

Электронные состояния и колебательные спектры сверхрешеток квантовых точек CdTe/ZnTe

© В.С. Багаев, Л.К. Водопьянов, В.С. Виноградов, В.В. Зайцев, С.П. Козырев, Н.Н. Мельник, Е.Е. Онищенко, Г. Карчевский*

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

* Институт физики Польской академии наук,

02-668 Варшава, Польша

E-mail: evgeny@lebedev.ru

Методами оптической спектроскопии (фотолюминесценция в широком интервале температур, ИК-отражение и комбинационное рассеяние света) исследованы электронные и колебательные состояния в сверхрешетках квантовых точек CdTe/ZnTe. Обсуждается изменение спектра люминесценции структур в зависимости от толщины барьерного слоя ZnTe. Предполагается, что люминесценция электронно-связанных островков вследствие особенностей зонной структуры гетеропары CdTe/ZnTe обусловлена пространственно непрямыми экситонами. В спектрах комбинационного рассеяния обнаружена ранее не наблюдавшаяся комбинация колебательных мод квантовых точек. Анализ спектров решеточного ИК-отражения показывает, что если для структур с большими толщинами барьеров между плоскостями квантовых точек упругие напряжения сосредоточены в слоях $Zn_{1-x}Cd_xTe$, то в структурах с меньшей толщиной барьера имеет место более сложная картина распределения упругих напряжений.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 03-02-16854 и 03-02-17110), а также Комиссии РАН по работе с молодыми учеными.

1. Структуры с множественными плоскостями квантовых точек (КТ), иногда называемые сверхрешетками квантовых точек (СРКТ), были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках GaAs (100). На подложку наносился буферный слой CdTe толщиной $4.5 \mu\text{m}$, на который затем наращивалась СРКТ, состоящая из 200 периодов слоев CdTe с номинальной ростовой толщиной 2.5 монослоя (МС), разделенных барьерами ZnTe с толщиной, меняющейся от 12 до 75 МС. Выращенные структуры исследовались методом просвечивающей электронной микроскопии (JEOL 2000EX с разрешением 0.27 nm). Анализ изменений решеточных параметров в направлении роста показал, что отдельный слой КТ представляет собой слой твердого раствора $Zn_{1-x}Cd_xTe$, в котором имеются области (островки) диаметром 6–10 нм и толщиной около 2 нм (КТ) с повышенным содержанием кадмия. Обнаружено, что при толщине барьерного слоя ZnTe менее 25 МС проявляется корреляция в расположении КТ в соседних слоях [1].

Измерения спектров фотолюминесценции проводились в интервале температур 5–150 К. Оптическое возбуждение производилось He–Cd-лазером (длина волны 4416 \AA). Спектр анализировался двойным монохроматором ДФС-24 с предельным разрешением не хуже 0.1 \AA . Спектры решеточного ИК-отражения при 300 К регистрировались на Фурье-спектрометре фирмы „Bruker“ IFS-55 со спектральным разрешением не хуже 1 cm^{-1} . Спектры комбинационного рассеяния измерялись на спектрометре U-1000 в геометрии обратного рассеяния при возбуждении различными линиями Ar^{2+} -лазера. Спектральное разрешение составляло 1 cm^{-1} . Рассеянный свет анализировался в направлении роста структу-

ры (направление z) при осях образца $x \parallel [100]$, $y \parallel [010]$ и $z \parallel [001]$ (согласно правилам отбора, для такой конфигурации разрешено рассеяние только на продольных оптических фононах).

2. Спектры люминесценции СРКТ с толщинами барьерных слоев ZnTe 12, 25 и 75 МС (B_{12} , B_{25} и B_{75} соответственно) при 5 К представлены на рис. 1. Если спектр люминесценции структуры B_{75} практически не отличается от спектров люминесценции структур с одиночными плоскостями КТ CdTe/ZnTe при сопоставимой номинальной толщине слоя CdTe (см., например, [2]), то по мере уменьшения толщины барьерного слоя CdTe ситуация существенно меняется. При толщине барьерного слоя 25 МС наблюдается значительное (более чем в 2 раза) сужение линии люминесценции по сравнению

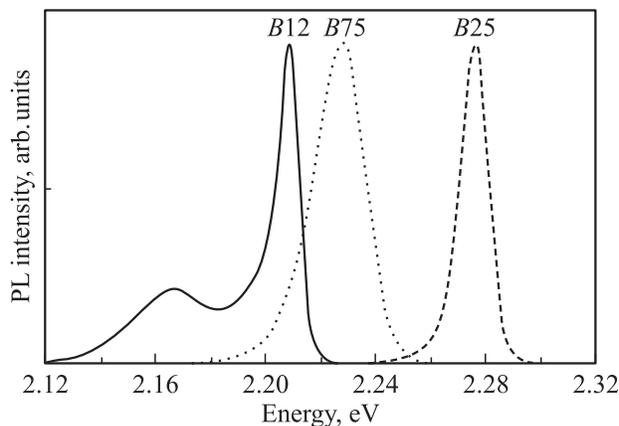


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции СРКТ с толщинами барьерного слоя ZnTe 12, 25 и 75 МС.

со случаем изолированных слоев. Предположительно это обусловлено уменьшением разброса размеров образующихся КТ при росте структур с большим числом слоев КТ (данный эффект впервые наблюдался для СРКТ SiGe/Si [3]). При уменьшении толщины барьера до 12 МС в спектре люминесценции появляется дополнительная полоса, обусловленная излучением экситонов, локализованных на коррелированных островках в соседних плоскостях КТ.

Энергия активации гашения люминесценции, определена по зависимости интегральной интенсивности люминесценции СРКТ от температуры, последовательно уменьшается по мере убывания толщины барьерного слоя ZnTe (от более чем 60 meV для структуры B75 до менее 30 meV для структуры B12). Наиболее интересный результат, обнаруженный при исследовании температурных зависимостей люминесценции СРКТ, демонстрирует структура B12: гашение люминесценции с ростом температуры происходит быстрее в случае электронно-связанных островков (уже при повышении температуры до 80 К в спектре остается только линия люминесценции, обусловленная изолированными островками $Zn_{1-x}Cd_xTe$). Такая странная на первый взгляд ситуация (глубина уровня энергии в случае связанных островков больше, чем для изолированных), по-видимому, объясняется особенностью зонной структуры гетеропары $Zn_{1-x}Cd_xTe/ZnTe$. Для этой гетеропары скачок потенциала в валентной зоне практически полностью определяется напряжениями, обусловленными различием параметров решетки двух материалов. В структурах с малыми расстояниями между слоями КТ вследствие наличия напряжений в барьерном слое ZnTe (см. раздел 3) возможно образование непрямого в пространстве экситона. Мы полагаем, что подобная ситуация реализуется в случае электронно-связанных островков: напряжения в барьерном слое ZnTe максимальны именно в области между двумя КТ CdTe, что может обуславливать возникновение потенциальной ямы для легкой дырки в этой области. В определенном отношении схожая ситуация наблюдалась в сверхрешетках GaAs/AlAs [4], где локальные изменения толщины слоев GaAs и AlAs приводили к изменению типа структуры (в областях с большей толщиной слоя GaAs излучение было обусловлено прямыми экситонами, в то время как в целом излучение структуры определялись непрямыми экситонами).

Потенциальная яма для дырки, обусловленная упругими напряжениями и кулоновским взаимодействием с электроном (для которого в структурах $Zn_{1-x}Cd_xTe/ZnTe$ существует достаточно глубокая потенциальная яма в слое $Zn_{1-x}Cd_xTe$), достаточно мелка, а характерное время излучательной рекомбинации непрямого экситона существенно превышает время излучательной рекомбинации прямого экситона. Оба эти фактора должны приводить к тому, что с ростом температуры будет происходить достаточно быстрое гашение люминесценции электронно-связанных островков. По-

дробный анализ температурных зависимостей люминесценции СРКТ CdTe/ZnTe будет проведен в отдельной работе.

3. При формировании КТ происходит перестройка не только электронного, но и фононного спектра, что проявляется в спектрах комбинационного рассеяния света. На рис. 2 приведены спектры комбинационного рассеяния структур B12, B25 и B75, полученные при возбуждении линией 4880 Å. Обсудим для примера кривую для СРКТ с шириной барьеров 25 МС. В спектре проявляются три полосы комбинационного рассеяния. Высоочастотная полоса при 201 cm^{-1} относится к LO-моду ZnTe, но с уменьшенной на 2 cm^{-1} частотой (по сравнению с невозмущенным ZnTe). Две другие наблюдаемые полосы комбинационного рассеяния попадают в область колебательных возбуждений CdTe. Однако заметно отсутствие полосы комбинационного рассеяния, соответствующей LO-моду CdTe при 171 cm^{-1} . Проявляющаяся в спектре полоса 139 cm^{-1} близка к TO-моду CdTe (140 cm^{-1}), но активна в комбинационном рассеянии. Интенсивная низкочастотная полоса при 126 cm^{-1} представляется весьма необычной для структур на основе соединений II–VI. Следует отметить, что наблюдаемый спектр комбинационного рассеяния имеет резонансный характер. Так, спектр того же образца с 25 МС, полученный при возбуждении линией 5145 Å, повторяет основные черты спектра при 4880 Å, но имеет гораздо меньшую интенсивность. При сравнении спектров различных структур можно заметить, что с увеличением толщины барьерного слоя ZnTe все наблюдаемые полосы комбинационного рассеяния сдвигаются в сторону меньших энергий. Это объясняется уменьшением средней по объему всей структуры постоянной решетки.

Детальный анализ полученных данных проведен в работе [5]; здесь мы лишь вкратце остановимся на основных выводах. Колебательные моды с частотами в области 140 и 120 cm^{-1} отождествлены с симметричной кулоновской (интерфейсной) модой КТ и с симметричной модой „плененных“ в КТ фононов соответственно.

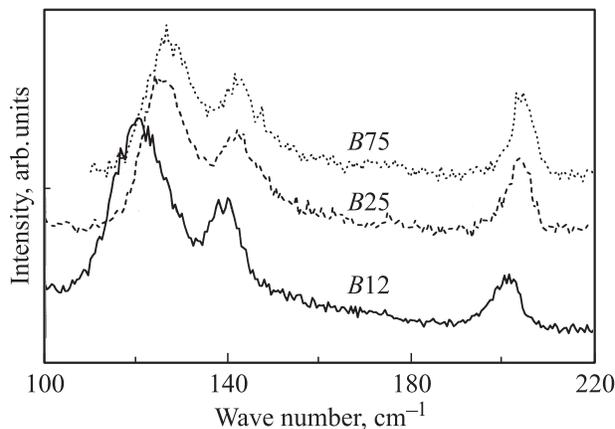


Рис. 2. Спектры комбинационного рассеяния структур B12, B25 и B75 (для наглядности спектры смещены по оси ординат).

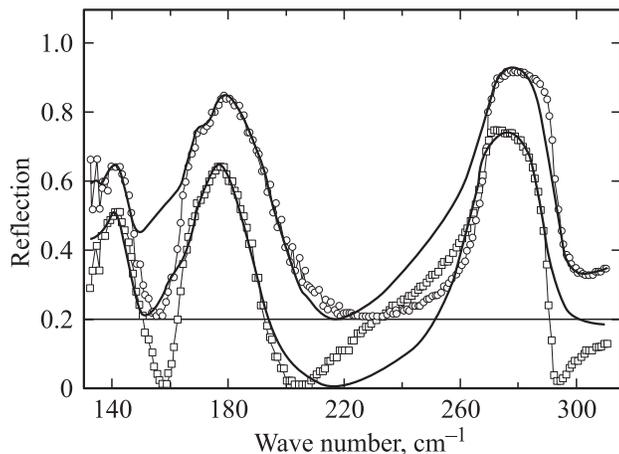


Рис. 3. Спектры решеточного ИК-отражения для структур *B12* и *B25*. Экспериментальные точки представлены квадратами (*B12*) и кружками (*B25*), расчетные спектральные кривые — сплошными линиями. Для наглядности спектр структуры *B25* смещен по оси ординат на 0.2.

Ранее такая комбинация мод в структурах с КТ не наблюдалась.

Из-за наличия толстого буферного слоя CdTe наблюдение колебательных возбуждений непосредственно в КТ в спектрах ИК-отражения затруднено. Однако эти спектры позволяют получить информацию об упругих напряжениях в исследуемых структурах. На рис. 3 представлены спектры отражения структур *B12* и *B25*. Полоса отражения в окрестности 270 cm^{-1} соответствует области остаточных лучей подложки GaAs, а особенности спектра в окрестности 140 и 170 cm^{-1} — CdTe- и ZnTe-колебаниям буферного слоя и СРКТ.

Математическая обработка экспериментального спектра проводилась методом дисперсионного анализа с использованием модельной структуры, образованной тонкой пленкой (СРКТ и буферный слой) на полубесконечной подложке. Рассчитанная частота решеточной моды GaAs для подложки с осажденным на нее буферным слоем CdTe толщиной $4.5\text{ }\mu\text{m}$ составляет 267 cm^{-1} , что на 3 cm^{-1} меньше значения решеточной моды объемного кристалла GaAs, а параметр затухания γ для этой моды равен 8 cm^{-1} .

Наиболее интересный эффект проявляется при исследовании моды ZnTe-колебаний в зависимости от толщины барьерного слоя в структурах. На основе дисперсионного анализа установлено, что для структуры *B12* с наиболее тонким (12 МС) барьерным слоем ZnTe-колебания характеризуются одной сильно модой $\omega_{t1} = 172\text{ cm}^{-1}$. Для структуры *B25* частота сильной моды повышается до $\omega_{t1} = 173.5\text{ cm}^{-1}$ и появляется дополнительная мода $\omega_{t2} = 169\text{ cm}^{-1}$. Для структуры *B75* (на рис. 3 не показана), в которой слои $\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ разделены барьерными слоями ZnTe толщиной 75 МС , ZnTe-колебания определяются двумя сравнимыми по силе осциллятора модами $\omega_{t1} = 176\text{ cm}^{-1}$ и $\omega_{t2} = 165\text{ cm}^{-1}$.

С изменением толщины барьерного слоя значения частоты сильной моды ω_{t1} изменяется от 172 до 176 cm^{-1} и в пределах ошибки измерения приближается к частоте поперечной моды $\omega_t = 177\text{ cm}^{-1}$ чистого ZnTe. Это означает, что в структуре *B12* тонкие барьерные слои ZnTe сильно растянуты чередующимися с ними слоями $\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ и толстым буферным слоем CdTe. В структуре *B75* барьерные слои уже достаточно толстые, чтобы в них завершилась релаксация упругих напряжений.

4. Итак, исследованы температурные зависимости спектров люминесценции СРКТ CdTe/ZnTe. Предполагается, что излучение электронно-связанных островков CdTe обусловлено пространственно непрямыми экситонами. Показано, что для структур с большими толщинами барьерных слоев ZnTe между плоскостями КТ упругие напряжения сосредоточены в слоях $\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, а для структур с меньшей толщиной барьера имеет место более сложная картина распределения упругих напряжений. В спектрах комбинационного рассеяния обнаружена ранее не наблюдавшаяся комбинация колебательных мод КТ.

Список литературы

- [1] S. Mackowski, G. Karczewski, T. Wojtowicz, J. Kossut, S. Kret, A. Szczepanska, P. Dluzewski, G. Prechtel, W. Heiss. *Appl. Phys. Lett.* **78**, 3884 (2001).
- [2] В.В. Зайцев, В.С. Багаев, Е.Е. Онищенко. *ФТТ* **41**, 717 (1999).
- [3] J. Tersoff, C. Teichert, M.G. Lagally. *Phys. Rev. Lett.* **76**, 1675 (1996).
- [4] D. Luerksen, A. Oehler, R. Bleher, H. Kalt. *Phys. Rev. B* **59**, 19862 (1999).
- [5] Л.К. Водопьянов, В.С. Виноградов, Н.Н. Мельник, Г. Карчевский. *Письма в ЖЭТФ* **77**, 171 (2003).