

## Влияние условий изготовления светодиодов на основе SiGe на их люминесцентные и электрофизические свойства

© А.Е. Калядин, Н.А. Соболев, А.М. Стрельчук, П.Н. Аруев,  
В.В. Забродский, Е.И. Шек

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: nick@sobolev.ioffe.rssi.ru

(Получена 30 июня 2015 г. Принята к печати 7 июля 2015 г.)

Исследованы  $n^+ - p - p^+$ -светодиоды на основе SiGe, сильно легированные слои в которых изготовлены по диффузионной (диффузия бора и фосфора) и газофазной (нанесение слоев поликристаллического кремния, легированных бором и фосфором, путем газофазного осаждения) технологиям. Спектры электролюминесценции обоих типов светодиодов идентичны, однако интенсивность в диодах газофазной технологии ниже в  $\sim 20$  раз. В диодах газофазной технологии по сравнению с диффузионными наблюдалось существенное увеличение обратных и прямых токов. Ухудшение люминесцентных и электрофизических характеристик газофазных диодов обусловлено образованием дефектов на границе между эмиттерным и базовым слоями.

### 1. Введение

Варьирование состава твердого раствора SiGe позволяет изменять длину волны излучения в широком диапазоне в ближней инфракрасной области спектра. В настоящее время изготовлены светодиоды (СД) на основе монокристаллического SiGe с высокими значениями внешней квантовой эффективности электролюминесценции при комнатной температуре [1–3]. Такие СД представляют большой интерес для применения в кремниевой оптоэлектронике. Для изготовления СД на основе твердого раствора SiGe применялись методы молекулярно-пучковой эпитаксии [1,2] и диффузии легирующих примесей [3–5]. Технология, основанная на процессе газофазного осаждения поликристаллических сильно легированных бором и фосфором слоев, позволила разработать кремниевые фотодетекторы с рекордными характеристиками [6–8]. В настоящей работе изготовлены СД на основе SiGe путем формирования  $n^+$ - и  $p^+$ -слоев методами газофазного осаждения поликристаллического Si и диффузии легирующих примесей, исследованы их люминесцентные и электрофизические свойства.

### 2. Экспериментальные условия

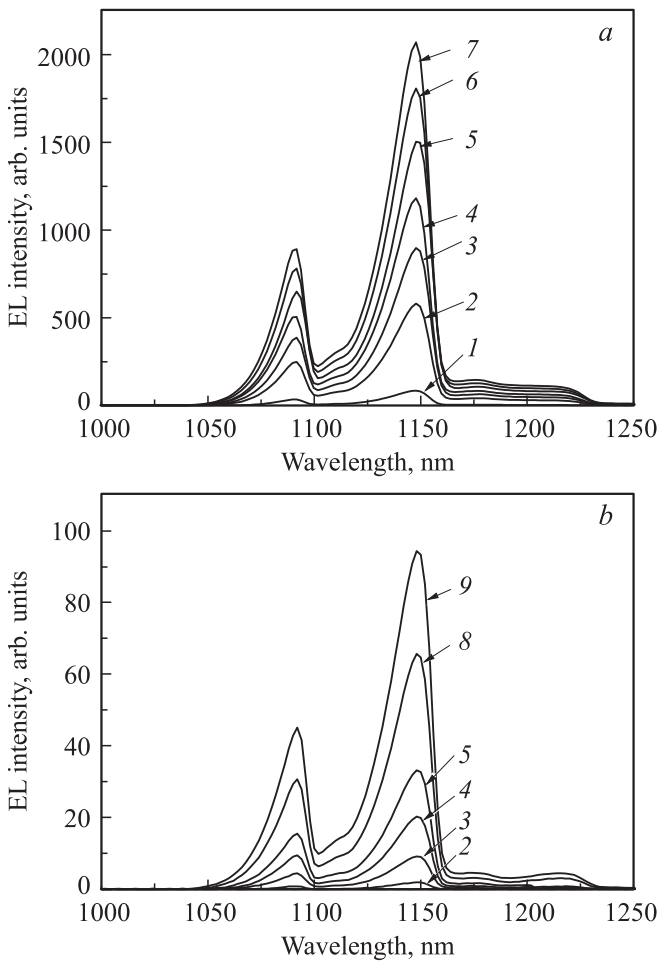
Светодиоды изготавливались по двум различным технологиям на основе пластин монокристаллического твердого раствора SiGe  $p$ -типа проводимости, с удельным сопротивлением  $2.5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , толщиной  $350 \text{ мкм}$ . Концентрация Ge составляла  $5.2\%$ . В первой группе СД  $p - n$ -переход был сформирован по планарной технологии методом диффузии фосфора через отверстие диаметром  $0.5 \text{ мм}$  в пленке  $\text{SiO}_2$ . Концентрация фосфора в  $n^+$ -слое составляла  $\sim 4 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . Обратная сторона пластины была легирована в процессе диффузии бора до концентрации  $\sim 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Омические контакты были

сформированы термическим напылением Au и Cr на лицевой и обратной сторонах пластины. Во второй группе СД в начале формировался окисел в процессе термического окисления при температуре  $1100^\circ\text{C}$  в течение  $2 \text{ ч}$  в хлорсодержащей атмосфере, представляющей собой поток кислорода, насыщенный парами четыреххлористого углерода с молярной концентрацией  $1\%$ . Для создания  $n - p$ -переходов в слое  $\text{SiO}_2$  вскрывались окна диаметрами  $0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 2 \text{ мм}$  и в них методом газофазного осаждения при  $850^\circ\text{C}$  в течение  $6 \text{ мин}$  осаждался сильно легированный фосфором до концентрации  $\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$   $n^+$ -слой поликристаллического кремния. Толщина осажденного слоя составляла  $\sim 0.5 \text{ мкм}$ . Для получения омических контактов на обратную сторону пластин при тех же режимах наносились  $p^+$ -слои поликристаллического кремния (поликремния), сильно легированные бором, до концентрации  $\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . Сверху поликремния на лицевой и обратной сторонах пластины формировались контакты нанесением слоя алюминия толщиной  $0.5 \text{ мкм}$ .

Спектры электролюминесценции (ЭЛ) измерялись на автоматизированном спектрометре на основе монохроматора МДР-23 и неохлаждаемого InGaAs-фотодиода с разрешением  $7 \text{ нм}$  при температурах  $77 - 300 \text{ К}$ . ЭЛ возбуждалась прямоугольными импульсами тока с длительностью  $5 \text{ мс}$ , амплитудой до  $510 \text{ мА}$  и частотой  $32 \text{ Гц}$ . Представленные спектры ЭЛ были скорректированы с учетом спектральных характеристик как фотоприемника, так и всего оптического тракта.

### 3. Результаты и обсуждение

Спектры ЭЛ при разных токах и температуре  $77 \text{ К}$  для СД, изготовленных по диффузионной и газофазной технологиям, приведены на рис. 1, *a, b*. Диаметр СД составлял  $500 \text{ мкм}$ . Спектры полностью идентичны: максимумы бесфоновой ( $1091 \text{ нм}$ ) и обусловленной фоновыми ( $1148 \text{ нм}$ ) линий совпадают. Однако интенсивность



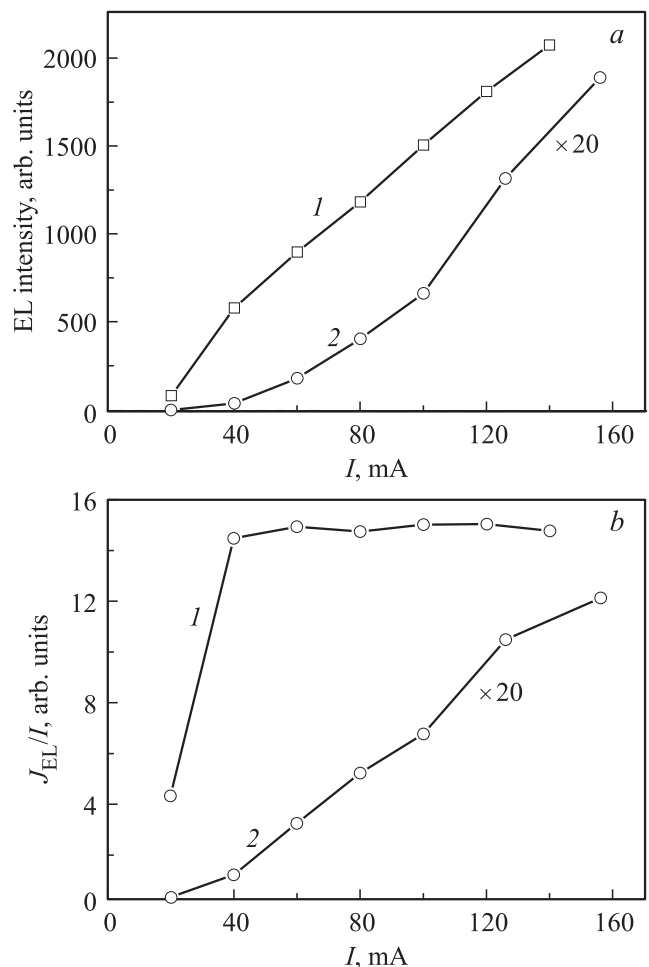
**Рис. 1.** Спектры электролюминесценции (EL) при 77 К для изготовленных по диффузионной (а) и газофазной (b) технологиям СД. Ток, мА: 1 — 20, 2 — 40, 3 — 60, 4 — 80, 5 — 100, 6 — 120, 7 — 140, 8 — 126 и 9 — 156. Диаметр СД 500 мкм.

линий ЭЛ в в диодах газофазной технологии примерно в 20 раз меньше, чем в диффузионных СД.

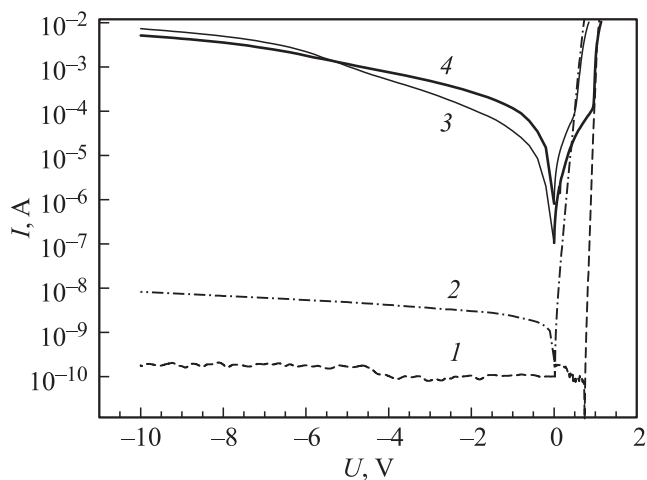
Зависимости от тока накачки  $I$  максимумов интенсивности ЭЛ при 77 К для СД, изготовленных по диффузионной и газофазной технологиям, приведены на рис. 2, а (кривые 1 и 2). Интенсивность в газофазных СД более, чем в 20 раз, превышает интенсивность в диффузионных диодах. Характер зависимостей различен. В диодах газофазной технологии ЭЛ появляется при токах  $> 20$  мА и интенсивность нарастает суперлинейно. В диффузионных СД при токах  $> 40$  мА токовая зависимость интенсивности практически линейна. Более наглядно это следует из рис. 2, b, на котором для обоих типов диодов приведены токовые зависимости максимума интенсивности ЭЛ, деленной на ток ( $J_{EL}/I$ ). В СД газофазовой технологии эта зависимость нарастает практически линейно с током. В диффузионных СД после тока 40 мА она практически не зависит от тока.

На рис. 3 приведены вольт-амперные характеристики СД, изготовленных по диффузионной (кривые 1, 2) и

газофазной (кривые 3, 4) технологиям, измеренные при температурах 77 и 290 К. Диаметр СД 500 мкм. В СД газофазной технологии обратный ток при увеличении напряжения смещения до 10 В возрастает почти на 3 порядка. В то же время в диффузионных СД обратные токи меньше, чем в газофазных, на 6–8 порядков в зависимости от температуры измерения. В них при 77 К обратный ток практически не зависит от напряжения, т.е. он определяется диффузионной составляющей. При увеличении температуры до 290 К с ростом напряжения происходит увеличение тока за счет вклада генерационной составляющей. Прямая ветвь вольт-амперной характеристики в диффузионных СД представляет собой зависимость, характерную для высококачественных кремниевых диодов, с напряжениями отсечки  $\sim 0.7$  В при комнатной температуре и  $\sim 1$  В при 77 К. На прямой ветви СД газофазной технологии до токов  $\sim 10^{-4}$  А при обеих температурах наблюдается увеличение тока по сравнению с диффузионными диодами. При больших



**Рис. 2.** Токовые зависимости при 77 К интенсивности в максимуме электролюминесценции (EL) (а) и интенсивности в максимуме, деленной на ток,  $J_{EL}/I$  (b), для СД, изготовленных по диффузионной (1) и газофазной (2) технологиям. Диаметр СД 500 мкм.



**Рис. 3.** Вольт-амперные характеристики  $I(U)$  СД, изготовленных по диффузионной (1, 2) и газофазной (3, 4) технологиям, при температурах 77 (1, 3) и 290 К (2, 4). Диаметр СД 500 мкм.

значениях тока прямые ветви обоих СД практически совпадают. При этом экстраполяция вольт-амперной характеристики газофазных диодов при токах  $> 10^{-4}$  А дает значения напряжения отсечки, равные значениям в диффузионных СД.

Наблюдавшееся ухудшение люминесцентных и вольт-амперных характеристик СД газофазной технологии по сравнению с диффузионными может быть объяснено образованием дефектов в процессе газофазного осаждения поликристаллической пленки на границе раздела между эмиттерным и базовым слоями. Эти дефекты связаны с процессом формирования переходного слоя между монокристаллическим твердым раствором SiGe и поликристаллическим кремнием. Возможно, качество поверхности пластины твердого раствора недостаточно высоко и образующийся  $n^+$ - $p$ -переход повторяет рельеф поверхности, поскольку процесс газофазного осаждения проводится в течение короткого времени. В диффузионных СД глубина  $n^+$ - $p$ -перехода существенно больше (несколько мкм) и рельеф поверхности сглаживается. При этом дефекты на границе  $p$ - $n$ -перехода не образуются или их концентрация невелика. Образовавшиеся дефекты в СД газофазной технологии являются центрами безызлучательной рекомбинации. Сохранение формы спектров в диодах обоих типов (см. рис. 1) обусловлено тем обстоятельством, что излучательная рекомбинация происходит в базе диодов, и центры не оказывают влияния на вид спектра ЭЛ. Однако эти центры существенно снижают концентрацию носителей заряда, инжектированных в базу диодов газофазной технологии и обуславливающих излучательную рекомбинацию, и уменьшают интенсивность люминесценции. При небольших токах определяющую роль играет захват носителей на центры безызлучательной рекомбинации и люминесценция не наблюдается (рис. 2). По мере заполнения центров безызлучательной рекомбинации доля но-

сителей, инжектированных в базу диода и участвующих в излучательной рекомбинации, возрастает и соответственно увеличивается эффективность люминесценции с ростом тока. Отсутствие дефектов в диффузионных СД приводит к тому, что в исследованном диапазоне токов эффективность ЭЛ практически не меняется, а вольт-амперная характеристика близка к таковой для идеального диода. Образовавшиеся центры безызлучательной рекомбинации в СД газофазной технологии вызывают существенное увеличение обратного тока и появление избыточного тока на прямой ветви вольт-амперной характеристики при небольших токах, пока центры не заполнены.

Таким образом, исследование СД на основе SiGe, изготовленных с помощью методов газофазного осаждения и диффузии, показало, что в диодах газофазной технологии по сравнению с диффузионными наблюдается уменьшение интенсивности краевой ЭЛ и появление избыточных токов на обеих ветвях вольт-амперных характеристик. Ухудшение люминесцентных и электрофизических характеристик в диодах газофазной технологии по сравнению с диффузионными обусловлено образованием дефектов на границе между пластиной монокристаллического твердого раствора SiGe и слоем поликристаллического кремния.

Авторы благодарны Н.В. Абросимову за предоставление SiGe пластин и Н.М. Шмидт за обсуждение полученных результатов.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 13-02-00473).

## Список литературы

- [1] T. Stoica, L. Vescan, M. Goryll. *J. Appl. Phys.*, **83**, 3367 (1998).
- [2] T. Stoica, L. Vescan. *Semicond. Sci. Technol.*, **18**, 409 (2003).
- [3] N.A. Sobolev. *Mater. Sci. Forum*, **590**, 79 (2008).
- [4] A.M. Emel'yanov, N.A. Sobolev, T.M. Mel'nikova, N.V. Abrosimov. *Sol. St. Phenomena*, **108-109**, 761 (2005).
- [5] А.М. Емельянов, Н.А. Соболев, Т.М. Мельникова, Н.В. Абросимов. *ФТП*, **39**, 1170 (2005).
- [6] В.Л. Суханов, П.Н. Аруев, М.В. Дроздова, Н.В. Забродская, В.В. Забродский, М.С. Лазеева, В.В. Филимонов, Е.В. Шерстнев. *ФТП*, **47**, 174 (2013).
- [7] Л.Б. Лопатина, В.Л. Суханов, В.М. Тучкевич, Н.М. Шмидт, Б.С. Явич. *Письма ЖТФ*, **16**, 11 (1979).
- [8] А.Б. Грудинин, Е.И. Иванов, В.Л. Суханов, В.М. Тучкевич, Н.М. Шмидт. *ФТП*, **15**, 920 (1981).

Редактор Л.В. Шаронова

## **Influence of the SiGe-based light-emitting diode preparation conditions on their luminescence and electrophysical properties**

*A.E. Kalyadin, N.A. Sobolev, A.M. Strel'chuk, P.N. Aruev, V.V. Zbrodskiy, E.I. Shek*

loffe Institute,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** SiGe-based  $n^+ - p - p^+$  light-emitting diodes (LEDs) were studied. High doped layers in the diodes were performed by diffusion (boron and phosphorus diffusion) and CVD (chemical vapour deposition of polycrystalline silicon layers doped with boron and phosphorus) technologies. The electroluminescence spectra in the LEDs of both types are identical, however, an intensity in the CVD diodes are lower approximately by twenty times. An essential increase of reverse and forward currents was observed in the CVD diodes as compared with the diffusion ones. Degradation of luminescence and electrophysical characteristics in the CVD diodes are associated with introduction of defects at the boundary between emitter and base layers.