

## ЭКСИТОННЫЕ ПОЛЯРИТОНЫ В СТРУКТУРАХ С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ В УСЛОВИЯХ БРЭГГОВСКОГО ОТРАЖЕНИЯ СВЕТА

Д.Р.Яковлев, Г.Р.Позина, В.П.Кочерешко, А.Вааг<sup>\*1)</sup>, В.Оссау\*,  
Г.Ландвер<sup>\*1)</sup>

Физико-технический институт РАН  
194021 Санкт-Петербург, Россия

\*Physikalisches Institut der Universität Würzburg,  
97074 Würzburg, Germany

Поступила в редакцию 7 марта 1995 г.

Исследовалось отражение света в области экситонных резонансов в периодических гетероструктурах с квантовыми ямами CdTe/(Cd,Mg)Te. Обнаружено гигантское возрастание коэффициента отражения света в структурах, удовлетворяющих условиям Брэгга  $kd = \pi$  (где  $k$  – волновой вектор света,  $d$  – период структуры).

Исследование спектров отражения света от полупроводниковых структур с квантовыми ямами (СКЯ) и сверхрешеток (СР) является перспективным методом для изучения и характеристики свойств полупроводниковых квантово-размерных гетероструктур. Анализ экситонного контура отражения позволяет проследить зависимость продольно-поперечного расщепления экситонного поляритона от параметров гетероструктуры и от внешних магнитного и электрического полей. Этим методом был продемонстрирован переход от квазидвумерного к квази-трехмерному движению носителей при уменьшении периода в GaAs/(Al,Ga)As короткопериодичных СР [1], прослежен переход в состояние спиновой СР, индуцированной внешним магнитным полем, в полумангнитных гетероструктурах CdTe/(Cd,Mn)Te [2], обнаружен гигантский рост силы осциллятора экситона в квантовых нитях [3].

До настоящего времени анализ спектров отражения периодических СКЯ ограничивался случаем  $kd \ll 1$ , то есть случаем короткопериодной СКЯ, для описания которой можно использовать приближение эффективной диэлектрической среды [4]. В данной работе метод резонансного экситонного отражения света использован для исследования периодических структур с квантовыми ямами, разделенными барьерами с толщинами, сравнимыми с длиной волны света в среде. В этом случае приближение эффективной среды заведомо не выполняется. Теоретическое рассмотрение этого случая, проведенное Ивченко и др. [5], предсказывает гигантское возрастание коэффициента отражения света в области экситонного резонанса в СКЯ, период которой удовлетворяет условию Брэгга для распространяющейся световой волны:  $kd = \pi$  (где  $k = \omega n/c$  – волновой вектор света,  $d$  – период структуры,  $n$  – показатель преломления света в среде).

Исследовались полупроводниковые гетероструктуры с периодической цепочкой 10-ти квантовых ям CdTe/Cd<sub>0,6</sub>Mg<sub>0,4</sub>Te, выращенные методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках Cd<sub>0,96</sub>Zn<sub>0,04</sub>Te с ориентацией (100). Ширины квантовых ям в структурах составляли  $L_z = 70 - 75 \text{ \AA}$ , период структуры варьировался от 100 до 2000 \AA. Период структур определялся по скорости

<sup>1)</sup>A.Waag, W.Ossau, G.Landwehr

раста и контролировался по дифракции рентгеновских лучей. Специального легирования структур не проводилось, остаточная концентрация примесей  $\sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

Отметим, что для получения большого коэффициента отражения света от СКЯ необходимо выполнение условия Брэгга с точностью выше 10%. Условие должно выполняться для проекции волнового вектора света на ось структуры ( $k_z$ ):  $k_z d = \pi$ , где  $k_z = \frac{\omega}{c} \sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi}$ , а  $\varphi$  - угол падения света. Таким образом, выбором угла падения можно добиться более точного выполнения условия Брэгга для  $z$ -компоненты волнового вектора света.

На рис.1 представлены спектры отражения в области резонанса тяжелого экситона для двух СКЯ CdTe/Cd<sub>0,6</sub>Mg<sub>0,4</sub>Te. Спектры регистрировались при наклонном падении света на структуру ( $\varphi = 45^\circ$ ) в  $p$ -поляризации при  $T = 1,6 \text{ K}$  [1]. Спектр "брэгговской" СКЯ, период которой  $d = 1620 \text{ \AA}$  позволял близко подойти к выполнению условия Брэгга  $k_z d = 1,09\pi$ , показан на рис.1а. На рис.1б приведен спектр отражения "антибрэгговской" ( $kd = \pi/2$ ) структуры с  $d = 850 \text{ \AA}$  и  $k_z d = 0,57\pi$ . В спектрах обеих структур ярко выделяется резонансный контур экситонного отражения. Сопоставление спектров этих структур показывает, что как амплитуда, так и ширина контура экситонного отражения в "брэгговской" СКЯ существенно больше, чем в "анти-брэгговской" структуре.

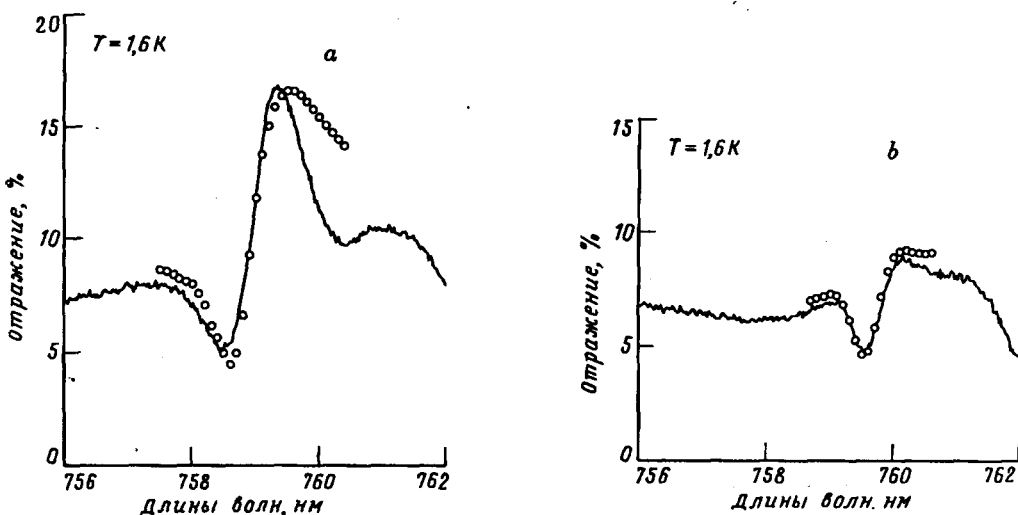


Рис.1. Спектры отражения при наклонном падении света ( $\varphi = 45^\circ$ ) от "брэгговской" СКЯ CdTe/Cd<sub>0,6</sub>Mg<sub>0,4</sub>Te с периодом  $d = 1620 \text{ \AA}$  (а) и "антибрэгговской" СКЯ с периодом  $d = 850 \text{ \AA}$  (б),  $L_z = 75 \text{ \AA}$ ,  $T = 1,6 \text{ K}$ . Точками показаны результаты расчета с параметрами: (а)  $\omega_0^{-1} = 759,1 \text{ нм}$ ,  $\hbar\Gamma = 0,85 \text{ мэВ}$ ,  $\hbar\Gamma_0 = 0,12 \text{ мэВ}$ ,  $l = 860 \text{ \AA}$  и (б)  $\omega_0^{-1} = 759,6 \text{ нм}$ ,  $\hbar\Gamma = 0,75 \text{ мэВ}$ ,  $\hbar\Gamma_0 = 0,14 \text{ мэВ}$ ,  $l = 300 \text{ \AA}$ . Показатель преломления света для Cd<sub>0,6</sub>Mg<sub>0,4</sub>Te,  $n = 2,64$ , брался из работы [8]

Как было показано в работе [5], световые волны, отраженные от каждой из одиночных ям в "брэгговской" СКЯ, суммируются на внешней поверхности структуры с одной и той же фазой, кратной  $2\pi$ . При этом коэффициент отражения света от такой структуры "складывается" из коэффициентов отражения

света от одиночных квантовых ям. В то же время, для "анти-брэгговской" структуры отраженные от одиночных квантовых ям волны суммируются на поверхности в противофазе, уменьшая тем самым результирующий коэффициент отражения.

В работе [4] было показано, что амплитудный коэффициент отражения от одиночной квантовой ямы определяется выражением

$$r_1 = \frac{i\Gamma_0}{\omega_0 - \omega - i(\Gamma_0 + \Gamma)}, \quad (1)$$

где  $\Gamma_0$  – радиационное затухание экситона,  $\Gamma$  – нерadiационное затухание,  $\omega_0$  – резонансная частота экситона. В СКЯ, подчиненных условиям Брэгга, амплитудный коэффициент отражения света равен

$$r_N = \frac{iN\Gamma_0}{\omega_0 - \omega - i(N\Gamma_0 + \Gamma)}, \quad (2)$$

где  $N$  – число квантовых ям [5]. Следовательно, в "брэгговской" СКЯ имеет место сильное увеличение коэффициента отражения света в области экситонного резонанса, связанное с  $N$ -кратным увеличением радиационного затухания экситона. Так, амплитуда контура экситонного отражения света должна увеличиваться с увеличением числа квантовых ям как  $N\Gamma_0/(\Gamma + N\Gamma_0)$  и при  $N \rightarrow \infty$  коэффициент отражения света в "брэгговской" СКЯ  $r_N \rightarrow 1$ . При этом полуширина контура экситонного отражения ( $\gamma$ ) в "брэгговской" структуре рассчитывается как:  $\gamma = \Gamma + (1 + (n - 1)/n + 1)N\Gamma_0$ , и превосходит ширину контура "анти-брэгговской" структуры при  $N\Gamma_0 \geq \Gamma$ . Как будет показано ниже, последнее условие хорошо выполняется в исследованных СКЯ.

Мы экспериментально подтвердили (см. рис.1) предсказанное теоретически увеличение амплитуды и ширины контура экситонного отражения в "брэгговских" гетероструктурах. Для детального количественного описания обнаруженного эффекта была проведена обработка спектров отражения по формулам работы [5]. Результаты обработки показаны на рис.1 точками. Параметры, использовавшиеся при расчете, приведены в подписи к рисунку. Отметим, что оба спектра хорошо описываются с близким набором параметров ( $\hbar\Gamma = 0,85$  мэВ,  $\hbar\Gamma_0 = 0,12$  мэВ для "брэгговской" СКЯ и  $\hbar\Gamma = 0,75$  мэВ,  $\hbar\Gamma_0 = 0,14$  мэВ – для "анти-брэгговской" структуры), что свидетельствует об адекватном описании теорией экспериментальных спектров.

Еще одно проявление когерентного взаимодействия света с периодической гетероструктурой, которое может наблюдаться в СКЯ при толщинах барьеров, близких к "брэгговским", связано с интерференцией световых волн, отраженных от каждой из одиночных квантовых ям и пришедших на поверхность структуры с фазой, не точно кратной  $2\pi$ . При этом в спектрах отражения таких структур могут наблюдаться очень узкие интерференционные особенности на достаточно широком контуре экситонного отражения (см. рис.3 в [5]). На рис.2 представлен спектр отражения при нормальном падении света ( $\varphi = 0$ ) от периодической структуры с десятью квантовыми ямами  $\text{CdTe}/\text{Cd}_{0,58}\text{Mg}_{0,42}\text{Te}$  с периодом  $d = 1585 \text{ \AA}$  ( $kd = 1,11\pi$ ) в области тяжелого экситона в квантовой яме. Обращает на себя внимание узкий пик в спектре на длине волны 752 нм. Происхождение этого узкого пика на фоне более широкого контура экситонного отражения света имеет явно интерференционную природу. Обработка

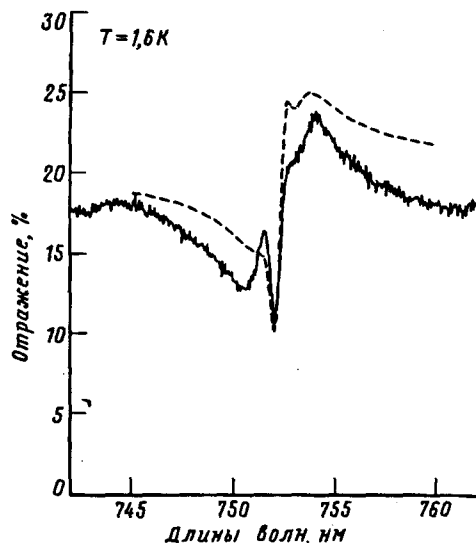


Рис.2. Спектр отражения при нормальном падении света ( $\varphi = 0^\circ$ ) от периодической  $\text{CdTe}/\text{Cd}_{0,58}\text{Mg}_{0,42}\text{Te}$  СКЯ, близкой к "брэгговской" с периодом  $d = 1585 \text{ \AA}$  ( $kd = 1,11\pi$ ) и  $L_x = 70 \text{ \AA}$ . Штриховая линия - расчет с параметрами:  $\omega_0^{-1} = 752,4 \text{ нм}$ ,  $\hbar\Gamma = 0,8 \text{ мэВ}$ ,  $\hbar\Gamma_0 = 0,17 \text{ мэВ}$ ,  $l = 830 \text{ \AA}$ ,  $n = 2,64$

этого спектра с параметрами  $\hbar\Gamma = 0,8 \text{ мэВ}$ ,  $\hbar\Gamma_0 = 0,17 \text{ мэВ}$  приведена на рис.2 штриховой линией.

Таким образом, в настоящей работе впервые исследованы спектры резонансного экситонного отражения света в периодических структурах с квантовыми ямами, удовлетворяющих условиям Брэгга. Обнаружено сильное возрастание коэффициента отражения света в таких структурах, вызванное конструктивной интерференцией света на поверхности образца, отраженного от каждой из одиночных квантовых ям в структуре. Исследованный эффект может представлять интерес для создания селективных узкополосных зеркал в микрорезонаторных полупроводниковых гетеролазерах [6, 7].

В заключение авторы выражают благодарность Е.Л.Ивченко, А.И.Несвижскому и С.Иорда (S.Jorda) за обсуждение результатов и фонду Фольксваген (Volkswagen Foundation) за поддержку работы.

1. E.L.Ivchenko, V.P.Kochereshko, P.S.Kopev et al., *Solid State Commun.* **70**, 529 (1989).
2. E.L.Ivchenko, A.V.Kavokin, V.P.Kochereshko et al., *Phys. Rev. B* **46**, 7713 (1992).
3. E.L.Ivchenko, A.V.Kavokin, V.P.Kochereshko et al., *Superlattices & Microstructures* **12**, 317 (1992).
4. Е.Л.Ивченко, ФТТ **33**, 2388 (1991).
5. Е.Л.Ивченко, А.И.Несвижский, С.Иорда, ФТТ **36**, 2118 (1994).
6. G.Björk, S.Mashida, Y.Yamamoto, and K.Igeta, *Phys. Rev. B* **44**, 669 (1991).
7. V.Savona, L.C.Andreani, P.Schwendimann, and A.Quattropani, *Solid State Commun.* **93**, 733 (1995).
8. H.J.Lugauer, F.Fischer, T.Litz et al., *Semicond. Sci. Technol.* **9**, 1567 (1994).