

Спиновые свойства трионов в плотном квазидвумерном электронном газе

© В.П. Кочерешко^{*†¶}, L. Besombes[°], R.T. Cox[°], H. Mariette[°], T. Wojtowicz[×],
G. Karczewski[×], J. Kossut[×]

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

[†] Лаборатория оптики спина Санкт-Петербургского государственного университета,
198504 Санкт-Петербург, Россия

[°] Институт Нееля, CNRS, Гренобль, Франция

[×] Институт физики Польской академии наук,
Варшава, Польша

(Получена 15 апреля 2011 г. Принята к печати 25 апреля 2011 г.)

Исследованы спектры отражения и фотолюминесценции от структур с квантовыми ямами CdTe/CdMgTe с модулированным легированием. Обнаружено, что величина и знак зеемановского расщепления линии отражения триона зависят от концентрации электронов в квантовой яме, в то же время величина и знак расщепления линии экситона абсолютно одинаковы для всех изучаемых электронных концентраций. В спектрах фотолюминесценции величина и знак зеемановских расщеплений экситона и триона были равны. Такая „перенормировка“ трионного g -фактора объясняется в модели комбинированных экситон-электронных процессов.

1. Введение

Трионы в полупроводниковых квантовых ямах (КЯ) исследуются уже относительно давно [1], но до сих пор в их природе остается еще много неясного. Особенно необычным является поведение трионов в присутствии достаточно плотного двумерного электронного газа (2ДЭГ). В экспериментальных спектрах КЯ, содержащих 2ДЭГ, было обнаружено, что линия экситона пропадает из спектра уже при очень малых концентрациях электронов, когда энергия Ферми 2ДЭГ еще много меньше энергии связи экситона. В то же время линия поглощения триона сохраняется в спектрах даже при больших концентрациях электронов, когда энергия Ферми 2ДЭГ оказывается больше энергии связи триона [2]. Более того, замечено даже некоторое сужение линии поглощения триона с ростом концентрации электронов.

Это выглядит странно, так как энергия связи триона примерно на порядок меньше энергии связи экситона и, казалось бы, 2ДЭГ должен в первую очередь „действовать“ на трионы, а не на экситоны. Кроме того, трионы являются заряженными квазичастицами и должны эффективно рассеиваться электронами в отличие от нейтральных экситонов.

Еще более необычно поведение оптических спектров экситонов и трионов в присутствии магнитного поля. В магнитном поле в спектрах поглощения, отражения и флюоресценции (ФЛ) КЯ, содержащих 2ДЭГ, начинают появляться новые линии. Эти линии смещаются линейно с ростом магнитного поля. Замечательно, что есть линии, которые смещаются линейно с ростом поля в сторону больших энергий, а есть такие, что смещаются также линейно, но в сторону меньших энергий. В нулевом магнитном поле все эти линии сходятся к

линии поглощения экситона, указывая на то, что они имеют прямое отношение к экситону. В то же время линейный сдвиг линий в магнитном поле указывает на их принадлежность к свободным электронам [3,4].

В данной работе, по спектрам отражения и фотолюминесценции, мы исследовали зависимости зеемановского расщепления от концентрации электронов в квантовой яме.

2. Эксперимент

Мы изучали структуры с квантовыми ямами на основе CdTe/(Cd_{0.7}Mg_{0.3})Te с модулированным легированием, содержащие 2ДЭГ различной плотности (от $n_e < 10^{10}$ до $n_e \approx 10^{12}$ см⁻²). Структуры содержали одиночную квантовую яму (ОКЯ) в 100 Å и были легированы в барьерах на расстоянии 100 Å от КЯ. Специальный дизайн структур делал возможным управлять электронной концентрацией, сохраняя все другие параметры неизменными с высокой точностью.

В данной работе мы сравниваем спектры отражения и фотолюминесценции, измеренные от ОКЯ с различной концентрацией электронов в магнитных полях от 0 до 11 Тл. На рис. 1 представлены спектры отражения, измеренные от трех структур с КЯ с различной концентрацией электронов в магнитных полях от 0 до 7.4 Тл в двух круговых поляризациях σ^+ (верхняя часть рис. 1) и σ^- (нижняя часть). Концентрация электронов изменялась от $n_e < 10^9$ см⁻² (рис. 1, *a*) до $n_e = 3 \cdot 10^{11}$ см⁻² (рис. 1, *d*). При очень малой концентрации электронов в спектрах наблюдается только линия отражения экситона, которая с ростом магнитного поля испытывает коротковолновый диамагнитный сдвиг и зеемановское расщепление. Уже при относительно небольшой концентрации электронов ($n_e = 2 \cdot 10^{10}$ см⁻², рис. 1, *b*) в спектре отражения наряду

¶ E-mail: Vladimir.Kochereshko@mail.ioffe.ru

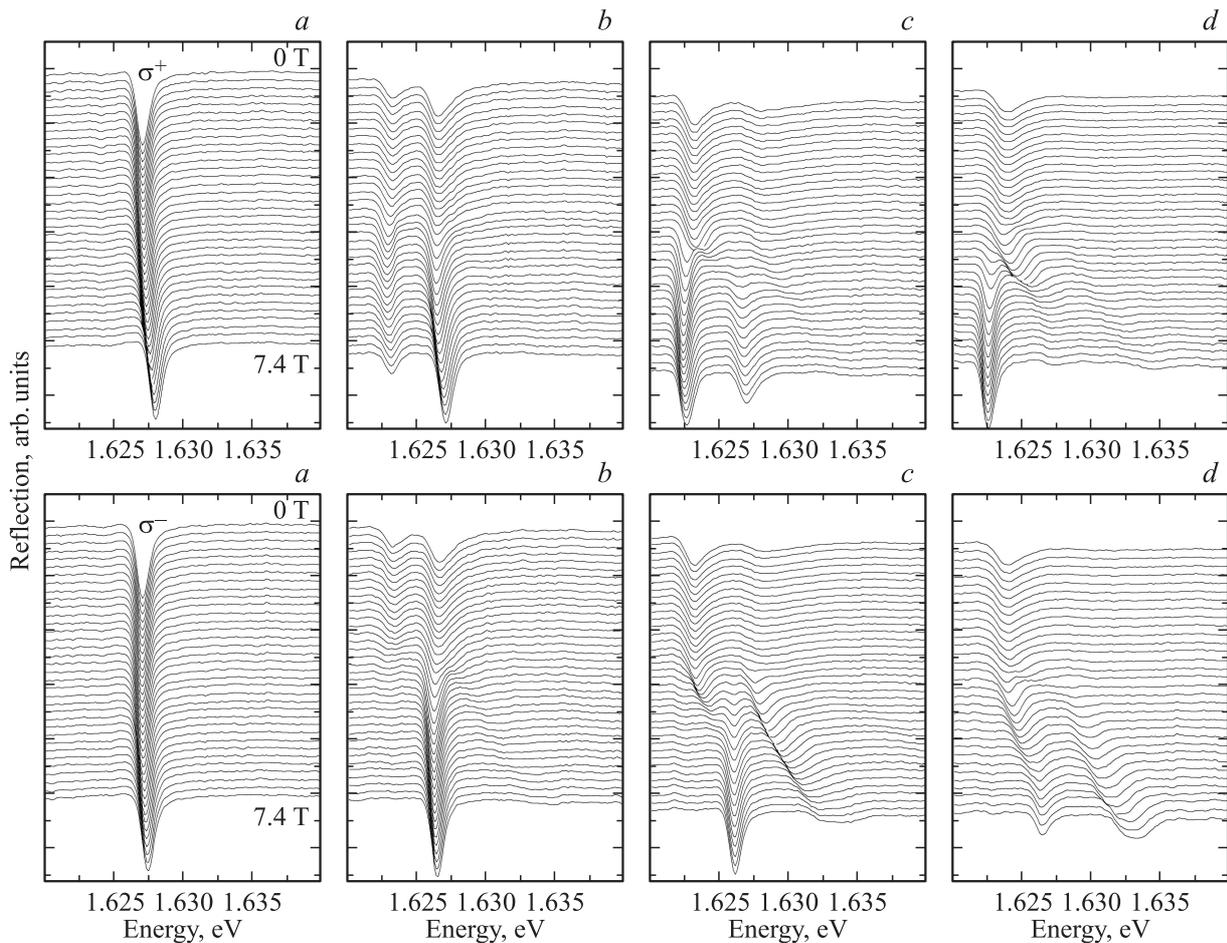


Рис. 1. Набор спектров отражения от структур с одиночной квантовой ямой CdTe/CdMgTe в магнитном поле от 0 до 7.4 Тл в двух циркулярных поляризациях: правая циркулярная компонента — верхняя часть рисунка и левая циркулярная — нижняя часть. Концентрация электронов в яме увеличивается слева направо: *a* — меньше 10^9 см^{-2} , *b* — $2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$, *c* — $8 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$, *d* — $3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$.

с линией экситона появляется линия триона. При этом линия отражения экситона несколько размывается. Обе линии испытывают зеемановское расщепление и диамагнитный сдвиг в магнитном поле. Кроме того, линия отражения триона в магнитном поле становится сильно поляризованной. Это связано с синглетным характером основного состояния триона. В результате в достаточно большом магнитном поле трион может рождаться фотоном только одной поляризации. При больших концентрациях электронов ($n_e = 8 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$, рис. 1, *c*) линия отражения экситона почти исчезает, линия триона усиливается, а в магнитном поле в дополнение к линиям триона и экситона появляются новые линии ExCR и TrCR. Они были проанализированы в наших работах [3,5]. При еще больших концентрациях электронов ($n_e = 3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, рис. 1, *d*) линия экситона вовсе пропадает из спектра отражения, а линия триона при этом изменяется слабо.

На рис. 2 представлены зависимости энергетического положения всех линий в спектре от магнитного поля для образцов с разной концентрацией электронов. В этих зависимостях хорошо видно, что линии экситона

и триона испытывают обычный диамагнитный сдвиг в сторону больших энергий. В то же время линии ExCR и TrCR сдвигаются линейно с ростом магнитного поля. Кроме того, все линии в спектре расщепляются в магнитном поле. При малых концентрациях электронов величины знаков зеемановских расщеплений триона и экситона совпадают. При больших концентрациях знак зеемановского расщепления линии отражения триона противоположен знаку расщепления всех остальных линий в спектре.

На рис. 3 представлены зависимости величины зеемановского расщепления экситона и триона от магнитного поля для образцов с разной концентрацией электронов. Хорошо видно, что при малой концентрации электронов экситонное и трионное расщепление совпадают, а с ростом концентрации электронов экситонное расщепление сохраняется, а трионное расщепление меняет свою величину и даже знак.

Мы измеряли также спектры ФЛ от этих же образцов. Было обнаружено, что в спектрах ФЛ величина и знак расщепления линии триона в точности совпадают с

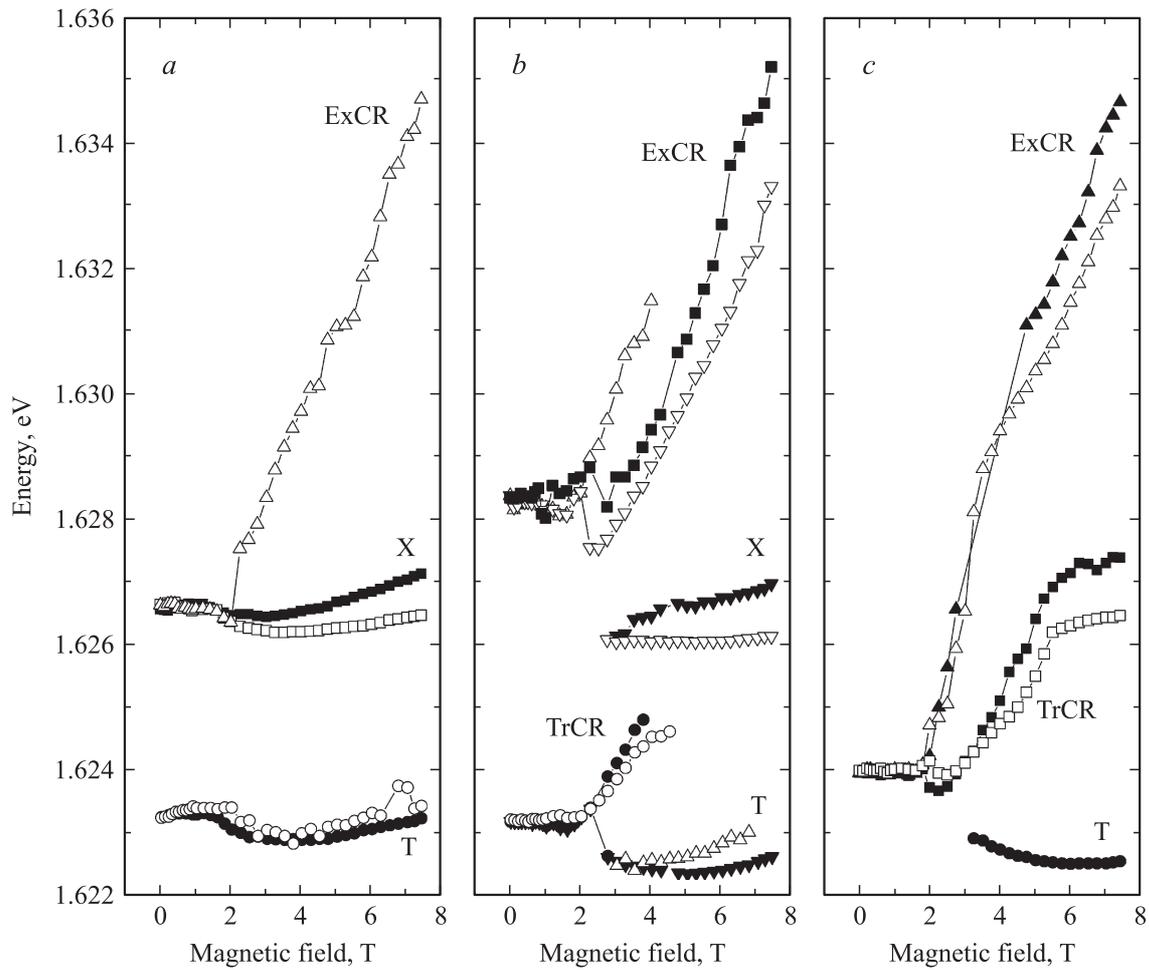


Рис. 2. Зависимости энергетического положения всех линий, наблюдаемых в спектрах отражения. Для концентраций электронов в КЯ, см^{-2} : $a - 2 \cdot 10^{10}$, $b - 8 \cdot 10^{10}$, $c - 3 \cdot 10^{11}$. X — линия экситона, T — линия триона, ExCR — линия комбинированного экситон-циклотронного резонанса, TrCR — линия комбинированного трион-циклотронного резонанса.

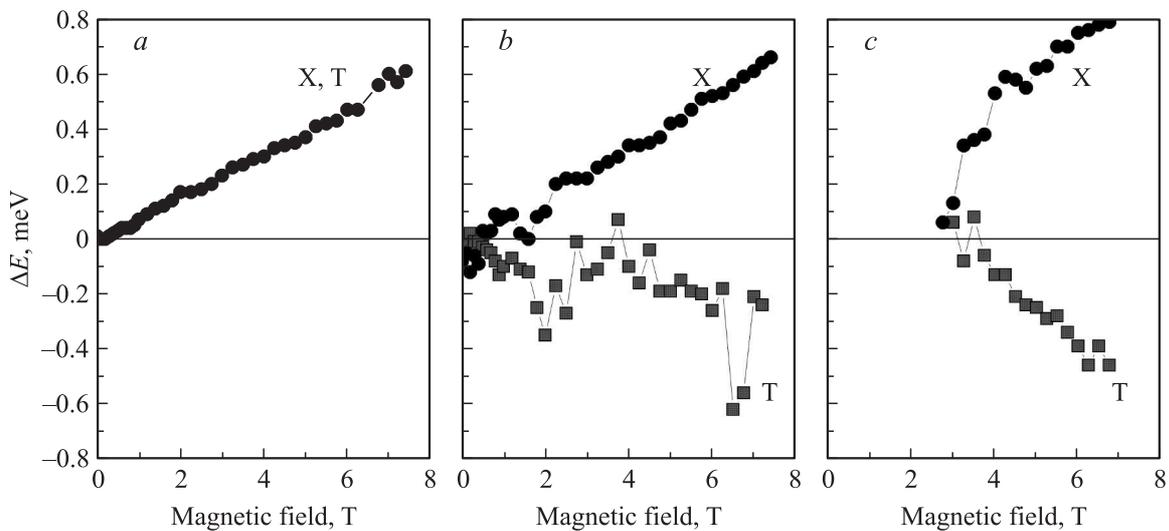


Рис. 3. Зеемановское расщепление (ΔE) линий отражения экситона и триона. Концентрации электронов как на рис. 2.

расщеплением линии ФЛ экситона и не зависят от концентрации электронов.

Такой эффект можно было бы интерпретировать перенормировкой g -фактора триона в присутствии 2ДЭГ, но не понятным осталось бы, почему этого эффекта нет для экситона, и совсем не понятно, почему этого нет в спектре ФЛ.

3. Обсуждение

Рассмотрим подробно процесс формирования триона.

Линия поглощения (отражения) триона формируется при связывании фоторожденного экситона и одного из электронов из 2ДЭГ. В начальном состоянии этого процесса мы имеем электрон, а в конечном состоянии мы имеем трион. Схема такой реакции выглядит так:



Следовательно, энергия такого перехода

$$E_{\text{ph}} = E_{\text{Tr}} - E_e. \quad (2)$$

Поскольку электроны в 2ДЭГ имеют энергии (измеренные от дна зоны проводимости) в диапазоне от нуля до энергии Ферми: $0 \leq E_e \leq E_F$, линия поглощения (отражения) триона должна занимать интервал энергий от $(E_{\text{Tr}} - E_F)$ до E_{Tr} .

В магнитном поле, начальный электрон находится на уровнях Ландау ниже уровня Ферми. В условиях, когда фактор заполнения $\nu \leq 1$, трион формируется при связывании электрона с нижнего уровня Ландау и экситона. Энергия оптического перехода при формировании триона равна

$$E_{\text{ph}} = E_{\text{Tr}}(H) - \frac{\hbar\omega_c}{2}. \quad (3)$$

Так как второй электрон в трионе слабо связан с экситоном, в достаточно больших магнитных полях

$$E_{\text{Tr}} \propto \frac{\hbar\omega_c}{2}. \quad (4)$$

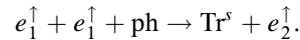
Таким образом, как и наблюдается в эксперименте, энергия оптического перехода при формировании триона

$$E_{\text{ph}} = \text{const}. \quad (5)$$

Легко видеть, что величина и знак зеемановского расщепления линии поглощения триона в точности совпадает с величиной и знаком зеемановского расщепления экситонной линии.

При больших факторах заполнения, когда $2 > \nu > 1$, электронами могут быть частично заполнены 2 уровня Ландау. В этих условиях наблюдается явление так называемого трион-(циклотронного резонанса) TrCR [5], когда падающий фотон рождает трион в синглетном состоянии и одновременно индуцирует переход одного

дополнительного электрона на один из верхних уровней Ландау. Схема соответствующей реакции выглядит так:

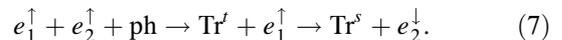


Здесь e_1^\uparrow — электрон на нижнем уровне Ландау со спином \uparrow , e_2^\uparrow — электрон на втором уровне Ландау со спином \uparrow . Энергия оптического перехода в магнитном поле в этом случае равна

$$E_{\text{ph}} = E_{\text{Tr}}(H) + \frac{1}{2} \hbar\omega_c. \quad (6)$$

Таким образом, линия поглощения смещается с ростом магнитного поля, как $\hbar\omega_c$, вверх по энергии. Очевидно, что знак и величина зеемановского расщепления и в этом случае совпадают со знаком и величиной расщеплений экситона.

В этих же условиях возможен и другой процесс, когда падающий фотон рождает триплетный трион [6] и одновременно индуцирует переход дополнительного электрона на нижний уровень Ландау, в результате чего в конечном состоянии остаются синглетный трион и электрон на нижнем уровне Ландау. Это возможно только в условиях частичного заполнения вышележащего уровня Ландау, т.е. когда второй уровень Ландау заполнен частично. Схема такой реакции выглядит следующим образом:



Энергия оптического перехода в этом случае совпадает с энергией синглетного триона. Легко видеть, что знак зеемановского расщепления при таком процессе противоположен знакам зеемановского расщепления экситона и синглетного триона.

Таким образом, процесс (7) может объяснить наблюдаемые парадоксы с зеемановским расщеплением триона.

4. Заключение

В спектрах отражения модулированно-легированных структур с КЯ было обнаружено, что величина и знак зеемановского расщепления линии триона не совпадает с зеемановским расщеплением линии экситона. Тогда как величина и знак зеемановского расщепления линии триона сильно зависят от концентрации электронов, зеемановское расщепление экситона от концентрации не зависит. Также наблюдалось, что зеемановское расщепление линий фотолюминесценции триона и экситона в точности совпадают и не зависят от концентрации электронов. Это явление объясняется триплет-синглетной конверсией триона с одновременным переходом дополнительного электрона между уровнями Ландау.

Работа частично поддержана грантами РФФИ, Отделения физических наук РАН и программ РАН-CNRS.

Список литературы

- [1] K. Kheng, R.T. Cox. et al. Phys. Rev. Lett., **71**, 1752 (1993);
A.J. Shields, M. Pepper et al. Phys. Rev. B, **52**, 7841 (1995);
G. Finkelstein, H. Shtrinkman, I. Bar-Joseph. Phys. Rev. B, **53**,
1709 (1996).
- [2] G.V. Astakhov, V.P. Kochereshko, D.R. Yakovlev, W. Ossau,
J. Nürnbergger, W. Faschinger, G. Landwehr. Phys. Rev. B, **62**,
10 345 (2000).
- [3] D.R. Yakovlev, V.P. Kochereshko et al. Phys. Rev. Lett., **79**,
3974 (1997).
- [4] K.J. Nash, M.S. Skolnick, M.K. Saker, S.J. Bass. Phys. Rev. Lett.,
70, 3115 (1993).
- [5] V.P. Kochereshko, G.V. Astakhov, D.R. Yakovlev, W. Ossau,
G. Landwehr, W. Faschinger, T. Wojtowicz, G. Karczewski,
J. Kossut. Physica E, **17**, 197 (2003).
- [6] D. Andronikov, V. Kochereshko et al. Phys. Rev. B, **71**, 165 339
(2005).

Редактор Т.А. Полянская

Spin properties of trions at thick quasytwodimensional electron gas

V.P. Kochereshko^{*,+}, i. Becomves[°], R.T. Cox[°],
H. Mariette[°], T. Wojtowich[×], G. Karchewski[×],
J. Kossut[×]

* Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

+ Laboratory of Spin Optic
of St. Petersburg State University,
198504 St. Petersburg, Russia

° Neel Institute,
CNRS, Grenoble, France

× Institute of Physics of Polish Academy of Science,
Warsaw, Poland

Abstract Reflectivity and photoluminescence spectra from CdTe/CdMgTe modulation doped quantum well structures were studied. We have found that the value and the sign of the trion line Zeeman splitting depends on the electron concentration in the quantum well, at the same time the value and sign of the exciton line splitting are absolutely equal for all studied electron concentrations. In the photoluminescence spectra the sign and value of the exciton and trion Zeeman splitting is equal. Such „renormalization“ of the trion g -factor is explained in the model of combined exciton electron processes.