

06;07;08;15

Прецизионная калибровка толщин и состава слоев эпитаксиальных гетероструктур AlGaAs с вертикальным оптическим микрорезонатором

© С.А. Блохин¹, А.Г. Кузьменков^{2,1}, А.Г. Гладышев^{2,1},
А.П. Васильев^{2,1}, А.А. Блохин^{3,1}, М.А. Бобров¹,
Н.А. Малеев¹, В.М. Устинов¹

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

² Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур РАН, Санкт-Петербург

³ Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
E-mail: blokh@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 5 августа 2014 г.

Исследована возможность определения фактических толщин и составов отдельных слоев гетероструктур AlGaAs с вертикальным микрорезонатором при совместном использовании методов спектроскопии оптического отражения и рентгеновской дифракции. Показано, что самосогласованное решение двух возникающих обратных задач при использовании специальной конструкции тестовой гетероструктуры частично снимает проблему неопределенности решения и повышает абсолютную точность определения параметров отдельных эпитаксиальных слоев.

Гетероструктуры AlGaAs с вертикальным оптическим микрорезонатором широко используются в различного рода оптоэлектронных приборах, в том числе: в вертикально-излучающих лазерах (vertical-cavity surface-emitting lasers) [1], резонансных светодиодах (resonance cavity light emitting diodes) [2], поверхностно-излучающих лазерах с вертикальным внешним резонатором [3], полупроводниковых отражателях с насыщающимся поглотителем (semiconductor saturable absorber mirrors) [4], резонансных фотодетекторах (resonant-cavity-enhanced photo detectors) [5]. Отличительной особенностью таких приборов является высокая чувствительность рабочих характеристик к оптическим характеристикам (максимальная величина коэффициента отражения,

спектральная зависимость коэффициента отражения и т.д.) распределенных брэгговских отражателей (РБО, distributed Bragg reflector — DBR). Более того, для ряда практических применений (квантовые стандарты частоты, газовые датчики) предъявляются и повышенные требования к обеспечению точного значения резонансной длины волны оптического микрорезонатора. Наиболее распространенный метод неразрушающей диагностики структурных параметров эпитаксиальных гетероструктур в системе AlGaAs с помощью спектроскопии фотолюминесценции применим лишь для оценки скорости роста квантово-размерных слоев и состава прямозонных материалов AlGaAs (содержание Al менее 43%) [6], а большой разброс коэффициента прогиба (bowing parameter) композиционной зависимости ширины запрещенной зоны тройного соединения AlGaAs ухудшает точность определения абсолютного значения состава [7]. Возможности традиционного для технологии молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) метода *in situ* контроля скоростей роста и состава соединений мышьяка по осцилляциям интенсивности дифракционной картины для зеркально-отраженного пучка электронов ограничены эффектом „перевсплеска“ скорости роста (из-за нестабильности температуры эффузионной ячейки при открытии заслонки), неоднородностью потоков атомов элементов III группы по площади подложки и стабилизацией шероховатости поверхности [8]. Большую гибкость предоставляет спектроскопия оптического отражения толстых слоев или многослойных гетероструктур AlGaAs, однако точность метода зависит от адекватности используемой модели показателей преломления синтезированных слоев [9]. В качестве оперативной методики калибровки толщин и составов слоев гетероструктур AlGaAs с вертикальным оптическим микрорезонатором высокоразрешающая рентгеновская дифрактометрия не нашла широкого применения вследствие большой ресурсоемкости метода [10] и в основном применяется для качественной оценки структурного совершенства [11,12] благодаря ее сильной чувствительности к шероховатости и резкости интерфейсов на гетерограницах, уровню легирования и напряжения в слоях. Следует отметить, что диагностика многослойных гетероструктур с РБО по результатам измерения спектров отражения или рентгенодифракционных кривых относится к классу обратных задач с несколькими независимыми параметрами и связана с преодолением ряда специфических проблем, характерных для решения некорректных обратных задач [13]. В этой связи развитие эффективных экспериментальных методов определения фактических толщин

и составов отдельных слоев гетероструктур AlGaAs с вертикальным оптическим микрорезонатором является крайне важной и актуальной задачей.

В качестве объекта исследований были выбраны два типа гетероструктур AlGaAs с вертикальным микрорезонатором спектрального диапазона $1.3\ \mu\text{m}$. Исследуемые образцы были выращены на подложках GaAs с ориентацией (100) методом МПЭ в установке Riber Compact 21 с твердотельным источником мышьяка и *in situ* системой дифракции быстрых электронов на отражение. Эпитаксиальная структура I типа содержит 12 пар четвертьволновых слоев GaAs/Al_xGa_{1-x}As ($x \sim 92\%$) и оптический резонатор GaAs толщиной $\sim \lambda/2$, тогда как гетероструктура II типа состоит из 12 пар четвертьволновых слоев GaAs/AlAs, оптического резонатора Al_xGa_{1-x}As ($x \sim 15\%$) толщиной $\sim 3\lambda$ и завершающего слоя GaAs толщиной 10 nm. Для анализа морфологии и структурного качества синтезированных гетероструктур использовался метод растровой электронной микроскопии (РЭМ) на базе микроскопа CamScan Seies 4 DV100. Спектры отражения измерялись в геометрии нормального падения света, а в качестве источника света использовалось излучение галогеновой лампы, пропущенное через монохроматор. Рентгенодифракционные исследования проводились на высокоразрешающем дифрактометре PANalytical X'Pert PRO MRD (CuK_α1-излучение, мощность 1.8 kW) в режиме сканирования ($\Omega-2\Omega$) в рефлекс (004).

На рис. 1 представлены РЭМ-изображения синтезированных структур в геометрии поперечного сечения (110). Исследуемые структуры демонстрируют достаточно высокую планарность эпитаксиальных слоев и резкость гетероинтерфейсов, а поверхность не имеет ярко выраженного рельефа, что крайне важно для интерпретации дифракционных кривых.

На рис. 2, а представлены экспериментальный спектр отражения для эпитаксиальной гетероструктуры I типа и результаты оптимизационной процедуры моделирования отражения от слоистой структуры в рамках метода матриц переноса [14]. С точки зрения оптических свойств такая гетероструктура представляет собой низкодобротный вертикальный оптический микрорезонатор Фабри–Перо, где толщина резонатора задает положение резонансной длины волны λ_0 , а полупроводниковый РБО формирует полосу отражения зеркала. Однако спектры оптического отражения слоистых структур определяются в первую очередь оптическими толщинами слоев (т.е. произведение фактической толщины

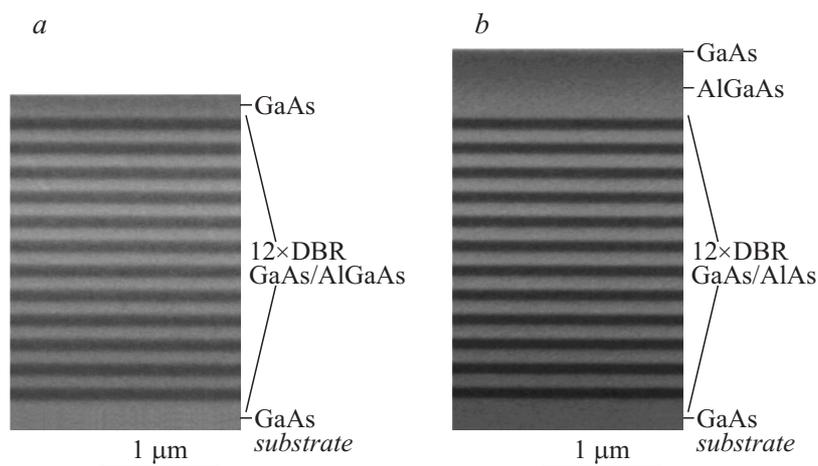


Рис. 1. Микрофотографии поперечного скола эпитаксиальных гетероструктур AlGaAs с вертикальным микрорезонатором спектрального диапазона $1.3 \mu\text{m}$ I (a) и II (b) типа, полученные с помощью растрового электронного микроскопа.

слоя на показатель преломления), поэтому при использовании твердого раствора AlGaAs в тестовой структуре возможно несколько решений обратной задачи. Так, в результате оптимизационной процедуры можно найти, как минимум, два варианта конструкций гетероструктуры, отличающиеся на 3% по составу слоя AlGaAs и на $\sim 4 \text{ nm}$ в толщинах слоев GaAs и AlGaAs, но при этом обеспечивающие оптимальное совпадение расчетных спектров отражения с экспериментальными данными.

С точки зрения рентгеновской дифракции гетероструктура I типа фактически представляет собой сверхрешетку $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.92}\text{Ga}_{0.08}\text{As}$, где нулевой пик среднего несоответствия F_0 отвечает за средний состав сверхрешетки, а расстояние между соседними сателлитами — за период. Согласно результатам численного моделирования дифракционных кривых в рамках динамической теории дифракции рентгеновских лучей [15], хотя период и средний состав сверхрешетки в обоих вариантах конструкции гетероструктуры идентичны, соотношение между толщинами слоев сверхрешетки влияет на интенсивности сателлитов высокого порядка (рис. 2, b), что потенциально позволяет определять

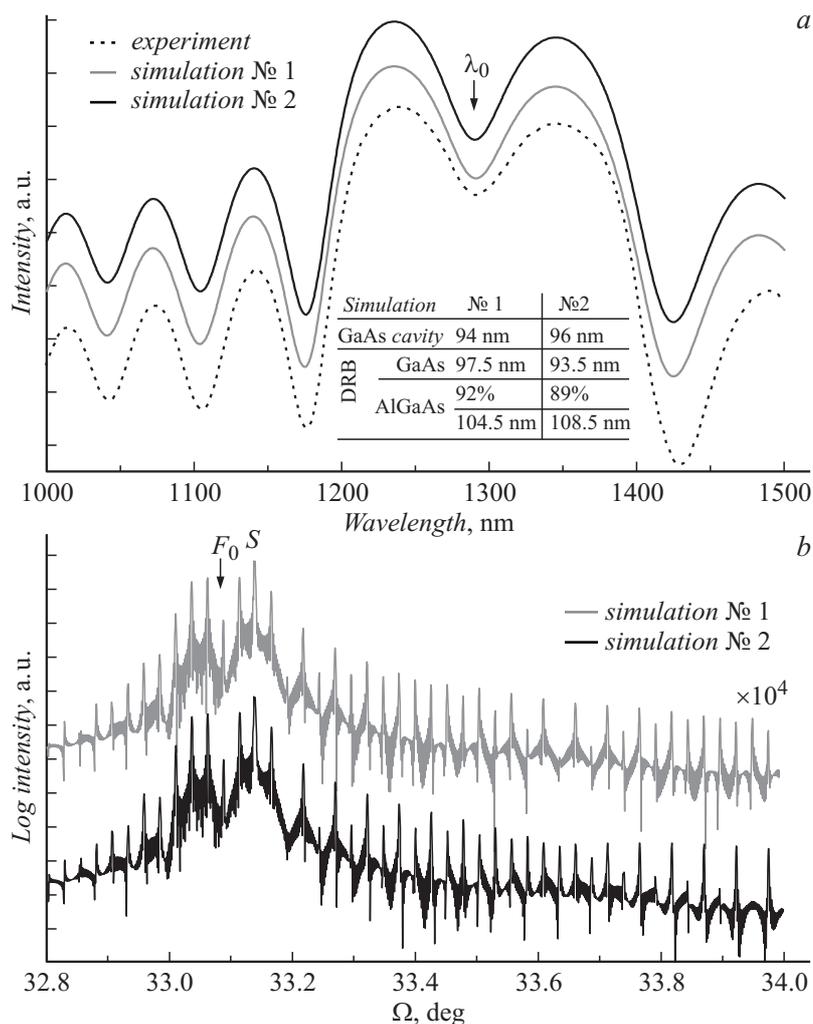


Рис. 2. Эпитаксиальная гетероструктура I типа: *a* — экспериментальный спектр отражения и расчетные спектры отражения для вариантов конструкции гетероструктур № 1 и 2 (толщины и составы слоев обоих вариантов конструкции гетероструктуры приведены на вставке); *b* — расчетные дифракционные кривые для вариантов конструкции гетероструктур № 1 и 2 без учета изгиба образца и разрешения системы.

толщины слоев с точностью до 0.5 nm и повысить точность определения состава слоев сверхрешетки [16]. Однако на практике шероховатость и резкость интерфейсов оказывают значительное влияние на относительные высоты последовательных сателлитов, а дисперсия периода сверхрешетки может приводить к перераспределению интенсивности в различных интерференционных осцилляциях, особенно в сателлитах высокого порядка [17]. Данный факт в совокупности с возможным отклонением параметров решетки твердого раствора AlGaAs от закона Вегарда [18] существенно затрудняет анализ экспериментальных данных и снова вносит неопределенность в определение толщин и состава слоев гетероструктур. Следует отметить, что в случае сверхрешеток $Al_xGa_{1-x}As/Al_yGa_{1-y}As$ точность определения составов резко падает и ошибка может достигать $\pm 2.5\%$ [10].

Возможное решение проблемы связано с уменьшением числа независимых переменных при решении обратной задачи за счет модификации конструкции тестовой гетероструктуры (рис. 1, *b*), т.е. фактически применением одного из возможных способов регуляризации решаемой обратной задачи [19]. На рис. 3 приведены экспериментальные данные исследований гетероструктуры II типа методами спектроскопии оптического отражения и рентгеновской дифракции. С точки зрения оптической спектроскопии гетероструктура II типа также представляет собой низкодобротный вертикальный оптический микрорезонатор Фабри–Перо с резонансом вблизи λ_0 . Тогда как с точки зрения структурного анализа данная гетероструктура содержит сверхрешетку GaAs/AlAs, параметры которой однозначно определяются боковыми сателлитами дифракционной кривой, а также толстый слой AlGaAs, который дает четко различимую особенность F_{AlGaAs} . Однако раздельное решение обратной задачи по восстановлению параметров гетероструктуры II типа из спектров оптического отражения, равно как и из рентгенодифракционных кривых, по-прежнему обладает низкой сходимостью (см. таблицу). При этом следует отметить, что каждый из используемых методов более чувствителен к разным параметрам гетероструктуры. Состав слоя AlGaAs точнее определяется из рентгеновских дифракционных кривых, в то время как толщина слоя AlGaAs оптического микрорезонатора при известном составе более точно определяется из спектров оптического отражения. В результате самосогласованного решения обратной задачи с использованием наборов данных, полученных двумя экспериментальными методами, удается частично снять неопределенность решаемой обратной задачи

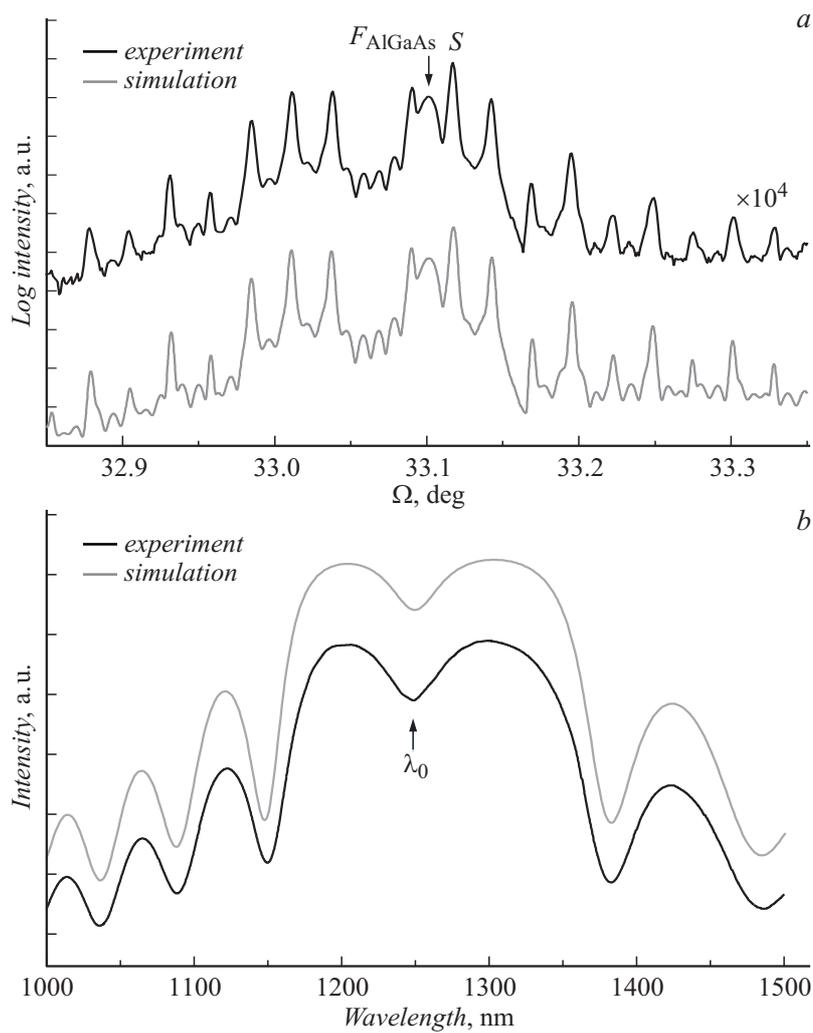


Рис. 3. Эпитаксиальная гетероструктура II типа: *a* — экспериментальная и расчетная дифракционные кривые; *b* — экспериментальный и расчетный спектры отражения.

Анализ абсолютных погрешностей обратной задачи

Метод	Параметр структуры	Значение параметра	Абсолютная погрешность
Спектроскопия оптического отражения	Толщины слоев GaAs/AlAs сверхрешетки	97 nm 102 nm	± 1 nm
	Состав AlGaAs резонатора	17.5%	$\pm 7.5\%$
	Толщина AlGaAs резонатора	542.5 nm	± 5.5 nm
Рентгеновская дифракция	Толщины слоев GaAs/AlAs сверхрешетки	96.5 nm 102.5 nm	± 0.5 nm
	Состав AlGaAs резонатора	16.5%	$\pm 0.5\%$
	Толщина AlGaAs резонатора	545 nm	± 5 nm
Согласованное решение обратных задач	Толщины слоев GaAs/AlAs сверхрешетки	96.5 nm 102.5 nm	± 0.5 nm
	Состав AlGaAs резонатора	16.5%	$\pm 0.5\%$
	Толщина AlGaAs резонатора	541.5 nm	± 1 nm

и обеспечить абсолютные погрешности определения толщин слоев сверхрешетки, состава и толщины слоя AlGaAs на уровне ± 0.5 nm, $\pm 0.5\%$ и ± 1 nm соответственно. Достигнутый уровень точности лежит на уровне экспериментальной погрешности используемых методов измерений и удовлетворяет требованиям к методам диагностики для реализации широкого класса гетероструктур AlGaAs с вертикальным оптическим микрорезонатором.

Работа выполнялась при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение о субсидии № 14.607.21.0001).

Список литературы

- [1] *Soda H.* et al. // *Jpn. J. Appl. Phys.* 1979. V. 18. P. 2329.
- [2] *Schubert E.F.* et al. // *Appl. Phys. Lett.* 1992. V. 60. P. 921.
- [3] *Kuznetsov F.* et al. // *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 1999. V. 5. P. 561.
- [4] *Keller U.* et al. // *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 1996. V. 2. P. 435.
- [5] *Kishino K.* et al. // *IEEE J. Quantum Electron.* 1991. V. 27. P. 2025.
- [6] *Chang K.H.* et al. // *J. Appl. Phys.* 1991. V. 70. P. 4877.
- [7] *Vurgaftman I.* et al. // *J. Appl. Phys.* 2001. V. 89. P. 5815.
- [8] *Roshko A.* et al. // *Phys. Stat. Sol. (c)*. 2003. V. 0. P. 992.
- [9] *Zhang B.Y.* et al. // *J. Cryst. Growth.* 2003. V. 251. P. 777.
- [10] *Kidd P., Mater J.* // *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* 2003. V. 14. P. 541.
- [11] *Thomas P.J.S.* et al. // *Semicond. Sci. Technol.* 2001. V. 16. P. 107.
- [12] *Bhattacharya A.* et al. // *J. Cryst. Growth.* 2005. V. 274. P. 331.
- [13] *Тихонов А.Н., Гончарский А.В.* Некорректные задачи естествознания. М.: Изд-во МГУ, 1987. 303 с.
- [14] *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. М.: Наука, 1970. 856 с.
- [15] *Takagi S.* // *Acta Crystallogr.* 1962. V. 15. P. 1311.
- [16] *Fewster P.F.* // *Rep. Prog. Phys.* 1996. V. 59. P. 1339.
- [17] *Боуэн Д.К., Таннер Б.К.* Высокорастворимая рентгеновская дифрактометрия и топография. СПб.: Наука, 2002. 274 с.
- [18] *Zhou D., Usher B.F.* // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2001. V. 34. P. 1461.
- [19] *Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.* Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1986. 288 с.