

УДК 538.915

А.В. ВОЙЦЕХОВСКИЙ, Д.И. ГОРН****МЕХАНИЗМЫ РЕКОМБИНАЦИИ В СТРУКТУРАХ InGaN/GaN С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ ПРИ ВЫСОКИХ УРОВНЯХ ВОЗБУЖДЕНИЯ¹**

В работе проведены теоретические исследования рекомбинационных процессов и внутренней квантовой эффективности в светоизлучающих структурах с квантовыми ямами (КЯ) GaN/InGaN при высоких уровнях возбуждения, когда доминирующим каналом безызлучательной рекомбинации становится оже-рекомбинация. Описана методика расчёта скоростей рекомбинации, учитывающая наличие размерного квантования в КЯ, а также двумерную концентрацию носителей в яме

Ключевые слова: широкозонный полупроводник, светодиоды, GaN, InGaN, квантовая яма, оже-рекомбинация

В настоящее время большое количество публикуемых работ посвящено исследованиям способов повышения внутренней квантовой эффективности в гетероструктурах InGaN/GaN, перспективных для изготовления на их основе светодиодов белого свечения. За величину внутренней квантовой эффективности светоизлучающего полупроводникового прибора отвечает соотношение скоростей излучательного и безызлучательных механизмов рекомбинации избыточных носителей заряда, инжектированных в активную область светоизлучающей структуры [1, 2]. На данном этапе развития теории рекомбинационных процессов в рассматриваемой материальной системе для их описания часто используется так называемая ABC-модель [3]. Согласно имеющимся в литературе данным, полученные с помощью данной модели результаты расчётов находятся в хорошем согласии с экспериментом.

Однако исследуемые в настоящее время структуры на основе InGaN/GaN, как правило, являются гетероструктурами с квантовыми ямами. При толщинах узкозонного слоя InGaN порядка единиц нанометров квантование энергии электронов и дырок может оказывать определённое влияние на скорости рекомбинации носителей заряда и, соответственно, на значения внутренней квантовой эффективности. Например, в [4] было экспериментально показано, что размерное квантование энергии электронов и дырок в структуре с пятью квантовыми ямами In_{0,1}Ga_{0,9}N (3 нм) / GaN (12 нм) оказывало существенное влияние на вид спектра фотолюминесценции при достаточно низких температурах.

В рамках данной работы нами проведены расчёты скоростей рекомбинации при излучательном и безызлучательном механизмах при высоких уровнях возбуждения, когда доминирующим рекомбинационным процессом может становиться оже-рекомбинация, а не характерная для высокодефектных соединений GaN рекомбинация Шокли-Рида-Холла. При этом все расчёты скоростей рекомбинации проводились с учётом специфики квантовых ям InGaN/GaN. Полученные данные сравнивались с результатами расчёта с использованием ABC-модели.

Согласно ABC-модели общая скорость рекомбинации описывается следующим выражением [3]:

$$R(n) = \frac{n}{\tau} = A_{nr}n + R_{sp}n^2 + C_a n^3 + f(n),$$

где n – концентрация носителей заряда в активной области гетероструктуры, τ – время жизни, $f(n)$ учитывает «утечку» носителей из ямы, а A_{nr} , R_{sp} , C_a – экспериментально определённые коэффициенты, отвечающие механизмам Шокли-Рида-Холла, излучательной и оже-рекомбинации соответственно. В [3] приведены следующие значения для данных ко-

¹ Данное научное исследование (проект № 8.2.10.2015) выполнено при поддержке Программы «Научный фонд им. Д.И. Менделеева Томского государственного университета» в 2015 г.

эффициентов: $A_{nr} = 10^7 \text{ с}^{-1}$, $R_{sp} = 2 \cdot 10^{-11} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$, $C_a = 1,5 \cdot 10^{-30} \text{ см}^6 \text{ с}^{-1}$. На рисунке 1 представлены рассчитанные в рамках АВС-модели зависимости скоростей рекомбинации в структуре $\text{In}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{N}$ (3 нм) / GaN (12 нм) от концентрации носителей заряда в активной области при температуре 300 К.

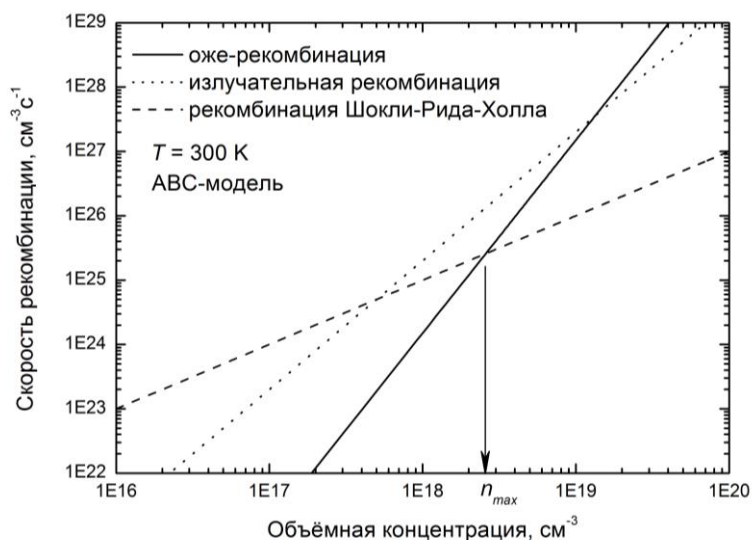


Рис.1. Зависимости скоростей рекомбинации от концентрации носителей заряда в активной области в структуре $\text{In}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{N}$ (3 нм) / GaN (12 нм) при температуре 300 К, рассчитанные в рамках АВС-модели

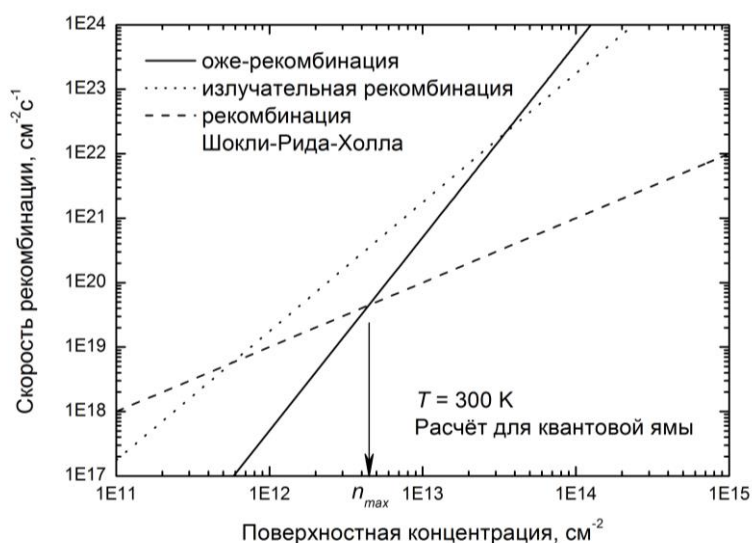


Рис.2. Зависимости скоростей рекомбинации от концентрации носителей заряда в активной области в структуре $\text{In}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{N}$ (3 нм) / GaN (12 нм) при температуре 300 К, рассчитанные в рамках модели, учитывающей специфику квантовой ямы

Рисунок 2 иллюстрирует изменение скоростей различных механизмов рекомбинации при изменении двумерной концентрации носителей заряда в квантовой яме. Расчёт скоростей рекомбинации в квантовой яме производился с использованием выражений, полученных в [5]. В данной работе исследовались рекомбинационные процессы в гетероструктурах II типа. Поскольку соединения InGaN/GaN образуют гетеропереходы I типа, то при расчётах были использованы соответствующие поправочные множители для скоростей рекомбинации.

Как можно увидеть из представленных на рисунках 1 и 2 графиков, соотношение различных механизмов рекомбинации при изменении уровня возбуждения имеет похожий вид в обоих случаях. Более того, пересчёт двумерной концентрации $n_{max} = 4,50 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, при которой квантовая эффективность максимальна, в соответствующую объёмную даёт значение, близкое к полученному в рамках ABC-модели ($2,75 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ [3]). Сказанное позволяет сделать вывод о том, что применённая в рамках данной работы теоретическая модель позволяет производить моделирование рекомбинационных процессов в гетероструктурах InGaN/GaN с квантовыми ямами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Voitsekhovskii A.V., Lilenko Y.V. // *Physica Status Solidi (a)*. – Vol. 67, issue 2. – P. 381-386.
2. Voitsekhovskii A.V., Lilenko Y.V. // *Soviet Physics Semiconductors-USSR*. – Vol. 15, issue 8. – P. 845-847.
3. Zhang M., Bhattacharya P., Singh J., Hinckley J. // *Applied Physics Letters*. – 2009. – Vol. 95. – 201108.
4. Lee D.U., Ryu J.T., You J.H., Kim T.W., Jeon M.H., Yoo K.H., Cho C.Y., Park S.J. // *Thin Solid Films*. – 2011. – Vol. 519, issue 15. – P. 5122-5125.
5. Bazhenov N.L., Zegrya G.G., Mikhaïlova M.P., Moiseev K.D., Smirnov V.A., Solov'eva O.Yu., Yakovlev Yu.P. // *Semiconductors*. – 1997. – Vol. 31, no. 7. – P. 560-562.

*Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия
E-mail: vav43@mail.tsu.ru

Войцеховский Александр Васильевич, д.ф.-м.н., профессор;
Горн Дмитрий Игоревич, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник;

A.V. VOITSEKHOVSKII, D.I. GORN

RADIATIVE AND NONRADIATIVE MECHANISMS OF RECOMBINATION IN InGaN/GaN QUANTUM WELLS UNDER HIGH EXCITATION LEVELS

The paper presents the theoretical analysis of recombination processes in InGaN/GaN quantum wells. The empirical ABC-model is often applied to describe the recombination processes of heterostructures in quantum wells. But it is known that dimensional quantization can lead to a significant influence on the optical characteristics of semiconductor devices. Such influence should be taken into account under numerical modeling of the quantum wells structures characteristics. We developed a theoretical model for description of InGaN/GaN quantum wells and compared the calculation results with the results given by the ABC-model. It is shown that the described theoretical model is in a good agreement with the experimental data and the ABC-model.

Keywords: a wide-gap semiconductor, LED, GaN, InGaN KPT, quantum well, auger-recombination

REFERENCES

1. Voitsekhovskii A.V., Lilenko Y.V. // *Physica Status Solidi (a)*. – Vol. 67, issue 2. – P. 381-386.
2. Voitsekhovskii A.V., Lilenko Y.V. // *Soviet Physics Semiconductors-USSR*. – Vol. 15, issue 8. – P. 845-847.
3. Zhang M., Bhattacharya P., Singh J., Hinckley J. // *Applied Physics Letters*. – 2009. – Vol. 95. – 201108.
4. Lee D.U., Ryu J.T., You J.H., Kim T.W., Jeon M.H., Yoo K.H., Cho C.Y., Park S.J. // *Thin Solid Films*. – 2011. – Vol. 519, issue 15. – P. 5122-5125.
5. Bazhenov N.L., Zegrya G.G., Mikhaïlova M.P., Moiseev K.D., Smirnov V.A., Solov'eva O.Yu., Yakovlev Yu.P. // *Semiconductors*. – 1997. – Vol. 31, no. 7. – P. 560-562.

*National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia
E-mail: vav43@mail.tsu.ru

Alexander V. Voitsekhovskii, Prof., Dr. Sc.;
Dmitry I. Gorn, Senior Researcher, PhD