

# Электролюминесценция на длине волны 1.54 мкм в структурах Si:Er/Si, выращенных методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии

© В.П. Кузнецов<sup>¶</sup>, Д.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

Научно-исследовательский физико-технический институт  
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,  
603950 Нижний Новгород, Россия

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

(Получена 30 ноября 2005 г. Принята к печати 19 декабря 2005 г.)

В диодных структурах Si:Er/Si, выращенных методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии в вакууме  $\sim 10^{-7}$  мбар при температуре 520–580°C, исследована интенсивность электролюминесценции на длине волны 1.54 мкм при комнатной температуре в зависимости от концентрации и распределения эрбия и донорных примесей в области объемного заряда (ОПЗ), а также от толщины ОПЗ. Найдены пути получения электролюминесценции в диодах, имеющих широкую ОПЗ (0.1–1 мкм). Найдены длина пробега электронов при взаимодействии с центрами Er и значение пороговой энергии свободного электрона, необходимой для возбуждения электрона в оболочке Er. Экспериментально определены значения напряженности электрического поля при пробое кремниевых  $p-i-n$ -диодов, легированных и нелегированных Er. Предложена модель взаимодействия горячих электронов с центрами Er.

PACS: 73.20.Nb, 73.40.Lq, 78.60.Fi, 85.30.Kk

## 1. Введение

Изучение на длине волны 1.54 мкм имеет минимум потерь и дисперсии в волоконно-оптических линиях связи. Этим обусловлен интерес к устройствам на основе структур Si:Er/Si, генерирующим такое излучение. Перспективный способ их получения — метод сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии (СМЛЭ) [1]. Хорошо известно использование в этих целях молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) [2–4], а наиболее распространенный способ — метод ионной имплантации (ИМП) (см., например, работы [5–7]). Максимальная интенсивность электролюминесценции  $I_{EL}$  в диодных структурах с Si:Er была получена при концентрациях эрбия ( $N_{Er}^{max}$ )  $10^{19}$  см $^{-3}$  [5–7],  $5 \cdot 10^{19}$  см $^{-3}$  [2]. Уменьшение  $I_{EL}$  при  $N_{Er} > N_{Er}^{max}$  объяснялось увеличением плотности дефектов кристаллической структуры. В ИМП-диодах даже при  $N_{Er} < N_{Er}^{max}$  она действительно велика и составляет  $10^8$ – $10^{10}$  см $^{-2}$  [5].

Слои Si:Er, как правило, имели  $n$ -тип проводимости. Предполагается [2–7], что донорами являются центры, содержащие атомы эрбия (центры Er). При  $N_{Er} \approx N_{Er}^{max}$  концентрация электронов  $n$  при комнатной температуре в ИМП- и МЛЭ-слоях Si:Er значительна, например,  $n = (3–9) \cdot 10^{18}$  см $^{-3}$  [4,5]; типичное напряжение пробоя диодов  $U_{br}$  ограничено диапазоном 3–5 В. Ширина области пространственного заряда (ОПЗ) диодов с такой концентрацией электронов мала — десятки нанометров. Из них эффективно люминесцируют 10–15 нм в конце ОПЗ [6]. Существование „темновой“ области (35–45 нм) в начале ОПЗ объясняется [4,6] необходимостью

набора средней энергии электронов, требующейся для эффективной люминесценции. Предполагается [6], что электроны теряют приобретенную энергию при столкновении с ионизованными центрами Er. Поскольку толщина ОПЗ мала, мало и количество центров Er, которые могут быть источником электролюминесценции (ЭЛ). Это является одной из главных причин слабой интенсивности ЭЛ, наблюдаемой в ИМП- и МЛЭ-диодах при обратном смещении.

Для наших слоев  $n$ -Sr:Er, выращенных методом СМЛЭ при 580–800°C, концентрация электронов не зависела от  $N_{Er}$  и составляла  $n \approx 10^{16}$  см $^{-3}$ . Соответственно толщина ОПЗ диодов может достигать 2 мкм, что на 2 порядка больше, чем в диодах, полученных другими методами. Путем легирования сурьмой или фосфором концентрацию доноров  $N_d$  в слоях Sr:Er можно изменять в широких пределах  $1.5 \cdot 10^{16}$ – $3 \cdot 10^{20}$  см $^{-3}$  [1], а значение  $U_{br}$  — от нескольких десятков до единиц вольт. Методом СМЛЭ можно выращивать слои Si с любым распределением примесей Er, P, B, Ga, Al, As, Sb, в частности, с резкими концентрационными переходами, сильно- и  $\delta$ -легированные, а также слои большой толщины.

Используя указанные возможности, в данной работе проведено исследование и анализ зависимостей интенсивности электролюминесценции  $I_{EL}$  на длине волны 1.54 мкм в обратно смещенных диодах  $p-p^+ - n_0 - n$ -Si:Er- $n^+$  от концентрации и распределения как эрбия, так и обычных для Si донорных примесей в ОПЗ, а также от толщины ОПЗ.

Цель исследования — поиск путей повышения интенсивности ЭЛ, выяснение механизма взаимодействия горячих носителей с центрами Er.

<sup>¶</sup> E-mail: Kuznetsov\_VP@mail.ru

## 2. Методы получения и исследования

Si-структуры  $p-p^+-n_0-n$ -Si:Er- $n^+$  выращивались методом СМЛЭ [1] в вакууме  $(2-6) \cdot 10^{-7}$  мбар, без напуска какого-либо газа, на подложках  $p$ -Si:B(100) с удельным сопротивлением 10 Ом·см. Сначала осаждался слой Si:B толщиной 50–200 нм и с концентрацией дырок  $p^+ = 4 \cdot 10^{18}$  см $^{-3}$ . Затем (в некоторых структурах) выращивался слой  $n_0$ -Si:P или  $n_0$ -Si:Sb (толщиной  $d_0$ ) с  $N_d^0 = 10^{15}-10^{16}$  см $^{-3}$  или слой  $n_0^+$  с  $N_d^0 = 3 \cdot 10^{18}$  см $^{-3}$ . Далее — слой  $n$ -Si:Er (толщиной  $d$  и концентрацией мелких доноров  $N_d$ ) и затем слой с концентрацией электронов  $n^+ \approx 10^{20}$  см $^{-3}$  и толщиной от 0.1 до 1 мкм. Концентрация эрбия в базе диодов обычно была в интервале  $N_{Er} \approx (1-5) \cdot 10^{18}$  см $^{-3}$ , иногда варьировалась от  $10^{17}$  см $^{-3}$  до  $10^{20}$  см $^{-3}$ . Слои  $p^+$ ,  $n^+$  и  $n$ -Si:Er выращивались при температурах 520–580°C. Дополнительному отжигу полученные структуры не подвергались. Светодиоды изготавливались по стандартной меза-технологии (площадь мез  $1.6-2.5$  мм $^2$ ) или путем вырезания чипов той же площади. Напряжение пробоя диодов  $U_{br}$  определялось на мезах площадью  $10^{-4}$  см $^2$ . Концентрация носителей заряда в структурах измерялась вольт-фарадным, электрохимическим вольт-фарадным, холловским методом; концентрация примесей — методом масс-спектрометрии вторичных ионов. Спектры ЭЛ в диапазоне 1–1.62 мкм регистрировались фотоприемниками на основе InGaAs [8] или Ge.

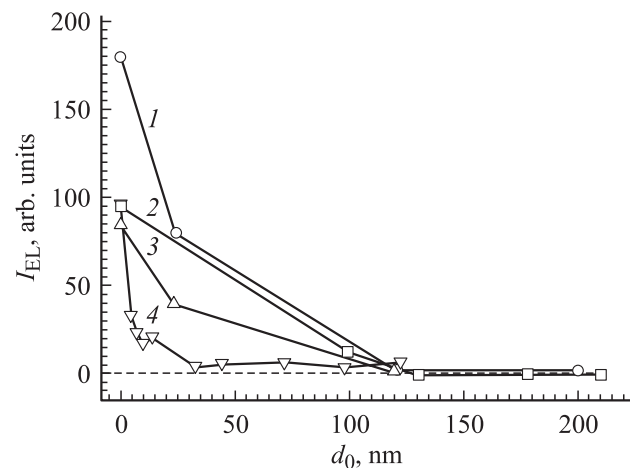
## 3. Общая характеристика структур

Механизм роста СМЛЭ-слоя Si на поверхности Si(100) — послойно-кластерный [9]. Это значит, что слой любой толщины должен быть сплошным. Исследование кристаллической структуры наших слоев Si:Er методами электронной микроскопии и обратного резерфордского рассеяния свидетельствует об их достаточно высоком совершенстве. Дефекты (дислокации) обнаружены только в оптическом микроскопе после избирательного травления толстых слоев в 1–3 мкм. Их плотность в однородно и селективно легированных эрбием слоях была в пределах от  $10^2$  до  $2 \cdot 10^4$  см $^{-2}$  [10]. Наличие небольшой плотности дефектов в наших слоях упрощает интерпретацию результатов исследований в данной работе. Метод СМЛЭ может служить альтернативой другим методам получения структур Si:Er/Si, например методу ИМП. Дефекты могут быть местами стока атомов Er в оптически неактивные позиции, центрами потери энергии свободными электронами и рекомбинации экситонов. Концентрационные  $p^+-n$ - и  $n-n^+$ -переходы в наших структурах предельно резкие с градиентом  $2.5 \cdot 10^{27}$  см $^{-4}$  [1]. В интервале 77–300 К концентрация электронов  $n$  в слоях Si:Er слабо зависит от температуры. ВИМС-исследования показали, что в наших слоях Si:Er присутствует фосфор с концентрацией, близкой к концентрации электронов  $n$ . Значения

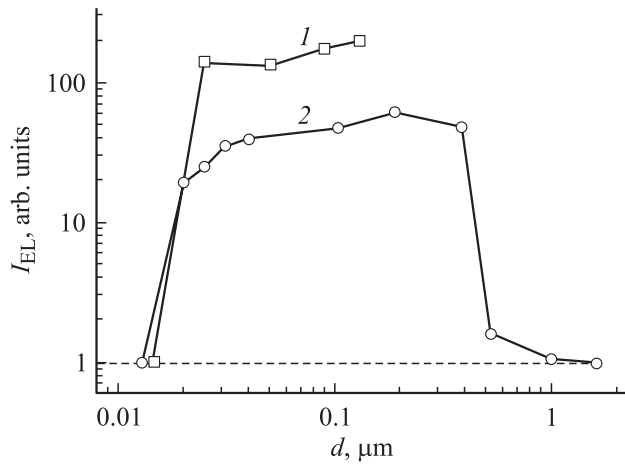
холловской подвижности электронов при  $T \approx 300$  К в наших слоях Si:Er были в 1.5–3 раза меньше подвижности в слоях Si, не содержащих эрбий [10]. Уменьшение подвижности, обусловленное введением в слой эрбия, можно удовлетворительно объяснить рассеянием на нейтральных центрах Er по модели Эргинсоа [11]. Отсюда, в частности, следует, что при комнатной температуре и  $N_{Er} = 5 \cdot 10^{18}$  см $^{-3}$  длина пробега электронов до столкновения с центром Er равна 17 нм. В  $n$ -Si:Er-базе наших диодов значение времени жизни в возбужденном состоянии и эффективное сечение возбуждения центров Er были не хуже, чем для ИМП- или МЛЭ-диодов. Поэтому после оптимизации параметров диода были основания ожидать более высоких значений интенсивности электролюминесценции  $I_{EL}$ .

## 4. Результаты исследования и их обсуждение

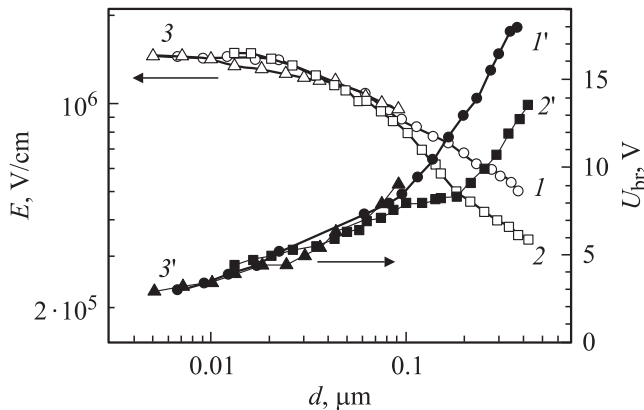
На рис. 1 представлены зависимости интенсивности  $I_{EL}$  от толщины  $d_0$  слабо легированного  $n_0$ -слоя в обратно смещенных диодах, сделанных на структурах типа  $p-p^+-n_0-n$ -Si:Er- $n^+$ . На этом рисунке, так же как и на последующих, штриховой горизонтальной прямой обозначен уровень чувствительности измерения интенсивности ЭЛ. Слой кремния с концентрацией электронов  $n_0$  легирован Sb или P ( $N_d^0 \approx 8 \cdot 10^{14}-5 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$ ) и не содержит Er. В слоях  $n$ -Si:Er концентрация мелких доноров  $N_d$  для трех структур составляла  $1.5 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$  для четвертой —  $5 \cdot 10^{17}$  см $^{-3}$ . Во всех структурах



**Рис. 1.** Зависимости интенсивности электролюминесценции от толщины  $d_0$  слоя  $n_0$  в обратно смещенных диодах  $p-p^+-n_0-n$ -Si:Er- $n^+$ . Температура роста слоев  $n$ -Si:Er  $T_{gr} = 580^\circ\text{C}$ . 1 — структура № 141,  $T = 77$  К,  $n_0 = 2 \cdot 10^{15}$  см $^{-3}$ ,  $N_{Er} = 5 \cdot 10^{18}$  см $^{-3}$ ,  $N_d = 1.5 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$ ,  $d = 250$  нм; 2 — структура № 139,  $T = 300$  К,  $n_0 = 8 \cdot 10^{14}$  см $^{-3}$ ,  $N_{Er} = 5 \cdot 10^{18}$  см $^{-3}$ ,  $N_d = 1.5 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$ ,  $d = 50$  нм; 3 — структура № 141,  $T = 300$  К,  $n_0 = 2 \cdot 10^{15}$  см $^{-3}$ ,  $N_d = 5 \cdot 10^{18}$  см $^{-3}$ ,  $N_d = 1.5 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$ ,  $d = 250$  нм; 4 — структура № 142,  $T = 300$  К,  $n_0 = 5 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$ ,  $N_{Er} = 3 \cdot 10^{18}$  см $^{-3}$ ,  $N_d = 5 \cdot 10^{17}$  см $^{-3}$ ,  $d = 500$  нм.  $d$  — толщина слоя  $n$ -Si:Er.



**Рис. 2.** Зависимости интенсивности электролюминесценции при  $T = 300$  К в диодах  $p-p^+-n\text{-Si:Er-n}^+$  от толщины  $d$  слоя  $n\text{-Si:Er}$ . Обратное смещение. Температура роста  $T_{\text{gr}} = 580^\circ\text{C}$ ,  $N_d = 1.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_{\text{Er}} = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . 1 — структура № 151, 2 — структура № 156. Структуры отличаются шероховатостью интерфейсов между слоями.



**Рис. 3.** Среднее значение электрического поля  $E$  (1–3) и напряжение при пробое  $p-i-n$ -диодов  $U_{\text{br}}$  (1'–3') в зависимости от толщины базы для резких несимметричных переходов при  $T = 300$  К. Диоды сделаны на структурах типа  $p-p^+-n\text{-Si-n}^+$ , температура роста структур  $T_{\text{gr}} = 580^\circ\text{C}$ ,  $p^+ = n^+ = 4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . 1, 1' — структура № 166, без Er; 2, 2' — структура № 156,  $N_{\text{Er}} = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ; 3, 3' — структура № 151,  $N_{\text{Er}} = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Для всех слоев  $n$ -типа  $N_d = 1.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

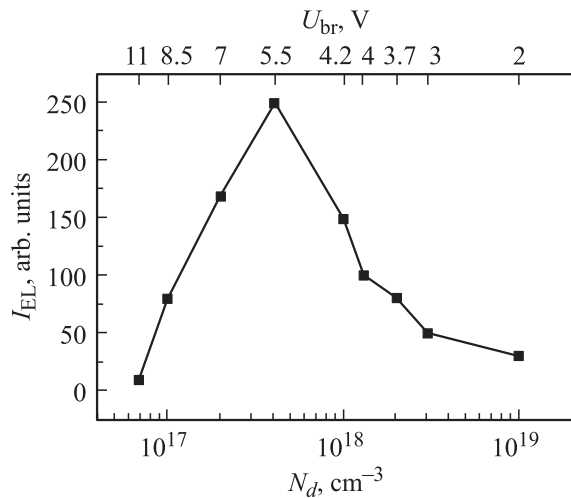
максимальная величина  $I_{\text{EL}}$  при 77 и 300 К наблюдалась в диодах, в которых не содержащая эрбий  $n_0$ -область отсутствовала ( $d_0 \rightarrow 0$ ). Таким образом, наличие в диодах  $n_0$ -области, вопреки распространенному мнению [2–6], не только бесполезно, но и вредно с этой точки зрения.

На рис. 2 представлены зависимости  $I_{\text{EL}}$  при 300 К в обратно-смещенных диодах  $p-p^+-n\text{-Si:Er-n}^+$  от толщины  $d$  базы  $n\text{-Si:Er}$ . В обеих структурах слой  $n\text{-Si:Er}$  имели  $N_d = 1.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_{\text{Er}} = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ;  $p^+ = n^+ = 4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , но отличались степенью шероховатости интерфейсных поверхностей. Рис. 2 де-

монстрирует замечательные закономерности. Диоды с толстой базой  $n\text{-Si:Er}$  ( $d > 0.4$  мкм) люминесценции не имели, а более тонкие — генерировали фотоны даже при очень малой толщине базы  $d = 0.02$  мкм. При  $d \lesssim 0.014$  мкм ЭЛ в диодах не наблюдалась. Среднее значение этих величин  $d_{\text{min}} = 17$  нм будем считать минимальной толщиной  $n\text{-Si:Er}$ -базы диода, в котором еще наблюдается ЭЛ. Зависимость  $I_{\text{EL}}(d)$  имеет слабо выраженный максимум при  $d = 0.2$  мкм. Сравнение величин напряжения пробоя диодов  $U_{\text{br}}$  при температурах 77 и 300 К показало, что с уменьшением толщины слоя  $\text{Si:Er}$  происходит переход от лавинного механизма пробоя ( $d > 0.4$  мкм) к смешанному ( $d \approx 0.2$  мкм), а затем к туннельному ( $d < 0.2$  мкм).

Измерив напряжение пробоя  $U_{\text{br}}$  и толщины базы  $n\text{-Si:Er}$ -диодов с  $N_d \approx 1.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , мы определили среднее значение напряженности электрического поля  $E$  в ОПЗ диодов с различной степенью прокола базы (рис. 3). Из рис. 3 видно, что с уменьшением толщины базы поле  $E$  растет, достигая в насыщении значения  $1.5 \cdot 10^6$  В/см при  $d \approx 20$  нм. Для толщины базы  $d \lesssim 0.02$  мкм  $E$  слабо изменяется по длине ОПЗ. При введении эрбия в базу диода поле  $E$  уменьшается, падает напряжение пробоя (рис. 3). Это становится заметным при  $d > 0.1$  мкм. Разница в значениях  $E$  и  $U_{\text{br}}$  растет с увеличением толщины базы, т.е. с увеличением лавинной составляющей пробоя. Вероятно, присутствие эрбия в базе диода способствует умножению электронов. Для диодов с эрбием и без эрбия значения  $E$  и  $U_{\text{br}}$  совпадают при  $d < 0.1$  мкм, так как при  $E > 8 \cdot 10^5$  В/см (рис. 3) пробой диодов становится туннельным. Знание напряженности электрического поля в  $\text{Si-p-i-n}$ -диодах необходимо для ряда применений. Теоретические расчеты  $U_{\text{br}}$  в  $p-i-n$ -диодах с резкими несимметричными переходами выполнены в предположении лавинного пробоя [12]. Последнее несправедливо для интересующего нас диапазона толщин базы  $n\text{-Si:Er}$   $d \lesssim 0.2$  мкм.

На рис. 4 показана зависимость  $I_{\text{EL}}$  от  $N_d$  и  $U_{\text{br}}$  при 300 К в обратно смещенных диодах. Диоды изготовлены на структурах типа  $p-p^+-n\text{-Si:Er:Sb-n}^+$ , которые были выращены при  $520^\circ\text{C}$  с  $N_{\text{Er}} = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Толщина слоя  $n\text{-Si:Er:Sb}$  в этих диодах была больше ширины ОПЗ при пробое или близка к ней (при  $N_d \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ). Из рис. 4 видно, что кривая  $I_{\text{EL}}(N_d)$  имеет максимум при  $N_d \approx 4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . При изменении  $N_d$  от этого оптимального значения интенсивность  $I_{\text{EL}}$  падает резко и значительно. Ширина ОПЗ при  $N_d = 4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  составляет 0.15 мкм, что заметно больше ширины ОПЗ в диодах, изготовленных методами ИМП [5] или МЛЭ [4] с  $N_d \approx (3-9) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Из рис. 4 видно, что интенсивность  $I_{\text{EL}}$  при таких значениях  $N_d$  в 5–10 раз ниже максимальной. Диод с  $N_d = 9 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  (ширина ОПЗ  $\sim 20$  нм) имеет такую же небольшую интенсивность ЭЛ, как и диод с длиной базы  $d = 20$  нм (рис. 2), близкой к значению  $d_{\text{min}}$ .



**Рис. 4.** Интенсивность электрOLUMИНЕСЦЕНЦИИ при  $T = 300$  К в обратно смещенных диодах  $p-p^+-n-n-Si:Er-n^+$  в зависимости от концентрации доноров в слое  $n-Si:Er$ . Структура № 136. Температура роста  $520^\circ\text{C}$ ,  $N_{Er} = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ .

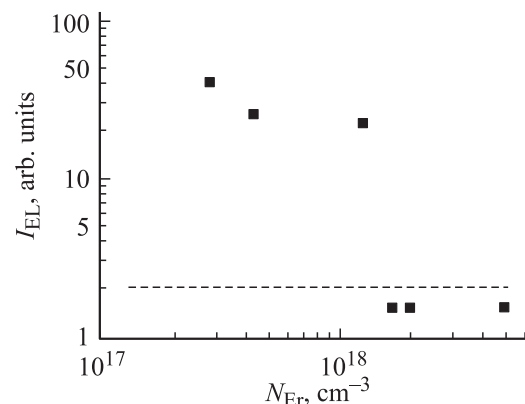
Примем, что в ОПЗ обратно смещенных люминесцирующих диодов имеет место ударный механизм возбуждения электронов в оболочке атома Er горячими электронами [5,6]. Эти электроны должны набирать энергию в электрическом поле ОПЗ. Наши диоды с толстой областью  $n-Si:Er$  ( $N_d = 1.5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , напряженность поля  $E$  падает до нуля на толщине 2 мкм) имели  $U_{br} = 40$  В. Если бы электроны не теряли энергию, они могли бы иметь в конце пробега ОПЗ энергию в несколько десятков эВ. Судя по тому, что в этих диодах ЭЛ отсутствовала, следует считать, что среднестатистический электрон на длине ОПЗ не мог копить энергию, пока она не достигла порогового значения  $W_{ex}$ . Это значит, что он практически полностью терял энергию при встрече с некоторым центром, теряя ее порциями, меньшими, чем  $W_{ex}$ . Умножение электронов в зоне проводимости может происходить по модели Шокли [13]. Шокли и его последователи предполагали, что пороговой энергии ионизации атомов кремния могут достигать лишь те электроны, которые пробегают в направлении электрического поля необходимый путь практически без соударений. Модель Шокли лучше, чем другие, описывает экспериментальные данные в Si [14]. Нормальные электроны энергии ионизации никогда не достигают. Они теряют ее при рассеянии на фонах. Среднестатистический электрон в легированных эрбием диодах тем более не будет достигать энергии ионизации, так как к потерям энергии на фонах будут добавляться потери на центрах Er. Так же как и в модели Шокли, мы предполагаем, что кинетическая энергия электронов обусловлена в основном составляющей скорости вдоль электрического поля. Далее будет указан и другой возможный путь умножения электронов в диодах, база которых содержит эрбий.

Для определения длины пробега электрона  $\lambda$ , на которой он копит и теряет энергию, был исследован диод  $p-p^+-n_0^+-n-Si:Er-n^+$ . Слой  $n-Si:Er$  имел толщину 50 нм,  $N_d = 1.5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $N_{Er} = 5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Слой  $n_0^+$  был легирован только фосфором до  $N_d^0 = 3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Его толщина (50 нм) равнялась ширине ОПЗ при пробое  $p^+-n_0^+$ -диода с  $n_0^+ = 3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  [12]. Найденное нами напряжение пробоя исследованного диода составляло  $U_{br} \approx 5$  В, т.е. совпадало с напряжением пробоя  $p^+-n_0^+$ -диода с  $n_0^+ = 3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  [12]. Таким образом, электрическое поле при пробое диода  $p-p^+-n_0^+-n-Si:Er-n^+$  концентрировалось в слое  $n_0^+$  и отсутствовало в слое  $n-Si:Er$ . В этом опыте цель осаждения слоя  $n_0^+$  — обеспечить накопление энергии электронами перед входом в слой  $n-Si:Er$ . По нашим оценкам эта энергия равнялась 3.5 эВ. Учитывая, что в диоде, содержащем слой  $n_0^+$ ,  $I_{EL}$  была в 3 раза меньше, чем в таком же диоде без слоя  $n_0^+$ , а толщина слоя  $n-Si:Er$  в обоих диодах равна 50 нм, мы определили, что  $\lambda \approx 17$  нм. Таким образом, поскольку предварительное накопление энергии электронами не увеличивает  $I_{EL}$ , единственной возможностью для этого является создание в Si:Er-базе диода достаточно сильного электрического поля, такого, чтобы длина  $L$ , на которой электрон мог бы набрать энергию  $W_{ex}$ , была меньше или сравнима с длиной пробега электрона  $\lambda$ :

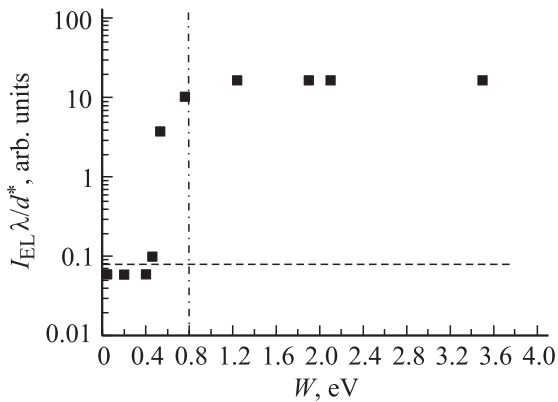
$$L \lesssim \lambda. \quad (1)$$

Это очевидное условие генерации фотонов справедливо независимо от того, на каких центрах в ОПЗ электроны теряют энергию.

Ответ на вопрос, какие центры в ОПЗ являются для электронов основными центрами потери энергии, дал следующий эксперимент. В диодах  $p-p^+-n-Si:Er-n^+$  исследовалась зависимость  $I_{EL}(N_{Er})$  (рис. 5). Слои  $n-Si:Er$  в диодах имели толщину  $d = 0.5-0.6$  мкм и



**Рис. 5.** Интенсивность электрOLUMИНЕСЦЕНЦИИ при  $T = 300$  К в обратно смещенных диодах  $p-p^+-n-Si:Er-n^+$  в зависимости от концентрации эрбия в слое  $n-Si:Er$ . Параметры слоя  $n-Si:Er$ : толщина 0.5–0.6 мкм,  $N_d = (1.5-3) \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . Штриховая прямая — уровень чувствительности измерения интенсивности электрOLUMИНЕСЦЕНЦИИ.



**Рис. 6.** Зависимость интенсивности электролюминесценции, отнесенной к длине пробега электрона, от его энергии. Расчет по данным структуры № 156 (рис. 2).

$N_d = (1.5-3) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Из рисунка видно, что такие диоды при  $N_{Er} \gtrsim 1.6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  не имели ЭЛ. Она появлялась при значении  $N_{Er} \lesssim 1.2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  и наблюдалась по крайней мере до  $N_{Er} \approx 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Полученные результаты можно объяснить, если принять во внимание, что основными центрами рассеяния в ОПЗ являются центры Er. При большой концентрации Er длина пробега  $\lambda$  настолько мала, что электроны не могут на ней набрать необходимую энергию  $W_{ex}$ .

Выше было найдено, что длина пробега  $\lambda$  составляет 17 нм. Это значение соответствует  $N_{Er} = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Интересно, что указанная величина  $\lambda$  совпадает с длиной пробега электронов, найденной для наших слоев Si:Er из холловской подвижности в слабом поле  $E$  при рассеянии на центрах Er [10]. Длина  $\lambda$  также совпадает со значением минимальной толщины  $d_{min}$   $n$ -Si:Er-базы диода, при которой ЭЛ находится на грани обнаружения (рис. 2). На расстоянии  $d_{min} = 17 \text{ нм}$  электрон в поле  $E = 1.5 \cdot 10^6 \text{ В/см}$  (рис. 3) набирает энергию 2.5 эВ, достаточную для генерации фотона с длиной волны 1.54 мкм. Однако при  $d = 17 \text{ нм}$   $I_{EL}$  резко падает, так как при толщине базы  $n$ -Si:Er  $d < \lambda$  среднестатистический электрон пробегает ОПЗ, не встретив Er. Такое же объяснение, вероятно, можно дать и наличию темновых областей ОПЗ, обнаруженных в работах [4,6]. Их существование авторы [4,6] объясняют разогревом электронов до энергии  $W_{ex}$ . Однако при  $N_d = (3-9) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  [4,6] поле  $E \gtrsim 10^6 \text{ В/см}$  [6,12,15], и, казалось бы, необходимую энергию 0.8 эВ электрон должен набрать на расстоянии  $L \lesssim 8 \text{ нм}$ , что заметно меньше длины темновой области 35–45 нм [4,6].

Какую энергию  $W_{ex}$  электрон в зоне проводимости должен иметь для возбуждения электрона в оболочке атома Er? По данным рис. 2 (кривая 2) мы рассчитали интенсивность ЭЛ, приходящуюся на одну длину пробега  $\lambda$ , а по величине поля  $E$  (рис. 3) — энергию электрона  $W = E\lambda = 0.062 \text{ эВ}$ , которую он может иметь

в конце пробега  $\lambda$  с учетом небольшой потери на фонах (0.062 эВ на длине волны 10 нм [14]). Зависимость  $I_{EL} \lambda/d^*$  от  $W$  показана на рис. 6. Для толщины базы  $d \geq 0.1 \text{ мкм}$  величина  $d^*$  принималась равной  $0.5d$ . Так мы пытались учесть существование области лавинного умножения электронов. Изменение численного коэффициента в соотношении  $d = 0.5d^*$  (в разумных пределах) не изменит выводов, сделанных далее. Из рис. 6 видно следующее.

1. Электроны с энергией  $W < 0.8 \text{ эВ}$  мало эффективны при генерации фотонов.

2. При увеличении  $W$  от 0.8 до 3.5 эВ величина  $I_{EL} \lambda/d^*$  практически не растет.

3. Найденное значение  $W = W_{ex}$  примерно совпадает с разницей энергий электрона 0.8 эВ, находящегося на основном и первом возбужденном уровнях атома Er.

Далее мы проанализируем полученные нами экспериментальные факты с точки зрения выполнения условия (1). Предлагаем простую модель. 1). При столкновении с центром Er электрон полностью теряет энергию независимо от того, больше она величины  $W_{ex}$  или меньше, а также есть ЭЛ или нет. 2). При рассеянии на оптических фонах электрон теряет 0.062 эВ на длине 10 нм [14]. 3). Длина пробега электрона  $\lambda$  не зависит от энергии электрона. 4). Направление движения электронов в ОПЗ совпадает с направлением поля  $E$ .

Выше указывалось, что для диодов с толстой базой  $n$ -Si:Er ( $d = 2 \text{ мкм}$ ,  $N_d = 1.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ) при  $N_{Er} = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  ЭЛ не наблюдалась. Ранее [8] этот факт был объяснен неоднородностью распределения тока накачки по площади  $p^+ - n$ -перехода. Далее обсуждается другая интерпретация, соответствующая условию (1). При лавинном пробое диода с  $N_d = 1.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  и толстой базой (поле  $E$  падает до нуля) концентрация свободных электронов достигает максимума на расстоянии (от слоя  $p^+$ ), составляющем 40% ширины ОПЗ. При  $N_d = 1.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  (толщина ОПЗ 2 мкм)  $E_{max} = 4 \cdot 10^5 \text{ В/см}$  [12]. Так как напряженность  $E$  по длине падает линейно, после образования лавины электронов она будет равна  $2.4 \cdot 10^5 \text{ В/см}$ . Даже без учета того, что при введении эрбия в ОПЗ напряженность  $E$  снижается, и без учета потерь энергии на генерацию оптических фотонов к моменту столкновения с центром Er электрон на длине  $\lambda = 17 \text{ нм}$  наберет только 0.4 эВ. Эта величина существенно меньше найденного минимального значения  $W_{ex} = 0.8 \text{ эВ}$ . Если центры Er являются глубокими донорами (ГД), то электроны проводимости с энергией менее  $W_{ex}$  при столкновении с центрами могут терять энергию, забрасывая электроны с глубокого уровня в зону проводимости, а сталкиваясь с атомами Si, — забрасывая электрон из валентной зоны на уровень центра Er.

Указание на существование ГД получено при легировании слоев бором. До введения бора слои Si:Er имели концентрацию электронов  $1.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Если бы центры Er были электрически неактивными, то после введения, например,  $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  бора слой Si:Er:В

должен иметь концентрацию дырок  $p \approx 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , а диод соответственно толщину начальной ОПЗ 100 нм и  $U_{\text{br}} = 8 \text{ В}$ . На самом деле, после легирования бором  $U_{\text{br}}$  составляло 22 В, а начальная толщина ОПЗ, равная 0.6 мкм, была больше ее значения 0.25 мкм до введения бора. Эти результаты можно объяснить компенсацией акцепторов бора электронами с мелких (Р) и глубоких (центров Er) уровней.

Из эксперимента (рис. 2, 4) следует, что ЭЛ появляется и растет с увеличением концентрации доноров в базе диода, начиная от  $N_d \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , или при сохранении  $N_d \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , с уменьшением ее толщины  $d$ . В обоих случаях увеличению  $I_{\text{EL}}$  соответствует рост напряженности поля  $E$  в базе диода. Об этом свидетельствуют теоретические расчеты зависимостей  $E(N_d)$  [12,15] и экспериментальные зависимости  $E(d)$ , найденные нами (рис. 3). Увеличение  $E$  приводит к уменьшению длины  $L$  и росту энергии свободных электронов перед столкновением с центрами Er. Именно этим в соответствии с (1) и объясняется рост интенсивности  $I_{\text{EL}}$  с уменьшением  $d$  (рис. 2) или ростом  $N_d$  (рис. 4). Однако, увеличивая  $E$ , мы уменьшаем толщину ОПЗ, а следовательно, и количество центров Er, генерирующих фотоны. При любом типе центров, на которых теряется энергия электронов, это должно привести и приводит к появлению на кривых рис. 2, 4 максимумов  $I_{\text{EL}}$ .

Вероятность безызлучательного оже-процесса зависит от концентрации холодных электронов (с энергией меньше  $W_{\text{ex}}$ ) и увеличивается при уменьшении напряженности поля  $E$  в  $p$ - $n$ -переходе. Поэтому уменьшение интенсивности  $I_{\text{EL}}$  после максимумов при возрастании толщины  $n$ -Si:Er-базы (рис. 2) или при уменьшении  $N_d$  (рис. 4) может усиливаться оже-процессом.

Если  $L \leq \lambda$  (диод люминесцирует), центры Er не будут мешать электронам копить энергию до значения  $W_{\text{ex}}$ . В этом случае нет необходимости вводить слой с малой концентрацией  $N_d$  между областью  $p^+$  и слоем  $n$ -Sr:Er. Это согласуется с нашими экспериментальными результатами (рис. 1). Кроме того, введение слабо легированного  $n_0$ -слоя не только не помогает, но и резко, в некоторых случаях до нуля, снижает  $I_{\text{EL}}$ . Для этого достаточно ввести  $n_0$ -слой толщиной  $d_0$  всего лишь в несколько десятков нанометров (рис. 1). Вероятно, присутствие на технологической границе  $p$ - $n$ -перехода центров Er облегчает заброс электронов через их глубокие уровни из валентной зоны в зону проводимости. Введение эрбия в ОПЗ диода снижает напряжение пробоя (рис. 3) и увеличивает предпробойный ток.

Область умножения электронов в толстой  $n$ -базе можно также существенно сократить, если между слоями  $p^+$  и  $n$ -Sr:Er в диоде ввести сильно легированный слой  $n_0^+$ . Слой  $n_0^+$  обеспечивает туннелирование электронов в  $n$ -Si:Er-базу диода, освобождая тем самым для генерации фотонов часть ОПЗ с наиболее сильным электрическим полем  $E$ . Такой диод  $p$ - $p^+$ - $n_0^+$ - $n$ -Sr:Er- $n^+$

был изготовлен. Его параметры: слой  $n_0^+$  толщиной  $d_0 \approx 20 \text{ нм}$  легирован фосфором до  $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , слой  $n$ -Sr:Er с концентрациями  $N_{\text{Er}} = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_d = 1.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , толщиной  $d \approx 0.8 \text{ мкм}$ ,  $U_{\text{br}} = 23 \text{ В}$ . Результат введения слоя  $n_0^+$  — появление интенсивной ЭЛ, без этого слоя диоды не имеют ЭЛ. Введение в базу диода тонкого слоя  $n_0^+$  может быть использовано не только в оптоэлектронных приборах.

Расстояние  $L$  зависит от напряженности поля  $E$  в ОПЗ диода, а следовательно, от величин  $N_d$  и  $d$  базы Si:Er, а длина  $\lambda$  — от концентрации  $N_{\text{Er}}$ . Поэтому условие (1) для возникновения ЭЛ указывает на существование зависимости между величинами  $N_d$ ,  $d$  и  $N_{\text{Er}}$ , т.е. для заданных значений  $N_d$  и  $d$  концентрация центров Er не должна быть больше некоторой максимальной  $N_{\text{Er}}^{\text{max}}$ . Если принять, что в люминесцирующих диодах на основе Si максимальное поле  $E$  ограничено величиной  $1.5 \cdot 10^6 \text{ В/см}$ , то соответственно при  $W_{\text{ex}} = 0.8 \text{ эВ}$  получим  $L = 5 \text{ нм}$ . Поэтому согласно условию (1)  $\lambda \geq 5 \text{ нм}$  и  $N_{\text{Er}}^{\text{max}} \leq 1.7 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  (предполагается, что  $\lambda$  обратно пропорциональна  $N_{\text{Er}}$ ). Если легировать  $n$ -Sr:Er-базу диода до  $N_{\text{Er}} > N_{\text{Er}}^{\text{max}}$  ( $\lambda < L$ ), то электрон встретит центр Er прежде, чем наберет энергию  $W_{\text{ex}}$ , и  $I_{\text{EL}}$  с ростом  $N_{\text{Er}}$  должна падать.

Мы изготовили диоды с  $N_{\text{Er}} = 2 \cdot 10^{19} - 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . Толщина  $n$ -Si:Er-базы в них составляла  $d = 50 \text{ нм}$  и, следовательно, напряженность  $E = 1.5 \cdot 10^6 \text{ В/см}$  была довольно большой (рис. 3). Тем не менее такие диоды в соответствии с (1) ЭЛ не имели. В диодах, полученных ИМП- или МЛЭ-методами, уменьшение  $I_{\text{EL}}$  при  $N_{\text{Er}}^{\text{max}} > (1-5) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  объясняется обычно иначе — появлением дефектов кристаллической структуры [2,7].

Если в ОПЗ  $N_{\text{Er}} < N_{\text{Er}}^{\text{max}}$ , то не всегда следует ожидать пропорциональной зависимости  $I_{\text{EL}}$  от  $N_{\text{Er}}$ . Например, в диодах с  $N_d = 10^{17} \text{ см}^{-3}$  и  $d = 0.4 \text{ мкм}$   $N_{\text{Er}}$  уменьшали на порядок от  $10^{18} \text{ см}^{-3}$  до  $10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Интенсивность  $I_{\text{EL}}$  при этом уменьшалась только в 1.5 раза. В этом случае в соответствии с (1) область продуктивного взаимодействия горячих электронов с центрами Er расширяется в ту часть ОПЗ, где поле  $E$  меньше, а длина  $L$  соответственно больше.

Поведение  $I_{\text{EL}}$  с изменением температуры зависит от соотношения меняющихся величин  $\lambda$  и  $L$ . В базе диода с  $N_d = 1.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  и  $d = 0.2-0.3 \text{ мкм}$  напряженность  $E$  практически не изменяется в интервале температур от 77 до 300 К, так как  $U_{\text{br}}^{77\text{K}} = U_{\text{br}}^{300\text{K}}$ , следовательно,  $L^{77\text{K}} \approx L^{300\text{K}}$ . Если предположить, что с понижением температуры уменьшается  $\lambda$ , и, следовательно,  $\lambda^{77\text{K}} < \lambda^{300\text{K}}$ , интенсивность ЭЛ в соответствии с (1) также должна резко падать. Это действительно наблюдалось нами — такие диоды при 77 К ЭЛ не имели и „загорались“ при  $T \approx 300 \text{ К}$ . Это было хорошо видно, так как в спектре ЭЛ от этих диодов практически отсутствовал фон горячей электrolюминесценции.

Таким образом, предложенная модель взаимодействия горячих электронов с центрами Er удовлетворительно

объясняет экспериментальные результаты. Условие (1) является необходимым для появления ЭЛ. Однако для получения максимальной  $I_{EL}$  необходимо, чтобы (1) было в согласии с другим очевидным условием — ОПЗ, где электроны взаимодействуют с центрами Er, должна быть максимально большой. При соблюдении обоих условий оптимальное значение  $E$  и  $N_{Er}$  могут быть ниже максимальных.

Наши исследования показали, что толщину области Si:Er, где горячие электроны сталкиваются с центрами Er, можно также существенно увеличить, если в одной структуре многократно повторить переход  $p^+ - n - Si:Er$ . В диодах, сделанных на таких структурах, почти пропорционально увеличивалась интенсивность ЭЛ. Ограничивается рост  $I_{EL}$  только увеличением рабочего напряжения диода. Последнее определяется условиями теплоотвода в диоде и возможностью эксплуатации диода при повышенных температурах. Исследования показали, что диод с базой Si:Er может длительное время работать при высоких температурах, например при 200°C, сохраняя неизменными первоначальные параметры ЭЛ.

В данной работе не рассматривалась роль факторов, влияющих на выход ЭЛ из диода. Заметим только, что  $I_{EL}$  зависела от высоты неровностей исходной подложки. Например, в диодах  $I_{EL}$  увеличивалась в 4 раза, если структура выращивалась на поверхности подложки с высотой неровностей 20 мкм (рис. 2).

## 5. Заключение

При получении структур Si:Er/Si методом МЛЭ в камере роста создается сверхвысокий вакуум  $10^{-10} - 10^{-11}$  мбар, затем в процессе испарения эрбия производится напуск кислорода при давлении  $\sim 10^{-9}$  мбар. Мы пошли иным путем — осаждали слои Si:Er в вакууме  $(2-6) \cdot 10^{-7}$  мбар. Слои Si:Er при этом еще имели небольшую плотность дефектов кристаллической структуры. Остаточными газами были N, O, H, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O и др. [1], давление каждого из которых было не менее  $10^{-9}$  мбар. Методом СМЛЭ нам удалось получить слои Si:Er с малой концентрацией носителей заряда (до  $1.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ) и соответственно диоды с широкой ОПЗ. Одной из задач данной работы было найти способы получения ЭЛ в диодах с большой ОПЗ, а также увеличить в структуре область взаимодействия горячих электронов с центрами Er.

В этой работе исследованы зависимости интенсивности ЭЛ от концентрации и распределения как Er, так и обычных для Si доноров в ОПЗ, а также от толщины ОПЗ. Найдены способы получения ЭЛ в диодах, имеющих широкую ОПЗ (0.15–1 мкм), в частности, показана возможность получения диодов Si с толстой ОПЗ и туннельным типом пробоя. Указана возможность увеличения интенсивности электролюминесценции  $I_{EL}$  на порядок и более путем многократного повторения в исход-

ной структуре  $p^+ - n - Si:Er$ -перехода. Определены длина пробега электронов при взаимодействии с центрами Er, зависимость интенсивности ЭЛ от энергии электронов. Найдено значение пороговой энергии свободного электрона  $W_{ex}$ , необходимой для возбуждения электрона в оболочке Er. Экспериментально определены значения напряженности электрического поля при пробое кремниевых  $p-i-n$ -диодов, легированных и нелегированных Er. Предложена простая модель взаимодействия горячих электронов с центрами Er.

Найденные закономерности могут быть лишь частично использованы при получении диодов методами МЛЭ или ИМП. Ширина их ОПЗ мала — сравнима с длиной одного пробега электрона при рассеянии на центрах Er. В методах МЛЭ и ИМП традиционно существуют также трудности выращивания структур с малой плотностью дефектов кристаллической структуры и заданным распределением примесей, в частности получения в процессе роста резких концентрационных переходов, сильно легированных и селективно легированных областей.

Эрбий как легирующая примесь в кремнии может быть использован не только в оптоэлектронных приборах. По сравнению с другими примесями, которые также имеют глубокие уровни в кремнии, центры Er обладают рядом преимуществ при легировании методом СМЛЭ.

1. Центры эрбия можно ввести в слои Si до большой концентрации  $10^{19} - 10^{20} \text{ см}^{-3}$ , при этом плотность дефектов кристаллической структуры, наблюдаемых в оптический микроскоп, остается относительно небольшой —  $10^2 - 10^4 \text{ см}^{-2}$ .

2. Отсутствие сегрегации эрбия на поверхности роста и диффузии в объеме слоев позволяет вводить его в СМЛЭ-слои с контролируемой концентрацией  $N_{Er}$  и в нужное место, в частности локально [1], например, только в область толщиной до 2 нм.

3. Независимо от  $N_{Er}$  концентрации электронов в слоях Si:Er могут меняться путем легирования донорами P, Sb, As в широких пределах  $N_d = 1.5 \cdot 10^{16} - 3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ .

4. Центры Er в Si являются источниками фото- и электролюминесценции. Интенсивность излучения зависит от концентраций  $N_{Er}$ ,  $N_d$  в слое Si:Er и от его размеров. Используя эту связь, по известным параметрам можно определить неизвестные.

При измерении электролюминесценции существенный вклад был сделан В.Б. Шмагиным (Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород). Авторы благодарят Б.А. Андреева (Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород) за постоянное внимание к работе и Н.А. Соболева (Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург) за полезное обсуждение.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 01-02-16439, 02-02-16773), Министерства промышленности и науки РФ (Госконтракты № 40.020.1.1.1161, 40.020.1.1.1159), Министерства образования РФ.

## Список литературы

- [1] В.П. Кузнецов, Р.А. Рубцова. ФТП, **34**, 519 (2000).
- [2] A. Reitinger, G. Stimmer, G. Abstreiter. Appl. Phys. Lett., **70** (18), 2431 (1997).
- [3] W.-X. Ni, C.-X. Du, F. Duteil, G. Pozina, G.V. Hansson. Thin Sol. Films, **369**, 414 (2000).
- [4] M. Markmann, E. Neufeld, A. Sticht, K. Brunner, G. Abstreiter. Appl. Phys. Lett., **78**, 210 (2001).
- [5] G. Franzo, S. Coffa, F. Priolo, C. Spinella. J. Appl. Phys., **81** (6), 2784 (1997).
- [6] S. Coffa, G. Franzo, F. Priolo, A. Pacelli, A. Lacaïta. Appl. Phys. Lett., **73** (1), 93 (1998).
- [7] Н.А. Соболев, А.М. Емельянов, Ю.А. Николаев. ФТП, **34** (9), 1069 (2000).
- [8] 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).
- [9] А.С. Перов, В.М. Перова, В.П. Кузнецов, А.Ю. Андреев. Поверхность. Физика, химия, механика, **6**, 28 (1988).
- [10] В.П. Кузнецов, Р.А. Рубцова, В.Н. Шабанов, А.П. Касаткин, С.В. Седова, Г.А. Максимов, З.Ф. Красильник, Е.В. Демидов. ФТТ, **47** (1), 99 (2005).
- [11] C. Erginsoy. Phys. Rev., **79** (6), 1013 (1950).
- [12] Y. Ocuto and C.R. Crowell. Sol. St. Electron., **18**, 161 (1975).
- [13] В. Шокли. УФН, **77**, 161 (1962).
- [14] И.В. Грехов, Ю.Н. Сережкин. *Лавинный пробой p-n-перехода в полупроводниках* (Л., Энергия, 1980)
- [15] S.M. Sze, G. Gibbons. Appl. Phys. Lett., **8**, 111 (1966).

Редактор Т.А. Полянская

## Electroluminescence at 1.54 $\mu\text{m}$ wavelength in Si:Er/Si structures grown by sublimation molecular-beam epitaxy

V.P. Kuznetsov, D.J. Remizov\*, V.N. Shabanov, R.A. Rubtsova, M.V. Stepihova\*, D.I. Kryzhkov\*, A.N. Shushunov, O.V. Belova, Z.F. Krasil'nik\*, G.A. Maximov

Physical and Technical Research Institute,  
Nizhni Novgorod State University,  
603950 Nizhniy Novgorod, Russia

\* Institute for Microstructures,  
Russian Academy of Sciences,  
603950 Nizhniy Novgorod, Russia

**Abstract** The electroluminescence (EL) was investigated at room temperature at wavelength of 1.54  $\mu\text{m}$  in Si:Er/Si diode structures grown by sublimation molecular-beam epitaxy at a pressure of  $10^{-5}$  Pa and temperatures of 520–580°C. EL intensity was determined as a function of space charge region (SCR) width and Er and donor impurities concentration and its distribution. The methods were found to obtain EL in diodes with wide SCR (0.1–1  $\mu\text{m}$ ). Er excitation threshold energy and the free run path of electrons for scattering with Er centers were evaluated. Breakdown electric field strength values were determined from experiments for Si p-i-n diodes doped and nondoped with Er. The model was proposed for interaction of the hot electrons with Er centers.