

Динамика экситонов в структурах с квантовыми ямами ZnCdSe/ZnSe

© С.А. Пермогоров, А.Н. Резницкий, Л.Н. Тенишев, А.В. Корниевский, С.Ю. Вербин, С.В. Иванов, С.В. Сорокин, W. von der Osten*, Н. Stolz*, М. Jütte*

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия
* Universität GH Paderborn,
33095 Paderborn, Deutschland

По спектрам люминесценции при $T = 2\text{ K}$ изучена динамика экситонов в структурах с квантовыми ямами ZnCdSe/ZnSe. На основании исследования разрушения оптического выстраивания экситонов внешним магнитным полем и прямых измерений кинетики затухания поляризованного излучения в пикосекундном диапазоне времен определены времена энергетической и фазовой релаксации состояний локализованных экситонов. Времена жизни экситонной поляризации, измеренные двумя независимыми методами, хорошо согласуются между собой.

Исследованные нами образцы были выращены методом МВЕ на подложках GaAs как лазерные структуры и представляли собой набор квантовых ям $\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Se}$ ($x = 0.2$, толщина 7 nm), разделенных барьерами ZnSe толщиной 6 nm и помещенных между толстыми слоями n - и p -ZnSe.

При гелиевых температурах спектр люминесценции квантовых ям ZnCdSe состоит из одной относительно широкой полосы. Как было показано ранее [1,2], эта полоса представляет собой суперпозицию двух перекрывающихся полос излучения различной природы (рис. 1). Более коротковолновая полоса соответствует излучению экситонов, локализованных на флуктуациях ширины ямы или флуктуациях состава твердого раствора (LE), в то время как полоса при меньших энергиях обусловлена экситонными комплексами, включающими дефект предположительно донорного типа (BE). Уширение обеих полос имеет неоднородную природу.

При резонансном возбуждении линейно поляризованным светом люминесценция в области полосы LE имеет существенную степень линейной поляризации $P_{\text{lin}} = (I_{\parallel} - I_{\perp}) / (I_{\parallel} + I_{\perp})$. Спектр люминесценции на рис. 1 получен с использованием линии Ar^+ лазера 476.5 nm. Резонансное возбуждение люминесценции в этом случае происходит в процессе поглощения с испусканием одного LO фонона. Энергия возбуждаемых экситонов при этом составляет 2570 meV и соответствует коротковолновому краю полосы излучения. Спектральная зависимость степени линейной поляризации показана на рис. 1 заполненными кружками.

Появление линейной поляризации излучения обусловлено оптическим выстраиванием дипольных моментов экситонов в процессе прямого возбуждения, а спектральная зависимость степени поляризации отражает постепенное разрушение выстраивания в процессе сопровождаемой испусканием фононов релаксации энергии экситонов в пределах неоднородно уширенного спектра локализованных состояний. В соответствии с предсказаниями теории [3] оптическое выстраивание не наблюдается в области полосы экситонных комплексов (BE).

Приложение внешнего магнитного поля в конфигурации Фарадея приводит к уменьшению степени линейной

поляризации люминесценции (рис. 2), причем зависимость P_{lin} от поля может быть описана контуром Лоренца

$$P_{\text{lin}} = P_0 \frac{1}{1 + (B/B_{1/2})^2},$$

где

$$B_{1/2} = \frac{h}{g_{\text{ex}} \mu T_d}.$$

Здесь B — напряженность магнитного поля, μ — магнетон Бора, h — постоянная Планка, $g_{\text{ex}} = 3g_h - g_e$ — g -фактор экситона, T_d — время жизни экситонной поляризации, определяемое как полным временем жизни экситонного состояния, так и процессами спиновой релаксации носителей в экситоне.

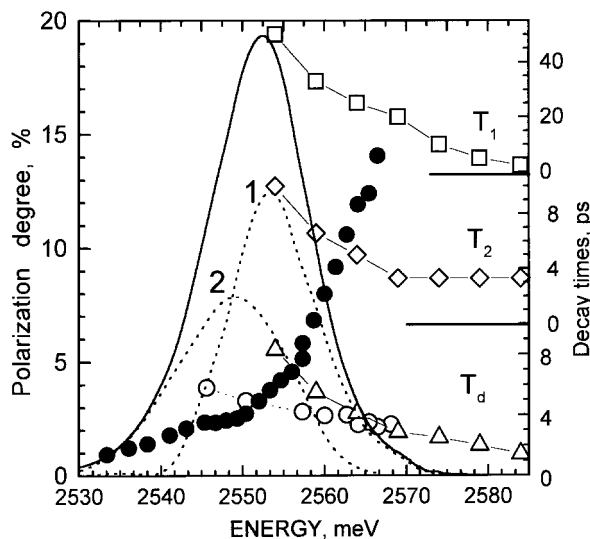


Рис. 1. Спектр экситонной люминесценции квантовых ям ZnCdSe/ZnSe при $T = 2\text{ K}$ (сплошная линия) и его разложение (согласно [1,2]) на полосы излучения локализованных (1) и связанных (2) экситонов (пунктиры). Черные точки — спектральная зависимость степени линейной поляризации P_{lin} при лазерном возбуждении 476.5 nm. Три правых шкалы представляют полное время жизни экситонов T_1 (квадраты), время фазовой релаксации T_2 (ромбы) и время жизни экситонной поляризации T_d (треугольники). Открытые кружки — результаты магнито-оптических измерений T_d .

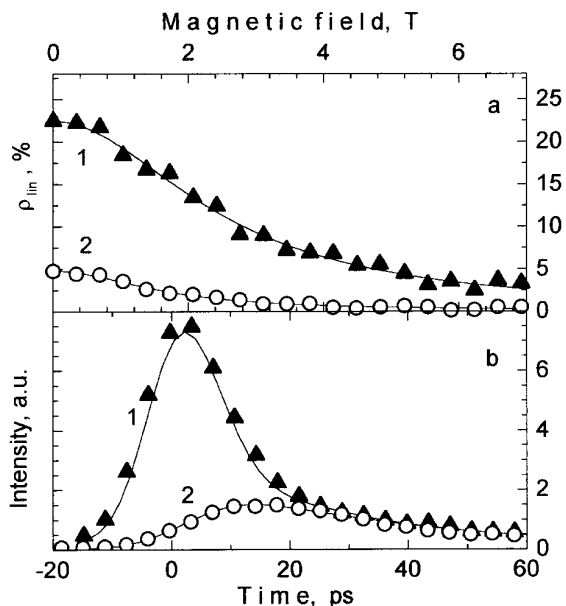


Рис. 2. *a)* Зависимость степени линейной поляризации P_{lin} в условиях возбуждения рис. 1 от внешнего магнитного поля для спектральных позиций 2568 meV (1) и 2557 meV (2). *b)* Кинетика излучения при резонансном возбуждении люминесценции квантовых ям на частоте 2529 meV в поляризации параллельной (1) и перпендикулярной (2) поляризации возбуждающего света. Сплошные кривые на *a* и *b* — описание данных теоретическими моделями.

Используя значение g -фактора для состояний локализованных экситонов $g_{ex} = 1.68$, полученное ранее для тех же образцов в работе [2] на основании теоретического анализа зависимости величины сигнала магнитно-циркулярной поляризации люминесценции от величины магнитного поля, мы определили время жизни экситонной поляризации и его спектральную зависимость. Результаты представлены открытыми кружками в нижней части рис. 1.

Как видно из рисунка, времена жизни поляризации состояний локализованных экситонов на коротковолновом краю полосы излучения имеют величину порядка 3 ps. Этот результат находится в хорошем качественном согласии с наблюдением ярко выраженной структуры с периодом энергии LO фонона в спектрах возбуждения люминесценции этого участка полосы [1], обусловленной малым временем жизни экситонов, ограниченным миграцией энергии к более глубоко локализованным состояниям. Однако по мере увеличения энергии локализации наблюдается лишь незначительный рост T_d . Отсюда можно сделать вывод о том, что миграция энергии не является единственным фактором, влияющим на время жизни поляризации.

Подтверждение этого предположения было получено в результате прямых измерений кинетики затухания излучения при возбуждении импульсным пикосекундным перестраиваемым лазером (длительность импульса 4 ps при частоте повторения 79 MHz). Измерения были проведены в поляризованном свете непосредственно на частоте

возбуждающего света. Типичные результаты измерений кинетики излучения для двух поляризаций представлены в нижней части рис. 2. Анализ экспериментальных данных на основании модели работы [4] позволяет в этом случае независимо определить как полное время жизни экситонов T_1 , определяемое излучательной рекомбинацией и миграцией энергии, так и время фазовой релаксации T_2 , обусловленное процессами спиновой релаксации в локализованном экситоне. Спектральная зависимость времен T_1 и T_2 , полученная в эксперименте, представлена в правой части рис. 1. Независимое определение величин T_1 и T_2 позволяет также вычислить полное время жизни поляризации T_d как $1/T_d = 1/T_1 + 1/T_2$. Величины T_d , вычисленные на основании измерений кинетики затухания излучения во времени, представлены в нижней части рис. 1 треугольниками.

Как видно из рис. 1, времена жизни экситонной поляризации, измеренные двумя независимыми методами, хорошо согласуются между собой в той области спектра, где излучение локализованных экситонов вносит доминирующий вклад. Сопоставление спектральных зависимостей T_1 , T_2 и T_d показывает, что в области коротковолнового края полосы люминесценции времена T_d определяются в основном быстрыми процессами релаксации энергии локализованных экситонов. Однако при увеличении энергии локализации процессы релаксации энергии замедляются, что отражается в существенном росте времени T_1 . При этом величины T_d начинают определяться в основном процессами фазовой релаксации. Времена фазовой релаксации T_2 также увеличиваются с ростом энергии локализации. Возможной причиной этого может быть уменьшение степени случайной анизотропии состояний локализованных экситонов.

В области энергий, где излучение локализованных и связанных экситонов имеет сравнимую интенсивность, наблюдается расхождение величин T_d , полученных двумя разными методами. Одной из причин наблюдаемого отличия может служить зависимость величины g -фактора от энергии локализации экситона. Кроме того, два метода отличаются способом возбуждения экситонов и полученные результаты могут соответствовать разным ансамблям локализованных состояний.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты 96-02-16933 и 97-02-18138) и фонда ИНТАС (грант 94-324).

Список литературы

- [1] S. Permogorov, A. Reznitsky, L. Tenishev, A. Kornievsky, S. Ivanov, S. Sorokin, W. von der Osten, H. Stolz, M. Juette, H. Vogelsang. Proc. 23d Int Conf. Phys. Semicond. Berlin (July 1996). P. 2015–2018.
- [2] A. Reznitsky, A. Kornievsky, S. Permogorov, L. Tenishev, S. Verbin, S. Ivanov, S. Sorokin. J. Lumin. **72–74**, 869 (1997).
- [3] G.E. Pikus, E.L. Ivchenko. In: Excitons / Ed. E.I. Rashba and M.D. Sturge. North-Holland (1982). Ch. 6.
- [4] H. Stolz. In: Springer Tracts in Modern Physics. Springer (1994). V. 130.