

# Электролюминесценция эрбия в $p-i-n$ -структурах на основе аморфного гидрогенизированного кремния

© Е.И. Теруков, О.Б. Гусев, О.И. Коньков, Ю.К. Ундалов, М. Stutzmann\*, А. Janotta\*, Н. Mell<sup>+</sup>, J.P. Kleider<sup>≠</sup>

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

\* Waltherschottky Institut, Technisch Universität,  
München, Deutschland

<sup>+</sup> Philipps-Universität,  
Marburg, Deutschland

<sup>≠</sup> Laboratoire de Genie Electrique de Paris, Ecole Superieure d'Electricite, Universites Paris,  
Paris, France

(Получена 2 апреля 2002 г. Принята к печати 11 апреля 2002 г.)

Представлены результаты и проведен сравнительный анализ электролюминесцентных структур на длину волны 1.54 мкм на базе аморфного гидрогенизированного кремния. Впервые демонстрируется возможность получения электролюминесценции при комнатной температуре в нормальных  $p-i-n$ -структурах на этом материале при прямом включении, что представляет интерес для разработки эффективных излучающих структур с токовой накачкой.

## 1. Введение

В последнее время получены обнадеживающие результаты в области исследования люминесценции аморфного гидрогенизированного кремния, легированного эрбием  $a\text{-Si:H(Er)}$ .

В частности, в этом материале наблюдается эффективная фотолюминесценция (ФЛ) [1,2] и электролюминесценция (ЭЛ) в гетероструктурах типа  $\text{Me}/a\text{-Si(Er)}/c\text{-Si } n\text{-типа}/\text{Me}$  (Me — металл) при комнатной температуре [3,4]. В таких структурах активный слой, содержащий эрбий, изготавливался методом модифицированного магнетронного напыления и эффективная электролюминесценция наблюдалась при обратном включении диода.

Цель настоящей работы заключается в выяснении возможности получения эрбиевой (1.54 мкм) электролюминесценции в структурах  $p-i-n$ -типа, являющихся базовыми в приборах на основе аморфного гидрогенизированного кремния.

## 2. Технология изготовления структур и техника эксперимента

Существует три принципиальные возможности изготовления  $p-i-n$ -структур на основе аморфного гидрогенизированного кремния, содержащих активный эрбиевый слой:

- имплантация эрбия в  $i$ -слой с последующим напылением  $n^+$ -слоя;
- напыление между  $i$ - и  $n^+$ -слоями  $p-i-n$ -структуры промежуточного активного слоя, легированного эрбием;
- изготовление традиционной  $p-i-n$ -структуры, собственный слой в которой легирован ионами эрбия.

Нам сразу пришлось отказаться от первого варианта. Имплантированный слой даже после низкотемператур-

ного постимплантационного отжига обладал большим количеством дефектов и структуры практически „не держали напряжения“. В двух других вариантах нам удалось получить положительный результат. При изготовлении  $p-i-n$ -структуры со встроенным активным слоем нами использовалась комбинация методов тлеющего разряда и магнетронного распыления, с помощью которого изготавливался активный слой, содержащий эрбий. Структура такого элемента представляла собой последовательность слоев  $\text{ITO}/p^+a\text{-Si:H}/i\text{-Si:H}/a\text{-Si:H(Er)}/n^+a\text{-Si:H}/\text{Me}$ . В дальнейшем структуру такого типа обозначим структурой типа I.

При изготовлении традиционной электролюминесцентной  $p-i-n$ -структуры типа II последовательность слоев была следующей:  $\text{ITO}/p^+a\text{-Si:H}/p^-a\text{-Si:H(Er)}/n^-a\text{-Si:H(Er)}/n^+a\text{-Si:H}/\text{Me}$ . Все слои, включая легированные  $n$ - и  $p$ -типа и содержащие эрбий, получались методом высокочастотного тлеющего разряда с исполь-

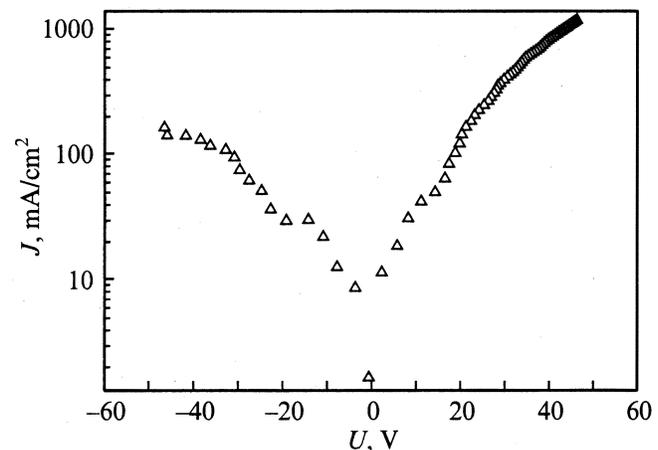


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика  $p-i-n$ -структуры типа I на базе  $a\text{-Si:H(Er)}$ .

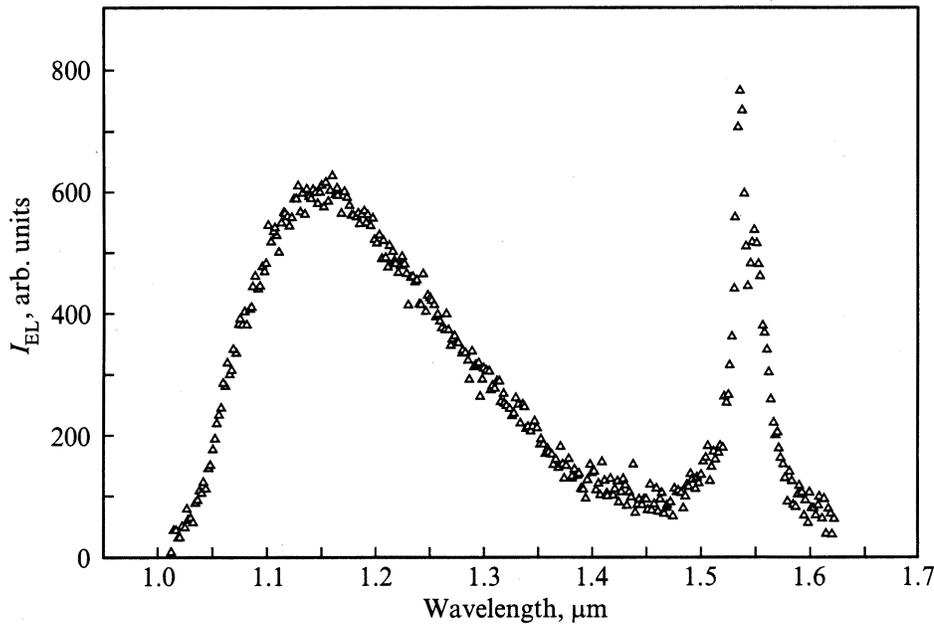


Рис. 2. Спектр электролюминесценции  $p-i-n$ -структуры типа I на базе  $a\text{-Si:H(Er)}$ .

зованием в качестве источника Er металлоорганики типа *tris* [2.4-pentanedionato-Er (III)]. Отметим, что, как было показано в работе [5], данный метод в отличие от метода магнетронного распыления позволяет получать качественные собственные и легированные слои аморфного гидрогенизированного кремния, содержащие ионы эрбия.

Как было показано нами ранее [2], введение ионов Er в  $a\text{-Si:H}$  ведет к его слабому легированию с образованием  $n$ -типа. Уровень легирования при рабочих концентрациях Er соответствует примерно содержанию  $10 \text{ млн}^{-1}$  (ppm) фосфина в газовой фазе. Поэтому рабочая структура типа II представляет в нашем случае  $p^+/p^-(\text{Er})/n^-(\text{Er})/n^+$ -комбинацию слоев  $a\text{-Si:H}$ , причем „собственный“ слой  $n^-(\text{Er})$  — это слой, легированный дибораном на уровне  $100 \text{ млн}^{-1}$  для обеспечения компенсации.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) исследуемых структур измерялись на постоянном токе. Исследование электролюминесценции проводилось в режиме стабилизации напряжения на частоте 100 Гц. Излучаемый свет анализировался двойным решеточным спектрофотометром с охлаждаемым германиевым фотоприемником. Все измерения осуществлялись при комнатной температуре.

### 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Типичная ВАХ  $p-i-n$ -структуры типа I представлена на рис. 1. В случае подачи напряжения в прямом направлении со стороны подложки наблюдалась электролюминесценция (ЭЛ) эрбия на длине волны 1.54 мкм и ЭЛ

дефектов аморфной матрицы на длине волны 1.15 мкм (рис. 2). Аналогичный результат наблюдался нами ранее на структуре типа  $p-n$ -гетероперехода ( $\text{Al}/a\text{-Si:H(Er)}$   $n$ -типа/ $c\text{-Si}$   $p$ -типа/ $\text{Al}$ ) [6]. Зависимость интенсивности эрбиевой ЭЛ от тока накачки показывает, что имеется некий пороговый ток (порядка 2.5 мА), после достижения которого интенсивность ЭЛ эрбия практически линейно зависит от тока.

На рис. 3 представлена ВАХ  $p-i-n$ -структуры типа II. Полученная ВАХ характерна для стандартных  $p-i-n$ -структур на базе  $a\text{-Si:H}$  без эрбия. При приложении к структуре прямого напряжения ток возрастает по экспоненциальному закону, а при напряжении порядка 1.5 В выходит на насыщение. Сигнал электролюминес-

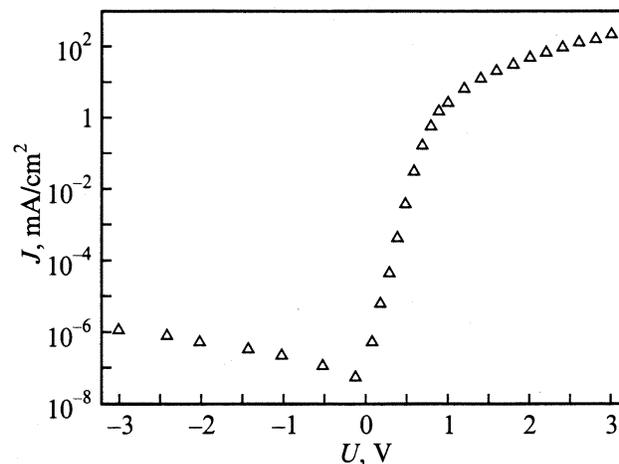
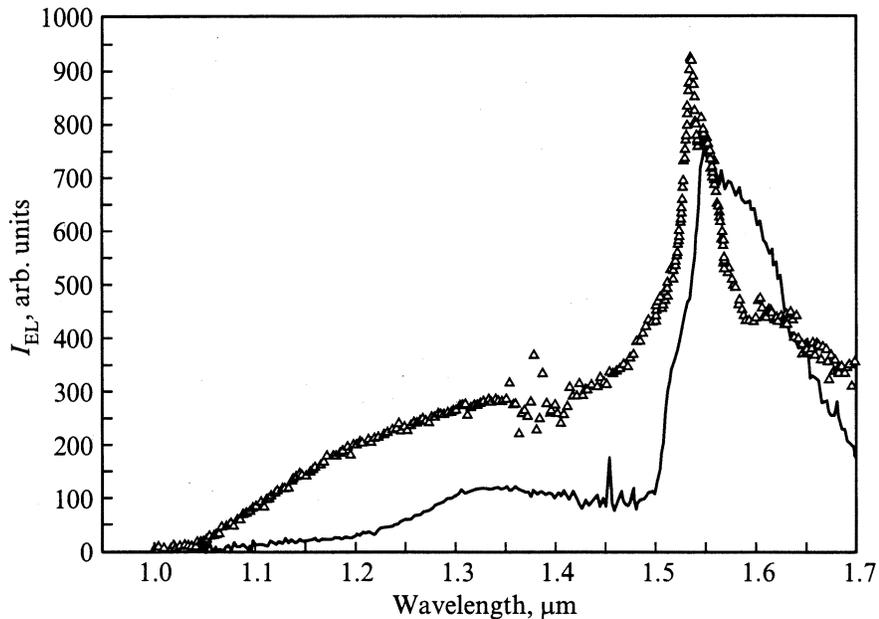


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика  $p-i-n$ -структуры типа II на базе  $a\text{-Si:H(Er)}$ .



**Рис. 4.** Спектр электролюминесценции  $p-i-n$ -структуры типа II на базе  $a\text{-Si:H(Er)}$  (сплошная линия) и гетероструктуры  $\text{Al}/a\text{-Si:H(Er)}/c\text{-Si } n\text{-типа}/\text{Al}$  (треугольники) [4].

ценции наблюдался при прямом включении структуры. На рис. 4 представлен спектр ЭЛ такой структуры в режиме насыщения тока (порядка  $100 \text{ mA/cm}^2$ ) при напряжении на структуре порядка 3.5 В. На том же рисунке для сравнения приведен спектр ЭЛ гетероструктуры типа  $\text{Al}/a\text{-Si:H(Er)}/c\text{-Si } n\text{-типа}/\text{Al}$ , об ЭЛ которых сообщалось нами ранее в работах [3,4]. ЭЛ в этих структурах наблюдалась только при обратном включении и аналогичная интенсивность ЭЛ достигалась при напряжении порядка 40 В и токе  $6 \text{ A/cm}^2$ . Как показали наши исследования, оптимизация таких структур в плане увеличения эрбиевой ЭЛ по таким параметрам как подвижность носителей, концентрация легирующих дефектов и оборванных связей представляет собой не простую и часто взаимоисключающую задачу. Другим недостатком таких структур являются высокие напряжения управления, что плохо совместимо с требованиями полупроводниковой микроэлектроники. Этих недостатков лишены предложенные в настоящей работе  $p^+/p^-/n^-/n^+$ -структуры (типа II) и оптимизация их является предметом дальнейших исследований.

#### 4. Заключение

Проведенные исследования и сравнительный анализ показали, что получение эрбиевой (1.54 мкм) электролюминесценции возможно в  $p-i-n$ -структурах:  $\text{ITO}/p^+-a\text{-Si:H}/i\text{-Si:H}/a\text{-Si:H(Er)}/n^+-a\text{-Si:H}/\text{Me}$  в случае подачи напряжения в прямом направлении и  $\text{ITO}/p^+-a\text{-Si:H}/p^-a\text{-Si:H(Er)}/n^-a\text{-Si:H(Er)}/n^+-a\text{-Si:H}/\text{Me}$  при напряжении на структуре порядка 3.5 В. Электро-

люминесценция в таких структурах привлекательна малыми напряжениями возникновения ЭЛ и тем фактом, что они являются базовыми для приборов на основе аморфного гидрогенизированного кремния.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, гранты № 01-02-17825 и 02-02-17631.

#### Список литературы

- [1] W. Fuhs, I. Ulber, G. Weiser, M.S. Bresler, O.B. Gusev, A.N. Kuznetsov, V.Kh. Kudoyarova, E.I. Terukov, I.N. Yassievich. *Phys. Rev. B*, **56**, 9545 (1997).
- [2] E.I. Terukov, O.I. Kon'kov, V.Kh. Kudoyarova, K.V. Koughia, G. Weiser, H. Kuehne, J.P. Kleder, C. Longeaud, R. Bruggemann. *J. Non-Cryst. Sol.*, **266–269**, 614 (2000).
- [3] O.B. Gusev, M.S. Bresler, E.I. Terukov, K.D. Tsendin, I.N. Yassievich. *Proc. 24th Int. Conf. Phys. Semicond.* (World Scientific, Singapore, 1998) on CD-ROM.
- [4] O.B. Gusev, M.S. Bresler, E.I. Terukov, K.D. Tsendin, I.N. Yassievich. *J. Luminesc.*, **80**, 335 (1999).
- [5] A.G. Kazanskii, H. Mell, G. Weiser, E.I. Terukov. *J. Non-Cryst. Sol.* (2002) in press.
- [6] I.O. Kon'kov, A.N. Kuznetsov, P.E. Pak, E.I. Terukov, L.S. Granitsyna. (Письма ЖТФ, **27** (13), 30 (2001) [*Techn. Phys. Lett.* **27** (7), 542 (2001)]).

Редактор Т.А. Полянская

## **Erbium electroluminescence in $p-i-n$ structures on the base of amorphous hydrogenated silicon**

*E.I. Terukov, O.B. Gusev, O.I. Kon'kov, Yu.K. Undalov,  
M. Stutzmann\*, A. Janotta\*, H. Mell<sup>+</sup>, J.P. Kleider<sup>≠</sup>*

Ioffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia

\* Walther Schottky Institut, Technisch Universität,  
München, Deutschland

+ Philipps-Universität,  
Marburg, Deutschland

≠ Laboratoire de Genie Electrique de Paris,  
Ecole Superieure d'Electricite, Universites Paris,  
Paris, France

**Abstract** Results are submitted and a comparative analysis of electroluminescent structures on the base of amorphous hydrogenated silicon for the wave length of 1.54 micron is carried out. The opportunity of obtaining electroluminescence is shown for the first time at room temperature in normal  $p-i-n$  structures on this material under direct switch, which is of interest for development of effective radiating structures with current injection.