

УДК 621.384.3
EDN: BBESIN

PACS: 85.30.-z



Спектроскопия полупроводниковых гетероэпитаксиальных структур на основе InGaAs для разработки фотоприемных устройств ближнего ИК-диапазона

А. М. Косякова, В. С. Ковшов, М. О. Можяева

Представлены исследования и анализ образцов с гетероэпитаксиальной структурой на основе твердого раствора InGaAs, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке GaAs. Определены состав и толщины слоев структуры методами фотолюминесцентной спектроскопии при комнатной температуре и растровой электронной микроскопии соответственно. Измерены спектры пропускания на ИК Фурье-спектрометре. Разработана аналитическая модель спектральных характеристик исследуемых структур. Решением обратной задачи методом подгонки определены конструктивные параметры структуры и состав активного слоя InGaAs. Сравнительный анализ экспериментальных и теоретических данных показал небольшой разброс значений для толщины (менее 65 нм) и состава поглощающего слоя (менее 0,04). Показана корректность и быстрое действие разработанного неразрушающего метода характеристики полупроводниковых структур.

Ключевые слова: InGaAs, фотолюминесценция, ИК-спектроскопия, МФПУ, коротковолновый ИК-диапазон, эпитаксиальные гетероструктуры.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-2-35-43

Введение

В настоящее время на мировом рынке инфракрасных фотоприемных устройств (ИК ФПУ) наблюдается высокий темп роста спроса

на фотодетекторы, чувствительные в ближнем ИК-диапазоне (SWIR). Это обусловлено прежде всего преимуществами SWIR фотодетекторов, имеющих высокую чувствительность, большое разрешение, низкие массогабаритные характеристики за счет отсутствия микрокриогенной системы, а также низкое энергопотребление [1]. Благодаря возможности наблюдения объектов в свете ночного неба, Луны, звезд и других источников излучения, а также наблюдения сквозь дым и туман SWIR-камеры находят широкое применение в военной и оборонной технике, медицине и науке, а также в сфере безопасности.

Классической структурой для разработки ФПУ ближнего ИК-диапазона спектра является полупроводниковая структура с фоточувствительным слоем $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. ФПУ на основе тройного соединения $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$, обладающего высокой степенью согласованно-

Косякова Анастасия Михайловна^{1,2}, инженер 2 кат., аспирант.

E-mail usova.am@phys.tech

Ковшов Владимир Сергеевич^{1,2}, инженер 1 кат., аспирант.

Можяева Мария Олеговна¹, инженер 2 кат.

¹ АО «НПО «Орион».

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

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет).

Россия, 141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 23.03.2023

После доработки 30.03.2023

Принята к публикации 6.04.2023

© Косякова А. М., Ковшов В. С., Можяева М. О., 2023

сти по постоянной кристаллической решетки с подложкой InP, детектирует излучение в диапазоне длин волн 0,9–1,7 мкм. Увеличение доли InAs до 80 % в твердом растворе позволяет расширить спектральный диапазон чувствительности вплоть до 2,5 мкм. Однако применение подложки InP в таком случае уже нецелесообразно в виду высокой концентрации дефектов, возникающих из-за рассогласованности кристаллических решеток. Альтернативным вариантом являются подложки GaAs в связи с лучшей согласованностью, а также с более низкой стоимостью, высокой механической прочностью и доступностью пластин размером до 6 дюймов [1].

Для отработки технологических процессов эпитаксиального роста на установке молекулярно-лучевой эпитаксии в настоящей работе проводились исследования полупроводниковых структур на основе InGaAs, выращенных на подложке GaAs. Характеризация структур проводилась методами фотолюминесцентной

и ИК-спектроскопии, а также растровой электронной микроскопии.

Объект исследования

В процессе отработки технологии эпитаксиального роста были проведены исследования порядка 40 полупроводниковых гетероструктур различной архитектуры, часть из которых представлены в таблице 1.

Тройной твердый раствор $\text{In}_{0,7}\text{Ga}_{0,3}\text{As}$, область поглощения которого покрывает 2 мкм, имеет рассогласованность по постоянной решетки с подложкой GaAs порядка 5 %. Для достижения более высокой степени согласованности в работе были предложены два типа структур с различными буферными слоями. Исследование состава поглощающего слоя были проведены для структур типа 1.1 и 2.1, исследование состава буферных слоев – для структур типа 1.2 и 2.2 (см. табл. 1).

Таблица 1

Классификация исследуемых структур

№ п/п	Структура	Образцы
1	1.1 – InGaAs – поглощающий слой толщиной ~ 1 мкм – InAlAs – варизонный слой толщиной ~ 1 мкм – GaAs – буферный слой толщиной ~ 300 нм – AlGaAs – буферный слой толщиной ~ 300 нм – GaAs – подложка с ориентацией (100)	A626 – A630
	1.2 – InGaAs – поглощающий слой толщиной ~ 7 нм – InAlAs – варизонный слой толщиной ~ 1 мкм – GaAs – буферный слой толщиной ~ 300 нм – AlGaAs – буферный слой толщиной ~ 300 нм – GaAs – подложка с ориентацией (100)	A631 – A633
2	2.1 – InGaAs – поглощающий слой толщиной ~ 1 мкм – InAlAs – буферный слой толщиной ~ 300 нм – InAlAs – варизонный слой толщиной ~ 1 мкм – AlAs – буферный слой толщиной ~ 100 нм – GaAs – подложка с ориентацией (100)	A641 – A644, A661 – A666
	2.2 – InGaAs – поглощающий слой толщиной ~ 7 нм – InAlAs – буферный слой толщиной ~ 300 нм – InAlAs – варизонный слой толщиной ~ 1 мкм – AlAs – буферный слой толщиной ~ 100 нм – GaAs – подложка с ориентацией (100)	A639, A640, A659, A660

Исследование структур методом ИК Фурье-спектроскопии

ИК-спектроскопия широко применяется для оценки качества выращенной эпитакси-

альной гетероструктуры. Данный метод исследования, основанный на явлении интерференции, является неразрушающим, бесконтактным способом получения информации о структурных и оптических свойствах полу-

проводниковых структур. Решение обратной задачи путем анализа особенностей спектра пропускания позволяет определить состав тройных или четверных твердых растворов, толщины слоев, а также некоторые оптические характеристики материалов.

Моделирование спектров пропускания проводилось с использованием классического метода матриц переноса [3], который учитывает поглощение в каждом слое и многократные переотражения от границ раздела соседних слоев. Данный метод позволяет определить отношение мощности прошедшего сквозь структуру излучения к мощности излучения, падающего на структуру (коэффициент пропускания), а также отношение мощности отраженного от структуры излучения к мощности излучения, падающего на структуру (коэффициент отражения). Варьируемыми параметрами являются показатель преломления и коэффициент поглощения материалов, зависящие от состава соединений, и толщины слоев.

Показатель преломления полупроводниковых материалов группы A_3B_5 , к которым относятся соединения GaAs, InGaAs, AlAs и InAlAs, рассчитывался методом, описанным ранее в работе [8]. Метод учитывает вклады прямых оптических переходов в точках Γ , L и X зоны Бриллюэна, а также вклады непрямых $\Gamma-L$ и $\Gamma-X$ переходов. Расчет показателя преломления для тройных соединений проводился с предположением линейной зависимости энергетических параметров, указанных в работе [2], от состава. Для расчета коэффициента поглощения применялась модель Андерсона [4], учитывающая прямые межзонные переходы между подуровнями валентной зоны и зоны проводимости, правило Урбаха [4, 5], а также эффект Бурштейна-Мосса [3].

В данной работе измерения спектров пропускания проводились на ИК Фурье-спектрометре при комнатной температуре. На рис. 1 представлены измеренные и рассчитанные спектры пропускания исследуемых структур.

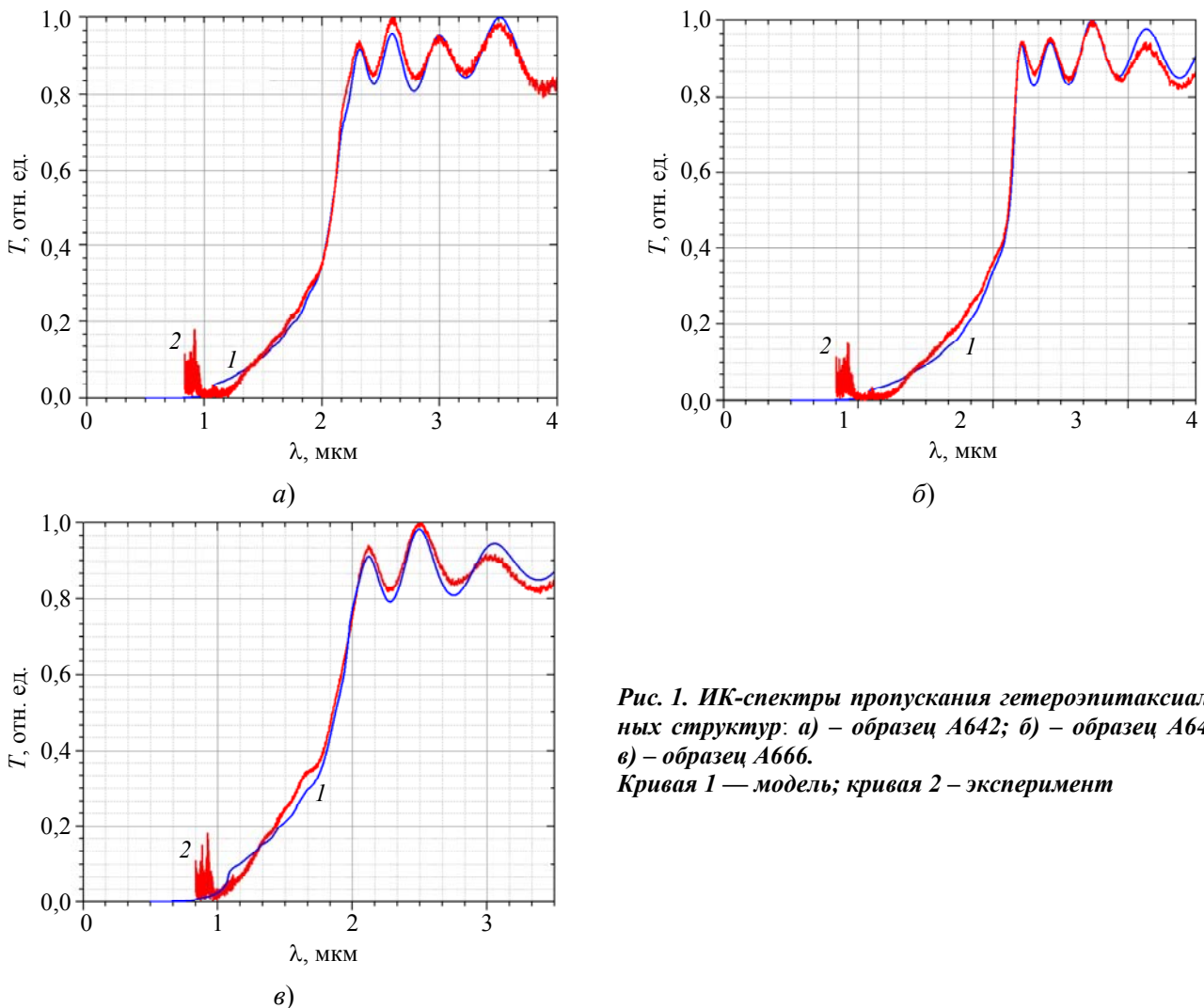


Рис. 1. ИК-спектры пропускания гетерозитаксиальных структур: а) – образец А642; б) – образец А643; в) – образец А666. Кривая 1 — модель; кривая 2 – эксперимент

Решение обратной задачи с применением подгонки параметров позволяет определить состав поглощающего слоя и толщины слоев гетероэпитаксиальной структуры. Состав определяется по краю поглощения (пропускания) в области 2 мкм (см. рис. 1),

а толщина слоев – по интерференционной картине спектра пропускания. В таблице 2 представлены значения исследуемых параметров структуры, полученные по результатам моделирования, для образцов А642, А643 и А666.

Таблица 2

Параметр\Образец	А642	А643	А666
Состав x поглощающего слоя $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	0,70	0,70	0,64
Толщины слоев структуры:			
– InGaAs	1430 нм	1650 нм	1060 нм
– InAlAs + InAlAs (варизонный)	1410 нм	1400 нм	920 нм
– AlAs	100 нм	100 нм	75 нм

Альтернативными методами определения состава поглощающего слоя и толщины слоев гетероэпитаксиальной структуры являются метод фотолюминесцентной спектроскопии и метод растровой электронной микроскопии соответственно. Далее будет представлено сравнение результатов данных методов с вышеописанным методом ИК-спектроскопии.

Исследование структур методом фотолюминесцентной спектроскопии

Для подтверждения работоспособности метода определения состава образца с помощью спектров пропускания, в качестве альтернативы использован метод фотолюминесцентной спектроскопии. Метод применяется для неразрушающего контроля технологических параметров изготовления полупроводниковых структур, в частности состава. Метод заключается в анализе рекомбинационного излучения полупроводниковых структур, возбуждаемого в результате облучения материала монохроматическим лазерным излучением с энергией, превышающей его ширину запрещенной зоны.

Измерение спектров фотолюминесценции проводилось при комнатной температуре

(300К). Для возбуждения фотолюминесценции использовались два лазера длиной волны 266 нм и 532 нм, мощностью 2 мВт и 30 мВт соответственно. Детектирование сигнала фотолюминесценции осуществлялось с помощью детекторов на кремнии с чувствительностью в диапазоне ~ 350–1100 нм и InGaAs с чувствительностью в области ~ 900–1700 нм на выходе монохроматора. Для спектрального разложения использовались дифракционные решетки 150 и 300 штрихов/мм.

Изображение спектров нескольких образцов приведены на рисунках 2–4. Для подавления шумов был использован метод быстрого дискретного преобразования Фурье (БПФ) и обозначен сплошной красной линией.

Спектры фотолюминесценции показывают зависимость спектральной интенсивности люминесценции от энергии излучаемого фотона или длины волны излучения. Для межзонной люминесценции при прямых переходах эта зависимость имеет максимум при энергии, несколько большей энергии, соответствующей краю поглощения. При прямых межзонных переходах величина E_g в легированных полупроводниках соответствует энергии максимума полосы излучения.

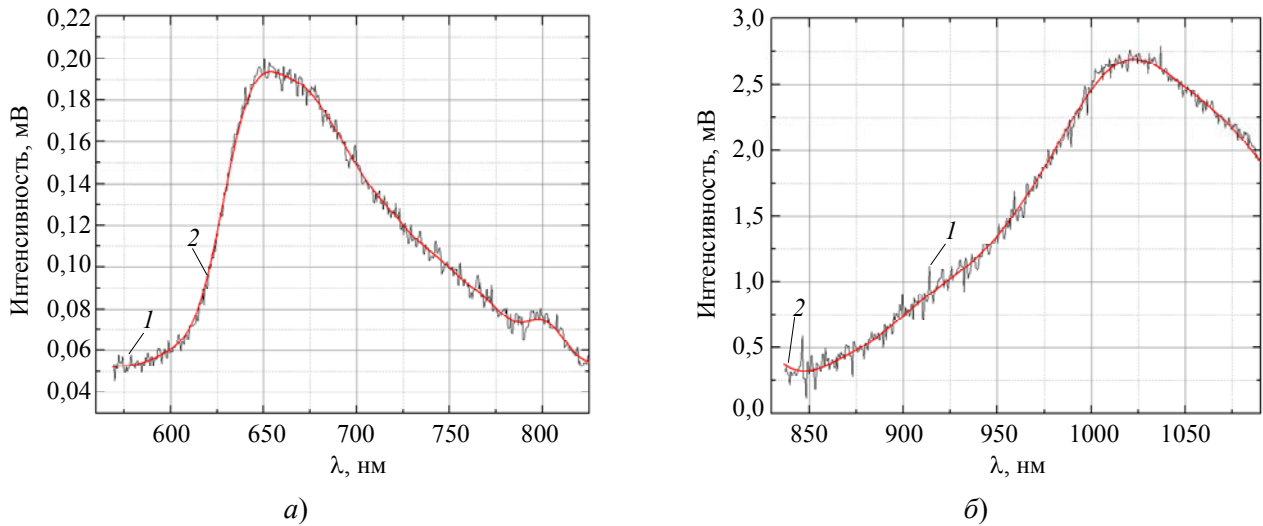


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции образца A626: а) – спектр InAlAs; б) – спектр InGaAs. Кривая 1 – спектр ФЛ; кривая 2 – сглаживание

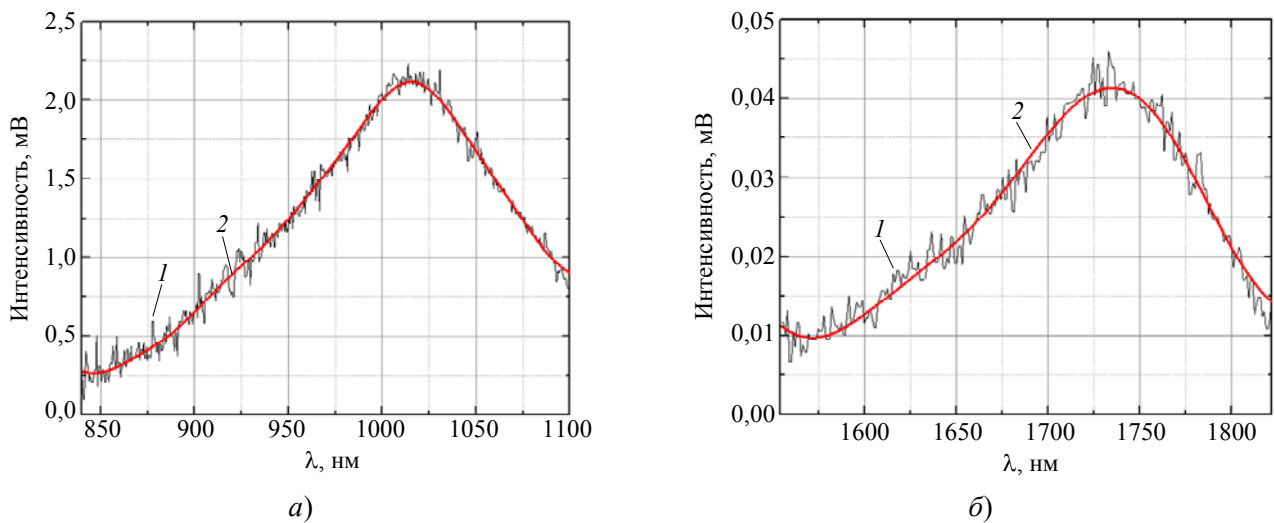


Рис. 3. Спектры фотолюминесценции образца A639: а) – спектр InAlAs; б) – спектр InGaAs. Кривая 1 – спектр ФЛ; кривая 2 – сглаживание

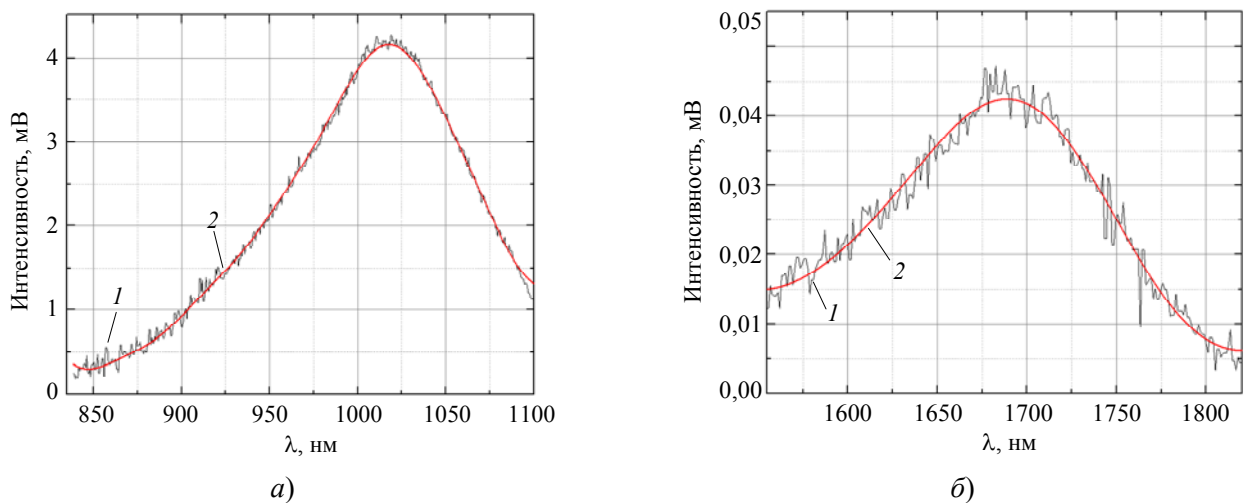


Рис. 4. Спектры фотолюминесценции образца A640: а) – спектр InAlAs; б) – спектр InGaAs. Кривая 1 – спектр ФЛ; кривая 2 – сглаживание

Таким образом, по результатам исследования получены данные значения x в твердых растворах $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ и $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Ширина запрещенной зоны рассчитана по формулам из работ [8, 9]. Характеристики некоторых образцов приведены в таблице 3. Для образцов A631 и A665 не удалось определить состав AlAs из-за низкого качества спектра. К недостаткам метода можно отнести ограниченность проникающей способности, поэтому возможно анализировать только приповерхностные слои полупроводника до 1 мкм.

Таблица 3

№ п/п	Образец	Состав x	
		$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	$\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$
1.1	A626	0,857	0,659
1.2	A631	0,493	–
2.1	A665	0,470	–
2.2	A639	0,471	0,446
2.2	A640	0,432	0,390

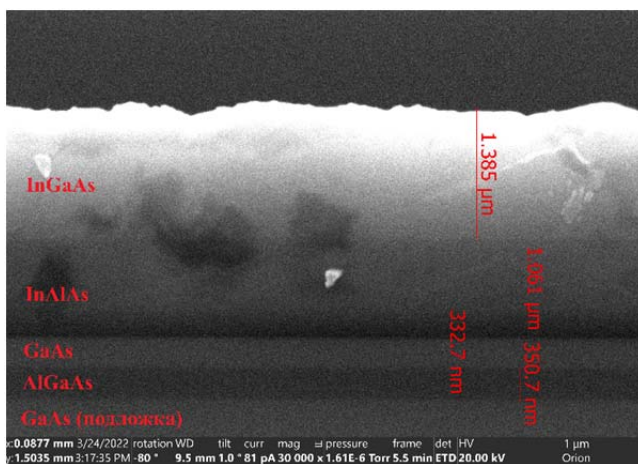
Определение толщины слоев структуры методом растровой электронной микроскопии

Метод растровой электронной микроскопии (РЭМ) позволяет проводить исследования поверхности образца с высоким пространственным разрешением для получения информации о морфологии исследуемой по-

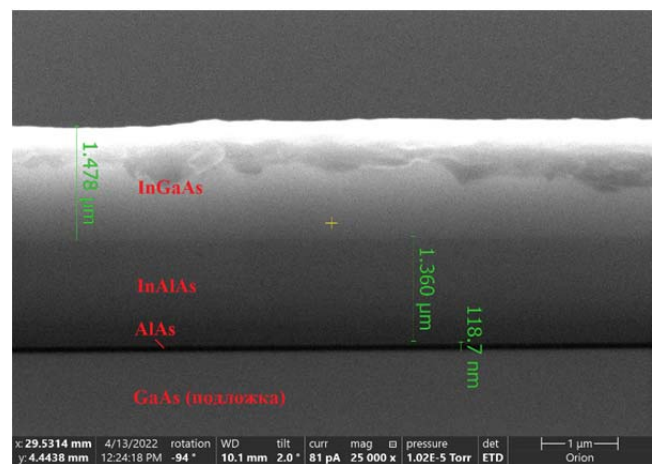
верхности, химическом (элементном) составе (при наличии соответствующих детекторов), состоянии атомов поверхностных слоев, форме и размерах дислокаций, а также толщине образцов.

Основным принципом данного метода является взаимодействие сфокусированного электронного пучка с исследуемым материалом, которое приводит к выходу из образца электронов и квантов электромагнитного излучения. Основными сигналами, которые регистрируются в растровом электронном микроскопе, являются вторичные электроны, отраженные электроны и характеристическое рентгеновское излучение. Для исследования морфологии поверхности образца чаще всего используют режим детектирования вторичных электронов. Вторичные электроны, обладающие небольшой энергией порядка 50 эВ, выходят из глубины 10 нм, причем размер области выхода в плоскости изображения невелик в связи с незначительным рассеянием пучка первичных электронов в этой плоскости. Поэтому данный режим позволяет получить изображение с максимальным разрешением.

В настоящей работе исследования проводились на сканирующем электронном микроскопе с разрешающей способностью до 3 нм при высоком вакууме. На рис. 5 представлены изображения поперечного сечения исследуемых образцов A627 и A642 с измеренными значениями толщин слоев.



а)



б)

Рис. 5. РЭМ-изображения структуры поперечного сечения исследуемых образцов: а) – образец A627; б) – образец A642

Композиционный контраст, связанный с изменением химического состава исследуемой поверхности торца, позволяет с высокой точностью определить толщины слоев структуры. Эпитаксиальные слои исследуемых структур обладают высокой степенью однородности по толщине. Вариация толщины поверхностного слоя обусловлены шероховатостью поверхности структуры. Кроме того, его толщина на РЭМ-изображении может отличаться от действительной из-за наличия краевого эффекта. Топографический (краевой) эффект, возникающий у поверхности структуры, обусловлен увеличением выхода вторичных электронов вблизи угла образца. В результате повышается яркость изображения и поверхность выглядит более светлой.

Результаты исследования

Ниже в таблицах приведены сравнительные характеристики исследуемых образцов. В таблице 4 сравниваются толщины слоев, полученные двумя методами измерения: методом решения обратной задачи на основе исследований ИК Фурье-спектроскопии и растровой электронной микроскопии. Разница результатов этих методов составляет менее 65 нм, что подтверждает корректность разработанной модели.

Результаты исследования состава x для варизонного слоя $In_xGa_{1-x}As$ нескольких образцов представлены в таблице 5. Наибольшее расхождение между данными, полученными с помощью фотолюминесцентной спектроскопии и моделирования спектров пропускания, составляет 0,04 мольной доли вещества.

Таблица 4

Образец \ Метод исследования	Толщина слоев, нм	
	ИК-спектроскопия	Растровая электронная микроскопия
A627		
– InGaAs	1180	1120
– InAlAs (варизонный)	1000	1032
– GaAs	320	344
– AlGaAs	315	323,8
A642		
– InGaAs	1430	1478
– InAlAs + InAlAs (варизонный)	1410	1360
– AlAs	100	118,7
A666		
– InGaAs	1060	1106
– InAlAs + InAlAs (варизонный)	920	895,7
– AlAs	75	70,2
A639		
– InGaAs	7	–
– InAlAs + InAlAs (варизонный)	1230	1295
– AlAs	100	98,9

Таблица 5

Образец \ Метод исследования	ИК спектроскопия	ФЛ спектроскопия
A642		
– $In_xGa_{1-x}As$	0,70	0,66
A643		
– $In_xGa_{1-x}As$	0,70	0,66
A666		
– $In_xGa_{1-x}As$	0,64	0,63

Заключение

В данной работе был произведен анализ эпитаксиальных структур с фоточувствительным слоем $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Исследования были проведены с помощью трех методов, позволяющих характеризовать параметры структуры. Используя метод инфракрасной Фурье-спектроскопии, были измерены спектры пропускания, а значения толщин и составов были определены с помощью решения обратной задачи.

Подтверждена корректность модели посредством сравнительного анализа образцов методами фотолюминесцентной спектроскопии и растровой электронной микроскопии. Значения толщин, полученных методом моделирования спектров пропускания, отличались от данных, полученных с помощью растрового электронного микроскопа в абсолютных значениях не более чем на 65 нм.

Для измерения составов образцов был выбран альтернативный метод – фотолюминесцентная спектроскопия. Разница между энергиями запрещенной зоны составляет ~ 60 мэВ, что дает разность в составе до 0,04 мольных долей.

Кроме того, измерения, проведенные на спектрометре, по скорости и простоте превос-

ходили исследования с помощью растрового электронного микроскопа, что является безусловным преимуществом разработанного метода характеристики гетероэпитаксиальных структур.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фомин Ф. В. Современное состояние и перспективы развития зарубежных ИК-систем (аналитический обзор) / Под ред. Вилковой Н. Н. – М.: ЗАО «МНИТИ», 2018.
2. Бурлаков И. Д., Гринченко Л. Я., Дирочка А. И., Залетаев Н. Б. / Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 2. С. 131–162.
3. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1973.
4. Adachi S. / Physical Review B. 1987. Vol. 35. № 14. P. 7454.
5. Anderson W. W. / Infrared Physics. 1980. Vol. 20. № 6. P. 363.
6. Schaefer S. T., Sao S., Webster P. T., Kosireddy R. R., Johnson S. R. / Journal of Applied Physics. 2020. Vol. 127. № 16. P. 165705.
7. Bhowmick M., Xi H., Ullrich B. / Materials. 2021. Vol. 14. № 7. P. 1639.
8. Vurgaftman I., Meyer J. R., Ram-Mohan L. R. / Journal of Applied Physics. 2001. Vol. 89. № 11. P. 5815–5876.
9. Nahory R. E., Pollack M. A., Johnston W. D., Barns R. L. / Appl. Phys. Lett. 1978. Vol. 33. P. 659. DOI: 10.1063/1.90455

PACS: 85.30.-z

Spectroscopy of semiconductor heteroepitaxial structures based on InGaAs for the development of NIR photodetectors

A. M. Kosyakova^{1,2}, V. S. Kovshov^{1,2} and M. O. Mozhaeva¹

¹ Orion R&P Association, JSC
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia

² Moscow Institute of Physics and Technology
9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia

Received 23.03.2023; revised 30.03.2023; accepted 6.04.2023

Studies and analysis of samples with heteroepitaxial structure based on InGaAs solid solution grown by molecular beam epitaxy on a GaAs substrate are presented. The composition and thickness of the layers of the structure were determined by photoluminescent spectroscopy at room temperature and scanning electron microscopy, respectively. Transmission spectra were measured on an IR Fourier spectrometer. An analytical model of the spectral characteristics of

the studied structures has been developed. By solving the inverse problem, the structural parameters of the structure and the composition of the InGaAs active layer were determined by the fitting method. A comparative analysis of experimental and theoretical data showed a small spread of values for the thickness (less than 65 nm) and the composition of the absorbing layer (less than 0.04). The correctness and speed of the developed method of characterization of semiconductor structures without plate destruction is shown.

Keywords: InGaAs, photoluminescence, IR spectroscopy, matrix photodetector, short-wave IR range, epitaxial heterostructures.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-2-35-43

REFERENCES

1. Fomin F. V., *Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya zarubezhnykh IK-sistem (analiticheskii ob-zor)* / Pod red. Vilkovoi N. N., Moscow, ZAO «MNITI», 2018 [in Russian].
 2. Burlakov I. D., Grinchenko L. Y., Dirochka A. I. and Zaletaev N. B., *Usp. Prikl. Fiz.* **2** (2), 131–162 (2014) [in Russian].
 3. Born M. and Vol'f E., *Osnovy optiki*, Moscow, Nauka, 1973.
 4. Adachi S., *Physical Review B* **35** (14), 7454 (1987).
 5. Anderson W. W., *Infrared Physics* **20** (6), 363 (1980).
 6. Schaefer S. T., Sao S., Webster P. T., Kosireddy R. R. and Johnson S. R., *Journal of Applied Physics* **127** (16), 165705 (2020).
 7. Bhowmick M., Xi H. and Ullrich B., *Materials* **14** (7), 1639 (2021).
 8. Vurgaftman I., Meyer J. R. and Ram-Mohan L. R., *Journal of Applied Physics* **89** (11), 5815–5876 (2001).
 9. Nahory R. E., Pollack M. A., Johnston W. D. and Barns R. L., *Appl. Phys. Lett.* **33**, 659 (1978).
- DOI: 10.1063/1.90455