

**ФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
МИКРО- И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ**

УДК 621.315.592

А. И. Белогорохов, Л. И. Белогорохова, А. Г. Белов, В. М. Лакеенков

*(Москва)***ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ОПТИЧЕСКИХ
И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $Cd_xHg_{1-x}Te$ ($0,35 < x < 0,40$)**

Исследованы оптические и фотоэлектрические свойства твердых растворов $Cd_xHg_{1-x}Te$ ($0,35 < x < 0,40$) в интервале температур $T = 5-300$ К в спектральном диапазоне $\nu = 30-5000$ см⁻¹. Установлено, что некоторые параметры (положение края фундаментального поглощения, положение максимума сигнала фотопроводимости, его интенсивность и другие) зависят от температуры немонотонно. Наблюдаемые аномалии объясняются локальной перестройкой кристаллической решетки при изменении температуры.

Твердые растворы $Cd_xHg_{1-x}Te$ с $x = 0,2$ изучены достаточно полно, поскольку эти полупроводниковые соединения являются одними из основных материалов для детекторов ИК-излучения с длинами волн 8—14 мкм. Более широкозонные соединения ($x = 0,3-0,4$) исследованы значительно хуже, хотя и они представляют интерес в плане создания приемников излучения для спектрального интервала 2—5 мкм.

При исследовании оптических свойств твердых растворов $Cd_xHg_{1-x}Te$ основное внимание уделяется, естественно, области фундаментального поглощения, коль скоро механизм детектирования ИК-излучения основан на межзонных переходах носителей заряда; процессы, происходящие в кристаллической решетке, вызывают значительно меньший интерес. На наш взгляд, такой подход не вполне оправдан. Во-первых, изучение динамики кристаллической решетки позволяет определить частоты и параметры затухания оптических фононов, силы осцилляторов тех или иных колебаний и в конечном счете составить представление о том, какая именно конфигурация атомов в элементарной ячейке реализуется в данном конкретном случае. Во-вторых, рассматриваемые соединения являются очень удобными модельными объектами для исследования свойств всей системы твердых растворов $Cd_xHg_{1-x}Te$, что, безусловно, необходимо при решении сугубо прикладных задач.

Процессы, происходящие в кристаллической решетке, по энергиям соответствуют далекой инфракрасной области спектра (решеточное отражение, многофононное поглощение). Указанный спектральный интервал труднодоступен для экспериментаторов и поэтому слабо изучен, так что любые новые данные, относящиеся к упомянутому диапазону, представляют несомненный интерес. Если же удастся проследить влияние процессов, происходящих в кристаллической решетке, на оптические свойства материала вблизи края фундаментального поглощения, ценность таких результатов заметно возрастает. Именно поэтому в настоящей работе предпринята попытка провести комплексные исследования оптических свойств $Cd_xHg_{1-x}Te$ в максимально

широком спектральном интервале, включающем как близкую инфракрасную (БИК), так и далекую инфракрасную (ДИК) область.

Выбор для исследования именно широкозонных твердых растворов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x = 0,35—0,40$) обусловлен, кроме перечисленных выше причин, еще и тем обстоятельством, что для изучения оптических свойств кристаллической решетки требуется по возможности исключить влияние свободных носителей заряда. Оно проявляется во взаимодействии плазменных колебаний с продольными оптическими фононами и сильнее сказывается в узкозонных материалах; выделить в этом случае решеточные колебания в чистом виде весьма затруднительно.

В работе исследовались образцы $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($0,35 < x < 0,40$), выращенные методом перекристаллизации предварительно синтезированной шихты в условиях непрерывной подпитки зоны расплава твердой фазой. После выращивания образцы подвергались отжигу в насыщенных парах ртути, а затем химико-механической полировке и свободному травлению в растворе брома в этиловом спирте; при этом удалялся нарушенный слой толщиной до 20 мкм. Состав материала контролировался по оптическому пропусканию и методами рентгеноспектрального микроанализа. Градиент состава по толщине образца ($d = 1$ мм) не превышал $\pm 0,05$, образцы выбирались таких размеров, чтобы в них можно было вписать квадрат (5×5 мм). Морфология поверхности контролировалась методами оптической и растровой электронной микроскопии. При температурах, близких к 80 К, образцы имели электропроводность n -типа.

В данной работе исследовались спектры фотопроводимости $I_{ph}(\nu)$, оптического пропускания $t(\nu)$ и отражения $R(\nu)$ в интервале волновых чисел $\nu = 30—5000$ см^{-1} в диапазоне температур $T = 5—300$ К. Спектральные зависимости перечисленных оптических параметров были получены с помощью фурье-спектрометра IFS-113v ("Bruker", ФРГ) при использовании проточного гелиевого криостата CF-1103 ("Oxford Instruments"). В качестве источников излучения использовались глобар для близкой и ртутная лампа для далекой ИК-областей спектра. Для фильтрации падающего на образец излучения применялись черный полиэтилен и холодное сапфировое окно.

Чтобы оценить дополнительный вклад в электропроводность со стороны фотоиндуцированных носителей заряда, возбуждаемых тепловым излучением, проводилась регистрация спектров отражения и пропускания образцов по схеме так называемых «отрицательных потоков», что предполагает помещение образца, находящегося при низкой температуре, на место источника излучения. Симметрия интерферометра Майкельсона и разность температур между образцом и приемником излучения позволили произвести запись оптических спектров без стимуляции внутренних процессов в материале оптическими квантами.

Все перечисленные процедуры и использованные дополнительные приспособления позволили существенно улучшить отношение сигнал/шум и уменьшить погрешность измерения оптических параметров.

Обработка спектров отражения проводилась методом дисперсионного анализа с использованием соотношений Крамерса — Кронига. Частоты продольных оптических фононов определялись по положениям максимумов зависимостей $\nu \text{Im}(-1/\epsilon) = f_1(\nu)$, частоты поперечных оптических фононов — по положениям максимумов зависимостей $\nu \text{Im}(\epsilon) = f_2(\nu)$, где $\epsilon = \epsilon_1 + i\epsilon_2$ — комплексная диэлектрическая проницаемость.

На рис. 1 представлены спектры пропускания и фотопроводимости образца $\text{Cd}_{0,37}\text{Hg}_{0,63}\text{Te}$ вблизи края фундаментального поглощения при различных температурах. Спектр пропускания приведен в относительных единицах, спектр фотопроводимости для удобства сравнения нормирован на максимальное значение. Рисунок наглядно иллюстрирует возможность регистрации зависимостей $t(\nu)$ и $I_{ph}(\nu)$ в одних и тех же экспериментальных условиях, что, безусловно, повышает надежность получаемых результатов.

Из рис. 1 видно, что с повышением температуры значение коэффициента пропускания вблизи максимума убывает, сам край незначительно смещается

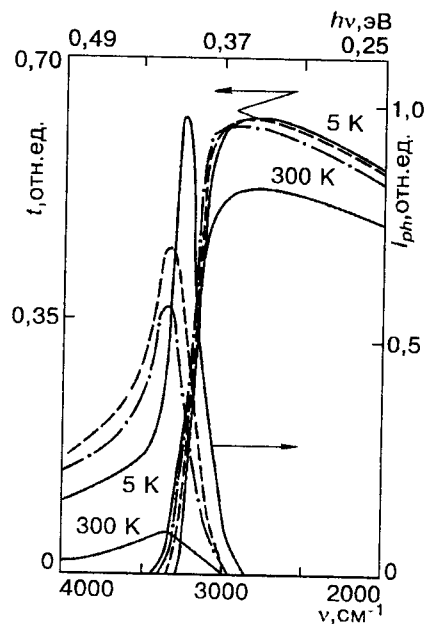


Рис. 1. Спектры пропускания $t(\nu)$ и фотопроводимости $I_{ph}(\nu)$ образца $Cd_{0,37}Hg_{0,63}Te$ при различных температурах в области фундаментального поглощения: штриховая линия соответствует $T = 100$ К, штрихпунктирная — $T = 200$ К

в сторону коротких волн, слегка размываясь при этом. Интенсивность спектральной зависимости фотопроводимости изменяется при повышении температуры гораздо сильнее (почти на порядок); смещение кривой $I_{ph}(\nu)$ влево выражено более явно при низких температурах.

Для этого же образца на рис. 2 приведены сразу три температурные зависимости. Здесь $h\nu_0$ — энергия кванта излучения, отвечающая коэффициенту поглощения $\alpha = 500$ $см^{-1}$ на краю фундаментального поглощения.

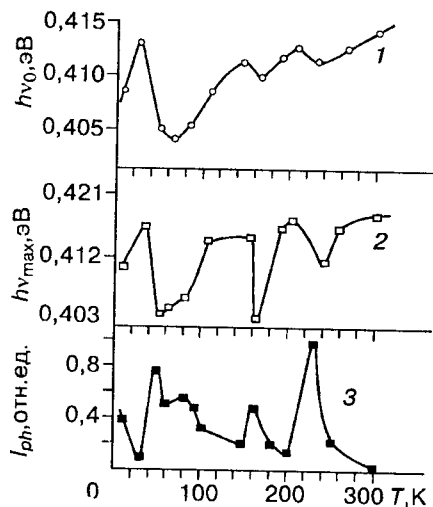


Рис. 2. Температурные зависимости края фундаментального поглощения $h\nu_0$ (в энерг. ед.) (1), положения максимума сигнала фотопроводимости $h\nu_{max}$ (в энерг. ед.) (2) и максимальной интенсивности сигнала фотопроводимости, нормированной на единицу, I_{ph} (в отн. ед.) (3) для образца $Cd_{0,37}Hg_{0,63}Te$:

кружки, светлые квадратики, темные квадратики — экспериментальные точки

Из рис. 2 видно, что эти зависимости имеют немонотонный характер. Наоборот, из зависимости $E_g(x, T)$ [1] следует, что для фиксированного значения x ширина запрещенной зоны E_g должна монотонно увеличиваться с ростом температуры. Соответственно можно было ожидать, что параметры $h\nu_0$, $h\nu_{\max}$, I_{ph} , непосредственно связанные с E_g , также должны монотонно зависеть от температуры. Наши результаты явно противоречат данной концепции.

Чтобы выяснить роль оптических фононов в обсуждаемых процессах, мы подробно исследовали спектры отражения наших образцов в области решеточного отражения (полоса «остаточных лучей») в диапазоне температур $T = 5\text{--}300$ К. На рис. 3 представлена температурная зависимость силы осциллятора продольного оптического фонона моды CdTe ρ_{LO}^{CdTe} для образца $Cd_{0,37}Hg_{0,63}Te$ (а), здесь же для наглядности воспроизведена кривая I рис. 2 (б). Видно, что максимумы зависимости $\rho_{LO}^{CdTe}(T)$ соответствуют минимумам кривой $h\nu_0(T)$ и наоборот.

Следует отметить, что под ρ_{LO}^{CdTe} подразумевается сила осциллятора самого высокоэнергетического нормального колебания связей Cd—Te в базисных ячейках $Cd(4-n)Hg(n)Te$, где $n = 0\text{--}4$. Иными словами, нас интересуют колебания Cd—Te-связей в ячейке, имеющей конфигурацию Cd(1)Hg(3)Te [2].

Для остальных исследованных образцов были получены температурные зависимости, близкие к представленным на рис. 2 и 3, что позволяет сделать некоторые выводы, общие для диапазона составов $0,35 < x < 0,40$. Так, немонотонные зависимости $h\nu_0(T)$, $h\nu_{\max}(T)$, $I_{ph}(T)$, $\rho_{LO}^{CdTe}(T)$ свидетельствуют, на наш взгляд, о локальной перестройке кристаллической решетки при изменении температуры. Явная корреляция в поведении кривых $\rho_{LO}^{CdTe}(T)$ и $h\nu_0(T)$ (см. рис. 3, а, б) наводит на мысль о наличии связи между процессами, происходящими в кристаллической решетке при изменении температуры, и положением края фундаментального поглощения. Наличие особенностей на кривых $h\nu_0(T)$, $h\nu_{\max}(T)$, $I_{ph}(T)$, $\rho_{LO}^{CdTe}(T)$ не только при низких, но и при достаточно высоких температурах (см. рис. 2) исключает возможность объяснения наблюдаемых эффектов ионизацией примесных уровней: при $T = 200$ К любая примесь или заряженный комплекс обязательно будут ионизованы.

Таким образом, мы связываем наблюдаемые аномалии в поведении температурных зависимостей $h\nu_0(T)$, $h\nu_{\max}(T)$, $I_{ph}(T)$, $\rho_{LO}^{CdTe}(T)$ с локальной перестройкой кристаллической решетки при изменении температуры. Для более

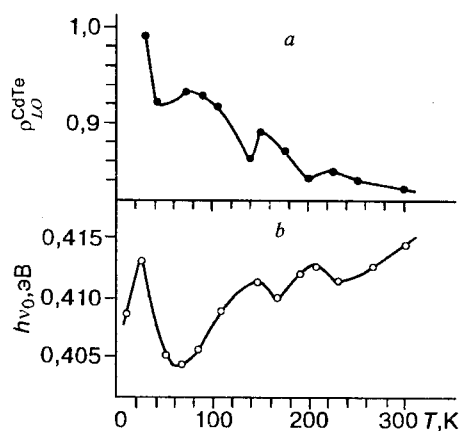


Рис. 3. Температурные зависимости силы осциллятора продольного оптического фонона моды CdTe ρ_{LO}^{CdTe} (а) и положения края фундаментального поглощения $h\nu_0$ (б) для образца $Cd_{0,37}Hg_{0,63}Te$:

темные кружки, светлые кружки — экспериментальные точки

детальной интерпретации полученных результатов требуется провести расчет динамики кристаллической решетки для широкого диапазона температур и для конкретных конфигураций расположения атомов кадмия и ртути в подрешетке металла. Это будет сделано нами в дальнейшем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hansen G. L., Schmit J. L., Casselman T. N. Energy gap versus alloy composition and temperature in $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ // J. Appl. Phys. 1982. 53, N 10. P. 7099.
2. Козырев С. П., Пыркoв В. Н., Водопьянов Л. К. Спектр решеточного отражения сплавов $\text{Cd}_{1-x}\text{Hg}_x\text{Te}$ ($x = 0-0,8$) // ФТТ. 1992. 34, вып. 8. С. 2372.

Поступила в редакцию 25 июля 1996 г.

Реклама продукции в нашем журнале — залог Вашего успеха!