

Спектры ИК-отражения структур с квантовыми точками CdTe/ZnTe и проявление в них свойств квантовых точек CdTe, а также эффектов взаимной диффузии

© И.В. Кучеренко, В.С. Виноградов, Г. Карчевски*, Н.Н. Новикова**, М. Чистелли Гауди***, М. Пиччинини***

Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук,
119991 Москва, Россия

* Институт физики Польской академии наук,
02-668 Варшава, Польша

** Институт спектроскопии Российской академии наук,
142190 Троицк, Московская обл., Россия

*** Национальная лаборатория Фраскати ИНФН,
00044 Фраскати, Италия

E-mail: vvs@sci.lebedev.ru, kucheran@sci.lebedev.ru

(Поступила в Редакцию 13 декабря 2006 г.)

Исследованы спектры ИК-отражения структур из чередующихся слоев квантовых точек CdTe и барьеров ZnTe, выращенных на буферных слоях ZnTe и CdTe/ZnTe на подложке (001) GaAs. Проведен дисперсионный анализ спектров и найдены параметры осцилляторов. Квантовые точки проявляются в спектрах в виде широкой полосы с частотой, близкой к частоте фрелиховской моды. В спектрах обнаружены также свидетельства взаимной диффузии CdTe и ZnTe — полосы, связанные с локальной модой Zn в CdTe и двумя щелевыми модами Cd в ZnTe.

Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН „Квантовые наноструктуры“.

PACS: 78.67.Hc, 78.40.Fy

1. Введение

Структуры с квантовыми точками в настоящее время вызывают большой интерес исследователей. Причиной такого внимания являются особые свойства квантовых точек, отличные от свойств объемных материалов, а также перспективы их применений в электронике, биологии, медицине и других областях. Квантовые точки можно получать различными способами. Наиболее популярными сейчас являются способы, основанные на использовании явления самоорганизации. Это методы молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) и коллоидной химии. Применяя эти методы, можно получать микрокристаллы, имеющие в размере несколько нанометров. Эти нанокристаллы (квантовые точки) имеют ширину запрещенной зоны, энергию квантов люминесценции, а также другие физические параметры, меняющиеся с их размером. В настоящее время для исследования структур с квантовыми точками чаще всего используются структурные методы, а также метод фотолюминесценции. Реже применяются методы решеточной спектроскопии. Отметим, однако, что они широко применялись ранее для исследования более крупных, микронных, частиц [1]. Методы решеточной спектроскопии (ИК-отражение и комбинационное рассеяние света) позволяют получить ценную дополнительную информацию о таких существенных для физики квантовых точек факторах, как упругие напряжения, границы раздела, форма, состав, структура квантовых точек и взаимодействие между ними.

Ранее с применением ИК-спектроскопии нами исследовались структуры из нанокристаллов CdTe, CdSe и CdTe/CdSe, полученные методом коллоидной химии [2]. В данной работе мы исследуем спектры ИК-отражения структур с квантовыми точками CdTe и барьерами ZnTe, выращенных методом МЛЭ. Ранее мы исследовали эти структуры с применением метода комбинационного рассеяния и фотолюминесценции [3,4]. Отметим, что сверхрешетки из ультратонких слоев CdTe и ZnTe методами решеточной спектроскопии исследовались в [5,6].

2. Эксперимент

Структуры CdTe/ZnTe с квантовыми точками CdTe выращивались методом МЛЭ на полуизолирующей подложке (001) GaAs толщиной 0.4 mm. Исследовались две группы образцов: первая группа (103B и 203A) была выращена на буферном слое ZnTe с толщиной 5 μm, вторая группа 203B (с числом периодов 200, 20 и 1) — на буферном слое CdTe (1 μm)/ZnTe (4 μm). Характеристики образцов даны в табл. 1. Толщина слоев CdTe была одинаковой для всех структур и составляла 3 монослоя (МС). Число МС ZnTe изменялось от 5 до 50. Число периодов варьировалось от 1 до 400.

Структурные свойства образцов исследовались на рентгеновском дифрактометре высокого разрешения, а также на просвечивающем электронном микроскопе JEOL 2000 с точечным разрешением 0.27 nm. Анализ изменений решеточных параметров в направлении оси

Таблица 1. Параметры образцов

Структуры CdTe/ZnTe с квантовыми точками CdTe	Число периодов N	Толщина барьерного слоя ZnTe, ml	Буферный слой
103B	100	50	ZnTe
203A	400	5	ZnTe
203B	20	10	CdTe/ZnTe
203B	200	10	CdTe/ZnTe

роста показал, что в изучаемых структурах наблюдаются островки CdTe, имеющие форму диска диаметром 6–10 nm и высотой 2 nm [7]. Измерения спектров отражения при угле падения, близком к нормальному, проводились на Фурье-спектрометре типа Equinox 55 с разрешением 1.5 cm^{-1} в интервале $50\text{--}700 \text{ cm}^{-1}$ при температурах 10, 100, 200 и 300 K. Общее число сканов составляло 150. Спектр регистрировался высокочувствительным полупроводниковым болометром, охлажденным до температуры жидкого гелия. Спектр отражения образца сравнивался со спектром отражения золотого зеркала, напыленного на образец.

Спектры отражения для двух групп образцов с буферными слоями ZnTe и CdTe/ZnTe при $T = 10 \text{ K}$ представлены на рис. 1 и 2. Для наглядности спектральные кривые смещены относительно друг друга по оси ординат. Опишем качественно экспериментальные результаты. На всех кривых отражения в области прозрачности подложки GaAs и слоев наблюдаются частые осцилляции, связанные с интерференцией на подложке. На спектрах отражения в образцах с буферным слоем ZnTe (рис. 1) видны две полосы с центрами при частотах 154 и 187 cm^{-1} . Первая полоса связана с отражением от слоев квантовых точек CdTe, а вторая — с отражением от слоев ZnTe. Отличие спектров отражения образцов с буферным слоем CdTe/ZnTe (рис. 2) состоит в том, что здесь проявляется мода, соответствующая TO -фонону буферного слоя CdTe (144 cm^{-1}), а также мода 148 cm^{-1} , представляющая собой TO -моду CdTe, сдвинутую в сторону высоких частот в результате диффузии Zn в CdTe вблизи интерфейса. В спектре видна также полоса 172 cm^{-1} , связанная с колебаниями Zn в CdTe. Вклад от квантовых точек CdTe в этих спектрах мало заметен и лучше выявляется при дисперсионном анализе (табл. 2). Сравнение спектров на рис. 1, 2 позволяет видеть особенности проявления квантовых точек CdTe в ИК-спектрах.

Для проведения дисперсионного анализа спектров решеточного отражения использовалась модель в виде двух слоев, в которой учитывалась интерференция при отражении волн от границ слоев. Один слой представлял подложку GaAs, а другой — саму структуру с буферным слоем. Диэлектрические свойства структуры и буферных

слоев описывались выражением вида

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \sum_j \frac{S^j (\omega_{TO}^j)^2}{(\omega_{TO}^j)^2 - \omega^2 - i\omega\Gamma^j},$$

где ε — высокочастотная диэлектрическая константа, ω_{TO}^j — частота, S^j — сила осциллятора и Γ^j — коэффициент затухания поперечной моды с индексом j . Эти параметры подбирались таким образом, чтобы получить наилучшее совпадение с экспериментом. Стартовые значения ε_{∞} брались из [8]. Подобный анализ проводился нами ранее, но с использованием более простой модели [9]. Кривые, полученные в результате подгонки, вместе с экспериментальными данными представлены на рис. 1, 2 для $T = 10 \text{ K}$. В табл. 2 приведены значения параметров, определенные из дисперсионного анализа. Для подложки GaAs получены следующие значения: $\varepsilon_{\infty} = 13.3$, $\omega_{TO} = 271.7 \text{ cm}^{-1}$ и $\Gamma = 0.3 \text{ cm}^{-1}$.

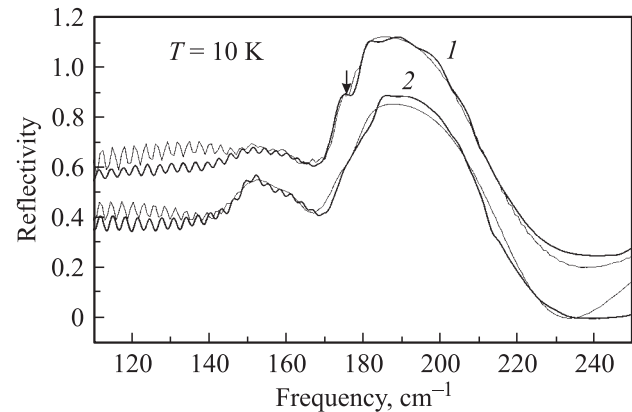


Рис. 1. Спектры решеточного ИК-отражения для двух структур CdTe/ZnTe с квантовыми точками CdTe (буферный слой ZnTe). 1 — 103B, 2 — 203A. Жирные линии соответствуют экспериментальным данным при $T = 10 \text{ K}$, тонкие линии — результат процедуры подгонки, описанной в тексте.

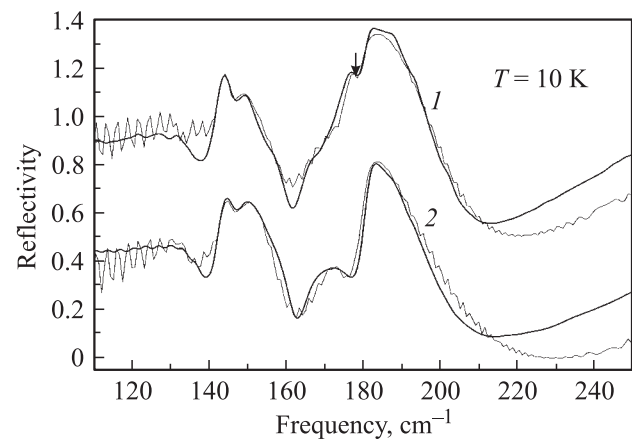


Рис. 2. Спектры решеточного ИК-отражения для двух структур CdTe/ZnTe с квантовыми точками CdTe (буферный слой CdTe/ZnTe). 1 — 203B (200), 2 — 203B (20). Жирные линии соответствуют экспериментальным данным при $T = 10 \text{ K}$, тонкие линии — получены так же, как и на рис. 1.

Таблица 2. Значения параметров S , ω (см^{-1}), Γ (см^{-1}), полученные в результате дисперсионного анализа ($T = 10\text{ К}$)

Параметр	Буферный слой		Щелевая мода 2	Квантовые точки CdTe	Щелевая мода 1	TO-мода CdTe в сплаве ZnCdTe	Локальное колебание Zn в CdTe
	ZnTe	CdTe					
203B (200)							
S	0.84	0.82	0.87	0.46	0.1	1.06	0.09
ω	180.4	144.0	177	152.6	161.3	148	174
Γ	3.0	2.1	2.45	13.4	9.8	6.5	3.2
203B (20)							
S	0.65	0.81				0.81	0.44
ω	180.4	144				148	172.3
Γ	2.26	2.8				6.6	7.6
103B							
S	1.74		1.52	0.86	0.83		
ω	180.4		178.7	152.1	160.2		
Γ	2.3		2.3	8.8	10		
203A							
S	2.71		0.04	1.62	0.94		
ω	180.4		177.5	153.8	161.3		
Γ	5.1		2.34	10.8	11.6		

3. Обсуждение результатов эксперимента

Так как на экспериментальных кривых нами замечены проявления эффектов взаимной диффузии CdTe и ZnTe, для их анализа в спектра были рассчитаны коэффициенты отражения и другие диэлектрические функции CdTe и ZnTe с примесями Zn и Cd. Расчеты были проведены тем же способом, что и в работе [10]. Выражения для диэлектрической функции взяты из работ [11,12], а плотности фононных состояний CdTe и ZnTe в зависимости от частоты — из работ [13,14]. Значения констант в диэлектрических функциях брались при комнатной температуре. На рис. 3 изображены частотные зависимости коэффициента отражения $R(\omega)$

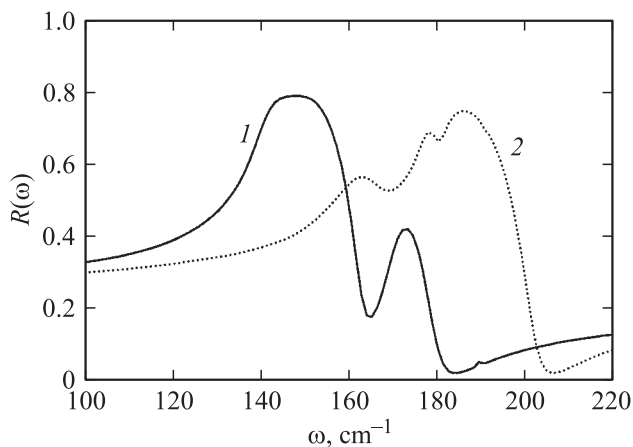


Рис. 3. Теоретические зависимости коэффициента отражения от частоты. 1 — для CdTe с примесью Zn (доля Zn равна 0.2), 2 — для ZnTe с примесью Cd (доля Cd равна 0.4).

для CdTe с примесью Zn, доля атомов Zn равна 0.2 (кривая 1), и ZnTe с примесью Cd, доля атомов Cd равна 0.4 (кривая 2); $\Gamma = 5\text{ см}^{-1}$. На кривой 1 с низкочастотной стороны видна основная полоса отражения, а при частоте $\sim 174\text{ см}^{-1}$ — примесная полоса, развивающаяся из локальной моды Zn в CdTe. Эта полоса хорошо заметна на кривых 1, 2 (рис. 2). На кривой 2 (рис. 3) слева от основной видны полосы при частотах ~ 164 и $\sim 178\text{ см}^{-1}$. Эти полосы возникают при замещении атома Zn атомом Cd и располагаются в щелях спектра ZnTe: одна между акустическими и оптическими, а другая между поперечными и продольными оптическими колебаниями. Соответствующие этим полосам частоты осцилляторов обозначены в табл. 2 как щелевая мода 1 и щелевая мода 2 соответственно. Отметим, что особенность при $\sim 178\text{ см}^{-1}$ наблюдалась в спектрах ИК-отражения сверхрешеток CdTe/ZnTe со сверхтонкими слоями [5]. В этой работе особенность $\sim 178\text{ см}^{-1}$ объяснялась действием на слои ZnTe растягивающих упругих напряжений со стороны слоев CdTe. В нашем случае такое объяснение не подходит, так как слой CdTe толщиной в 3 МС, к тому же разбитый на квантовые точки, не может так растянуть слой ZnTe толщиной в 50 МС (стрелка на кривой 1, рис. 1). Полосы отражения на кривых 1, 2 (рис. 1) с центром $\sim 152\text{ см}^{-1}$ обусловлены ИК-активными модами квантовых точек. Полученная из дисперсионного анализа частота 152 см^{-1} (табл. 2) близка к частоте дипольных колебаний сферы CdTe в окружении ZnTe, т.е. к частоте фрелиховской моды, а параметр затухания $\Gamma \sim 10\text{ см}^{-1}$. На высокочастотной стороне от полосы 152 см^{-1} в районе $\sim 160\text{ см}^{-1}$ заметно присутствие щелевой моды примеси Cd в ZnTe. Полоса в районе колебаний CdTe

на рис. 2 (кривые 1, 2) представляет собой суперпозицию полосы $\sim 144 \text{ cm}^{-1}$ от буферного слоя CdTe и полосы $\sim 148 \text{ cm}^{-1}$ от интерфейсного слоя буфера CdTe/ZnTe. Частота 148 cm^{-1} приблизительно соответствует частоте TO -моды твердого раствора $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ с $x = 0.2$ [15,16].

Итак, в данной работе исследованы спектры ИК-отражения структур CdTe/ZnTe, выращенных на буферных слоях ZnTe и CdTe/ZnTe, с квантовыми точками CdTe. Выявлены характерные особенности спектров квантовых точек CdTe: частота моды, близкая к фрелиховской частоте, и повышенное затухание, что позволяет отличить их от спектров плоских слоев того же материала. В спектрах исследованных структур обнаружены особенности, связанные с локальными модами атомов Zn в CdTe и щелевыми модами Cd в ZnTe, что свидетельствует о заметной роли процессов диффузии при росте структур.

В целом, продемонстрированы значительные возможности метода ИК-отражения при исследовании структур с квантовыми точками. Полученная информация полезна как для дальнейших фундаментальных исследований квантовых точек, так и для отработки технологии их выращивания.

Список литературы

- [1] R. Ruppin, R. Englman. Rep. Prog. Phys. **33**, 149 (1970).
- [2] Р.Б. Васильев, В.С. Виноградов, С.Г. Дорофеев, С.П. Козырев, И.В. Кучеренко, Н.Н. Новикова. ФТТ **49**, 523 (2007).
- [3] В.С. Виноградов, Л.К. Водопьянов, Г. Карчевски, Н.Н. Мельник. ФТТ **48**, 902 (2006).
- [4] E.E. Onishchenko, V.S. Bagaev, G. Karczewski, S.P. Kozyrev, I.V. Kucherenko, N.N. Mel'nik, V.S. Vinogradov, L.K. Vodop'yanov. Phys. Stat. Sol. (c) **3**, 881 (2006).
- [5] T. Fromherz, F. Hauzenberger, W. Feschinger, M. Helm, P. Juza, H. Sitter, G. Bauer. Phys. Rev. B **47**, 1998 (1993).
- [6] Eunsoon Oh, A.K. Ramdas, T. Fromherz, W. Faschinger, G. Bauer, H. Sitter. Phys. Rev. B **48**, 17364 (1993).
- [7] S. Mackowski, G. Karczewski, T. Wojtowicz, J. Kossut, S. Kret, A. Szczepanska, P. Dluzewski, G. Prechtel, W. Heiss. Appl. Phys. Lett. **78**, 3884 (2001).
- [8] Landolt-Bornstein. Tables / Eds O. Madelung, M. Schulz. Springer, Berlin (1987). V. III/22a.
- [9] S.P. Kozyrev, L.K. Vodopyanov. Semicond. Sci. Technol. **14**, 660 (1999).
- [10] L.K. Vodopyanov, E.A. Vinogradov, V.S. Vinogradov, I.V. Kucherenko, B.N. Mavrin, N.N. Novikova, P.V. Shapkin. Phys. Stat. Sol. (c) **1**, 3162 (2004).
- [11] В.С. Виноградов. ФТТ **11**, 2062 (1969).
- [12] Л.К. Водопьянов, Е.А. Виноградов, В.С. Виноградов. ФТТ **16**, 849 (1974).
- [13] J.M. Rowe, R.M. Nicklow, D.L. Price, K. Zanio. Phys. Rev. B **10**, 671 (1974).
- [14] N. Vagelatos, D. Wehe, J.S. King. J. Chem. Phys. **60**, 3613 (1974).
- [15] S. Perkowitz, L.S. Kim, Z.C. Feng, P. Vecla. Phys. Rev. B **42**, 1455 (1990).
- [16] С.П. Козырев, В.Н. Пырков, Л.К. Водопьянов. ФТТ **34**, 2367 (1992).