

УДК 621.315.592

## Экспериментальное наблюдение гигантского зеемановского расщепления уровня легкой дырки в квантовой яме GaAs/AlGaAs

© П.В. Петров, Ю.Л. Иванов<sup>†</sup>

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

(Получена 25 сентября 2012 г. Принята к печати 17 октября 2012 г.)

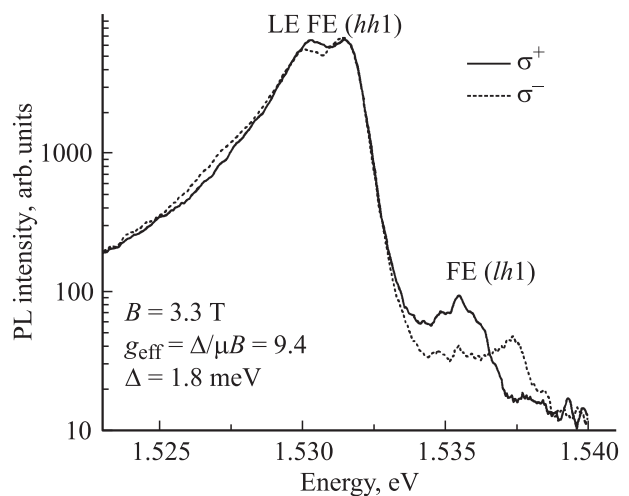
Экспериментально, методом измерения поляризованной фотолюминесценции в магнитном поле, измерена величина парамагнитного расщепления уровня легкой дырки в квантовой яме GaAs/AlGaAs. Обнаружено ранее предсказанное теоретически явление гигантского расщепления, приводящее к увеличению  $g$ -фактора легкой дырки до 9.4.

Более 25 лет исследуются свойства экситона в квантовых ямах GaAs/AlGaAs. Интерес к этим исследованиям обусловлен квантово-размерным расщеплением валентной зоны GaAs/AlGaAs, в результате чего наблюдается экситон как с тяжелой дыркой, так и с легкой. Обсуждаются такие характеристики экситона, как энергия связи, эффективная масса, спиновое расщепление и  $g$ -фактор. Основным методом определения этих характеристик является исследование зависимости характерных энергий от магнитного поля. Так, анализ диамагнитного сдвига линий экситонной фотолюминесценции позволил определить эффективную массу и энергию связи экситона с тяжелой дыркой [1], выявил влияние ширины квантовой ямы на диамагнитный сдвиг и величину  $g$ -фактора [2]. В работе [3] показано, что диамагнитный сдвиг энергии экситона с легкой дыркой — меньше, чем с тяжелой, что приводит к явлению антипересечения в полях около 30 Тл. В работе [4] экспериментально проанализировано явление смешивания экситонных состояний с легкой и тяжелой дырками, что приводит к нелинейному характеру зеемановского расщепления (см. рис. 2 в работе [4]). Анализ зеемановского расщепления легкой дырки позволил определить величину  $g$ -фактора легких дырок, который оказался сильно зависящим от магнитного поля с максимальной величиной  $g = 4$  в поле 5 Тл. Недавно вышла теоретическая работа [5] с расчетом величины  $g$ -фактора легких дырок в зависимости от ширины квантовых ям GaAs/AlGaAs, в которой учитывается нелинейный характер зеемановского расщепления легких дырок в сравнительно слабых магнитных полях. Величина  $g$ -фактора оказалась аномально большой (более 10). Наши экспериментальные данные в отношении  $g$ -фактора легких дырок приближаются к этим значениям.

Исследовались спектры фотолюминесценции чистой структуры GaAs/Al<sub>0.36</sub>Ga<sub>0.64</sub>As, состоящей из 5 квантовых ям шириной 180 Å. Эксперимент проводился в геометрии Фарадея в магнитном поле до 3.6 Тл. Температура образца составляла 4.2 К. Возбуждение проводилось полупроводниковым лазером с энергией кванта 1.88 эВ.

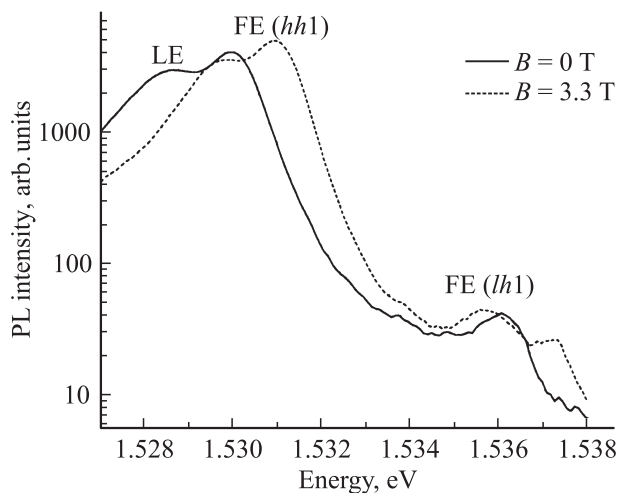
Используемый состав барьеров обеспечивал их прозрачность для возбуждающего излучения. Спектры анализировались монохроматором ДФС-12 и регистрировались фотоумножителем ФЭУ-62 в режиме счета фотонов. Энергетическое расщепление уровня легкой дырки исследовалось путем измерения спектров фотолюминесценции с  $\sigma^+$  и  $\sigma^-$  поляризациями в магнитном поле. Также были проведены измерения неполяризованной фотолюминесценции в магнитном поле для определения диамагнитных сдвигов линий. Неполяризованная люминесценция измерялась при подведении возбуждения и снятия люминесценции через волновод, что позволило улучшить соотношение сигнал-шум.

Типичная зависимость интенсивности фотолюминесценции в двух противоположных поляризациях при  $H = 3.3$  Тл представлена на рис. 1. Неполяризованные спектры приведены на рис. 2. В спектрах присутствуют три основных компонента: линия рекомбинации экситона, локализованного на неоднородностях ширины квантовой ямы, а также две линии рекомбинации свободных

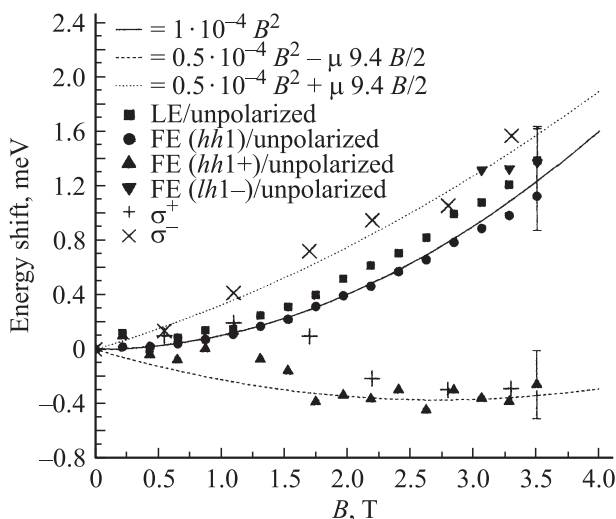


**Рис. 1.** Спектры фотолюминесценции двух направлений циркулярной поляризации. На рисунке обозначены: LE — локализованный экситон с тяжелой дыркой, FE — свободный экситон с тяжелой дыркой, FE  $1h$  — зееман-расщепленный экситон с легкой дыркой.

<sup>†</sup> E-mail: Yuri.Ivanov@mail.ioffe.ru



**Рис. 2.** Спектры неполяризованной фотолюминесценции в нулевом магнитном поле и в поле 3.3 Тл. На рисунке обозначены: LE — локализованный экситон с тяжелой дыркой, FE — свободный экситон с тяжелой дыркой, FE  $lh1$  — зееман-расщепленный экситон с легкой дыркой.



**Рис. 3.** Энергетические сдвиги линий фотолюминесценции в зависимости от магнитного поля. LE — локализованный экситон с тяжелой дыркой, FE — свободный экситон с тяжелой дыркой, FE  $lh(+/-)$  — правая и левая поляризации экситона с легкой дыркой.

экситонов, образованных тяжелой и легкой дырками. Такие спектры снимались в диапазоне магнитных полей от 0 до 3.6 Тл с интервалом 0.22 Тл. Их обработка позволила получить картину смещения пиков фотолюминесценции в магнитном поле, представленную на рис. 3. Как видно, характер смещения пиков и зеемановское расщепление подобны тому, что наблюдается в [4]. Однако величина зеемановского расщепления в нашем случае в поле  $H = 3.3$  Тл в 2.6 раза больше. Полученный результат можно объяснить следующим образом. Известно, что в квантовых ямах GaAs/AlGaAs первый уровень размерно-

го квантования легкой дырки находится вблизи оптически неактивного второго уровня тяжелой дырки. Как было теоретически показано в работе [5], в случае сближения этих уровней происходит перенормировка  $g$ -фактора легкой дырки, ведущая к его аномальному увеличению. Исходя из этого результата можно предложить следующее объяснение экспериментальных данных. В относительно слабых полях уровни  $lh1$  и  $hh2$  не смешиваются,  $g$ -фактор легкой дырки мал, и в эксперименте наблюдается диамагнитный сдвиг, сопровождаемый слабым зеемановским расщеплением. В силу того что эффективные массы в подзонах  $lh1$  и  $hh2$  отличаются, отличны и их диамагнитные сдвиги, т.е. в определенном магнитном поле возможно возникновение индуцированного полем пересечения подуровней. В этот момент начинает работать механизм, теоретически описанный в [5], который и приводит к аномальному увеличению наблюдаемого  $g$ -фактора в определенном диапазоне магнитных полей. В [5] указано, что величина  $g$ -фактора легкой дырки должна сильно зависеть от ширины квантовой ямы, высоты барьеров, а также характера смешивания подзон на интерфейсах ямы. В наших экспериментальных данных наблюдается увеличение  $g$ -фактора до 9.4 в магнитных полях 2 Тл. Возрастание  $g$ -фактора в наших результатах по сравнению с результатами работы [5], по-видимому, должно объясняться различием параметров структур.

Работа выполнена при поддержке фонда РФФИ (грант 12-02-00826-а) и гранта президента РФ НШ (3008.2012.2).

## Список литературы

- [1] W. Ossau, B. Jäkel, E. Bangert, G. Landwehr. *Surf. Sci.*, **174**, 188 (1986).
- [2] D.C. Reynolds. *Phys. Rev. B*, **35** (9), 4515 (1987).
- [3] Yongmin Kim, Kyu-Seok Lee, C.H. Perry. *Appl. Phys. Lett.*, **84**, (5), 738 (2004).
- [4] В.Б. Тимофеев, М. Байер, А. Форхел, М. Потемский. *Письма ЖЭТФ*, **64**, (1), 52 (1996).
- [5] M.V. Durnev, M.M. Glazov, E.L. Ivchenko. *Physica E*, **44**, 797 (2012).

Редактор Л.В. Беляков

## Experimental observation of light holes giant Zeeman splitting in GaAs/AlGaAs quantum well

P.V. Petrov, Yu.L. Ivánov

Ioffe Physico-technical institute,  
Russian Academy of Science,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** We report here results of light holes Zeeman splitting measurements carried out in GaAs/AlGaAs quantum wells by means of magneto-photoluminescence. We find out that the  $g$ -factor of light hole is significantly increased in the agreement with theoretical predictions and amount to 9.4.