

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 621.315.592

А. И. Белогорохов, В. М. Лакеенков, Л. И. Белогорохова  
(Москва)

ФОТОСТИМУЛИРОВАННОЕ ОБРАЗОВАНИЕ  
ДВОЙНЫХ ПОЛЯРОНОВ В CdTe

Использование оригинальной методики измерения в «отрицательных» потоках на базе интерферометра Майкельсона позволило разделить вклады от фотостимулированных и термостимулированных процессов в спектральную зависимость диэлектрической проницаемости в области фононного резонанса. Данный подход использовался для исследования образцов теллурида кадмия, в которых после дополнительной засветки ксеноновой лампой в течение длительного времени при температурах  $T = 220 - 230$  К в спектрах, обусловленных фононными колебаниями, появилась ранее не наблюдавшаяся полоса с силой осциллятора, сравнимой с резонансом на частоте продольного оптического фонона. Для объяснения этого явления высказано предположение о формировании двух типов поляронов, которые в определенных условиях могут образовывать поляронный комплекс.

На базе интерферометра Майкельсона проведены серии экспериментов по регистрации спектральных зависимостей оптических характеристик полупроводников  $A^{IV}B^{VI}$  по схеме так называемых «отрицательных» потоков (NB). Оригинальность метода заключается в том, что охлажденный образец помещается на место источника излучения, в то время как приемник излучения работает при комнатной температуре; разница температур между приемником и образцом, с одной стороны, и между камерой прибора и образцом – с другой, плюс преимущества фурье-спектрометра, известные под названием «выигрыш» Фелжета и Жакино, дают нам возможность проводить регистрацию оптических спектров в «термостатороможенном» режиме. Цель подобных исследований заключалась в том, чтобы разделить вклады от термостимулированных и фотостимулированных процессов в формирование локальных силовых взаимодействий. Известно, что в полупроводниках типа  $A^{IV}B^{VI}$ , таких как CdTe, ZnTe и другие, важную роль играют дефекты кристаллической решетки, которыми нередко определяется тип проводимости этих кристаллов. Недавно авторами работы [1] определено энергетическое положение  $V_{Cd}$  A-центров:  $E_{V_{Cd}} + 120$  мэВ,  $V_{Te}^0/V_{Te}^+$ ,  $E_V + 0,2$  мэВ (здесь  $E_V$  – энергетическое положение потолка валентной зоны). Для изучения

природы образования сложных дефектных комплексов исследовались монокристаллические образцы теллурида кадмия, выращенного по методу Бриджмена, намеренно не легированные. Как правило, кристаллы представляли собой полуизолирующий материал ориентации (111) с удельным сопротивлением при азотной температуре  $\rho \sim 10^6 - 10^7 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ . Толщина образцов составляла  $1,0 \pm 0,1 \text{ мм}$  или  $300 \pm 10 \text{ мкм}$ . Перед измерениями проводилась химико-механическая обработка поверхности с дальнейшим химическим травлением по известной методике. После проведения первой серии измерений часть образцов подверглась ионной бомбардировке ионами  $\text{Xe}^+$  с энергией  $E = 700 \text{ кэВ}$ . Общая доза имплантированных ионов составила  $D = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ . Подобный эксперимент был предпринят в целях внесения в образец дополнительных вакансий кадмия и перевода части атомов теллура в межузельное состояние. После этого на данных образцах вновь регистрировались оптические спектры. Особое внимание уделялось подробному изучению полосы «остаточных» лучей, поведению коэффициента поглощения в субмиллиметровом диапазоне длин волн. Регистрация оптических спектров проводилась с использованием фурье-спектрометра IFS-113v ("Bruker") в диапазоне волновых чисел от 20 до  $700 \text{ см}^{-1}$  при температурах  $5 < T < 350 \text{ К}$ .

На рис. 1 показаны спектры отражения  $R(\omega)$  одного из образцов CdTe при различных температурах измерения. Оптические спектры регистрировались до ионной бомбардировки образца по схеме прямого включения интерферометра Майкельсона. Из рисунка видно, что поведение  $R(\omega)$  имеет хорошо известный одномодовый характер. Частоты оптических фононов: продольного (LO) и поперечного (TO) – составляют соответственно 167 и  $140 \text{ см}^{-1}$  и незначительно смещаются при понижении температуры вплоть до  $T = 5 \text{ К}$ . На рис. 1 их положение отмечено вертикальными линиями. На рис. 2 показан спектр  $R(\omega)$  того же образца, что и на рис. 1, полученный по схеме NB. Из сопоставления этих рисунков видно, что  $R(\omega)$  на рис. 2 имеет определенную тонкую структуру в спектральной области между  $\omega_{\text{TO}}$  и  $\omega_{\text{LO}}$ , которая отсутствует в спектре на рис. 1. Это означает, что в выражение для

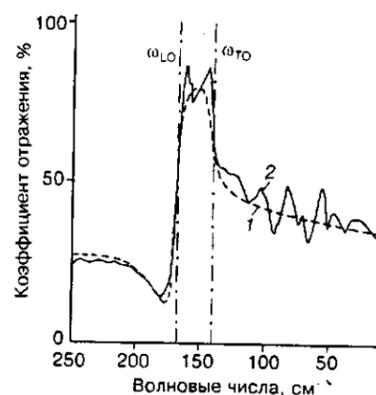


Рис. 1. Спектры оптического отражения образцов теллурида кадмия, измеренные по схеме прямого включения интерферометра Майкельсона (кривая 1) и по схеме «отрицательных» потоков NB (кривая 2). Вертикальными линиями показаны положения оптических фононов

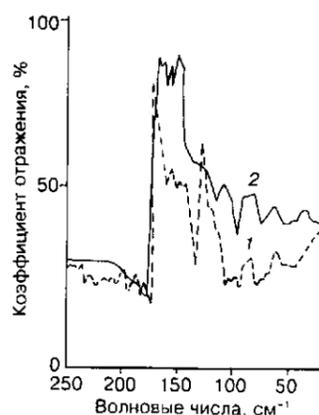


Рис. 2. Спектры оптического отражения образцов CdTe, полученные после ионной бомбардировки (кривая 1) и по схеме NB после оптической накачки при  $T = 230$  К в течение трех часов (кривая 2)

диэлектрической проницаемости кристалла CdTe, с помощью которой можно описать зависимость  $R(\omega)$ , необходимо добавить два осциллятора с частотами, близкими к значениям  $\omega_{\text{ГО}}$  и  $\omega_{\text{ЛО}}$  для CdTe, но с меньшими силами осцилляторов  $\rho_j$ . Таким образом, с формальным описанием  $R(\omega)$  трудностей не возникает. Далее необходимо понять природу этих дополнительных резонансов в исследованных кристаллах. Для этого и были предприняты эксперименты по ионной бомбардировке теллурида кадмия ионами ксенона с целью внесения дополнительных дефектов в кристаллическую решетку, а также NB-эксперименты для того, чтобы иметь возможность разделить эффекты поляронного и поляритонного типов. На рис. 2 показаны спектры  $R(\omega)$  образца CdTe в режиме NB, полученные со стороны кристалла, подвергнутого ионной бомбардировке. Из рисунка видно, что по сравнению с ситуацией, показанной на рис. 1, в полосе решеточных колебаний появились новые фоновые моды. Это связано с дополнительными локальными нарушениями межатомных силовых констант. Для стимуляции проявлений преципитатов теллура, обусловленных вакансиями Cd в CdTe, а также для стимуляции образования двойных поляронов, на одном из которых локализована дырка, на другом – электрон, некоторые образцы до регистрации спектральных зависимостей подверглись оптической накачке излучением ксеноновой лампы мощностью 150 кВт в течение трех часов. При этом излучение от лампы фокусировалось в камеру прибора и далее в оптический гелиевый криостат, в который помещался образец. Это позволило проводить засветку кристалла при любой необходимой температуре  $4,2 < T < 400$  К с дальнейшей регистрацией спектра в тех же экспериментальных условиях. На рис. 2 штриховой линией показан спектр  $R(\omega)$ , полученный по схеме NB после облучения его светом при  $T = 230$  К. Из рисунка видно, что за полосой «остаточных» лучей в области волновых чисел  $\omega \sim 124 \text{ см}^{-1}$  появилась особенность, сравнимая по величине с фоновыми колебаниями. Что-либо сказать об изменении интенсивности этой полосы с уменьшением температуры или оптической накачки трудно, так как подобные измерения достаточно трудоемки и продолжительны по времени. Тем не менее можно

однозначно утверждать, что появление данной особенности вызвано фотоиндуцированными, а не термостимулированными процессами. Нам удалось установить одну интересную и важную зависимость: если засветка образца имеет место при температурах  $220 < T < 250$  К, то указанная полоса колебаний в  $R(\omega)$  присутствует; если же охладить образец ниже 210 К, а затем накачать оптическими квантами, то спектральная зависимость  $R(\omega)$  не будет иметь дополнительную полосу  $\omega \sim 124 \text{ см}^{-1}$ . Отсутствие этой же особенности при получении оптических спектров по схеме прямой регистрации спектров в дальней ИК-области волновых чисел связано, вероятно, с тем обстоятельством, что при этом образец облучается светом недостаточной интенсивности.

Приняв во внимание тот факт, что температурный интервал, необходимый для появления данного эффекта, составляет  $220 < T < 250$  К, а также то, что энергетическое положение дополнительного пика сопоставимо с энергией решеточных колебаний, можно ожидать, что этот пик обязан своим появлением тепловым колебаниям решетки. Фотоиндуцированные дырки локализируются на атомах теллура, занимающих нецентральное положение в узлах кристаллической решетки, в области преципитатов теллура, и взаимодействуют при этом с другими ближайшими атомами теллура, т. е. имеет место ловушка для дырки. Дальнейшее развитие этого процесса приводит к зародышевому образованию Те-кластеров. Их размеры и число будут зависеть от совершенства кристаллической решетки, количества и распределения по образцу легирующих и остаточных примесей. Вероятнее всего, при температурах  $T \sim 230$  К подвижность  $n$ - и  $p$ -поляронов достаточно высока, чтобы мог сформироваться электронно-дырочный поляронный комплекс. При более высоких температурах колебания решетки становятся достаточно интенсивными, чтобы электроны, локализованные на поляронах, имеющих место на вакансиях теллура, преодолели энергетический барьер и прорекомбинировали с дырками, связанными на поляронах, образованных ближайшими парами межузельного теллура. Поэтому при  $T > 230$  К эффект пропадает.

Подобные сложные комплексы, будучи электрически нейтральными, не участвуют в процессах переноса заряда. Тем не менее в процессах рассеяния они могут играть заметную роль. Таким образом, простое присутствие дефектов в кристаллах теллурида кадмия, даже кластерированных, не приводит к образованию поляронных комплексов. Требуется достаточно длительная и интенсивная оптическая накачка кристалла при низких температурах. Полупроводники типа  $A^{IV}B^{VI}$ , такие как  $Cd_xHg_{1-x}Te$ , интенсивно используются для создания оптоэлектронных приборов, работающих в инфракрасном диапазоне длин волн и при пониженных рабочих температурах. В связи с этим фотоиндуцированные сложные электронно-дырочные двойные поляроны, которые температурно неустойчивы, могут представлять значительные трудности для работы именно таких оптических приборов. Помимо этого, в области кристалла, где образовались подобные сложные комплексы, могут иметь место переходы между подзонами легких и тяжелых дырок с поглощением кванта света с длиной волны от 6 до 10 мкм [2]. Как известно, именно этот спектральный диапазон интересен для создания ИК-приемников излучения.

---

Работа выполнена в рамках проекта Российского фонда фундаментальных исследований (№ 96-02-18853).

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Meyer B. K., Omling P., Weigel E., Muller-Vogt G. // Proc. 21-st Intern. Conf. Phys. Semicond. Beijing, China, 1992.
2. Белогорохов А. И. Поведение коэффициента поглощения, обусловленного переходами в валентной зоне, в CdTe в диапазоне температур 5–400 К // ФТТ. 1992. 34, вып. 4. С. 1045.

*Поступило в редакцию 27 мая 1998 г.*

---

---

**Реклама продукции в нашем журнале – залог Вашего успеха!**