

Электролюминесценция на длине волны 1.5 мкм в диодных структурах Si:Er/Si, легированных акцепторами Al, Ga, В

© В.П. Кузнецов*[†], В.Б. Шмагин⁺, М.О. Марычев[×], К.Е. Кудрявцев⁺, М.В. Кузнецов*, Б.А. Андреев⁺,
А.В. Карнаухов*, О.Н. Горшков*, 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 6 мая 2010 г. Принята к печати 18 мая 2010 г.)

Слой Si:Er в диодных структурах легировались Al, Ga или В в процессе выращивания методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии. Результат: в диодах с толстой базой (до 0.8 мкм) наблюдалось резкое увеличение интенсивности электролюминесценции на длине волны 1.5 мкм.

1. Введение

Для успешного функционирования оптоволоконных систем связи необходимы более совершенные и дешевые источники излучения в диапазоне длин волн 1.2–1.7 мкм [1]. Многие исследователи полагают, что такие устройства целесообразно готовить на основе слоев Si и, в частности, на эпитаксиальных структурах Si:Er/Si. Кремний является основным полупроводниковым материалом электроники, технология изготовления электронных приборов на основе кремния отработана, параметры приборов более стабильны. При прохождении тока температура диодов в процессе эксплуатации может значительно повышаться. По нашим данным, светодиоды на основе структур Si:Er/Si сохраняют свои параметры по крайней мере до 400°C. Однако слабая интенсивность люминесценции от светодиодов из кремния затрудняет их коммерческое использование. Несмотря на то что люминесценция в структурах Si:Er/Si изучается уже несколько десятилетий, надежда на успех не слабеет и исследование продолжается.

Наши структуры Si:Er/Si выращивались методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии (СМЛЭ). При температуре эпитаксии в области 580–800°C слои Si:Er имели концентрацию носителей тока n в пределах от $2 \cdot 10^{16}$ до $5 \cdot 10^{15}$ см⁻³. Температурная зависимость концентрации носителей тока для наших слоев Si:Er не имела насыщения до 300 К [2]. Энергия ионизации ε_i донорных центров Er, наблюдаемая в области комнатных температур, довольно велика, более 0.3 эВ от дна зоны проводимости. В области комнатных температур концентрация электрически активных (не ионизованных) центров Er, соответствующая $\varepsilon_i = 0.3$ эВ и $n = 2 \cdot 10^{16}$ см⁻³, составила $N_{Er} \approx 10^{18}$ см⁻³. Мы считали за благо иметь такие центры Er. В самом деле, при концентрации ионизованных центров эрбия $n \approx 10^{15} - 10^{16}$ см⁻³ ширина об-

ласти пространственного заряда (ОПЗ) p - n -переходов при 300 К имеет большую величину. Вырастив диодную структуру из ряда одинаковых p - n -переходов [3], область взаимодействия электронов с центрами Er можно значительно увеличить, до величины ~ 10 мкм. Это на 3 порядка больше, чем в диодах, полученных методом имплантации (ИМП) [4] или методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) [5], где концентрация n в базе диодов составляет $10^{18} - 10^{19}$ см⁻³. Однако нас ожидало разочарование. Диоды с концентрацией в базе $n = 10^{15} - 10^{16}$ см⁻³ при толщине базы $d \geq 0.5$ мкм электролюминесценции (ЭЛ) не имели. Некоторые причины этого и пути выхода из тупика обсуждались ранее [3]. Однако проблему хотелось понять более глубоко. Представлялось интересным выяснить, как влияет степень заполнения электронами донорных уровней центров Er на параметры ЭЛ в диодных структурах Si:Er/Si. Это являлось целью данной работы. Концентрацию заряженных центров эрбия Er, казалось бы, можно увеличить путем легирования слоев Si:Er обычными акцепторами Al, Ga или В.

2. Методы получения и исследования

Для исследования параметров ЭЛ методом СМЛЭ выращивались [6] простые диодные структуры. Источниками паров Si и примесей Er, Al, Ga, В служили пластины кремния, легированные соответствующей примесью. Температура эпитаксии слоев составляла 520, 580°C. В начале на подложку p -типа с ориентацией (100) и удельным сопротивлением 10 Ом·см осаждался слой p^+ толщиной 0.1–0.5 мкм. Он легировался одной из указанных акцепторных примесей до $\sim 10^{19}$ см⁻³. Затем осаждался слой Si:Er толщиной 0.6–0.8 мкм с концентрацией эрбия $5 \cdot 10^{18}$ см⁻³. Слой n^{++} под контакт с металлом легировался фосфором до 10^{20} см⁻³. Пластины Si — источники молекул Si, P, Er — располагались параллельно подложке. Скорость роста сло-

[†] E-mail: kvp@nifti.unn.ru

ев Si:Er была практически постоянна по длине подложки. Пластина Si — источник акцепторной примеси — располагалась перпендикулярно подложке, на расстоянии от нее в 15 мм. Таким образом, концентрация акцепторов в слое Si:Er могла уменьшаться примерно на порядок от значения $N_a \approx 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ в центре подложки до $\sim 4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ по мере удаления от ее центра к концу. Мезодиоды также располагались по длине подложки. Соответственно их Si:Er-базы содержали разную концентрацию акцепторной примеси. Площадь мезодиодов — 2 мм^2 , расстояние между ними — 3 мм. Мезодиоды готовились по стандартной технологии, включающей напыление металла и фотолитографию.

Распределение по толщине базы диодов концентрации заряженных примесных центров исследовалось вольт-фарадным (C-V) методом. Распределение концентрации примеси Er в структурах определялось методом масспектрометрии вторичных ионов (ВИМС). Спектры электролюминесценции измерялись на решеточном монохроматоре SP-150 (Acton Research Corp.) с пельтье-охлаждаемым InGaAs-детектором. Непрерывное излучение электролюминесценции модулировалось механическим прерывателем. Сигнал с детектора измерялся с помощью синхронного усилителя SR-810 (Stanford Research Systems).

3. Результаты и обсуждение

В первых опытах в качестве акцепторной примеси использовался Al. Максимальный поток акцепторной примеси подбирался так, чтобы в центральной части подложки слои Si:Er имели *p*-тип проводимости. Соответственно концентрация акцепторной примеси должна быть больше концентрации электрически активных центров эрбия ($N_a > N_{Er}$). Распределение концентрации ионизованных примесных центров по толщине слоев Si:Er/Al/Si в мезодиодах, расположенных на разных расстояниях от центра подложки, приведено на рис. 1. Поскольку поток акцепторов убывал по мере удаления от центра подложки, концентрация заряженных примесных центров также убывала (рис. 1) до значения $\sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$, пока слой Si:Er не становился *n*-типа проводимости. В этом случае $N_a < N_{Er}$. Далее, концентрация электронов менялась слабо, оставаясь на уровне $\sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$, который Si:Er-слои имели до легирования алюминием.

Диоды, базы которых имели *p*-тип проводимости, электролюминесценции практически не имели (рис. 2). Она появлялась, если Si:Er — база диодов — меняла тип проводимости. Интенсивность ЭЛ была максимальной при $N_a \approx N_{Er}$, когда степень компенсации акцепторами донорных центров Er была максимальной. В этом случае концентрация центров Er, не занятых электронами, была также максимально большой. Далее, интенсивность ЭЛ по мере уменьшения степени компенсации убывала (рис. 2). Необходимо заметить, что

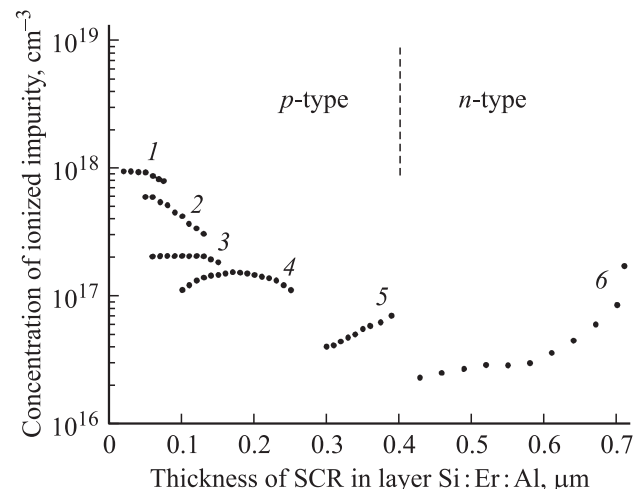


Рис. 1. Распределение концентрации ионизованных примесных центров по толщине слоев Si:Er:Al в мезодиодах, расположенных на разном расстоянии от центра подложки. 1–6 — номера мез, отсчитываемые от расстояния от центра подложки.

диоды с такой же Si:Er-базой (толщина 0.6–0.8 мкм, концентрация $N_{Er} \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$), но не легированной акцепторной примесью, ЭЛ не имели.

Для слоев Si:Er, легированных акцепторами при $N_{Er} > N_a$, спектры ЭЛ имели обычный вид. Они представляли собой пики с максимумом при 0.8 эВ. Это значит, что наблюдаемая ЭЛ обусловлена возбуждением атомов Er. Спектры ЭЛ по форме и интенсивности мало отличались от спектров, наблюдаемых для туннельно-пролетных диодов [7].

Как уже говорилось, *n*-типа слои Si:Er:Al ($N_{Er} > N_a$), выращенные при 580°C , имели $n \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$. При толщине базы 0.6–0.8 мкм диоды имели напряжение пробоя 16–18 В. Слои Si:Er, легированные акцепторами и

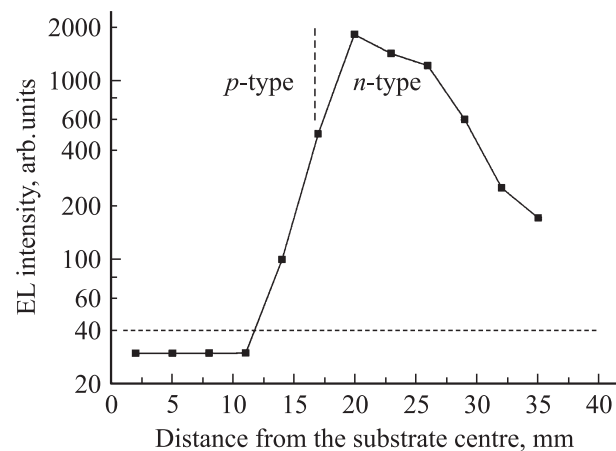


Рис. 2. Зависимость интенсивности электролюминесценции в мезодиодах от расстояния, отсчитываемого от центра подложки, где концентрация акцепторной примеси максимальна. Пунктирная линия — уровень чувствительности измерения электролюминесценции.

выращенные при 520°C, имели $n \approx 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Диоды с такой базой имели и более низкое напряжение пробоя 5 В. Интенсивность ЭЛ в этом случае практически не менялась, а температура диода в процессе эксплуатации снижалась.

В процессе работы в коллективе авторов данной статьи появилось предположение о том, что эффект от легирования алюминием является следствием проникновения его в примесную атмосферу атома Er. Известно [8], что многие примеси при введении их в кремний методом ИМП так или иначе влияют на интенсивность фотолюминесценции (ФЛ). Однако вряд ли это играет существенную роль в нашем случае. Во-первых, потому что с изменением концентрации акцепторов в слое концентрация ионизированных примесных центров менялась так, как будто имела место обычная компенсация. Во-вторых, результат легирования Si:Er-базы разными акцепторами Al, Ga, В был практически одинаков, несмотря на то что их тетраэдрические ковалентные радиусы [9] резко отличались. По данным [9], значения указанных радиусов для В, Si, Al составляют 0.085, 0.117, 0.123 нм соответственно. Однако у всех указанных примесей общим является то, что они в кремнии являются акцепторами и могут компенсировать донорные центры Er.

При легировании бором увеличение интенсивности ЭЛ от МЛЭ-диодов обнаружено ранее [10]. Однако эффект наблюдался только при очень низкой температуре 10 К, что, вероятно, не случайно. Одно из возможных объяснений следующее. Структуры Si:Er/Si обычно получают методом ионной имплантации или классической МЛЭ. Энергия ионизации донорных центров Er в слоях, полученных этими методами, относительно мала. Чаще называется величина 0.15 эВ от дна зоны проводимости. Для сравнения, при методе СМЛЭ в изготовленных слоях значение этой энергии 0.3 эВ или более [2]. Соответственно для методов ИМП и МЛЭ значительна и степень ионизации донорных уровней при 300 К. С точки зрения результатов вышеприведенных исследований это полезно для достижения максимальной интенсивности ЭЛ. Однако, вероятно, более существенным является тот факт, что слои, выращенные при комнатной температуре методом ИМП или МЛЭ, имеют очень большую концентрацию носителей тока 10^{19} см^{-3} [4] и $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ [5] соответственно. При таких концентрациях ширина ОПЗ диодов мала и составляет несколько десятков нанометров. Если учесть, что значительную долю ОПЗ занимает темновая область (20–40 нм), толщина области, где возможно взаимодействие горячих электронов с центрами Er, составляет небольшую величину ~ 15 нм. С уменьшением температуры концентрация носителей тока значительно снижается, увеличивается ширина ОПЗ диодов, растет концентрация нейтральных центров Er. В этом случае, например, при 10 К и наблюдался эффект от легирования бором [10]. Во всяком случае, вопрос о возможности существования указанного эффекта при комнатной

температуре для ИМП- или МЛЭ-диодов на основе структур Si:Er/Si остается открытым.

4. Заключение

Для диодов, выращенных методом СМЛЭ, на структурах Si:Er/Si обнаружено при 300 К резкое увеличение интенсивности ЭЛ на длине волны 1.5 мкм. Эффект наблюдался в результате легирования области Si:Er-диодов акцепторами Al, Ga или В.

Предполагается, что этот эффект связан с резким увеличением концентрации незанятых электронами заряженных донорных центров Er. При встрече с такими центрами электроны не будут тратить энергию на их ионизацию, поэтому увеличивается вероятность передачи энергии во внутреннюю электронную оболочку самого атома Er.

Список литературы

- [1] Е.М. Дианов. Квант. электрон., **30**, 659 (2000).
- [2] О.В. Белова, В.Н. Шабанов, А.П. Касаткин, О.А. Кузнецов, А.Н. Яблонский, М.В. Кузнецов, В.П. Кузнецов, А.В. Корнаухов, Б.А. Андреев, З.Ф. Красильник. ФТП, **42**, 136 (2008).
- [3] В.П. Кузнецов, З.Ф. Красильник. ФТП, **44**, 413 (2010).
- [4] G. Franzo, S. Coffa, F. Priolo, C. Spinella. J. Appl. Phys., **81** (6), 2784 (1997); S. Coffa, G. Franzo, F. Priolo, A. Pacelli, A. Lacaïta. Appl. Phys. Lett., **73** (1), 93 (1998); Н.А. Соболев. ФТП, **29**, 1153 (1995).
- [5] В.П. Кузнецов, М.В. Кузнецов, З.Ф. Красильник. ФТП, **44**, 402 (2010).
- [6] В.П. Кузнецов, З.Ф. Красильник. ФТП, **44**, 413 (2010).
- [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); Д.Ю. Ремизов, З.Ф. Красильник, В.П. Кузнецов, С.В. Оболенский, В.Б. Шмагин. Матер. X симп. „Нанофизика и наноэлектроника“ (2006) с. 348; Матер. XI симп. „Нанофизика и наноэлектроника“ (2007) с. 422.
- [8] J. Michel, J.L. Benton, R.F. Ferrante, D.C. Jacobson, D.J. Eaglesham, E.A. Fitzgerald, Y.-H. Xie, J.M. Poate, L.C. Kimerling. J. Appl. Phys., **70**, 2672 (1991).
- [9] J.A. Van Vechten, J.C. Phillips. Phys. Rev. Sol. St., **2**, 2160 (1970).
- [10] F. Priolo, G. Franzo, S. Coffa, A. Carnera. Phys. Rev. B, **57**, 4443 (1998).

Редактор Т.А. Полянская

Electroluminescence on $1.5\ \mu\text{m}$ in diodes structures Si:Er/Si alloyed by acceptors Al, Ga, B

V.P. Kuznetsov^{*+}, *V.B. Shmagin*⁺, *M.O. Marychev*[×],
K.E. Kudryavtsev⁺, *M.V. Kuznetsov*^{*}, *B.A. Andreev*⁺,
A.V. Kornaukhov^{*}, *O.N. Gorshkov*^{*}, *Z.F. Krasilnik*⁺

* Physical Technical Research Institute, Lobachevskii
University of Nizhny Novgorod,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

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

× Lobachevskii University of Nizhny Novgorod,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract Layers Si:Er in diodes structures were alloyed with Al, Ga or B in the course of growing by sublimation molecular beam epitaxy. Result is follows: in diodes with thick base (to $0.8\ \mu\text{m}$) the sharp increase in intensity of an electroluminescence at a wave length of $1.5\ \mu\text{m}$ was observed.