

УДК 621.315.592:535.215

ФОТОЭДС И ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ $ZnTe/Cd_xZn_{1-x}Te$

Е. Н. Агафонов, А. Н. Георгобиани¹, Л. С. Лепнев, Ю. Г. Садофьев

Выращенные методом МВЕ нелегированные многоямные квантовые структуры $ZnTe/Cd_xZn_{1-x}Te$ с напряженными слоями исследовались методами фотоЭДС (PV) и катодолюминесценции (CL). В спектрах PV всех образцов, полученных при температурах 77 К и 293 К, обнаружена полоса П-образной формы. Высокоэнергетическая и низкоэнергетическая границы этой полосы соответствуют рассчитанным значениям энергий зона-зонного перехода в образующих структуру материалах. Высказано предположение о наличии в их кристаллической решетке встроенных электрических полей, увеличивающих вероятности непрямых переходов под действием света (эффект Франца-Келдыша).

Квантово-размерные структуры, изготовленные из соединений II-VI групп, являются перспективными материалами для создания ряда оптоэлектронных приборов. Этому способствуют такие их свойства, как прямые энергетические зоны и диапазон значений энергий запрещенной зоны, перекрывающий широкую область видимого спектра. Одним из факторов, который сдерживает их применение, является рассогласование по параметру кристаллической решетки материалов ямы и барьера, а также обычно используемого в качестве подложки $GaAs$. Оно способствует формированию дефектов несоответствия на гетерограницах и приводит к появлению встроенных механических

¹E-mail:georg @ sci.lebedev.ru

напряжений. Эти факторы недостаточно изучены и в реальных структурах контролируются плохо. Как следствие, имеется значительный разброс в литературных данных о зонной диаграмме таких квантово-размерных структур. Например, диапазон значений относительного разрыва зоны проводимости $Q_C = \Delta E_C / (\Delta E_C + \Delta E_V)$, где ΔE_C и ΔE_V – разрывы зоны проводимости и валентной зоны, в работах разных авторов составляет от 0.75 до 1.2 [1 – 5].

Для исследования зонной диаграммы квантово-размерных структур на основе соединений II-VI обычно используются оптические методы. Однако дополнительную информацию о структурах можно независимо получить и из электрических измерений. В данной работе исследовались многоямные квантовые структуры состава $ZnTe/Cd_xZn_{1-x}Te$ методами катодолюминесценции (CL) и фотоЭДС (PV).

Исследованные образцы были изготовлены методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МВЕ) без намеренного легирования. Использовались проводящие подложки n^+ - $GaAs$ ориентации (001), отклоненные на 3° к направлению $\langle 110 \rangle$. Структуры содержали буферный слой $ZnTe$ толщиной 1.5 мкм, выращенный в условиях сосуществования поверхностных реконструкций типов (2×1) и $c(2 \times 2)$ при температуре 350° . Этот режим роста контролировался методом дифракции отраженных быстрых электронов (RHEED) и достигался при отношении эффективных давлений молекулярных пучков Zn и Te , равном 1:2. Скорость роста буферного слоя составляла $2 \text{ \AA}/c$. В процессе выращивания квантово-размерной структуры она была уменьшена до $1 \text{ \AA}/c$, а эффективная температура подложки поддерживалась на уровне $280^\circ C$. Состав и толщина квантовых ям и барьеров структур контролировались методом дифракции быстрых электронов (RHEED). Над структурой выращивался покровный слой $ZnTe$ толщиной 150 нм. Для проведения контрольных экспериментов при таких же условиях был изготовлен не содержащий квантово-размерной структуры слой $ZnTe$ толщиной 1.9 мкм на проводящей подложке $GaAs$. Основные параметры исследованных в работе структур приведены в табл. 1.

С целью проведения фотоэлектрических измерений из исследуемых квантово-размерных структур были изготовлены диоды Шоттки. Барьерный контакт на лицевой стороне образца получали путем напыления в вакууме Ni , омический контакт на подложке из $GaAs$ – путем сплавления In . Все образцы обладали высоким электрическим сопротивлением.

Т а б л и ц а 1

Технологические параметры образцов. x – содержание Cd , L_W и L_B – толщина квантовых ям и барьеров в структурах.

Образец	Состав	x	Число ям	$L_W(\text{Å})$	$L_B(\text{Å})$
220	$Cd_xZn_{1-x}Te/ZnTe$	0.25	7	50	80
221		0.15	10	100	100
222		0.27	15	70	100

Фотовольтаические измерения производились при температурах 77 К и 273 К. Возбуждение носителей заряда осуществлялось прошедшим через монохроматор непрерывным светом лампы накаливания. Было обращено внимание на обеспечение линейной зависимости фотоотклика от интенсивности возбуждающего света. С этой целью интенсивность освещения в исследуемом спектральном диапазоне была выбрана достаточно низкой. Была проведена серия контрольных измерений, подтвердивших линейность указанной зависимости.

Все измеренные спектры фотоЭДС содержат полосу П-образной формы в энергетической области 2.1 – 2.4 эВ. Спектры некоторых образцов, измеренные при температуре 77 К, представлены на рис. 1. Измерения всех спектров РВ проводились как при уменьшении, так и при увеличении энергии квантов возбуждающего света. В обоих случаях спектральная область, содержащая П-образную полосу, воспроизводилась одинаково. В измеренных при температурах 77 К и 293 К спектрах фотоЭДС слоя $ZnTe$ на подложке из $GaAs$, не содержащего квантово-размерной структуры, указанная П-образная полоса отсутствует. Это позволяет заключить, что ее появление в спектрах образцов связано с физическими процессами, происходящими в области квантово-размерной структуры.

Для независимого измерения отдельных параметров и контроля качества всех квантово-размерных структур измерялись их спектры СЛ при температуре 14 К. Методика этих измерений описана в работе [6]. Все спектры содержат по одной интенсивной линии, связанной с экситонным излучением, соответствующим параметрам квантовых ям в образце. Ширина этой линии на полувысоте составляет порядка 20 мэВ. Краевое излучение буферного слоя $ZnTe$ слабее на 2 – 3 порядка, что указывает на достаточно высокое качество структур.

С целью интерпретации полученных экспериментальных данных были рассчитаны значения ширины запрещенной зоны материалов квантово-размерных структур в зависимости от температуры и содержания компонент в тройном соединении. Для определения ширины запрещенной зоны в зависимости от температуры была использована

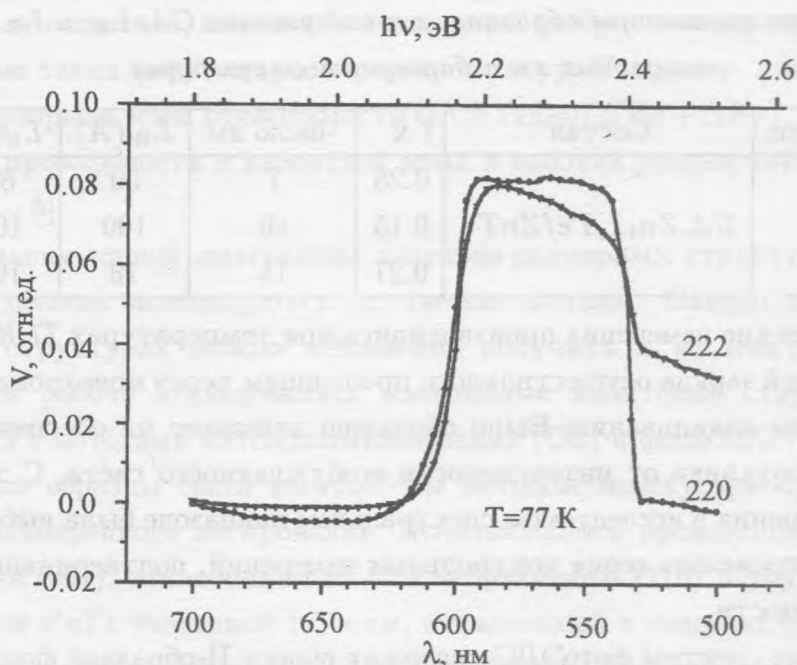


Рис. 1. Спектры фотоЭДС многоямных квантовых структур $ZnTe/Cd_xZn_{1-x}Te$, измеренные при температуре 77 К.

подгоночная формула с тремя параметрами, хорошо согласующаяся с экспериментальными данными [7]:

$$E_G(T) = E_G|_{T=0} - S\overline{\hbar\omega} \left(\coth \left(\frac{\overline{\hbar\omega}}{2kT} \right) - 1 \right). \quad (1)$$

Здесь $E_G|_{T=0}$ – ширина запрещенной зоны при абсолютном нуле температур, S – безразмерный параметр, $\overline{\hbar\omega}$ – среднее значение энергии фонона, k – постоянная Больцмана. Зависимость ширины запрещенной зоны в материале квантовых ям $Cd_xZn_{1-x}Te$ от концентрации компонент может быть представлена в виде:

$$E_G(x) = E_G|_{x=0} + (E_G|_{x=1} - E_G|_{x=0} - c)x + cx^2, \quad (2)$$

где $E_G|_{x=0}$ и $E_G|_{x=1}$ – значения ширины запрещенной зоны соответственно для $x = 0$ и $x = 1$, а c – параметр изгиба. Методика определения этого параметра описана в [8], его величина для всех образцов составила $c = 0.34$. Необходимые для расчета значения физических величин и параметров были взяты из [7]. Эти значения, а также ширины

запрещенной зоны для ям и барьеров исследованных образцов при температуре 77 К, приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Энергетические параметры образцов. $E_G|_{T=0}^{ZnTe}$ и $E_G|_{T=0}^{CdTe}$ – ширина запрещенной зоны $ZnTe$ и $CdTe$ при абсолютном нуле температур; $E_G|_{ZnTe}$ и $E_G|_{CdTe}$ – ширина запрещенной зоны $ZnTe$ и $CdTe$ при температуре 77 К; $E_G|_W$ – ширина запрещенной зоны в квантовых ямах $Cd_xZn_{1-x}Te$ при температуре 77 К. Для соединений $ZnTe$ и $CdTe$ величина параметра S составляет 2.29×10^{-3} и 1.68×10^{-3} ; $\hbar\omega - 10.8$ мэВ и 5.8 мэВ, соответственно [7].

Образец	$E_G _{T=0}^{ZnTe}$, эВ	$E_G _{T=0}^{CdTe}$, эВ	$E_G _{ZnTe}$, эВ	$E_G _{CdTe}$, эВ	$E_G _W$, эВ
220					2.12
221	2.39	1.608	2.38	1.594	2.22
222					2.10

Как показывают результаты расчета, высокоэнергетическая и низкоэнергетическая границы Π -образной полосы в спектрах фотоЭДС соответствуют рассчитанным для температуры 77 К значениям энергий зона-зонного перехода в образующих структуры материалах – $ZnTe$ и $Cd_xZn_{1-x}Te$, соответственно. Это означает, что в области квантово-размерной структуры происходит поглощение фотонов не только с энергиями экситонного поглощения, но и с промежуточными энергиями между значениями зона-зонного перехода в барьере и яме.

На наш взгляд, это связано с тем, что из-за рассогласования между постоянными кристаллической решетки образующих квантово-размерную структуру соединений на гетерограницах и материалах барьера и ямы появляются встроенные механические напряжения. Это сопровождается появлением в материалах барьеров и ям сильных локальных электрических полей, поскольку кристаллы широкозонных полупроводников Π -VI являются сильными пьезоэлектриками. Мы предполагаем, что характер измеренных спектров РВ данных многоямных квантовых структур на основе $ZnTe/Cd_xZn_{1-x}Te$ связан с наличием в их кристаллической решетке таких встроенных электрических полей, которые увеличивают вероятность непрямых переходов носителей заряда под действием света (эффект Франца-Келдыша).

Эта работа была поддержана РФФИ (проекты 00-02-16421, 00-02-16607), Министерством науки РФ как часть программы "Физика твердотельных наноструктур" (проект

99–1122) и как часть программы "Физика квантовых и волновых процессов", подпрограмма "Фундаментальная спектроскопия" (проект 01.08. 02.8–4).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Mariette H., Dal'bo F., Magnea N., et al. Phys. Rev., **B 38**, 12443 (1988).
- [2] Pelya P., Merle d'Aubigne Y., Wasiela A., et al. Phys. Rev., **B 46**, 1557 (1992).
- [3] Hsu Tran Min Duc C. and Faurie J. P. Phys. Rev. Lett., **58**, 1127 (1987).
- [4] Kim T. W., and Park H. L. J. Crystal Growth, **159**, 467 (1996).
- [5] Katani A. D. and Margaritongo G. Phys. Rev., **B 28**, 1944 (1983).
- [6] Kozlowsky V. I., Sadofyev Yu. G., and Litvinov V. G. J. Crystal Growth **214/215**, 983 (2000).
- [7] EMIS Databreviews Series No. 17. Properties of Wide Bandgap II–VI Semiconductors. Ed. by R. Bhargava, INSPEC, London, UK, 1997.
- [8] Van Vechten J. A. and Bergstresser T. K. Phys. Rev., **B 1**, 3351 (1970).

Поступила в редакцию 26 декабря 2001 г.