

Долговременная кинетика фотолюминесценции квантовых точек InAs/AlAs в магнитном поле

© Т.С. Шамирзаев[¶], А.М. Гилинский, А.К. Бакаров, А.И. Торопов, С.А. Фигуренко, К.С. Журавлев

Институт физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук,
630090 Новосибирск, Россия

(Получена 1 июня 2004 г. Принята к печати 14 июня 2004 г.)

Изучалось влияние магнитного поля на кинетику низкотемпературной фотолюминесценции квантовых точек InAs/AlAs. Обнаружено ускорение кинетики затухания фотолюминесценции при включении магнитного поля. Полученные результаты объяснены в рамках модели, учитывающей тонкую структуру экситонных уровней и их зеемановское расщепление в магнитном поле.

1. Введение

Хорошо известно, что время излучательной рекомбинации экситонов в самоорганизованных квантовых точках InAs в матрице GaAs составляет несколько наносекунд [1]. Недавно, однако, было показано, что динамика рекомбинации экситонов в системе квантовых точек InAs, сформированных в матрице AlAs, существенно иная, и нестационарная фотолюминесценция (ФЛ) прямозонных квантовых точек InAs в матрице AlAs при низких температурах демонстрирует длительное (миллисекундное) неэкспоненциальное затухание [2,3]. Ранее нами было предположено, что неожиданно длительное затухание ФЛ объясняется обменным расщеплением экситонных состояний в квантовых точках малого размера [2].

В данной работе для проверки этого предположения изучалось влияние магнитного поля на длительность затухания ФЛ квантовых точек InAs в матрице AlAs. Мы установили, что изменение энергетической структуры экситонных уровней в квантовой точке магнитным полем приводит к ускорению кинетики затухания экситонной ФЛ. Полученные результаты описываются в рамках модели, принимающей во внимание обменное и зеемановское расщепления уровней экситона в квантовой точке, помещенной в магнитное поле [2].

2. Методика эксперимента

Структуры с самоорганизованными квантовыми точками InAs в матрице AlAs были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии, на подложках полупроводящего GaAs ориентации (100) с использованием установки Riber 32P. Образцы состояли из 5 слоев InAs квантовых точек, разделенных слоями AlAs толщиной 8 нм. Количество InAs, высаживаемого в процессе роста каждого слоя с квантовыми точками, было эквивалентно 2,7 монослоям вещества. Слои с квантовыми точками выращивались при температуре 500°C. Подробное описание процесса роста приведено в работе [2].

Фотолюминесценция (ФЛ) возбуждалась прямоугольными импульсами излучения полупроводникового лазера с $\hbar\omega = 1.82$ эВ и пиковой плотностью мощности на поверхности образца 5 Вт/см². Рекомбинационное излучение анализировалось дифракционным монохроматором и регистрировалось охлаждаемым фотоэлектронным умножителем, работающим в режиме времякоррелированного счета фотонов. Измерения кинетики ФЛ проводились при температуре жидкого гелия. Образец помещался в оптический криостат со сверхпроводящим магнитом фирмы OXFORD, позволяющим вводить магнитное поле величиной до 6 Тл.

3. Модель рекомбинации

Основное состояние экситона как системы двух спаренных спинов ($\pm 1/2$ для электрона и $\pm 3/2$ для тяжелой дырки) восьмикратно вырожденно. В квантовых точках, имеющих симметрию кристаллической решетки типа цинковой обманки, это вырождение снимается за счет обменного взаимодействия и отклонения формы точки от идеальной сферы [3]. В сферической квантовой точке вследствие обменного взаимодействия экситонные уровни с различным значением полного момента расщепляются на пятикратно вырожденный нижележащий оптически неактивный ($J = 2$) уровень, характеризующийся большим временем жизни τ_T , и лежащий выше по энергии трехкратно вырожденный оптически активный ($J = 1$) уровень с малым излучательным временем жизни экситонов τ_C . Отклонение формы точки от сферической приводит к дальнейшему снятию вырождения, уже частично снятому обменным взаимодействием. В несимметричной точке восьмикратно вырожденное основное состояние экситона расщепляется на 5 состояний, характеризующихся проекциями полного момента системы m [3]: одно состояние с $m = \pm 2$ (ε_2), два с $m = \pm 1$ (ε_1^L и ε_1^U) и два с $m = 0$ (ε_0^L и ε_0^U). Последовательность энергетических уровней, соответствующих состояниям с различными значениями m , определяется формой точки, однако в любом случае самое низшее состояние будет оптически неактивным. На основе данных просвечивающей электронной спектроскопии [4] хорошим приближением для формы точек, изучаемых в данной работе,

[¶] E-mail: timur@thermo.isp.nsc.ru

является сплюснутый эллипсоид вращения. Для точек такой формы самым низким энергетическим состоянием будет синглетное состояние ε_0^t с $m = 0$, а следующим по энергии оптически активным двухкратно вырожденное состояние ε_1^t с $m = \pm 1$ [3].

В трехмерных полупроводниковых материалах и квантовых точках большого размера расщепление Δ между оптически неактивным и оптически активным состояниями меньше, чем kT , даже при температуре жидкого гелия [5], поэтому кинетика экситонной ФЛ характеризуется временем жизни τ_c . Однако для экситонов, сильно локализованных в квантовых точках малого размера в широкозонной матрице, как это имеет место для квантовых точек InAs в матрице AlAs, величина расщепления Δ при температуре жидкого гелия становится больше, чем тепловая энергия kT . Поэтому в маленьких квантовых точках при отсутствии конкурирующих каналов для рекомбинации носителей заряда время излучательной рекомбинации экситона определяется в основном величиной τ_T .

При помещении квантовых точек в магнитное поле должно наблюдаться зеемановское расщепление экситонных состояний, вырожденных по проекции момента m . Ожидаемое поведение энергетических уровней экситона в исследуемых квантовых точках приведено на вставке к рис. 2. Энергетическое положение самого нижнего состояния не зависит от поля, поскольку имеет проекцию момента, равную нулю. Оптически активное состояние расщепляется в магнитном поле, что должно приводить к уменьшению энергетического зазора Δ и к ускорению кинетики затухания ФЛ из-за повышения вероятности заселения возбужденного оптически активного состояния.

4. Экспериментальные результаты и выводы

Спектр низкотемпературной фотолюминесценции структуры с квантовыми точками InAs в матрице AlAs приведен на рис. 1. В спектре наблюдаются линии с энергетическим положением 1.515 и 1.490 эВ, обусловленные рекомбинацией экситонов и зона-акцепторными переходами в подложке GaAs, и линия 1.65 эВ, связанная с излучательной рекомбинацией экситонов в квантовых точках. Кинетика интегральной ФЛ в квантовых точках InAs в матрице AlAs, измеренная при температуре 4.2 К в магнитных полях $B = 0$ (кривая 1) и $B = 5$ Т (кривая 2), приведены на рис. 2. Из рисунка видно, что так же, как и в нашей предыдущей работе [2], в нулевом магнитном поле кинетика затухания имеет неэкспоненциальный характер, что не позволяет ввести характерного времени жизни для ее описания. Длительность затухания ФЛ составляет несколько миллисекунд. После включения магнитного поля кинетика затухания ФЛ ускоряется, как это и ожидалось в предложенной нами

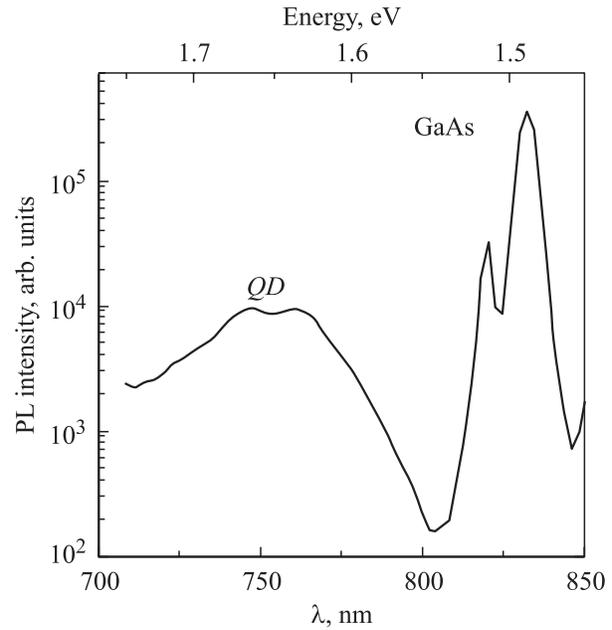


Рис. 1. Спектр фотолюминесценции структуры с квантовыми точками InAs в матрице AlAs, измеренный при температуре $T = 5$ К.

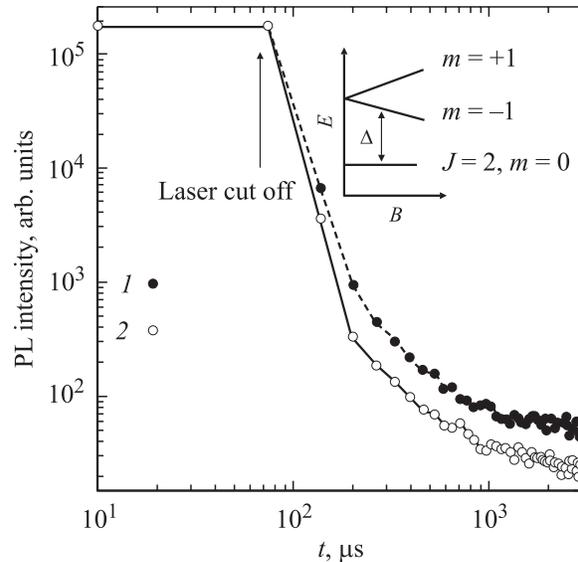


Рис. 2. Кинетика фотолюминесценции квантовых точек InAs/AlAs при температуре 4.2 К, помещенных в магнитное поле B , T : 1 — 0, 2 — 5.

модели для рекомбинации экситонов в изучаемых квантовых точках.

Таким образом, в данной работе изучено влияние магнитного поля на кинетику фотолюминесценции квантовых точек InAs в матрице AlAs. Обнаружено ускорение кинетики в поле 5 Т. Полученные результаты объяснены в рамках модели, учитывающей обменное и зеемановское расщепления экситонных уровней квантовых точек, помещенных в магнитное поле.

Работа была частично поддержана грантами Volkswagen Foundation (Project I/76 837), РФФИ (проект № 04-02-16653) и Министерства промышленности, науки и технологий.

Список литературы

- [1] R.Heitz, A. Kalburge, Q. Xie, M. Grundmann, P. Chen, A. Hoffmann, A. Madhukar, D. Bimberg. Phys. Rev. B, **57**, 9050 (1998).
- [2] T.S. Shamirzaev, A.M. Gilinsky, A.I. Toropov, A.K. Bakarov, D.A. Tenne, K.S. Zhuravlev, C. von Borczyskowski, D.R.T. Zahn. Письма ЖЭТФ, **77**, 459 (2003).
- [3] A.L. Efros, M. Rosen, M. Kuno, M. Nirmal, D.J. Norris, M. Wawendi. Phys. Rev. B, **54**, 4843 (1996).
- [4] Д.А. Тенне, О.Р. Баютова, А.К. Бакаров, А.К. Калагин, А.Г. Милехин, А.И. Торопов, Д.Р.Т. Цан. Письма ЖТФ, **28** (13), 44 (2002).
- [5] H. Fu, Lin-Wang Wang, A. Zunger. Phys. Rev. B, **59**, 5568 (1999).

Редактор Л.В. Беляков

Long-time photoluminescence kinetics of InAs/AIAs quantum dots in magnetic field

T.S. Shamirzaev, A.M. Gilinsky, A.I. Toropov, A.K. Bakarov, S.A. Figurenko, K.S. Zhuravlev

The Institute of Semiconductor Physics
Siberian branch of Russian Academy of Sciences,
630090 Novosibirsk, Russia

Abstract A time-resolved magneto-photoluminescence from self-organized InAs quantum dots embedded in AIAs has been studied at a temperature of 4.2 K. It has been found that photoluminescence decay duration decreases in the presence of a magnetic field. The experimental results are interpreted using a model of exchange and Zeeman splitting of exciton levels in quantum dots in magnetic field.