

УДК 621.384.3/5

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

Исследование спектров отражения многослойных гетероэпитаксиальных структур на основе КРТ

А. В. Никонов, Н. И. Яковлева

Разработана модель расчета характеристик многослойных гетероэпитаксиальных структур на основе тройных твердых растворов кадмий-ртуть-теллур (КРТ) из спектров отражения. Реализованная модель основана на анализе прохождения излучения через многослойную структуру с учетом как переходов между слоями, так и поглощением излучения каждым эпитаксиальным слоем. Проведен расчет характеристик эпитаксиальных слоев, входящих в состав многослойных структур КРТ, выращенных методами молекулярно-лучевой эпитаксии, жидкофазной эпитаксии и осаждением металлоорганических соединений из газовой фазы. Результаты исследования показали эффективность разработанного метода благодаря расчету состава и толщин эпитаксиальных слоев КРТ с повышенной точностью.

Ключевые слова: коэффициент отражения, многослойная структура, КРТ, матричный метод, градиентный спуск.

Введение

Современная оптоэлектроника инфракрасного диапазона спектра широко использует твердые растворы теллуридов кадмия и ртути (КРТ) в качестве передового фоточувствительного материала [1, 2]. Качество изготавливаемых структур является критическим фактором, влияющим на работоспособность фотоприемного устройства (ФПУ) в целом [3].

Для обеспечения заданного качества фоточувствительных структур необходимо, в частности, отслеживать точность выращивания структуры, контролируя состав и толщины эпитаксиальных слоев. Перед разработчиками фотоприемных устройств остро стоит задача входного контроля и трактовки параметров многослойных гетероэпитаксиальных структур (ГЭС), имеющих более одного рабочего фоточувствительного слоя, спектры пропускания и отражения которых имеют много-

численные особенности, не объяснимые с точки зрения однослойной модели. В настоящий момент существуют методики расчета характеристик многослойных структур КРТ по спектрам пропускания [4–6], но исследования такого типа являются недостаточными без апробации результатов анализом характеристик многослойных структур по спектрам отражения.

Целью данной работы является разработка модели спектра отражения многослойных гетероэпитаксиальных структур на основе тройных соединений кадмий-ртуть-теллур. При этом предполагается, что должна быть решена как прямая задача построения спектра отражения по заданным характеристикам многослойной структуры, так и обратная задача вычисления характеристик структур из экспериментальных спектров отражения.

Расчет спектров ИК-отражения многослойных структур

В современной спектроскопии фоточувствительных материалов, чувствительных в ИК-диапазоне, существует ряд методик, позволяющих оценить особенности прохождения излучения через многослойную структуру [7, 8]. Наибольшей распространенностью пользуется одномерная модель чередующихся слоев [9], последовательно нанесенных на оптически прозрачную подложку различными эпитаксиальными методами. На рис. 1 представлена схема, являющаяся базовой для указанной одномерной модели.

Никонов Антон Викторович^{1,2}, начальник НИЦ, зам. зав. кафедрой, к.ф.-м.н.

Яковлева Наталья Ивановна¹, главный научный сотрудник, к.т.н.

¹ АО «НПО «Орион».

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

Тел. +7(499) 374-81-30. E-mail: orion@orion-ir.ru

² Московский физико-технический институт

(государственный университет).

Россия, 141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 11 декабря 2017 г.

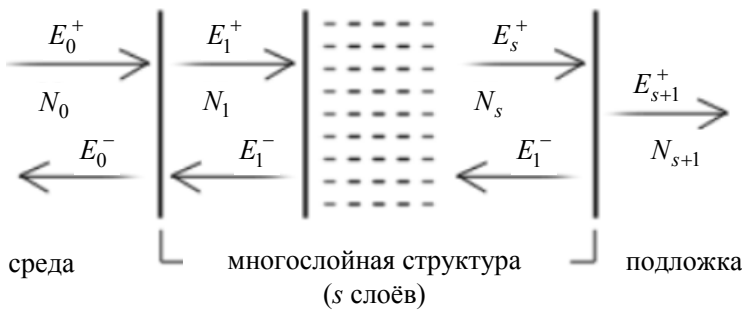


Рис. 1. Схема прохождения излучения через многослойную структуру.

При этом в рамках данной модели устанавливается связь между амплитудами поля падающего (E_0^+), отраженного (E_0^-) и прошедшего (E_{s+1}^+) через многослойную структуру излучений:

$$\begin{pmatrix} E_0^+ \\ E_0^- \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} s+1 \\ \prod_{j=1} t_j \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} s \\ \prod_{j=1} M_j \end{bmatrix} \times \begin{vmatrix} 1 & r_{s+1} \\ r_{s+1} & 1 \end{vmatrix} \times \begin{pmatrix} E_{s+1}^+ \\ 0 \end{pmatrix},$$

где M_j – характеристическая матрица, описывающая поглощение излучения в j -м слое:

$$M_j = \begin{vmatrix} \exp(i\delta_j) & r_j \exp(-i\delta_j) \\ r_j \exp(i\delta_j) & \exp(-i\delta_j) \end{vmatrix},$$

$$\delta_j = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) N_j d_j = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) (n_j - ik_j) d_j$$

где N_j – комплексный показатель преломления, t_j и r_j – коэффициенты Френеля, d_j – толщина j -го слоя.

В рамках данной модели коэффициент отражения от многослойной структуры на заданной длине волны излучения рассчитывается для интенсивности излучения в следующем виде:

$$R = \left| \frac{E_0^-}{E_0^+} \right|^2.$$

Разработанная методика расчета коэффициента отражения многослойных структур является сравнительной: проводится сравнение и минимизация среднеквадратичного отклонения (СКО) экспериментально измеренного спектра отражения и рассчитанного спектра, сформированного из моделирования коэффициента отражения структуры на заданном пакете волновых чисел. Минимизация СКО проводится путем реализации метода пакетного градиентного спуска [10]. Для реализации

методики определения параметров многослойных гетероэпитаксиальных структур на основе КРТ и нахождения функции наилучшего приближения экспериментальной и теоретически рассчитанной характеристик разработано специальное программное обеспечение.

Расчет характеристик многослойных ГЭС КРТ по спектрам отражения

Экспериментальные характеристики спектров отражения снимались путем сканирования образцов КРТ на ИК-спектрометре в диапазоне волновых чисел $\nu = 500 \div 5000 \text{ см}^{-1}$. В измеренных спектрах отчетливо различаются две области: коротковолновая область $\nu > \nu_n$, в которой ИК-излучение сильно поглощается, и длинноволновая область $\nu < \nu_n$, в которой слоистая структура КРТ поглощает мало. Здесь ν_n – значение волнового числа, при котором спектр отражения меняет форму: происходит переход от интерференционной картины поглощения излучения слоистой структурой к поглощению излучения подложкой. Так как в структуре КРТ присутствуют дополнительные буферные и варизонные слои, интерференционная картина носит сложный характер, поскольку включает в себя информацию о влиянии каждого слоя, входящего в такую структуру. На рис. 2 представлен пример экспериментально измеренного спектра отражения многослойной ГЭС КРТ.

В разработанной методике учитывается ряд параметров эпитаксиальных слоев на основе КРТ, входящих в состав многослойных структур:

- количество слоев, включая буферные и варизонные;
- состав эпитаксиальных слоев;
- толщины эпитаксиальных слоев, в том числе буферных и варизонных;
- зависимости коэффициента поглощения и показателя преломления от состава эпитаксиальных слоев, температуры измерений и длины волны излучения.

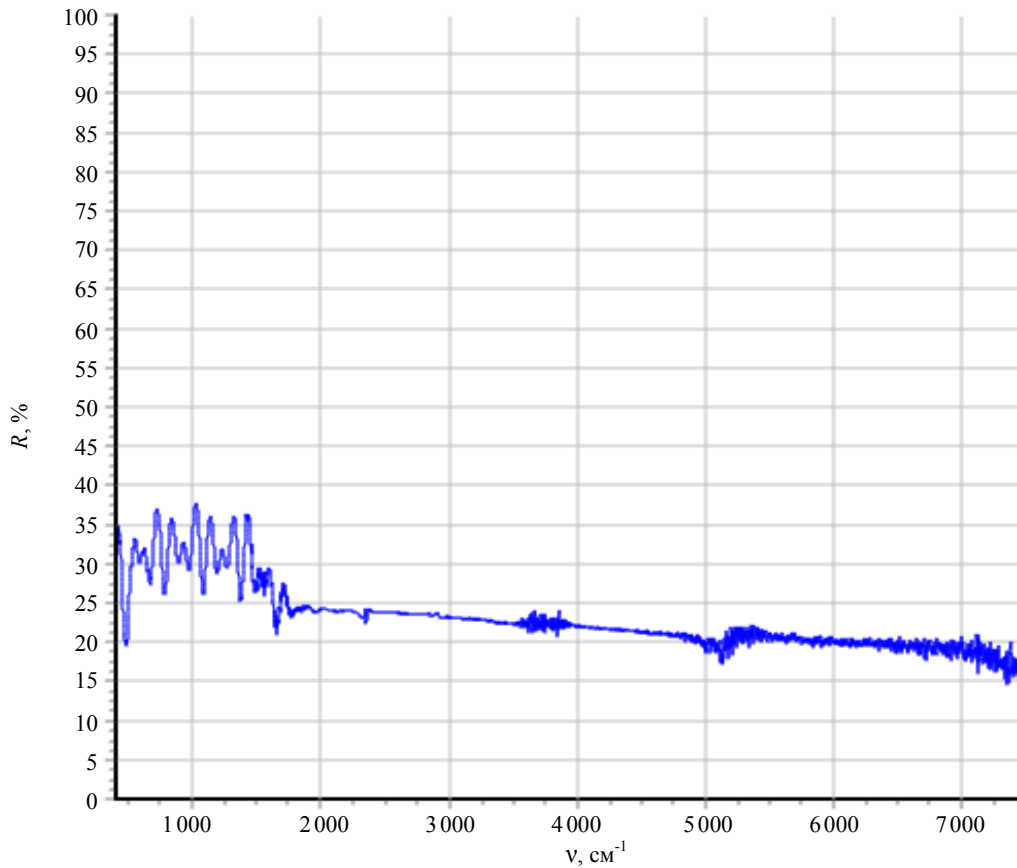


Рис. 2. Спектр отражения многослойной гетероэпитаксиальной структуры на основе КРТ.

Проведены также исследования спектров отражения ГЭС КРТ, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). На рис. 3 показано сравнение экспериментального спектра отражения и модели спектра отражения, построенной по паспортным данным, многослойной ГЭС КРТ, выращенной методом МЛЭ. Расхождение двух спектров обусловлено либо наличием дополнительного тонкого слоя, не учтенного в паспорте на образец, либо неточностью измерения толщины

одного из варизонных слоев в процессе роста структуры. Для представленного образца применен метод пакетного градиентного спуска, по которому установлены значения характеристик структуры (толщина и состав рабочего фоточувствительного слоя и варизонных слоев). Результат реализации метода представлен на рис. 4. Результаты расчета характеристик многослойной структуры дополнительно приведены в таблице.

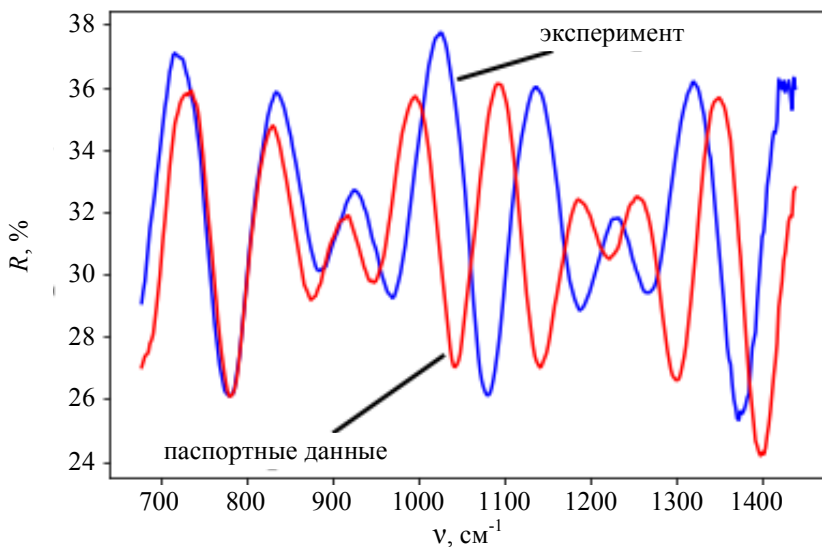


Рис. 3. Сравнение экспериментального спектра отражения и модели спектра отражения, построенной по паспортным данным, многослойной ГЭС КРТ, выращенной методом МЛЭ.

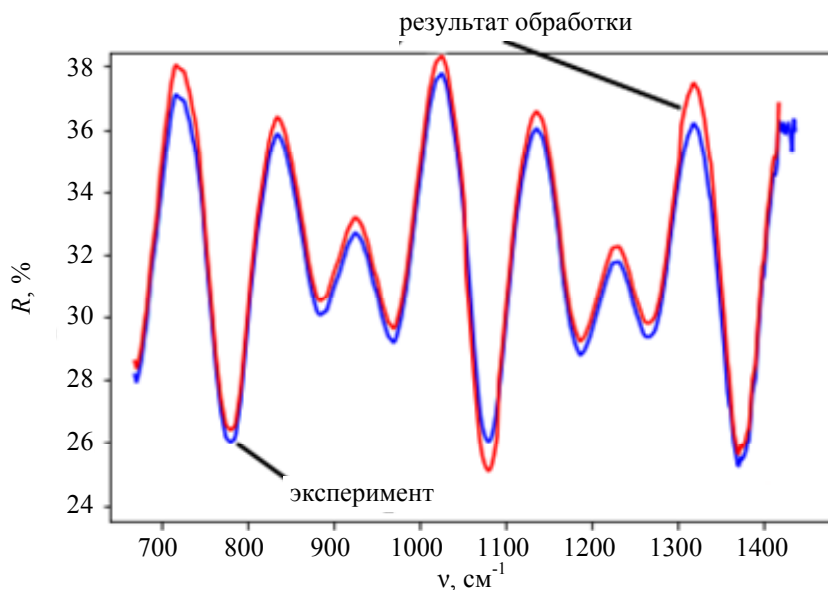


Рис. 4. Сравнение экспериментального спектра отражения и результата применения метода пакетного градиентного спуска, для многослойной ГЭС КРТ, выращенной методом МЛЭ.

Таблица

Результаты расчета характеристик многослойной структуры

Образец: 3 КРТ 121107 А	Паспортные данные	Результаты расчета
Толщина верхнего варизонного слоя, мкм	0,48	0,52
Толщина рабочего слоя, мкм	8,96	8,72
Состав рабочего слоя, мол.дол.	0,222	0,227
Толщина нижнего варизонного слоя, мкм	1,75	1,79
Толщина буферного слоя CdTe, мкм	5,8	5,8
СКО от экспериментальных данных, %	24,1 %	0,9 %

Представленные результаты показывают уточненные значения состава и толщины рабочего фоточувствительного слоя КРТ, а именно, 0,227 мол. дол. и 8,72 мкм. Значения дополняют и уточняют паспортные данные на исследуемый образец, позволяя получить значения характеристик структуры с повышенной точностью.

Аналогичные исследования проводились для структур, выращенных методами жидкофазной эпитаксии и осаждением металлоорганических соединений из газовой фазы. По результатам обработки собранных статистических данных отмечается, что экспериментальные и паспортные данные на характеристики многослойных структур на основе КРТ незначительно отличаются. Кроме того, результаты расчета характеристик эпитаксиальных слоев КРТ позволяют уточнить толщины и состав слоев с более высокой точностью по сравнению с заявленными данными.

Заключение

В работе проведено исследование спектров отражения многослойных гетероэпитаксиальных структур на основе КРТ, чувствительных в ИК-

диапазоне. Разработаны модель спектра отражения многослойной структуры и сопровождающее программное обеспечение, позволяющие решать как задачу моделирования оптических характеристик многослойных структур, так и расчет характеристик эпитаксиальных слоев КРТ, входящих в состав многослойных структур, по результатам анализа экспериментально измеренных спектров отражения образцов многослойных структур.

Разработанная методика может играть важную роль в входном и межоперационном контроле образцов эпитаксиальных структур на основе КРТ, так как позволяет рассчитывать состав и толщины эпитаксиальных слоев с повышенной точностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурлаков И. Д., Дирочка А. И., Корнеева М. Д., Пономаренко В. П., Филачев А. М. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 5. С. 509.
2. Предеин А. В., Сидоров Ю. Г., Сабина И. В., Васильев В. В., Сидоров Г. Ю., Марчишин И. В. // Автометрия. 2013. Т. 49. № 5. С. 78.
3. Яковлева Н. И., Болтарь К. О., Никонов А. В. // Прикладная физика. 2017. № 3. С. 58.
4. Никонов А. В., Яковлева Н. И. // Прикладная физика. 2017. № 5. С. 64.

5. Rogalski A. // Reports on Progress in Physics. 2005. Vol. 68. P. 2267.
6. Болтарь К. О., Яковлева Н. И., Каиуба А. С., Удалова А. Г. // Прикладная физика. 2008. № 1. С. 26.
7. Никонов А. В., Болтарь К. О., Яковлева Н. И. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 4. С. 500.
8. Корнеева М. Д., Сало В. В., Никонов А. В., Болтарь К. О., Яковлева Н. И. // Прикладная физика. 2013. № 6. С. 48.
9. Болтарь К. О., Яковлева Н. И., Никонов А. В. // Прикладная физика. 2011. № 5. С. 100.
10. Максимов Ю. А. Алгоритмы линейного и дискретного программирования. – М.: МИФИ, 1980.

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

Refraction spectra of MCT multilayer heterostructures

A. V. Nikonov^{1,2} and N. I. Iakovleva¹

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

² Moscow Institute of Physics and Technology
9 Institutsky al., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia

Received December 11, 2017

Obtained was the model of layers parameters calculation on the base of the refraction spectra for MCT multilayer heterostructures. Optical transitions between epitaxial layers and absorption in each layer were taken into account in the calculations. The inverse problem of thickness and composition calculating for layers from multilayer structure was solved. The main aims of interest were the MCT experimental samples grown by molecular-beam epitaxy and alternative methods of liquid-phase epitaxy and metalorganic chemical vapour deposition. Developed method shows high efficiency for calculating thickness and composition of photosensitive layers due to refined characteristics of multilayer MCT structures.

Keywords: reflection coefficient, multilayer structure, MCT, matrix method, gradient descent.

REFERENCES

1. I. D. Burlakov, A. I. Dirochka, M. D. Korneeva, V. P. Ponomarenko, and A. M. Filachev, Usp. Prikl. Fiz. **2** (5), 509 (2014).
2. A. V. Predein, Y. G. Sidorov, I. V. Sabinina, V. V. Vasilyev, G. Y. Sidorov, and I. V. Marchishin, Autometry **49** (5), 78 (2013).
3. N. I. Iakovleva, K. O. Boltar, and A. V. Nikonov, Prikl. Fiz., No. 3, 58 (2017).
4. A. V. Nikonov and N. I. Iakovleva, Prikl. Fiz., No. 5, 64 (2017).
5. A. Rogalski, Reports on Progress in Physics **68**, 2267 (2005).
6. K. O. Boltar, N. I. Iakovleva, A. S. Kashuba, and A. G. Udalova, Prikl. Fiz., No. 1, 26 (2008).
7. A. V. Nikonov, K. O. Boltar, and N. I. Iakovleva, Usp. Prikl. Fiz. **1** (4), 500 (2013).
8. M. D. Korneeva, V. V. Salo, A. V. Nikonov, K. O. Boltar, and N. I. Iakovleva, Prikl. Fiz., No. 6, 48 (2013).
9. K. O. Boltar, N. I. Iakovleva, and A. V. Nikonov, Prikl. Fiz., No. 5, 100 (2011).
10. Y. A. Maksimov, *Algorithms of linear and discrete programming* (MEPhI, Moscow, 1980) [in Russian].