

О природе электролюминесценции в режиме пробоя при обратном смещении на длине волны 1.5 мкм для легированных эрбием кремниевых структур с $p-n$ -переходом, полученных методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии

© А.В. Корнаухов[¶], А.А. Ежевский, М.О. Марычев, Д.О. Филатов, В.Г. Шенгуров

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

(Получена 6 мая 2010 г. Принята к печати 18 мая 2010 г.)

В выращенных методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии структурах Si/Si:Er/Si с $p-n$ -переходом при обратном напряжении смещения в режиме пробоя экспериментально исследованы особенности электролюминесценции в диапазоне длин волн 0.9–1.65 мкм. В соответствии с результатами исследований предложена новая физическая модель, в которой возбуждение излучательных переходов в ближнем инфракрасном диапазоне обеспечивается рекомбинационными процессами для электронов, поступающих на соответствующие энергетические уровни в слое Si:Er за счет их туннелирования из валентной зоны p^+ -слоя в электрическом поле обратного смещенного $p-n$ -перехода. Предлагаемая модель качественно согласуется с основными известными результатами экспериментальных исследований.

1. Введение

В связи с интенсивным развитием волоконно-оптических линий связи на длину волны 1.5 мкм заметные усилия предпринимаются в области разработки твердотельных источников такого излучения. Одним из наиболее перспективных объектов для решения указанной задачи являются легированные эрбием эпитаксиальные кремниевые структуры с $p-n$ -переходом в режиме пробоя при обратном смещении [1–3]. Считается, что электролюминесценция (ЭЛ) на длине волны 1.5 мкм в таких структурах обусловлена переходами $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ в f -оболочке иона Er^{3+} (эрбиевая ЭЛ). Ранее предполагалось [4,5], что возбуждение этих переходов вызвано взаимодействием центров Er с электронами зоны проводимости (С-зоны) слоя Si:Er с энергией \mathcal{E} не менее 0.8 эВ. Указанная энергия приобретает электронами при дрейфе в электрическом поле E в области пространственного заряда (ОПЗ) обратного смещенного $p-n$ -перехода (модель ударного возбуждения ЭЛ).

Одновременно с эрбиевой ЭЛ в рассматриваемых объектах присутствует более низкая по интенсивности, но более широкополосная инфракрасная составляющая, называемая „горячей“ ЭЛ. Ранее [5] предполагалось со ссылкой на [6], что „горячая“ ЭЛ вызвана междолинным рассеянием свободных электронов в С-зоне слоя Si:Er. Таким образом, оба вида ЭЛ считались обусловленными „горячими“ электронами в слое Si:Er.

Наиболее высокие на сегодняшний день значения интенсивности ЭЛ (I_{EL}) в области длин волн 1.5 мкм получены с применением так называемой туннельно-пролетной (ТП) структуры типа $p^{++}/n^+/n\text{-Si:Er}/n^{++}$, выращенной методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии (СМЛЭ) [7]. Отличие ТП структуры

от типичной диодной, не содержащей n^+ -слоя в плоскости $p-n$ -перехода, заключается в пространственном разделении областей инжекции электронов и их взаимодействия с центрами (ионами) эрбия. Инжекция электронов реализуется за счет туннельного пробоя $p^{++}-n^+$ -перехода. Введение n^+ -слоя уменьшает напряжение пробоя (U_{br}) ТП структуры по сравнению с типичной диодной, уменьшает ширину ОПЗ, приходящуюся на область Si:Er, и величину поля E в ней тем сильнее, чем больше толщина n^+ -слоя (если она не превышает ширину ОПЗ). Максимальное значение I_{EL} достигается при толщине n^+ -слоя 23 нм, а E в слое Si:Er не превышает $2 \cdot 10^5$ В/см [7]. Можно предположить, что если туннелирование необходимо лишь для получения требуемой концентрации (n) электронов в С-зоне в области „сильного“ поля слоя Si:Er, то получение I_{EL} , сравнимой с достигнутой в ТП структуре, возможно и в других структурах, с близкими к требуемым значениями n , E и параметрами активного слоя.

Цель данной работы — развитие исследований механизма связи I_{EL} с E в слое $n\text{-Si:Er}$, а также уточнение условий возбуждения эрбиевой ЭЛ.

2. Методы получения и исследования

Для изучения механизма связи интенсивности ЭЛ с величинами E и n в слое Si:Er использовалась эпитаксиальная структура типа $n_1^+/n_1/p^+/n_2/n\text{-Si:Er}/n^{++}$, по конструкции аналогичная известной Si-структуре инжекционно-пролетного диода (ИПД-структуре) [8,9].

Структура содержит два включенных последовательно навстречу друг другу $p-n$ -перехода. Принцип ее работы основан на надбарьерной инжекции электронов из прямо смещенного $p-n$ -перехода, возникающей при смыкании ОПЗ прямо- и обратносмещенного

[¶] E-mail: svetlovsp@mail.ru

p - n -переходов в p^+ -слое при некотором напряжении, называемом напряжением „смыкания“ или „прокола“ (U_C). Методика расчета вольт-амперной характеристики (ВАХ) для таких структур представлена в работе [8]. Заметим, что величина поля E в обратном смещенном p - n -переходе при n больше некоторой критической величины n_{cr} может быть меньше E , соответствующего U_C , из-за возникновения лавинообразования, возбуждаемого инжектированными электронами. Такой эффект известен для биполярных транзисторных структур [10].

Параметры исследуемых слоев ИПД-структур представлены в табл. 1. В табл. 1 введены обозначения: $N_{d,a}$ — концентрация доноров (d) или акцепторов (a), N_{Er} — концентрация электрически активных ионов эрбия. Для создания условий „ударного возбуждения“ электролюминесценции в слое n -Si : Er „плюс“ внешнего напряжения смещения прикладывался к слою n^{++} , а „минус“ к n_1^+ -подложке. Слой n_2 введен в конструкцию структуры для подавления эффектов, обусловленных туннелированием электронов из валентной зоны (V -зоны) p^+ -слоя, и соответственно повышения степени однозначности трактовки экспериментальных результатов.

На рис. 1 представлены расчетные значения электрического поля: максимального (E_{max}), минимального (E_{min}) и среднего ($\langle E \rangle$) в ОПЗ, содержащей слой Si : Er, обратного смещенного p - n -перехода, а также напряжения смыкания (U_C) в зависимости от толщины p^+ -слоя. Расчеты выполнены для Si-структур по методике, представленной в работе [8]. Эффекты ударной ионизации и легирования кремния эрбием не учитывались.

Соответствующие табл. 1 структуры Si/Si : Er/Si выращивались методом СМЛЭ в вакууме $(2-6) \cdot 10^{-7}$ мбар, без напуска какого-либо газа, на подложках n_1^+ -Si : P (100) с удельным сопротивлением $0.005 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Технологический режим получения ИПД-структур определялся на основе результатов предварительного выращивания

Таблица 1. Параметры слоев инжекционно-пролетной структуры

Тип слоя	$N_{d,a}, \text{см}^{-3}$	$N_{Er}, \text{см}^{-3}$	Толщина слоя*, нм
n_1^+ -Si : P	Подложка КЭФ-0.005	—	
n_1 -Si : Sb	$1.5 \cdot 10^{16}$	—	(250) 200–300
p^+ -Si : Sb	$4 \cdot 10^{17}$	—	(**) 30–70
n_2 -Si : Sb	$1.5 \cdot 10^{16}$	—	(40) 30–40
n -Si : Er	$1.5 \cdot 10^{16}$	$2 \cdot 10^{18}$	(600) 400–600
n^{++} -Si : Sb	$> 10^{18}$	—	200–300

Примечание. * В скобках толщина, используемая в расчетах, без скобок — толщина, задаваемая в технологии. ** варьируемый параметр.

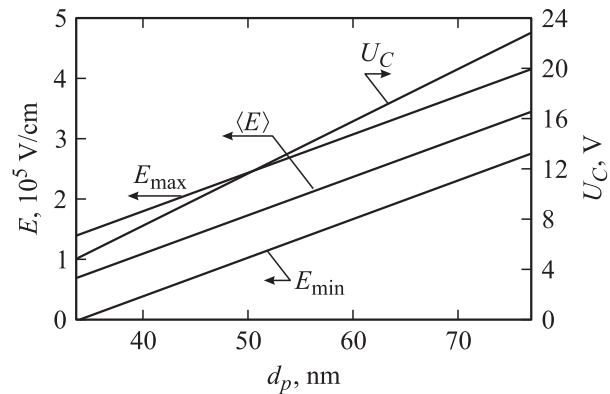


Рис. 1. Расчетные значения электрического поля: максимального (E_{max}), минимального (E_{min}) и среднего ($\langle E \rangle$) в области пространственного заряда обратносмещенного перехода $p^+ - n - n$ -Si : Er, а также напряжения „смыкания“ (U_C) в зависимости от толщины p^+ -слоя d_p для структур с параметрами из табл. 1.

тестовых структур n_1^+ -Si : P/ n_1 -Si : Sb/ p^+ -Si : B и структур p^+ -Si : B/ n_2 -Si : Sb/ n -Si : Er/ n^{++} -Si : Sb с близкими к требуемым параметрами слоев.

Концентрация носителей заряда в слоях измерялась вольт-фарадным (C - V) и электрохимическим вольт-фарадным (E - C - V) методами. Для измерения вольт-амперных характеристик применялся характериограф TR-4805 (Венгрия). Спектры ЭЛ в диапазоне длин волн $0.9-1.65 \text{ мкм}$ измерялись на постоянном токе и регистрировались фотоприемником на основе InGaAs-фотодетектора с пельтье-охлаждением.

Так же, как в работе [7], светодиоды для измерения ЭЛ изготавливались по стандартной мезотехнологии. Площадь мезы составляла 2.5 мм^2 , 70% площади мезы было свободно для выхода излучения.

3. Результаты исследований и их обсуждение

Выращенные ИПД-структуры по параметрам слоев соответствовали заданным в табл. 1. Типичные зависимости тока I от напряжения U , определенные для ИПД-структур, представлены на рис. 2. Как и ожидалось, ВАХ структур для разных полярностей приложенного напряжения была асимметричной.

Особенностью ВАХ при обратном смещении на p - n -переходе, содержащем слой Si : Er, являлась возможность возникновения на отдельных мезах S -образности (переключения при росте тока) (рис. 2, б). Подобные особенности для ВАХ наблюдались нами и для аналогичных ИПД-структур, не содержащих Er в слоях. Предполагалось, что переключение обусловлено уменьшением напряжения пробоя U_{br} после инжекции электронов в ОПЗ обратного смещенного p - n -перехода, когда U_C достаточно близко к U_{br} . Как известно [10], в транзисторных структурах U_{br} может значительно

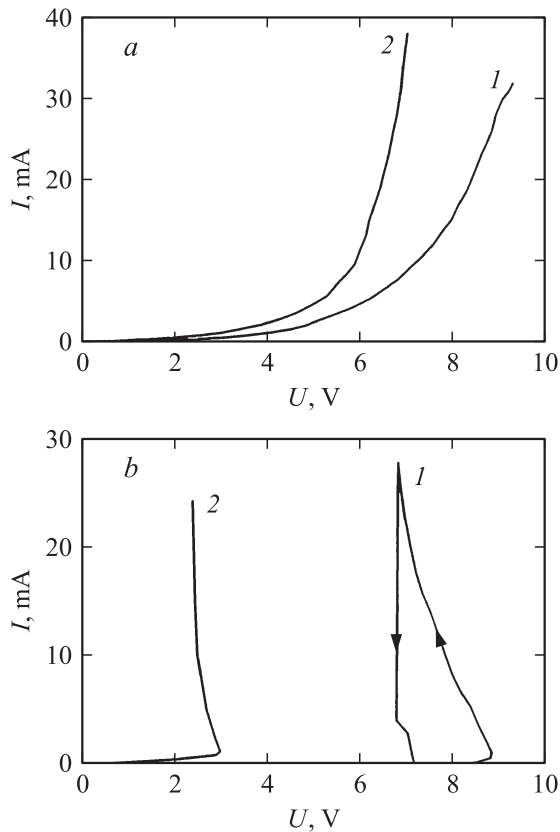


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики структуры № 271K1: *a* — без *S*-образности, *b* — с переключением. Обратная (1) и прямая (2) ветви. Площадь мезадиода 2.5 мм^2 .

уменьшаться с ростом тока инжекции. В нашем случае этот эффект проявляется в виде „переключения“ на ВАХ. Замечено, что „амплитуда“ переключения была ограничена лишь внешним сопротивлением цепи питания. Под „амплитудой“ переключения мы понимаем разность минимального тока после переключения и максимального тока до переключения. Мы предполагаем, что для мезадиодов с „переключением“ увеличение U_C может быть обусловлено флуктуационным увеличением N_a в p^+ -слое.

Величина напряжения, соответствующая резкому росту тока в режиме обратного смещения на $p^+ - n$ -переходе, содержащем активный слой, варьировалась для разных структур в диапазоне от 5 (структура № 275K) до 17.5 В (структура № 273K1). Расчетные значения поля E_{\max} в активном слое таких структур варьировались от $\sim 1.5 \cdot 10^5$ до $\sim 3 \cdot 10^5$ В/см, т.е. этот интервал содержал и значение $E_{\max} \approx 2 \cdot 10^5$ В/см, характерное для ТП структур. Соответствующая ИПД-структура (№ 271K2) имела $U_C \approx 8$ В.

При измерениях ВАХ не обнаружено светящихся в видимом диапазоне областей (точек) на поверхности мезадиодов для всех типов ВАХ, что можно трактовать как однородное по площади протекание тока.

Таким образом, выращенные структуры по своим параметрам обеспечивали выполнение необходимых (в рамках модели ударного возбуждения) условий генерации эрбиевой ЭЛ, в том числе с интенсивностью не ниже, чем в ТП структурах. Однако ни эрбиевой, ни „горячей“ электролюминесценции в ИПД-структурах обнаружить не удалось при изменении обратного тока от 50 до 500 мА.

Этот эффект мы считаем принципиально важным результатом с точки зрения определения закономерности возбуждения ЭЛ в структурах Si/Si : Er/Si с $p - n$ -переходом в режиме пробоя при обратном смещении. Поскольку в ИПД-структурах ЭЛ не наблюдается (в пределах чувствительности спектрометра), можно было сделать однозначный вывод о том, что роль туннелирования в процессе ЭЛ в ТП структурах состояла не только в поставке электронов в С-зону слоя Si : Er. Действительно, основное отличие между ИПД- и ТП структурами заключалось в характере инжекции электронов в область Si : Er: надбарьерный в ИПД-структуре и туннельный (подбарьерный) в ТП структуре. Если бы в обоих случаях инжектированные электроны попадали только в С-зону слоя Si : Er, то при одинаковых n , E и конструктивных параметрах слоя Si : Er значения I_{EL} в них должны были бы быть идентичными. Однако в ИПД-структурах ЭЛ не замечено. Следовательно, можно предположить, что для возбуждения ЭЛ в структурах Si/Si : Er/Si с $p - n$ -переходом в режиме пробоя при обратном смещении необходимым условием является туннелирование электронов из V-зоны p^+ -слоя на глубокие ионизованные донорные уровни, образованные центрами Er в Si. Согласно [11], энергия ионизации этих уровней составляет 0.2–0.27 эВ.

Степенью выполнения этого условия можно объяснить ряд не до конца выясненных ранее закономерностей для ЭЛ в рассматриваемых структурах Si/Si : Er/Si. Например, подавление ЭЛ при введении в диодную структуру в плоскости $p - n$ -перехода нанометровой высокоомной прослойки n -Si между слоями p^+ - и n -Si : Er [4] и уменьшение I_{EL} с понижением температуры [4] могут быть обусловлены снижением туннельной составляющей в обратном токе структуры.

В качестве примера рассмотрим также изменение I_{EL} от концентрации ионизованных доноров (N_d) в слое Si : Er в диодных структурах, приведенное в работе [4] (на рис. 4 из работы [4]). Модель ударного возбуждения предполагает, что для возникновения ЭЛ необходимым условием является наличие в С-зоне слоя Si : Er электронов с энергией \mathcal{E} не менее 0.8 эВ. Эту энергию электрон набирает в электрическом поле на длине свободного пробега $\lambda \approx 17$ нм [4,5]. По величине \mathcal{E} легко определить, что соответствующая величина поля $E = E_\lambda$ составляет не менее $4.7 \cdot 10^5$ В/см. Поскольку в области более низких полей ЭЛ должна отсутствовать, для рассматриваемых диодных структур можно рассчитать ширину активной области W_a , в которой $E \geq 4.7 \cdot 10^5$ В/см. Результаты таких расчетов приведены

Таблица 2. Исходные данные по структурам $p^+ - n\text{-Si} : \text{Er}/n^+$ из работы [4], отличающимся концентрацией ионизованных доноров

i	$N_d,$ 10^{17} см^{-3}	$U_{br},$ В	$I_{EL},$ отн. ед.	$E_{max},$ 10^5 В/см	$W,$ нм	$W_a,$ нм	I_{ELi}/I_{EL3}
1	1	8.5	75	5.08	335	25	1.5
2	4	5.5	250	8.18	134	57	5
3	30	3	50	16.5	36	26	1

в табл. 2 совместно с данными по U_{br} и I_{EL} из рис. 4 работы [4]. Также в табл. 2 для анализа приведены расчетные значения E_{max} и W — максимальной напряженности поля и ширины ОПЗ при пробое $p-n$ -перехода соответственно. Обозначим индексом „ i “ номер строки в табл. 2. В рамках модели „ударного возбуждения“ из табл. 2 следует, что I_{EL3} (значение I_{EL} при $i = 3$) должно быть не менее I_{EL1} (I_{EL} при $i = 1$), поскольку $W_{a1} < W_{a3}$, а $\langle E_1 \rangle < \langle E_3 \rangle$. Здесь

$$\langle E \rangle = (1/W_a) \int_0^{W_a} E dx$$

и энергия, набираемая электронами на длине λ в третьей структуре ($i = 3$), должна быть больше, чем в первой ($i = 1$). Кроме того, I_{EL2} должно превышать I_{EL3} не более чем в 2.2 раза, так как $W_{a2}/W_{a3} = 2.2$, а в эксперименте отношение I_{EL2} к I_{EL3} равно 5. Таким образом, имеется несоответствие полученных в модели „ударного возбуждения“ и экспериментальных результатов.

Обсуждаемая закономерность зависимости $I_{EL}(N_d)$ становится понятной, если для процесса ЭЛ важна не энергия электронов в C -зоне, а степень выполнения условия туннелирования электронов на глубокие донорные состояния. Понятно, что величина туннельной составляющей в обратном токе через диодную структуру должна расти с ростом E , т.е. при изменении N_d от 10^{17} до $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. При этом величина концентрации электронов, захватываемых на глубокие уровни, будет иметь максимум в зависимости от электрического поля E , обусловленный тем, что начиная с некоторого поля $E > E_{cr}$ будет доминировать прямое туннелирование электронов из V -зоны p^+ -слоя в C -зону слоя $-Si : \text{Er}$, без захвата на глубокие ионизованные донорные уровни. Если значение E_{cr} примерно равно значению, характерному для смешанного туннельно-лавинного типа пробоя, то при $E \approx E_{cr}$ интенсивность ЭЛ должна быть максимальной. Это качественно согласуется с экспериментальными результатами.

Таким образом, учет вышеприведенных закономерностей позволяет повысить степень понимания физики процесса ЭЛ, а также позволяет усомниться в правомерности модели возбуждения ЭЛ „горячими“ электронами. Действительно, из анализа экспериментальных результатов следует, что ЭЛ наблюдается и в случаях, когда

$E < E_{\lambda}$ в 2–2.5 раза, т.е. при кинетической энергии электронов, явно не достаточной для возбуждения излучательных переходов в $4f$ -оболочке ионов Er^{3+} . При этом, например в ТП структурах, I_{EL} заметно выше, чем в диодных, с более высокими значениями поля E в слое $\text{Si} : \text{Er}$. Кроме того, если интенсивность I_{EL} растет с ростом потока электронов на глубокие донорные состояния в слое $\text{Si} : \text{Er}$, это позволяет предположить, что ЭЛ возникает из-за передачи энергии ионам Er^{3+} именно этими электронами, в результате их перехода на энергетические уровни вблизи потолка V -зоны в Si . В качестве таковых могут использоваться, например, мелкие акцепторные уровни, создаваемые примесями типа В или Al в Si . О их наличии в слоях $\text{Si} : \text{Er}$ сообщалось в работе [12]. Некоторые из этих уровней могут быть нейтральными, например, в результате термогенерационных процессов и быть способными к захвату электронов с глубоких доноров за время, соответствующее времени жизни неосновных носителей. Подобный механизм возбуждения излучательных переходов в $4f$ -оболочке иона Er^{3+} известен для процесса фотолюминесценции в аналогичных структурах при энергии возбуждения менее ширины запрещенной зоны \mathcal{E}_g [13,14].

Для проверки гипотезы о рекомбинационном характере возбуждения излучательных переходов для ЭЛ в режиме пробоя при обратном смещении была экспериментально исследована токовая зависимость I_{EL} в диапазоне длин волн 0.9–1.65 мкм для выращенных СМЛЭ методом туннельно-пролетных структур с параметрами, близкими к оптимальным, приведенным в работе [7]. Измерения проводились при комнатной температуре в режиме постоянного тока. Результаты измерений для 3-х линий спектра ЭЛ: $\lambda = 1.1, 1.54$ и 1.56 мкм приведены на рис. 3. Из рис. 3 следует, что зависимости I_{EL} от величины обратного тока как для $\lambda = 1.54$ мкм, так и для $\lambda = 1.1$ мкм имеют максимум. При этом максимум I_{EL} для $\lambda = 1.54$ мкм имеет место при токах заметно меньших, чем для $\lambda \approx 1.1$ мкм. Эти особенности спектра можно объяснить на основе положения о рекомбина-

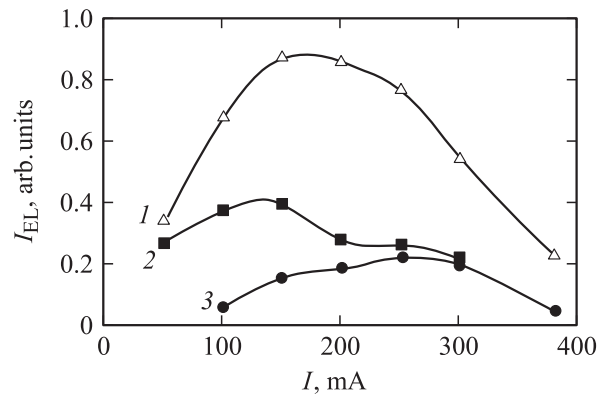


Рис. 3. Токовая зависимость интенсивности электролюминесценции туннельно-пролетной структуры № 251K2 для спектральных линий: 1.54 (1), 1.56 (2), 1.1 мкм (3).

ционном характере возбуждения ЭЛ. Действительно, как отмечалось ранее, эрбиевая ЭЛ имеет место при токах (напряжениях, полях), когда электроны туннелируют на глубокие ионизованные донорные состояния в слое Si:Er. С ростом обратного тока (напряжения, поля) интенсивность эрбиевой ЭЛ сначала растет (поскольку растет концентрация электронов, туннелирующих на глубокие ионизованные донорные состояния), а затем падает (так как усиливается туннелирование на мелкие донорные уровни в слое Si:Er, а захват электронов на глубокие донорные уровни падает). Вызванное этим увеличение концентрации электронов вблизи дна С-зоны обуславливает повышение интенсивности рекомбинационных процессов с излучением энергии, близкой к \mathcal{E}_g ($\lambda \approx 1$ мкм). Дальнейшее увеличение поля в p^+-n^+ -переходе (дальнейший рост обратного тока) обуславливает доминирование межзонного механизма туннелирования и повышение энергии свободных электронов в С-зоне для слоя Si:Er. Соответственно снижается вероятность межзонных рекомбинационных процессов [15] и, как следствие, падает интенсивность излучения для $\lambda \approx 1$ мкм.

Таким образом, характер токовой зависимости спектра ЭЛ в ближнем ИК диапазоне соответствует особенностям рекомбинационных процессов в слое Si:Er для различных значений энергии электронов, протуннелировавших через p^+-n^+ -переход, что подтверждает справедливость гипотезы о рекомбинационном механизме возбуждения излучательных переходов, причем как для эрбиевой, так и для широкополосной, так называемой „горячей“ ЭЛ.

4. Заключение

Методом СМЛЭ выращены структуры типа $n^+/n_1/p^+/n_2/n\text{-Si:Er}/n^{++}$, имеющие два включенных навстречу друг другу $p-n$ -перехода. Параметры структур подобраны таким образом, что при обратном смещении p^+-n_2 -перехода возможны смыкание ОПЗ прямо- и обратносмещенного $p-n$ -переходов в p^+ -слое и реализация режима надбарьерной инжекции электронов из слоя n_1 в слой $n\text{-Si:Er}$. При этом величина поля E_{\max} в активном слое составляла от $\sim 1.5 \cdot 10^5$ до $\sim 3.2 \cdot 10^5$ В/см, что близко к характерной для аналогичного слоя туннельно-пролетных структур ($E \approx 2 \cdot 10^5$ В/см), отличающихся достаточно высокой интенсивностью ЭЛ.

Установлено, что в ближнем ИК диапазоне ЭЛ в таких структурах при обратном смещении $p-n$ -перехода, содержащего слой Si:Er, не наблюдается в широком диапазоне токов.

Обнаружено, что для туннельно-пролетной структуры интенсивность ЭЛ на длине волны 1.5 мкм и около 1 мкм в зависимости от величины обратного тока имеет максимум.

В соответствии с результатами экспериментальных исследований замечено, что возбуждение ЭЛ на длине волны 1.54 мкм в структурах Si/Si:Er/Si с $p-n$ -переходом в режиме пробоя при обратном смещении имеет место при наличии туннелирования электронов из V-зоны p^+ -слоя на глубокие ионизованные донорные уровни, образованные центрами Er в Si.

Предложена и обоснована модель ЭЛ на длине волны 1.54 мкм, основанная на возбуждении переходов $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ в ионе Er^{3+} за счет передачи им энергии электронов при переходе с глубоких донорных уровней на свободные энергетические состояния вблизи потолка V-зоны.

Авторы выражают искреннюю благодарность проф. Е.С. Демидову, проф. Д.И. Тетельбауму (ННГУ, г. Н. Новгород) за внимание к работе, В.П. Кузнецову за предоставление структур Si/Si:Er/Si для исследований, Н.А. Алябиной, Л.Т. Щипковой (НИФТИ ННГУ, г. Н. Новгород) за помощь в измерениях ВАХ и концентрационных профилей структур.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № 2.1.1.3615).

Список литературы

- [1] G. Franzo, F. Priolo, S. Koffa, A. Kamera. Appl. Phys. Lett., **64**, 2235 (1994).
- [2] J. Stimmer, A. Reittinger, V.F. Nützel, G. Abstreiter, H. Holzbrecher, Ch. Buchal. Appl. Phys. Lett., **68**, 3290 (1996).
- [3] N.A. Sobolev, A.M. Emel'yanov, K.F. Shtel'makh. Appl. Phys. Lett., **71**, 190 (1997).
- [4] В.П. Кузнецов, 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. ФТП, **40**, 868 (2006).
- [5] V.B. Shmagin, S.V. Obolensky, D.Yu. Remizov, V.P. Kuznetsov, Z.F. Krasilnik. IEEE J. Select. Topics Quant. Electron., **12**, 1556 (2006).
- [6] A.G. Chynoweth, K.G. McKay. Phys. Rev., **102**, 369 (1956).
- [7] 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).
- [8] O. Eknoyan, S.M. Sze, E.S. Yang. SSE, **20**, 285 (1977).
- [9] O. Eknoyan, E.S. Yang, S.M. Sze. SSE, **20**, 295 (1977).
- [10] С. Зи. *Физика полупроводниковых приборов* (М., Мир, 1984) т. 1, гл. 3, с. 158 [Пер. с англ.: S.M. Sze. *Physics of Semiconductor Devices* (N. Y.–Chichester–Brisbane–Toronto–Singapore, Willey Interscience Publication, 1981) v. 1].
- [11] О.В. Белова, В.Н. Шабанов, А.П. Касаткин, О.А. Кузнецов, А.В. Корнаухов, Б.А. Андреев, З.Ф. Красильник. ФТП, **42**, 136 (2008).
- [12] В.П. Кузнецов, Р.А. Рубцова. ФТП, **34**, 519 (2000).
- [13] Б.А. Андреев, З.Ф. Красильник, Д.И. Крыжков, А.Н. Яблонский, В.П. Кузнецов, Т. Gregorkieviz, V.A.J. Klik. ФТП, **46**, 98 (2004).

- [14] Б.А. Андреев, З.Ф. Красильник, А.Н. Яблонский, В.П. Кузнецов, Т. Gregorkieviz, V.A.J. Klik. ФТП, **47**, 83 (2005).
- [15] А. Милнс. *Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках* (М., Мир, 1977) гл. 5, с. 105 [Пер. с англ.: A.G. Milnes. *Deep Impurities in Semiconductors* (N.Y.–London–Sidney–Toronto, Willey Interscience Publication, 1977)].

Редактор Т.А. Полянская

On the nature of the electroluminescence at 1.5 μm in the breakdown regime of the reverse biased Er-doped Si $p-n$ -structures grown by sublimation molecular beam epitaxy

A.V. Kornaukhov, A.A. Ezhevskii, M.O. Marychev, D.O. Filatov, V.G. Shengurov

Research Institute for Physics and Technology,
Lobachevskii University of Nizhny Novgorod,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract The electroluminescence in the 0.9–1.65 μm emission wavelength band in the breakdown regime of the reversed biased Si/Si : Er/Si $p-n$ structures grown by sublimation molecular beam epitaxy has been experimentally studied. Based on the results of the present study, a novel physical model for the excitation of the radiative transitions in the near infrared band through the recombination of the electrons injected from the valence band of the p^+ -layer into the respective electronic states in the n -Si : Er one by tunneling in the electric field of the reverse biased $p-n$ junction has been proposed. The model proposed has been found to agree qualitatively with the main results of the experimental studies known to date.