

УДК538.911; 621.32

*А.А. МАРМАЛЮК\**, *П.В. ГОРЛАЧУК\**, *Ю.Л. РЯБОШТАН\**, *В.Н. БРУДНЫЙ\*\**,  
*И.А. ПРУДАЕВ\*\**, *И.С. РОМАНОВ\*\**, *М.А. ЛЕЛИКОВ\*\*\**

## СПЕКТРЫ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ «КРАСНЫХ» СВЕТОДИОДОВ AlGaInP/GaAs<sup>1</sup>

Представлены результаты исследований спектров электролюминесценции «красных» светодиодных структур AlGaInP/GaAs, выращенных с использованием технологии МОСГФЭ. Выявлена высокая однородность состава твердого раствора в квантовых ямах GaInP исследованных структур.

**Ключевые слова:** металлорганическая эпитаксия, алюминий – галлий – индий – фосфор, квантовая яма, светодиодные структуры, «красная» область спектра.

### Введение

Светодиоды (СД) AlGaInP находят широкое применение в области длин волн от зелено-желтого до красного, в частности в системах сигнализации, отображения информации и т.п. СД AlGaInP используются в качестве источников света высокой яркости, поскольку для них характерна слабая зависимость внешней квантовой эффективности (External Quantum Efficiency – EQE) с ростом плотности прямого тока в области температуры близкой к комнатной [1]. В качестве активной области таких структур вместо объемных *p-n*-переходов на основе двойных гетероструктур в настоящее время применяются гетероструктуры с множественными квантовыми ямами (КЯ) на основе твердого раствора  $(Al_xGa_{1-x})_{0,5}In_{0,5}P$ , выращенные на подложках GaAs с использованием технологии эпитаксии из металлорганических соединений из газовой фазы (МОСГФЭ). Такие структуры имеют меньшие пороговые токи зажигания и лучшие температурные характеристики по сравнению с соответствующими параметрами объемных гетероструктур AlGaInP. При этом низкая плотность дислокаций в активной области квантово-размерной структуры AlGaInP и отсутствие спонтанной поляризации обеспечивают ее высокую внутреннюю квантовую эффективность.

### Светодиодная структура AlGaInP/GaAs

В настоящей работе приведены спектры электролюминесценции (ЭЛ) «красных» (628–632 нм) светодиодов AlGaInP/GaAs, выращенных с использованием технологии МОСГФЭ. Геометрия исследуемых светодиодных структур представлена на рис. 1.

Оконный слой <i>p</i> -GaP
<i>p</i> -AlGaInP
<i>p</i> -AlInP
<i>i</i> -AlGaInP
МКЯ 10–20 × GaInP/AlGaInP
<i>i</i> -AlGaInP
<i>n</i> -AlInP
<i>n</i> -AlGaInP
РЗБ 15 × AlGaAs/AlGaAs
Буферный слой GaAs
Подложка GaAs

Рис. 1. Структура AlGaInP/GaAs с распределенным зеркалом Брэгга AlGaAs/AlGaAs

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке госконтракта № 14.513.11.0122 ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 гг.».

В качестве подложек при выращивании гетероструктуры AlGaInP/GaAs использовался легированный кремнием GaAs ( $n = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) толщиной около 350 мкм с разориентацией на  $10^\circ$  к плоскости (111A). На подложке GaAs формировался слой GaAs:Si ( $n = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) толщиной около 0,2 мкм.

В качестве оптического отражателя использовалось распределенное зеркало Брэгга (РЗБ) на основе легированных кремнием ( $n = 1,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) слоев  $\text{Al}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{As}/\text{Al}_{0,90}\text{Ga}_{0,1}\text{As}$  с числом пар равным 15. Толщина слоев выбиралась в соответствии с четвертьволновым условием с максимумом отражения в области 620–630 нм. Число пар выбиралось таким образом, чтобы достичь коэффициента отражения, близкого к 1 в диапазоне 600–640 нм. Состав используемых слоев обеспечивает непоглощающий характер, т.е. ширина запрещенной зоны слоев зеркала больше, чем энергетический переход в КЯ GaInP.

Активная область структуры формировалась на основе множественных квантовых ям (МКЯ), (10–20) КЯ  $\text{Ga}_{0,47}\text{In}_{0,53}\text{P}$  шириной 7 нм и барьерных слоев  $\text{Al}_{0,27}\text{Ga}_{0,23}\text{In}_{0,50}\text{P}$  толщиной 10 нм. КЯ ограничивались волноводными  $\text{Al}_{0,27}\text{Ga}_{0,23}\text{In}_{0,5}\text{P}$  и эмиттерными слоями  $n\text{-Al}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{P}$  ( $n = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ,  $d = 0,52 \text{ мкм}$ ) и  $p\text{-Al}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{P}$  ( $p = 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ,  $d = 0,52 \text{ мкм}$ ), легированными примесью кремния и магния соответственно.

«Оконный» слой светодиодной структуры AlGaInP/GaAs толщиной 9,3–9,6 мкм изготавливался на основе легированного магнием фосфида галлия (GaP) ( $p = 3\text{--}4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ). Значение толщины «оконного» слоя выбиралось для улучшения растекания тока в плоскости  $p\text{--}n$ -перехода.

### Результаты эксперимента

В работе исследовались электролюминесцентные характеристики двух типов структур AlGaInP/GaAs: структуры типа № 1 с 10 КЯ  $\text{Ga}_{0,47}\text{In}_{0,53}\text{P}$  и структуры типа № 2 с 20 КЯ  $\text{Ga}_{0,47}\text{In}_{0,53}\text{P}$ . Измерение спектров электролюминесценции (ЭЛ) проводили при 300 К с использованием сферы FOIS-1 и цифрового спектрометра USB 2000 фирмы «Ocean Optics». Для определения EQE образцы помещали в интегрирующую сферу фирмы «Labsphere» (диаметр 10 дюймов) и измеряли фототок фотоприемника ФД–7К. Квантовый выход излучения рассчитывался по значениям фототока с учетом спектральной чувствительности фотоприемника. Ток через светодиод задавался при помощи источника-измерителя Keithley 2410.

На рис. 2 представлены типичные спектры ЭЛ исследуемых структур при различных плотностях прямого тока  $j$ .

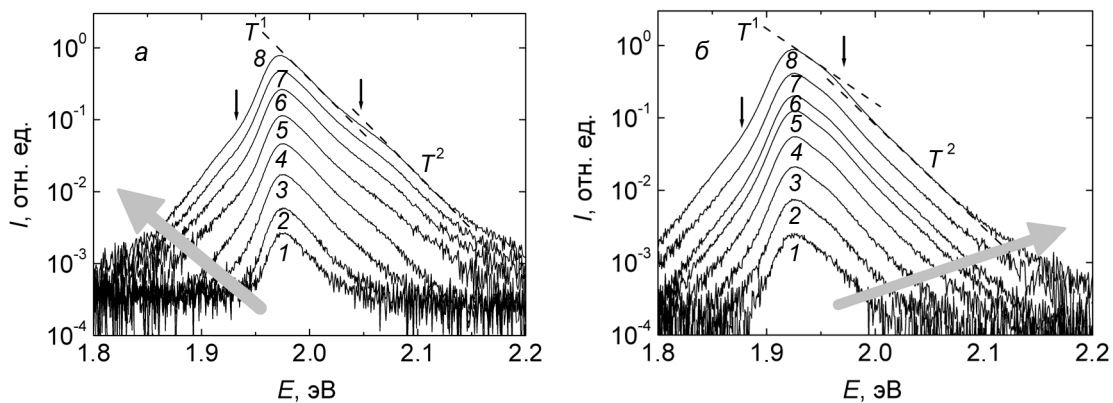


Рис. 2. Спектры ЭЛ структуры № 1 (10 КЯ) при плотности тока  $j$ ,  $\text{А}/\text{см}^2$ : кр. 1 – 0,04; кр. 2 – 0,07; кр. 3 – 0,17; кр. 4 – 0,40; кр. 5 – 0,82; кр. 6 – 1,75; кр. 7 – 3,12; кр. 8 – 5,16 (а). Спектры ЭЛ структуры № 2 (20 КЯ) при плотности тока  $j$ ,  $\text{А}/\text{см}^2$ : кр. 1 – 0,02; кр. 2 – 0,06; кр. 3 – 0,15; кр. 4 – 0,36; кр. 5 – 0,78; кр. 6 – 1,23; кр. 7 – 2,24; кр. 8 – 5,23 (б)

При изменении плотности прямого тока от  $\sim 0,005$  до  $5 \text{ А}/\text{см}^2$  длина волны, соответствующая максимальной интенсивности излучения ( $\lambda_{\text{max}}$ ), остается неизменной, что указывает на отсутствие нагрева исследуемых образцов при измерениях ЭЛ в широком интервале плотностей прямых токов. Ширина спектра ЭЛ на полувысоте полосы излучения (FWHM) при изменении  $j$  меняется незначительно и составляет 40–41 мэВ для структуры № 1 (10 КЯ) и несколько больше, около 47–48 мэВ, для структуры № 2 (20 КЯ).

В полулогарифмических координатах с низкоэнергетической и высокоэнергетической сторон от основного максимума полосы ЭЛ наблюдаются «перегибы» на спектральной зависимости ЭЛ, обозначенные вертикальными стрелками на рис. 2, энергетическое положение которых не изменяется с увеличением плотности прямого тока. Со стороны коротких длин волн можно выделить два экспоненциальных участка (на рис. 2 участки  $T^1$  и  $T^2$  показаны пунктирными линиями), из которых было определено эффективное значение температуры ( $T_{\text{эфф}}$ ) носителей заряда согласно выражению [2]

$$d[\ln(I)]/dE \propto -[kT_{\text{эфф}}]^{-1}. \quad (1)$$

Здесь  $I$  – интенсивность излучения;  $E$  – энергия фотонов;  $k$  – постоянная Больцмана. Эти оценки показали, что расчетное значение  $T_{\text{эфф}}$  отличается от комнатной температуры на 20–60 К.

На рис. 3 представлены зависимости внешнего квантового выхода EQE структуры от плотности прямого тока. Как следует из рисунка, увеличение числа КЯ с 10 до 20 приводит к росту EQE во всем интервале изменения плотности прямого тока  $j$ . В области насыщения зависимости EQE от прямого тока, при  $j \geq 3\text{--}5 \text{ A/cm}^2$ , внешний квантовый выход структур № 1 и 2 различается примерно в 1,5 раза.

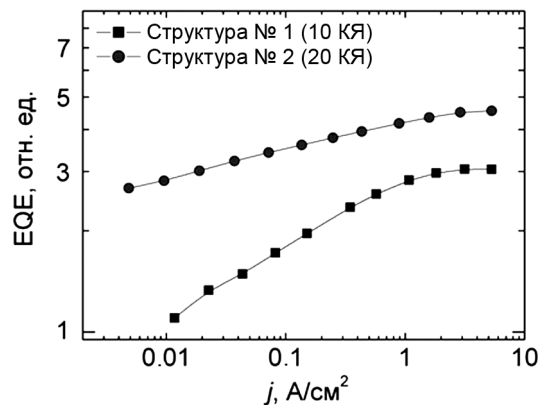


Рис. 3. Зависимость внешнего квантового выхода EQE (в отн. ед.) светодиодных гетероструктур AlGaInP/GaAs от плотности прямого тока  $j$

### Заключение

Согласно ранее опубликованным данным, для светодиодных структур AlGaInP может наблюдаться уширение спектров ЭЛ за счет флуктуаций состава трехкомпонентного твердого раствора квантовых ям GaInP [2, 3]. В нашем случае незначительное уширение спектра ЭЛ наблюдалось лишь для структуры № 2 (FWHM = 47,5 мэВ относительно ее расчетного значения  $1,8 \cdot kT \approx 45,5$  мэВ [2]). В целом, результаты исследования спектров ЭЛ свидетельствуют о достаточно высокой степени однородности состава твердого раствора в КЯ GaInP исследованных структур. Тем не менее вид спектров ЭЛ указывает на наличие некоторой неоднородности состава такого раствора предположительно за счет его нестохастической сегрегации на локальные области определенного химического состава на стадии эпитаксиального роста. Это приводит к появлению излучательной рекомбинации зона–зона в локальных областях КЯ GaInP различного состава, что может быть причиной появления «перегибов» на спектрах основной полосы ЭЛ. В исследуемых структурах можно выделить до трех типов локальных областей твердого раствора GaInP различного состава. При этом объемная доля области, дающей основной вклад в спектр ЭЛ, является доминирующей по отношению к объемной доле локальных областей с другими составами твердого раствора GaInP. Полученные в настоящей работе зависимости внешней квантовой эффективности от плотности прямого тока в целом согласуются с результатами других исследователей светодиодных структур AlGaInP, например [1].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jong-In Shim, Dong-Pyo Han, Hyunsung Kim, et al. // Appl. Phys. Lett. – 2012. – V. 100. – P. 111106.
2. Шуберт Ф. Светодиоды: пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича. – М.: Физматлит, 2008. – 496 с.
3. Gessmann T.H., Schubert E.F., Graff J.W., and Streubel K. // Proc. SPIE – 2003. – V. 4996. – P. 26.

\*ОАО «Научно-исследовательский институт “Полус” им. М.Ф. Стельмаха», Поступила в редакцию 05.08.13.

г. Москва, Россия

\*\*Национальный исследовательский Томский государственный университет,

г. Томск, Россия

\*\*\*ОАО «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов»,

г. Томск, Россия

E-mail: brudnyi@mail.tsu.ru

---

Мармалюк Александр Анатольевич, д.т.н., зам. ген. директора по науке;

Горлачук Павел Владимирович, инженер-технолог;

Рябоштан Юрий Леонидович, ведущ. инженер-технолог;

Брудный Валентин Натанович, д.ф.-м.н., профессор;

Прудасев Илья Анатольевич, к.ф.-м.н., зав. лабораторией;

Романов Иван Сергеевич, аспирант;

Леликов Михаил Александрович, к.ф.-м.н., нач. отдела.