

УДК 539.2; 539.292

©1995

## ФОТОИНДУЦИРОВАННОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА В ТВЕРДОМ РАСТВОРЕ $\text{Cd}_{0.65}\text{Mn}_{0.35}\text{Te}$ С ВЫСОКОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ ДЕФЕКТОВ

*В.Ф.Агекян, А.Ю.Серов, Ю.А.Степанов, Ле Тхай Лай*

НИИ физики Санкт-Петербургского государственного университета  
(Поступила в Редакцию 31 августа 1994 г.)

Исследована кинетика фотопоглощения в кристаллах  $\text{Cd}_{0.65}\text{Mn}_{0.35}\text{Te}$  с высоким содержанием дефектов при температуре 77 К. Наблюдаемые изменения поглощения при подзонной ( $h\nu = 1.96$  eV) и инфракрасной ( $h\nu = 0.36$  eV) подсветках объясняются воздействием на край поглощения случайных электрических полей, возникающих при перезарядке примесных центров.

Фотоиндуцированное изменение свойств полупроводников имеет широкое практическое применение, оно лежит в основе методов оптической записи и обработки информации. Изучение фотоиндуцированных процессов позволяет получать сведения о параметрах собственных дефектов кристаллов и примесных центров [1-3].

В настоящей работе обнаружено поглощение, наведенное светом в твердых растворах  $\text{Cd}_{0.65}\text{Mn}_{0.35}\text{Te}$ , и изучена кинетика изменения этого поглощения при включении и выключении подсветки. Кристаллы  $\text{Cd}_{0.65}\text{Mn}_{0.35}\text{Te}$  были выращены из расплава методом Бриджмена, причем в процессе роста образовались примесные центры, связанные, по видимому, с кислородом. В отличие от стандартных твердых растворов  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  с  $x < 0.4$  [4,5] в этих образцах наблюдаются сильные полосы примесной люминесценции в области энергий, значительно меньших, чем ширина запрещенной зоны  $E_g$ , при сравнительно слабом экситонном излучении  $E_{ex}$  (рис. 1). Спектр пропускания образца  $\text{Cd}_{0.65}\text{Mn}_{0.35}\text{Te}$  представлен на рис. 2. Оказалось, что присутствие примесных центров вызывает изменение поглощения образца при подсветке с энергиями квантов  $h\nu_0$  меньшими ширины запрещенной зоны (фотопоглощение). Сходное в общих чертах явление наблюдается в некоторых соединениях группы III-V. В образцах полупроводящего GaAs в области  $0.8 \text{ eV} < h\nu < E_g$  исследовано поглощение глубокого донора  $EL2$  при переводе его в метастабильное состояние  $EL2^*$  [3], причем переход  $EL2 \rightarrow EL2^*$  можно индуцировать подсветкой  $h\nu_0 = 1.17$  eV, а обратный переход  $EL2^* \rightarrow EL2$  — подсветкой  $h\nu_0 = 0.94$  eV [6]. Однако наблюдаемые нами фотоиндуцированные изменения коэффициента поглощения имеют существенные отличия, так как в спектре  $\text{Cd}_{0.65}\text{Mn}_{0.35}\text{Te}$  существует область, где подзонная подсветка просветляет образец. Обнаружить аналогичный эффект в кри-

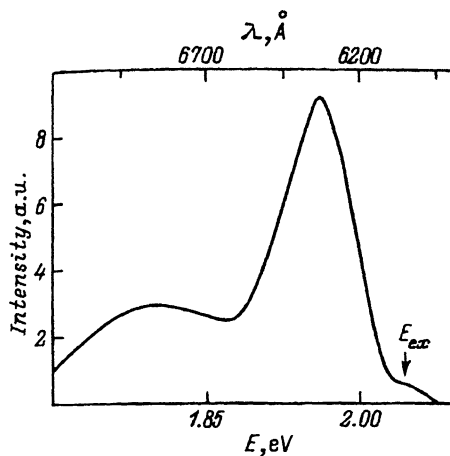


Рис. 1. Люминесценция исследованного образца  $\text{Cd}_{0.65}\text{Mn}_{0.35}\text{Te}$  при  $T = 77$  К.

$E_{ex}$  — люминесценция экситона.

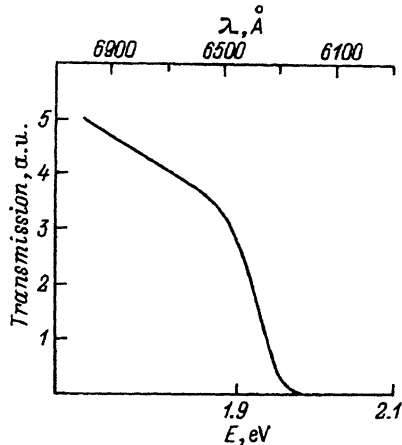


Рис. 2. Пропускание  $\text{Cd}_{0.65}\text{Mn}_{0.35}\text{Te}$  с толщиной 1.1 см при  $T = 77$  К.

сталлах  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  (с  $x = 0.35$  и другими значениями  $x$ ), выращенных в стандартных условиях, не удалось.

Измерялись спектры пропускания образцов  $\text{Cd}_{0.65}\text{Mn}_{0.35}\text{Te}$  с толщиной 0.1–1.1 см ниже энергии экситона с  $n = 1$  в интервале от 1.93 до 1.38 eV при  $T = 77$  К. Монохроматизированный свет галогенной лампы (зондирующий луч) проходил через образец и проектировался на щель спектрометра ДФС-24, при этом монохроматор МДР-4 и спектрометр согласовывались по длинам волн. В качестве подзонной  $h\nu_r$  и более длинноволновой  $h\nu_{ir}$  подсветок использовалось излучение гелий-неонового лазера с энергиями квантов 1.96 eV (мощность 2 mW) и 0.36 eV (мощность 5 mW) соответственно. Интенсивность подсветок менялась с помощью кристаллического поляризатора. На рис. 3 показаны величины и кинетика изменения пропускания зондирующего света с энергией 1.87 eV (коэффициент поглощения около  $10^2 \text{ cm}^{-1}$ ) при подзонной подсветке ( $h\nu_r = 1.96 \text{ eV}$ ). Видно, что включение подсветки в момент  $t = 0$  уменьшает пропускание образца с толщиной 1.1 см на 70%, после выключения подсветки в момент  $t = t_1$  происходит медленное просветление образца.

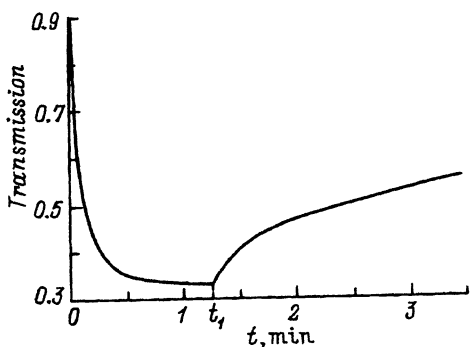


Рис. 3. Кинетика изменения пропускания  $\text{Cd}_{0.65}\text{Mn}_{0.35}\text{Te}$  при включении ( $t = 0$ ) и выключении ( $t = t_1$ ) подзонной подсветки.

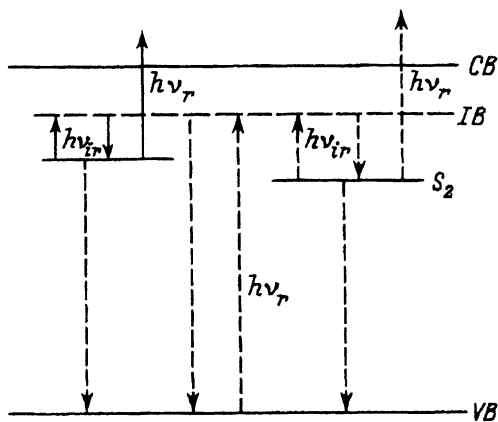


Рис. 4. Схема уровней и электронных переходов в образце  $\text{Cd}_{0.65}\text{Mn}_{0.35}\text{Te}$ .

Глубина модуляции поглощения и скорость его изменения зависят от интенсивности подзонной подсветки, причем время, необходимое для полного просветления кристалла, можно существенно уменьшить дополнительной ИК-подсветкой.

Исследование кинетики затемнения и просветления образца позволяет предложить схему уровней энергии (рис. 4). По-видимому, в кристалле существуют два достаточно глубоких примесных уровня ( $S_1$  и  $S_2$  на рис. 4), ответственных за изменение пропускания в случае подсветки.

Наблюдаемые изменения спектра вряд ли можно объяснить только появлением новой наведенной полосы поглощения, аналогичной наблюдаемой в GaAs [3]. По нашему мнению, изменение пропускания образца связано также с тем, что образование заряженных примесей приводит к появлению случайных электрических полей. Эти поля изменяют форму края поглощения (эффект Франца-Келдыша [6]) таким образом, что в области  $1.38 \div 1.93$  eV наблюдается затемнение образца, а в более высокоэнергетической области вплоть до 2.0 eV — его просветление.

Подзонная подсветка переводит электроны из валентной зоны на мелкие примесные уровни IB, расположенные ниже дна зоны проводимости, после чего часть фотоэлектронов заселяет уровни  $S_1$  и  $S_2$  (зарядка центров по схеме  $VB \rightarrow IB \rightarrow S_1, S_2$  (рис. 4)), а часть рекомбинирует обратно в валентную зону. Носители в состояниях  $S_1$  и  $S_2$  могут либо рекомбинировать с дырками валентной зоны, либо под действием подзонной подсветки  $h\nu_r$  выбрасываться высоко в зону проводимости ( $S_1, S_2 \rightarrow CB$ ). При достаточно длительной подсветке в образце устанавливается динамическое равновесие. Выключение подсветки прерывает процессы  $VB \rightarrow IB \rightarrow S_1, S_2$  и  $S_1, S_2 \rightarrow CB$ , вследствие чего происходит опустошение уровней  $S_1$  и  $S_2$  через переходы  $S_1, S_2 \rightarrow IB \rightarrow VB$ . При включении ИК-подсветки  $h\nu_r$  появляются дополнительные переходы ( $S_1, S_2 \rightarrow IB \rightarrow VB$ ).

Процесс опустошения уровней  $S_1$  и  $S_2$  можно описать выражениями

$$N_1 = N_{01} \exp(-w_1 t), \quad (1a)$$

$$N_2 = N_{02} \exp(-w_2 t), \quad (1b)$$

где  $N_1$  и  $N_2$  — концентрации носителей на уровнях  $S_1$  и  $S_2$  в момент времени  $t$ ,  $N_{01}$  и  $N_{02}$  — концентрации занятых состояний  $S_1$  и  $S_2$  в мо-

мент выключения подзонной подсветки,  $w_1$  и  $w_2$  — вероятности ухода носителей с уровней  $S_1$  и  $S_2$ .

Если считать, что коэффициент наведенного поглощения приблизительно пропорционален концентрациям заряженных центров  $S_1$  и  $S_2$ , то  $\alpha = k_1 N_1 + k_2 N_2$ , где  $k_1$  и  $k_2$  — численные коэффициенты. В этом случае изменение во времени интенсивности света, проходящего через образец, после выключения подзонной подсветки можно представить как

$$I = I_0 \exp \{ -k_1 N_{01} \exp(-w_1 t) - k_2 N_{02} \exp(-w_2 t) \}, \quad (2)$$

где  $I_0$  — интенсивность света, проходящего через образец при включенной подсветке. Поскольку ИК-подсветка увеличивает вероятность ухода носителей с уровней  $S_1$  и  $S_2$  ( $S_1, S_2 \rightarrow IB$ ), то естественно ожидать изменений в кинетике просветления образца при различных уровнях ИК-подсветки.

На рис. 5 представлены экспериментальные и расчетные (с использованием выражения (2)) кривые восстановления прозрачности образца после выключения подзонной подсветки ( $t = 0$ ) для различных уровней ИК-подсветки  $P_{ir}$ . Видно, что расчетные кривые хорошо согласуются с экспериментальными точками. Как и следовало ожидать, величины  $k_1 N_{01}$  и  $k_2 N_{02}$  не зависят от уровня подсветки и равны для всех кривых 0.85 и 0.45 соответственно. Вероятности  $w_1$  и  $w_2$  переходов с уровней  $S_1$  и  $S_2$  линейно зависят от уровня ИК-подсветки (рис. 6). Экстраполяция в области малых уровней подсветки при  $T = 77$  К показывает, что  $w_1$  не обращается в нуль при  $P = 0$ , вероятно, вследствие нерадиационной разрядки примесного уровня  $S_1$ . Что касается вероятности  $w_2$ , то ее обращение в нуль при  $P_{ir} = 0.1P_0$ , где  $P_0$  — максимальная интенсивность, может быть объяснено наличием переходов  $S_1 \rightarrow S_2$ : в этом случае при малых уровнях ИК-подсветки ( $P_{ir} < 0.1P_0$ ) количество заряженных центров  $S_2$  может начать увеличиваться, и формально  $w_2$  станет отрицательной величиной. В этом случае выражение (1b) следует видоизменить с учетом возможного заселения  $S_2$  с  $S_1$ .

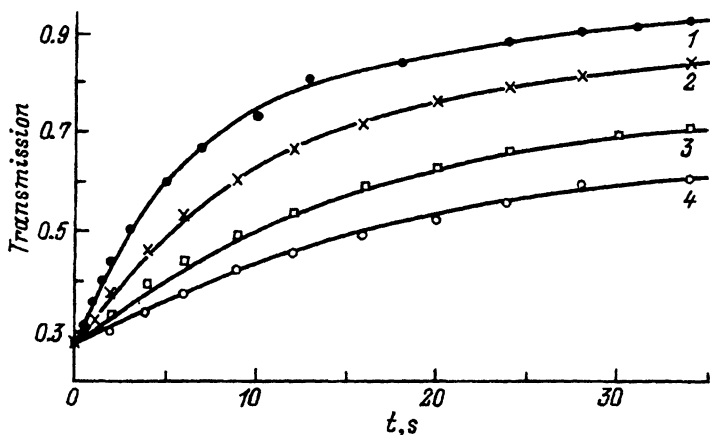


Рис. 5. Кинетика восстановления пропускания в  $Cd_{0.65}Mn_{0.35}Te$  после выключения подзонной подсветки при различных уровнях ИК-подсветки.

$P_{ir}$ : 1 —  $P$ , 2 —  $0.5P$ , 3 —  $0.25P$ , 4 —  $0.12P$ ;  $P = 0.5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ .

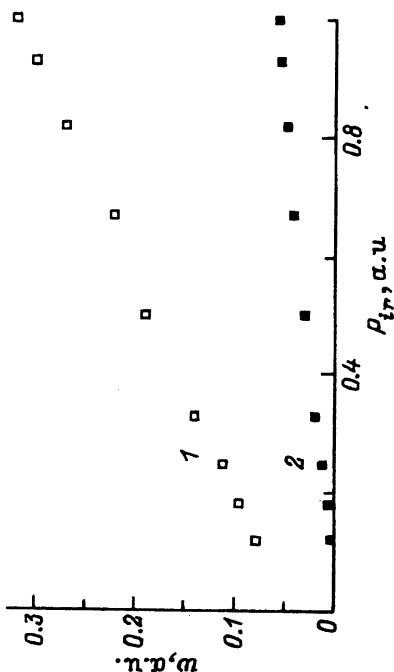


Рис. 6. Зависимости вероятностей  $w_1$  (1) и  $w_2$  (2) от интенсивности ИК-подсветки  $P_{tr}$ , полученные из расчета кинетики изменения пропускания (см. (4)).

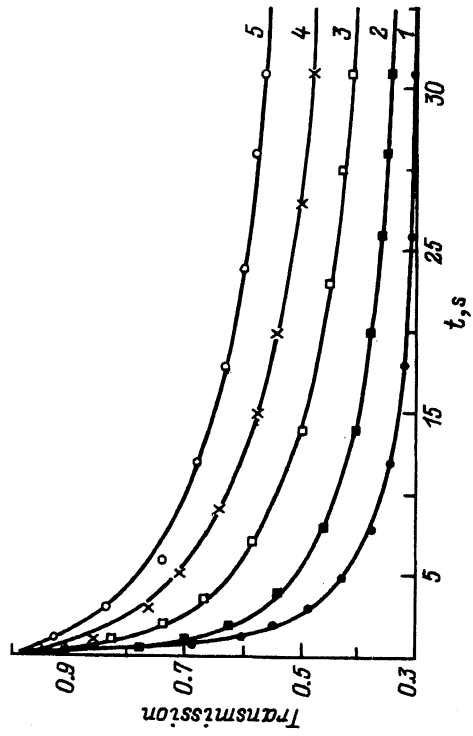


Рис. 7. Кинетика уменьшения пропускания образца  $Cd_{0.65}Mn_{0.35}Te$  при разных уровнях подзонной подсветки  $P_{tr}$ .  
 $P_{tr}$ : 1 —  $P$ , 2 —  $0.5P$ , 3 —  $0.25P$ , 4 —  $0.12P$ , 5 —  $0.08P$ ;  
 $P = 0.2 W \cdot cm^{-2}$ .

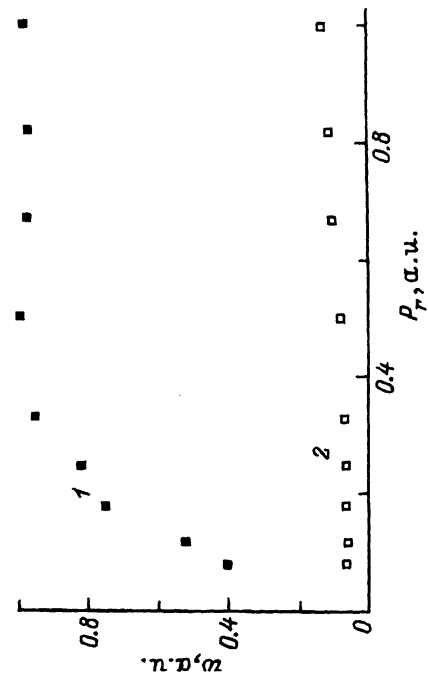


Рис. 8. Зависимости вероятностей  $w_1$  (1) и  $w_2$  (2) от интенсивности подзонной подветки  $P_r$ .

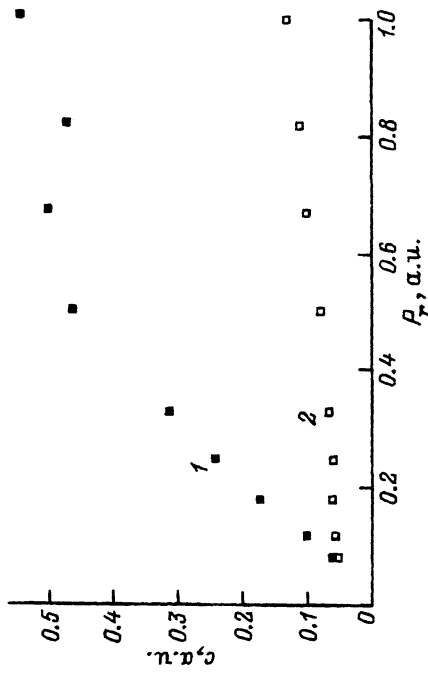


Рис. 9. Зависимости коэффициентов  $c_1$  (1) и  $c_2$  (2) от интенсивности подзонной подветки  $P_r$ .

Процесс заселения уровней  $S_1$  и  $S_2$  при включении подзонной подсветки в рамках предложенной модели описывается выражениями

$$N_1 = \frac{c_1}{w_1} \{1 - \exp(-w_1 t)\}, \quad (3a)$$

$$N_2 = \frac{c_2}{w_2} \{1 - \exp(-w_2 t)\}, \quad (3b)$$

где  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $w_1$ ,  $w_2$  имеют тот же смысл, что и в (1),  $c_1$  и  $c_2$  описывают поступление носителей с мелких примесных уровней на уровни  $S_1$  и  $S_2$  соответственно. Тогда процесс изменения во времени интенсивности света, проходящего через образец, после включения подзонной подсветки можно описать выражением

$$I = I_0 \exp \left\{ -k_1 \frac{c_1}{w_1} [1 - \exp(-w_1 t)] - k_2 \frac{c_2}{w_2} [1 - \exp(-w_2 t)] \right\}. \quad (4)$$

На рис. 7 сопоставлены экспериментальные и расчетные данные для различных интенсивностей подзонной подсветки. Зависимости параметров  $w_1$ ,  $w_2$  и  $c_1$ ,  $c_2$  от интенсивности этой подсветки представлены на рис. 8 и 9. Сравнение величин  $w_1$  и  $w_2$ , полученных при ИК-подсветке и подзонной подсветке (рис. 6 и 8), указывает на то, что подзонная подсветка наряду с переходами  $VB \rightarrow IB \rightarrow S_1, S_2$  индуцирует переходы  $S_1, S_2 \rightarrow CB$ . Вероятности  $w_1$  и  $w_2$  оказались при подзонной подсветке вдвое большими, чем при ИК-подсветке, что связано с большим коэффициентом поглощения.

В предложенной модели не учтены неоднородность возбуждения образца и возможность оптического возбуждения переходов иного типа. Уточнение этих моментов позволит понять нелинейную зависимость величин  $c_1$  и  $w_2$  от интенсивности подзонной подсветки  $P_r$ . Этими же причинами можно объяснить тот факт, что величины  $c_2$  и  $w_2$  не обращаются в нуль при экстраполяции  $P_r$  к нулю.

В заключение отметим, что влияние оптической перезарядки примесных центров на форму края поглощения полупроводников имеет практическое значение, и, как показывают наши последние эксперименты, наблюдается в кристаллах группы III-V.

#### Список литературы

- [1] Кочкаев С.К., Копаранова И.С., Георгиев М. Квантовая электрон. **4**, 4, 857 (1977).
- [2] Вартамян Э.С., Овсепян Р.К., Погосян А.Р. Кристаллография **35**, 4, 900 (1990).
- [3] Tajima M., Saito H., Ino T., Isida K. Jap. J. Appl. Phys. **27**, 1, P. 2, L101 (1988).
- [4] Агекян В.Ф., Фан Зунг. ФТТ **27**, 4, 1216 (1985).
- [5] Goede O., Heimbrot W. Phys. Stat. Sol. (b) **146**, 1, 11 (1988).
- [6] Manasrek M.O., Fischer P.W., Mitchel W.C. Phys. Stat. Sol. (b) **154**, 1, 11 (1989).
- [7] Вавилов В.С. Действие излучения на полупроводники (1963), С. 28.