

# НАНОФИЗИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

**Труды XXVII Международного симпозиума**

*13–16 марта 2023 г., Нижний Новгород*

## **Том 2**

### *Секция 3*

Полупроводниковые наноструктуры: электронные, оптические свойства, методы формирования

### *Секция 5*

Многослойная и кристаллическая рентгеновская оптика

Нижний Новгород  
ИПФ РАН  
2023

УДК 538.9(063)  
ББК 22.37я431  
32.844.2я431  
Н-25

Н-25 В 2 томах. Том 2-й. — Нижний Новгород : ИПФ РАН, 2023. — 468 с.  
ISBN 978-5-8048-0120-6

#### Организаторы

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Отделение физических наук РАН  
Научный совет РАН по физике полупроводников  
Научный совет РАН по физике конденсированных сред  
Институт физики микроструктур РАН  
Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского  
Благотворительный фонд «От сердца к сердцу»

#### Сопредседатели программного комитета

С. В. Гапонов, академик РАН, ИФМ РАН, Нижний Новгород;  
З. Ф. Красильник, чл.-корр. РАН, ИФМ РАН, Нижний Новгород.

#### Учёный секретарь Симпозиума

Д. А. Татарский, к.ф.-м.н., ИФМ РАН, Нижний Новгород

#### Программный комитет

А. Ю. Аладышкин, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Нижний Новгород
В. В. Бельков, д.ф.-м.н.	ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
И. С. Бурмистров, д.ф.-м.н.	ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН, Черногловка
В. А. Бушуев, д.ф.-м.н.	МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва
В. А. Быков, д.т.н.	NT-MDT Spectrum Instruments, Москва
В. А. Волков, д.ф.-м.н.	ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, Москва
В. И. Гавриленко, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Нижний Новгород
А. Б. Грановский, д.ф.-м.н.	МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва
К. Н. Ельцов, д.ф.-м.н.	ИОФ им. А. М. Прохорова РАН, Москва
С. В. Зайцев-Зотов, д.ф.-м.н.	ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, Москва
С. В. Иванов, д.ф.-м.н.	ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
Е. Л. Ивченко, чл.-корр. РАН	ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
В. В. Кведер, академик РАН	ИФТТ РАН, Черногловка
И. В. Кукушкин, академик РАН	ИФТТ РАН, Черногловка
В. Д. Кулаковский, академик РАН	ИФТТ РАН, Черногловка
А. В. Латышев, академик РАН	ИФП СО РАН им. А. В. Ржанова, Новосибирск
А. С. Мельников, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Нижний Новгород
М. А. Мильяев, д.ф.-м.н.	ИФМ УрО РАН им. М. Н. Михеева, Екатеринбург
В. Л. Миронов, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Нижний Новгород
С. А. Никитов, чл.-корр. РАН	ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, Москва
А. В. Новиков, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Нижний Новгород
Д. В. Рощупкин, д.ф.-м.н.	ИПТМ РАН, Черногловка
В. В. Рязанов, д.ф.-м.н.	ИФТТ РАН, Черногловка
А. В. Садовников, к.ф.-м.н.	СГУ им. Н. Г. Чернышевского, Саратов
Н. Н. Салащенко, чл.-корр. РАН	ИФМ РАН, Нижний Новгород
М. В. Сапожников, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Нижний Новгород
А. А. Саранин, чл.-корр. РАН	ИАПУ ДВО РАН, Владивосток
Ю. А. Филимонов, д.ф.-м.н.	Саратовский филиал ИРЭ РАН, Саратов
А. А. Фраерман, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Нижний Новгород
Д. Р. Хохлов, чл.-корр. РАН	МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва
А. В. Чаплик, академик РАН	ИФП СО РАН им. А. В. Ржанова, Новосибирск
Н. И. Чхало, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Нижний Новгород
Т. В. Шубина, д.ф.-м.н.	ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

#### Организационный комитет

В. Г. Беллюстина	ИФМ РАН, Нижний Новгород
М. В. Зорина	ИФМ РАН, Нижний Новгород
А. В. Иконников	МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва
Д. А. Камелин	ИФМ РАН, Нижний Новгород
Р. С. Малофеев	ИФМ РАН, Нижний Новгород
М. С. Михайленко	ИФМ РАН, Нижний Новгород
С. В. Морозов	ИФМ РАН, Нижний Новгород
Е. Н. Садова	ИФМ РАН, Нижний Новгород
Е. Е. Пестов	ИФМ РАН, Нижний Новгород

ISBN 978-5-8048-0120-6

ББК 22.37я431

32.844.2я431

© ИПФ РАН, 2023

© ИФМ РАН, 2023

# Низкотемпературная экситонная динамика в квантовой яме CdTe/CdZnTe

А. В. Михайлов<sup>1,\*</sup>, Е. С. Храмцов<sup>1</sup>, А. С. Курдюбов<sup>1</sup>, Б. Ф. Грибакин<sup>1,2</sup>, М. Р. Владимиров<sup>2</sup>, Regis Andre<sup>3</sup>, И. В. Игнатьев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Лаборатория оптики спина Санкт-Петербургского государственного университета, Университетская наб., д. 7–9, Санкт-Петербург, 199034, Россия

<sup>2</sup> Laboratoire Charles Coulomb, UMR 5221 CNRS, Université de Montpellier, Place Eugène Bataillon, F-34095, Montpellier, France

<sup>3</sup> Université Grenoble-Alpes, CEA-CNRS joint group "Nano-Physique & Semi-Conducteurs", CNRS, Institut Néel, 25 rue des martyrs, 38042, Grenoble CEDEX 9, France

\*mikhailovav@yandex.ru

Методом накачка — зондирование со спектральным разрешением исследована динамика экситонов в квантовой яме CdTe/CdZnTe шириной 47 нм. Выполнен расчет спектра экситонного отражения в рамках модели нелокального диэлектрического отклика. Определены характерные времена экситон-экситонного рассеяния.

Экситоны в квантовых ямах (КЯ) CdTe сильно отличаются от экситонов в КЯ GaAs по силе осциллятора, борновскому радиусу и энергии связи [1]. Можно ожидать, что экситонная динамика также будет отличной от динамики экситонов в КЯ GaAs, недавно исследованной в работе [2]. В данной работе исследована энергетическая структура экситонов и их динамика в относительно широкой КЯ CdTe/CdZnTe. Основное внимание уделено динамике взаимодействия фоторожденных экситонов друг с другом и другими квазичастицами в системе. Установлено, что динамика в целом аналогична динамике экситонов в КЯ GaAs и характеризуется несколькими временами процессов от долей до десятков наносекунд.

## Эксперимент и расчет

Исследована гетероструктура CdTe/Cd<sub>0.95</sub>Zn<sub>0.05</sub>Te с одиночной КЯ шириной 47 нм, выращенная методом молекулярной пучковой эпитаксии. Легкий и тяжелый экситоны в такой КЯ расщеплены упругим напряжением на величину около 15 мэВ, что позволяет отдельно изучать размерно-квантованные состояния тяжелого экситона.

В спектрах отражения гетероструктуры наблюдается несколько размерно-квантованных экситонных состояний (рис. 1). Для интерпретации спектров

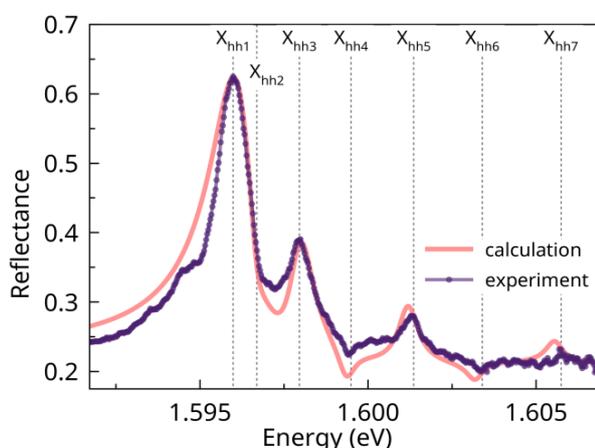


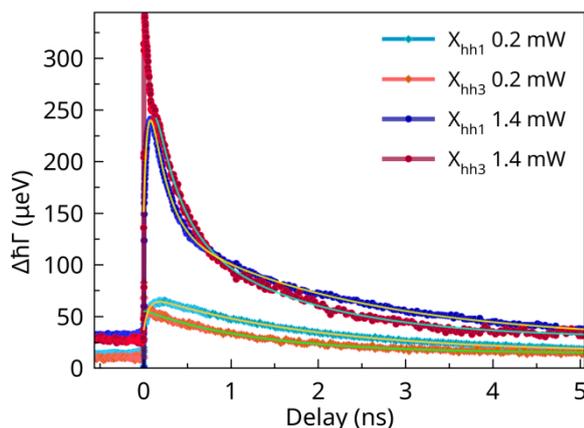
Рис. 1. Спектр отражения образца, измеренный при температуре  $T = 4$  К, и его микроскопическое моделирование. Пунктирными линиями показаны положения экситонных резонансов

отражения выполнен микроскопический расчет энергий экситонных состояний и величины их свето-экситонного взаимодействия. Для этого численно решалось соответствующее трёхмерное уравнение Шрёдингера методом конечных разностей для экситона с тяжёлой дыркой в КЯ в приближении эффективной массы и огибающей волновой функции. Учитывалось смешивание размерно-квантованных состояний электромагнитным полем [3]. В качестве свободных параметров расчета использовалась величина нерадикационного уширения экситонных резонансов,  $\hbar\Gamma = 0.3$  мэВ, и небольшой общий сдвиг спектра вверх по энергии,  $\Delta E = 2.15$  мэВ, обусловленный, вероятно, механическими напряжениями в структуре. Получено хорошее согласие с экспериментом, что позволило интерпретировать наблюдаемые спектральные особенности (см. рис. 1). Расчетные значения радиационного уширения равны:  $\hbar\Gamma_0 = 428.9, 40.4, 71.7, 19.4, 34.2, 12.1, 11.3$  мкэВ для состояний  $X_{hh1}, \dots, X_{hh7}$ .

## Динамика экситонов

Динамика экситонных состояний изучалась с помощью спектрально-разрешенного метода «накачка — зондирование» [2]. Накачка производилась как в нижайшее состояние, так и в более высокие размерно-квантованные состояния. Обработка экспериментальных результатов и определение основных характеристик экситонных резонансов, радиационного ( $\hbar\Gamma_0$ ) и нерадикационного ( $\hbar\Gamma$ ) уширений, энергии ( $\hbar\omega_0$ ) и фазы отражения ( $\phi$ ), осуществлялись с помощью теории нелокального диэлектрического отклика [4]. Предполагалось, что неоднородное уширение резонансов при разбросе энергии экситонных переходов мало по сравнению с однородным уширением. Основное внимание в работе уделено динамике нерадикационного уширения, которое несет информацию о взаимодействии экситонов с различными квазичастицами.

На рис. 2 приведен пример динамических кривых, измеренных при двух мощностях возбуждения. Показана только фотоиндуцированная часть нерадикационного уширения. При малой мощности накачки наблюдается быстрое нарастание уширения и затем медленный спад его величины с характерным временем 1–2 нс. Кроме того, наблюдается долгоживущая



**Рис. 2.** Динамика нерадикационного уширения основного ( $X_{hh1}$ ) и третьего ( $X_{hh3}$ ) размерно-квантованного состояния тяжелого экситона при двух мощностях импульсной накачки в состояние  $X_{hh1}$ . Диаметр лазерного пятна на образце  $d = 0.1$  м.  $T = 4$  К. Плавные кривые — подгонка формулой:  $y = c \cdot [a_1 \cdot \exp(-t/t_1) + a_2 \cdot \exp(-t/t_2) - \exp(-t/t_3)]$

компонента уширения, не затухающая вплоть до прихода следующего лазерного импульса. Она видна как ненулевой сигнал при отрицательных задержках (импульс зондирования раньше импульса накачки). При больших мощностях накачки уширение увеличивается в несколько раз. Кроме того, наблюдается еще одна компонента затухания уширения с характерным временем 0.2 нс. В целом поведение уширения аналогично тому, что наблюдается для экситонов в КЯ GaAs/AlGaAs [2].

Следуя работе [2], мы предполагаем, что наблюдаемая динамика уширения определяется динамикой темных экситонов с волновым вектором, превышающим волновой вектор света в CdTe. Взаимодействие светлых экситонов с резервуаром темных экситонов, а также со свободными носителями заряда и фононами определяет характерные времена динамики уширения, наблюдаемые экспериментально. Быстрое нарастание уширения в момент прихода импульса накачки связано с выбросом фоторожденных экситонов

за пределы светового конуса. Медленная релаксация уширения вызвана опустошением резервуара путем возврата экситонов в световой конус при рассеянии их друг на друге или свободных носителях заряда с последующей быстрой рекомбинацией. Наиболее медленная компонента динамики, вероятно, обусловлена фононно-индуцированным рассеянием экситонов в световой конус. Наблюдаемая при большой мощности накачки компонента динамики с характерным временем 0.2 нс предположительно обусловлена связыванием свободных носителей заряда в экситоны.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что в КЯ CdTe/CdZnTe наблюдается долгоживущая динамика нерадикационного уширения экситонных резонансов, характеризующаясь несколькими временами затухания. Она определяется несколькими динамическими процессами в резервуаре неизлучающих экситонов.

### Финансирование

Авторы благодарят СПбГУ за финансовую поддержку в рамках грантов № 94030557 и № 94271404. И. В. И. благодарит РФФИ за поддержку теоретической части работы в рамках гранта № 19-72-20039. М. Р. В. благодарит Национальный центр научных исследований Франции, грант № ANR-21-CE30-0049. Б. Ф. Г. благодарит грант от Правительства Франции (грант Вернадского) под управлением Campus France.

### Литература

1. E. L. Ivchenko, A. V. Kavokin, V. P. Kochereshko, et al. // Phys. Rev. B, **46**, 7713 (1992).
2. A. S. Kurdyubov, A. V. Trifonov, I. Ya. Gerlovin et al. // Phys. Rev. B, **104**, 035414 (2021).
3. E. S. Khrantsov, P. S. Grigoryev, D. K. Loginov et al. // Phys. Rev. B, **99**, 035431 (2019).
4. E. L. Ivchenko, Optical Spectroscopy of Semiconductor Nanostructures. Berlin : Springer, 2004.