

УКРАИНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ТОМ 25
№ 10
ОКТЯБРЬ
1980

ПЕРЕВІРНО
2008P

ПЕРЕВІР
2015P

УДК 621.315.592

*Е. А. Сальков, П. Е. Мозоль, И. И. Пацкун,
И. В. Фекешгази, Н. С. Корец, И. И. Тычина*

ДВУХКВАНТОВАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ПРИМЕСНЫХ ЦЕНТРОВ В ДИФОСФИДЕ КАДМИЯ

Некоторые сведения о спектре двухфотонного поглощения (ДФП) света в дифосфиде кадмия CdP_2 в узкой области, где энергия двух квантов превышает ширину запрещенной зоны, получены в работах [1, 2], из которых следует монотонное возрастание ДФП с увеличением степени превышения. В настоящей работе детально исследовано нелинейное поглощение в более широкой области спектра на установке с повышенной чувствительностью, что позволило выделить ряд особенностей ДФП, обусловленных наличием примесей или дефектов даже в оптически однородных специально не легированных кристаллах.

Эксперименты выполнены по методу двух соосных световых пучков, распространяющихся в одном направлении. Оптическая схема установки подобна описанной в работе [3]. В качестве высокоинтенсивного источника света использовался лазер на алюмоиттриевом гранате, излучающий моноимпульсы света с частотой ω_1 , длительностью 15 нс и энергией 0,2 Дж, а в качестве зондирующего — ксеноновая лампа с частотой ω_2 и длительностью свечения 100 мкс.

Измерения проведены при комнатной температуре в интервале энергий кванта зондирующего излучения $\hbar\omega_2 = 1,3\text{--}2$ эВ на плоскопараллельных образцах, вырезанных перпендикулярно оптической оси кристалла. Световые пучки распространялись вдоль оптической оси кристалла, а плоскости колебания электрических векторов были параллельными друг другу. Значения константы $\beta_{1,2}$ и коэффициента $K_{1,2} = \beta_{1,2}I_1$ двухквантового поглощения рассчитывались по дополнительно уменьшению интенсивности I_2 проходящего через образец зондирующего луча в момент действия интенсивной подсветки [3, 4] (I_1 — интенсивность лазерного излучения).

Типичная экспериментальная зависимость $\beta_{1,2}$ от суммарной энергии квантов $\hbar\omega_1 + \hbar\omega_2$ для специально не легированных образцов CdP_2 приведена на рис. 1 (кривая 1) при $I_1 = 5$ МВт/см². Наблюдается пять максимумов, амплитуды которых несколько отличаются в случае образцов, взятых из различных партий. Эти максимумы, по-видимому, обусловлены преобладанием резонансного ДФП или двухступенчатых переходов (ДСП) над собственным ДФП.

Поскольку ширина запрещенной зоны CdP_2 $E_g = 2,02$ эВ, при $\hbar\omega_1 = 1,17$ эВ наряду с исследуемым ДФП типа $\beta_{1,2}$ наблюдается ДФП типа $\beta_{1,1}$, изученное в работе [5]. В этом случае примесные и (или) дефектные уровни в запрещенной зоне могут одновременно принимать участие в ДФП в качестве как виртуальных, так и реальных состояний. В первом случае будет происходить собственное ДФП, а во втором — резонансное ДФП или ДСП.

Одним из наиболее простых методов разделения ДФП и ДСП является анализ временной формы зондирующего импульса. При поглоще-

нии на частоте зондирующего импульса после прекращения действия интенсивной подсветки выделить вклад ДСП в ДФП относительно просто [6]. Однако для специально не легированных образцов временная форма дополнительного уменьшения интенсивности зондирующего луча идентична форме лазерного импульса во всей исследуемой области спектра. Следовательно, используя только эти результаты, разделить вышеуказанные процессы не представляется возможным.

В связи с этим измерялись зависимости $K_{1,2}(I_1)$ при различных энергиях квантов $\hbar\omega_1 + \hbar\omega_2$ (рис. 2). Как показали эксперименты, прак-

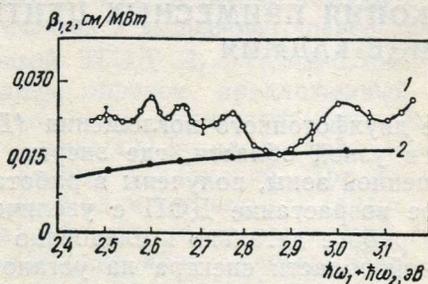


Рис. 1. Спектры суммарного (кривая 1) и собственного (кривая 2) ДФП в CdP₂.

тически во всей области спектра эти зависимости характеризуются двумя прямолинейными участками. Причем зависимости с большими коэффициентами пропорциональности $\beta_{1,2}$ соответствуют меньшим значениям I_1 . Исключение составляет зависимость $K_{1,2}(I_1)$ при $\hbar\omega_1 + \hbar\omega_2 = 2,86$ эВ, соответствующая наиболее глубокому минимуму функции $\beta_{1,2}(\hbar\omega_1 + \hbar\omega_2)$, для которой характерен только один наклон вплоть до значений I_1 , соответствующих порогу разрушения.

Как показано в работах [7, 8], дополнительную информацию о двухквантовых процессах можно получить, исследуя линейно-циркулярный дихроизм (ЛЦД) нелинейного поглощения. Проведенные измерения показали, что при малых значениях I_1 ЛЦД незначителен (1,05), т. е. в процессе нелинейного поглощения преобладает ДСП. Практически для всех значений $\hbar\omega_1 + \hbar\omega_2$ величина ЛЦД возрастает с увеличением I_1 , что свидетельствует о возрастающем вкладе ДФП в нелинейное поглощение. Исключение составляет случай поглощения двух квантов с $\hbar\omega_1 + \hbar\omega_2 = 2,86$ эВ, для которого характерна линейная зависимость $K_{1,2}(I_1)$ (см. рис. 2) и независимость ЛЦД от I_1 . Последнее свидетельствует о собственном двухфотонном поглощении.

Идентифицировав таким образом поглощение при больших значениях I_1 как собственно двухфотонное, по наклону прямых, аналогичных 1' и 2' (рис. 2), нашли соответствующие константы ДФП. Их спектральное распределение показано точками на кривой 2 рис. 1. Как видно, с увеличением $\hbar\omega_1 + \hbar\omega_2$ наблюдается сублинейное возрастание $\beta_{1,2}$, качественно согласующееся с результатами теоретических оценок (сплошная кривая), выполненных в рамках двухзонной модели для разрешенно-запрещенных переходов с учетом электронно-дырочного взаимодействия [9].

По положению максимумов $\beta_{1,2}$ с точностью до слагаемого $\mu(\hbar\omega_1 + \hbar\omega_2 - E_g)/m_V$ [10, 11] найдены значения глубины залегания уровней, равные 0,19; 0,42; 0,53; 0,59 и 0,69 эВ. Последние могут играть роль центров безызлучательной рекомбинации, так как они характеризуются малым временем жизни носителей.

При существенном легировании полупроводников в спектрах двухфотонных переходов удастся выделить особенности, свойственные дан-

ному типу примесей, и частично или полностью подавить особенности, характерные исходному материалу. На рис. 3 приведены спектры нелинейного поглощения света в CdP_2 , легированном Se и Bi. Отсутствие результатов в области $\hbar\omega_1 + \hbar\omega_2 > 2,6$ эВ для легированных Bi образцов обусловлено сложной природой спектра и кинетики поглощения, связанных с проявлением просветления, требующего более детальных исследований.

Основные закономерности нелинейного поглощения света в CdP_2 с примесями сводятся к следующему.

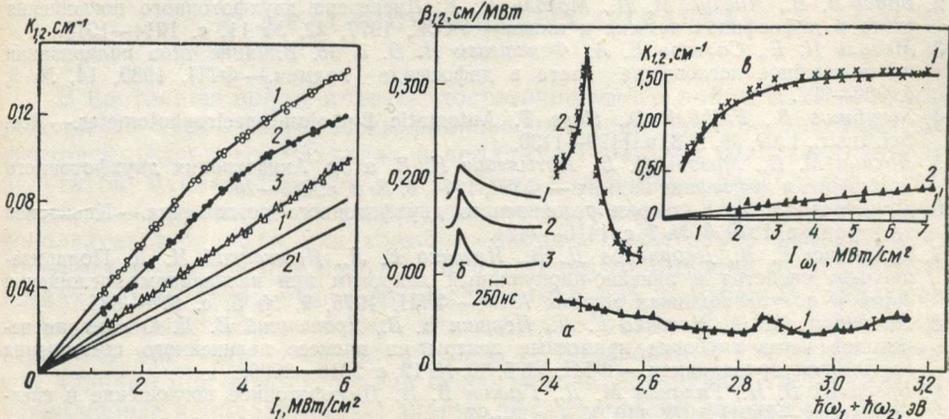


Рис. 2. Зависимость $K(I_1)$: 1 — $\hbar\omega_1 + \hbar\omega_2 = 2,6$ эВ, 2 — 2,5, 3 — 2,86. Прямые 1' и 2' параллельны высокоинтенсивным участкам кривых 1 и 2 соответственно.

Рис. 3. а — спектр нелинейного поглощения света в образцах CdP_2 , легированных Se (кривая 1) и Bi (кривая 2); б — временная форма сигнала нелинейного поглощения в CdP_2 : Bi при $\hbar\omega_1 + \hbar\omega_2 = 2,47$ эВ (кривая 1), в CdP_2 : Se при $\hbar\omega_1 + \hbar\omega_2 = 2,85$ эВ (кривая 2) и $\hbar\omega_1 + \hbar\omega_2 = 2,5$ эВ (кривая 3); в — зависимость $K(I_1)$ для CdP_2 : Bi при $\hbar\omega_1 + \hbar\omega_2 = 2,47$ эВ (кривая 1), CdP_2 : Se при $\hbar\omega_1 + \hbar\omega_2 = 2,85$ эВ (кривая 2) и собственное ДФП, соответствующее энергии 2,47 эВ (кривая 1').

1. Абсолютные значения констант $\beta_{1,2}$ значительно превышают таковые в случае специально не легированного материала. В спектре наблюдается резкий пик поглощения при $\hbar\omega_1 + \hbar\omega_2 = 2,47$ эВ в случае легирования Bi и менее резкий пик при $\hbar\omega_1 + \hbar\omega_2 = 2,85$ эВ в случае легирования Se.

2. Существенно изменилась временная форма сигнала нелинейного поглощения (рис. 3, б). Происходит длинновременное затягивание процесса после прекращения действия лазерного импульса.

3. Во всей спектральной области отсутствует ЛЦД двухквантового поглощения.

4. Зависимости $K_{1,2}(I_1)$ аналогичны таким зависимостям для исходного материала. Однако их линейность, наблюдаемая для CdP_2 , легированного Se (рис. 3, в), обусловлена только ДСП.

Таким образом, исследования нелинейного поглощения света в CdP_2 показали, что в запрещенной зоне даже специально не легированных оптически однородных кристаллов, выращиваемых в настоящее время, имеется большое число дефектных или примесных уровней. Степень заполнения их носителями тока определяет механизм двухквантового поглощения. Однако при дополнительном легировании процесс поглощения определяется типом примеси, а двухквантовые переходы носят двухступенчатый характер.

SUMMARY

The paper presents the results of studies in nonlinear light absorption spectrum in tetragonal cadmium diphosphide crystals. Types of two-quantum transitions are established. The depths of levels at which the two-step transitions take place are determined.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лисица М. П., Мозоль П. Е., Фекешгази И. В. Температурное изменение коэффициента двухфотонного поглощения в дифосфидах кадмия и цинка.— Квантовая электроника, 1974, 1, № 3, с. 714—716.
2. Борщ В. В., Лисица М. П., Мозоль П. Е. Дисперсия двухфотонного поглощения света в дифосфидах кадмия и цинка.— УФЖ, 1977, 22, № 11, с. 1914—1915.
3. Мозоль П. Е., Сальков Е. А., Фекешгази И. В. и др. Влияние типа поляризации на нелинейное поглощение света в дифосфиде кадмия.— ФТП, 1980, 14, № 5, с. 902—907.
4. Stagninus V., Fröhlich D., Caps T. Automatic 2-photon spectrophotometer.— Rev. Sci. Instr., 1969, 39, N 8, p. 1129—1130.
5. Лисица М. П., Мозоль П. Е., Потыкевич И. В. и др. Анизотропия двухфотонного поглощения в дифосфиде кадмия.— ФТП, 1974, 8, № 2, с. 242—246.
6. Демиденко З. А. К теории резонансного двухфотонного поглощения.— Квантовая электроника, 1979, 6, № 7, с. 1416—1421.
7. Берегулин Е. В., Дворников Д. В., Ивченко Е. Л., Ярошецкий И. Д. Поляризационные свойства и линейно-циркулярный дихроизм при нелинейном поглощении света в полупроводниках группы A^2B^6 .— ФТП, 1975, 9, № 5, с. 876—885.
8. Дворников Д. П., Ивченко Е. Л., Першин В. В., Ярошецкий И. Д. О влиянии переходов через глубокие примесные центры на процесс нелинейного поглощения света в полупроводниках.— ФТП, 1976, 10, № 12, с. 2316—2320.
9. Бредихин В. Н., Галанин М. Д., Генкин В. Н. Двухфотонное поглощение и спектроскопия.— УФН, 1973, 110, № 1, с. 3—97.
10. Продан В. Д., Рознерица Я. А. Двухфотонные межзонные оптические переходы в полупроводниках с участием примесных центров.— ФТП, 1975, 9, № 1, с. 148—151.
11. Балтрамеюнас Р., Вайткус Ю., Гаврюшин В. Влияние примесей на спектральное распределение двухфотонного поглощения в монокристаллах ZnSe.— ФТП, 1976, 18, № 10, с. 2954—2957.

Институт полупроводников АН УССР,
г. Киев;

Киевский пединститут им. А. М. Горького

Поступила в редакцию 23.VII 1979 г.,
в окончательном варианте—26.X 1979 г.