

Изменение структуры дефектов в монокристаллах *p*-CdTe при прохождении лазерной ударной волны

© А. Байдуллаева[¶], А.И. Власенко, Б.Л. Горковенко, А.В. Ломовцев, П.Е. Мозоль

Институт физики полупроводников Национальной академии наук Украины, 252650 Киев, Украина

(Получена 7 июля 1999 г. Принята к печати 1 ноября 1999 г.)

Исследованы изменения времени жизни неравновесных носителей заряда, спектров фотопроводимости, температурные зависимости темнового тока и фототока высокоомных кристаллов *p*-CdTe при воздействии лазерной ударной волны. Показано, что изменения вышеуказанных характеристик в процессе воздействия ударной волны обусловлены генерацией неравновесных носителей с глубоких центров, а после ее воздействия — образованием собственных дефектов и их последующим взаимодействием с дефектами, существующими в исходном кристалле.

При облучении кристаллов $A^{IV}B^{VI}$, в частности *p*-CdTe, импульсами излучения рубинового лазера наносекундной длительности с плотностью мощности ниже порога разрушения происходит изменение электрических, фотоэлектрических и оптических свойств не только в приповерхностной области материала, но и на глубине ~ 5 мкм, что намного превышает глубину поглощения света (10^{-5} см $^{-1}$) [1–5]. Причиной этих изменений является образование собственных дефектов решетки за счет ее разогрева, возникновения термоупругих напряжений, воздействия акустической и ударной волны (УВ) при облучении кристалла. Если непосредственное влияние лазерного облучения на физические свойства кристаллов CdTe изучено достаточно хорошо, то влияние каждого из происходящих при лазерном облучении явлений, в частности при воздействии УВ, исследовано недостаточно [5].

В данной работе приведены результаты изучения электрических и фотоэлектрических свойств высокоомных монокристаллов *p*-CdTe как в процессе воздействия УВ неразрушающей амплитуды, так и после ее прохождения через кристалл. Ударные волны генерировались импульсами излучения рубинового лазера длительностью 20 нс с плотностью мощности, варьируемой в пределах 10^7 – 10^9 Вт/см 2 . Методики приготовления и облучения образцов аналогичны описанным в работах [4,5]. Исследуемый образец в виде параллелепипеда $2 \times 3 \times 2$ мм 3 помещался между медной фольгой и кварцевой подложкой, пространство между которыми заливалось эпоксидным клеем так, что расстояние от кристалла до фольги и подложки составляло 25 мкм. Медная фольга служила для предотвращения нежелательного фотоэффекта от прямого или рассеянного излучения лазера, а кварцевая подложка — для вывода волны разгрузки. Облучение образцов проводилось при комнатной температуре. Давление УВ оценивалось по формуле, приведенной в работе [6]:

$$P = \left(I_0 \frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{\rho_1 u_1 \rho_2 u_2}{\rho_1 u_1 + \rho_2 u_2} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где I_0 — плотность мощности лазерного излучения, γ — эффективный показатель адиабаты образующейся

плазмы, $\rho_1 u_1$ и $\rho_2 u_2$ — ударные импедансы конденсированной среды и поглощающего вещества соответственно, ρ — плотность вещества, u — скорость ударной волны.

С учетом отражения от границ раздела фольга–смола и смола–кристалл давление ударной волны определялось по отношению давлений проходящей P_2 и падающей P_1 волн [6]:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{2}{1 + \rho_2 u_2 / \rho_1 u_1}. \quad (2)$$

Результаты эксперимента и их обсуждение

На рис. 1 (кривая 1) представлена зависимость изменения концентрации (Δp) неравновесных носителей заряда (ННЗ) от давления УВ. При малых давлениях УВ концентрации ННЗ экспоненциально возрастает, достигая насыщения при давлении УВ более 3 кбар. Время релаксации ННЗ зависит от давления проходящей через кристалл УВ. В начале с увеличением давления УВ (до 2.5 кбар) время релаксации ННЗ уменьшается. При дальнейшем увеличении давления УВ — в области

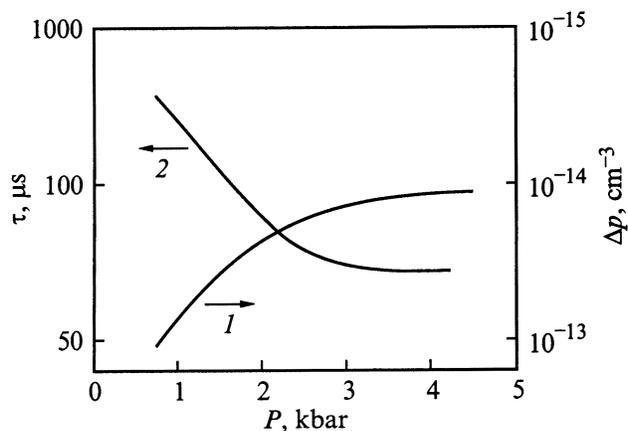


Рис. 1. Зависимости концентрации Δp (1) и времени релаксации τ (2) неравновесных носителей заряда в монокристалле CdTe от давления ударной волны P .

[¶] Phone: ++(38044)2651875
E-mail: baidulla@class.semicond.kiev.ua

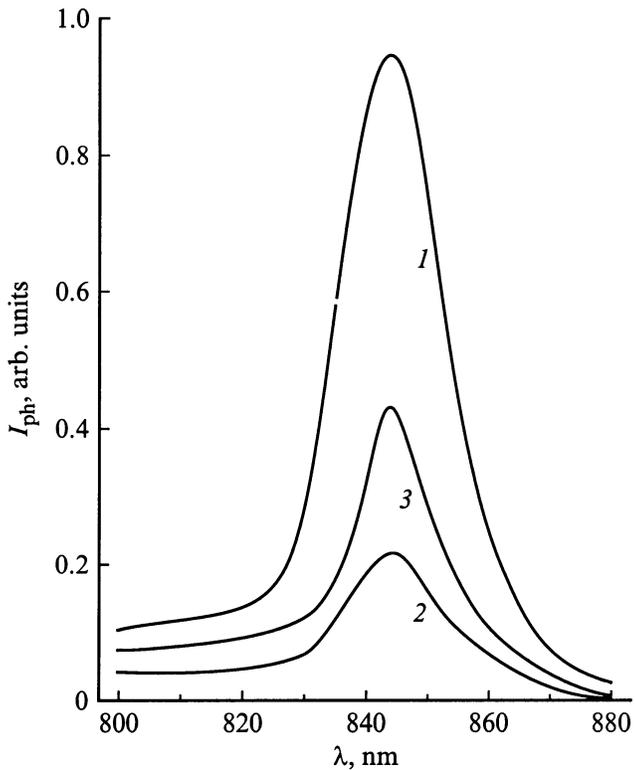


Рис. 2. Спектральные зависимости фотопроводимости монокристалла CdTe до (1) и после (2) прохождения ударной волны с давлением $P > 2$ кбар. Кривая 3 измерена после хранения облученного образца на воздухе в течение одного месяца.

насыщения Δp — время релаксации изменяется слабо (рис. 1, кривая 2). Наблюдаемый начальный рост Δp можно было бы объяснить увеличением концентрации ННЗ из-за распространения тепловых и ударных волн, образующихся при воздействии излучения лазера на кристаллы.

Глубина проникновения тепловой волны, образующейся при облучении образцов, составляла ~ 1.5 мкм, что намного меньше, чем толщина фольги. Поэтому изменение ННЗ кристаллов от нагрева можно исключить. В результате уменьшения ширины запрещенной зоны E_g под действием УВ уменьшается энергия ионизации дефектов. Оценка показывает, что изменение E_g в исследуемом диапазоне давлений УВ составляет ~ 0.01 эВ, а проводимость увеличивается в 2–2.5 раза. Это свидетельствует о том, что концентрация ННЗ, генерированных с ловушек, соизмерима с равновесной концентрацией. Но слабое изменение E_g не может ионизовать все ловушки. В связи со сказанным выше увеличение концентрации ННЗ при малых (менее 2 кбар) давлениях можно объяснить генерацией ННЗ с глубоководных точечных дефектов (ловушек), а насыщение при увеличении давления УВ свыше 3 кбар — накоплением генерированных УВ остаточных дефектов [4].

Исследовались также спектры фотопроводимости (ФП), температурные зависимости фототока и темнового тока до и после прохождения УВ через кристалл.

Отметим, что при исследовании ФП и фототока образцы освещались с выходной грани. На рис. 2 представлены спектральные зависимости ФП монокристаллов CdTe до и после прохождения УВ давлением с $P > 2$ кбар, а также после хранения образцов на воздухе в течение одного месяца. Форма спектра ФП исходного образца имеет селективную полосу с максимумом при $\lambda_{\max} = 840$ нм. После воздействия УВ величина ФП уменьшается. Селективная форма и положение максимума ФП при этом сохраняются. При хранении образцов после воздействия УВ на воздухе в течение одного месяца наблюдается увеличение величины ФП, однако она не достигает исходной величины.

Фототок исходных кристаллов слабо зависит от температуры в интервале 100–300 К, выше которого наступает термическая активация фототока, где зависимость $I_{\text{ph}}(T)$ имеет экспоненциальный характер с энергией активации $E_i = 0.8–0.9$ эВ (рис. 3, кривая 1). После прохождения УВ с давлением $p < 2$ кбар в области низких температур наблюдается участок температурного гашения фототока с энергией активации $E_{vt} = 0.13$ эВ. При температуре выше комнатной область температурной активации фототока остается неизменной, а ее величина падает почти на порядок (рис. 3, кривая 2). Появление участка температурного гашения фототока после прохождения УВ с $P < 2$ кбар может быть связано с образованием мелких центров с энергией активации ~ 0.13 эВ. При низких температурах и слабых уровнях возбуждения из области собственного поглощения света в кристаллах CdTe происходит сильная оптическая перезарядка между r -центрами ($E_r = 0.9$ эВ) и мелкими акцепторами ($E_{vt} = 0.13$ эВ) — захват фотодырок на мелкие уровни и уменьшение дырочного заполнения r -центров, т.е. формирование квазитемнового заполнения центра неосновными носителями с концентрацией N_r^0 [7]. Сле-

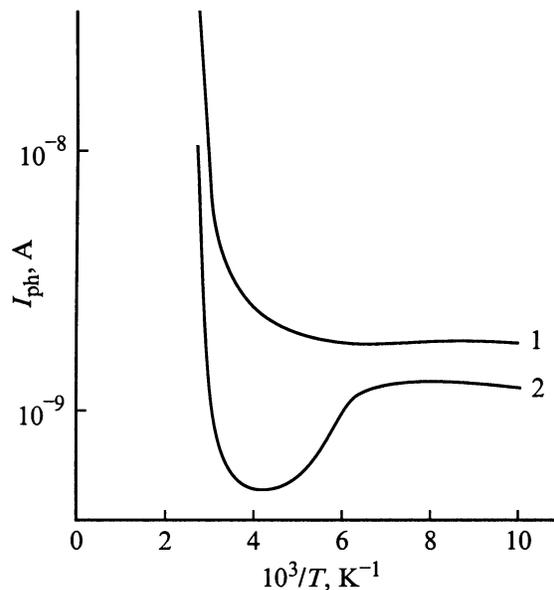


Рис. 3. Температурные зависимости фототока I_{ph} монокристалла CdTe до (1) и после (2) прохождения ударной волны.

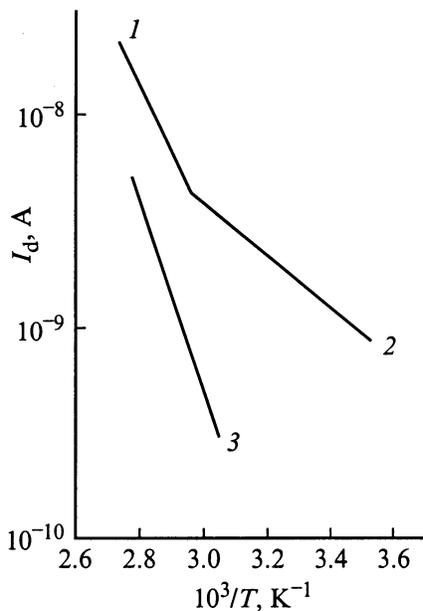


Рис. 4. Температурные зависимости темнового тока монокристалла CdTe до (1) и после (2, 3) прохождения ударной волны.

довательно, увеличение N_r^0 вызывает уменьшение τ ($\tau \propto 1/N_r^0$) и фототока. Об этом также свидетельствует наблюдаемое уменьшение τ после прохождения УВ с давлением $P < 2$ кбар. При повторном прохождении УВ с $P > 2$ кбар фототок падает еще на порядок, при этом вид температурной зависимости сохраняется, за исключением области температурного гашения фотопроводимости (исчезает).

В температурной зависимости темнового тока кристалла (I_d) наблюдается один участок с энергией активации $E_1 = 0.6$ эВ (рис. 4, кривая 1). После прохождения УВ с давлением $P < 2$ кбар величина темнового тока остается неизменной, но появляется дополнительный участок с $E_2 = 0.14$ эВ (рис. 4, кривая 2). При дальнейшем увеличении давления УВ величина темнового тока падает, а в температурной зависимости энергии активации E_1 и E_2 исчезают, но появляется уровень с энергией $E_3 = 0.8$ эВ, которая соответствует глубоким r -центрам (рис. 4, кривая 3). Этот факт свидетельствует о том, что генерация носителей тока после прохождения УВ с $P > 2$ кбар происходит с более глубоких уровней, чем в исходном кристалле. Уровень с энергией $E_2 = 0.14$ эВ соответствует в кристаллах CdTe энергетическому положению акцептора, который, как известно, является вакансией кадмия [8], а уровень $E_1 = 0.6$ эВ соответствует двухзарядной вакансии кадмия [9].

Поскольку в кристаллах p -типа вакансии металла (акцептора) проявляются в равновесной проводимости, можно предположить, что уменьшение величины равновесной проводимости при прохождении УВ с $P > 2$ кбар связано с изменением концентрации акцепторных центров в кристаллах. Рассмотрим поведение акцепторных центров после многократного прохождения лазерной УВ.

При воздействии волны в полупроводниках образуются пары Френкеля, отдельные вакансии и межузельные атомы, которые способны вступать во взаимодействие с атомами примесей и образовывать устойчивые комплексы дефектов [10]. При многократном прохождении УВ эти устойчивые дефекты накапливаются от импульса к импульсу лазерного излучения, что аналогично воздействию на полупроводник радиационного облучения [11]. Возможно, что при первом прохождении УВ происходит образование вакансии кадмия, о чем свидетельствует появление уровня с $E_2 = 0.14$ эВ (рис. 3 и 4, кривые 2). При повторном прохождении УВ с $P > 2$ кбар вакансии кадмия переходят на дислокации. За счет уменьшения энергии образования вакансии при многократном прохождении УВ через кристалл возникает большое количество избыточных вакансий, которые вызывают дополнительную деформацию среды [12]. Эта деформация в свою очередь может создавать концентрационные потоки, вызывая явление восходящей диффузии. Возникший упруго деформированный слой резко стимулирует скорость диффузии вакансий в объем материала. Ускоренная диффузия может быть связана с краудинным механизмом смещения узловых атомов, диффузией по стокам, "дислокационным трубкам" с повышенной диффузионной проницаемостью или дрейфом в градиенте упругих деформаций, т.е. "восходящей диффузией" [12]. Скорость перемещения атомов в локальных объемах при осуществлении восходящей диффузии может на несколько порядков превышать средний уровень подвижности атомов в кристаллах при данной температуре. В результате вакансии локализуются в областях сжатия, созданных как самими вакансиями, так и ударной волной, образуя кластеры. В зависимости от числа вакансий кластеры принимают форму шара либо диска моноатомной толщины, т.е. дислокационной петли. Образование дислокационной петли и связанное с ним появление в спектрах фотолюминесценции полосы $\lambda_{\max} = 840$ нм наблюдалось нами ранее [5]. Во многих работах других авторов эту дислокационную полосу связывают с точечными центрами рекомбинации, включающими вакансии кадмия [13]. Отметим, что появление дислокационной петли и полосы $\lambda_{\max} = 840$ нм наблюдалось лишь при многократном прохождении УВ, что коррелирует с результатами данной работы.

Таким образом, можно заключить, что ударная волна образующаяся при облучении кристаллов импульсами лазерного излучения, является одним из механизмов образования дефектов в p -CdTe.

Список литературы

- [1] В.Н. Бабенцов, А. Байдуллаева, А.И. Власенко, С.И. Горбань, Б.К. Даулетмуратов, П.Е. Мозоль. ФТП, **27**, 1618 (1993).
- [2] В.Н. Бабенцов, А. Байдуллаева, С.И. Горбань, П.Е. Мозоль. Поверхность. Физика, химия, механика, № 12, 144 (1988).
- [3] А. Байдуллаева, Б.М. Булах, Б.К. Даулетмуратов, Б.Д. Джумаев, Н.Е. Корсунская, П.Е. Мозоль, Г. Гарягдыев. ФТП, **26**, 801 (1992).

- [4] В.А. Янушкевич, А.В. Полянинов, Е.Г. Пруцков, Г.А. Поляганов. Изв. АН СССР. Сер. физ., № 5, 1146 (1986).
- [5] А. Байдуллаева, А.И. Власенко, Ю.В. Власенко, Б.К. Дулетмуратов, П.Е. Мозоль. ФТП, **30**, 1438 (1996).
- [6] Л.И. Иванов, Ю.Н. Никифоров, В.А. Янушевич. ЖЭТФ, **67**, 147 (1974).
- [7] Р. Бьюб. *Фотопроводимость в твердых телах* (М., Наука, 1962).
- [8] Н.В. Агринская, Е.Н. Аркадьева, О.А. Матвеев, Ю.В. Рудь. ФТП, **2**, 932 (1968).
- [9] А.А. Соколова, В.С. Вавилов, А.Ф. Плотников, В.А. Чаплин. ФТП, **3**, 720 (1969).
- [10] Г.Г. Бондаренко, Л.И. Иванов, В.А. Янушевич. Физика и химия обраб. материалов, № 4, 147 (1973).
- [11] А.И. Власенко, В.В. Горбунов, А.В. Любченко, Е.А. Сальков. УФЖ, **29**, 423 (1984).
- [12] В.Б. Брик. *Диффузия и фазовые превращения в металлах и сплавах*. (Киев, Наук. думка, 1985).
- [13] I.M. Figueoа, F.S. Sinensio, J.G. Mendoza-Alvares. J. Appl. Phys., **60**, 452 (1986).

Редактор Т.А. Полянская

Changes in defect structure patterns of *p*-CdTe single crystals at laser shock wave passing

A. Baidullaeva, A.I. Vlasenko, A.I. Gorkovenko,
B.L. Lomovets, P.E. Mozol

Institute of Semiconductor Physics,
National Academy of Sciences,
252650 Kiev, Ukraine

Abstract Changes on lifetime of nonequilibrium charge carriers (NCC), temperature dependencies of photo- and dark currents of high-resistance *p*-CdTe crystals at shock wave (SW) passing have been investigated. It is shown that changes of the above characteristics under SW passing are caused by NCC generation from deep centers. Changes after SW passing are caused by intrinsic defects formation and their subsequent interaction with as-grown defects.