

Резонансное отражение света периодической системой экситонов в квантовых ямах GaAs/AlGaAs

© В.В. Чалдышев[¶], Е.В. Кунделев⁺, Е.В. Никитина^{*}, А.Ю. Егоров^{*}, А.А. Горбачевич^{*}

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

⁺ Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия

^{*} Санкт-Петербургский академический университет — научно-образовательный центр нанотехнологий
Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 28 февраля 2012 г. Принята к печати 7 марта 2012 г.)

Проведены исследования спектров оптического отражения от периодических структур с двумя квантовыми ямами в элементарной ячейке. Изучены зависимости брэгговского и экситон-поляритонного отражения от угла падения света, поляризации и температуры. Анализ данных зависимостей показал, что образец с 60 ячейками является хорошим распределенным брэгговским отражателем с коэффициентом отражения более 90% в максимуме спектральной полосы шириной 16 мЭВ.

Структуры с периодически изменяющимся в пространстве показателем преломления (фотонные кристаллы) позволяют создавать разрешенные и запрещенные энергетические зоны для фотонов [1], что весьма интересно как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения. В частности, одномерные фотонные кристаллы являются основой для создания брэгговских отражателей и диэлектрических зеркал, которые широко применяются в оптических и электрооптических приборах, например, в вертикально-излучающих полупроводниковых лазерах (vertical cavity surface emitting lasers, VCSELs) [2]. Особый интерес представляют структуры, в которых возможно управлять фотонной запрещенной зоной [3], тем самым активно управлять потоками фотонов.

Разновидностью одномерных фотонных кристаллов являются резонансные брэгговские структуры (РБС) [4]. В таких структурах периодическая модуляция диэлектрической функции реализуется за счет экситонных состояний в квантовых ямах (КЯ). При этом, когда брэгговская периодичность системы квантовых ям совпадает с частотой квазидвумерных экситонов в КЯ, возникает коллективная суперизлучательная экситон-поляритонная мода, сила осциллятора которой пропорциональна числу квантовых ям. В пределе бесконечного числа ям формируется фотонная запрещенная зона. С точки зрения оптических свойств при падении света из внешней среды РБС представляет собой брэгговский полосовой отражатель. При этом функциональность отражателя обеспечивается системой экситонов в квантовых ямах. Таким отражателем можно управлять, например, путем приложения внешнего электрического поля, меняющего энергетические параметры экситонов (эффект Штарка) [5].

Исследованию свойств РБС было посвящено весьма значительное количество теоретических работ [6–13],

в которых были проанализированы различные аспекты формирования суперизлучательной моды. Экспериментальные доказательства существования коллективной суперизлучательной моды были получены для квантовых ям CdTe/CdMgTe [14], GaAs/InGaAs [15–18], GaAs/AlGaAs [19–23] и InGaN/GaN [24]. Следует отметить, что создание РБС является весьма сложной задачей, поскольку для формирования суперизлучательной оптической моды необходима система из большого числа КЯ с малым разбросом геометрических параметров и малым нерадикационным уширением экситонов. В частности, для достижения резонансного коэффициента отражения более 90% оказалось необходимым создать РБС на основе $\text{In}_{0.04}\text{Ga}_{0.96}\text{As}/\text{GaAs}$ с 100 периодами, каждый из которых был толщиной 115 нм [16].

Для практического использования РБС необходимо увеличить взаимодействие света с экситонами, уменьшить число периодов структуры, тем самым уменьшить общую толщину и время выращивания структуры. Для этого необходимо изменить архитектуру РБС. Определенный выигрыш в величине параметра радиационного затухания экситонов в КЯ можно получить, используя широкозонные материалы с большой энергией связи экситонов и большой высотой барьеров, обеспечивающей локализацию электронов и дырок, составляющих экситон, в малом объеме пространства. К сожалению, однако, технология выращивания структур с множественными квантовыми ямами широкозонных соединений II–VI [14] и III-нитридов [24] не позволяет получать структуры желаемого качества. Наиболее технологически совершенной, по-видимому, является система GaAs/AlGaAs. В этой системе можно реализовать достаточно глубокие квантовые ямы. Кроме того, малое рассогласование параметров решетки позволяет выращивать большое число периодов без формирования дислокаций и иных дефектов структуры. Эта система была выбрана нами для реализации РБС в данной работе, как

[¶] E-mail: chald.gvg@mail.ioffe.ru

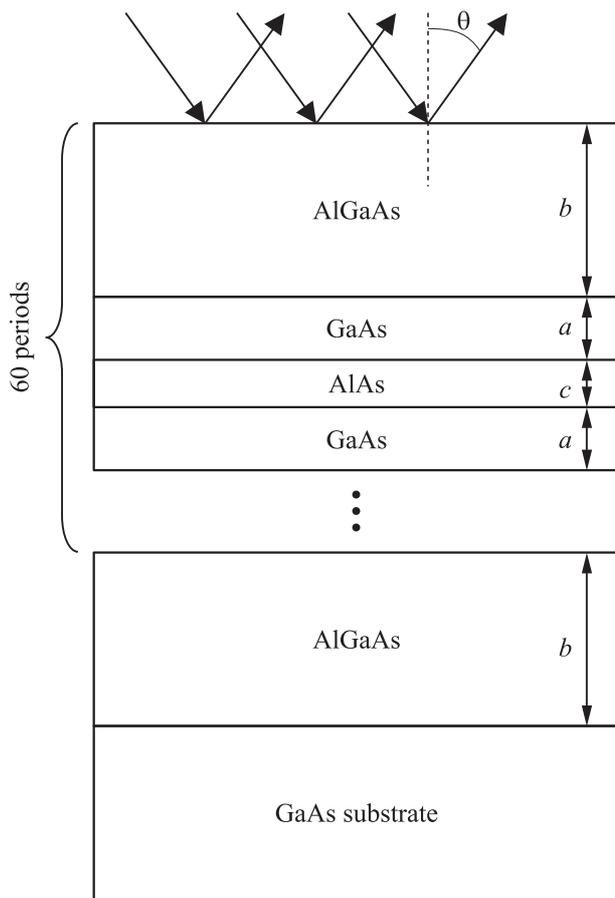


Рис. 1. Схематическое изображение исследованной РБС. Элементарная ячейка состоит из двух близко расположенных одинаковых квантовых ям GaAs, разделенных тунельно-непрозрачным барьером AlAs. Барьеры представляют собой слой AlGaAs с содержанием AlAs 24 мол%. Толщина барьеров обеспечивает брэгговский резонанс при энергии, близкой к энергии экситонов в КЯ. Стрелки условно обозначают падающий и отраженный пучки света.

и в предшествующих работах [19,20,23]. В отличие от предшествующих работ, здесь мы использовали новый вариант периодической элементарной ячейки: она содержала две КЯ GaAs, разделенные барьером AlAs. Теоретические расчеты [10] показали, что при наличии двух ям в элементарной ячейке максимальное увеличение параметра радиационного затухания, характеризующего взаимодействие света с экситонами, составляет $\sqrt{2}$.

Итак, в данной работе мы сообщаем о создании РБС на основе системы GaAs/AlGaAs, обеспечивающей коэффициент отражения $> 90\%$ и состоящей из 60 периодов с двумя КЯ в каждой элементарной ячейке.

Исследованные структуры выращивались методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках полупроводящего GaAs диаметром 7.5 см с ориентацией (001). Структура схематически показана на рис. 1. Каждая элементарная ячейка РБС содержала две КЯ GaAs, разделенные барьером AlAs. Толщины КЯ GaAs и барьера

AlAs составляли соответственно $a = 7.8$ нм, $c = 4.8$ нм. Между группами КЯ находился барьер AlGaAs с содержанием алюминия 24% и толщиной $b = 97.4$ нм. Точные значения толщин слоев были определены методом рентгеновской дифрактометрии высокого разрешения. Была выращена РБС с 60 периодами и референтная структура с одиночной элементарной ячейкой.

Исследование спектров оптического отражения проводилось при температурах 4, 77, 300 К в диапазоне длин волн 0.4–1.0 мкм при *s*-, *p*-поляризациях и различных углах падения света. Источником света был прибор LS-1 с вольфрамовой спиралью накаливания. Для транспорта света от источника к образцу и от образца к приемнику использовались оптоволоконные кабели. Отраженный от образцов сигнал регистрировался спектрометром HR4000CG-UV-NIR, который позволял проводить измерения в спектральном диапазоне от 200 до 1100 нм с оптическим разрешением 0.5 нм. Детектором в нем являлась кремниевая ПЗС-матрица.

На рис. 2 представлены спектры отражения света от РБС с 60 периодами и от референтного образца. Спектры записаны при нормальном падении света (угол падения $\theta = 0^\circ$) при температуре образцов 4.2 К. Видно, что спектры содержат серию резких особенностей на фоне плавно меняющегося отражения от поверхности образцов, определяемого формулами Френеля

$$R = \left| \frac{n_b - n_{out}}{n_b + n_{out}} \right|^2, \quad (1)$$

где n_b и n_{out} — показатели преломления барьера AlGaAs и внешней среды соответственно. Стрелками на рис. 2 отмечены особенности, связанные с экситонами с тяжелыми и легкими дырками, $x(e1-hh1)$ и $x(e1-lh1)$, в

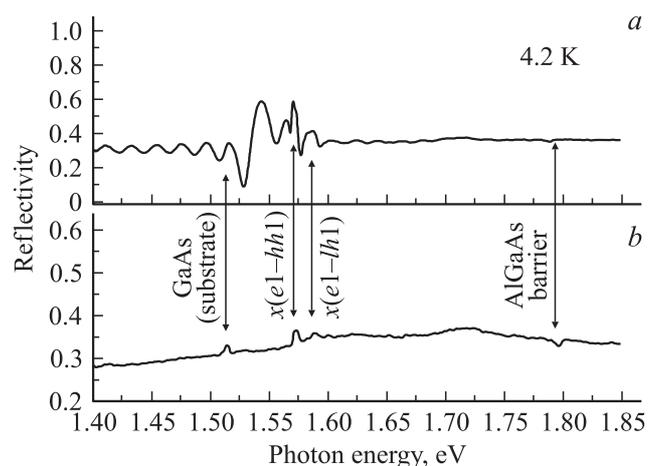


Рис. 2. Спектры оптического отражения от РБС с 60 периодами (а) и от референтной структуры с одиночной элементарной ячейкой (б). Спектры записаны при 4.2 К и при нормальном падении света. Стрелками отмечены особенности, связанные с экситонами с тяжелыми и легкими дырками, $x(e1-hh1)$ и $x(e1-lh1)$, в КЯ и с экситонными возбуждениями в подложке GaAs и барьере AlGaAs.

КЯ GaAs и с экситонными возбуждениями в подложке GaAs и барьере AlGaAs. Видно, что энергетическое положение экситонных пиков одинаково для референтной структуры и для РБС, что показывает хорошую воспроизводимость всех элементов технологического процесса выращивания образцов.

Сравнение экситонных особенностей в спектрах *a* и *b* на рис. 2 показывает, что в структуре с 60 периодами амплитуда отражения света экситонами КЯ в несколько раз выше, чем в референтной структуре. Фактор усиления, однако, значительно меньше 60. Причина относительно небольшого увеличения коэффициента отражения света системой экситонов при весьма большом числе КЯ состоит в том, что индивидуальные экситонные состояния в КЯ отражают свет с разной фазой. Результирующий коэффициент отражения света при этом определяется интерференцией.

Еще одной спектральной особенностью на рис. 2, *a* является знакопеременный по отношению к фоновому отражению сигнал с максимальной амплитудой в области 1.53–1.54 эВ, быстро затухающий в области больших энергий и медленно затухающий в области малых энергий фотонов. Энергетическое положение и характерная форма этого сигнала свидетельствуют о том, что он вызван брэгговским отражением света от слоистой структуры барьер — КЯ [19,20], элементы которой имеют различные показатели преломления n_a , n_b и n_c . Резонансная длина волны (в вакууме) λ_{Br} для такого отражения определяется брэгговским условием

$$\lambda_{Br} = 2d \sqrt{\left(\frac{2n_a a + n_b b + n_c c}{d}\right)^2 - \sin^2 \theta}, \quad (2)$$

где d — период структуры, равный сумме толщин КЯ a и барьеров b и c ; n_a , n_b , n_c — показатели преломления материалов КЯ и барьеров, θ — угол падения света. В спектре отражения от референтного образца брэгговский пик, конечно, отсутствует, как можно убедиться из рис. 2, *a*.

Условие формирования коллективной суперизлучательной экситон-поляритонной моды в РБС является совпадение брэгговского и экситон-поляритонного резонансов. Исходя из спектров рис. 2, *b*, полученных при нормальном падении света, и соотношения (2), необходимое условие может быть выполнено при определенном ненулевом угле падения света θ . На рис. 3 представлены спектры отражения от РБС, записанные при 4.2 К и при углах падения света $\theta = 23^\circ$, 45° и 67° . Видно, что при увеличении угла падения брэгговский пик постепенно смещается в сторону больших энергий $E_{Br} = hc/\lambda_{Br}$ в соответствии с соотношением (2). Угол 23° по-прежнему соответствует энергии брэгговского резонанса, меньшей энергии экситонов в КЯ, $E_{Br} < E_{x(e1-hh1)}$. При этом коэффициент брэгговского отражения в максимуме и коэффициент экситонного отражения в максимуме составляют $\sim 60\%$. Совмещение резонансов происходит при угле падения света $\sim 45^\circ$.

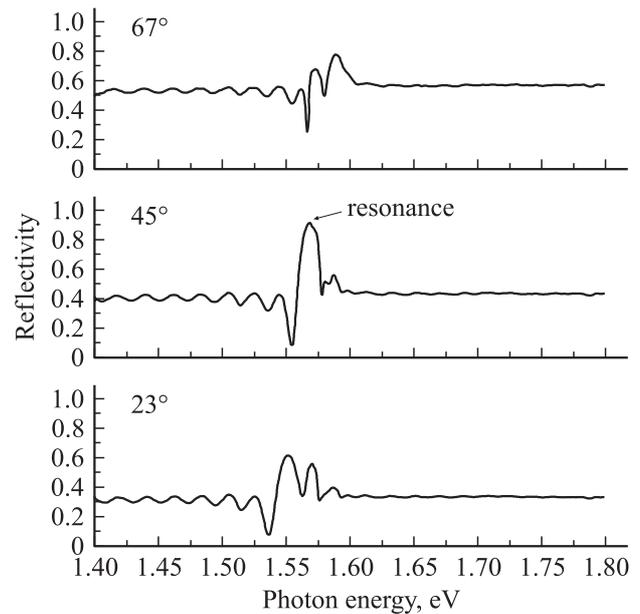


Рис. 3. Спектры оптического отражения от РБС с 60 периодами при 4.2 К и при различных углах падения света с *s*-поляризацией.

При этом возникает полоса отражения шириной 16 мэВ с коэффициентом отражения в максимуме $> 90\%$. Дальнейшее увеличение угла падения света приводит вновь к расстройке брэгговского и экситон-поляритонного с экситоном $x(e1-hh1)$ резонансов. Резонансный пик отражения расщепляется на $x(e1-hh1)$ и брэгговскую компоненты. При $\theta = 67^\circ$ брэгговский резонанс совмещается с экситон-поляритонным резонансом, вызванным экситонами с легкими дырками $x(e1-lh1)$ в КЯ. Известно (см., например, [5]), что экситоны $x(e1-lh1)$ обладают меньшей силой осциллятора по сравнению с $x(e1-hh1)$. В результате при совмещении брэгговского и экситон-поляритонного с экситоном $x(e1-lh1)$ резонансов полоса оптического отражения оказывается уже, максимум коэффициента отражения оказывается меньше и составляет 78%.

В работе [16] были исследованы оптические свойства РБС на основе КЯ InGaAs с барьерами GaAs с различным числом периодов. Авторы установили, что ширина резонансной полосы отражения РБС для системы из 60 КЯ составляет ~ 4 мэВ, а для системы из 100 КЯ ~ 6 мэВ. Полученная нами полоса резонансного отражения оказалась значительно шире — 16 мэВ.

Ширина полосы оптического отражения в резонансных условиях определяется двумя вкладками. Во-первых, это отражение света от виртуальной слоистой структуры без экситонов вследствие различия коэффициентов преломления в КЯ и барьерах. Оценки показывают, что для структуры на основе GaAs/AlGaAs, исследованной в данной работе, такое отражение должно быть больше, чем для структур на основе InGaAs/GaAs, исследованных в работе [16]. Во-вторых, отражение света периодической

системой экситоной в КЯ определяется параметром радиационного затухания экситонных состояний в КЯ, числом и расположением КЯ [10]. Использование системы GaAs/AlGaAs обеспечивает большую энергию связи и более сильную локализацию экситонов в квантовых ямах, что увеличило параметр радиационного затухания до $\Gamma_0 \approx 40$ мЭВ в нашем случае [23] по сравнению с 27 мЭВ в работе [16] для системы InGaAs/GaAs. Кроме того, использование двух близко расположенных КЯ в элементарной ячейке должно дополнительно эффективно увеличивать параметр Γ_0 и соответственно увеличивать ширину экситонной резонансной полосы в $\sim \sqrt{2}$ раз [10]. Таким образом, качественный анализ показывает, что значительно большая ширина резонансной полосы в РБС на основе GaAs/AlGaAs по сравнению с РБС на основе InGaAs/GaAs вызвана увеличением как экситонного, так и неэкситонного вкладов. Для количественного анализа этих вкладов необходимо численное моделирование оптических свойств, которое будет проведено в последующих работах.

Можно заключить, что нами получены и исследованы РБС, состоящие из 60 пар квантовых ям GaAs, разделенных барьерами AlGaAs. Установлено, что в резонансных условиях, обеспечивающих формирование оптической решетки экситонов $x(e1-hh1)$ в КЯ, полученные РБС являются эффективными брэгговскими отражателями с шириной полосы 16 мЭВ и коэффициентом отражения света в максимуме более 90%. Оптическая решетка экситонов $x(e1-hh1)$ в КЯ является менее эффективной, создавая более узкую полосу с коэффициентом отражения в максимуме 78%.

Авторы благодарны М.А. Ягвониной за рентгеноструктурные исследования образцов, Е.Л. Ивченко, А.Н. Поддубному, М.М. Воронову да полезные дискуссии.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, грант № _11-02-12238-офи-м, и Российской академией наук.

Список литературы

- [1] J.D. Joannopoulos, R.D. Meade, J.N. Winn. *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light* (Princeton University Press, Princeton, 1995).
- [2] *Vertical Cavity Surface Emitting Lasers*, ed. by L.A. Coldren, H. Temkin, and C.W. Wilmsen (Cambridge University, Cambridge, 1999).
- [3] А.Б. Певцов, С.А. Грудинкин, А.Н. Поддубный, С.Ф. Каплан, Д.А. Курдюков, В.Г. Голубев. ФТП, **44**, 1585 (2010).
- [4] Е.Л. Ивченко, А.И. Несвижский, С. Йорда. ФТТ, **36**, 2118 (1994).
- [5] E.L. Ivchenko. *Optical spectroscopy of semiconductor nanostructures* (Alpha Science International, Harrow, UK, 2005).
- [6] E.L. Ivchenko, M. Willander. Phys. Status Solidi B, **215**, 199 (1999).
- [7] L.I. Deych, A.A. Lisyansky. Phys. Rev. B, **62**, 4242 (2000).
- [8] T. Ikawa, K. Cho. Phys. Rev. B, **66**, 85338 (2002).
- [9] L. Pilozzi, A. D'Andrea, K. Cho. Phys. Rev. B, **69**, 205311 (2004).
- [10] E.L. Ivchenko, M.M. Voronov, M.V. Erementchouk, L.I. Deych, A.A. Lisyansky. Phys. Rev. B, **70**, 195106 (2004).
- [11] М.М. Воронов, Е.Л. Ивченко, А.Н. Поддубный, В.В. Чалдышев. ФТТ, **48** (9), 1814 (2006).
- [12] M.V. Erementchouk, L.I. Deych, A.A. Lisyansky. Phys. Rev. B, **73**, 115321 (2006).
- [13] М.М. Воронов, Е.Л. Ивченко, В.А. Кособукин, А.Н. Поддубный. ФТТ, **49** (9), 1709 (2007).
- [14] Е.Л. Ивченко, В.П. Кочерешко, А.В. Платонов, Д.Р. Яковлев, А. Ваг, В. Оссау, Г. Ландвер. ФТТ, **39**, 2072 (1997).
- [15] M. Hübner, J. Kuhl, T. Stroucken, A. Knorr, S.W. Koch, R. Hey, K. Ploog. Phys. Rev. Lett., **76**, 4199 (1996).
- [16] M. Hübner, J.P. Prineas, C. Ell, P. Brick, E.S. Lee, G. Khitrova, H.M. Gibbs, S.W. Koch. Phys. Rev. Lett., **83**, 2841 (1999).
- [17] G.R. Hayes, J.L. Staehli, U. Oesterle, B. Deveaud, R.T. Phillips, C. Ciuti. Phys. Rev. Lett., **83**, 2837 (1999).
- [18] J.P. Prineas, C. Ell, E.S. Lee, G. Khitrova, H.M. Gibbs, S.W. Koch. Phys. Rev. B, **61**, 13863 (2000).
- [19] В.В. Чалдышев, А.С. Школьник, В.П. Евтихийев, Т. Holden. ФТП, **40** (12), 1466 (2006).
- [20] В.В. Чалдышев, А.С. Школьник, В.П. Евтихийев, Т. Holden. ФТП, **41** (12), 1455 (2007).
- [21] D. Goldberg, L.I. Deych, A.A. Lisyansky, Z. Shi, V.M. Menon, V. Tokranov, M. Yakimov, S. Oktyabrsky. Nature Photonics, **3**, 662 (2009).
- [22] J.P. Prineas, C. Cao, M. Yildirim, W. Johnston, M. Reddy. J. Appl. Phys., **100**, 063101 (2006).
- [23] V.V. Chaldyshev, Y. Chen, A.N. Poddubny, A.P. Vasil'ev, Z. Liu. Appl. Phys. Lett., **98**, 073112 (2011).
- [24] V.V. Chaldyshev, A.S. Bolshakov, E.E. Zavarin, A.V. Sakharov, W.V. Lundin, A.F. Tsatsulnikov, M.A. Yagovkina, T. Kim, Y. Park. Appl. Phys. Lett., **99**, 251103 (2011).

Редактор Л.В. Шаронова

Resonant light reflection by a periodic system of excitons in GaAs/AlGaAs quantum wells

V.V. Chaldyshev, E.V. Kundeleev⁺, E.V. Nikitina*, A.Yu. Egorov*, A.A. Gorbatsevich*

Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia
⁺ St. Petersburg State Polytechnic University,
195251 St. Petersburg, Russia
^{*} St. Petersburg Academic University,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract A study has been done of the optical reflection spectra from periodic structures with two quantum wells in the elementary cell. The dependencies of the Bragg and exciton-polariton reflection on the angle of the light incidence, polarization and temperature were studied. An analysis of the experimental data showed that the sample with 60 cells is a good distributive Bragg reflector with reflectivity more than 90% in the maximum of the spectral band, having width of 16 meV.