

Исследование особенностей рабочих характеристик многокомпонентных гетероструктур и светоизлучающих диодов на основе AlInGaN

© О.И. Рабинович[¶], В.П. Сушков

Государственный технологический университет „Московский институт стали и сплавов“,
Институт физико-химии материалов,
119049 Москва, Россия

(Получена 22 мая 2008 г. Принята к печати 15 августа 2008 г.)

Проведено моделирование многокомпонентных гетероструктур на основе AlInGaN для использования их в светоизлучающих диодах. Определено влияние неоднородного распределения атомов индия в светоизлучающих „нанодиодах“ на рабочие характеристики приборов в целом. Разработана модель, описывающая строение многокомпонентных AlInGaN-гетероструктур для излучающих диодов.

PACS: 73.40.Kp, 78.60.Fi, 85.60.Jb

1. Введение

Проведение работ по компьютерному моделированию электрических и оптических характеристик светоизлучающих диодов (СИД), изготовленных на основе многокомпонентных гетероструктур (МКГ) с квантово-размерными ямами (КЯ) $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, было стимулировано успехами в разработках и увеличением производства этих приборов, что вызвало необходимость детального, но быстрого изучения поведения характеристик гетероструктур и СИД [1–3]. В данной работе при моделировании МКГ для СИД использовалась некоммерческая программа SimWindows 1.5 (freeware software), разработанная Д. Уинстоном в Центре оптоэлектронных систем при Колорадском университете, Боулдер, США [4].

2. Методика

Программа была усовершенствована для выполнения данных исследований. Для каждого конкретного кристалла на основе твердых растворов $\text{Al}_y\text{In}_x\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ в его файле прибора указывались: геометрические размеры эмиттеров, КЯ и барьеров; количество КЯ и барьеров; состав твердого раствора; тип проводимости; концентрации и энергии активации легирующих примесей в каждой области МКГ. В файле параметров материалов указывались такие параметры материала, как ширина запрещенной зоны, показатель преломления, оптическое поглощение, теплопроводность, подвижность и время жизни носителей заряда, электронное сродство, коэффициенты излучательной и безызлучательной рекомбинации и т.д. Всего учитывается более 35 параметров. В качестве основного параметра, характеризующего МКГ, выбрана величина внутреннего квантового выхода $\eta_{\text{IQE}} = \sum U_{\text{Bimol}} / \sum (U_{\text{Bimol}} + U_{\text{SHR}})$, где U_{Bimol} и U_{SHR} — скорости излучательной и безызлучательной рекомбинации соответственно, суммированные по всем КЯ.

Проводилось моделирование конструкции МКГ типа $p^+\text{-GaN}/p^+\text{-Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/4(n^-\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}-n^-\text{GaN})/n^+\text{-GaN}$ с 4 КЯ для СИД синего и зеленого цвета свечения, с различным по величине и однородным содержанием атомов In (x) в КЯ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ в плоскости, параллельной плоскости p – n -перехода, для определения влияния величины x на электрические и оптические характеристики СИД. Файлы приборов содержали следующие параметры КЯ и барьеров в активной области: 1) содержание атомов In в КЯ составляло $x = 0.05$ – 0.35 с шагом 0.05; 2) количество КЯ — 4, ширина КЯ равнялась 2 нм при толщине GaN-барьеров 3 нм; 3) КЯ и барьеры в активной области имели n -тип проводимости, концентрация доноров в КЯ равна $N_d = 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, в барьерах $N_d = 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$; 4) концентрация доноров в эмиттере $n\text{-GaN}$, легированном Si, составляла $N_d = 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$; 5) p -область состояла из контактного слоя GaN и эмиттера $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ толщиной 80 нм, оба p -слоя легированы Mg с концентрацией $N_a = 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$; 6) при моделировании температура принималась равной $T = 300 \text{ K}$.

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

Результаты моделирования МКГ типа $p^+\text{-GaN}/p^+\text{-Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/4(n^-\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}-n^-\text{GaN})/n^+\text{-GaN}$ с различным содержанием атомов In в КЯ показывают, что введение в конструкцию МКГ $p\text{-Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ -эмиттера полностью исключает инжекцию электронов из активной области в эмиттер, что особенно важно при моделировании приборов с малым содержанием In.

Анализ поведения зависимости коэффициента неидеальности (η) (рис. 1) от плотности тока для МКГ с различным содержанием In выявляет следующее. В отсутствие КЯ ($x = 0$) вольт-амперная характеристика (ВАХ) имеет обычный вид; в области малых плотностей

[¶] E-mail: Rabinwork@mail.ru

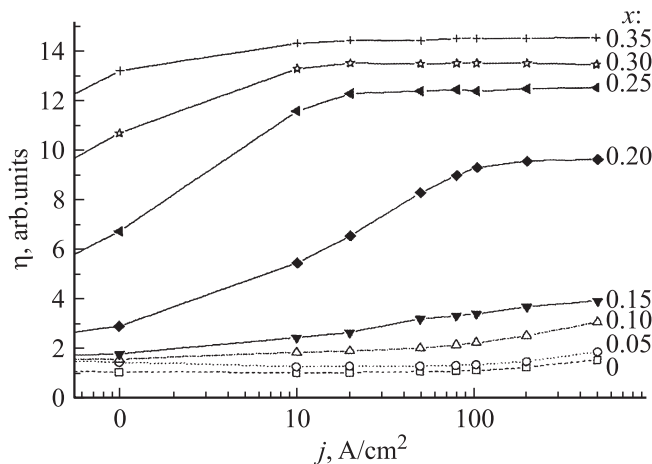


Рис. 1. Зависимости величины коэффициента неидеальности ВАХ η от плотности тока при различном содержании In (x) в квантово-размерных ямах.

тока вплоть до $j = 0.1 \text{ A/cm}^2$ коэффициент неидеальности $\eta > 1$, что связано с существенным влиянием на величину тока процессов рекомбинации электронов и дырок в области объемного заряда; затем все более начинает преобладать ток надбарьерной инжекции носителей заряда, при этом $\eta \rightarrow 1$ при малом уровне инжекции ($j = 1\text{--}20 \text{ A/cm}^2$) и $\eta \rightarrow 2$ при увеличении уровня инжекции ($j = 20\text{--}500 \text{ A/cm}^2$). Наличие КЯ начинает сказываться на виде ВАХ уже при значениях $x = 0.05\text{--}0.1$, особенно в диапазоне $x = 0.1\text{--}0.35$; при $x > 0.1$ величина η постепенно растет во всем диапазоне $j = 0.1\text{--}500 \text{ A/cm}^2$, достигая значений $\eta > 2$ и даже $\eta \gg 2$ при $x > 0.15$.

При малых концентрациях In, $x = 0.05\text{--}0.1$, с ростом плотности тока концентрации электронов и дырок в КЯ увеличиваются, а неравномерность их распределений по КЯ уменьшается, при этом величина напряженности тормозящего электрического поля в квантово-размерной области уменьшается, достигая нуля при $x = 0.1$ и $j = 100 \text{ A/cm}^2$. При дальнейшем увеличении концентрации In ($x > 0.15$) увеличивается неравномерность распределений электронов и дырок по КЯ (рис. 2), в активной области возникает дополнительная разность потенциалов, т.е. появляется дополнительное напряжение на МКГ по сравнению со структурой с $x = 0$.

Следующий этап состоял в уточнении характеристик МКГ для СИД синего и зеленого цвета свечения, учитывающем неоднородность содержания атомов In в КЯ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ в плоскости, параллельной плоскости $p\text{--}n$ -перехода, а также в сравнении результатов моделирования и экспериментальных данных.

По результатам моделирования предложена новая модель, учитывающая влияние неоднородного распределения атомов In, наряду с другими моделями, учитывающими эту неоднородность, например, в виде гауссова [5] или экспоненциального [6] хвоста энергетических состояний в КЯ. Моделирование проводилось

в предположении, что кристалл СИД, имеющий площадь $p\text{--}n$ -перехода S_{Het} , может быть рассмотрен как совокупность параллельно соединенных наноразмерных элементов („нано-СИД“) с различным содержанием In в

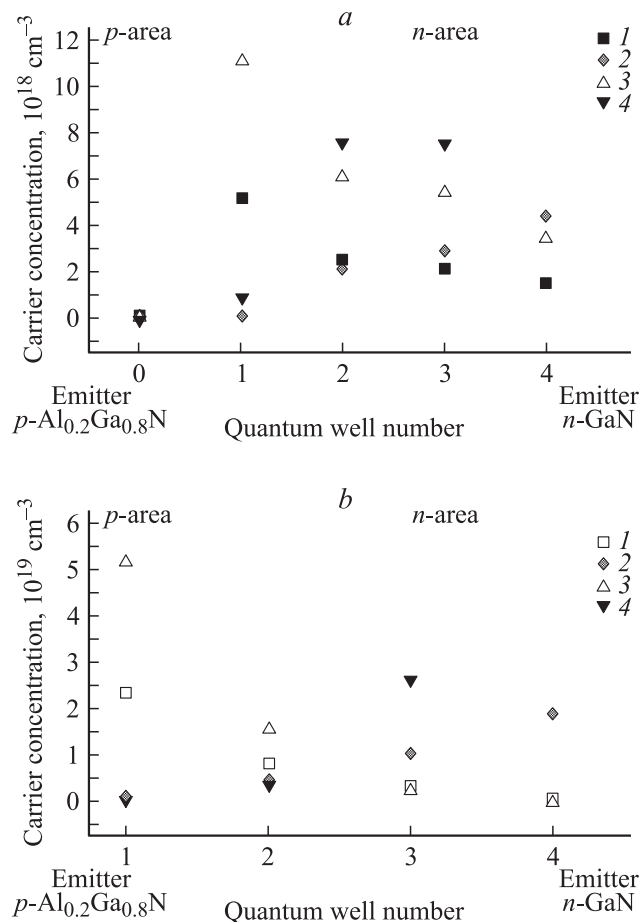


Рис. 2. Распределение концентраций дырок (1, 3) и электронов (2, 4) в структурах на основе AlInGaN с КЯ. Содержание In в КЯ: *a* — $x = 0.05$ (1, 2) и 0.1 (3, 4); *b* — $x = 0.2$ (1, 2) и 0.3 (3, 4).

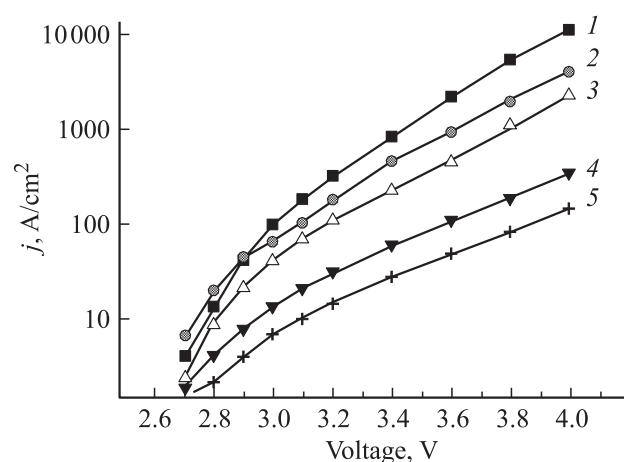


Рис. 3. Моделирование зависимости плотности тока от напряжения для $x = 0.15$ (1), 0.17 (2), 0.20 (3), 0.22 (4), 0.25 (5). $T = 300 \text{ K}$.

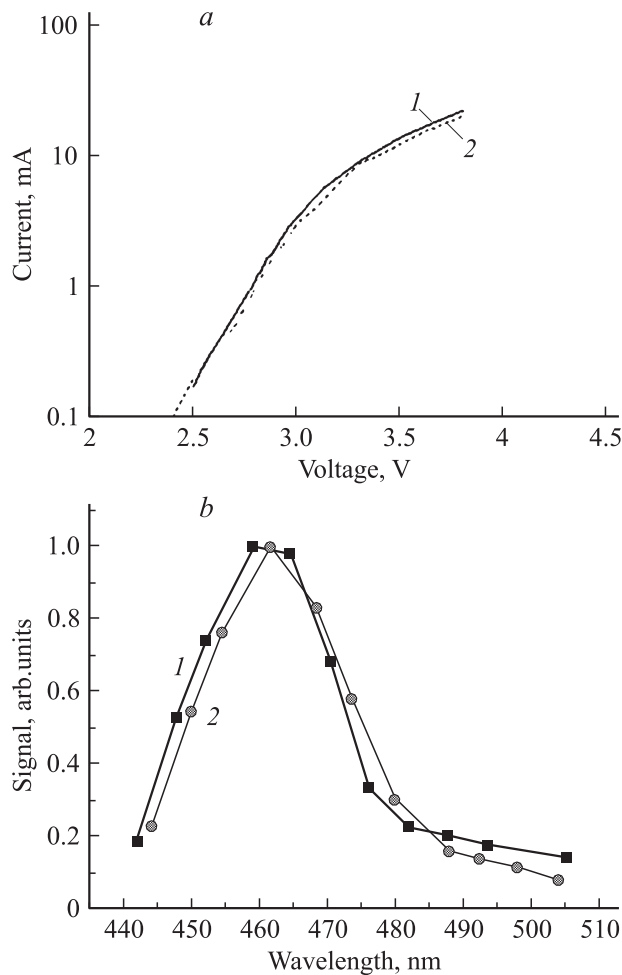


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики (а) и спектры излучения (б) СИД синего свечения. 1 — результаты моделирования, 2 — экспериментальные данные. $T = 300$ К.

МКГ и имеющих площади p – n -перехода $S(x)$. Величины $S(x)/S_{\text{Het}}$ описываются гауссовым распределением.

Зависимости плотности тока от напряжения (ВАХ) для „нано-СИД“ с различным содержанием In представлены на рис. 3. При одинаковом напряжении видно, что плотность тока зависит от содержания In.

Из рис. 4 видно хорошее согласие результатов моделирования и экспериментов, притом что результаты моделирования получены без каких-либо дополнительных (сверх базовых физических моделей) приближений и аппроксимаций. Для сравнения представлены экспериментальные ВАХ, измеренные на СИД типа C460MB290E1000 компании Cree Inc.

По результатам моделирования установлено, что через области с пониженным относительно среднего значения содержания In $x = 0.2$ протекают значительно большие токи, чем через области с повышенным содержанием атомов In. Следовательно, с одной стороны, области, через которые протекают большие токи, „выгорают“, т. е. их излучательная способность уменьшается, а с другой стороны, возможно перераспределение содержания

атомов In в сторону увеличения количества областей с их повышенным содержанием. Это объясняет тенденцию смещения спектров излучения в длинноволновую область при длительной работе СИД.

4. Заключение

Таким образом, разработана методика компьютерного моделирования электрических и излучательных характеристик МКГ $\text{Al}_y\text{In}_x\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ с квантово-размерными ямами, позволяющая учитывать структуру, физические процессы и параметры слоев кристаллов с различным содержанием атомов In и Al. Методика позволяет рассчитывать вольт-амперные характеристики, внешний квантовый выход и спектры излучения в зависимости от плотности прямого тока, учитывать степень неоднородности состава в КЯ и может быть использована при конструировании МКГ для диодов, излучающих в видимой и ультрафиолетовой областях спектра.

Моделирование позволило развить ряд представлений о свойствах МКГ AlInGaN ; установлено влияние неоднородного распределения атомов индия на зависимость коэффициента неидеальности η от плотности тока j . Экспериментальные ВАХ и спектры излучения СИД синего и зеленого цвета свечения, измеренные в настоящей работе в импульсном режиме, исключающем нагрев МКГ, хорошо согласуются с рассчитанными характеристиками, что является подтверждением работоспособности методики компьютерного моделирования.

Предложена модель, описывающая строение многокомпонентных гетероструктур на основе AlInGaN для излучающих диодов.

Список литературы

- [1] V.F. Mymrin, K.A. Bulashevich, N.I. Podolskaya. Phys. Status Solidi C, **2**, 2928 (2005).
- [2] В.П. Сушков, О.И. Рабинович, А.Л. Архипов. В сб.: *Тр. IV Росс.-яп. сем. „Перспективные технологии и оборудование для материаловедения, микро- и наноэлектроники“*, под ред. Л.В. Кожитова и В.К. Карпасюка (М., МГИУ, 2006) с. 311.
- [3] О.И. Рабинович, В.П. Сушков, А.В. Шишов. В сб.: *5-я Всеросс. конф. „Нитриды галлия, индия и алюминия — структуры и приборы“* (СПб., Изд-во Политехн. ун-та, 2007) с. 83.
- [4] D.W. Winston. Faculty of the Graduate School of the University of Colorado, 1996.
<http://www.wemif.pwr.wroc.pl/zpp/laboratoria/labopto/labopto.php>
- [5] P.G. Eliseev, P. Perlin, J. Lee, M. Osinski. Appl. Phys. Lett., **71**, 569 (1997).
- [6] В.Е. Кудряшов, С.С. Мамакин, А.Н. Туркин, А.Э. Юнович, А.Н. Ковалев, Ф.И. Маняхин. ФТП, **35** (7), 861 (2001).

Редактор Л.В. Шаронова

Investigation of peculiarities of heterostructure characteristics and light-emitting diodes based on AlInGaN

O.I. Rabinovich, V.P. Sushkov

State Technological University
„Moscow Institute of Steel and Alloys“
Institute of Physics–Chemistry of Materials,
119049 Moscow, Russia

Abstract Simulation of the AlInGaN heterostructures was carried out for application them to light-emitting diodes. The influence of inhomogeneous indium distribution in nano-light-emitting diodes on whole light-emitting diode performance characteristics is found. The method for simulation describing AlInGaN heterostructures for emitting diodes was developed.