

УДК 621.382.2

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

ПЕРЕНОС НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В СВЕТОДИОДАХ НА ОСНОВЕ МНОЖЕСТВЕННЫХ КВАНТОВЫХ ЯМ $(Al_xGa_{1-x})_{0.5}In_{0.5}P/(Al_{0.54}Ga_{0.46})_{0.5}In_{0.5}P$ ¹

Представлены результаты экспериментальных исследований прямых вольт-амперных характеристик светодиодов с активной областью из множественных квантовых ям $(Al_xGa_{1-x})_{0.5}In_{0.5}P/(Al_{0.54}Ga_{0.46})_{0.5}In_{0.5}P$. Эксперимент показал, что увеличение числа квантовых ям и уменьшение содержания Al в твердом растворе Al_xGa_{1-x} приводят к росту прямого тока при фиксированном напряжении. Согласно проведенному анализу, интерпретация полученного результата возможна при использовании теории диффузионного переноса заряда в двойной гетероструктуре с узкозонным слоем, толщина которого многократно превышает толщину одной квантовой ямы. Предложенный подход учитывает перенос носителей в активной области с множественными квантовыми ямами за счет их туннелирования через барьеры.

Ключевые слова: светодиод, гетероструктура, квантовая яма, вольт-амперная характеристика.

Введение

Светодиоды на основе гетероструктур из твердых растворов AlGaInP широко используются в качестве источников света красного и желтого диапазонов. Активная область высокоэффективных светодиодов представляет собой набор множественных квантовых ям (МКЯ) $(Al_xGa_{1-x})_{0.5}In_{0.5}P/(Al_yGa_{1-y})_{0.5}In_{0.5}P$, количество которых достигает нескольких десятков [1]. Наличие большого числа гетеропереходов в таких структурах должно приводить к сложному характеру переноса заряда, проявляющемуся, в частности, в ограничении прямого тока и в увеличении прямого напряжения. Однако ранее было показано, что интерпретация прямых вольт-амперных характеристик (ВАХ) допускает использование наиболее простых формул, выведенных для случая рекомбинационного и диффузионного токов в гомопереходах [2, 3]. В настоящей работе проводится экспериментальное исследование прямых ВАХ светодиодов на основе МКЯ с различными параметрами активной области (количество квантовых ям и их состав), обсуждаются механизмы переноса заряда в активной области при формировании прямых ВАХ светодиодов.

Эксперимент

В эксперименте проводились измерения прямых ВАХ светодиодов красного (партии № 1, 2) и желтого (партия № 3) диапазонов. Гетероструктуры были выращены методом эпитаксии из металлоорганических соединений на подложках GaAs (100), разориентированных на 10° к плоскости (111A). Схематически активная область структур представлена на рис. 1. Между активной светоизлучающей областью и подложкой выращено бреггов-

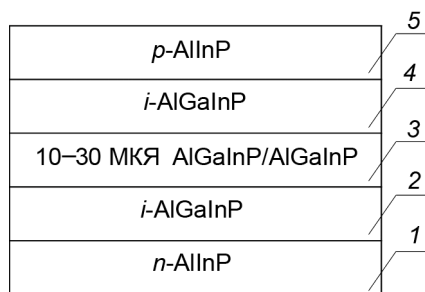


Рис. 1. Схематическое изображение активной области исследованных структур: 1 – эмиттерный слой n - $Al_{0.5}In_{0.5}P$ толщиной 0.52 мкм; 2 – нелегированный спейсерный слой $(Al_{0.54}Ga_{0.46})_{0.5}In_{0.5}P$ i -типа проводимости толщиной 50 нм; 3 – активная область $(Al_xGa_{1-x})_{0.5}In_{0.5}P/(Al_{0.54}Ga_{0.46})_{0.5}In_{0.5}P$; 4 – нелегированный спейсерный слой $(Al_{0.54}Ga_{0.46})_{0.5}In_{0.5}P$ i -типа проводимости толщиной 50 нм; 5 – эмиттерный слой p - $Al_{0.5}In_{0.5}P$ толщиной 0.52 мкм

ское зеркало, состоящее из 15 пар $Al_zGa_{1-z}As/Al_wGa_{1-w}As$. Активная область светодиода состояла из множественных квантовых ям $(Al_xGa_{1-x})_{0.5}In_{0.5}P/(Al_{0.54}Ga_{0.46})_{0.5}In_{0.5}P$. Параметры активной области структур представлены в таблице. Площадь светодиодов составляла $\sim 1 \text{ мм}^2$, ширина квантовых ям (КЯ) $\sim 7 \text{ нм}$, толщина барьеров $\sim 10 \text{ нм}$.

¹ Работа поддержана Минобрнауки РФ (госзадание № 3.1206.2014).

В работе измерялись прямые ВАХ светодиодов при температурах $T = 160\text{--}300$ К в статическом и импульсном режимах с помощью источника-измерителя Keithley 2636, осциллографа LeCroy 104Xs и криостата Janis CCS-300S/204 НТ. Длительность импульсов составляла 60 мкс, максимальный импульсный ток 2 А. Для определения оптической мощности излучения при комнатной температуре образцы помещали в интегрирующую сферу фирмы «Labsphere» (диаметр 10 дюймов) и измеряли фототок фотоприемника ФД-7К. Мощность излучения рассчитывалась по значениям фототока с учетом спектральной чувствительности фотоприемника.

Параметры исследованных структур и их количество

№	Число квантовых ям	Состав x по Al	Длина волны, нм	Количество диодов
1	10	0	629	46
2	20	0	629	45
3	30	0.22	590	47

Результаты и их обсуждение

Исследования показали, что для всех образцов светодиодов ВАХ имеют одинаковый вид. Типичные ВАХ при различных температурах представлены на рис. 2. Аналогично результатам предыдущей работы [3] можно выделить три различных участка зависимости тока от напряжения. На первом участке ВАХ описывается экспоненциальной зависимостью

$$I = I_0 \cdot \exp[eU / nkT], \quad (1)$$

где T – абсолютная температура; e – заряд электрона; k – постоянная Больцмана; n – коэффициент неидеальности; $I_0 \sim \exp(E_0/kT)$. Для всех измеренных образцов коэффициент $n \approx 2$ и не зависит от температуры, значения E_0 для различных диодов составляют величину 0.96–1.21 эВ, что близко к полуширине запрещенной зоны 1.91 и 2.04 эВ для красных и желтых светодиодов соответственно в области квантовых ям. Анализ результатов показал, что на первом участке ВАХ ток ограничивается процессом безызлучательной рекомбинации [3].

Второй участок ВАХ описывается экспоненциальной зависимостью вида (1) с другими показателями n и I_0 . Коэффициент неидеальности также не зависит от температуры и принимает значения, близкие к единице ($n = 1.14\text{--}1.38$). Энергия активации для коэффициента I_0 составляет $E_0 = 1.77\text{--}2.12$ эВ, что близко к ширине запрещенной зоны квантовых ям. Согласно ранее представленным результатам, на данном участке ВАХ ток ограничивается процессом излучательной рекомбинации [3]. Однако в структурах с малой толщиной активной области существенный вклад в протекание тока может давать диффузионная утечка носителей заряда из активной области. На это, в частности, указывают результаты работы [4], в которой обнаружено увеличение внешнего квантового выхода при увеличении количества квантовых ям. В настоящей работе получен аналогичный результат для большой выборки светодиодов (рис. 3).

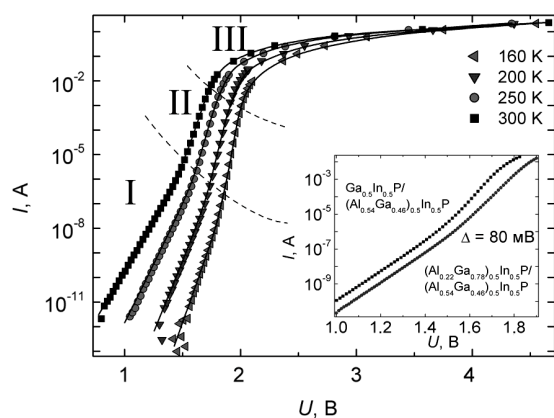


Рис. 2. Прямые ветви ВАХ при различных температурах для светодиодов из партии № 2. Пунктирной линией показаны границы различных участков ВАХ; на вставке изображены ВАХ для красного и желтого светодиодов при $T = 300$ К

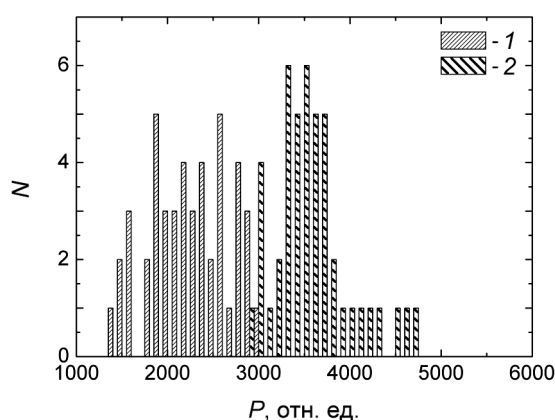


Рис. 3. Гистограммы распределения светодиодов по мощности излучения при токе 40 мА для образцов с 10-ю (1) и 20-ю квантовыми ямами (2)

Как видно из рис. 3, в светодиодах с большим количеством квантовых ям средняя мощность излучения при заданном токе вырастает примерно в 1.5 раза. Следует отметить, что диффузионный ток, как и ток излучательной рекомбинации, описывается зависимостью вида (1) с параметрами $n = 1$ и $E_0 = E_g$, где E_g – ширина запрещенной зона широкозонного эмиттера.

Третий участок ВАХ связан с ограничением тока последовательным сопротивлением и описывается зависимостью вида

$$I = I_0 \cdot \exp[e(U - IR)/nkT], \quad (2)$$

где R от температуры практически не зависит и составляет для разных диодов 1–1.5 Ом. Значения n и I_0 соответствуют второму участку ВАХ. Слабая температурная зависимость R указывает на ограничение тока контактным сопротивлением.

Эксперимент показал, что увеличение содержания Al в квантовых ямах приводит к сдвигу ВАХ при комнатной температуре в область больших прямых напряжений на величину $\Delta = 60$ –90 мВ для различных образцов (вставка на рис. 2). Известно, что при двусторонней инжекции носителей заряда из широкозонных эмиттеров в узкозонный слой прямое напряжение на светодиоде складывается из следующих составляющих [5]:

$$U = E_{g0}/e + I \cdot R + \Delta E_c/e + \Delta E_v/e = E_g/e + I \cdot R, \quad (3)$$

где E_{g0} – ширина запрещенной зоны узкозонной области; ΔE_c и ΔE_v – разрывы зоны проводимости и валентной зоны соответственно. Таким образом, инжектированные в узкозонный слой носители заряда отдают часть энергии кристаллической решетке. Именно поэтому прямое напряжение должно определяться шириной запрещенной зоны эмиттера и не зависеть от состава узкозонного слоя. Однако это противоречит экспериментальным данным. Данный факт указывает на туннельный характер инжекции носителей в квантовые ямы и туннельный транспорт носителей в активной области.

На рис. 4 изображена энергетическая диаграмма активной области светодиода, а также схематично представлен процесс туннелирования в МКЯ. При туннелировании электронам не требуется дополнительная тепловая энергия для преодоления барьера, поэтому прямое напряжение должно определяться запрещенной зоной узкозонной области: $E_{g0}/e + I \cdot R$. Оценки показывают, что в этом случае при изменении содержания Al от 0 до 0.22 в твердом растворе $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}$ величина $\Delta = 190$ мВ, что сопоставимо с экспериментальными данными. Более низкие значения $\Delta = 60$ –90 мВ, полученные в эксперименте, свидетельствуют о смешанном характере инжекции носителей заряда в квантовые ямы. Следует отметить, что с понижением температуры больший вклад в перенос носителей заряда должно давать туннелирование. Данный факт наблюдается экспериментально и выражается в увеличении Δ при снижении температуры. Высокая вероятность туннелирования через барьеры толщиной 10 нм может быть связана с наличием хвоста плотности состояний вблизи E_c и E_v .

Увеличение толщины активной области (количества квантовых ям) приводит к росту тока при фиксированном напряжении в режиме электролюминесценции. На рис. 5 представлена гистограмма распределения светодиодов по величине тока при напряжении 1.8 В для образцов с 10-ю и

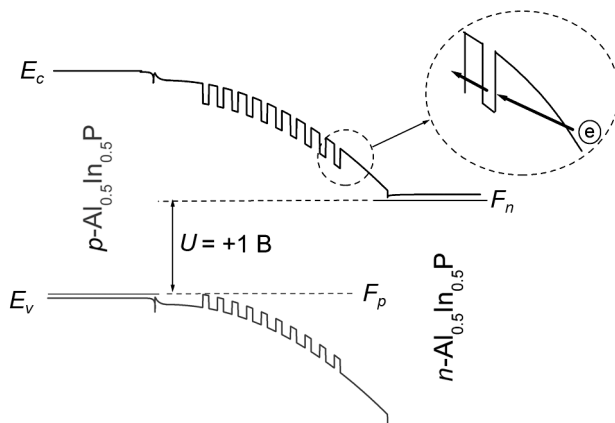


Рис. 4. Энергетическая диаграмма активной области структуры светодиода из партии № 1 при прямом смещении $U = 1$ В; на вставке схематично представлен процесс туннелирования электронов

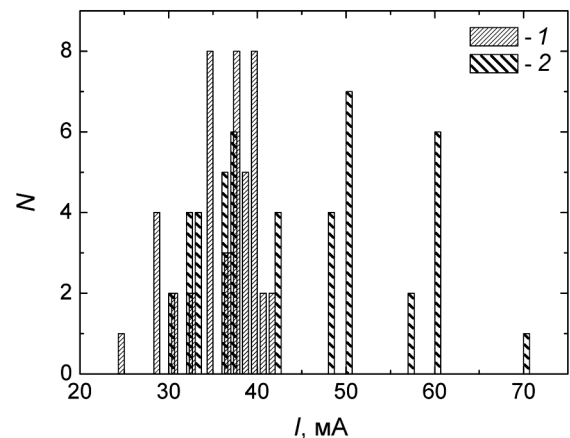


Рис. 5. Гистограммы распределения светодиодов по току при прямом напряжении $U = 1.8$ В для образцов с 10-ю (1) и 20-ю квантовыми ямами (2)

20-ю квантовыми ямами. Из рисунка следует, что двукратное увеличение количества квантовых ям приводит к увеличению прямого тока с 24–42 до 30–70 мА. Таким образом, среднее значение тока вырастает примерно в 1.5 раза. Подобный эффект характерен для двойных гетероструктур (ДГС) и связан с электронным ограничением. Эффект заключается в ограничении диффузионного растекания электронов в узкозонном слое за счет введения отражающего потенциального барьера гетероперехода со стороны *p*-эмиттера [6].

Рост оптической мощности и тока при увеличении толщины активной области указывают на то, что электронное ограничение происходит и в структурах с МКЯ. В этом случае роль отражающего барьера выполняет первый со стороны *p*-слоя гетеропереход $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}/(\text{Al}_{0.54}\text{Ga}_{0.46})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$, высота барьера которого составляет ~ 0.2 эВ. Однако в отличие от ДГС в структурах с МКЯ скорость переноса носителей заряда обусловлена не только диффузией, но и тепловой эмиссией носителей заряда из квантовых ям, либо их туннелированием через энергетические барьеры. Это должно приводить к снижению эффективной диффузионной длины в области МКЯ по отношению к диффузионной длине электронов в слоях $(\text{Al}_{0.54}\text{Ga}_{0.44})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ и $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$.

Заключение

В работе экспериментально исследовано влияние количества квантовых ям и их состава на ВАХ и мощность излучения при фиксированном токе для светодиодов на основе МКЯ $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}/(\text{Al}_{0.54}\text{Ga}_{0.46})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$. Установлено, что общий вид ВАХ не изменяется при изменении параметров активной области светодиодов. При этом увеличение количества квантовых ям, как и уменьшение состава по Al в них, приводит к росту тока при фиксированном напряжении. Анализ результатов показал, что описание ВАХ структур с МКЯ допускает использование диффузионной теории переноса носителей заряда в активной области с некоторыми эффективными диффузионными параметрами. При этом фактический перенос носителей заряда в активной области светодиодной структуры обеспечивается за счет их диффузии и туннелирования. Снижение температуры приводит к увеличению относительного вклада туннельной составляющей в общий поток электронов в МКЯ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gessmann T.H. and Schubert E.F. // J. Appl. Phys. – 2004. – V. 95. – P. 2203.
2. Chen N.C., Yang Y.K., Lien W.C., and Tseng C.Y. // J. Appl. Phys. – 2007. – V. 102. – P. 043706.
3. Прудаев И.А., Скакунов М.С., Лелеков М.А. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. – № 8. – С. 44.
4. Мармалюк А.А., Горлачук П.В., Рябоштан Ю.Л. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. – № 8. – С. 40.
5. Шуберт Ф. Светодиоды: пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича. – М.: Физматлит, 2008. – 496 с.
6. Елисеев П.Г. Введение в физику инжекционных лазеров. – М.: Наука, 1983. – 296 с.

*Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия Поступила в редакцию 20.02.14.

**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;
Олейник Владимир Леонидович, инженер;
Романов Иван Сергеевич, мл. науч. сотр.;
Брудный Валентин Натанович, д.ф.-м.н., профессор;
Рябоштан Юрий Леонидович, ведущ. инженер-техн.;
Горлачук Павел Владимирович, к.т.н., инженер;
Мармалюк Александр Анатольевич, д.т.н., зам. ген. директора.