

Влияние характера пробоя $p-n$ -перехода на интенсивность и эффективность возбуждения электролюминесценции ионов Er^{3+} в эпитаксиальных слоях Si:Er , полученных методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии

© В.Б. Шмагин, Д.Ю. Ремизов, З.Ф. Красильник, В.П. Кузнецов,
В.Н. Шабанов, Л.В. Красильникова, Д.И. Крыжков, М.Н. Дроздов

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

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

На примере серии светоизлучающих диодных структур Si:Er/Si с плавно меняющимся механизмом пробоя $p-n$ -перехода, полученных методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии, исследовано влияние механизма пробоя на электролюминесцентные свойства структур. Показано, что максимальные интенсивности и эффективность возбуждения электролюминесценции ионов Er^{3+} при комнатной температуре достигаются в диодных структурах, работающих в режиме смешанного пробоя.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 02-02-16773), Минпромнауки РФ (Госконтракт № 40.020.1.1.1159).

В течение двадцати лет, прошедших со времени первого наблюдения фото- (ФЛ) и электролюминесценции (ЭЛ) иона Er^{3+} , внедренного в матрицу монокристаллического кремния (переход ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ в $4f$ -оболочке иона Er^{3+}) [1,2], достигнуты заметные успехи в технологии получения светоизлучающих структур на основе Si:Er и понимании механизмов возбуждения и гашения люминесценции в них. Установлено, в частности, что при комнатной температуре наиболее эффективен ударный механизм возбуждения ЭЛ ионов Er^{3+} в диодных структурах, работающих в режиме пробоя $p-n$ -перехода [3]. Реализованы ЭЛ-диоды, работающие в режимах туннельного [4] и лавинного [5] пробоя $p-n$ -перехода, определены сечения возбуждения ионов Er^{3+} , составившие $6 \cdot 10^{-17}$ [6] и $2.3 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^2$ [7] для диодов, работающих в туннельном и лавинном режимах пробоя соответственно.

Вместе с тем вопрос о влиянии механизма пробоя $p-n$ -перехода на характер и эффективность возбуждения ЭЛ в диодных структурах на основе Si:Er исследован, с нашей точки зрения, недостаточно. В частности, не выделены области преимуществ туннельного и лавинного режимов пробоя, не исследованы ЭЛ-диоды, работающие в области смешанного пробоя $p-n$ -перехода.

Цель настоящей работы — на примере серии светоизлучающих диодных структур Si:Er/Si с плавным изменением характера пробоя, полученных методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии (СМЛЭ) [8], исследовать влияние режима пробоя $p-n$ -перехода на излучательные свойства структур.

1. Методика эксперимента

Исследованные в настоящей работе диодные ЭЛ-структуры типа pp^+nn^+ выращены методом СМЛЭ на подложках $p\text{-Si:В}$ с ориентацией (100) и удельным

сопротивлением $15 \Omega \cdot \text{cm}$. Толщина слоя $n\text{-Si:Er}$ составляла $\sim 1 \mu$, концентрация носителей менялась от $3 \cdot 10^{16}$ до $1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, температура роста была $\sim 520^\circ\text{C}$, концентрация $\text{Er} \sim 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Светодиоды изготавливались по стандартной меза-технологии, площадь мезы составляла 2.5 mm^2 , 70% ее площади было свободно для выхода излучения.

Спектры ЭЛ регистрировались с использованием дифракционного монохроматора МДР-23 и инфракрасного фотоприемника InGaAs , охлаждаемого до температуры жидкого азота, в диапазоне $1.0\text{--}1.6 \mu$ 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. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) диодов измерялись в импульсном режиме. Напряжение пробоя U_b определялось экстраполяцией прямолинейного участка обратной ветви ВАХ до пересечения с осью напряжений.

2. Результаты эксперимента и их обсуждение

В таблице приведены напряжения пробоя U_b исследованных диодных структур. Сравнение величин U_b , измеренных при $T = 300$ и 77 K , позволяет констатировать плавный переход от туннельного механизма пробоя (№ 4A1) к лавинному (№ 3A3) в исследованной серии диодов. Отметим, что все диоды получены в одном ростовом опыте. Методика выращивания эпитаксиальных структур, в том числе светоизлучающих структур Si:Er/Si , с плавным изменением по длине структуры толщин эпитаксиальных слоев и концентрации носителей заряда в них изложена в [9].

Напряжения пробоя диодных структур

Номер структуры	U_b, V	
	$T = 300 K$	$T = 77 K$
4A1	2.7	5.1
4A2	3.0	5.4
4A3	3.5	5.6
4A4	3.9	6.0
3A0	5.0	6.6
3A1	6.8	7.1
3A2	8.4	7.8
3A3	11.1	9.6

На рис. 1 показано, как меняется характер спектра ЭЛ при переходе от туннельного к лавинному механизму пробоя. В серии диодов с преобладанием туннельного механизма пробоя (№ 4A1–3A0) с ростом U_b (под величиной U_b , если не оговорено иное, будем подразумевать напряжение пробоя структуры при комнатной температуре) наблюдается увеличение интенсивности спектра в целом при постоянном отношении интенсивности эрбиевой ЭЛ (пик на длине волны 1.54μ) к

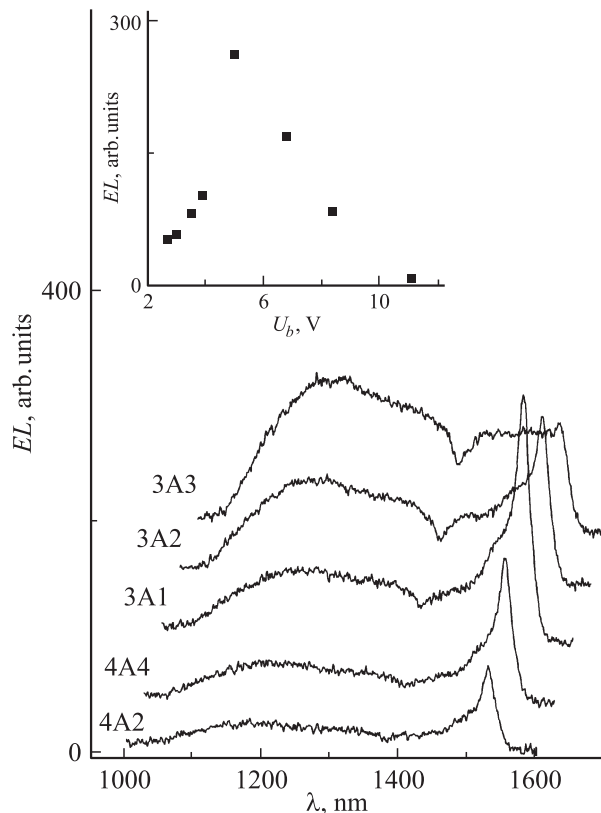


Рис. 1. Спектры ЭЛ диодных структур Si:Er/Si при $T = 300 K$ и плотности тока накачки $8 A/cm^2$. Для удобства восприятия спектры разнесены по осям абсцисс и ординат. На вставке приведена зависимость интенсивности ЭЛ ионов Er^{3+} от напряжения пробоя диодной структуры при постоянной плотности тока накачки.

интенсивности горячей ЭЛ (широкая полоса с видимым максимумом на длине волны 1.2μ). При дальнейшем увеличении U_b (диоды № 3A1–3A3 с преобладанием лавинного механизма пробоя) наблюдается перераспределение спектральной плотности мощности излучения: интенсивность эрбиевой ЭЛ уменьшается при одновременном увеличении интенсивности горячей ЭЛ. В целом зависимость интенсивности эрбиевой ЭЛ от напряжения пробоя диодной структуры (см. вставку на рис. 1) имеет вид асимметричной колоколообразной кривой с максимумом интенсивности ЭЛ, достигаемым в структурах с напряжением пробоя $U_b \sim 5 V$, что соответствует режиму смешанного пробоя $p-n$ -перехода [10]. Обсудим возможные причины уменьшения интенсивности эрбиевой ЭЛ в диодных структурах как с большими, так и с меньшими напряжениями пробоя.

2.1. Структуры с преобладанием туннельного механизма пробоя ($U_b \leq 5 V$). Известно, что при однородном распределении плотности тока накачки по площади $p-n$ -перехода зависимость интенсивности ЭЛ ионов Er^{3+} от плотности тока накачки описывается следующим выражением [3]:

$$EL \propto \frac{\sigma \tau \frac{j - j_{th}}{q}}{1 + \sigma \tau \frac{j - j_{th}}{q}}, \quad (1)$$

где EL — интенсивность ЭЛ, j — плотность тока накачки, j_{th} — его пороговая плотность, q — элементарный заряд, σ — сечение возбуждения, τ — время жизни оптически активного иона Er^{3+} в возбужденном состоянии $^4I_{13/2}$. Произведение $\sigma \tau$ характеризует скорость выхода ЭЛ в режим насыщения при увеличении плотности тока накачки и является мерой эффективности возбуждения ЭЛ.

Для всех диодов с преобладанием туннельного механизма пробоя (№ 4A1–3A0) наблюдается хорошее согласие полученных теоретически и экспериментально зависимостей $EL(j)$ (рис. 2, а), т.е. выражение (1) с достаточной точностью описывает процессы возбуждения и релаксации ионов Er^{3+} в диодах с туннельным механизмом пробоя. Наблюдается плавное возрастание величины $\sigma \tau$ (см. вставку на рис. 2, а) при увеличении напряжения пробоя: $\sigma \tau$ возрастает от $1.4 \cdot 10^{-20} cm^2 \cdot s$ при $U_b = 2.7 V$ до $9.4 \cdot 10^{-20} cm^2 \cdot s$ при $U_b = 5.0 V$, что связано, по-видимому, с разогревом электронного газа по мере увеличения напряжения пробоя ЭЛ-диода.

Анализ данных, приведенных на рис. 2, а, показывает, что при фиксированной плотности тока накачки структуры с меньшей эффективностью возбуждения ЭЛ (с меньшим значением $\sigma \tau$) обнаруживают и меньшую интенсивность ЭЛ, а отмеченное выше уменьшение интенсивности ЭЛ ионов Er^{3+} в туннельных диодах с малыми напряжениями пробоя (левая ветвь зависимости $EL(U_b)$ на вставке к рис. 1) обусловлено снижением эффективности возбуждения ЭЛ.

2.2. Структуры с преобладанием лавинного механизма пробоя ($U_b \geq 7 V$). Изменения

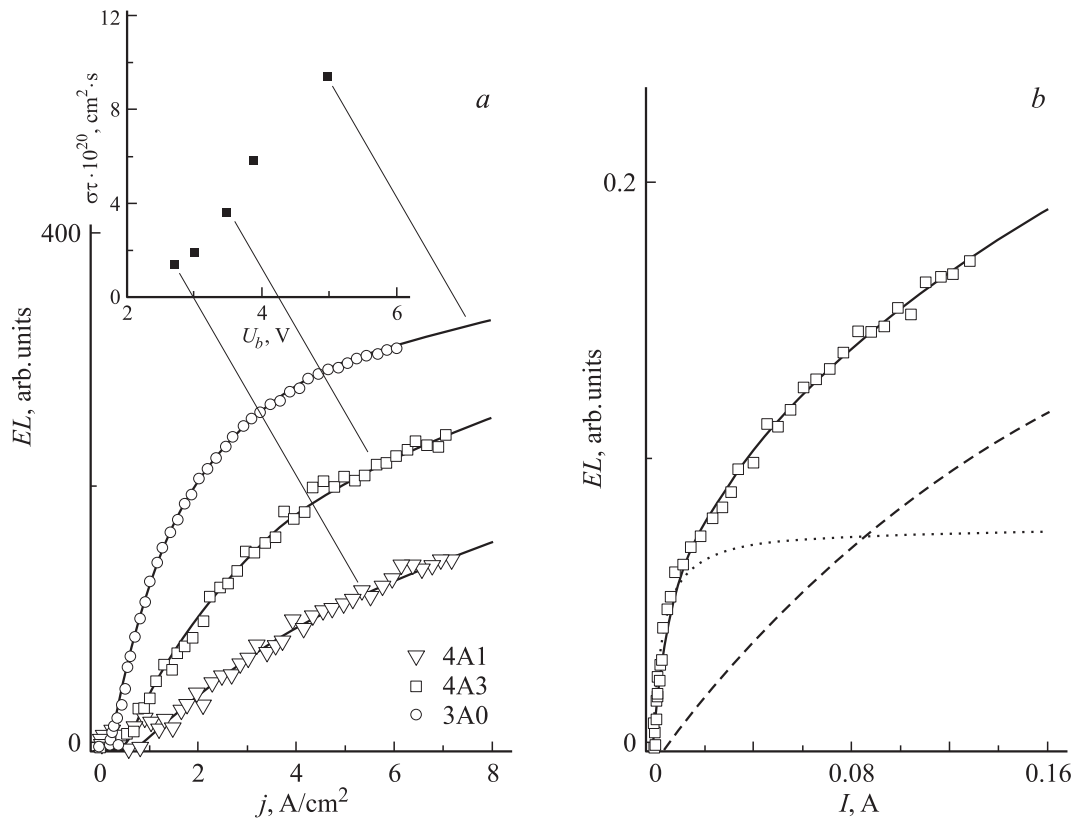


Рис. 2. Зависимость интенсивности эрбиевой ЭЛ от плотности тока накачки (*a*) и тока накачки (*b*) для диодных структур с преобладанием туннельного (*a*) и лавинного (*b*) механизмов пробоя. На вставке — зависимость величины $\sigma\tau$ от напряжения пробоя туннельной структуры. Штриховой и пунктирной линиями (часть *b*) показаны вклады каждого из слагаемых выражения (2) в описание экспериментальной зависимости $EL(I)$.

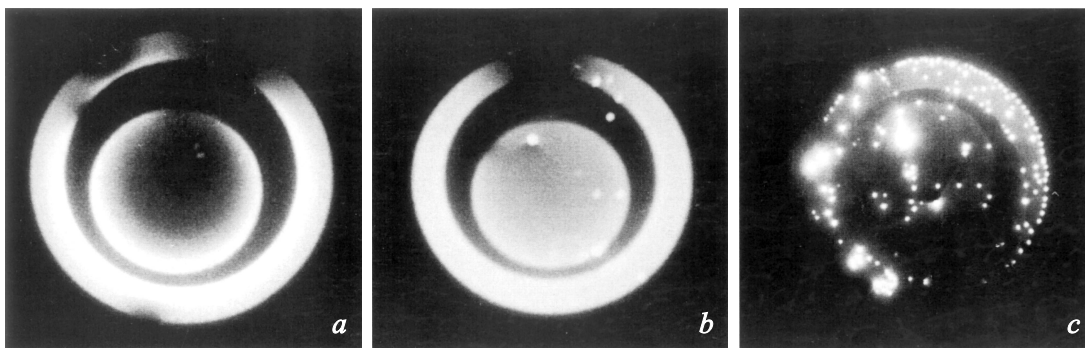


Рис. 3. Фотография излучения диодных структур Si:Er/Si в видимом диапазоне в режиме пробоя p - n -перехода. *a* — № 4A4, *b* — № 3A1, *c* — № 3A3.

в характере спектра ЭЛ (рис. 1) в диодных структурах с напряжением пробоя $U_b \geq 7$ В мы сопоставили с характером излучения диодов в видимом диапазоне длин волн, наблюдаемого с помощью микроскопа МБС-10 в режиме пробоя структуры (рис. 3). В серии диодов № 4A1–3A0 ($U_b \leq 5$ В) отмечается однородное свечение незакрытой металлом площади p - n -перехода (рис. 3, *a*), усиливающееся с увеличением напряжения пробоя. На поверхности диода № 3A1 ($U_b \approx 6.8$ В, рис. 3, *b*) видны отдельные ярко светящиеся точки (микроплазмы [11]). В диодах

№ 3A2 и 3A3 ($U_b \geq 8.4$ В) пробой p - n -перехода носит ярко выраженный неоднородный характер, на излучающей поверхности p - n -перехода в режиме пробоя наблюдается около сотни микроплазм (рис. 3, *c*). В режиме микроплазменного пробоя p - n -перехода ток накачки течет в основном по микроплазменным шнурам, и, следовательно, эффективность возбуждения ионов Er^{3+} в большей части области пространственного заряда, свободной от микроплазм, падает, что ведет к уменьшению интенсивности эрбиевой ЭЛ в целом. С нашей

точки зрения, заметное уменьшение интенсивности ЭЛ ионов Er^{3+} , наблюдаемое в диодах № 3А2 и 3А3 с преобладанием лавинного механизма пробоя (правая ветвь зависимости $EL(U_b)$ на вставке к рис. 1), обусловлено неоднородным характером пробоя $p-n$ -перехода в этих структурах и соответственно неоднородным распределением тока накачки по площади $p-n$ -перехода. Отметим, что возникновение микроплазм характерно для лавинного пробоя $p-n$ -перехода в кремнии [11].

Неоднородность протекания тока накачки по площади $p-n$ -перехода в структурах с развитым микроплазменным пробоем отражается также в характере зависимости $EL(I)$, где I — ток накачки (рис. 2, *b*). Удовлетворительное теоретическое описание зависимостей $EL(I)$ для структур № 3А2 и 3А3 может быть достигнуто с помощью предположения о неоднородном протекании тока накачки по площади $p-n$ -перехода в этих структурах.

Допустим, что площадь $p-n$ -перехода может быть разбита на две области с однородным распределением плотности тока накачки в каждой из областей. Каждая область характеризуется проводимостью G_i , площадью A_i и пороговой плотностью тока накачки j_i^{th} . В этом случае зависимость интенсивности ЭЛ ионов Er^{3+} от суммарного тока накачки I может быть описана выражением

$$EL \propto A_1 \frac{\frac{\sigma\tau}{q} \left(\frac{G_1}{G_1+G_2} \frac{I}{A_1} - j_1^{\text{th}} \right)}{1 + \frac{\sigma\tau}{q} \left(\frac{G_1}{G_1+G_2} \frac{I}{A_1} - j_1^{\text{th}} \right)} + A_2 \frac{\frac{\sigma\tau}{q} \left(\frac{G_2}{G_1+G_2} \frac{I}{A_2} - j_2^{\text{th}} \right)}{1 + \frac{\sigma\tau}{q} \left(\frac{G_2}{G_1+G_2} \frac{I}{A_2} - j_2^{\text{th}} \right)}. \quad (2)$$

Из рис. 2, *b* видно, что зависимости $EL(I)$ для одного из лавинных диодов (№ 3А2) достаточно хорошо описываются выражением (2), что подтверждает наше предположение о неоднородном возбуждении ионов эрбия в структурах с явным преобладанием лавинного механизма пробоя.

Итак, исследованы ЭЛ-свойства диодных структур Si:Er/Si , излучающих в режиме пробоя $p-n$ -перехода. Показано, что ЭЛ-диоды, работающие в лавинном режиме пробоя или в режиме пробоя, близком к лавинному, характеризуются на порядок большей эффективностью возбуждения ЭЛ ионов Er^{3+} по сравнению с туннельными диодами. С другой стороны, углубление в область лавинного пробоя ведет к резко неоднородному распределению плотности тока накачки по площади $p-n$ -перехода (микроплазменный пробой) и, как следствие, к заметному уменьшению интенсивности ЭЛ ионов Er^{3+} . Более предпочтительны, с нашей точки зрения, ЭЛ-диоды, работающие в режиме смешанного пробоя, в которых высокие интенсивность и эффективность возбуждения ЭЛ ионов Er^{3+} оптимально сочетаются с однородным характером пробоя $p-n$ -перехода.

Список литературы

- [1] H. Ennen, J. Schneider, G. Pomrenke, A. Axmann. Appl. Phys. Lett. **43**, 943 (1983).
- [2] H. Ennen, G. Pomrenke, A. Axmann, W. Haydl, J. Schneider. Appl. Phys. Lett. **46**, 381 (1985).
- [3] G. Franzo, S. Coffà, F. Priolo, C. Spinella. J. Appl. Phys. **81**, 2784 (1997).
- [4] G. Franzo, F. Priolo, S. Coffà, A. Polman, A. Carnera. Appl. Phys. Lett. **64**, 2235 (1994).
- [5] N.A. Sobolev, A.M. Emel'yanov, K.F. Shtel'makh. Appl. Phys. Lett. **71**, 1930 (1997).
- [6] S. Coffà, G. Franzo, F. Priolo. Appl. Phys. Lett. **69**, 2077 (1996).
- [7] N.A. Sobolev, Yu.A. Nikolaev, A.M. Emel'yanov, K.F. Shtel'makh, P.E. Khakuashev, M.A. Trishhenkov. J. Lumin. **80**, 315 (1999).
- [8] В.П. Кузнецов, Р.А. Рубцова. ФТП **34**, 519 (2000).
- [9] Е.Н. Морозова, В.Б. Шмагин, З.Ф. Красильник, А.В. Антонов, В.П. Кузнецов, Р.А. Рубцова. Изв. РАН. Сер. физ. **67**, 283 (2003).
- [10] С. Зи. Физика полупроводниковых приборов. Мир, М. (1984). Ч. 1. С. 106.
- [11] И.В. Грехов, Ю.Н. Сержкин. Лавинный пробой $p-n$ -перехода в полупроводниках. Энергия, Л. (1980). 152 с.