

# Циклотронный резонанс дырок в гетероструктурах InGaAs/GaAs с квантовыми ямами в квантующих магнитных полях

© А.В. Иконников, К.Е. Спирин<sup>¶</sup>, В.И. Гавриленко, Д.В. Козлов, О. Драченко\*, Н. Schneider\*, М. Helm\*

Институт физики микроструктур Российской академии наук,  
603950 Нижний Новгород, Россия

\* Dresden High Magnetic Field Laboratory and Institute of Ion-Beam Physics and Materials Research,  
Forschungszentrum Dresden-Rossendorf, P.O.Box 510119,  
01314 Dresden, Germany

(Получена 8 апреля 2010 г. Принята к печати 8 апреля 2010 г.)

Исследованы спектры циклотронного резонанса дырок в селективно-легированных гетероструктурах InGaAs/GaAs с квантовыми ямами в импульсных магнитных полях до 50 Тл при 4.2 К. Подтвержден обнаруженный ранее эффект инвертированного (по сравнению с результатами одночастичного расчета уровней Ландау) соотношения интегральных интенсивностей двух расщепившихся компонент линии циклотронного резонанса, связываемый с эффектами обменного взаимодействия дырок. Обнаружено, что на восходящей и нисходящей ветвях импульса магнитного поля соотношения интенсивностей компонент линии циклотронного резонанса сильно различаются, что может быть связано с большим временем спиновой релаксации дырок между двумя нижними уровнями Ландау, составляющим десятки миллисекунд.

## 1. Введение

Напряженные многослойные структуры на основе InGaAs/GaAs представляют интерес как для фундаментальных, так и для прикладных исследований. На основе таких структур могут быть созданы СВЧ транзисторы, ячейки солнечных батарей и инфракрасные лазеры. Одной из нерешенных фундаментальных проблем является определение зонного спектра материала, в котором наименее изученным остается энергетический спектр валентной зоны. Прямым методом изучения энергетического спектра носителей является метод циклотронного резонанса (ЦР), который позволяет определять эффективные массы носителей и исследовать непараболичность зоны на масштабе энергии Ферми или энергии циклотронных переходов в квантующих магнитных полях. Исследованию ЦР дырок в селективно-легированных гетероструктурах InGaAs/GaAs с квантовыми ямами (КЯ) было посвящено несколько работ. В работе [1] исследовался ЦР в сравнительно слабых магнитных полях в нескольких образцах с разной концентрацией дырок, что позволило установить зависимость эффективной массы от энергии Ферми. В работах [2,3] исследования проводились в квантующих магнитных полях до 17 Тл, где фактор заполнения уровней Ландау в исследованных образцах составлял  $\nu < 2$ . Во всех этих работах доля индия в твердом растворе  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  была  $x \approx 0.2$ . Однако, несмотря на то что ширина наблюдаемой линии ЦР была уже рассчитанного расстояния между энергиями циклотронных переходов с двух нижних уровней Ландау, ожидаемого расщепления линии обнаружить не удалось. Это расщепление было обнаружено только в полях свыше 20 Тл в выполненной нашими группами работе [4]. Измерения проводились в импульсных магнитных полях до 50 Тл, а в качестве источников излучения использовались лазер на свободных

электронах, газовые субмиллиметровые лазеры и квантовые каскадные лазеры (ККЛ) терагерцового диапазона. Было установлено, что положения двух компонент расщепившейся линии ЦР дырок в КЯ InGaAs очень хорошо согласуются с результатами расчета уровней Ландау с использованием гамильтониана Латтинжера  $4 \times 4$  при линейной интерполяции параметров Латтинжера от GaAs к InAs. Вместе с тем в работе [4] было обнаружено инвертированное по сравнению с расчетом соотношение интегральных интенсивностей расщепившейся линии ЦР. Фактор  $\nu$  в резонансных полях составлял величину  $< 1$ , но расчетное расщепление двух нижних уровней Ландау было сопоставимо с  $k_B T$  ( $k_B$  — постоянная Больцмана, температура  $T = 4.2$  К). Оказалось, что интегральная интенсивность перехода с нижнего (в соответствии с расчетом) уровня Ландау дырок  $0s$  заметно меньше, чем интенсивность перехода с вышележащего уровня  $3a$  (см. рис. 2 из работы [4]). Было высказано предположение, что эта особенность может быть связана с обменной перенормировкой параметра Латтинжера  $k$ , ответственного за спиновое расщепление в магнитном поле (аналог  $g$ -фактора для электронов). Цель настоящей работы — проведение дальнейшего детального исследования спектров ЦР дырок в сильных магнитных полях с использованием других образцов с аналогичными параметрами, отличающихся уровнем легирования. Измерения проводились в импульсных магнитных полях в Дрезденской лаборатории сильных магнитных полей (HLD) с использованием в качестве источников излучения ККЛ терагерцового диапазона.

## 2. Эксперимент

Исследуемые структуры InGaAs/GaAs были псевдоморфно выращены на полуизолирующих подложках GaAs (100) методом металл-органической газофазной эпитаксии. В таких структурах слои InGaAs оказываются

<sup>¶</sup> E-mail: Spirink@ipm.sci-nnov.ru

Параметры исследуемых образцов InGaAs/GaAsP при 4.2 К

Образец	$n_s, \text{см}^{-2}$	$\mu, \text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$
5805	$4.2 \cdot 10^{11}$	5400
5807	$3.2 \cdot 10^{11}$	12400

двуосно сжатыми в плоскости роста структуры, что приводит к расщеплению подзон легких и тяжелых дырок, в результате чего продольные (в плоскости слоя) массы дырок в нижней подзоне размерного квантования оказываются в несколько раз меньше эффективной массы тяжелых дырок. Последовательность роста и параметры слоев были такими же, как в образце 4722, исследовавшемся в работе [4]. Образцы содержали 50 КЯ  $\text{In}_{0.14}\text{Ga}_{0.86}\text{As}$  шириной 70 Å, разделенных барьерными слоями GaAs толщиной 500 Å. В отличие от образца #4722 в середине барьерных слоев GaAs были сделаны тонкие вставки из GaAsP для компенсации напряжений в структуре, что не должно приводить к изменению энергетического спектра дырок в КЯ InGaAs. Проводилось  $\delta$ -легирование барьерных слоев углеродом на расстоянии 150 Å от каждого интерфейса. Для всех образцов измерялись удельное сопротивление и постоянная Холла при  $T = 4.2$  К, из которых были определены концентрация,  $n_s$ , и подвижность,  $\mu$ , дырок в КЯ InGaAs (см. таблицу).

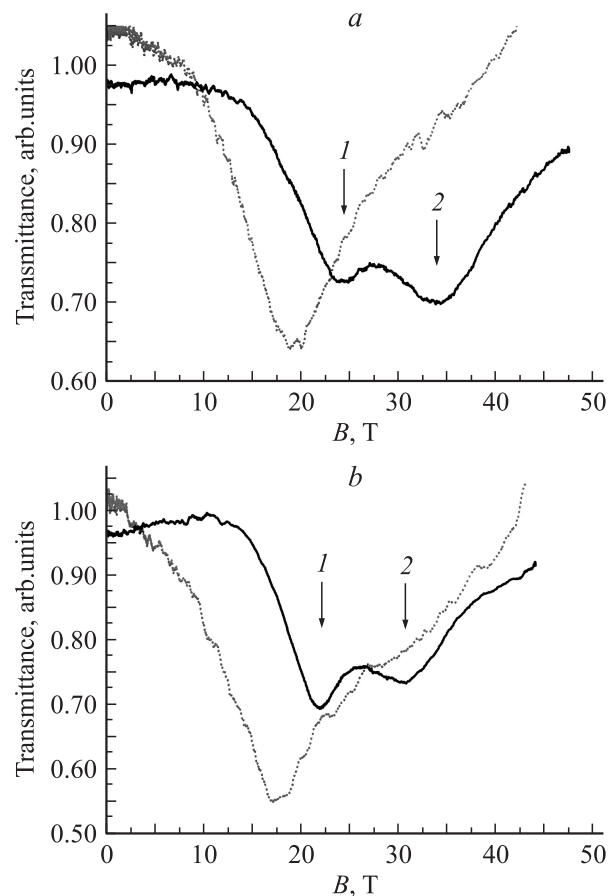
Исследования ЦР проводились в импульсных магнитных полях до 50 Тл. Длительность импульса магнитного поля составляла  $\sim 150$  мс. Импульсный соленоид располагался в сосуде с жидким азотом. Внутри соленоида находился криостат с жидким гелием, в котором располагалась вставка с образцом, источником излучения (ККЛ с длиной волны 75 или 100 мкм) и примесным фотоприемником Ge : Ga. Использовалась конфигурация Фарадея, ось структур была параллельна направлению магнитного поля  $\mathbf{B}$ . Все измерения проводились при  $T = 4.2$  К. При измерениях в компьютере записывались значения магнитного поля и сигнала на фотоприемнике как функции времени.

### 3. Результаты и обсуждение

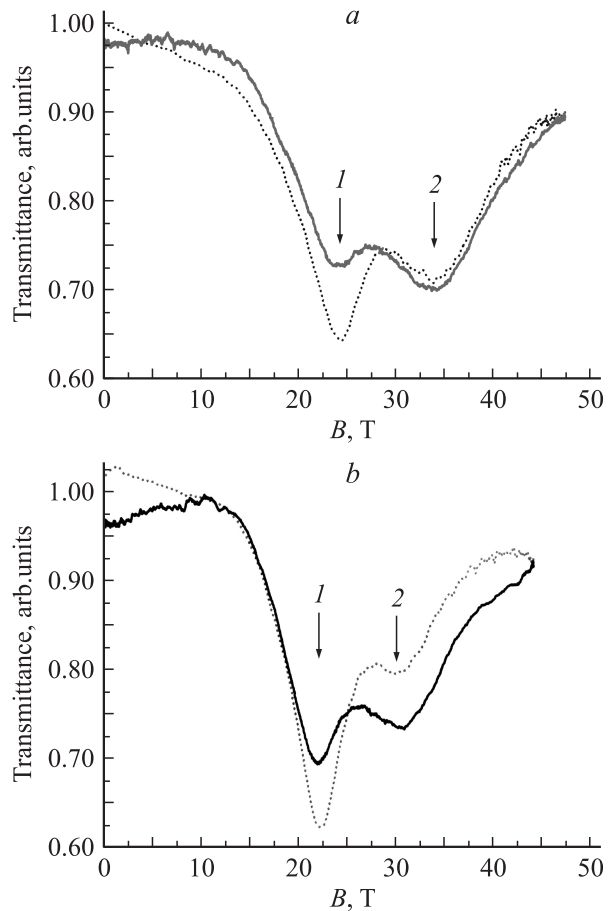
На рис. 1 представлены спектры ЦР в исследуемых гетероструктурах InGaAs/GaAs, измеренные при двух различных длинах волн излучения  $\lambda$  на нисходящей ветви импульса магнитного поля (как в работе [4]). Видно, что при  $\lambda = 100$  мкм в обоих образцах в спектре наблюдается одна линия ЦР, в то время как при  $\lambda = 75$  мкм — две линии (1 и 2). Для обоих образцов резонансным магнитным полям соответствуют значения фактора заполнения  $\nu < 1$ . Отметим, что образцу 5805 соответствуют большие значения резонансных магнитных полей по сравнению с образцом 5807. Сопоставление с соответствующими данными для образца 4722 [4] показывает, что положения линий 1 (переход  $0s \rightarrow 1s$ ,

см. [4]) в образцах 4722 и 5205 совпадают, в то время как положения линий 2 (переход  $3a \rightarrow 4a$ ) — нет: для образца 5805 наблюдается меньшее расщепление линий 1 и 2 по сравнению с 4722. Все эти различия могут быть связаны как с неточностью воспроизведения в разных ростовых опытах толщины и состава слоев квантовых ям InGaAs, так и с эффектами обменного взаимодействия. Этот вопрос требует дополнительного исследования.

Обратимся теперь к интегральным интенсивностям линий ЦР. Как и в образце 4722, в образце 5805 наблюдается инвертированное соотношение интенсивностей линий 1 и 2 (интенсивность линий 2 в несколько раз больше, чем линии 1), а в образце 5807 они одного уровня, в то время как в соответствии с одночастичным расчетом в спектрах должна доминировать линия 1, соответствующая переходу с нижнего уровня  $0s$ . Неожиданный результат был получен при анализе соотношения интенсивностей линий 1 и 2 на восходящей и нисходящей ветвях импульса магнитного поля. Как видно из рис. 2, интенсивность линии 1 заметно выше на восходящей ветви магнитного поля, а на нисходящей ветви она „перекачивается“ в интенсивность линии 2.



**Рис. 1.** Спектры циклотронного резонанса в образцах 5805 (a) и 5807 (b), измеренные на нисходящих ветвях импульсов магнитного поля при  $\lambda = 75$  (сплошная линия) и 100 мкм (пунктирная).



**Рис. 2.** Спектры циклотронного резонанса в образцах 5805 (*a*) и 5807 (*b*), измеренные при  $\lambda = 75$  мкм на восходящей (пунктирная линия) и нисходящей (сплошная) ветвях импульсного магнитного поля.

Если допустить, что наблюдаемое различие связано с неравномерностью распределения дырок между двумя нижними уровнями —  $0s$  (с моментом  $-3/2$ ) и  $3a$  (с моментом  $+3/2$ ), то этот факт подтверждает сделанное в работе [4] предположение об инвертированном вследствие обменных эффектов взаимном расположении уровней Ландау  $0s$  и  $3a$  (уровень  $3a$  становится самым нижним) по сравнению с результатами одночастичного расчета. Ввод поля до максимального значения осуществляется за время  $\sim 10$  мс, а вывод — за время  $\sim 130$  мс. Таким образом, наблюдаемое различие интенсивностей может свидетельствовать о неожиданном большом времени спиновой релаксации в дырочной системе, составляющем десятки миллисекунд. На восходящей ветви магнитного поля фактор заполнения уровней Ландау  $\nu$  уменьшается ( $\nu = 1$  для поверхностной концентрации  $n_s = 2.4 \cdot 10^{11}$  см $^{-2}$  в поле 10 Тл) и в какой-то момент все дырки оказываются на двух нижних уровнях Ландау, релаксация между которыми затруднена вследствие большой разницы моментов, равной 3. К моменту достижения резонансного магнитного поля на нисходящей ветви поля в системе происхо-

дит релаксация и интегральная интенсивность линии 2 возрастает. Подобный эффект наблюдался в работе [5] для электронов в гетероструктуре InAs/AlSb с КЯ, однако там характерные времена составляли несколько микросекунд.

Таким образом, в настоящей работе исследованы спектры ЦР дырок в селективно-легированных гетероструктурах InGaAs/GaAs с квантовыми ямами в импульсных магнитных полях при  $T = 4.2$  К с использованием ККЛ, работающих на частотах 3 и 4 ТГц, в качестве источников излучения. Подтвержден обнаруженный в работе [4] эффект инвертированного (по сравнению с результатами одночастичного расчета уровней Ландау) соотношения интегральных интенсивностей двух расщепившихся в полях свыше 20 Тл компонент ЦР, связываемый с эффектами обменного взаимодействия носителей. Обнаружено, что на восходящей и нисходящей ветвях импульса магнитного поля соотношения интенсивностей компонент линии ЦР сильно различаются, что может быть связано с большим временем спиновой релаксации дырок между двумя нижними уровнями Ландау, составляющим десятки миллисекунд.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 09-02-00752), Российской академии наук и ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“. Исследования в HLD выполнены при поддержке со стороны EuroMagNET II в рамках контракта ЕС 228043.

Авторы признательны Б.Н. Звонкову за предоставленные образцы структур InGaAs/GaAs и В.Я. Алешкину за полезные обсуждения.

## Список литературы

- [1] S.Y. Lin, C.T. Liu, D.C. Tsui, E.D. Jones, L.R. Dawson. Appl. Phys. Lett., **55**, 666 (1989).
- [2] D. Lancefield, W. Batty, C.G. Crookes, E.P. O'Reilly, A.R. Adams, K.P. Homewood, G. Sundaram, R.J. Nicholas, M. Emeny, C.R. Whitehouse. Surf. Sci., **229**, 122 (1990).
- [3] R.J. Warburton, R.J. Nicholas, L.K. Howard, M.T. Emeny. Phys. Rev. B, **43**, 14 124 (1991).
- [4] O. Drachenko, D.V. Kozlov, V. Ya. Aleshkin, V.I. Gavrilenko, K.V. Maremyanin, A.V. Ikonnikov, B.N. Zvonkov, M. Goiran, J. Leotin, G. Fasching, S. Winnerl, H. Schneider, J. Wosnitza, M. Helm. Phys. Rev. B, **79**, 073 301 (2009).
- [5] H. Arimoto, N. Miura, R.A. Stradling. Phys. Rev. B, **67**, 155 319 (2003).

Редактор Л.В. Шаронова

## Hole cyclotron resonance in InGaAs/GaAs heterostructures with quantum wells in high magnetic fields

*A.V. Ikonnikov, K.E. Spirin, V.I. Gavrilenko, D.V. Kozlov, O. Drachenko\*, H. Schneider\*, M. Helm\**

Institute for Physics of Microstructures,  
Russian Academy of Sciences,  
603905 Nizhny Novgorod, Russia

\*Dresden High Magnetic Field Laboratory and Institute  
of Ion-Beam Physics and Materials Research,  
Forschungszentrum Dresden-Rossendorf,  
P.O. Box 510119,  
01314 Dresden, Germany

**Abstract** Hole cyclotron resonance spectra in selectively doped InGaAs/GaAs quantum well heterostructures in pulsed magnetic fields up to 50 T at 4.2 K have been investigated. The earlier observed effect of inverted (if compared with single particle calculation of hole Landau levels) relation of spectral weights of two split components of the cyclotron resonance line that is related with hole–hole exchange interaction has been confirmed. The relation of the two components spectral weight at the ascending and descending parts of the magnetic field pulse has been shown to differ significantly that could result from a large hole spin relaxation time of the order of tens milliseconds.