

# Электролюминесценция на длине волны 1.54 мкм от структуры Si:Er/Si, состоящей из ряда p–n-переходов

© В.П. Кузнецов<sup>×,\*†</sup>, М.В. Степихова<sup>\*</sup>, В.Б. Шмагин<sup>\*</sup>, М.О. Марычев<sup>+</sup>, Н.А. Алябина<sup>1</sup>,  
М.В. Кузнецов<sup>1</sup>, Б.А. Андреев<sup>\*</sup>, А.В. Корнаухов<sup>1</sup>, О.Н. Горшков<sup>1</sup>, З.Ф. Красильник<sup>\*</sup>

<sup>×</sup> Научно-исследовательский физико-технический институт Нижегородского Государственного университета им. Н.И. Лобачевского, 603950 Нижний Новгород, Россия

<sup>\*</sup> Институт физики микроструктур Российской академии наук, 603950 Нижний Новгород, Россия

<sup>+</sup> Нижегородский Государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 12 апреля 2011 г. Принята к печати 18 апреля 2011 г.)

Демонстрируется способ соединения нескольких p<sup>+</sup>–n-переходов в одной структуре Si:Er/Si, позволяющий увеличить интенсивность электролюминесценции на длине волны 1.54 мкм. Структуры выращены методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии.

## 1. Введение

Основной составляющей полупроводникового прибора является p–n-переход. На структурах, полученных ионной имплантацией или одним из традиционных методов эпитаксии (из газовой фазы или молекулярно-лучевой эпитаксии — МЛЭ) приборы делаются по планарной технологии. Они располагаются в плоскости исходной пластины, подложки. Для того чтобы иметь возможность делать несколько приборов (p–n-переходов) в направлении, перпендикулярном к поверхности подложки (в третьем измерении), нужны специальные структуры. Их отличительные особенности изложены в нашем патенте [1]. Заявленное в патенте решение сформулировано в общем виде. В настоящей работе продемонстрирована его полезность на конкретном примере. Исследовались структуры на основе кремния, легированного эрбием. Они состояли из ряда p–n-переходов. Задача состояла в том, чтобы продемонстрировать способ соединения ряда p–n-переходов в одной структуре, позволяющей увеличить интенсивность электролюминесценции (ЭЛ) на длине волны 1.54 мкм.

## 2. Результаты исследования

Структуры выращивались методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии (СМЛЭ) [2]. Для наблюдения в слоях n–Si:Er ЭЛ обычно используются простые диодные структуры типа p<sup>+</sup>–n–Si:Er–n<sup>+</sup>. В нашем случае в качестве подложек использовались пластины p–Si(100) с удельным сопротивлением 0.1–20 Ом·см. Первым осаждался слой p<sup>+</sup> с концентрацией бора 10<sup>19</sup> см<sup>–3</sup>, вторым — слой n–Si:Er толщиной 80–200 нм. Наши слои n–Si:Er имели разную концентрацию носителей тока — электронов от 10<sup>16</sup> до 5 · 10<sup>17</sup> см<sup>–3</sup>. Концентрация измерялась вольт-

емкостным методом. При всех вариантах обратносмещенные диоды имели хорошо наблюдаемую эрбиевую ЭЛ на длине волны 1.54 мкм.

Желая увеличить интенсивность ЭЛ путем увеличения длины области взаимодействия горячих электронов с центрами эрбия, мы исследовали структуры типа p–p<sup>+</sup>–n–Si:Er–p<sup>+</sup>–n–Si:Er–p<sup>+</sup>...p<sup>+</sup>. Области p<sup>+</sup> имели концентрацию бора 10<sup>19</sup> см<sup>–3</sup>. В этой структуре при пробое p<sup>+</sup>–n-переходы имели обратное смещение, переходы n–p<sup>+</sup> — прямое. В таких структурах ЭЛ не наблюдалось. Это, вероятно, явилось следствием проникновения дырок от прямосмещенных n–p<sup>+</sup> переходов в области p<sup>+</sup>–n-переходов. Для подтверждения этого предположения была исследована серия диодов типа p–p<sup>+</sup>–n–Si:Er–n<sup>+</sup>–p<sup>+</sup>. Слой n<sup>+</sup> сильно легировался фосфором до 2 · 10<sup>18</sup> см<sup>–3</sup>, и поэтому имел небольшое время жизни для дырок. На рис. 1 видно, что с уменьшением толщины n<sup>+</sup>-слоя и, следовательно, с ростом количества дырок в n–Si:Er-области интенсивность ЭЛ падает.

Важно отметить следующее. Диоды p<sup>+</sup>–n–Si:Er–n<sup>+</sup>, в которых n-область имеет малую концентрацию иони-

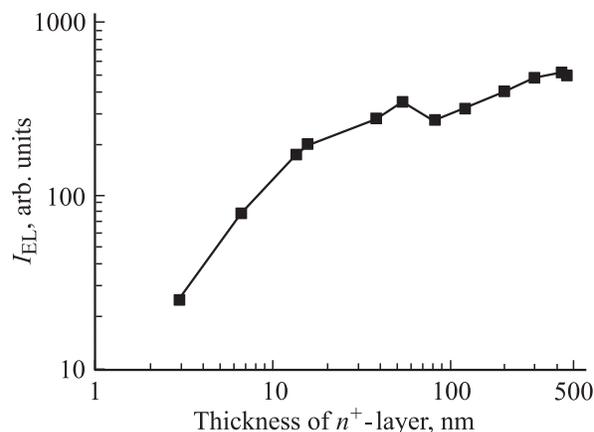
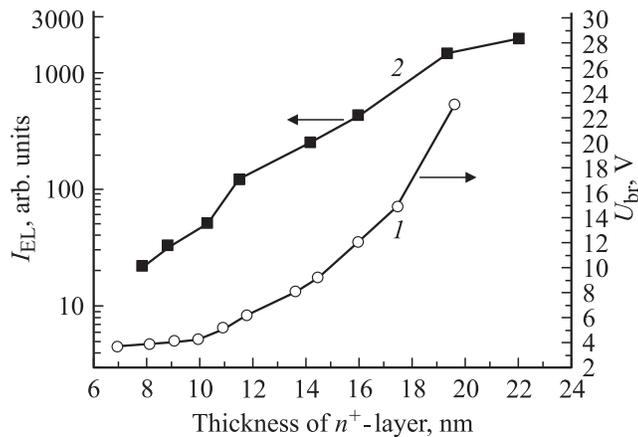


Рис. 1. Зависимость интенсивности электролюминесценции в структуре p–p<sup>+</sup>–n–Si:Er–n<sup>+</sup>–p<sup>+</sup> от толщины n<sup>+</sup>-слоя.

<sup>†</sup> E-mail: kvp@nifti.unn.ru



**Рис. 2.** Зависимость напряжения пробоя (кривая 1) и интенсивности электролюминесценции (кривая 2) от толщины  $n^+$ -слоя в структуре  $p-p^+-n-Si:Er-n^+-p^+-n-Si:Er-n^+-p^+ \dots p^+$ , состоящей из пяти периодов.

зованных центров эрбия  $N_i \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$  и большую толщину  $d > 0.5 \text{ мкм}$ , не имеют ЭЛ [3]. В валентной зоне их  $n$ -областей вследствие лавинного пробоя также появляются дырки. Именно этим диоды с лавинным пробоем отличаются от диодов  $p-p^+-n-Si:Er-n^+$  ( $N_i \geq 4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ) с туннельным типом пробоя или  $p-p^+-n^+-n-Si:Er-n^+$  [4]. Толщины  $n$ -баз для диодов туннельно-пролетных и лавинных были примерно одинаковы, а интенсивности ЭЛ резко отличаются. В диодах с лавинным пробоем электролюминесценции вообще не было несмотря на то что напряженность электрического поля в их  $n$ -базе была больше в несколько раз. Большинство исследователей считает, что ЭЛ на длине волны 1.54 мкм в слоях Si:Er возникают вследствие взаимодействия горячих электронов зоны проводимости с центрами эрбия. Горячие электроны теряют энергию при возбуждении электронов внутренней оболочки атомов эрбия. С появлением дырок в валентной зоне у электронов проводимости появляется альтернативный путь без возбуждения атомов эрбия, например, рекомбинация электрон-дырка. На рис. 1 видно, что интенсивность ЭЛ в структуре  $p-p^+-n-Si:Er-n^+-p^+$  приближается к стационарному значению уже при толщине  $n^+$ -области в несколько десятков нм.

На рис. 2 (кривая 1) показано как напряжение пробоя  $U_{br}$  растет с увеличением толщины  $n^+$ -слоя в структуре  $p-p^+-n-Si:Er-n^+-p^+-n-Si:Er-n^+-p^+ \dots n^{++}$  из пяти периодов. Напряжение пробоя в этой структуре при толщине  $n^+$ -слоя в несколько десятков нм приблизительно равно произведению напряжения пробоя одного обратносмещенного диода на число периодов в структуре. Это значит, что все  $p^+-n$ -переходы в структуре работают.

На рис. 2 (кривая 2) также приведена зависимость интенсивности ЭЛ от толщины  $n^+$ -слоя в структуре из пяти периодов. Видно, что интенсивность ЭЛ приближа-

ется к стационарному значению при толщине  $n^+$ -слоя в несколько десятков нм. Интенсивность ЭЛ в такой структуре была существенно выше, чем в структуре из одного  $p^+-n$ -перехода.

## Заключение

1. Для наблюдения ЭЛ на длине волны 1.54 мкм исследовались структуры на основе Si. Они имели несколько  $p-n$ -переходов, отдельные области легировались бором, фосфором или эрбием. Продемонстрирован способ соединения  $p-n$ -переходов в одной структуре, позволяющей увеличить интенсивность ЭЛ по сравнению со структурой, содержащей один  $p-n$ -переход. Не обязательно, чтобы  $p-n$ -переходы имели ЭЛ, они могут иметь другое назначение, выполнять разные функции, могут быть изготовлены из разных материалов (гетеропереходы). Важно, чтобы отдельные  $p-n$ -переходы в структуре не мешали друг другу, а увеличивали или создавали новый приборный эффект. Нам представляется, что решение этих задач возможно. Многократное контролируемое в широком диапазоне легирование примесями P, B, Er на большую глубину кремния (3–5 мкм) практически невозможно в традиционных методах получения структур ионной имплантацией или молекулярно-лучевой эпитаксией. Если принять во внимание, что в методе СМЛЭ можно менять режим эпитаксии от варианта, когда примеси P, As, Sb, Al, Ga, а также C, входят в кристалл к варианту, когда они накапливаются на поверхности роста до монослоя, метод СМЛЭ становится еще привлекательнее.

2. Исследования показали, что появление дырок в валентной зоне  $n-Si:Er$ -области обратносмещенного  $p^+-n-Si:Er$ -перехода уменьшает интенсивность электролюминесценции на длине 1.54 мкм. Вероятно поэтому диоды с туннельным типом пробоя и туннельно-пролетные были более эффективны по сравнению с лавинно-пролетными.

Источники финансирования работы: РФФИ (Гранты № 11-02-00953 и № 09-02-00898), Рособразование (РНП № 2.1.1/3615).

## Список литературы

- [1] М.В. Степихова, А.М. Шаронов, В.П. Кузнецов. Патент РФ2407109, NOIL 33/04, опубликован 20.12.2010 приоритет от 5.10.2009.
- [2] В.П. Кузнецов, З.Ф. Красильник. ФТП, **44**, 413 (2010).
- [3] В.П. Кузнецов, М.В. Кузнецов, З.Ф. Красильник. ФТП, **44**, 402, (2010).
- [4] В.П. Кузнецов, Д.Ю. Ремизов, И.Б. Шмагин, К.Е. Кудрявцев, В.Н. Шабанов, С.В. Оболенский, О.В. Белова, М.В. Кузнецов, А.В. Корнаузов, Б.А. Андреев, З.Ф. Красильник. ФТП, **41**, 1329, (2007).

Редактор Л.В. Беляков

## **Electroluminescence on $1.54\ \mu\text{m}$ of Si:Er/Si structures contained several $p^+ - n$ -junctions**

*V.P. Kuznetsov<sup>1,2</sup>, M.V. Stepihova<sup>2</sup>, V.B. Shmagin<sup>2</sup>,  
M.O. Marychev<sup>3</sup>, N.A. Alyabina<sup>1</sup>, M.V. Kuznetsov<sup>1</sup>,  
B.A. Andreev<sup>2</sup>, A.V. Kornaukhov<sup>1</sup>, O.N. Gorshkov<sup>1</sup>,  
Z.F. Krasilnik<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Physical Technical Research Institute,  
Lobachevskii University of Nizhny Novgorod,  
603950 Nizhny Novgorod, Russia,

<sup>2</sup> Institute for Physics of Microstructures,  
Russian Academy of Sciences,  
603950 Nizhny Novgorod, Russia

<sup>3</sup> Lobachevskii University of Nizhny Novgorod,  
603950 Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract** The method of jointing several  $p^+ - n$ -junctions in a single structure Si:Er/Si which permits to enhance the intensity of electroluminescence at wavelength of  $1.54\ \mu\text{m}$  is demonstrated. The structures are grown by method of sublimation-molecular-epitaxy.