в возбужденном состоянии  ${}^4I_{13/2}$ ,  $\sigma$  — эффективное сечение возбуждения  $\text{Er}^{3+}$ ,  $\tau$  — время жизни  $\text{Er}^{3+}$  в возбужденном состоянии,  $j$  — плотность тока накачки,  $q$  — заряд электрона,  $\tau_{\text{on}}$  — время нарастания ЭЛ, которое определяется выражением

$$\frac{1}{\tau_{\text{on}}} = \frac{\sigma j}{q} + \frac{1}{\tau}. \quad (3)$$

Поскольку интенсивность ЭЛ ионов эрбия  $\text{EL} \sim N^* / \tau_{\text{rad}}$ , где  $\tau_{\text{rad}}$  — излучательное время жизни ионов  $\text{Er}^{3+}$  в возбужденном состоянии, выражение (2) может быть записано в виде более удобном для описания результатов кинетических измерений

$$\text{EL} = \text{EL}_{\text{max}} \frac{\sigma \tau j / q}{1 + \sigma \tau j / q} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\text{on}}}\right) \right], \quad (4)$$

где  $\text{EL}_{\text{max}}$  — максимальная интенсивность ЭЛ, соответствующая переводу всех ионов  $\text{Er}^{3+}$  в возбужденное состояние. Зависимость установившейся интенсивности



**Рис. 3.** Кривые нарастания ЭЛ при включении тока накачки, нормированные на установившееся значение интенсивности ЭЛ. Температура 300 К. Около кривых указаны значения плотности тока накачки (в  $\text{A}/\text{cm}^2$ ).

эрбиевой ЭЛ (при  $t \rightarrow \infty$ ) от плотности тока накачки имеет вид

$$EL = EL_{\max} \frac{\sigma \tau j / q}{1 + \sigma \tau j / q}. \quad (5)$$

На рис. 3 приведены кривые нарастания  $EL(t)$  при различной плотности тока накачки, нормированные на установившееся значение интенсивности ЭЛ  $EL(t \rightarrow \infty)$ . Видно, что в соответствии с выражением (3) время нарастания  $\tau_{\text{on}}$  уменьшается с ростом плотности тока накачки. Для теоретического описания кривых нарастания  $EL(t)$  мы использовали следующее выражение:

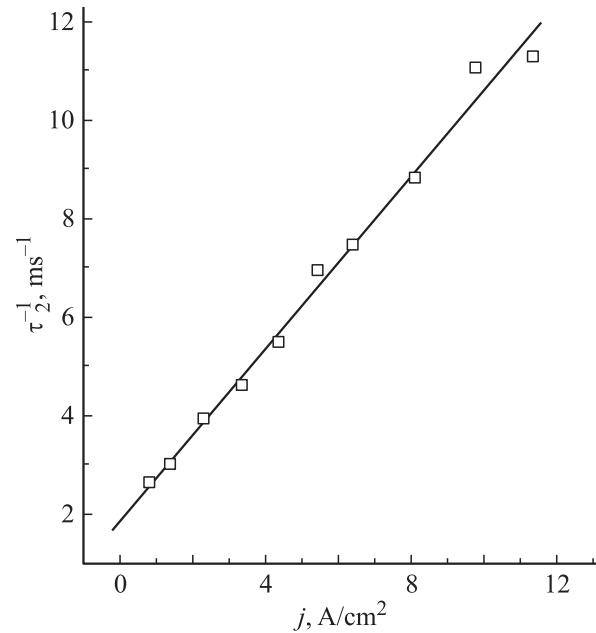
$$EL(t) = A_0 + A_1 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) \right] + A_2 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \right]. \quad (6)$$

Здесь первое слагаемое — постоянная составляющая, определяемая схемой формирования сигнала; второе слагаемое описывает нарастание интенсивности горячей ЭЛ, третье — нарастание эрбиевой ЭЛ. Поскольку время нарастания горячей ЭЛ  $\sim 200$  ns [8], постоянная  $\tau_1$  в наших экспериментах определяется временем отклика приемника и составляет величину  $\sim 15$   $\mu\text{s}$ . Исключение фильтра из оптической схемы эксперимента не меняло времен нарастания  $\tau_1$  и  $\tau_2$ , но изменяло соотношение амплитуд  $A_1$  и  $A_2$  в сторону увеличения амплитуды быстрой компоненты  $A_1$ , что подтверждает наше предположение о том, что быстрая компонента в кривой нарастания  $EL(t)$  соответствует нарастанию интенсивности горячей ЭЛ.

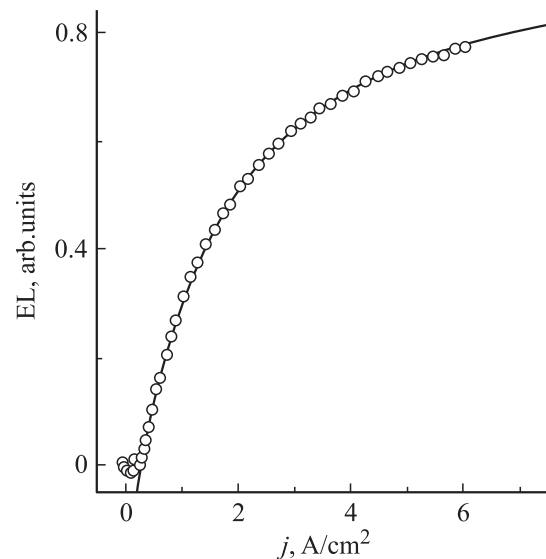
На рис. 4 приведена зависимость обратного времени нарастания ЭЛ ионов  $\text{Er}^{3+}$  от плотности тока накачки. Зависимость линейна. Используя выражение (3) для

описания экспериментальных данных, получаем следующие значения для эффективного сечения возбуждения и времени жизни:  $\sigma = 1.4 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^2$ ,  $\tau = 540 \mu\text{s}$ .

Произведение  $\sigma \tau$  эффективного сечения возбуждения и времени жизни возбужденного состояния иона  $\text{Er}^{3+}$  может быть независимо определено из измерений зависимости стационарной (установившейся) интенсивности эрбиевой ЭЛ от плотности тока накачки. На рис. 5 для того же диода приведена зависимость ин-



**Рис. 4.** Зависимость обратного времени нарастания ЭЛ ионов  $\text{Er}^{3+}$  от плотности тока накачки. Точки — эксперимент, прямая линия — описание данных эксперимента выражением (3).



**Рис. 5.** Зависимость интенсивности ЭЛ ионов  $\text{Er}^{3+}$  от плотности тока накачки. Точки — эксперимент, сплошная кривая — описание данных эксперимента выражением (5).

тенсивности эрбиевой ЭЛ от плотности тока накачки и описание ее выражением (5). Данные эксперимента хорошо описываются выражением (5), это позволило оценить величину произведения  $\sigma\tau = 6.9 \cdot 10^{-20} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}$ . Отметим хорошее согласие полученного результата с данными по кинетике: прямое перемножение величин  $\sigma$  и  $\tau$ , определенных из кинетических измерений, дает  $\sigma\tau = 7.6 \cdot 10^{-20} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}$ .

Таким образом, ЭЛ-диоды на основе Si:Er со смешанным или близким к смешанному характером пробоя ОПЗ и ударным механизмом возбуждения ионов Er<sup>3+</sup>, полученные методом СМЛЭ, по эффективности возбуждения эрбиевой ЭЛ незначительно уступают имплантационным ЭЛ-диодам с лавинным характером пробоя ( $\sigma = 2.3 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^2$ ,  $\tau = 380 \mu\text{s}$  [9]), что соответствует ранее высказанному утверждению об увеличении эффективности возбуждения эрбиевой ЭЛ по мере усиления лавинной компоненты в токе пробоя диода [5], и заметно превосходят ЭЛ-диоды с туннельным характером пробоя как по сечению возбуждения, так и по времени жизни возбужденного состояния ( $\sigma = 6 \cdot 10^{-17} \text{ cm}^2$ ,  $\tau = 100 \mu\text{s}$  [7]). Меньшее время жизни Er<sup>3+</sup> в туннельных диодах вызвано, по-видимому, более высоким уровнем легирования (по сравнению с лавинными и смешанными диодами) и, следовательно, большей концентрацией дефектов.

## Список литературы

- [1] В.П. Кузнецов, Р.А. Рубцова. ФТП **34**, 5, 519 (2000).
- [2] B. Andreev, V. Chalkov, O. Gusev, A. Emel'yanov, Z. Krasil'nik, V. Kuznetsov, P. Pak, V. Shabanov, V. Shengurov, V. Shmagin, N. Sobolev, M. Stepikhova, S. Svetlov. Nanotechnology **13**, 1, 97 (2002).
- [3] Z.F. Krasil'nik, V.Ya. Aleshkin, B.A. Andreev, O.B. Gusev, W. Jantsch, L.V. Krasilnikova, D.I. Kryzhkov, V.P. Kuznetsov, V.G. Shengurov, V.B. Shmagin, N.A. Sobolev, M.V. Stepikhova, A.N. Yablonsky. In: Towards the First Silicon Laser / Ed. L. Pavesi et al. Kluwer Academic Publ. (2003). P. 445.
- [4] Б.А. Андреев, Т. Грегоркевич, З.Ф. Красильник, В.П. Кузнецов, Д.И. Курицын, М.В. Степихова, В.Г. Шенгуров, В.Б. Шмагин, А.Н. Яблонский, В. Янч. Изв. РАН. Сер. физ. **67**, 2, 273 (2003).
- [5] В.Б. Шмагин, Д.Ю. Ремизов, З.Ф. Красильник, В.П. Кузнецов, В.Н. Шабанов, Л.В. Красильникова, Д.И. Крыжков, М.Н. Дроздов. ФТТ **46**, 1, 110 (2004).
- [6] F.G. Chynoweth, K.G. McKay. Phys. Rev. **102**, 2, 369 (1956).
- [7] S. Coffa, G. Franzo, F. Priolo. Appl. Phys. Lett. **69**, 14, 2077 (1996).
- [8] W.-X. Ni, C.-X. Du, K.B. Joelsson, G. Pozina, G.V. Hansson. J. Lumin. **80**, 1-4, 309 (1999).
- [9] N.A. Sobolev, Yu.A. Nikolaev, A.M. Emel'yanov, K.F. Shtel'makh, P.E. Khakuashev, M.A. Trishhenkov. J. Lumin. **80**, 1-4, 315 (1999).