

Электролюминесценция ионов эрбия в кремниевых диодных структурах $p^{++}/n^{+}/n\text{-Si}:\text{Er}/n^{++}$

© 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[†]

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

* Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 4 апреля 2007 г. Принята к печати 16 апреля 2007 г.)

Обсуждаются результаты экспериментов по исследованию электролюминесценции ионов эрбия в кремниевых диодных структурах типа $p^{++}/n^{+}/n\text{-Si}:\text{Er}/n^{++}$, выращенных методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии. Отличительной особенностью структур является то, что области формирования потока электронов ($n^{+}\text{-Si}$) и ударного возбуждения ионов эрбия ($n\text{-Si}:\text{Er}$) пространственно разнесены. Исследовано влияние толщины слоя $n^{+}\text{-Si}$ на электрические и электролюминесцентные свойства диодов. Показано, что уменьшение толщины слоя $n^{+}\text{-Si}$ вызывает трансформацию механизма пробоя структуры в направлении туннельный \rightarrow лавинный. Зависимость интенсивности электролюминесценции ионов Er^{3+} от толщины высоколегированной области $n^{+}\text{-Si}$ носит колоколообразный характер. При уровне легирования слоя $n^{+}\text{-Si}$ $n \approx 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ максимальная интенсивность электролюминесценции достигается при толщине слоя $n^{+}\text{-Si} \sim 23 \text{ нм}$.

PACS: 78.60.Fi, 85.30.Mn, 85.60.Jb

1. Введение

Интерес к монокристаллическому кремнию, легированному редкоземельным элементом эрбием, обусловлен перспективой создания на его основе светоизлучающих устройств, совместимых с кремниевой технологией и излучающих в одном из окон прозрачности кварцевых волоконно-оптических линий связи (переход ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ в $4f$ -оболочке иона Er^{3+} на длине волны $\lambda \approx 1.54 \text{ мкм}$). При комнатной температуре наиболее эффективен ударный механизм возбуждения ионов Er^{3+} горячими электронами, реализуемый в диодных структурах $\text{Si}:\text{Er}/\text{Si}$, работающих при обратном смещении в режиме пробоя p/n -перехода [1,2]. Высокая эффективность ударного механизма обусловлена достаточно большим эффективным сечением возбуждения ($\sigma \approx 2 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$ при температуре $T = 300 \text{ К}$ [3,4]) и практически полным подавлением безызлучательной оже-релаксации возбужденных ионов Er^{3+} на свободных носителях в области пространственного заряда (ОПЗ) диодной структуры.

Известно, что интенсивность эрбиевой электролюминесценции (ЭЛ) из обратно смещенной диодной структуры $p^{+}\text{-Si}/n\text{-Si}:\text{Er}$ при заданной объемной концентрации ионов Er^{3+} пропорциональна ширине ОПЗ. В то же время увеличение ширины ОПЗ (например, путем уменьшения уровня легирования базы диода $p^{+}\text{-Si}/n\text{-Si}:\text{Er}$) в конечном итоге неизбежно вызывает трансформацию

туннельного механизма пробоя p/n -перехода в лавинный и, как следствие, резкое снижение интенсивности ЭЛ ионов Er^{3+} [5,6]. По нашему мнению, указанное ограничение, связанное с развитием лавинного пробоя, можно обойти, используя кремниевые диодные электролюминесцентные структуры с более сложным профилем легирования, в частности диодные структуры типа $p^{++}\text{-Si}/n^{+}\text{-Si}/n\text{-Si}:\text{Er}/n^{++}\text{-Si}$ (далее $p^{++}/n^{+}/n\text{-Si}:\text{Er}/n^{++}$). Такие структуры (по аналогии с лавинно-пролетными диодами они были названы туннельно-пролетными) были предложены в 60-х годах прошлого столетия для генерации СВЧ колебаний, но вследствие невысокой эффективности, обусловленной безынерционностью туннельного пробоя, не смогли успешно конкурировать с лавинно-пролетными диодами (см., например, [7]).

Потенциальное преимущество структур типа $p^{++}/n^{+}/n\text{-Si}:\text{Er}/n^{++}$ перед ранее исследованными диодными структурами с треугольным и трапецеидальным распределениями поля по ширине ОПЗ [5,6,8] состоит в том, что в структурах $p^{++}/n^{+}/n\text{-Si}:\text{Er}/n^{++}$ области формирования потока электронов ($n^{+}\text{-Si}$) и ударного возбуждения ионов эрбия ($n\text{-Si}:\text{Er}$) пространственно разнесены [8,9]. Это позволяет возбуждать ионы Er^{3+} практически во всем объеме ОПЗ и тем самым заметно увеличить интенсивность ЭЛ ионов Er^{3+} . Перспективность светоизлучающих структур типа $p^{++}/n^{+}/n\text{-Si}:\text{Er}/n^{++}$ подтверждена результатами численного моделирования [10]. О первом наблюдении ЭЛ ионов Er^{3+} в диодных туннельно-пролетных структурах

[¶] E-mail: shm@ipm.sci-nnov.ru

сообщалось в [11]. В настоящей работе систематизированы результаты первых экспериментов по исследованию электрофизических и электролюминесцентных свойств диодных структур этого типа.

2. Методы получения и исследования

Эпитаксиальные структуры $p^{++}/n^{+}/n\text{-Si:Er}/n^{++}$ выращивались методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии (СМЛЭ) [12] на подложках $p\text{-Si:В}$ с ориентацией (100) и удельным сопротивлением $10\text{ Ом}\cdot\text{см}$ в вакууме при остаточном давлении $(2-6)\cdot 10^{-5}$ Па без намеренного напуска какого-либо газа. Температура роста составляла $500-600^\circ\text{C}$. Дополнительному отжигу структуры не подвергались. Концентрация носителей в слоях составляла: $p \approx 1\cdot 10^{19}\text{ см}^{-3}$ в слое $p^{++}\text{-Si}$, $n \approx 2\cdot 10^{18}\text{ см}^{-3}$ в слое $n^{+}\text{-Si}$, $n \approx 3\cdot 10^{20}\text{ см}^{-3}$ в слое $n^{++}\text{-Si}$ и $n \approx 1\cdot 10^{16}\text{ см}^{-3}$ в слое $n\text{-Si:Er}$. Слой $n\text{-Si:Er}$ равномерно легировался эрбием до концентрации $5\cdot 10^{18}\text{ см}^{-3}$. Концентрация свободных носителей в эпитаксиальных слоях определялась из вольт-фарадных ($C-V$) измерений и измерений эффекта Холла, распределение примесей по глубине слоев — методом масс-спектрометрии вторичных ионов. Светодиоды для измерений ЭЛ изготавливались по стандартной мезотехнологии, площадь мезы $\sim 2.5\text{ мм}^2$, 70% площади мезы было свободно для выхода излучения. Для измерения напряжения пробоя U_{br} и определения концентрации электронов из емкостных измерений использовались диоды с площадью мезы $4\cdot 10^{-2}\text{ мм}^2$.

3. Результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведены результаты $C-V$ -профилеирования диодных структур $p^{++}/n^{+}/n\text{-Si:Er}/n^{++}$ с различной толщиной высоколегированного слоя $n^{+}\text{-Si}$. Следует отметить, что интерпретация результатов $C-V$ -

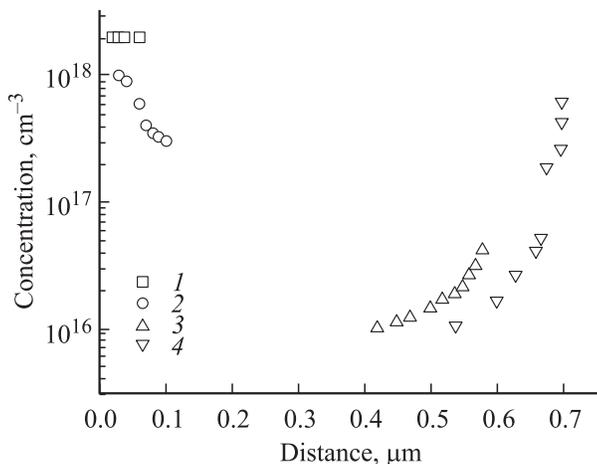


Рис. 1. Результаты $C-V$ -профилеирования диодных структур $p^{++}/n^{+}/n\text{-Si:Er}/n^{++}$ при разной толщине высоколегированного слоя $n^{+}\text{-Si}$ d , нм: 1 — 50, 2 — 30, 3 — 22, 4 — 15.

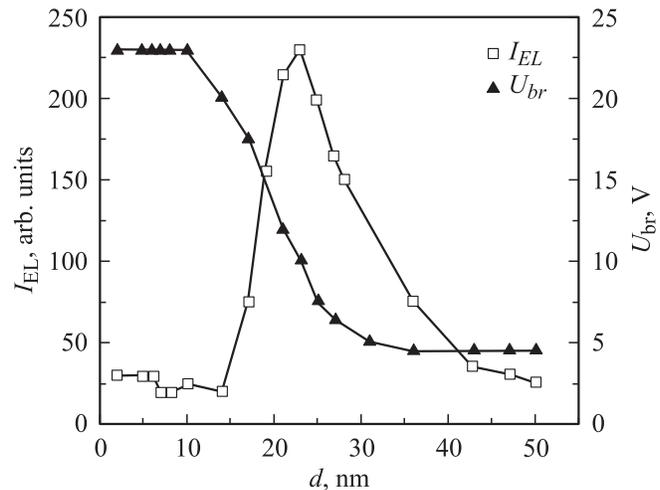


Рис. 2. Зависимость интенсивности электролюминесценции I_{EL} и напряжения пробоя U_{br} от толщины d высоколегированного слоя $n^{+}\text{-Si}$. Ток накачки $\sim 0.2\text{ А}$, температура $\sim 300\text{ К}$. Толщина слоя $n\text{-Si:Er} \sim 0.7\text{ мкм}$.

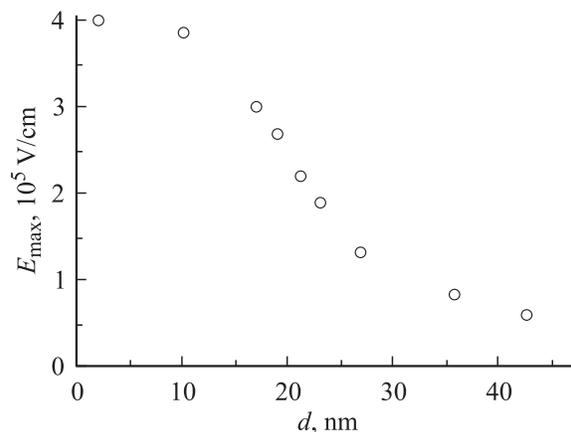


Рис. 3. Зависимость максимальной напряженности электрического поля в слое $n\text{-Si:Er}$ E_{max} в режиме пробоя диода $p^{++}/n^{+}/n\text{-Si:Er}/n^{++}$ от толщины d высоколегированного слоя $n^{+}\text{-Si}$. Толщина слоя $n\text{-Si:Er} \sim 0.7\text{ мкм}$.

измерений достаточно сложна в данном случае в силу того, что исследованные структуры характеризуются резким профилем легирования. Уровень легирования слоя $n^{+}\text{-Si}$ ($\sim 2\cdot 10^{18}\text{ см}^{-3}$) проявляется лишь при профилеировании структур с максимальной толщиной $n^{+}\text{-Si}$ слоя $d \approx 50\text{ нм}$. При меньшей толщине слоя $n^{+}\text{-Si}$ его не удается отчетливо зарегистрировать, что вызвано, по-видимому, влиянием дебаевского экранирования. На рис. 2 показано, как с изменением толщины d слоя $n^{+}\text{-Si}$ меняются напряжение пробоя диодной структуры U_{br} и интенсивность эрбиевой ЭЛ I_{EL} . На рис. 3 приведены результаты расчета максимальной напряженности электрического поля E_{max} в слое $n\text{-Si:Er}$. Величина E_{max} оценивалась с помощью уравнения Пуассона по измеренным U_{br} , результатам ВИМС и $C-V$ -профилеирования. Толщина d слоя $n^{+}\text{-Si}$ оценивалась по скорости роста слоя.

Анализ приведенных зависимостей позволяет нам утверждать следующее. При $d \geq 50$ нм поле не проникает в область $n\text{-Si:Er}$, ОПЗ полностью сосредоточена в слое $n^{+}\text{-Si}$, возбуждение ионов эрбия минимально. По мере проникновения поля в слой $n\text{-Si:Er}$ (диодные структуры с $d \leq 40$ нм) мы наблюдаем увеличение напряжения пробоя U_{br} и интенсивности ЭЛ I_{EL} . Расчеты показывают, что при выбранном соотношении уровней легирования слоев $n^{+}\text{-Si}$ и $n\text{-Si:Er}$ проникновение поля в область $n\text{-Si:Er}$ происходит достаточно резко, практически сразу на всю глубину слоя $n\text{-Si:Er}$. Однако при $d \approx 40$ нм поле в слое $n\text{-Si:Er}$ слишком мало, чтобы скомпенсировать потери, связанные с рассеянием носителей на примесях и тепловых колебаниях решетки. Поэтому заметное увеличение интенсивности ЭЛ наблюдается при $d \leq 35$ нм, когда E_{max} достигает $\sim 10^5$ В/см. Интенсивность ЭЛ достигает максимума при $d \approx 23$ нм, при этом напряжение пробоя диода и поле в слое $n\text{-Si:Er}$ достигают соответственно величин $U_{br} \approx 10$ В, $E_{max} \approx 2 \cdot 10^5$ В/см. При дальнейшем уменьшении толщины слоя $n^{+}\text{-Si}$ и соответствующем увеличении E_{max} интенсивность эрбиевой ЭЛ достаточно резко падает, что мы связываем с усилением лавинного размножения носителей в слое $n\text{-Si:Er}$. Отметим, что максимум зависимости $I_{EL}(d)$ является достаточно острым. Это говорит о том, что трансформация механизма пробоя диодной структуры в направлении туннельный \rightarrow лавинный, вызываемая уменьшением толщины слоя $n^{+}\text{-Si}$ и соответственно увеличением электрического поля в слое $n\text{-Si:Er}$, происходит достаточно резко. В диодах с $d < 10$ нм напряжение пробоя возрастает до величины $U_{br} \approx 23$ В, характерной для диодов с развитым лавинным механизмом пробоя. Интенсивность ЭЛ ионов Er^{3+} в таких диодах близка к нулю.

В целом полученные зависимости напряжения пробоя структуры и интенсивности ЭЛ от толщины высоколегированного слоя $n^{+}\text{-Si}$, $U_{br}(d)$ и $I_{EL}(d)$, соответствуют нашим представлениям о процессах, определяющих интенсивность излучения из туннельно-пролетной структуры. В то же время интенсивность ЭЛ туннельно-пролетной структуры, связанной с ионами Er^{3+} , меньше ожидаемой. Дальнейшие усилия будут направлены на оптимизацию параметров туннельно-пролетной структуры с целью увеличения ЭЛ ионов Er^{3+} .

4. Заключение

В диодных светоизлучающих структурах $p^{++}/n^{+}/n\text{-Si:Er}/n^{++}$ с тонким сильно легированным слоем $n^{+}\text{-Si}$ ($n \approx 2 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$) и широким слабо легированным активным слоем $n\text{-Si:Er}$ (концентрация эрбия $N_{Er} \approx 5 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$, концентрация электронов $n \approx 1 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$) исследована зависимость напряжения пробоя и интенсивности ЭЛ ионов Er^{3+} от толщины слоя $n^{+}\text{-Si}$. Показано, что уменьшение толщины слоя $n^{+}\text{-Si}$ сопровождается постепенным нарастанием

напряженности электрического поля в слое $n\text{-Si:Er}$ и вызывает трансформацию механизма пробоя структуры в направлении туннельный \rightarrow лавинный. Зависимость интенсивности ЭЛ ионов Er^{3+} от толщины сильно легированной области $n^{+}\text{-Si}$ носит колоколообразный характер. При уровне легирования слоя $n^{+}\text{-Si}$ $n = 2 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$ максимальная интенсивность ЭЛ достигается при толщине слоя $d \approx 23$ нм.

Авторы благодарят проф. Д.И. Тетельбаума за помощь в работе.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 06-02-16563, 07-02-01304), RFBR-NWO (грант № 047.011.2005.003) и Министерства образования и науки РФ.

Список литературы

- [1] G. Franzo, F. Priolo, S. Coffa, A. Polman, A. Carnera. Appl. Phys. Lett., **64**, 2235 (1994).
- [2] B. Zheng, J. Michel, F.Y.G. Ren, L.C. Kimerling, D.C. Jacobson, J.M. Poate. Appl. Phys. Lett., **64**, 2842 (1994).
- [3] 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).
- [4] Д.Ю. Ремизов, В.Б. Шмагин, А.В. Антонов, В.П. Кузнецов, З.Ф. Красильник. ФТТ, **47**, 95 (2005).
- [5] В.Б. Шмагин, Д.Ю. Ремизов, З.Ф. Красильник, В.П. Кузнецов, В.Н. Шабанов, Л.В. Красильникова, Д.И. Крыжков, М.Н. Дроздов. ФТТ, **46** (1), 110 (2004).
- [6] 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).
- [7] А.С. Тагер, В.М. Вальд-Перлов. *Лавинно-пролетные диоды и их применение в технике СВЧ* (М., Сов. радио, 1986) гл. 1, с. 27.
- [8] В.Б. Шмагин, Д.Ю. Ремизов, С.В. Оболенский, Д.И. Крыжков, М.Н. Дроздов, З.Ф. Красильник. ФТТ, **47**, 120 (2005).
- [9] V.B. Shmagin, S.V. Obolensky, D. Yu. Remizov, V.P. Kuznetsov, Z.F. Krasilnik. IEEE J. Select. Topics Quant. Electron., **12**, 1556 (2006).
- [10] S.V. Obolensky, V.B. Shmagin, V.A. Kozlov, K.E. Kudryavtsev, D.Yu. Remizov, Z.F. Krasilnik. Semicond. Sci. Technol., **21**, 1459 (2006).
- [11] Д.Ю. Ремизов, З.Ф. Красильник, В.П. Кузнецов, С.В. Оболенский, В.Б. Шмагин. *Матер. X симп. „Нанотехника и наноэлектроника“* (Нижний Новгород, Россия, 2006) т. 2, с. 348.
- [12] В.П. Кузнецов, Р.А. Рубцова. ФТП, **34**, 519 (2000).

Редактор Л.В. Шаронова

Erbium electroluminescence of silicon diodes $p^{++}/n^{+}/n\text{-Si}:\text{Er}/n^{++}$

V.P. Kuznetsov, D. Yu. Remizov[†], V.B. Shmagin[†],
K.E. Kudryavtsev[†], V.N. Shabanov, S.V. Obolensky*,
O.V. Belova, M.V. Kuznetsov, A.V. Kornaukhov,
B.A. Andreev[†], Z.F. Krasilnik[†]

Physico-Technical Research Institute
of N.I. Lobachevsky State University
of Nizhny Novgorod,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

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

* N.I. Lobachevsky State University
of Nizhny Novgorod,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract The results of experiments on research of erbium electroluminescence from silicon diodes $p^{++}/n^{+}/n\text{-Si}:\text{Er}/n^{++}$ grown by sublimation molecular beam epitaxy are discussed. The characteristic feature of these diodes is that the regions of electron stream formation ($n^{+}\text{-Si}$) and erbium impact excitaton ($n\text{-Si}:\text{Er}$) are separated spatially. The influence of $n^{+}\text{-Si}$ layer on electrical and electroluminescent properties of the diodes has been investigated. It is shown, that decrease in the $n^{+}\text{-Si}$ layer thickness causes the transformation of a tunnel $p\text{-}n$ junction breakdown to an avalanche one. The dependence of electroluminescence intensity on $n^{+}\text{-Si}$ layer thickness is shown to be bell-shaped curve. At the doping level of the $n^{+}\text{-Si}$ layer $n \approx 2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ the maximal electroluminescence intensity is reached at the $n^{+}\text{-Si}$ layer thickness of $\sim 23 \text{ nm}$.