

УДК 621.384.3/5

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz, 07.57.Kp,
85.60.Dw, 42.25.Gy, 78.20.Ci

Анализ спектров фотолюминесценции гетероструктур с квантовыми ямами на основе AlGaAs/GaAs

М. Р. Юскаев, Д. А. Пашкеев, В. Е. Гончаров, А. В. Никонов, А. В. Егоров

Разработана методика контроля спектров фотолюминесценции для многослойных гетероэпитаксиальных структур с квантовыми ямами на основе AlGaAs/GaAs, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Проведен расчет уровней размерного квантования в квантовых ямах. Построены тепловые карты распределения значений длины волны и интенсивности в максимуме спектра фотолюминесценции по поверхности эпитаксиальных слоев различного состава. Картографирование позволило оценить однородность распределения состава и толщины эпитаксиальных слоев по поверхности образцов. Проведенное исследование является перспективным для усовершенствования методик входного и межоперационного контроля многослойных гетероэпитаксиальных структур, используемых в технологии изготовления матричных фотоприемных устройств ИК-диапазона.

Ключевые слова: спектр фотолюминесценции, квантовая яма, многослойная структура, AlGaAs, энергетические уровни, тепловая карта поверхности.

Введение

Активное развитие технологии разработки опико-электронных систем, чувствительных в ИК-диапазоне, предъявляет повышенные требования к техническим характеристикам матричных фотоприемных устройств (МФПУ) нового поколения, используемых в таких системах [1]. В последние годы достойной альтернативой классическим полупроводниковым материалам, в частности, тройным растворам кадмий-ртуть-теллур (КТР), являются гетероэпитаксиальные структуры (ГЭС) с квантовыми ямами на основе соединений

AlGaAs/GaAs в силу однородности выходных характеристик структур, меньшего количества дефектов и отработанной технологии эпитаксиального выращивания материалов [2–4].

Методики исследования соединений на основе квантовых ям в настоящее время разработаны не в полной мере [5]. В частности, недостаточное внимание уделено исследованию спектров фотолюминесценции выращиваемых структур. При этом спектр фотолюминесценции является крайне информативным источником информации о эпитаксиальных слоях, входящих в состав сложных многослойных структур: из пиков фотолюминесценции, например, на пониженных температурах, исследователи могут получить информацию об однородности состава выращиваемых слоев [6, 7], что, в свою очередь, влияет на однородность выходных характеристик МФПУ на основе многослойных структур с квантовыми ямами.

В данной работе проведены исследования результатов измерения спектров фотолюминесценции образцов, содержащих слои арсенида галлия и тройного раствора AlGaAs.

Расчет уровней размерного квантования в квантовых ямах AlGaAs/GaAs

Уровни размерного квантования в квантовых ямах на основе соединений AlGaAs/GaAs характеризуются волновыми функциями, рассчитанными из решения уравнения Шредингера [8].

Юскаев Марат Ринатович¹, инженер 2 кат.

Пашкеев Дмитрий Александрович^{1,2}, гл. спец., доцент, к.ф.-м.н.

Гончаров Валерий Евгеньевич^{1,2}, инженер 2 кат., ассистент.

Никонов Антон Викторович^{1,3}, нач. НИЦ, зам. зав. кафедрой, к.ф.-м.н.

Егоров Александр Васильевич¹, ученый секретарь, доцент, к.т.н.

¹ АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

Тел. 8(499) 374-81-30. E-mail: orion@orion-ir.ru

² Московский технологический университет (МИРЭА).

Россия, 119454, Москва, просп. Вернадского, 78.

³ Московский физико-технический институт

(государственный университет).

Россия, 141700, Московская обл., г. Долгопрудный,

Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 4 апреля 2018 г.

© Юскаев М. Р., Пашкеев Д. А., Гончаров В. Е., Никонов А. В., Егоров А. В., 2018

В рамках проведенного исследования для решения уравнения Шредингера использовалась модель прямоугольной потенциальной ямы, имеющей конечное значение глубины (рис. 1). В данной модели решения уравнения Шредингера определяются путем численного расчета. В расчетной модели квантовая яма аппроксимируется монокристаллическим слоем полупроводника с шириной L_z , ограниченными слоями более широкозонного полупроводника (рис. 1). В этом случае на энергетической диаграмме образуются потенциальные ямы, определяемые разрывами в зоне проводимости и валентной зоне.

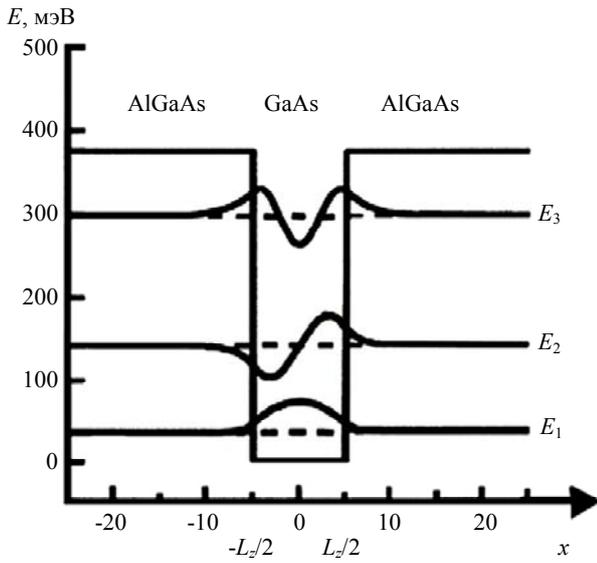


Рис. 1. Значения дискретных уровней энергии в одномерной квантовой яме.

При этом энергетические уровни бесконечной прямоугольной потенциальной ямы определяются из соотношения:

$$E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL_z^2} n^2,$$

где $n = 1, 2, 3, \dots, L_z$. Электрон принимает дискретные значения энергии, при этом энергетическое состояние при $n = 1$ располагается над дном зоны проводимости, и волновые функции электрона не проникают под барьер.

Уравнение Шредингера, характеризующее поведение электрона в одномерной квантовой яме [9, 10], имеет вид:

$$\frac{\hbar}{2m} \frac{d}{dx} \Psi(x) - E\Psi(x) = 0 \text{ при } |x| \geq \frac{L_z}{2};$$

$$-\frac{\hbar^2}{2m_e} \frac{d^2}{dx^2} \Psi(x) - (V_0 - E)\Psi(x) = 0 \text{ при } |x| \leq \frac{L_z}{2}.$$

Решая уравнение Шредингера для значений энергии, не превышающих высоту барьера, удобно ввести величины с размерностью модуля волнового вектора K, k, k_0 , связанные с соответствующими энергиями соотношениями:

$$E = -\frac{\hbar^2 K^2}{2m_e},$$

$$V_0 + E = -\frac{\hbar^2 k^2}{2m_e},$$

$$V_0 = -\frac{\hbar^2 k_0^2}{2m_e}.$$

При этом значение $\frac{2\pi}{k_0}$ является длиной волны де

Бройля, связанной с потенциалом V_0 . С использованием введенных величин, решение уравнения Шредингера для центральной (c), левой (l) и правой (r) областей (см. рис. 1) представляется в следующем виде:

$$\psi_c(x) = A_c e^{ikx} + B_c e^{-ikx} \text{ при } |x| < \frac{L_z}{2};$$

$$\psi_l(x) = A_l e^{iKx} + B_l e^{-iKx} \text{ при } x < -\frac{L_z}{2};$$

$$\psi_r(x) = A_r e^{ik_0x} + B_r e^{-ik_0x} \text{ при } x > \frac{L_z}{2}.$$

Граничные условия при процессе квантования формируются за счёт нормировки волновой функции: её величина не расходится при $x \rightarrow -\infty$, при этом $B_l = 0$. Помимо этого, при $x = L_z/2$ устанавливается связь между коэффициентами A_c и A_l, A_r, B_r, A_c, B_c :

$$A_c = \frac{\kappa + ik}{2ik} \exp\left[\frac{(-\kappa + ik)L_z}{2}\right] A_l,$$

$$A_c = -\frac{\kappa - ik}{2ik} \exp\left[\frac{(-\kappa + ik)L_z}{2}\right] A_l,$$

$$A_r \exp\left(\frac{\kappa L_z}{2}\right) + B_r \exp\left(-\frac{\kappa L_z}{2}\right) =$$

$$= A_c \exp\left(\frac{ikL_z}{2}\right) + B_c \exp\left(-\frac{kL_z}{2}\right),$$

$$A_r \exp\left(\frac{\kappa L_z}{2}\right) - B_r \exp\left(-\frac{\kappa L_z}{2}\right) =$$

$$= \frac{ik}{k} \left[A_c \exp\left(\frac{ikL_z}{2}\right) - B_c \exp\left(-\frac{kL_z}{2}\right) \right].$$

Конечность волновой функции при $x \rightarrow +\infty$ обуславливается соотношением:

$$\left(\frac{\kappa - ikL_z}{\kappa + ikL_z} \right)^2 = \exp(2ikL_z).$$

Волновые функции, являющиеся решениями уравнения Шредингера, определяются точками пересечения отрезков с наклоном $1/k_0$ и синусоидальных полуволн, обозначенных на рис. 2 штрихпунктирными линиями:

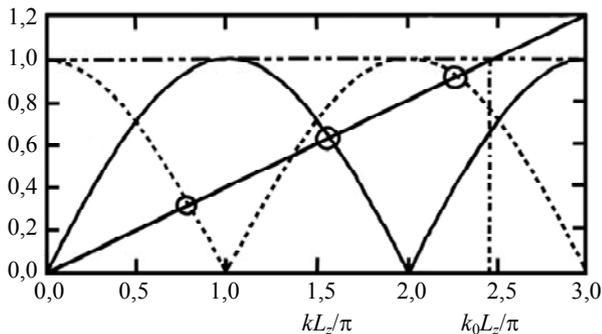


Рис. 2. Расчет уровней размерного квантования.

Волновые функции описываются как:

$$\Psi_{n,c}(x) = A_n \cos(k_n x) \text{ при } |x| < \frac{L_z}{2};$$

$$\Psi_{n,l}(x) = B_n \exp(k_n x) \text{ при } x < -\frac{L_z}{2};$$

$$\Psi_{n,r}(x) = B_n \exp(-k_n x) \text{ при } x > \frac{L_z}{2}.$$

Число энергетических уровней в потенциальной яме рассчитывается из зависимости:

$$N = 1 + \text{int} \left[\frac{\sqrt{2m_e V_0} L_z}{\hbar \pi} \right].$$

Таким образом, в потенциальной яме всегда имеется как минимум один квантоворазмерный уровень вне зависимости от её глубины. Для ямы конечной глубины количество уровней имеет ограничение. Квантовые уровни локализованы, так как вероятность найти электрон увеличивается только вблизи ямы, при этом растёт величина волновых функций.

Методика измерения спектров фотолюминесценции

Измерения и исследования спектров фотолюминесценции проводились для образцов гетеро-

эпитаксиальных структур на основе гетеропары AlGaAs/GaAs, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках арсенида галлия. Для верхнего контактного слоя GaAs проводилось травление с целью возбуждения фотолюминесценции в квантоворазмерной структуре.

На рис. 3 показано изображение границы области травления, полученное на атомно-силовом микроскопе. Квантоворазмерная область в исследуемых образцах представляет собой чередующиеся слои Al_{0,25}Ga_{0,75}As и GaAs, легированные кремнием до концентрации 10¹⁸ см⁻³ (рис. 4).



Рис. 3. Изображение границы области травления, полученное на атомно-силовом микроскопе.

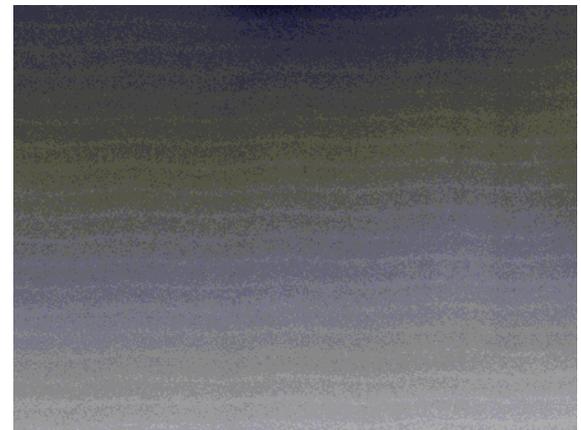


Рис. 4. Изображение гетеропар AlGaAs/GaAs, формирующих квантоворазмерную структуру, полученное на атомно-силовом микроскопе.

В ходе исследования проводилось картографирование спектров фотолюминесценции на измерительном комплексе Nanometrics Vertex. Глубина проникновения возбуждающего излучения с длиной волны 532 нм в структуру составляла порядка 500 нм. По результатам картографирования были получены распределения интенсивности фотолюминесцентного сигнала по полной поверхности измеряемых образцов. Ключевыми характеристиками при измерениях спектров являлись значения пиковой длины волны, пиковой интенсивности фотолюминесценции, интегрального

сигнала и полной ширины на половине максимума (ПШПВ) фотолюминесценции. На основе полученных данных проводился анализ однородности распределения выращенных слоев и формировалось заключение о корректности параметров эпитаксиального роста.

Результаты измерения спектров фотолюминесценции

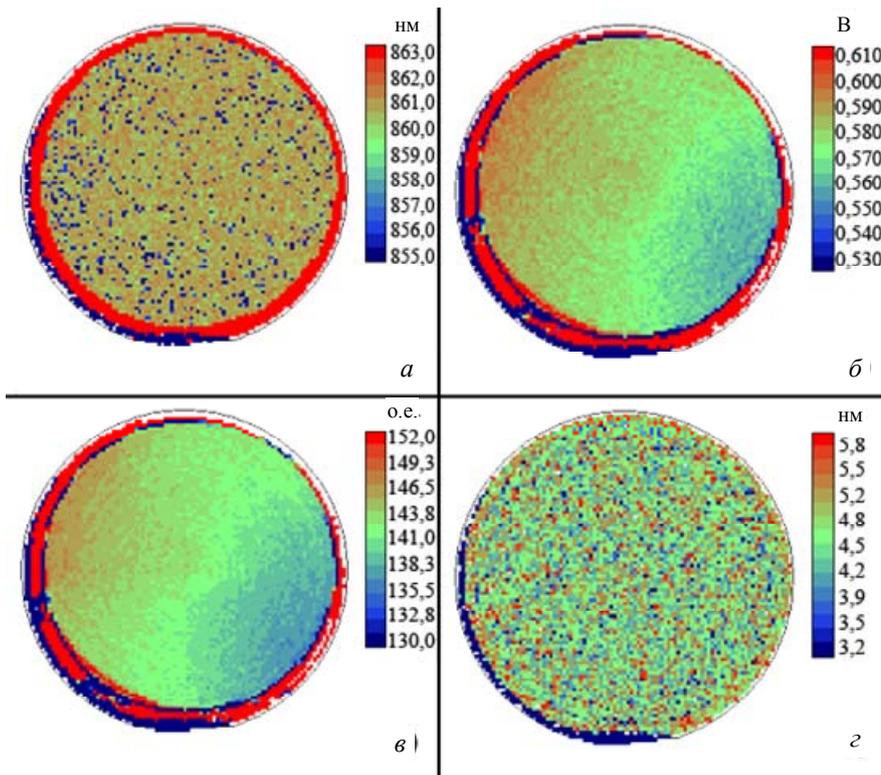


Рис. 5. Тепловые карты распределения параметров спектров фотолюминесценции с области стравленного контактного слоя GaAs (образец A030) при 300K: а – пиковая длина волны; б – пиковая интенсивность; в – интегральный сигнал; г – ПШПВ.

Возбуждающее излучение показывает высокую степень однородности характеристик фотолюминесценции в исследуемом слое арсенида галлия. Разброс длины волны, соответствующей максимуму спектра фотолюминесценции, составляет 6 нм, что говорит о низком содержании дефектов, примесей и лигатур в измеряемом слое. Значения амплитуды интенсивности меняются в пределах 0,55–0,59 В, что свидетельствует о высокой однородности выращенного слоя.

На рис. 6 показан спектр фотолюминесценции, соответствующий центральной точке экспериментального образца. Максимум интенсивности фотолюминесценции приходится на длину волны 860,3 нм, что соответствует ширине запрещенной зоны (прямым Г-переходам) в арсениде галлия. Вблизи максимума наблюдаются дополнительные шумы, возникающие из-за теплового фона. Полуширина на полувысоте составляет 50 нм. Данное значение превышает теоретические расчеты за счёт наличия дополнительных примесей в арсениде галлия в точке измерения.

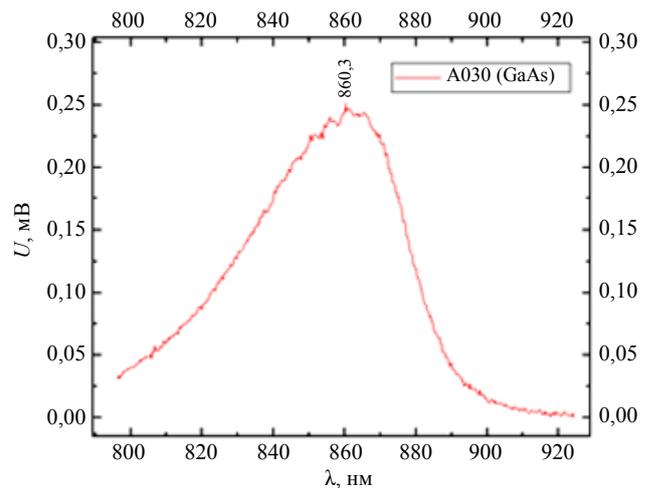


Рис. 6. Спектр фотолюминесценции слоя GaAs.

Проведение картографирования для квантово-размерной гетероэпитаксиальной структуры с гетеропарой AlGaAs/GaAs показало неравномерность выращивания верхнего контактного слоя арсенида галлия. На рис. 7 показано распределе-

В ходе исследования проведено картографирование образцов гетероэпитаксиальных структур, состоящих из слоев GaAs и AlGaAs, последовательно нанесенных на оптически прозрачную подложку. На рис. 5 показаны тепловые карты распределения параметров спектров фотолюминесценции для образца гетероэпитаксиальной структуры с верхним слоем GaAs толщиной 200 нм.

ние длины волны, соответствующей максимуму интенсивности, по поверхности образца. Более светлая область соответствует GaAs, в то время как оставшаяся затемненная область свидетельствует о детектировании слоя AlGaAs. Контроль спектров фотолюминесценции показывает схожую картину в обеих областях: на спектрах присутствуют два пика интенсивности схожей амплитуды. На рисунке 8 представлены спектры фотолюминесценции в светлой и темной областях. Значения длин волн, при которых наблюдаются локальные максимумы спектра, соответствуют энергиям Г-переходов в GaAs (862,7 нм) и AlGaAs (851,4 нм). При этом значение интенсивности фотолюминесцентного излучения, соответствующего Г-переходам в GaAs, незначительно выше по сравнению с интенсивностью излучения в максимуме, соответствующем Г-переходам в AlGaAs. В более темной области, соответствующей слою AlGaAs наблюдается обратная ситуация (в области 850 нм достигается максимум спектра).

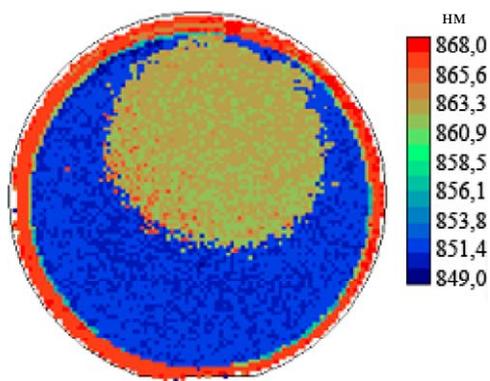


Рис. 7. Тепловая карта распределения пиковой длины волны спектров фотолюминесценции квантоворазмерной гетероэпитаксиальной структуры AlGaAs/GaAs при 300 К.

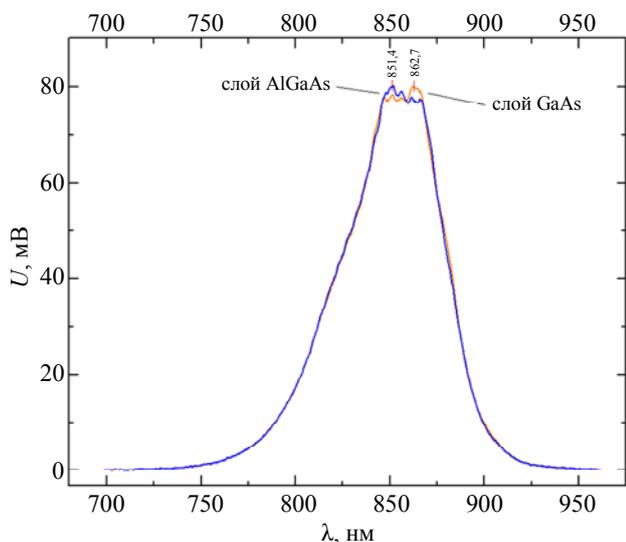


Рис 8. Спектры фотолюминесценции в квантоворазмерной гетероэпитаксиальной структуре AlGaAs/GaAs.

Результаты проведенного исследования показали, что картографирование спектров фотолюминесценции является эффективным инструментом контроля качества полупроводниковых структур. Распределение характеристик спектров по поверхности образца позволяет получить информацию об однородности толщины и состава эпитаксиальных слоев. Из спектров фотолюминесценции можно сделать выводы о химическом составе соединений, оценить наличие примесей и дефектов.

Разработанная методика является перспективной для реализации в технологии производства как гетероэпитаксиальных структур с квантоворазмерной активной областью на основе соединений AlGaAs/GaAs, так и перспективных полупроводниковых соединений материалов групп A3B5 и A2B6, чувствительных в ИК-диапазоне спектра.

Заключение

В работе проведено исследование спектров фотолюминесценции для многослойных гетероэпитаксиальных структур со слоями GaAs и AlGaAs, в том числе квантоворазмерными. Разработанная методика позволяет проводить картографирование поверхности и обеспечивать диагностику качества исследуемых образцов в части одномерности распределения состава материалов в эпитаксиальных слоях, контролировать однородность толщины слоёв.

Реализована модель расчета уровней размерного квантования в квантовых ямах AlGaAs/GaAs.

Проведенные исследования позволяют реализовать методику входного контроля образцов гетероэпитаксиальных структур на основе соединений A3B5, применяемых в технологии изготовления перспективных матричных фотоприемных устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурлаков И. Д., Болтарь К. О., Власов П. В., Лопухин А. А., Торопов А. И., Журавлев К. С., Фадеев В. В. // Прикладная физика. 2016. № 3. С. 58.
2. Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Власов П. В., Лопухин А. А., Чалый В. П., Кацавец Н. И. // Прикладная физика. 2016. № 6. С. 37.
3. Бутягин О. Ф., Кацавец Н. И., Коган И. В., Красовицкий Д. М., Куликов В. Б., Чалый В. П., Дудин А. Л., Чердынченко О. Б. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. № 9. С. 81.
4. Дудин А. Л., Кацавец Н. И., Красовицкий Д. М., Кокин С. В., Чалый В. П., Шуков И. В. // Прикладная физика. 2016. № 6. С. 49.
5. Никонов А. В., Скребнева П. С., Яковлева Н. И. // Прикладная физика. 2017. № 1. С. 31.

6. Сычева А. В., Сысоева С. Г. / V Международная научно-техническая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов, г. Томск, 5–7 декабря 2016 г.: сборник трудов. – Томск: STT, 2016. С. 245–246.
 7. Агекян В. Ф., Ильчук Г. А., Рудь Ю. В., Степанов А. Ю. // Физика твердого тела. 2002. Т. 44. № 12. С. 2117.

8. Davies John H. The Physics of Low-Dimensional Semiconductors: An Introduction. – Cambridge University Press, 2006.
 9. Флюгге З. Задачи по квантовой механике. – Издательство ЛКИ, 2008. Т. 1.
 10. Мандель Л., Вольф Э. Оптическая когерентность и квантовая оптика. – М.: Физматлит, 2000.

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz, 07.57.Kp,
 85.60.Dw, 42.25.Gy, 78.20.Ci

Photoluminescence spectra of heterostructures with AlGaAs/GaAs quantum wells

M. R. Yuskaev¹, D. A. Pashkeev^{1,2}, V. E. Goncharov^{1,2}, A. V. Nikonov^{1,3}, and A. V. Egorov¹

¹Orion R&P Association
 9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia
 E-mail: orion@orion-ir.ru

²Moscow Technological University (MIREA)
 78 Vernadsky av., Moscow, 119454, Russia

³Moscow Institute of Physics and Technology
 9 Institutsky al., Dolgoprudny, Moscow region, 141700, Russia

Received April 4, 2018

Photoluminescence spectra control method was developed adapted to MBE multilayer structures with AlGaAs/GaAs quantum wells. The calculation of quantum-size levels in quantum wells was made. Wavelength and intensity distribution heatmaps of experimental samples with different AlGaAs composition were measured. Mapping made it possible to estimate the composition and thickness distribution homogeneity over the surface of epitaxial layers in different samples. Results of this research are suitable for improvement of entrance and interoperational control.

Keywords: photoluminescence spectra, quantum well, multilayer structure, AlGaAs, energy levels, surface heatmap.

REFERENCES

1. I. D. Burlakov, K. O. Boltar, P. V. Vlasov, A. A. Lopukhin, A. I. Toropov, K. S. Juravlev, and V. V. Fadeev, Prikl. Fiz., No. 3, 58 (2016).
2. K. O. Boltar, I. D. Burlakov, P. V. Vlasov, A. A. Lopukhin, V. P. Chaliy, and N. I. Katsavec, Prikl. Fiz., No. 6, 37 (2016).
3. O. F. Butyagin, N. I. Katsavec, I. V. Kogan, D. M. Krasovitsky, V. B. Kulikov, V. P. Chaliy, A. L. Dudin, and O. B. Cherednichenko, Tech. Phys. Lett. **38** (9), 81 (2012).
4. A. L. Dudin, N. I. Katsavec, D. M. Krasovitsky, S. V. Kokin, V. P. Chaliy, and I. V. Shukov, Prikl. Fiz., No. 6, 49 (2016).
5. A. V. Nikonov, P. S. Skrebneva, and N. I. Iakovleva, Prikl. Fiz., No. 1, 31 (2017).
6. A. V. Sycheva and S. G. Sysoeva, in Proc. V-th International Conference for Young Scientists (Tomsk, 2016), pp. 245–246.
7. V. F. Agekyan, G. A. Ilchuk, U. V. Rud, and A. U. Stepanov, Solid State Physics **44** (12), 2117 (2002).
8. John H. Davies, *The Physics of Low-Dimensional Semiconductors: An Introduction* (Cambridge University Press, 2006).
9. Z. Flugge, *Problems in Quantum Mechanics. Part 1* (LKI, 2008) [in Russian].
10. L. Mandel and E. Volf, *Optical Coherence and Quantum Optics* (Fizmatlit, Moscow, 2000) [in Russian].