

при  $H_0 = 0$ , а при увеличении величины внешнего магнитного поля растет медленнее, чем частота пульсационных колебаний.

Таким образом, в магнитных материалах с высококоэрцитивными переходными слоями возможно (наряду с возбуждением пульсационных, изгибных колебаний) существование и наклонных колебаний, частота которых не обращается в нуль при уменьшении внешнего магнитного поля.

Авторы выражают благодарность Ю.И.Горобцу за интерес к работе и плодотворное обсуждение результатов.

Данная работа выполнена в рамках Проекта, финансируемого Министерством образования Украины.

### Список литературы

- [1] Бажанин Г.А., Ильичева Е.Н., Мушенкова И.В., Федюнин Ю.Н., Шишков А.Г., Широкова Н.Б. // ЖТФ. 1985. Т. 55. № 2. С. 396-399.
- [2] Бажанин Г.А., Ильичева Е.Н., Котов В.А., Телеснин Р.В., Шишков А.Г. // ФТТ. 1987. Т. 29. № 1. С. 257-259.
- [3] Porvadi-Horvath M., Crizaki A., Fellegvari I., Vestesy G. // IEEE Trans. Magnet. 1984. V. 20. N 5. P. 1123-1127.
- [4] Барьяхтар В.Г., Горобец Ю.И. Цилиндрические магнитные домены и их решетки. Киев: Наукова думка, 1988. 163 с.

Донецкий государственный университет

Поступило в Редакцию  
6 декабря 1993 г.

УДК 535.372+538.95

© Физика твердого тела, том 36, № 5, 1994  
Solid State Physics, vol. 36, N 5, 1994

## КИНЕТИКА ЗАТУХАНИЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ АВТОЛОКАЛИЗОВАННЫХ ЭКСИТОНОВ В КРИСТАЛЛАХ $\text{BeO}$

*В.А.Пустоваров, В.Ю.Иванов, А.В.Кружалов, Э.И.Зинин*

Люминесценция автолокализованных экситонов (АЛЭ), хорошо изученная на примере щелочно-галогидных кристаллов (см., например, [1]), характеризуется, как правило, двумя полосами свечения. Длинноволновое свечение поляризовано поперек молекулы  $X_2^-$ , имеет время затухания  $10^{-6} - 10^{-3}$  с и соответствует триплет-синглетным переходам в АЛЭ. Коротковолновое свечение поляризовано вдоль оси молекулы, имеет время затухания порядка  $10^{-9}$  с, что характерно для разрешенных синглет-синглетных переходов в АЛЭ.

Для класса оксидных кристаллов (например,  $Y_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Y_3Al_5O_{12}$ ) обнаружена люминесценция триплетных АЛЭ [2], однако вопрос о синглетных АЛЭ пока не ясен. Хотя в кинетике свечения в широком диапазоне температур имеются быстрые компоненты со временем затухания порядка  $10^{-8}$  с, их спектральный состав, а также спектры возбуждения не установлены, что связано, в частности, с недостаточным временным разрешением. Для кристаллов оксида бериллия также изучена люминесценция АЛЭ, которая характеризуется двумя полосами

свечения — 6.7 (АЛЭ) и 4.9 eV (АЛЭ). Обе полосы связаны с излучательной аннигиляцией АЛЭ, дырочным ядром которых являются поляроны малого радиуса типа  $O^-$ -ионов в аксиальной или экваториальной конфигурации соответственно [3,4]. Триплетный характер состояния АЛЭ не вызывает сомнений [5], в то время как мультиплетность состояния АЛЭ до конца не выяснена. Согласно [5], свечение 4.9 eV (253 nm) имеет сложную кинетику затухания: слабо зависящий от температуры экспоненциальный компонент  $\tau = 29$  ns и инерционные составляющие, аппроксимирующиеся гиперболическим законом.

Настоящая работа посвящена изучению начального этапа кинетики затухания люминесценции 4.9 eV, поиску проявлений свечения синглетных АЛЭ в номинально чистых кристаллах оксида бериллия. Это стало возможным благодаря использованию техники люминесцентной спектроскопии с субнаносекундным временным разрешением на канале синхротронного излучения накопителя БЭПП-3 Института ядерной физики СО РАН [7]. Возбуждающие импульсы синхротронного излучения рентгеновского диапазона энергий (3–62 keV) имели гауссову форму ( $\sigma = 0.43$  ns), частоту следования 4 MHz и близкую к 100% линейную поляризацию.

При возбуждении импульсами синхротронного излучения начальный этап кинетики затухания BeO в области 250–500 nm содержит два экспоненциальных компонента: быстрый  $\tau_1 = 2.0 \pm 0.1$  ns и более медленный  $\tau_2 = 45 \pm 2$  ns. Параметры кинетики определялись методом свертки [7]. Спектр быстрого компонента смещен относительно спектра медленного компонента или совпадающего с ним спектра стационарной рентгенолюминесценции (рис. 1). Квантовый выход и время затухания быстрого компонента слабо зависят от температуры в исследованном интервале 80–550 K (область температурной стабильности АЛЭ) и практически совпадают с температурной зависимостью стационарной рентгенолюминесценции [6]. Введение гетеровалентных (Al, B) или изовалентных (Zn, Mg) примесей не влияет на

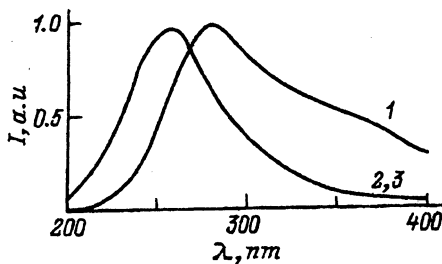


Рис. 1. Разрешенные во времени (1,2) и стационарный (3) спектры люминесценции BeO при возбуждении синхротронного излучения ( $T = 300$  K,  $E \parallel C$ ).

1 — спектр быстрого компонента, полученный как разность спектров, измеренных в момент импульса возбуждения и с задержкой 40 ns; 2 — спектр, измеренный с задержкой 40 ns.

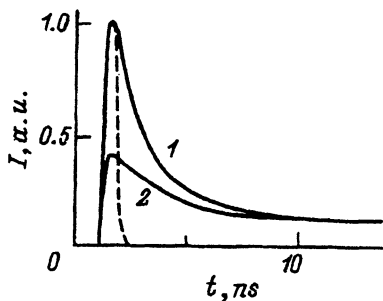


Рис. 2. Кинетика затухания люминесценции ориентированных кристаллов BeO ( $T = 300$  K,  $\lambda = 350$  nm).

1 —  $E \parallel C$ , 2 —  $E \perp C$ . Штрихи — форма возбуждающего импульса синхротронного излучения.

относительный выход короткого компонента. Также не замечено влияния плотности возбуждения синхротронного излучения в пределах  $10^{14} - 6 \cdot 10^{16} \text{ photon} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$  на соотношение интенсивностей компонент. Нет отклонений от линейности между плотностью возбуждения и пиковой интенсивностью импульса люминесценции, что указывает на отсутствие процессов насыщения.

Поскольку кристаллы  $\text{BeO}$  обладают выраженной анизотропией кристаллической решетки (гексагональная решетка типа вюрцита, пространственная группа  $C_{6v}$ ), использование поляризованного синхротронного излучения позволило четко наблюдать ориентационные эффекты. Короткий компонент наблюдается преимущественно при параллельной ориентации оптической оси  $C$  кристалла относительно электрического вектора синхротронного излучения. При  $E \perp C$  вклад короткого компонента существенно меньше (рис. 2). Поляризованные измерения показывают, что короткий компонент имеет степень поляризации  $P = +70\%$ . Степень поляризации медленного компонента иная, причем меняется даже знак,  $P = -50\%$ . Следует отметить, что, согласно работе [3], для  $\text{BeO}$  степень поляризации стационарной рентгенолюминесценции, которая определяется преимущественно длинными компонентами кинетики, также отрицательна и составляет  $P = -60\%$ . Это согласуется с нашими данными. Экспериментальные результаты указывают, что быстрое свечение в  $\text{BeO}$  со временем затухания  $2.0 \text{ ns}$  по своим спектрально-кинетическим, ориентационным, поляризационным характеристикам существенно отличается от ранее изученного свечения АЛЭ в  $\text{BeO}$ . Экспериментальные данные не позволяют связать быстрое свечение с проявлением примесных или собственных дефектов. Электронная структура  $\text{BeO}$  [8] не содержит в себе предпосылок для связи его с основными валентными переходами, распространенного вида быстрого свечения кристаллов [9]. Однако ситуация очень схожа с проявлением синглетных и триплетных АЛЭ в кристаллах инертных газов, где их спектры практически одинаковы [10].

Аналогичная картина, согласно ряду последних работ (см., например, [11]), наблюдается и для кристаллов  $\text{NaI}$ , где состояния синглетных ( $\tau_1 = 1.2 \text{ ns}$ ) и триплетных ( $\tau_2 = 110 \text{ ns}$ ) по энергетике практически совпадают. Для оксидных кристаллов  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  в работе [12] короткие компоненты с  $\tau \leq 50 \text{ ns}$  связывались с переходами с расщепленных триплетных неравновесных состояний. Однако параметры кинетики, поляризованные и ориентационные характеристики быстрого свечения в  $\text{BeO}$  не позволяют рассматривать его в такой модели. По всем свойствам быстрое свечение в  $\text{BeO}$  логично связать с люминесценцией синглетных АЛЭ. Дальнейшие измерения разрешенных во времени спектров возбуждения быстрого компонента в ВУФ-области спектра позволят изучить релаксацию экситонов на триплетный и синглетный излучательные уровни.

#### Список литературы

- [1] Лушик Ч.В. Экситоны / Под ред. Э.И. Рашбы и М.Д. Стерджа. М.: Наука, 1985. С. 362-384.
- [2] Кузнецов А.И., Абрамов В.Н., Мюрк В.Б. и др. // Труды ИФ АН ЭССР. 1989. Т. 63. С. 19-42.
- [3] Ivanov V.Yu., Pustovarov V.A., Kruzhalov A.V. et al. // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. 1989. V. A282. P. 559-562.

- [4] Иванов В.Ю., Горбунов С.В., Яковлев В.Ю. и др. // Тез. докл. VIII Всес. конф. по физике вакуумного ультрафиолета и его взаимодействию с веществом. ВУФ-89. Иркутск, 1989. С. 14-15.
- [5] Горбунов С.В., Яковлев В.Ю., Иванов В.Ю. и др. // ФТТ. 1990. Т. 32. № 10. С. 2942-2946.
- [6] Гиниятуллин К.Н., Малышева А.Ф., Кружалов А.В. и др. // Труды ИФ АН ЭССР. 1982. Т. 53. С. 71-82.
- [7] Pustovarov V.A., Betenekova T.A., Zinin E.I. et al. // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. 1991. V. A308. P. 203-204.
- [8] Лобач В.А., Рубин И.Р., Кружалов А.В. и др. // ФТТ. 1987. Т. 29. № 9. С. 2610-2615.
- [9] Родный П.А. // ФТТ. 1992. Т. 34. № 7. С. 1975-1988.
- [10] Schwentner N., Dossel O., Nahme H. Laser Techniques for Extreme Ultraviolet Spectroscopy. New York, 1982. P. 163.
- [11] Itoh M., Hashimoto S., Ohno N. // J. Phys. Soc. Japan. 1991. V. 60. N 12. P. 4357-4365.
- [12] Мюрк В.В., Исмаилов К.М. // ФТТ. 1993. Т. 35. № 2. С. 498-500.

Уральский государственный  
технический университет  
Екатеринбург

Поступило в Редакцию  
7 декабря 1993 г.

УДК 539.193:537.635:541.(64-516)

© Физика твердого тела, том 36, № 5, 1994  
Solid State Physics, vol. 36, N 5, 1994

## ДАЛЬНЕЕ СВЕРХТОНКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В МАКРОРАДИКАЛАХ ПОЛИЭТИЛЕНА

*Н.Г.Квачадзе, Э.Е.Томашевский*

Высокая разрешающая способность метода двойного электронно-ядерного резонанса (ДЭЯР) позволяет исследовать слабые магнитные взаимодействия в свободных радикалах, стабилизирующихся в полимерах. В настоящей работе метод ДЭЯР был применен для изучения сверхтонкого взаимодействия (СТВ) между неспаренным электроном и удаленными протонами в полиэтиленовом макрорадикале



Радикалы создавали рентгеновским облучением одноосноориентированных образцов полиэтилена высокой плотности. Спектры ДЭЯР записывали при низких температурах на лабораторном спектрометре [1], работающем на частоте 35 GHz. Развертка по радиочастоте осуществлялась в пределах от 50 до 58 MHz.

На рисунке, *a, b* показан участок спектра ДЭЯР, характеризующий СТВ с собственными удаленными протонами в макрорадикале и с протонами соседних молекул полимера. Спектр, записанный при параллельной ориентации оси вытяжки *L* образца в магнитном поле *H*, имеет более простую форму по сравнению со спектром, записанным при перпендикулярной ориентации.

При анализе спектров было принято во внимание следующее. Изотропная компонента СТВ *a*, обусловленная возникновением неравной нулю спиновой плотности на *S*-орбитали атома водорода, существенна