

# Электрические и люминесцентные свойства кремниевых диодных светоизлучающих структур $p^+/n^+/n\text{-Si:Er}$ туннельно-пролетного типа

© В.Б. Шмагин<sup>¶</sup>, В.П. Кузнецов\*, К.Е. Кудрявцев, С.В. Оболенский<sup>+</sup>, В.А. Козлов, З.Ф. Красильник

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

\* Научно-исследовательский физико-технический институт

Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,  
603950 Нижний Новгород, Россия

<sup>+</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 8 апреля 2010 г. Принята к печати 20 апреля 2010 г.)

Представлены результаты экспериментальных исследований электрофизических и люминесцентных свойств кремниевых диодных светоизлучающих структур  $p^+/n^+/n\text{-Si:Er}$  туннельно-пролетного типа, излучающих при обратном смещении в режиме пробоя  $p^+/n^+$ -перехода. Определены мощность, излучаемая в диапазоне  $\lambda \approx 1.5$  мкм ( $\sim 5$  мкВт), внешняя квантовая эффективность ( $\sim 10^{-5}$ ) и эффективность возбуждения ионов эрбия ( $\sim 2 \cdot 10^{-20}$  см<sup>2</sup>с) при комнатной температуре. Показано, что при одной и той же эффективности возбуждения туннельно-пролетные светодиоды превосходят диодные структуры типа  $p^+/n\text{-Si:Er}$  по мощности излучения. Проведено сопоставление экспериментальных результатов с модельными представлениями о работе туннельно-пролетного светодиода. Обсуждаются факторы, ограничивающие интенсивность электролюминесценции и эффективность ударного возбуждения ионов эрбия в структурах данного типа.

## 1. Введение

Легирование кремния и других полупроводниковых материалов редкоземельными (РЗ) ионами весьма привлекательно с точки зрения оптоэлектронных приложений, поскольку открывает возможность создания оптически активных сред, характеризующихся узкой и температурно-независимой спектральной линией. Такие исключительные свойства материалов, легированных РЗ ионами, объясняются тем, что оптическая активность РЗ ионов обусловлена внутриатомными (внутриионными) переходами в частично заполненной  $4f$ -оболочке РЗ иона, экранированной внешними  $5s$ - и  $5p$ -оболочками от внешних воздействий. Интерес к кремнию, легированному эрбием, обусловлен, помимо прочего, перспективой создания на его основе светоизлучающих устройств, совместимых с кремниевой технологией и излучающих в одном из окон прозрачности волоконно-оптических линий связи: переход  $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$  в  $4f$ -оболочке иона  $\text{Er}^{3+}$  на длине волны  $\lambda \approx 1.54$  мкм (см. обзоры [1–3]).

Исследования показали, что для достижения высокой интенсивности электролюминесценции (ЭЛ) ионов  $\text{Er}^{3+}$  при комнатной температуре предпочтителен ударный механизм возбуждения ионов  $\text{Er}^{3+}$ , реализуемый в диодных структурах типа  $p^+/n\text{-Si:Er}$ , излучающих при обратном смещении в режиме пробоя  $p/n$ -перехода [4,5]. При ударном возбуждении удается в значительной степени подавить безызлучательную релаксацию возбужденных ионов  $\text{Er}^{3+}$  и тем самым заметно уменьшить температурное гашение эрбиевой люминесценции.

Основной недостаток диодных структур типа  $p^+/n\text{-Si:Er}$  — малая ширина области пространственного

заряда (ОПЗ) в режиме пробоя  $p/n$ -перехода, которая при ударном механизме возбуждения ионов  $\text{Er}^{3+}$  определяет размеры излучающей области и, следовательно, интенсивность ЭЛ. Увеличение ширины ОПЗ, достигаемое в структурах типа  $p^+/n\text{-Si:Er}$  снижением уровня легирования слоя  $n\text{-Si:Er}$ , вызывает трансформацию туннельного механизма пробоя  $p/n$ -перехода в лавинный и, как следствие, резкое снижение интенсивности ЭЛ ионов  $\text{Er}^{3+}$  [6,7]. К факторам, вызывающим уменьшение интенсивности ЭЛ ионов  $\text{Er}^{3+}$  в диодах с лавинным механизмом пробоя  $p/n$ -перехода, относят ударное девозбуждение ионов эрбия горячими электронами [8], неоднородное распределение тока накачки по площади  $p/n$ -перехода [6], слабое электрическое поле в ОПЗ диодной структуры [7].

Ранее было показано, что ограничение, связанное с развитием лавинного пробоя при расширении ОПЗ диодных структур типа  $p^+/n\text{-Si:Er}$ , можно обойти, используя диодные структуры со специальным профилем легирования, в частности диодные структуры туннельно-пролетного типа  $p^+/n^+/n\text{-Si:Er}$  [9,10]. Перспективность светоизлучающих структур типа  $p^+/n^+/n\text{-Si:Er}$  подтверждается результатами численного моделирования [11] и первыми наблюдениями ЭЛ ионов  $\text{Er}^{3+}$  в диодных структурах типа  $p^+/n^+/n\text{-Si:Er}$ , о чем сообщалось в [12,13].

Результаты первых исследований на туннельно-пролетных светодиодах подтвердили правильность наших представлений о работе туннельно-пролетной структуры и выявили сильную зависимость свойств туннельно-пролетных структур (электрофизических и люминесцентных) от толщины  $d$  тонкого высоколегированного слоя  $n^+\text{-Si}$  [13]. Вместе с тем более поздние исследования, направленные на установление факторов, ограничи-

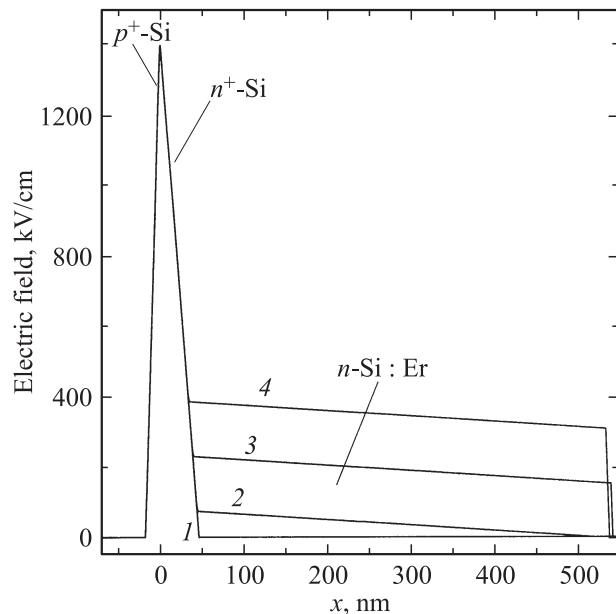
<sup>¶</sup> E-mail: shm@ipm.sci-nnov.ru

вающих интенсивность эрбиевой ЭЛ и квантовую эффективность туннельно-пролетных светодиодов, показали, что значительная часть экспериментов, выполненных на туннельно-пролетных светодиодах, не обнаруживает анонсированной в [13] резкой колоколообразной зависимости интенсивности эрбиевой ЭЛ от толщины слоя  $n^+$ -Si. В данном сообщении обобщены результаты этих экспериментов, обсуждаются факторы, ограничивающие интенсивность ЭЛ и эффективность ударного возбуждения ионов эрбия в туннельно-пролетных светодиодах, результаты экспериментов сопоставлены с модельными представлениями о работе туннельно-пролетного светодиода.

## 2. Модельные представления о работе туннельно-пролетного светодиода

Исследования эрбиевой люминесценции в диодных структурах с различным профилем легирования и соответственно различным распределением электрического поля по ширине ОПЗ плоскостной диодной структуры позволили сформулировать представления об оптимальном распределении поля по ширине ОПЗ, которое позволило бы максимально увеличить интенсивность эрбиевой люминесценции при ударном механизме возбуждения ионов эрбия. Было показано, что распределение поля по ширине ОПЗ должно быть существенно неоднородным: узкая область сильного поля, прижатая к металлургической границе  $p/n$ -перехода, и достаточно широкая область слабого поля. Узкий  $p^+/n^+$ -переход (область сильного поля) работает в режиме туннельного пробоя и играет роль инжектора электронов. Назначение области слабого поля  $n$ -Si:Er — разогрев электронов до энергии  $E$ , необходимой для возбуждения иона эрбия в состоянии  $^4I_{13/2}$  ( $E \approx 0.8$  эВ), компенсация потерь энергии, связанных с рассеянием электронов на дефектах структуры и тепловых колебаниях решетки, и, наконец, ударное возбуждение ионов эрбия [9,10].

На рис. 1 приведены результаты расчета распределения электрического поля по ширине ОПЗ туннельно-пролетного светодиода при различной толщине  $d$  высоколегированного слоя  $n^+$ -Si. Максимальное поле в плоскости  $p^+/n^+$ -перехода, соответствующее развитию туннельного механизма пробоя  $p^+/n^+$ -перехода, полагалось равным 1400 кВ/см. При сравнительно большой толщине слоя  $n^+$ -Si (более 50 нм при уровне легирования слоя  $n^+$ -Si  $N_D \approx 2 \cdot 10^{18}$  см $^{-3}$ ) поле не проникает в слой  $n$ -Si:Er. При этом возбуждение эрбия минимально, интенсивность эрбиевой ЭЛ практически равна нулю. В диодах с меньшей толщиной слоя  $n^+$ -Si при увеличении обратного смещения поле проникает в слой  $n$ -Si:Er раньше, чем развивается туннельный пробой  $p^+/n^+$ -перехода. Причем с уменьшением толщины  $d$  поле в слое  $n$ -Si:Er в режиме пробоя структуры увеличивается. Соответственно возрастают средняя энергия электронов, транспортируемых через слой  $n$ -Si:Er, и вероятность ударного возбуждения ионов эрбия потоком

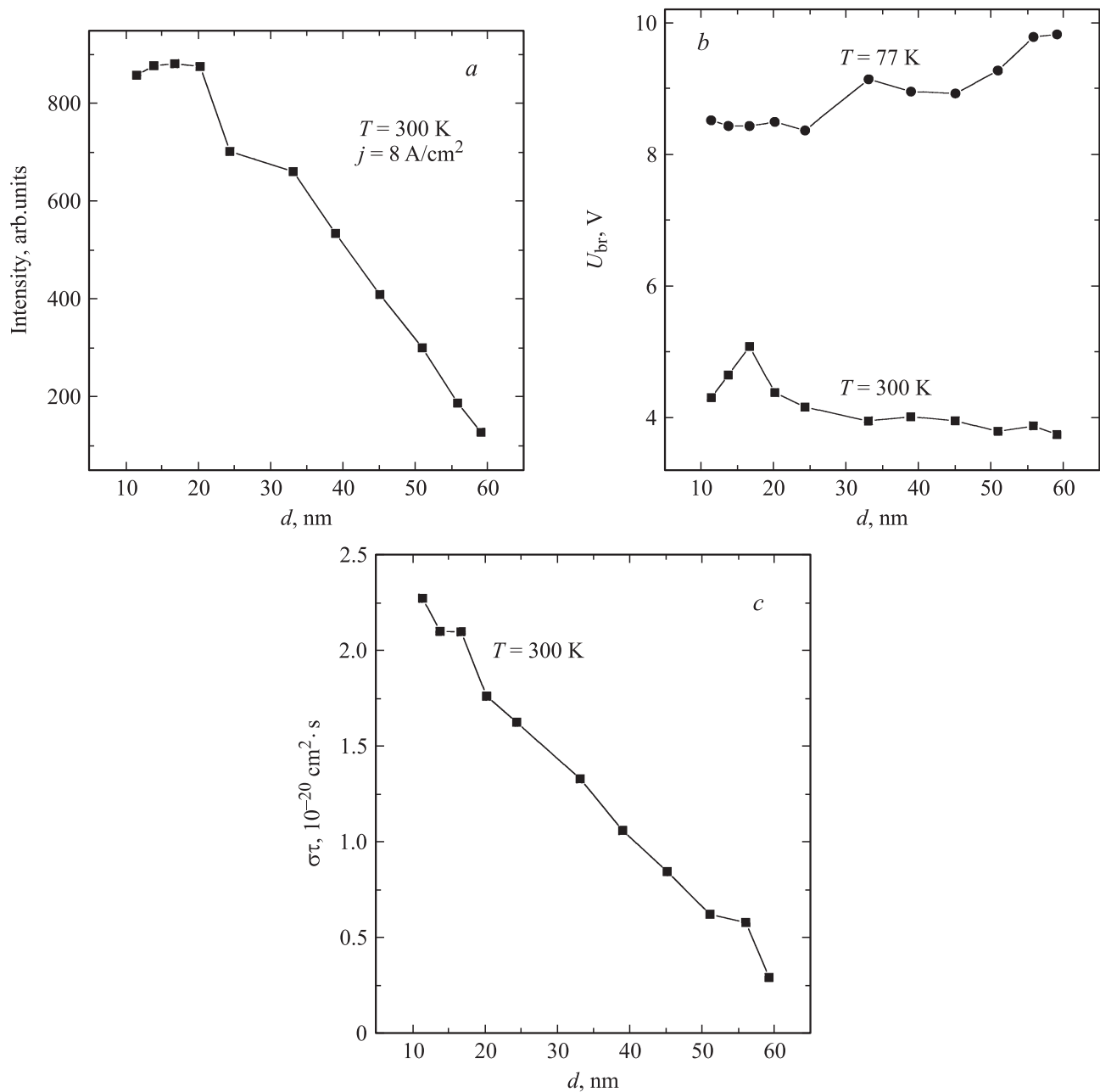


**Рис. 1.** Распределение электрического поля по ширине ОПЗ туннельно-пролетного светодиода, смещенного в обратном направлении. Начало оси абсцисс совмещено с плоскостью  $p^+/n^+$ -перехода. Концентрация свободных носителей заряда в слоях,  $10^{18}$  см $^{-3}$ :  $p^+$ -Si — 5,  $n^+$ -Si — 2,  $n$ -Si:Er — 0.01. Толщина слоя  $n^+$ -Si, нм: 1 — 50, 2 — 40, 3 — 35, 4 — 30.

горячих электронов; в конечном итоге возрастает интенсивность эрбиевой люминесценции. С другой стороны, чрезмерный рост электрического поля в слое  $n$ -Si:Er будет приводить к развитию лавинного пробоя слоя  $n$ -Si:Er и соответственно уменьшению интенсивности эрбиевой люминесценции. Таким образом, уменьшение толщины  $d$  слоя  $n^+$ -Si должно инициировать трансформацию туннельного пробоя  $p^+/n^+$ -перехода в лавинный пробой слоя  $n$ -Si:Er и достижение при некотором промежуточном значении  $d$  максимальной интенсивности эрбиевой люминесценции в режиме смешанного пробоя структуры.

## 3. Выращивание структур и методика эксперимента

Эпитаксиальные структуры  $p^+/n^+/n$ -Si:Er выращивались методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии (СМЛЭ) [14] на подложках  $p$ -Si:В с ориентацией (100) и удельным сопротивлением 10–12 Ом·см. Параметры слоев:  $p^+$ -Si ( $d \approx 0.2$  мкм,  $p \approx 10^{19}$  см $^{-3}$ );  $n^+$ -Si ( $d \approx 10$ –60 нм,  $n \approx 2 \cdot 10^{18}$  см $^{-3}$ );  $n$ -Si:Er ( $d \approx 0.5$  мкм,  $n \approx 10^{16}$  см $^{-3}$ ,  $N_{Er} \approx 3 \cdot 10^{18}$  см $^{-3}$ ). Сверху структура закрывалась подконтактным слоем  $n^+$ -Si ( $d \approx 0.4$  мкм,  $n \approx 10^{20}$  см $^{-3}$ ). Светодиоды для измерений ЭЛ изготавливались по обычной мезотехнологии, площадь мезы  $\sim 2.2$  мм $^2$ . На поверхность мезы наносился сетчатый металлический контакт, при этом 80% площади мезы было свободно для выхода излучения.



**Рис. 2.** Зависимости интенсивности эрбиевой электролюминесценции (а), напряжений пробоя при комнатной и азотной температурах (б) и эффективности возбуждения  $\sigma\tau$  (с) туннельно-пролетного светодиода от толщины  $d$  слоя  $n^+$ -Si.

Спектры ЭЛ возбуждались с использованием импульсной токовой накачки (длительность импульса  $\sim 4$  мс, частота повторения  $\sim 40$  Гц, амплитуда до 500 мА) и регистрировались в диапазоне 1.0–1.6 мкм с использованием дифракционного монохроматора МДР-23, инфракрасного фотоприемника InGaAs и методики синхронного накопления сигнала.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) диодов измерялись в импульсном режиме. Напряжение пробоя  $U_{br}$  определялось экстраполяцией прямолинейного участка обратной ветви ВАХ до пересечения с осью напряжений. Сопоставление напряжений пробоя, измеренных при

комнатной  $U_{br}^{300}$  и азотной  $U_{br}^{77}$  температурах, позволяло оценить близость механизма пробоя к туннельному ( $U_{br}^{300}/U_{br}^{77} < 1$ ), лавинному ( $U_{br}^{300}/U_{br}^{77} > 1$ ) или смешанному ( $U_{br}^{300}/U_{br}^{77} \approx 1$ ) [15].

#### 4. Результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлены результаты измерений интенсивности эрбиевой ЭЛ, напряжений пробоя  $U_{br}$  при комнатной и азотной температурах и эффективности возбуждения ионов  $Er^{3+}$  в зависимости от толщины  $d$

слоя  $n^+$ -Si. Под эффективностью возбуждения понимают произведение  $\sigma\tau$  сечения возбуждения  $\sigma$  на время жизни  $\tau$  иона  $\text{Er}^{3+}$  в возбужденном состоянии. Эффективность возбуждения определяется обычно из измерений зависимости интенсивности  $I$  эрбиевой ЭЛ от плотности тока накачки  $j$  (см., например, [16]):

$$I = I_{\max} \frac{\sigma\tau j/q}{1 + \sigma\tau j/q}, \quad (1)$$

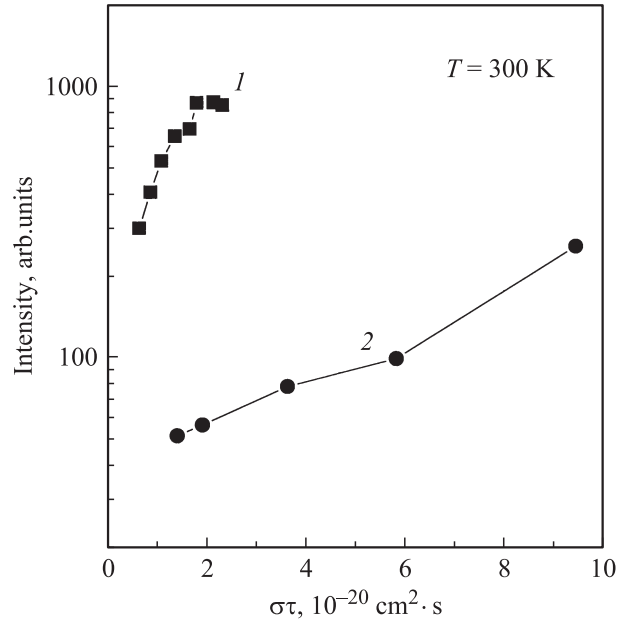
где  $q$  — элементарный заряд.

Полученные зависимости можно назвать типичными для большей части исследованных туннельно-пролетных структур. Вместе с тем они отличаются как от рассмотренных выше упрощенных модельных представлений о работе туннельно-пролетного светодиода, так и от результатов исследования туннельно-пролетных светодиодов [13].

Во-первых, уменьшение толщины  $d$  слоя  $n^+$ -Si не сопровождается кардинальным изменением механизма пробоя структуры: напряжения пробоя  $U_{\text{br}}^{300}$  и  $U_{\text{br}}^{77}$  в диапазоне толщин  $d = 10$ – $60$  нм меняются слабо, механизм пробоя остается туннельным ( $U_{\text{br}}^{300} < U_{\text{br}}^{77}$ ). Сближение величин  $U_{\text{br}}^{300}$  и  $U_{\text{br}}^{77}$  по мере уменьшения толщины  $d$  слоя  $n^+$ -Si свидетельствует в пользу того, что механизм пробоя структуры действительно трансформируется в сторону лавинного, но достаточно слабо.

Далее, в соответствии с вышеизложенными представлениями, при уменьшении толщины  $d$  слоя  $n^+$ -Si мы наблюдаем рост интенсивности эрбиевой ЭЛ, что мы связываем с ростом электрического поля в излучающем слое  $n$ -Si:Er [13]. Вместе с тем мы не наблюдаем ожидаемой колоколообразной зависимости интенсивности ЭЛ от толщины слоя  $n^+$ -Si, связываемой, как правило, с трансформацией механизма пробоя светодиода. В наших экспериментах уменьшение  $d$  вызывает лишь рост интенсивности ЭЛ с последующим выходом на плато. Отметим, что результаты, представленные на рис. 2, *a* (отсутствие колоколообразной зависимости) и рис. 2, *b* (сохранение туннельного механизма пробоя), вполне соответствуют друг другу.

Эффективность ударного возбуждения ионов эрбия в исследованных образцах возрастает по мере уменьшения толщины слоя  $n^+$ -Si (рис. 2, *c*), что мы также связываем с ростом электрического поля в слое  $n$ -Si:Er. Вместе с тем эффективность возбуждения остается достаточно низкой по сравнению с результатами, полученными при исследовании светодиодов типа  $p^+/n$ -Si:Er с постоянным уровнем легирования базы диода (слой  $n$ -Si:Er) и треугольным профилем распределения электрического поля по ширине ОПЗ ( $\sigma\tau \approx 10^{-19} \text{ см}^2 \cdot \text{с}$  [6]). На рис. 3 сопоставлены данные по измерению интенсивности эрбиевой ЭЛ и эффективности возбуждения ионов  $\text{Er}^{3+}$  в серии туннельно-пролетных светодиодов (настоящая работа) и серии светодиодных структур типа  $p^+/n$ -Si:Er [6]. В туннельно-пролетных светодиодах изменение эффективности возбуждения достигалось изменением толщи-

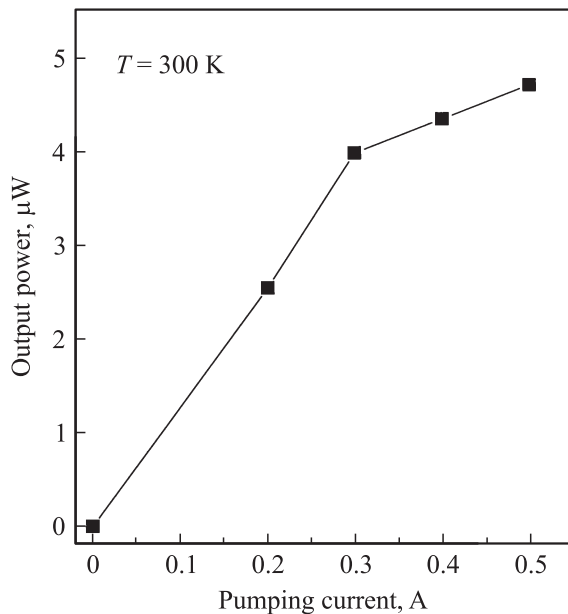


**Рис. 3.** Связь между эффективностью возбуждения  $\sigma\tau$  и интенсивностью электролюминесценции ионов эрбия для туннельно-пролетного светодиода (1) и светодиода типа  $p^+/n$ -Si:Er (2). Интенсивность электролюминесценции измерялась при токе накачки 200 мА.

ны  $d$  слоя  $n^+$ -Si, в диодных структурах  $p^+/n$ -Si:Er — изменением уровня легирования слоя  $n$ -Si:Er.

В светодиодах типа  $p^+/n$ -Si:Er диапазон изменения  $\sigma\tau$  достигает, как уже указывалось, порядка величины и, что важнее, эффективность возбуждения достигает величины  $\sigma\tau \approx 10^{-19} \text{ см}^2 \cdot \text{с}$  (светодиоды со смешанным механизмом пробоя), что является рекордным для структур типа  $p^+/n$ -Si:Er [6,17]. Видно, что по эффективности возбуждения туннельно-пролетные структуры уступают структурам типа  $p^+/n$ -Si:Er. Отметим, что уровень эффективности возбуждения, достигнутый в туннельно-пролетных светодиодах, соответствует эффективности возбуждения, характерной для светодиодов  $p^+/n$ -Si:Er, излучающих в режиме туннельного пробоя, что также соответствует результатам, представленным на рис. 2, *a* и *b*.

Вместе с тем при одной и той же эффективности возбуждения интенсивность ЭЛ туннельно-пролетного светодиода заметно выше по сравнению с интенсивностью ЭЛ диодных структур типа  $p^+/n$ -Si:Er. Наблюдаемое на рис. 3 различие в интенсивности эрбиевой ЭЛ из туннельно-пролетного и обычного светодиодов приблизительно в равной степени обусловлено двумя факторами: различием в ширине ОПЗ диодных структур ( $W \approx 50$ – $100$  нм в структуре  $p^+/n$ -Si:Er и  $W \approx 500$  нм в туннельно-пролетной структуре) и различием в форме верхнего металлического контакта. Дело в том, что светодиоды  $p^+/n$ -Si:Er были изготовлены с использованием кольцевого металлического контакта, а туннельно-пролетные светодиоды, как уже отмечалось, — с исполь-



**Рис. 4.** Зависимость мощности, излучаемой туннельно-пролетным светодиодом, от тока накачки.

зованием сетчатого контакта. Эксперименты показали, что сетчатый контакт предпочтителен как с точки зрения вывода излучения, так и с точки зрения эффективности накачки светодиода. С нашей точки зрения, различие в интенсивности эрбиевой ЭЛ, обусловленное различием в ширине ОПЗ диодных структур, составляет в разных светодиодах от 3 до 5 раз, что приблизительно соответствует отношению предполагаемых ширин ОПЗ.

На рис. 4 приведена зависимость мощности, излучаемой туннельно-пролетной структурой в сферу в диапазоне  $\sim 1.5$  мкм, от тока накачки. Излучение структуры собиралось из телесного угла  $\sim 0.3$  ср и фокусировалось на приемную площадку высокочувствительного ИК фотоприемника OPHIR-3A. Мощность, излучаемая в сферу, оценивалась в предположении изотропной диаграммы направленности структуры. При комнатной температуре мощность, излучаемая в сферу, составила  $\sim 4.7$  мкВт при токе накачки  $\sim 0.5$  А ( $j \approx 20$  А/см<sup>2</sup>), внешняя квантовая эффективность  $\sim 1.5 \cdot 10^{-5}$  при токе накачки до 0.2 А ( $j \approx 8$  А/см<sup>2</sup>).

Приведем основные выводы, вытекающие из рассмотрения результатов, представленных на рис. 2–4. Во-первых, нам действительно удалось расширить ОПЗ диодной светоизлучающей структуры (приблизительно до 0.5 мкм), не выходя из режима туннельного пробоя структуры, т.е. подтвердить тем самым справедливость основных модельных представлений о работе туннельно-пролетного светодиода. Уровень мощности излучения, достигнутый в туннельно-пролетном светодиоде, судя по литературным данным, является наивысшим для кремниевых диодных структур, легированных эрбием, излучающих при комнатной температуре.

Во-вторых, по эффективности ударного возбуждения ионов эрбия туннельно-пролетные светодиоды уступают светодиодам типа  $p^+/n\text{-Si:Er}$ . Причина низкой эффективности возбуждения ионов эрбия в туннельно-пролетном светодиоде, по-видимому, связана с невозможностью (по крайней мере для большинства светодиодов) увеличения электрического поля в слое  $n\text{-Si:Er}$  до величины, соответствующей смешанному механизму пробоя светодиода ( $\sim 300$  кВ/см), при котором туннельная и лавинная компоненты в равной степени были бы представлены в токе пробоя. В пользу этого предположения говорят также эксперименты по изучению влияния толщины  $d$  слоя  $n^+\text{-Si}$  на интенсивность эрбиевой ЭЛ и механизм пробоя туннельно-пролетных светодиодов, результаты которых представлены на рис. 2, *a* и *b*.

Согласно сложившимся представлениям, увеличение эффективности ударного возбуждения ионов  $\text{Er}^{3+}$ , наблюдаемое в светодиодах  $p^+/n\text{-Si:Er}$  при расширении ОПЗ и соответственно усилении лавинной компоненты в токе пробоя светодиода (см. рис. 3 и данные в [6]), обусловлено разогревом электронов, транспортируемых через диодную структуру в режиме ее пробоя, что подтверждается увеличением  $U_{br}$  [6,17]. В туннельно-пролетных светодиодах разогрев электронов, транспортируемых через слой  $n\text{-Si:Er}$ , равно как и увеличение напряжения пробоя  $U_{br}$ , должен вызываться уменьшением толщины слоя  $n^+\text{-Si}$  и соответствующим увеличением напряженности электрического поля в слое  $n\text{-Si:Er}$  (рис. 1). Причина, по которой уменьшение толщины слоя  $n^+\text{-Si}$  не позволяет увеличить напряженность электрического поля в слое  $n\text{-Si:Er}$  до величины, достаточной для разогрева электронов и трансформации туннельного механизма пробоя в смешанный, с нашей точки зрения, может быть связана с неоднородным распределением плотности ионизованных доноров и акцепторов в ОПЗ большей части исследованных диодных структур. Результаты предварительных вычислений дают основания полагать, что при малой толщине слоя  $n^+\text{-Si}$  флуктуации в распределении заряда ионизованных доноров и акцепторов в ОПЗ диодной структуры задерживают развитие лавинного пробоя. Данная гипотеза позволяет не только объяснить полученные в данной работе экспериментальные результаты, но и предположить, что их отличие от полученных ранее [13] обусловлено различием в интенсивности флуктуаций плотности заряда в ОПЗ светодиодных структур. В настоящее время проводятся исследования, имеющие целью подтвердить вышеупомянутую гипотезу.

## 5. Заключение

Таким образом, изготовлены и исследованы диодные светоизлучающие структуры туннельно-пролетного типа  $p^+/n^+/n\text{-Si:Er}$  с расширенной ОПЗ и повышенной мощностью излучения при комнатной температуре. По сравнению с исследованными ранее более простыми диодны-

ми структурами типа  $p^+/n\text{-Si:Er}$  туннельно-пролетные светодиоды показывают в 3–5 раз большую мощность излучения, но характеризуются меньшей эффективностью возбуждения. Факторы, определяющие низкую эффективность возбуждения ионов эрбия в туннельно-пролетных светодиодах, могут лежать как в области технологии, так и быть обусловленными особенностями развития электрического пробоя в диодных структурах с нанометровым масштабом легирования.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 09-02-00898), программ РАН и ФЦП (ГК № 02.740.11.0117).

## Список литературы

- [1] A. Polman. J. Appl. Phys., **82**, 1 (1997).
- [2] A.J. Kenyon. Semicond. Sci. Technol., **20**, R65 (2005).
- [3] N.Q. Vinh, N.N. Ha, T. Gregorkiewicz. Proc. IEEE, **97**, 1269 (2009).
- [4] G. Franzo, F. Priolo, S. Coffa, A. Polman, A. Carnera. Appl. Phys. Lett., **64**, 2235 (1994).
- [5] J. Stimmer, A. Reittinger, J.F. Nutzel, H. Holzbrecher, Ch. Buchal, G. Abstreiter. Appl. Phys. Lett., **68**, 3290 (1996).
- [6] 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**, 110 (2004).
- [7] В.П. Кузнецов, Ю.Ю. Ремизов, В.Н. Шабанов, Р.А. Рубцова, М.В. Степихова, Д.И. Крыжков, А.Н. Шушунов, О.В. Белова, З.Ф. Красильник, Г.А. Максимов. ФТП, **40**, 868 (2006).
- [8] G.V. Hansson, W.-X. Ni, C.-X. Du, A. Elfving, F. Duteil. Appl. Phys. Lett., **78**, 2104 (2001).
- [9] В.Б. Шмагин, Ю.Ю. Ремизов, С.В. Оболенский, Д.И. Крыжков, М.Н. Дроздов, З.Ф. Красильник. ФТТ, **47**, 120 (2005).
- [10] V.B. Shmagin, S.V. Obolensky, F.Yu. Remizov, V.P. Kuznetsov, Z.F. Krasilnik. IEEE J. Select. Topics Quant. Electron., **12**, 1556 (2006).
- [11] S.V. Obolensky, V.B. Shmagin, V.A. Kozlov, K.E. Kudryavtsev, D.Yu. Remizov, Z.F. Krasilnik. Semicond. Sci. Technol., **21**, 1459 (2006).
- [12] Д.Ю. Ремизов, З.Ф. Красильник, В.П. Кузнецов, С.В. Оболенский, В.Б. Шмагин. Матер. X симп. „Нанозлектроника и наноэлектроника“ (Нижний Новгород, Россия, 2006) т. 2, с. 348.
- [13] В.П. Кузнецов, Д.Ю. Ремизов, В.Б. Шмагин, К.Е. Кудрявцев, В.Н. Шабанов, С.В. Оболенский, О.В. Белова, М.В. Кузнецов, А.В. Корнаухов, Б.А. Андреев, З.Ф. Красильник. ФТП, **41**, 1329 (2007).
- [14] В.П. Кузнецов, Р.А. Рубцова. ФТП, **34**, 519 (2000).
- [15] С. Зи. Физика полупроводниковых приборов (М., Мир, 1984) ч. 1, гл. 2, с. 106.
- [16] G. Franzo, S. Coffa, F. Priolo, C. Spinella. J. Appl. Phys., **81**, 2784 (1997).
- [17] N.A. Sobolev, Yu.A. Nikolaev, A.M. Emel'yanov, K.F. Shtel'makh, P.E. Khakuashev, M.A. Trishenkov. J. Luminesc., **80**, 315 (1999).

Редактор Т.А. Полянская

## Electrical and luminescence properties of silicon-based tunnel transit-time light-emitting diodes $p^+/n^+/n\text{-Si:Er}$

V.B. Shmagin, V.P. Kuznetsov\*, K.E. Kudryavtsev, S.V. Obolensky+, V.A. Kozlov, Z.F. Krasil'nik

Institute for Physics of Microstructures,  
Russian Academy of Sciences,  
603950 Nizhny Novgorod, Russia

\* Physico-Technical Research Institute  
of Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,  
603950 Nizhny Novgorod, Russia

+ Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,  
603950 Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract** Results of experimental investigation into electrical and luminescence properties of silicon-based tunnel transit-time light-emitting diodes  $p^+/n^+/n\text{-Si:Er}$ , operating under reverse bias of the  $p/n$  junction in breakdown regime are presented. Room temperature emitting power at the wavelength of  $1.5\ \mu\text{m}$  ( $\sim 5\ \mu\text{W}$ ), external quantum efficiency ( $\sim 10^{-5}$ ) and excitation efficiency ( $\sim 2 \cdot 10^{-20}\ \text{cm}^2\text{s}$ ) are determined. At the same excitation efficiency, tunnel transit-time light-emitting diodes demonstrate higher emitting power, being compared to  $p^+/n\text{-Si:Er}$  diodes. Experimental results are compared to model predictions for these structures. Factors, limiting electroluminescence intensity and erbium excitation efficiency for tunnel transit-time light-emitting diodes, are discussed.