

УДК 621.382.2

И.А. ПРУДАЕВ*, М.С. СКАКУНОВ*, М.А. ЛЕЛЕКОВ**, Ю.Л. РЯБОШТАН***,
П.В. ГОРЛАЧУК***, А.А. МАРМАЛЮК***

РЕКОМБИНАЦИОННЫЕ ТОКИ В СВЕТОДИОДАХ НА ОСНОВЕ МНОЖЕСТВЕННЫХ КВАНТОВЫХ ЯМ $(Al_xGa_{1-x})_{0,5}In_{0,5}P/(Al_yGa_{1-y})_{0,5}In_{0,5}P^1$

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния температуры на прямую вольт-амперную характеристику светодиодов с активной областью из множественных квантовых ям $(Al_xGa_{1-x})_{0,5}In_{0,5}P/(Al_yGa_{1-y})_{0,5}In_{0,5}P$. Показано, что в интервале температур 210–390 К на вольт-амперной характеристике можно выделить несколько участков. Проведенный анализ позволил связать первый участок с рекомбинационным током Саа – Нойса – Шокли, второй – с током излучательной рекомбинации.

Ключевые слова: светодиод, гетероструктура, вольт-амперная характеристика, квантовый выход.

Светодиоды на основе растворов AlGaInP являются перспективными полупроводниковыми источниками света красного и желтого диапазонов [1]. Активная область светодиодов, выпускаемых промышленностью, представляет собой набор множественных квантовых ям (МКЯ) $(Al_xGa_{1-x})_{0,5}In_{0,5}P/(Al_yGa_{1-y})_{0,5}In_{0,5}P$, состав и ширина которых определяют длину волны излучения. При этом типичная ширина квантовых ям составляет $\approx 4-7$ нм, а их количество достигает 20–40 [1–3]. Несмотря на большой коммерческий успех данных светодиодов (внешний квантовый выход промышленных образцов достигает 40–60 % [1]), недостаточно изучены механизмы формирования прямых вольт-амперных характеристик (ВАХ) при изменении температуры. В литературе лишь указывается, что влияние на ВАХ могут оказывать механизмы протекания рекомбинационного тока Саа – Нойса – Шокли (рекомбинация Шокли – Рида – Холла) либо диффузионный ток [2]. В связи с этим целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование прямых ВАХ светодиодов с МКЯ $(Al_xGa_{1-x})_{0,5}In_{0,5}P/(Al_yGa_{1-y})_{0,5}In_{0,5}P$ и установление механизмов протекающего тока.

В эксперименте проводились измерения прямых ВАХ светодиодов красного (630 нм, партия № 1) и желтого (590 нм, партия № 2) диапазонов. Площадь светодиодов ~ 1 мм², ширина квантовых ям (КЯ) ~ 7 нм, толщина барьеров ~ 10 нм. Активная область светодиодов первой партии состояла из 20 КЯ $Ga_xIn_{1-x}P/(Al_yGa_{1-y})_{0,5}In_{0,5}P$ ($x = 0,47$, $y = 0,1$), второй партии – из 30 КЯ $(Al_xGa_{1-x})_{0,5}In_{0,5}P/(Al_yGa_{1-y})_{0,5}In_{0,5}P$ ($x = 0,42$, $y = 0,54$). Гетероструктуры были сформированы на подложках GaAs (100), разориентированных на 10° к $\langle 111A \rangle$. Между активной светоизлучающей областью и подложкой было помещено брегговское зеркало, состоящее из 15 пар $Al_zGa_{1-z}As/Al_wGa_{1-w}As$. Дополнительно проводились измерения коммерческих светодиодов с МКЯ (630 нм – партия № 3; 590 нм – партия № 4). Площадь данных диодов составляла 700×700 мкм². Измерения проводили в статическом режиме при температурах $T = 210-390$ К с использованием криостата фирмы «Janis» и источника измерителя Keithley 2636. Дополнительно проводились измерения внешнего квантового выхода (ВКВ) при помощи кремниевого фотоприемника ФДУК-13.

Типичные прямые ветви ВАХ исследованных светодиодов представлены на рис. 1. Из рисунка следует, что на ВАХ можно выделить три участка. Первый участок соответствует напряжениям $U \leq 1,3-1,6$ В для всех партий светодиодов и хорошо описывается экспоненциальной зависимостью вида

$$I = I_s \cdot \exp[eU/(n \cdot kT)], \quad (1)$$

где e – заряд электрона; n – коэффициент неидеальности; k – постоянная Больцмана; $I_s = I_s(T)$. Коэффициент неидеальности принимает значения $n \equiv n_1 \approx 2$ для всех светодиодов. Второй участок ВАХ соответствует сверхлинейному росту тока в координатах $\ln(I)$ от U . Для «желтых» диодов данный участок проявляется отчетливой и переходит в экспоненциальную зависимость вида (1) со значением коэффициента неидеальности $n \equiv n_2 \leq 1,51$ для $T = 210-390$ К. Начало второго участка

¹ 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.».

сопровождается переходом к режиму электролюминесценции светодиодов, что обозначено пунктирной линией на рис. 1. Диапазоны значений n_1 и n_2 для всех партий, полученные из ВАХ во всем интервале температур, представлены в таблице. Третий участок ВАХ соответствует сублинейной зависимости в координатах $\ln(I)$ от U и описывается выражением

$$I = I_s \cdot \exp[e(U - I \cdot R)/(n_2 \cdot kT)], \tag{2}$$

где R – омическое сопротивление, слабо зависящее от температуры. Для всех диодов данный участок начинается при одинаковых плотностях тока $j \approx 0,2-0,4 \text{ А/см}^2$ и связан, по-видимому, с ограничением тока последовательным сопротивлением пассивных областей светодиодов и сопротивлением контактов [2].

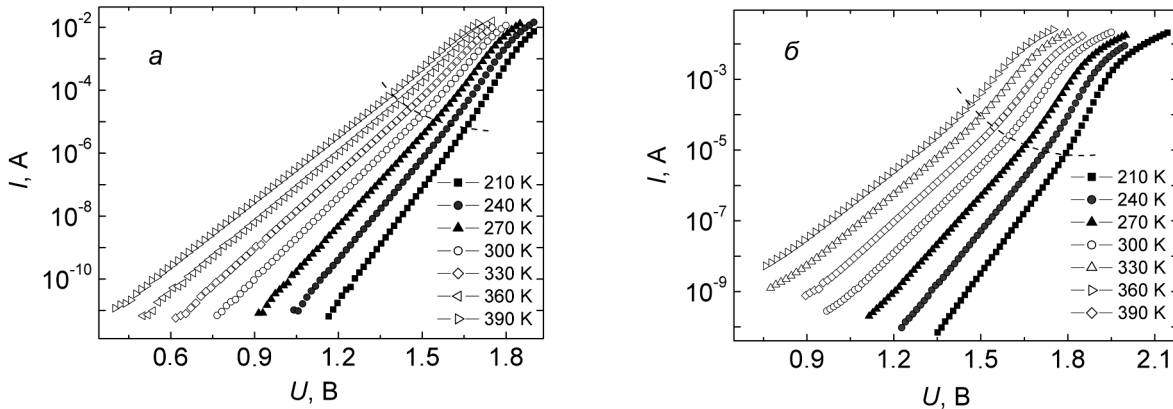


Рис. 1. Прямые ветви ВАХ при различных температурах для светодиодов из партии № 3 (а) и партии № 2 (б). Пунктирной линией показана область, соответствующая началу режима электролюминесценции

Значения рассчитанных параметров ВАХ по экспериментальным данным; $E_g \approx 1,24 \text{ эВ}/\lambda_{\text{max}}$ (мкм), λ_{max} – длина волны для максимальной интенсивности электролюминесценции

№ партии	n_1	$\Delta E_1, \text{ эВ}$	n_2	$\Delta E_2, \text{ эВ}$	$E_g, \text{ эВ}$
1	1,90–2,12	0,99	1,19–1,26	1,79 (при 210–360 К)	1,97
2	2,02–2,11	1,11	1,38–1,51	1,80 (при 210–240 К)	2,10
3	1,87–2,00	1,02	–	–	1,97
4	1,95–2,00	1,19	1,27–1,34	2,05 (при 210–270 К)	2,10

Перейдем к обсуждению результатов. Ранее при интерпретации прямых ВАХ светодиодов с множественными квантовыми ямами $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{P}/(\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y})_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{P}$ указывалось, что в формирование ВАХ может давать вклад несколько механизмов протекания тока, которые, в общем случае, описываются выражениями вида (1) или (2). При этом в эксперименте наблюдался один участок с экспоненциальной зависимостью I_s от $1/T$, а энергия активации (ΔE) имеет промежуточные значения между E_g и $E_g/2$ (E_g – ширина запрещенной зоны излучающей активной области). Полученное в работе [2] значение энергии активации составляло 1,41 эВ, а $n = 1,58$ для интервала температур $T = 300-470 \text{ К}$. Результаты настоящей работы указывают на наличие двух различных механизмов протекания тока, соответствующих двум участкам ВАХ.

Первый участок ВАХ соответствует рекомбинационному току по механизму Саа – Нойса – Шокли [4]. С одной стороны, на это указывает значение коэффициента n_1 близкое к 2, которое практически не изменяется во всем интервале температур. С другой стороны, температурная зависимость $I_s \equiv I_{s1}$, представленная на рис. 2, а, хорошо описывается экспонентой с энергией активации, близкой к половине ширины запрещенной зоны. Например, для партии № 3 $\Delta E_1 = 1,02 \text{ эВ}$ при $E_g/2 \approx 1,97 \text{ эВ}$ (значения энергий активации для других партий представлены в таблице).

Количественный анализ второго участка ВАХ затруднен в связи с его небольшой протяженностью. Для диодов из всех партий данный участок, по-видимому, сильно искажается за счет ограничения сопротивлением R со стороны больших напряжений и наличия тока рекомбинации

Шокли – Рида – Холла со стороны низких напряжений. Например, из рис. 1, *a* видно, что при высоких температурах избыточный ток (по отношению к току Саа – Нойса – Шокли) практически не выявляется. Для «желтых» светодиодов рекомбинационный ток через дефектные уровни ниже в силу большей ширины запрещенной зоны, что приводит к увеличению протяженности второго участка. Можно ожидать, что такие параметры светодиодов, как толщина активной области и уровень легирования будут влиять на протяженность второго участка ВАХ, так как они определяют значение I_{s1} [4].

При аппроксимации второго участка экспоненциальной зависимостью были рассчитаны значения $I_s \equiv I_{s2}$, которые представлены на рис. 2, *a*. Из рисунка видно, что I_{s2} не подчиняется экспоненциальной зависимости от $1/T$ во всем интервале температур. В предположении, что при росте температуры второй участок искажается сильнее, была рассчитана энергия активации (ΔE_2) для наиболее низких T (таблица). Следует отметить, что полученные ΔE_2 близки к ширине запрещенной зоны. Например, для партии № 4 на участке $T = 210\text{--}270$ К $\Delta E_2 = 2.05$ эВ, что близко к $E_g = 2,10$ эВ. Экспоненциальная зависимость вида (1) с близким к единице коэффициентом n и значением энергии активации для $I_s(T)$, близким к E_g , может быть объяснена с привлечением механизма диффузионного тока. Однако измерения внешнего квантового выхода противоречат этому предположению.

На рис. 2, *б* представлены типичные зависимости ВКВ от тока на втором и третьем участках

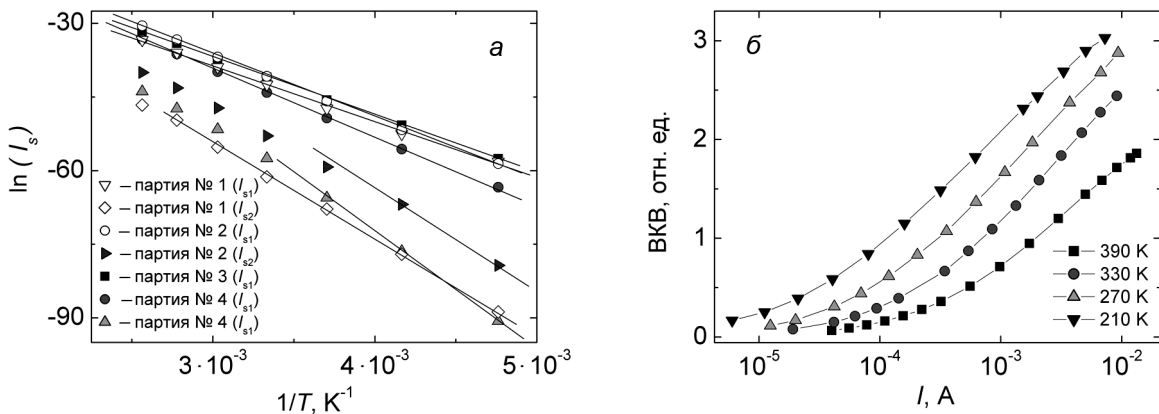


Рис. 2. Температурная зависимость предэкспоненциального множителя из (1) в полулогарифмических координатах (*a*), номера партий и участков на рисунке. Типичная зависимость внешнего квантового выхода от тока (*б*), зависимость представлена для светодиода из партии № 3

ВАХ. Из рисунка видно, что во всей области температур и токов наблюдается рост внешнего квантового выхода. Данный факт вступает в противоречие с предположением о диффузионном токе, так как его доминирование должно приводить к утечке носителей в пассивные области, что соответствует снижению коэффициента инжекции. Как следствие, рост диффузионного тока по отношению к рекомбинационному должен приводить к спаду внешнего квантового выхода, о чем также указывалось ранее в работе [3] для высокого уровня инжекции электронов в p -область.

С учетом того, что начало второго участка ВАХ соответствует началу свечения светодиодов, наиболее вероятным механизмом в области напряжений $U \geq 1,3\text{--}1,6$ В является ток излучательной рекомбинации. На это также указывает рост ВКВ при увеличении I . Согласно данным из [5], ВАХ гетероструктуры с активной областью толщиной d в случае излучательной межзонной (квадратичной) рекомбинации описывается выражением

$$I = e \cdot S \cdot d \cdot B \cdot n_i^2 \cdot \exp[eU/(nkT)], \quad (3)$$

где S – площадь диода; B – коэффициент излучательной рекомбинации; n_i – концентрация собственных носителей, $n = 1$. Температурная зависимость предэкспоненциального множителя в (3) соответствует нашим экспериментальным данным. Отклонение коэффициента n от единицы, полученное в эксперименте, может быть объяснено с учетом искажения второго участка ВАХ за счет наличия тока безызлучательной рекомбинации и ограничения тока последовательным сопротивлением R . Также отклонение n в большую сторону может быть связано с частичным вырождением инжектирующих областей гетероструктуры [5].

В заключение отметим следующее. Измеренные ВАХ светодиодов с множественными квантовыми ямами $(Al_xGa_{1-x})_{0,5}In_{0,5}P/(Al_yGa_{1-y})_{0,5}In_{0,5}P$ имеют сложный вид, что вызвано влиянием нескольких механизмов протекания тока. Анализ результатов показал, что при напряжениях менее 1,3–1,6 В преобладающим механизмом является рекомбинационный ток Саа – Нойса – Шокли. В режиме электролюминесценции, при напряжениях более 1,3–1,6 В, ВАХ определяется током излучательной межзонной рекомбинации. При плотностях тока $j > 0,2-0,4 \text{ A/cm}^2$ наблюдается ограничение тока, которое может быть связано с последовательным сопротивлением контактов и пассивных областей светодиода.

Авторы выражают благодарность профессору В.И. Гаману за проявленный интерес к работе и обсуждение полученных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gessmann T.H. and Schubert E.F. // J. Appl. Phys. – 2004. – V. 95. – P. 2203.
2. Jong-In Shim, Dong-Pyo Han, Hyunsung Kim, et al. // Appl. Phys. Lett. – 2012. – V. 100. – P. 111106.
3. Chen N.C., Yang Y.K., Lien W.C., and Tseng C.Y. // J. Appl. Phys. – 2007. – V. 102. – P. 043706.
4. Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов: 1 кн.: пер. с англ. под ред. Р.А. Сурица. – М.: Мир, 1984. – 455 с.
5. Елисеев П.Г. Введение в физику инжекционных лазеров. – М.: Наука, 1983. – 296 с.

*Национальный исследовательский Томский государственный университет, Поступила в редакцию 05.08.13.

г. Томск, Россия

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

г. Томск, Россия

***ОАО «Научно-исследовательский институт “Полюс” им. М.Ф. Стельмаха»,

г. Москва, Россия

E-mail: jaia@pochta.ru

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

Скакунов Максим Сергеевич, науч. сотр.;

Лелеков Михаил Александрович, к.ф.-м.н., нач. отдела;

Рябоштан Юрий Леонидович, ведущ. инженер-техн.;

Горлачук Павел Владимирович, инженер;

Мармалюк Александр Анатольевич, д.т.н., зам. ген. директора.