

УДК 535.3

*Нальгиева М. А., к.ф.-м.н.  
доцент*

*Ингушский государственный университет  
Россия, г. Магас*

*Орцханов М. А., студент магистратуры  
Ингушский государственный университет*

*Россия, г. Магас*

## **ПРОЦЕССЫ РЕКОМБИНАЦИИ И РАЗОГРЕВА НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В НАНОСТРУКТУРАХ С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ**

*Аннотация: В работе исследованы зависимости интенсивности фотолюминесценции в пикосекундном и наносекундном временных диапазонах в квантовых ямах InGaAsSb/InAlGaAsSb с различными составами барьеров квантовых ям. Определены времена захвата носителей заряда в квантовые ямы, времена энергетической релаксации, времена жизни. Показано, что при определенных параметрах в структурах с квантовыми ямами InGaAsSb/InAlGaAsSb наблюдается резонансная оже-рекомбинация.*

*Ключевые слова: фотолюминесценция, квантовые ямы, время захвата, энергетическая релаксация, резонансная оже-рекомбинация.*

*Nalgieva M. A., Ph.D.  
docent*

*Ingush State University  
Russia, Magas*

*Ortskhanov M.A., master student  
Ingush State University  
Russia, Magas*

## **RECOMBINATION AND HEATING OF CHARGE CARRIERS IN NANOSTRUCTURES WITH QUANTUM WELLS**

Abstract: We have studied the dependences of the photoluminescence intensity in the picosecond and nanosecond time ranges in InGaAsSb/InAlGaAsSb quantum wells with different compositions of quantum well barriers. The times of capture of charge carriers into quantum wells, the times of energy relaxation, and the lifetimes are determined. It is shown that resonant Auger recombination is observed in structures with InGaAsSb/InAlGaAsSb quantum wells at certain parameters.

Keywords: photoluminescence, quantum wells, capture time, energy relaxation, resonant Auger recombination.

При конструировании лазеров и оптимизации их характеристик необходимо знать механизмы рекомбинации носителей заряда, в частности характеристики оже-рекомбинации, которая при определенных условиях может становиться резонансной [1].

В работе исследованы динамики фотолюминесценции и определение механизмов рекомбинации носителей заряда в структурах с квантовыми ямами InGaAsSb/InAlGaAsSb двух типов: содержащих и не содержащих индий (In) в твердом растворе, формирующем барьер.

Зависимости интенсивности фотолюминесценции от времени были получены экспериментально методом «up-conversion». Метод основан на преобразовании частоты излучения фотолюминесценции вверх при сложении сигнала фотолюминесценции и возбуждающего излучения с помощью нелинейного кристалла [2].

В качестве источника излучения накачки использовался лазер на неодимовом стекле с синхронизацией мод. Энергия кванта излучения лазера составляла 1,172 эВ, длительность импульса излучения 150 фс, частота повторения импульсов – 100 МГц. Излучение фокусировалось на поверхности структуры в виде пятна диаметром около 10 мкм. Максимальная средняя мощность возбуждающего излучения была равна 30 мВт. Линия задержки, управляемая компьютером, позволяла получить максимальный сдвиг импульсов 10 нс при временном разрешении системы около 0,5 пс. Исследование динамики фотолюминесценции проводилось при температурах 77, 230 и 300 К.

Объектами исследований являлись лазерные структуры с напряженными квантовыми ямами двух типов. В структурах первого типа с квантовыми ямами  $\text{In}_{0,545}\text{Ga}_{0,455}\text{As}_{0,238}\text{Sb}_{0,762}$  барьер был образован четырехкомпонентным твердым раствором  $\text{Al}_{0,35}\text{Ga}_{0,65}\text{As}_{0,03}\text{Sb}_{0,97}$ . Схематичная зонная диаграмма структур первого типа приведена на рис. 1.

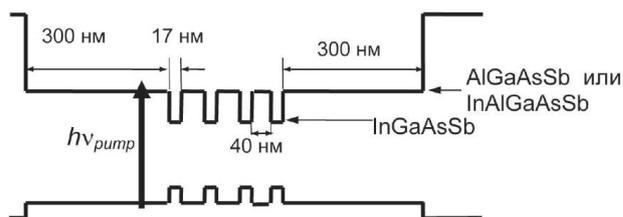


Рис. 1 Схематичные диаграммы исследованных структур

Структуры второго типа с квантовыми ямами

$\text{In}_{0,545}\text{Ga}_{0,455}\text{As}_{0,255}\text{Sb}_{0,745}$  имели барьер из пятикомпонентного твердого раствора  $\text{In}_{0,25}\text{Al}_{10,20}\text{Ga}_{0,55}\text{As}_{0,245}\text{Sb}_{0,755}$ .

Обе структуры содержали по четыре квантовые ямы шириной 17 нм, разделенные туннельно непрозрачными барьерами толщиной 40 нм. На расстоянии 300 нм от квантовых ям с обеих сторон находились ограничивающие слои  $\text{Al}_{0,60}\text{Ga}_{0,40}\text{As}_{0,05}\text{Sb}_{0,95}$ . Ширина запрещенной зоны материала барьера при  $T = 300$  К для четырехкомпонентной структуры составляет около 1,1 эВ, а для пятикомпонентной – около 0,7 эВ, что меньше энергии накачки; таким образом, в данных структурах оптическая накачка осуществлялась в области барьера структур.

Расчет энергетического спектра носителей заряда был проведен в рамках модели Кейна, учитывающей непараболичность зон. Параметры твердых растворов для расчета были взяты из обзорной статьи [3].

Величины ширины запрещенной зоны барьера и квантовой ямы, разрыва дна зоны проводимости  $\Delta E_c$ , разрыва потолка валентной зоны  $\Delta E_v$ , а также энергия основного уровня размерного квантования электронов  $E_{e1}$ , отсчитываемая от дна зоны проводимости КЯ, и энергия основного уровня размерного квантования дырок  $E_{hh1}$ , отсчитываемая от потолка валентной зоны КЯ, для структур первого и второго типов при  $T = 300$  К приведены в таблице.

Энергетические параметры, использованные в расчетах, для структур двух типов

Энергетический параметр	Значение энергии, эВ	
	I тип	II тип
$E_g^{barr}$	1,177	0,713
$E_g^{QW}$	0,296	0,289
$\Delta E_c$	0,728	0,238
$\Delta E_v$	0,153	0,186
$E_{e1}$	0,023	0,023
$E_{hh1}$	0,003	0,003

В структуре I типа с четырехкомпонентным твердым раствором барьера AlGaAsSb глубина квантовой ямы  $\Delta E_c$  больше, чем энергия кванта излучения. В этом случае основным механизмом рекомбинации при достаточно высоком уровне

инжекции электронно-дырочных пар может стать пороговый оже-процесс типа СНСС (С – уровень электрона в зоне проводимости, Н – уровень тяжелой дырки в валентной зоне, обозначение взято из [1]), когда оже-электрон забрасывается в одну из подзон размерного квантования электронов с энергией  $E_{ej}$ . Более того, если при определенной температуре выполняется условие [4]

$$(T) + E_{e1} + E_{hh1} \equiv E_{ej} - E_{e1},$$

то оже-процесс может стать резонансным, что резко увеличивает его вероятность. Стоит также отметить, что беспороговый механизм оже-рекомбинации с забросом электрона в непрерывный спектр идет с меньшей скоростью, чем пороговый механизм оже-рекомбинации, и тем более меньшей, чем резонансный оже-процесс, если таковой может наблюдаться в структуре.

Полученные временные зависимости фотолюминесценции представлены на рис. 2, а. Видно, что уход носителей заряда из барьера и их захват в квантовую яму протекает быстрее, чем рекомбинация носителей заряда в объемном материале без квантовых ям. Характерное

время захвата, определенное по спаду фотолюминесценции со

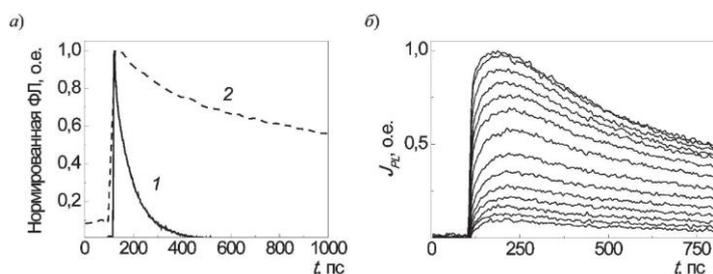


Рис. 2 Зависимости интенсивности ФЛ от времени при T = 300 К

временем в структуре с квантовой ямой, составляет около 70 пс. На рис. 2, б представлены нормированные зависимости от времени интенсивности фотолюминесценции из квантовой ямы в максимуме спектра излучения для структуры второго типа при комнатной температуре. Аналогичный вид имеют эти зависимости для более низких температур, и сходным образом они выглядят для структуры первого типа. При возбуждении неравновесных электронов и дырок в области барьера участок нарастания ФЛ содержит быструю и инерционную части. Процесс быстрого нарастания определяется энергетической релаксацией электронов в КЯ. Наличие инерционного участка можно объяснить особенностями захвата носителей заряда в КЯ из барьера.

Итак, в работе исследованы зависимости интенсивности фотолюминесценции в пикосекундном и наносекундном временных диапазонах в квантовых ямах InGaAsSb/ InAlGaAsSb с различными составами барьеров квантовых ям. Определены времена захвата носителей заряда в квантовые ямы, времена энергетической релаксации, времена жизни, в том числе и время жизни по отношению к резонансной оже-рекомбинации при различных уровнях оптического возбуждения.

Показано, что при определенных параметрах в структурах с квантовыми ямами InGaAsSb/ InAlGaAsSb наблюдается резонансная оже-рекомбинация.

#### Литература

1. Данилов, Л.В. Теоретическое исследование процессов оже-рекомбинации в глубоких квантовых ямах/ Л.В. Данилов, Г.Г. Зегря // Физика и техника полупроводников. – 2008. – Т. 42. – Вып. 5. – С. 566 – 572.
2. Shah, J. Ultrafast luminescence spectroscopy using sum frequency generation/J. Shah // IEEE J. Quantum Electron. – 1988. – Vol. 24. – Iss. 2. – P. 276 – 288.
3. Vurgaftman, I. Band parameters for III–V compound semiconductors and their alloys / I. Vurgaftman, J.R. Meyer, R. Ram-Mohan // J. Appl. Phys. – 2001. – Vol. 89. – No. 11. – P. 5815 – 5875.

4. Винниченко М.Я., Фирсов Д.А., Машко М.О., Штеренгас Л. Рекомбинация и захват электронов в лазерных наноструктурах с квантовыми ямами InGaAsSb/AlGaAsSb// Научнотехнические ведомости СПбГПУ. Физикоматематические науки №3, 2012. Стр.9-15.