

ВЛИЯНИЕ ЖЕЛЕЗА, МАРГАНЦА И ХРОМА
НА СВОЙСТВА ТЕЛЛУРИДА КАДМИЯ

В. М. Сальман. В. А. Чапнин

УДК 535.341

Показано, что атомы железа, марганца и хрома не создают глубоких донорных уровней вблизи верха валентной зоны и акцепторных уровней у дна зоны проводимости. Однако при введении железа, марганца и хрома образуются электрически активные дефекты кристаллической решетки.

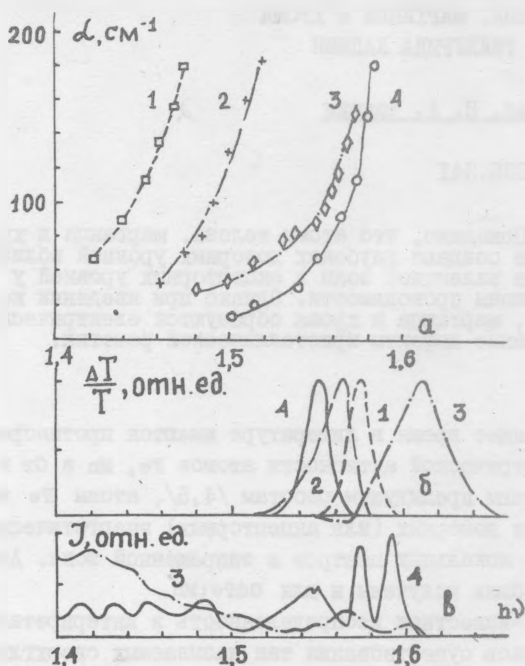
В настоящее время в литературе имеются противоречивые данные об электрической активности атомов Fe, Mn и Cr в CdTe /1-3/. Согласно нашим предыдущим работам /4,5/, атомы Fe и Cr не создают ни мелких донорных (или акцепторных) энергетических уровней, ни глубоких локальных центров в запрещенной зоне. Аналогичные результаты были получены и для CdTe:Mn.

Однако, известная неопределенность в интерпретации результатов касалась существования так называемых сверхглубоких энергетических уровней - донорных у верха валентной зоны и акцепторных у дна зоны проводимости. Для выяснения этого вопроса были проведены исследования оптического поглощения, электропоглощения и фотолюминесценции вблизи края фундаментальной полосы. Для измерений использовался CdTe с концентрацией указанных примесей $N = 10^{18} - 4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. При анализе результатов принималось, что примесные атомы не образуют скоплений, а являются изолированными, как показано в /3,6/.

Кроме того, в настоящей работе рассматривается случай, когда искомые уровни являются очень глубокими и их волновые функции не перекрываются. Действительно, согласно работе /7/, радиус r локализации носителей на глубоких уровнях не превышает 20 Å и условие перекрытия их орбит $rN^{1/3} > 1$ будет выполняться

при $N > 10^{20}$ см⁻³.

На рис. 1а приведены спектры поглощения при 90 К изученных образцов вблизи края фундаментальной полосы. Видно, что в леги-



Р и с. 1. а) спектры поглощения CdTe (90 К). 1 - CdTe:Cr ($N_{\text{Cr}} = 3 \cdot 10^{18}$ см⁻³); 2 - CdTe:Fe ($N_{\text{Fe}} = 2 \cdot 10^{18}$ см⁻³); 3 - CdTe:Mn ($N_{\text{Mn}} = 10^{19}$ см⁻³); 4 - специально не легированный CdTe .

б) спектры электропоглощения образцов тех же материалов толщиной 100 мкм (78 К); в) спектры фотолюминесценции (20 К)

рованном материале с длинноволновой стороны имеется дополнительное поглощение. Этот эффект максимален для CdTe:Cr , слабее для CdTe:Fe и минимален при легировании марганцем. Такие же "хвосты" оптического поглощения наблюдаются и при 300 К.

Исследование спектров электропоглощения при 78 К дало следующие результаты. В случае CdTe:Mn при $N_{Mn} \sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ не обнаружено дополнительных полос по сравнению с нелегированным материалом. При $N_{Mn} \sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ появляется полоса электропоглощения при 1,61 эВ. В материале, легированном Fe и Cr, наблюдается полоса электропоглощения при 1,56 - 1,57 эВ, причем ее интенсивность не коррелирует с концентрацией примесей. Ширины наблюдавшихся полос составляют 0,015 - 0,035 эВ (рис. 1б).

В случае CdTe:Mn (при $N_{Mn} \sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$) наблюдаемый пик связан, по-видимому, с междузонными переходами. Действительно, ширина запрещенной зоны CdTe при 78 К составляет 1,595 эВ. В случае CdTe, легированного Mn до концентрации $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$, согласно /6/, происходит увеличение ширины запрещенной зоны на 0,01 эВ. Полосы электропоглощения в CdTe:Fe и CdTe:Cr также не связаны с глубокими уровнями Fe и Cr. На это указывает совпадение энергий максимумов электропоглощения двух различных примесей и отсутствие корреляции интенсивности полос с концентрацией примеси. Кроме того, малая ширина полос ($\approx 0,02$ эВ) не характерна для глубоких примесей. Согласно /7/, ширина полос электропоглощения на глубоких центрах в CdTe составляет 0,10 - 0,15 эВ.

В пользу того, что основная часть ионов Fe, Mn и Cr не образует энергетических уровней у краев разрешенных зон CdTe, говорят и данные фотолуминесценции при 20 К (рис. 1в). В CdTe:Mn вблизи края фундаментального поглощения луминесценция была слабой и ее коротковолновая граница была несколько сдвинута в область высоких энергий по сравнению со случаем специально не легированного материала. Величина этого смещения согласуется с данными электропоглощения. В CdTe:Fe и CdTe:Cr луминесценция наблюдалась, соответственно, только при энергиях 0,6 - 1,2 эВ и 0,45 - 0,55 эВ.

Таким образом, полученные в настоящей работе результаты свидетельствуют о том, что Fe, Mn и Cr не создают сверхглубоких локальных уровней в запрещенной зоне и являются электрически нейтральными в CdTe.

Возникновение "хвостов" оптического поглощения вблизи края запрещенной зоны в CdTe:Fe и CdTe:Cr, а также "фона" поглощения при меньших энергиях в нашем сильно легированном электрически неактивными примесями материале, как мы считаем, связано с

введением большого количества сопутствующих электрически активных дефектов решетки донорного и акцепторного типа при высокой степени их компенсации. В пользу такого объяснения свидетельствуют "хвосты" оптического поглощения, которые вызываются уменьшением эффективной ширины запрещенной зоны на величину ΔE_g в сильно легированных компенсированных полупроводниках. Согласно /9/

$$\Delta E_g = 2 \frac{e^2}{8a} (Na^3)^{2/5} \left[\left[\frac{m_v}{m_e} \right]^{2/5} - 1 \right]^{1/2}.$$

Для оценки ΔE_g концентрацию мелких примесей N и их радиус локализации a можно предположить равными, соответственно, концентрации атомов легирующих переходных металлов ($4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$) и радиусу водородоподобных доноров ($5 \cdot 10^{-7} \text{ см}$). Величина $\Delta E_g \approx 0,1 \text{ эВ}$ дает правильный порядок величины.

При энергиях квантов, значительно меньших ширины запрещенной зоны, наблюдается фоновое поглощение ($\alpha \sim 10 \text{ см}^{-1}$), слабо зависящее от энергии. Это поглощение можно объяснить наличием в наших образцах, кроме мелких донорных и акцепторных центров, ряда глубоких энергетических уровней. Согласно модели Луковского /10/, сечение поглощения для глубоких уровней σ_1 каждого центра различно от нуля при энергиях квантов от E_1 до $2E_1$ (E_1 — энергия ионизации центра). Суммирование σ_1 по всем локальным центрам может привести к слабому изменению поглощения в довольно широкой спектральной области.

В заключение авторы выражают благодарность Б. М. Вулу за обсуждение результатов работы и В. В. Ушакову и Е. В. Колесниковой за помощь в измерениях фотолуминесценции и электропоглощения.

Поступила в редакцию
23 октября 1978 г.

Л и т е р а т у р а

1. M. Z. Cieplak, M. Godlewski, J. M. Baranowski, Phys. Stat. Sol. (b), 70, 323 (1975).
2. Физика и химия соединений типа $AB_{2-3}VI$. Пер. под ред. С. А. Медведева, Москва, "Мир", 1970 г.

3. J. T. Vallin, G. D. Watkins, *Phys. Rev.* **B9**, 2051 (1974).
4. Б. М. Вул, В. С. Иванов, В. А. Рукавишников, В. М. Сальман, В. А. Чапнин, *ФТП* **6**, 1264 (1972).
5. Ю. В. Клевков, В. М. Сальман, В. А. Чапнин, *Краткие сообщения по физике ФИАН № 6*, 30 (1972).
6. Н. П. Гавалешко, Р. Д. Иванчук, М. В. Курик, И. Ф. Скицко, *ФТТ* **18**, 2371 (1976); *ФТТ* **17**, 3057 (1975).
7. Б. И. Шкловский, *ФТП* **6**, 2335 (1972).
8. Б. М. Вул, В. С. Вавилов, В. С. Иванов, В. Б. Стопачинский, В. А. Чапнин, *ФТП* **5**, 101 (1971); **6**, 1442 (1972).
9. Л. В. Келдыш, Г. П. Прошко, *ФТТ* **5**, 3378 (1963).
10. G. W. Lucowsky, *Sol. St. Comm.* **3**, 299 (1965).