

## Оптическое детектирование магнитного резонанса и антикроссинга уровней экситонов в квантовых ямах и сверхрешетках

© П.Г. Баранов, Н.Г. Романов

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

E-mail: nikolai.romanov@pop.ioffe.rssi.ru

Приведены результаты последних исследований экситонной и электронно-дырочной рекомбинаций в квантовых ямах и сверхрешетках GaAs/AlAs, полученные с помощью развитых авторами методов микроволново-оптической спектроскопии низкоразмерных структур.

Исследования в области оптического детектирования магнитных резонансов были начаты в ФТИ им. А.Ф. Иоффе в 1977 году открытием эффекта влияния циклотронного резонанса свободных носителей на люминесценцию полупроводников [1]. В чистых кристаллах Ge и Si было обнаружено сильное уменьшение интенсивности люминесценции экситонов и электронно-дырочных капель при циклотронном резонансе электронов и дырок. Кроме повышения чувствительности и пространственной селективности оптически детектируемый циклотронный резонанс (ОДЦР) обладает такими важными достоинствами, как возможность исследования нелегированных образцов и одновременного наблюдения циклотронного резонанса электронов и дырок, возможность изучения динамики носителей и природы процессов их захвата и рекомбинации, возможность исследования зонной структуры и эффектов локализации носителей в тонких эпитаксиальных слоях и наноструктурах. ОДЦР превратился в настоящее время в мощный инструмент исследования полупроводников [2,3], особенно эффективно используемый для изучения низкоразмерных систем [4–7].

В ФТИ были выполнены пионерские работы по изучению туннельных и фотостимулированных рекомбинационных процессов в облученных ионных кристаллах методом оптического детектирования магнитного резонанса (ОДМР) [8–10]. В ионных и полупроводниковых кристаллах с магнитными примесями был обнаружен эффект влияния спиновой поляризации примеси на интенсивность рекомбинационной люминесценции, исследованы процессы передачи энергии [10,11]. Оптическая накачка и кросс-релаксация были применены для развития оригинальных методик оптической регистрации электронного и ядерного магнитного резонанса без микроволн [10,12]. Были проведены многочисленные исследования экситонной и донорно-акцепторной рекомбинации в полупроводниках GaP, GaSe,  $A_2B_6$ , SiC, в частности выполнены первые исследования ОДМР акцепторов в карбиде кремния, легированном галлием, бором и скандием [10,13,14]. Многоквантовая ОДМР-спектроскопия была впервые применена для исследования полупроводников и галогенидов серебра [15].

В настоящей работе приведены результаты последних исследований квантовых ям и сверхрешеток (СР) GaAs/AlAs и GaAs/AlGaAs методами ОДМР и развитой

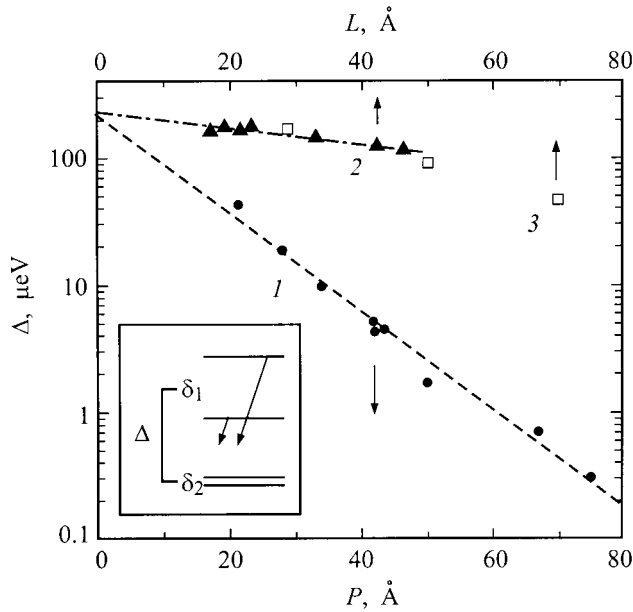
на его основе спектроскопии антикроссинга уровней (АКУ) экситонов.

В системах GaAs/AlAs в зависимости от толщины слоев возможно создание как прямых (тип I), так и непрямых (тип II) СР. В СР типа II электроны ( $S = 1/2$ ) и тяжелые дырки ( $J_z = \pm 3/2$ ), образующие экситон (heavy-hole exciton), локализованы в соседних слоях AlAs и GaAs соответственно, и рекомбинационные процессы между ними могут быть использованы для исследования микроскопической структуры интерфейсов. Вследствие низкой локальной симметрии интерфейса ( $C_{2v}$ ) все четыре уровня экситона расщеплены обменным воздействием, причем порядок расположения излучательных уровней инвертирован для экситонов, локализованных на противоположных интерфейсах.

Одним из основных методов исследования наноструктур является фотолюминесценция. Традиционные методы радиоспектроскопии неприменимы из-за недостаточной чувствительности, однако эта трудность может быть преодолена при использовании ОДМР. Уже первые эксперименты по ОДМР в СР GaAs–AlAs позволили получить точную и однозначную информацию о системе энергетических уровней локализованных экситонов, параметрах их тонкой структуры, а также о магнитных  $g$ -факторах несвязанных электронов и дырок [16–19]. Было показано, что в СР типа II изотропное обменное расщепление  $\Delta$  зависит в основном только от периода СР и изменяется, как это показано на рисунке [19,20]. Расщепление излучательных уровней  $\delta_1 \cong \Delta/2$ , а расщепление безызлучательных уровней мало. Величина дырочного  $g$ -фактора определяется толщиной слоев GaAs.

В СР типа II были обнаружены также широкие линии ОДМР обменно-связанных электронно-дырочных пар. Наблюдение многоквантового ОДМР позволило показать, что ширина и форма линии "локализованных" электронов в таких парах определяется не разбросом  $g$ -факторов, а распределением обменных расщеплений, вызванным статистическим распределением расстояний между партнерами.

Результаты исследований ОДМР были использованы авторами для развития спектроскопии антикроссинга уровней [20]. При антикроссинге более населенного безызлучательного уровня с излучательным наблюдается резонансное увеличение интенсивности люминесценции соответствующей поляризации. Положение сигналов



Экспериментальные зависимости изотропного обменного расщепления  $\Delta$  экситонов в сверхрешетках GaAs/AlAs типа II от периода  $P$  сверхрешетки (1) и экситонов в сверхрешетках GaAs/AlAs (2) и квантовых ямах GaAs/AlGaAs (3) типа I от толщины  $L$  слоев GaAs. На вставке показаны энергетические уровни экситона в нулевом магнитном поле.

АКУ зависит от обменных расщеплений и  $g$ -факторов, а также от ориентации магнитного поля относительно плоскости СР. Оно может быть рассчитано путем диагонализации спин-гамильтониана экситона подобно тому, как это делается для сигналов ОДМР. Следует отметить, что в отличие от ОДМР регистрация антикроссинга не требует насыщения ЭПР-переходов и не имеет ограничений по радиационному времени жизни. ОДМР может наблюдаться лишь для состояний с временем жизни более  $0.1 \mu\text{s}$ , т.е. только для СР типа II. Регистрация антикроссинга по линейной поляризации люминесценции позволяет определить направление поляризации нижнего излучательного уровня экситона, что оказывается важным для идентификации интерфейса в структурах типа II и выяснения анизотропии локализирующего потенциала в структурах типа I.

Специально изготовленный образец с градиентом состава в плоскости СР и плавным переходом от типа II к типу I был использован для исследования переходной области и первого наблюдения АКУ в структурах типа I [21,22]. Применение спектроскопии антикроссинга уровней к квантовым ямам и СР типа I впервые позволило надежно измерить величину обменного расщепления экситона [21] и ее зависимость от ширины ямы. Полученные результаты для сверхрешеток GaAs/AlAs и квантовых ям GaAs/AlGaAs приведены на рисунке. Обращает на себя внимание то обстоятельство, что при уменьшении периода СР типа II и ширины квантовой ямы в СР типа I расщепления  $\Delta$  стремятся к одинаковому значению  $\cong 235 \mu\text{eV}$ . Дополнительную информацию об экситонах

дает исследование ориентационных зависимостей АКУ и регистрация кросс-релаксационных резонансов [23].

Важным достоинством спектроскопии ОДМР и АКУ является возможность селективного исследования экситонов, локализованных на противоположных интерфейсах в сверхрешетках GaAs/AlAs типа II. Специальные "асимметричные" сверхрешетки, локализация экситонов в которых происходит на одном, заранее определенном интерфейсе, были использованы для установления взаимно однозначного соответствия между типом интерфейса и порядком расположения излучательных уровней экситона [24]. Было доказано, что нижний излучательный уровень поляризован вдоль  $[110]$  для экситонов на нормальном (AlAs на GaAs) интерфейсе и вдоль  $[1\bar{1}0]$  для экситонов на инвертированном (GaAs on AlAs) интерфейсе. Исследования ОДМР и АКУ показали, что в "обычных" СР типа II такие экситоны различаются величиной обменного расщепления, что может быть объяснено асимметрией композиционных профилей противоположных интерфейсов из-за различной поверхностной сегрегации галлия и алюминия [25,26]. Исследованы закономерности локализации экситонов на противоположных интерфейсах в зависимости от условий роста сверхрешеток, в частности от прерываний роста после слоев GaAs или AlAs [27]. Изучение отклика люминесценции на приложение резонансного микроволнового поля позволило начать ОДМР-исследования динамических характеристик экситонов [28].

Регистрация сигналов АКУ по линейной поляризации люминесценции в системах типа I позволила установить, что излучательные уровни экситона расщеплены и в этих структурах, причем излучение с нижнего уровня поляризовано вдоль  $[1\bar{1}0]$ . Это доказывает наличие преимущественной ориентации интерфейсных островков вдоль  $[1\bar{1}0]$ , что соответствует данным электронной и туннельной микроскопии.

Таким образом, в результате исследования сверхрешеток GaAs/AlAs типа II, а также квантовых ям и сверхрешеток GaAs/AlGaAs и GaAs/AlAs типа I методами оптического детектирования антикроссинга уровней и магнитного резонанса изучена связь величин обменных расщеплений,  $g$ -факторов, порядка расположения излучательных уровней экситонов с параметрами сверхрешеток и со структурой интерфейсов. Полученная информация может быть использована для диагностики наноструктур [27,29].

Развитие методов оптического детектирования циклотронного и магнитного резонанса, спектроскопии антикроссинга уровней, кросс-релаксационной спектроскопии, многоквантового магнитного резонанса позволило начать разработку нового направления исследований: радиоспектроскопия носителей и возбуждений в структурах с пониженной размерностью.

Исследования частично поддержаны Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 96-02-16927).

## Список литературы

- [1] П.Г. Баранов, Ю.П. Вещунов, Р.А. Житников, Н.Г. Романов, Ю.Г. Шрегер. Письма в ЖЭТФ **26**, 5, 369 (1977).
- [2] T. Tomaru, T. Ohyama, E. Otsuka. Appl. Magnetic Resonance **2**, 2, 379 (1991).
- [3] M. Godlewski, W.M. Chen, B. Monemar. Critical Review in Solid State and Material Sciences **19**, 4, 241 (1994).
- [4] B.C. Cavenett. Phys. Rev. **B32**, 12, 8449 (1985).
- [5] R.T. Warburton, J.G. Michels, R.J. Nicholas, J.J. Harris, C.T. Foxon. Phys. Rev. **B46**, 20, 13394 (1992).
- [6] D.M. Hofmann, M. Drechsler, C. Wetzel, B.K. Meyer, F. Hirler, R. Strenz, G. Abstreiter, G. Böhm, G. Weimann. Phys. Rev. **B52**, 15, 11313 (1995).
- [7] Y.F. Chen, Y.T. Dai, J.C. Fan, T.L. Lee, H.H. Lin. Appl. Phys. Lett. **67**, 9, 1256 (1995).
- [8] П.Г. Баранов, Ю.П. Вещунов, Н.Г. Романов. ФТТ **22**, 12, 3732 (1980).
- [9] Н.Г. Романов, В.А. Ветров, П.Г. Баранов. Письма в ЖЭТФ **37**, 7, 325 (1983).
- [10] P.G. Baranov, N.G. Romanov. Applied Magnetic Resonance **2**, 2, 361 (1991).
- [11] П.Г. Баранов, М.Ф. Буланый, В.А. Ветров, Н.Г. Романов. ФТТ **25**, 7, 517 (1983).
- [12] Н.Г. Романов, В.В. Дьяконов, В.А. Ветров, П.Г. Баранов. ФТТ **31**, 11, 106 (1989).
- [13] П.Г. Баранов, В.А. Ветров, Н.Г. Романов, В.И. Соколов. ФТТ **27**, 11, 3459 (1985).
- [14] П.Г. Баранов, В.А. Ветров, Н.Г. Романов, В.Г. Одинг. Письма в ЖТФ **11**, 10, 1168 (1985).
- [15] N.G. Romanov, P.G. Baranov. Semicond. Sci. Technol. **9**, 5, 1080 (1994).
- [16] van H.W. Kesteren, E.C. Cosman, W.A.J.A. van der Pool, C.T. Foxon. Phys. Rev. **B41**, 8, 5283 (1990).
- [17] J.M. Trombetta, T.A. Kennedy, D. Gammon, B.V. Shanabrook, S.M. Prokes. Material Science Forum **83–87**, 1361 (1991).
- [18] P.G. Baranov, P. Lavallard, R. Planel, N.G. Romanov. Superlattices and Microstructures **12**, 3, 327 (1992).
- [19] P.G. Baranov, I.V. Mashkov, N.G. Romanov, P. Lavallard, R. Planel. Solid State Commun. **87**, 7, 649 (1993).
- [20] P.G. Baranov, N.G. Romanov. In: Proc. 22nd Int. Conf. Phys. Semicond. / Ed. by D.J. Lockwood. World Scientific, Singapore–New Jersey–London–Hong Kong (1994). P. 1400.
- [21] Н.Г. Романов, И.В. Машков, П.Г. Баранов, Ф. Лаваллар, Р. Плanel. Письма в ЖЭТФ **57**, 12, 788 (1993).
- [22] N.G. Romanov, I.V. Mashkov, N.G. Baranov, P. Lavallard, R. Planel. Solid State Electronics **37**, 4–6, 911 (1994).
- [23] П.Г. Баранов, В.А. Ветров, Б.Р. Намозов, Н.Г. Романов. Письма в ЖЭТФ **61**, 9, 774 (1995).
- [24] П.Г. Баранов, И.В. Машков, Н.Г. Романов, К. Гордон, Ф. Лаваллар, Р. Плanel. Письма в ЖЭТФ **60**, 6, 429 (1994).
- [25] П.Г. Баранов, Н.Г. Романов, А. Хофштеттер, А. Шарманн, К. Шнорр, Ф.А. Алерс, К. Пирц. Письма в ЖЭТФ **64**, 10, 701 (1996).
- [26] P.G. Baranov, N.G. Romanov, A. Hofstaetter, A. Scharmann, C. Schnorr, F.A. Ahlers, K. Pierz. Inst. Phys. Conf. Series N 155, IOP Publ. Ltd. (1996). P. 893.
- [27] P.G. Baranov, N.G. Romanov, A. Hofstaetter, C. Schnorr, W. von Foerster, B.K. Meyer, A. Scharmann, F.A. Ahlers, R. Pierz. 5th Int. Symp. Nanostructures: Physics and Technology / Ed. by Zh. Alferov, L. Esaki. St. Petersburg (1997). P. 47.
- [28] P.G. Baranov, N.G. Romanov, A. Hofstaetter, C. Schnorr, W. von Foerster, B.K. Meyer. Proc. 6th Int. Symp. Nanostructures: Physics and Technology / Ed. by Zh. Alferov, L. Esaki. St. Petersburg (1998). P. 366.
- [29] П.Г. Баранов, Н.Г. Романов, И.В. Машков, Г.Б. Хитрова, Х.М. Гиббс, О. Лунгрес. ФТТ **37**, 10, 2991 (1995).