

Оптическое отражение и бесконтактное электроотражение от слоев GaAlAs с периодически расположенными квантовыми ямами GaAs

© В.В. Чалдышев[¶], А.С. Школьник, В.П. Евтихийев, Т. Holden*

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

* Brooklyn College of the City University of New York, USA

(Получена 25 декабря 2005 г. Принята к печати 28 апреля 2006 г.)

В диапазоне энергий фотонов от 1 до 2 эВ проведены исследования оптического отражения и электроотражения от слоев AlGaAs с периодически расположенными квантовыми ямами GaAs различной толщины. Установлено, что спектральная зависимость коэффициента отражения содержит три основных вклада: отражение от границы воздух–среда; интерференционное отражение, обусловленное периодической модуляцией коэффициента преломления из-за различий его значений для материалов ям и барьеров; отражение, связанное с взаимодействием электромагнитных волн с экситонными состояниями в квантовых ямах. Исследование спектров отражения показало, что эти вклады имеют различные зависимости от температуры, угла падения и поляризации, однако количественное разделение различных вкладов весьма затруднительно. Для выделения в оптических спектрах вклада, обусловленного взаимодействием света с экситонными состояниями, разработан подход на основе бесконтактного измерения спектров оптического электроотражения. Показано, что применение такой методики позволяет определить параметры экситонных состояний в квантовых ямах.

PACS: 78.67.De, 73.21.Fg, 78.40.Fy

Взаимодействие электромагнитных волн и экситонных возбуждений в полупроводнике приводит к образованию экситонных поляритонов и резонансному изменению оптических свойств среды [1]. Для такого резонанса особый интерес представляет периодическая структура с квантовыми ямами, такими, что длина волны, отвечающая основному состоянию экситона в квантовых ямах $\lambda_{ex} = hc/E_{ex}n$, удовлетворяет брэгговскому условию интерференции электромагнитных волн: $\lambda_{ex} = 2d$, где d — период структуры, E_{ex} — энергия основного состояния экситона, n — коэффициент преломления среды, h — постоянная Планка, c — скорость света в вакууме. Теоретический анализ, впервые выполненный в работе [2], показал, что в такой структуре оптически активной является только одна поляритонная мода, сила осциллятора которой увеличивается пропорционально числу квантовых ям. В последующих теоретических работах [3–9] был проведен расчет оптических свойств такого рода структур с учетом таких факторов, как безызлучательная диссипация энергии, отклонение параметров структуры от точного брэгговского условия, наличие ям с различными ширинами и т.д. Теоретические расчеты получили подтверждение в экспериментальных работах, выполненных на структурах с периодически расположенными квантовыми ямами в системах полупроводниковых соединений II–VI [10–12] и III–V [13–17].

Экспериментальные исследования показали, что спектры оптического отражения структур с периодически расположенными квантовыми ямами являются комплексными, поскольку формируются в результате комбинации нескольких вкладов, наиболее важными из

которых являются: 1) преломление и отражение от границы вакуум–среда, 2) интерференция, обусловленная периодической модуляцией коэффициента преломления, имеющего различную величину для материалов ям и барьеров и 3) резонансное рассеяние и частичное поглощение света в результате взаимодействия с экситонами в области поляритонного резонанса, а также с иными элементарными возбуждениями в среде. Физические процессы, обеспечивающие два первых вклада, хорошо изучены и описаны в классических монографиях (см., например, [18]). Тем не менее отделение этих вкладов от резонансного экситон-поляритонного эффекта представляет собой непростую задачу, поскольку явления интерференции и взаимодействия света со средой не являются аддитивными и существенным образом зависят от фазы электромагнитной волны.

В данной работе проведены исследования оптического отражения и бесконтактного электроотражения от слоев AlGaAs, содержащих систему периодически расположенных квантовых ям GaAs. Измерения спектров отражения при различных температурах и углах падения света позволили выявить вклады различной физической природы. Показано, что применение модуляционной методики электроотражения является эффективным инструментом исследования взаимодействия света с электронными возбуждениями в квантовых ямах в таких структурах.

Схематическое изображение поперечного сечения исследованных образцов дано на рис. 1. Исследованные структуры были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии на установке ЦНА-13. Подложками служили пластины *n*-GaAs диаметром 50 мм с ориентацией (001). Выращивание производилось при температуре 690°C и соотношении потоков атомов III/V, рав-

[¶] E-mail: chald.gvg@mail.ioffe.ru

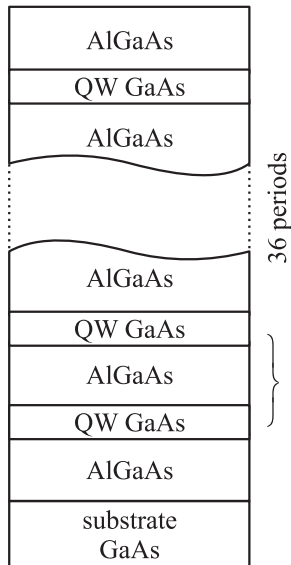


Рис. 1. Схематическое изображение исследованной периодической структуры. Один период отмечен фигурной скобкой. Каждый из 36 периодов состоял из квантовой ямы QW GaAs и барьера AlGaAs, выполненного в виде короткопериодной сверхрешетки.

ном 4. Скорость роста контролировалась по дифракции быстрых электронов на отражение (RHEED) и составляла 0.6 и 0.35 мкм/ч для GaAs и AlAs соответственно. Эпитаксиальный слой AlGaAs был выполнен в виде короткопериодной сверхрешетки GaAs–AlAs. Толщина слоев GaAs в этой сверхрешетке составляла 3 монослоя, а толщина слоев AlAs — 7 монослоев, что с точки зрения оптических свойств в ближнем инфракрасном диапазоне эффективно соответствовало твердому раствору Al_{0.3}Ga_{0.7}As. В массиве короткопериодной сверхрешетки AlGaAs была сформирована система периодически расположенных квантовых ям GaAs. Из общего числа 36 ям ширина четырех была 20 нм, а остальных 32 ям — 15 нм. Расстояние между центрами ям (период структуры) составляло 119 нм.

Измерения спектров оптического отражения проводились в диапазоне температур от 10 до 300 К при *s*- и *p*-поляризациях и различных углах падения света. Источником света служила лампа накаливания с вольфрамовой спиралью, соединенная с дифракционным монохроматором с решеткой 1200 штрихов/мм. В качестве фотоприемника использовался кремниевый фотодиод. Калибровка измерительной системы осуществлялась при соответствующих углах падения и поляризации света с помощью металлического Al-зеркала.

Спектры электроотражения измерялись в тех же условиях по бесконтактной методике [19,20]. Величина модулирующего напряжения варьировалась в пределах 300–500 В. Измерение сигнала модуляционного отражения проводилось при нормированной величине немодулированного отражения, что достигалось с помощью

автоматической перестройки плотности нейтрального фильтра, установленного на выходной щели монохроматора.

На рис. 2 представлены спектры оптического отражения, измеренные при температурах $T = 17, 50, 80$ и 160 К. Спектры измерены при *s*-поляризации и угле падения света 43° . Во всем диапазоне спектра видна картина, обусловленная интерференцией света из-за периодического изменения диэлектрической проницаемости среды [18]. Главный пик интерференционного отражения (фотонная запрещенная зона) расположен при энергии фотонов $E_{ph} \approx 1.54$ эВ. Эффективное значение диэлектрической функции ϵ исследованной периодической структуры при этой энергии можно оценить с помощью формулы Брэгга:

$$\lambda_{Br} = 2d\sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta}, \quad (1)$$

где $\lambda_{Br} = hc/E_{ph}$, θ — угол падения света. Данные, представленные на рис. 2, дают $\epsilon = 11.9$, что соответствует показателю преломления $n = 3.45$. Эта величина близка к значению показателя преломления твердого раствора AlGaAs с содержанием алюминия 30% [21]. При изменении температуры в диапазоне 10–300 К интерференционная картина изменяется незначительно в соответствии со слабой температурной зависимостью показателя преломления. Существенно более сильные изменения положения интерференционных пиков происходят при изменении угла падения света. Соответствующие экспериментальные данные приведены в [17]. Измеренные сдвиги λ_{Br} хорошо описываются формулой (1).

На главном пике интерференционного отражения видны особенности (отмечены на рис. 2 стрелками). В отличие от интерференционных пиков и провалов

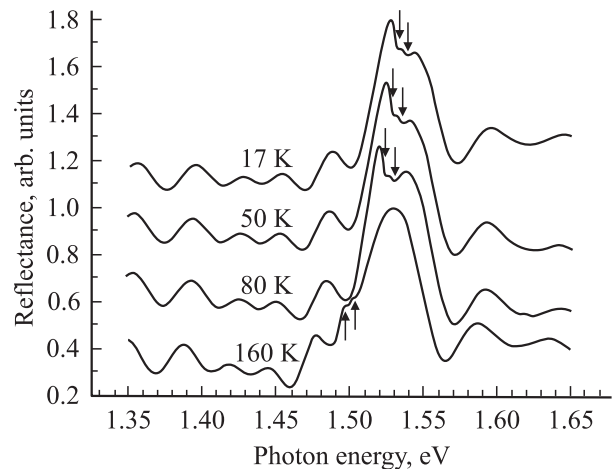


Рис. 2. Спектры оптического отражения от слоя AlGaAs с периодически встроенными квантовыми ямами GaAs при разных температурах. Угол падения света 43° , *s*-поляризация. Стрелками показаны спектральные особенности, обусловленные с взаимодействием света с экситонными состояниями в квантовых ямах. Для удобства спектры смещены друг относительно друга по вертикальной оси.

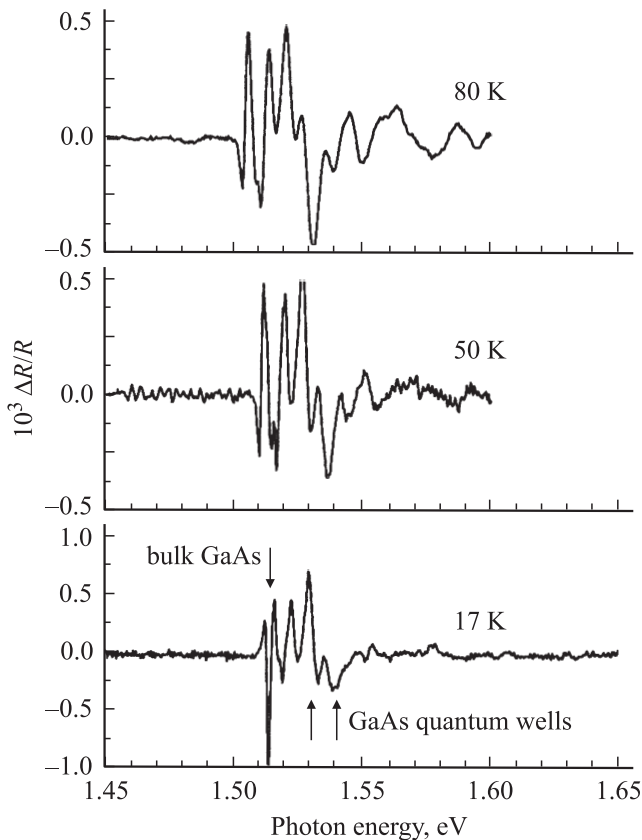


Рис. 3. Спектры бесконтактного электроотражения от слоя AlGaAs с периодически встроенными квантовыми ямами GaAs при температурах 17, 50 и 80 К. Угол падения света 43° , s -поляризация. Стрелками показаны спектральные особенности, обусловленные взаимодействием света с экситонными состояниями в квантовых ямах, а также с экситонами в подложке GaAs.

положение этих особенностей не зависело от угла падения света [17], но заметно изменялось при повышении температуры, особенно при $T > 80$ К (см. рис. 2). Энергетическое положение пиков соответствовало энергии основного состояния экситонов в квантовых ямах GaAs шириной 15 и 20 нм с барьерами $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$.

Таким образом, в исследованных спектрах оптического отражения от слоев AlGaAs с периодически расположенными квантовыми ямами GaAs обнаружены три различных компонента. Во-первых, это отражение, обусловленное различием показателей преломления воздуха и среды AlGaAs. Во-вторых, это интерференционное брэгговское отражение, вызванное периодической модуляцией показателя преломления из-за системы тонких слоев GaAs. Наконец, в-третьих, наблюдаются особенности, обусловленные взаимодействием света с экситонными состояниями в квантовых ямах. Несмотря на заметную разницу в поведении этих вкладов при изменении условий эксперимента, их разделение, необходимое для изучения экситонных особенностей, весьма затруднительно.

Для решения этой проблемы мы использовали подход, основанный на модуляционной методике бесконтактного электроотражения (БЭО) [19,20]. При этом образец помещался между двумя электродами, на которые подавалось высокое напряжение (330–500 В) частотой 200 Гц. Кремниевым детектором одновременно измерялась модулированная и постоянная составляющие отраженного монохроматического светового потока. Спектры БЭО $\Delta R/R$ от исследованного образца, измеренные при различных температурах, представлены на рис. 3. Следует подчеркнуть, что спектры БЭО были получены в условиях, полностью идентичных тем, что использовались для измерения обычных спектров отражения, представленных на рис. 2.

Из рис. 3 видно, что в спектрах БЭО не проявляется заметным образом интерференционная картина, характерная для обычных спектров отражения (рис. 2). Причина состоит в том, что диэлектрические функции GaAs, AlAs и AlGaAs слабо зависят от электрического поля в диапазоне энергий ниже края фундаментального поглощения. Основной сигнал БЭО наблюдается при энергиях фотонов 1.50–1.55 эВ, т.е. в области энергий, соответствующих основному состоянию экситонов в квантовых ямах и объемном GaAs. Энергетическое положение соответствующих особенностей отмечено на рис. 3 стрелками. Сигнал при более высоких энергиях, возможно, связан с осцилляциями Франца–Келдыша [19,20].

Следует отметить, что спектры на рис. 2 и 3 записаны с одинаковым спектральным разрешением. При этом в случае БЭО удастся значительно лучше выявить и разделить особенности, связанные с экситонами в квантовых ямах различной ширины, а также наблюдать сигнал от объемных экситонов подложки GaAs. Это обстоятельство делает возможным количественный анализ формы спектральных линий. Энергетическое положение особенностей, связанных с экситонами в квантовых ямах, хорошо согласуется с квантово-механическими расчетами для ям GaAs, шириной 15 и 20 нм, окруженных барьерами $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$. Детальный количественный анализ формы спектральных линий будет проведен в последующих работах.

Таким образом, исследования оптического отражения и электроотражения от слоев AlGaAs с периодически расположенными квантовыми ямами GaAs различной ширины в диапазоне энергий фотонов от 1 до 2 эВ показали, что спектральная зависимость коэффициента отражения содержит три основных вклада: отражение от границы воздух–среда; интерференционное отражение, обусловленное периодической модуляцией коэффициента преломления из-за различий его значений для материалов ям и барьеров; отражение, связанное с взаимодействием электромагнитных волн с экситонными состояниями в квантовых ямах. Эти вклады имеют различные зависимости от температуры, угла падения и поляризации. Для выделения в оптических спектрах вклада, обусловленного взаимодействием света с экситонными состояниями, разработан подход на основе бес-

контактного измерения спектров оптического электроотражения. Показано, что применение такой методики позволяет определить параметры экситонных состояний в квантовых ямах.

Авторы благодарны Е.Л. Ивченко и А.Н. Поддубному за полезные обсуждения.

Работа поддержана программами РАН и Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 05-02-17778).

Список литературы

- [1] E.L. Ivchenko. *Optical spectroscopy of semiconductor nanostructures* (Alpha Science International, Harrow, UK, 2005).
- [2] Е.Л. Ивченко, А.И. Несвижский, С. Йорда. ФТТ, **36**, 2118 (1994).
- [3] В.А. Кособукин, М.М. Моисеева. ФТТ, **37**, 3694 (1995).
- [4] Е.Л. Ивченко, В.П. Кочерешко, А.В. Платонов, Д.Р. Яковлев, А. Ваг, В. Оссау, Г. Ландвер. ФТТ, **39**, 2072 (1997).
- [5] E.L. Ivchenko, M. Willander. Phys. Status Solidi B, **215**, 199 (1999).
- [6] L.I. Deych, A.A. Lisyansky. Phys. Rev. B, **62**, 4242 (2000).
- [7] T. Ikawa, K. Cho. Phys. Rev. B, **66**, 85338 (2002).
- [8] L. Pilozi, A. D'Andrea, K. Cho. Phys. Rev. B, **69**, 205311 (2004).
- [9] M.M. Voronov, M.V. Erementchouk, L.I. Deych, A.A. Lisyansky. Phys. Rev. B, **70**, 195106 (2004).
- [10] V.P. Kochereshko, G.R. Pozina, E.L. Ivchenko, D.R. Yakovlev, A. Waag, W. Ossau, G. Landwehr, R. Hellmann, E.O. Gobel. Superlatt. Microstruct., **15**, 471 (1994).
- [11] Y. Merle d'Aubigne, A. Wasiela, H. Mariette, T. Dietl. Phys. Rev. B, **54**, 14003 (1996).
- [12] J. Sadowski, H. Mariette, A. Wasiela, R. Andre, Y. Merle d'Aubigne, T. Dietl. Phys. Rev. B, **56**, 1664 (1997).
- [13] M. Hubner, J. Kuhl, T. Stroucken, A. Knorr, S.W. Koch, R. Hey, K. Ploog. Phys. Rev. Lett., **76**, 4199 (1996).
- [14] C. Ell, J. Prineas, T.R. Nelson, jr., S. Park, H.M. Gibbs, G. Khitrova, S.W. Koch. Phys. Rev. Lett., **80**, 4795 (1998).
- [15] G.R. Hayes, J.L. Staehli, U. Oesterle, B. Deveaud, R.T. Phillips, C. Ciuti. Phys. Rev. Lett., **83**, 2837 (1999).
- [16] J.P. Prineas, C. Ell, E.S. Lee, G. Khitrova, H.M. Gibbs, S.W. Koch. Phys. Rev. B, **61**, 13863 (2000).
- [17] V.P. Evtikhiev, A.B. Pevtsov, A.V. Sel'kin, A.S. Shkolnik, E.L. Ivchenko, V.V. Chaldyshev, L.I. Deych, A.A. Lisyansky, D.R. Yakovlev, M. Bayer. *13th Int. Symp. Nanostructures: Physics and Technology* (St. Petersburg, Russia, 2005).
- [18] М. Борн, Б. Вольф. *Основы оптики* (М., Наука, 1973).
- [19] F.H. Pollak. In: *Properties of III-V Quantum Wells and Superlattices: EMI Data Reviews Series*, ed. by P. Bhattacharya (INSPEC, London, 1996) p. 232.
- [20] М. Кардона. *Модуляционная спектроскопия* (М., Мир, 1972).
- [21] S. Adachi. J. Appl. Phys., **58**, R1 (1985).

Редактор Л.В. Шаронова

Optical reflection and contactless electroreflection from AlGaAs layers with periodically embedded GaAs quantum wells

V.V. Chaldyshev, A.S. Shkolnik, V.P. Evtikhiev, T. Holden*

loffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

* Brooklyn College of the City University
of New York, USA

Abstract In the range of photon energies from 1 to 2 eV we studied optical reflection and electroreflection from AlGaAs layers with periodically embedded GaAs quantum wells of different thickness. It is found that the spectral behavior of the reflection coefficient is determined by three main contributions: reflection from the air-medium interface; interference reflection due to periodic modulation of the refraction coefficient that is different for the materials of wells and barriers; reflection related to the interaction of the electromagnetic waves with the excitonic states in quantum wells. The investigation of the reflection spectra showed different dependencies of these contributions on the temperature, angle of the light incidence and polarization, however, quantitative separation of the contributions is a hard task. In order to extract the contribution related to the light-exciton interaction we developed an approach based on contactless measurements of the electroreflectance spectra. We show this technique to be powerful for evaluation of the parameters of the excitonic states in quantum wells.