

## Экситонные спектры полупроводниковых сверхрешеток в параллельном магнитном поле

© Н.Н. Сибельдин, М.Л. Скориков, В.А. Цветков

Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, 117924 Москва, Россия

Исследованы спектры низкотемпературной фотолуминесценции (ФЛ) и возбуждения ФЛ (ВФЛ) полупроводниковых сверхрешеток (СР) GaAs/AlGaAs, отличающихся шириной потенциальных барьеров ( $b = 20, 30, 50$  и  $200 \text{ \AA}$ ), т.е. степенью туннельной связи между квантовыми ямами (КЯ), в магнитном поле напряженностью до 5 Т, ориентированном параллельно и перпендикулярно слоям структуры. Наблюдаемые в параллельном магнитном поле изменения качественного характера в спектрах ВФЛ при увеличении туннельной прозрачности барьеров отражают переход от квазидвумерного к квазитрехмерному электронному спектру при формировании минизон в СР. В спектрах ВФЛ СР с  $b = 50 \text{ \AA}$  при увеличении напряженности параллельного магнитного поля обнаружено возникновение новой линии, отсутствующей в перпендикулярном поле, на фиолетовом крыле линии возбуждения пространственно-непрямых экситонов. Возгорание аналогичной линии также наблюдалось в спектрах ФЛ. Показано, что линия люминесценции непрямых экситонов может подавляться магнитным полем как параллельной, так и перпендикулярной ориентации.

1. Свойства экситонов в симметричных системах связанных КЯ и СР представляют значительный интерес и не случайно привлекают внимание исследователей в последние годы. Как известно, в СР происходит переход от двумерного к трехмерному характеру экситонов при увеличении туннельной прозрачности барьеров [1]. Природа экситонов в таких системах зависит от соотношения между энергией связи экситона  $E_{ex}$  и суммарной шириной электронной и дырочной минизон  $\Delta$ . В частности, при  $\Delta < E_{ex}$  в СР возможно формирование пространственно-непрямых экситонов, образованных электронами и дырками, находящимися в соседних КЯ (например, [2]).

Соотношением между  $E_{ex}$  и  $\Delta$  в СР можно управлять, воздействуя на структуру магнитным полем. Магнитное поле, ориентированное перпендикулярно плоскости структуры, увеличивает энергию связи экситона, не влияя на одночастичные сверхрешеточные состояния.

Магнитное поле, параллельное слоям структуры, радикально изменяет одноэлектронные состояния и энергетический спектр СР [3]. В слабых полях СР ведет себя как объемный кристалл с анизотропной эффективной массой: минизона разбивается на подзоны Ландау. В полях, превосходящих  $H^* = (\hbar c / ea^2) \cdot (m/M)^{1/2}$  (где  $m$  — эффективная масса в плоскости КЯ,  $M \cong 2\hbar^2/a^2\Delta$  — эффективная масса вдоль оси СР,  $a$  — период СР), минизона разрушается и СР распадается на изолированные КЯ.

2. В настоящей работе были исследованы СР GaAs/Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As с ширинами КЯ  $w = 80 \text{ \AA}$  и ширинами барьеров  $b = 20, 30, 50$  и  $200 \text{ nm}$ . ФЛ возбуждалась излучением перестраиваемого Ti-сапфирового лазера. Он же использовался для измерений спектров ВФЛ; при этом детектировалось излучение, отвечающее длинноволновому крылу линии люминесценции экситонов с тяжелыми дырками. Все измерения проводились при температуре 2 К.

3. Общими особенностями спектров ВФЛ всех образцов являются интенсивные линии, связанные с переходами в основное состояние экситонов с тяжелой и легкой дырками ( $HH$  и  $LH$  соответственно, рис. 1). На большинстве спектров наблюдается также достаточно резкий край непрерывного спектра, обусловленный поглощением при межзонных переходах электронов из зоны тяжелых дырок. Переход в первое возбужденное состояние  $HH$ -экситона, как правило, проявляется только в магнитном поле.

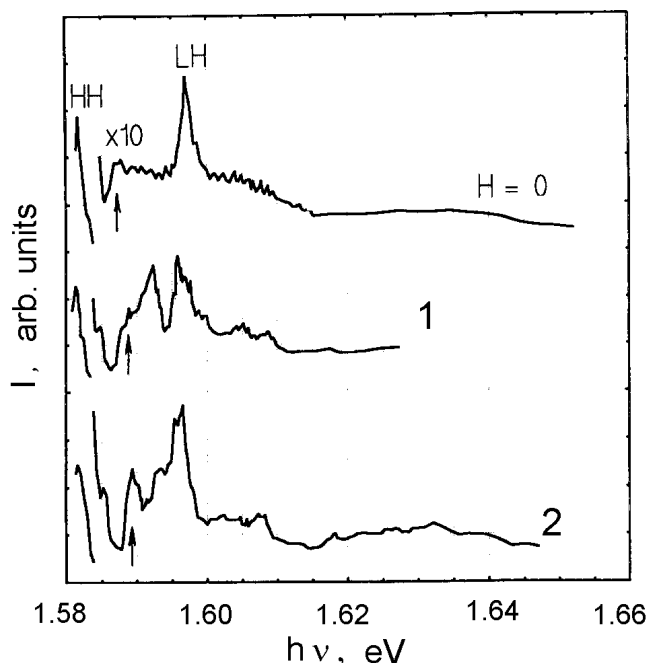
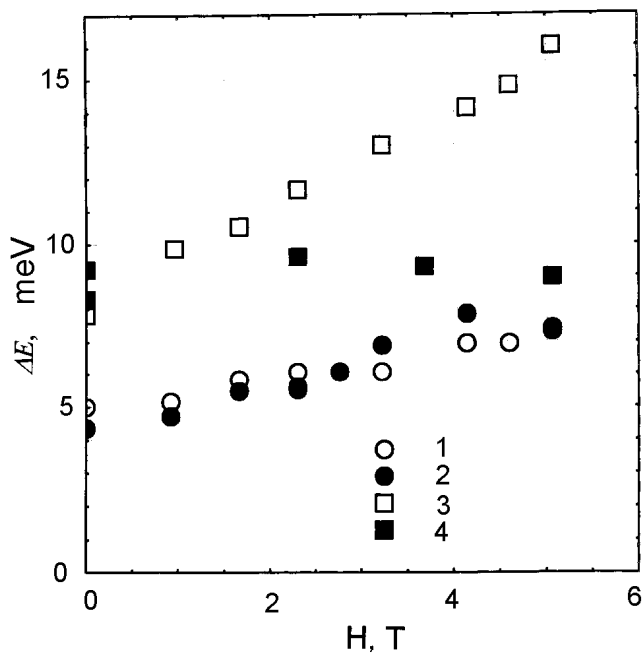


Рис. 1. Спектры ВФЛ сверхрешетки с  $b = 20 \text{ \AA}$  в параллельном (1) и перпендикулярном (2) слоям магнитном поле напряженностью  $H = 51 \text{ kOe}$ . Стрелками отмечены  $2s$ -линии  $HH$ -экситона.



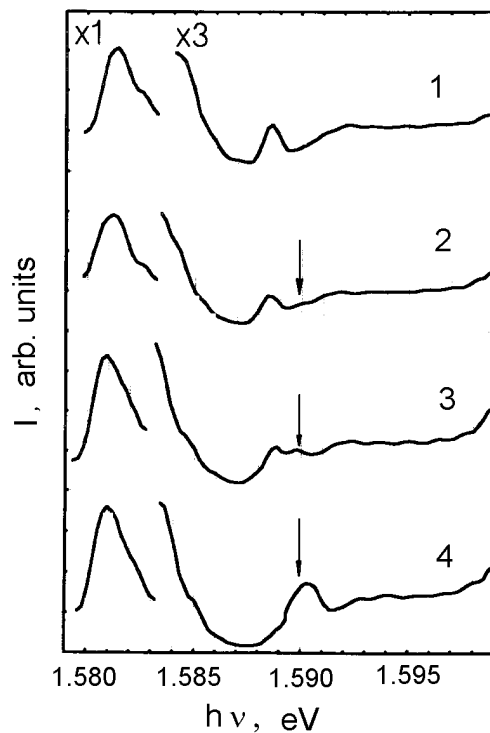
**Рис. 2.** Зависимости энергетического расстояния между первым возбужденным и основным уровнями прямого  $HH$ -экситона от магнитного поля в образцах с  $b = 20$  (1, 2) и  $200 \text{ \AA}$  (3, 4) при параллельном (2, 4) и перпендикулярном (1, 3) слоям магнитном поле.

Параллельное магнитное поле не оказывает заметного воздействия на спектр ВФЛ образца с  $b = 200 \text{ \AA}$ , поскольку в этом образце из-за малой туннельной прозрачности барьеров КЯ изолированы друг от друга, а магнитная длина  $l < w$  во всем диапазоне напряженностей поля. В поле, направленном вдоль оси роста структуры, спектр ВФЛ имеет обычный вид, отвечающий спектру квазидвумерных магнитоэкситонов. В этом случае изменение с ростом поля энергетического расстояния  $\Delta E$  между первым возбужденным ( $2s$ ) и основным ( $1s$ ) состояниями прямого  $HH$ -экситона (рис. 2) в достаточно сильном поле отражает в основном изменение расщепления между двумя нижними уровнями Ландау.

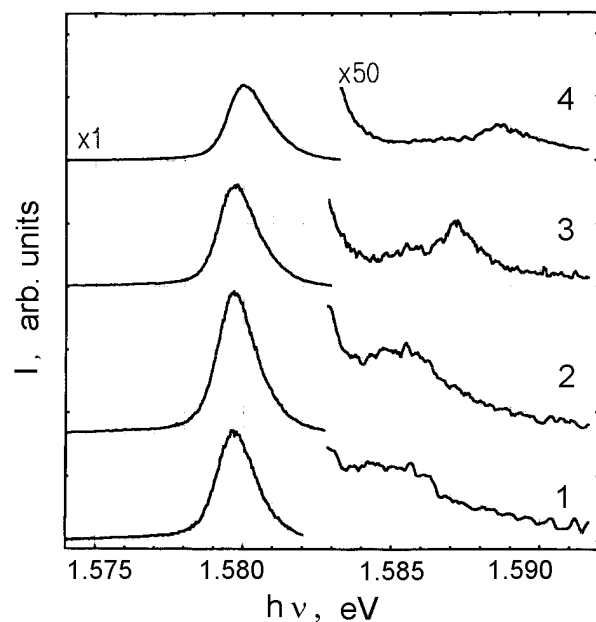
По мере уменьшения толщины барьеров усиливается влияние параллельного магнитного поля на спектры ВФЛ. В образцах с  $b = 30$  и  $20 \text{ \AA}$  экситоны квазитрехмерны, на что указывает качественно схожее поведение спектров ВФЛ в параллельном и перпендикулярном магнитном поле (рис. 1) и примерно одинаковое изменение  $\Delta E$  с ростом напряженности поля (рис. 2).

По-видимому, в исследованном диапазоне магнитных полей условие  $H > H^*$  надежно выполняется только для СР с  $b = 50 \text{ \AA}$  (оценка при  $b = 20 \text{ \AA}$  дает  $H^* \approx 7 \text{ Т}$ ). Однако, в этом образце экситоны практически квазидвумерны уже в отсутствие поля ( $E_{\text{сх}}$  более  $8 \text{ meV}$ ), и наблюдающиеся изменения в спектрах ВФЛ в параллельном поле не позволяют в настоящий момент сделать заключение о дальнейшей двумеризации (разрушении минизоны) электронного спектра этой СР.

4. В спектрах ВФЛ и ФЛ образцов с  $b = 30$  и  $50 \text{ \AA}$ , помимо линий прямого ( $D$ ) экситона также наблюдались линии, связанные с пространственно-непрямыми ( $I$ )  $HH$ -экситонами [2].



**Рис. 3.** Возникновение новой линии (отмечена стрелкой) в спектре ВФЛ образца с  $b = 50 \text{ \AA}$  при увеличении напряженности параллельного поля.  $H_{\parallel}$  (кОе): 1 — 0, 2 — 23, 3 — 32, 4 — 51.



**Рис. 4.** Спектры люминесценции сверхрешетки с  $b = 30 \text{ \AA}$  в параллельном магнитном поле.  $H_{\parallel}$  (кОе): 1 — 0, 2 — 9, 3 — 32, 4 — 51.

В спектрах ВФЛ образца с  $b = 50 \text{ \AA}$  в параллельном слое магнитном поле линия  $I$ -экситона (как и спектр в целом) заметно не смещается, а на ее высокоэнергетическом крыле возникает новая линия, которая при больших напряженностях поля по интенсивности превосходит исходную  $I$ -линию (рис. 3). В перпендикулярном поле с ростом его напряженности  $I$ -линия смещается в сторону больших энергий [2], однако возгорания новой линии не происходит.

В спектрах ФЛ этого образца как в параллельном, так и в перпендикулярном поле линия  $I$ -экситона смещается в сторону больших энергий, уширяется и уменьшается в несколько раз по интенсивности.

В спектрах ФЛ образца с  $b = 30 \text{ \AA}$  линия  $I$ -экситона в нулевом поле едва видна на коротковолновом крыле основной  $D$ -линии. При увеличении напряженности параллельного слое магнитного поля,  $I$ -линия вначале возрастает по интенсивности, а на ее высокоэнергетическом краю появляется еще одна линия излучения (рис. 4). При дальнейшем увеличении поля обе эти линии уменьшаются по интенсивности, так что при наибольших напряженностях поля в спектре помимо  $D$ -линии остается только наиболее коротковолновая компонента. В перпендикулярном поле аналогичные явления в спектре ФЛ выражены значительно менее отчетливо.

Настоящая работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 96-02-18237) и Министерства науки РФ в рамках программы "Физика твердотельных наноструктур" (проект № 97-1050) и "Фундаментальная спектроскопия" (проект № 2.6).

## Список литературы

- [1] A. Chomette, B. Labmert, B. Deveaud, F. Clerot, A. Regreny, G. Bastard. *Europhys. Lett.* **4**, 4, 461 (1987).
- [2] А.И. Тартаковский, В.Б. Тимофеев, В.Г. Лысенко, Д. Биркедал, Й. Хвам. *ЖЭТФ*, в печати (1997).
- [3] А.М. Бережковский, Р.А. Сурис. *ЖЭТФ* **86**, 1, 193 (1984).