

Спиновые свойства трионов в плотном 2DEG

В.П. Кочерешко^{1,2}, L. Besombes³, R.T. Cox³, H. Mariette³, T. Wojtowicz⁴, G. Karczewski⁴, J. Kossut⁴

¹Физико-технический институт РАН, 194021, Санкт-Петербург, Россия

²Лаборатория Оптики спина, Санкт-петербургский Государственный Университет.

³Институт Нееля, CNRS, Гренобль, Франция

⁴Институт физики Польской академии наук, Варшава, Польша

Е-мэйл: Vladimir.Kochereshko@mail.ioffe.ru

Изучались спектры отражения и фотолюминесценции от структур с квантовыми ямами CdTe/CdMgTe с модулированным легированием. Обнаружено, что в спектрах отражения величина и знак зеемановского расщепления линий триона зависит от концентрации электронов в квантовой яме, в то время как величина и знак расщепления экситонной линии постоянны для всех изученных концентраций электронов. С другой стороны, в спектрах ФЛ знак и величину зеемановского расщепления одинаковы для триона и экситонов. Такие «перенормировки» g-фактора триона объясняется в модели комбинированных экситон-электронных процессов.

Введение:

Трионы в полупроводниковых квантовых ямах (КЯ) исследуются уже в течение относительно длительного времени [1], однако все еще остается много неясных явлений связанных с трионами. Самые удивительные свойства трионов проявляются в присутствии плотного электронного газа. Например, в экспериментальных спектрах квантовых ям, которые содержат двумерный электронный газ (2DEG) было обнаружено, что линии экситонного поглощения исчезают из спектров при очень низких концентрациях электронов, когда энергия Ферми значительно меньше, чем энергия связи экситона. В то же время линии поглощения триона по-прежнему сохраняется в спектрах даже при больших концентрациях электронов, когда энергия Ферми больше энергии связи триона [2].

Еще необычнее ведут себя линии экситонов и триона в спектрах в присутствии магнитных полей. В магнитных полях в спектрах легированных КЯ появляются новые линии поглощения, отражения и фотолюминесценции. Эти линии движутся линейно с увеличением магнитного поля. Примечательно то, что есть линии, сдвигающиеся в сторону высоких энергий с увеличением вмагнитного поля а есть линии, сдвигающиеся также линейно но в сторону низких энергий. [3, 4].

В настоящей работе мы изучаем зависимость зеемановского расщепления от концентрации 2DEG с помощью спектроскопии отражения и фотолюминесценции (ФЛ) в магнитном поле.

Эксперимент

Мы изучали структуры с КЯ CdTe/(Cd0.7Mg0.3)Te содержащие 2DEG различной плотности (от $n_e < 10^{10}$ до $n_e \sim 10^{12}$ см⁻²). Структуры содержали 100Å одиночную квантовую яму и были, легированы в барьерах на расстоянии 100Å от ямы. Специальный дизайн структур позволил контролировать концентрация электронов сохраняя все остальные параметры постоянными. В данной работе мы сравниваем спектры отражения и ФЛ, от КЯ с различной плотностью электронов в магнитных полях от 0 Т до 7,5 Т.

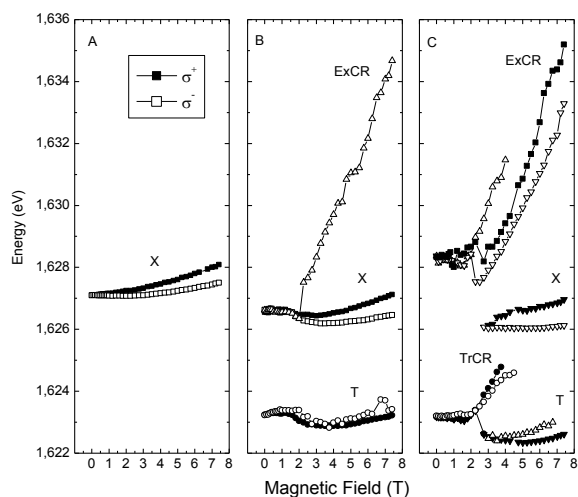


Рисунок 1 Зависимость энергий оптических переходов для всех линий (X) – экситон, (T) трион, (ExCR) Комбинированный экситон циклотронный резонанс, (TrCR) Комбинированный трион циклотронный резонанс.

На рисунке 1 показана зависимость энергии всех линий, наблюдаемых в спектрах отражения в магнитном поле для трех образцов с различными концентрациями электронов. Из этих зависимостей можно видеть, что линии

экситона и триона испытывают обычный квадратичный диамагнитный сдвиг в сторону высоких энергий с ростом магнитного поля. В то же время линии $ExCR$ и $TrCR$ [3, 5] сдвигаются линейно с увеличением магнитного поля. Кроме того, все эти линии расщепляются в магнитном поле. При низких концентрациях электронов величина и знак зеемановского расщепления экситона и триона равны. Но при высоких концентрациях (см. рисунок) знак зеемановского расщепления триона становится противоположным знаку расщепления экситона.

Обсуждение

Рассмотрим образование триона в деталях. Линии поглощения (отражения) триона соответствует связывание рожденного светом экситона и одного электрона из 2DEG. В исходном состоянии для этого процесса мы имеем электрон а в конечном состоянии синглетный триона. Схема такого процесса:



Энергия этого перехода равна:

$$E_{ph} = E_{Tr} - E_e$$

Поскольку электроны в 2DEG имеют энергии (измеренные от дна зоны проводимости) в диапазоне от нуля до энергии Ферми, то полоса поглощения триона должна находиться в диапазоне энергий от 0 до E_F . В магнитных полях электроны занзаполняют все уровни Ландау находящиеся ниже уровня Ферми. Когда фактор заполнения меньше единицы трионы могут образовываться путем связывания экситонов и электронов с самого нижнего уровня Ландау. Энергии соответствующего оптического перехода:

$$E_{ph} = E_{Tr}(H) - \hbar\omega_c / 2$$

Поскольку второй электрон связан очень слабо с экситоном, то в достаточно большом магнитном поле зависимость энергии триона от магнитного поля:

$$E_{Tr}(H) \propto \hbar\omega_c / 2$$

Следовательно, энергия оптического перехода соответствующая формированию триона не зависит от магнитного поля (без диамагнитного сдвига), как это наблюдалось в эксперименте.

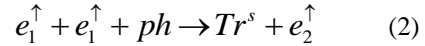
$$E_{ph} = const$$

Легко видеть, что величина и знак зеемановского расщепления линии поглощения триона точно такой же, как величина и знак зеемановское расщепление экситонной линии [1].

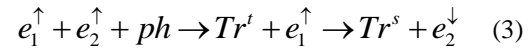
При более высоких факторах заполнения, электроны могут занимать два уровня Ландау. В этих условиях можно наблюдать явление комбинированного Трион Циклотронного Резонанса $TrCR$ [5].

В этом эффekte, падающий фотон создает трион и одновременно инициирует переход

дополнительного электрона из самых нижних в один из высших уровней Ландау. Схема соответствующего процесса: (2)



В этих условиях ($1 < \nu < 2$) возможен также другой процесс. В этом процессе, падающий фотон создает виртуальный трион в триплетном состоянии [6, 7]. Этот трион производит спин-флип с одним из электронов на первом уровне Ландау. В результате, в конечном состоянии, получим трион в синглетном состоянии плюс электрон на втором уровне Ландау с противоположным спином. Это возможно, если второй уровень лишь частично заполнен. Схема такого процесса:



Энергия оптического перехода в этом случае такая же, как и для формирования синглетного триона. Легко видеть, что знак зеемановское расщепление линий поглощения для этого процесса противоположен знаку зеемановское расщепления линии синглетного триона в нормальных процессах (1) и (2). В самом деле, из-за того, что начальное и конечное спиновые состояния электрона разные это даст двойной вклад в наблюдаемое зеемановское расщепление.

Следовательно, процесс (3) может объяснить наблюдаемые парадоксы, связанные с зеемановским расщеплением триона без какой либо перенормировки g-фактора.

Заключение: В спектрах отражения КЯ содержащих 2DEG обнаружено, что величина и знак зеемановского расщепления линии триона зависит от концентрации электронов, приэтом расщепление экситонной линии не зависит от концентрации электронов. В спекрах ФЛ обнаружено, что зеемановские расщепления трионов и экситонов одинаковы. Наблюдаемое поведение объясняется в модели комбинированных процессов.

Литература:

- [1]. K.Kheng, R.T.Cox, et al., Phys.Rev.Lett. **71**, 1752, (1993); A.J.Shields, M.Pepper, et al., Phys. Rev. **B52**, 7841, (1995); G.Finkelstein, H.Shtinkman, I.Bar-Joseph, et al., Phys. Rev. **B53**, R1709 (1996)
- [2]. G.V.Astakhov, V.P.Kochereshko, D.R.Yakovlev, W.Ossau, J.Nürnberg, W.Faschinger, and G.Landwehr, Phys.Rev.**B62**, 10345 (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, and 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.Karczowski, J.Kossut Physica **E17**, 197-200, (2003)
- [6]. D. Andronikov, V.Kochereshko, et al., Phys. Rev. **B71**, 165339, (2005)
- [7]. A.B.Dzyubenko, H.A.Nickel, T.Yeo, B.D.McCombe, A.Petrou Phys. Stat. Sol. (b) **227**, 365, (2001)