

## ИЗМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МОНОКРИСТАЛЛОВ CdTe ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ОТ ИМПУЛЬСА ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРА

© А.Байдунлаева, А.И.Власенко, Ю.В.Власенко,  
Б.К.Даулетмуратов, П.Е.Мозоль

Институт физики полупроводников Национальной академии наук Украины,  
252650 Киев, Украина  
(Получена 15 июня 1995 г. Принята к печати 28 июля 1995 г.)

Исследованы изменения электропроводности, фотолюминесценции и дислокационной структуры монокристаллов  $p$ -CdTe под воздействием ударной волны, возникающей при взаимодействии лазерного излучения мощностью  $\sim 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> с поглощающим материалом. Показано, что электропроводность монокристаллов  $p$ -CdTe увеличивается в момент прохождения ударной волны и уменьшается после ее прохождения. Время релаксации этого процесса составляет 156 мкс. С увеличением плотности мощности лазерного излучения наблюдается увеличение числа дислокаций, которое коррелирует с увеличением остаточного сопротивления образцов. После прохождения ударной волны в спектре фотолюминесценции появляется полоса  $\lambda = 840$  нм, которая связана с рекомбинацией свободных носителей на протяженных дефектах. Остаточные изменения проводимости обусловлены образованием устойчивых дефектов кристаллической структуры. Анализируется природа наблюдаемых эффектов.

Известно, что облучение полупроводников  $A^{II}B^{VI}$  импульсами излучения лазеров наносекундной длительности с плотностью мощности ниже порога разрушения материала приводит к существенному изменению их электрофизических свойств [1-7]. Так, при облучении монокристаллов CdTe импульсами излучения рубинового лазера длительностью  $\sim 20$  нс наблюдалось изменение электрических, фотоэлектрических и люминесцентных характеристик в приповерхностной области глубиной  $3 \div 5$  мкм, что намного больше толщины области поглощения излучения. Можно предположить, что энергия импульса излучения лазера передается решетке в процессах генерации, термализации и последующей рекомбинации электронно-дырочных пар. Даже незначительное повышение температуры (на величину до  $200^\circ\text{C}$ ) в зоне облучения за столь малые времена ( $\sim 10^{-8}$  с) приводит к тепловому удару, в решетке возникают термоупругие напряжения  $\sim 20 \div 30$  кбар, достаточные для разрыва менее прочных химических связей. При сильном колебательном возбуждении центров, расположенных у поверхности,

возможен отрыв и испарение атомов вещества полупроводника, различных примесей или адсорбированных молекул. Наблюдается диффузия примесей и дефектов в глубь кристалла. В ряде работ [8-10] показано, что для Ge и Si такой процесс диффузии стимулируется ударной волной (УВ), возникающей при воздействии короткого лазерного импульса излучения. Можно предположить, что такой механизм существует и для CdTe. Следует в то же время подчеркнуть, что УВ действует совместно с фотоэффектом, термоупругими деформациями, термонагревом и достаточно трудно выявить роль каждого из этих факторов в процессах дефектообразования и изменения электрофизических свойств [3-7].

Представляет интерес выделение роли УВ в дефектообразовании CdTe без сопутствующих лазерному излучению указанных выше эффектов. Исследование воздействия УВ на материал проводилось различными авторами, при этом отмечалось, что наиболее удобным способом создания УВ является воздействие импульсами излучения лазера наносекундной или пикосекундной длительности [8-10]. В этих работах показано, что при прохождении УВ через кристалл генерируется большое количество точечных дефектов, которые существенно изменяют электрические свойства материала.

В настоящей работе получены экспериментальные результаты по изменению электрических свойств, морфологии и фотолюминесценции монокристаллов CdTe при прохождении УВ, созданной импульсом излучения рубинового лазера наносекундной длительности.

### Методика эксперимента

Для генерации неразрушающих УВ использовались импульсы излучения рубинового лазера длительностью 20 нс и интенсивностью, изменяемой нейтрально-серыми светофильтрами в пределах  $10^7 \div 10^9$  Вт/см<sup>2</sup> · с. Методика эксперимента аналогична описанной в [8].

Образцы изготавливались в форме параллелепипедов площадью  $2 \times 3$  мм<sup>2</sup> и варьируемой толщиной. Исследуемые образцы помещались между кварцевой подложкой и полированной медной фольгой, пространство между которыми заливалось эпоксидным клеем. Медная фольга служила для предотвращения попадания на образец прямого или рассеянного излучения лазера и связанных с этим фото- и термоэффектов. Толщина фольги выбиралась таким образом, чтобы генерируемая УВ образовывалась в фольге, а затем воздействовала на образец. Глубина образования УВ вычислялась по выражению, приведенному в [11], и при использовании табличных значений параметров составляла  $u_{\text{CdTe}} = 32.5$  мкм,  $u_{\text{Cu}} = 236$  мкм для CdTe и Cu соответственно. Кварцевая подложка применялась для исключения разрушения образцов волнами разгрузки, которые выходили на свободную поверхность подложки, предохраняя от разрушения образец.

Объектом исследования являлись монокристаллы высокоомного *p*-CdTe. Электрические контакты (медь, индий) наносились с обратной стороны образца и проверялись на омичность по линейности вольт-амперных характеристик. Изменение проводимости образцов регистрировалось как в момент облучения на осциллографе С8-12, так и после него. Дислокационная структура исследовалась методом оптической микротографии до и после облучения на выходной грани

образцов. Остаточное сопротивление образцов после каждого импульса излучения лазера измерялось через  $4 \div 5$  мин. Фотолюминесценция (ФЛ) образцов возбуждалась с поверхности выходной грани (111)A излучением гелий-неонового лазера.

## Результаты эксперимента

При облучении кристаллов  $p$ -CdTe толщиной 2.5 мм импульсами излучения рубинового лазера длительностью  $2 \cdot 10^{-8}$  с при комнатной температуре наблюдалось увеличение проводимости, а затем ее восстановление до начального значения. Типичный ход изменения во времени  $t$  проводимости одного из образцов после воздействия импульса излучения лазера с плотностью мощности  $100 \text{ МВт/см}^2$  при 300 К показан на рис. 1. Спад изменения проводимости при различных интенсивностях облучения имеет две составляющие — быструю, которая протекает по экспоненциальному закону с постоянной времени релаксации  $t_1 = 1.56 \cdot 10^{-4}$  с, и медленную, в течение которой (за время  $t_2 = 3 \div 4$  мин) проводимость уменьшается в несколько раз и затем стабилизируется. При этом остаточная проводимость кристалла становится ниже, чем исходная  $\sigma_0$ .

На рис. 2 приведены зависимости амплитуды импульса изменения проводимости (кривая 1) и остаточной проводимости (кривая 2) от мощности генерирующего УВ излучения лазера. С ростом мощности излучения лазера проводимость увеличивается по экспоненциальному закону, а затем выходит на насыщение (кривая 1). Остаточная проводимость (как при увеличении энергии одного импульса — кривая 2 на рис. 2, так и при увеличении суммарной энергии  $N$  импульсов постоянной плотности мощности излучения лазера — рис. 3,а) вначале уменьшается, а затем выходит на насыщение. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) исследуемых образцов  $p$ -CdTe до и после прохождения УВ приведены на рис. 3,б (кривые 1 и 2 соответственно). Измерения фототока после возбуждения УВ показали, что он падает на 2 порядка, а темновой ток уменьшается незначительно, причем наблюдается спрямление ВАХ (рис. 3,б).

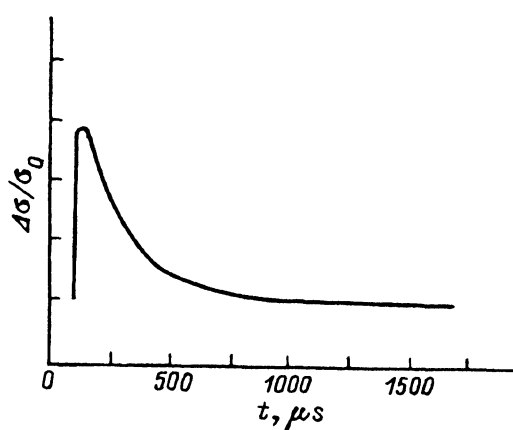


Рис. 1. Кинетика изменения электропроводности  $\Delta\sigma/\sigma_0$   $p$ -CdTe после воздействия импульса лазера с плотностью мощности  $100 \text{ МВт/см}^2$ .

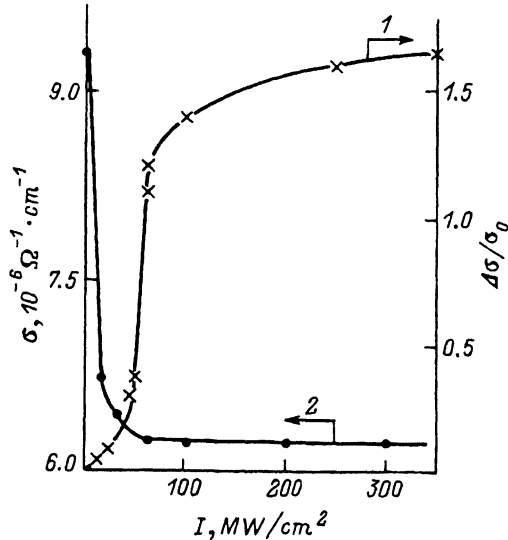


Рис. 2. Зависимость амплитуды импульса изменения проводимости  $\Delta\sigma/\sigma_0$  (1) и остаточной проводимости  $\sigma$  (2)  $p$ -CdTe от плотности мощности излучения лазера  $I$ .

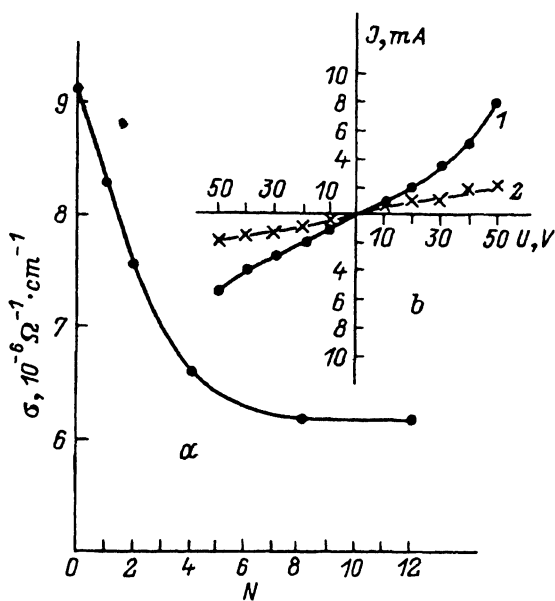
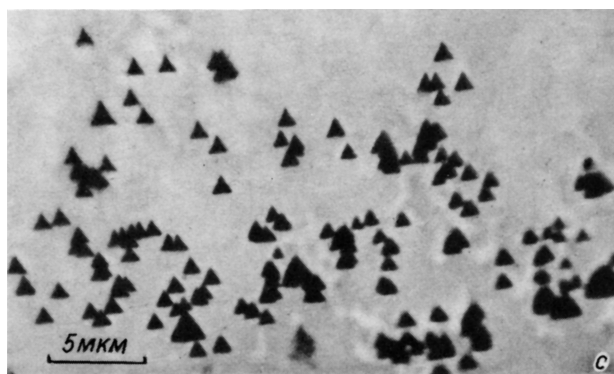
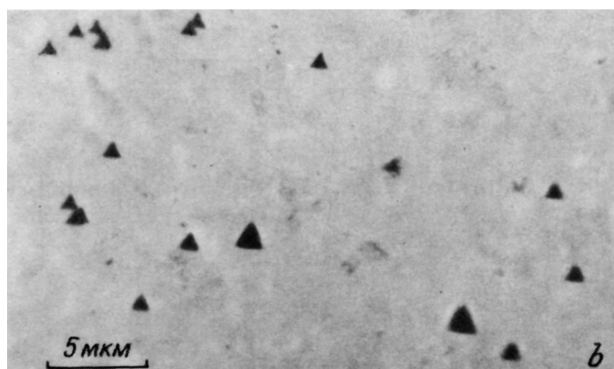
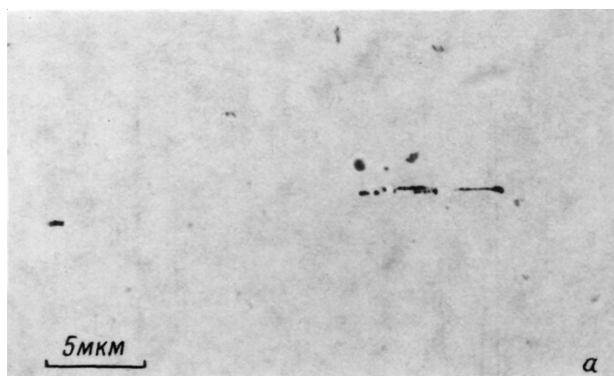


Рис. 3.  $a$  — зависимость остаточной проводимости  $\sigma$   $p$ -CdTe от числа импульсов излучения лазера  $N$  при плотности мощности  $20 \text{ МВт/см}^2$ ;  $b$  — вольт-амперные ( $J-U$ ) характеристики  $p$ -CdTe до (1) и после (2) прохождения УВ, возбуждаемой импульсом излучения лазера с плотностью мощности  $100 \text{ МВт/см}^2$ .

Плотность дислокаций в необлученных кристаллах составляла  $\sim 10^2 \text{ см}^{-2}$ . УВ при используемых плотностях мощности излучения лазера не приводила к появлению видимых разрушений входной и выходной поверхностей кристаллов. Однако после селективного травле-



**Рис. 4.** Микроскопия поверхности кристаллов  $p$ -CdTe до (а) и после воздействия УВ (b, c), генерируемой соответственно при меньшей и большей плотности мощности лазерного излучения.

ния наблюдалось увеличение количества дислокационных ямок травления, причем число их возрастало с увеличением плотности мощности излучения или количества импульсов (рис. 4). Отметим, что пороговая плотность мощности излучения лазера, при которой наблюдается размножение дислокаций, соответствует порогу образования УВ.

Спектры ФЛ при температуре 4.2 К содержат линию экситонов, связанных на нейтральных акцепторах (длина волны  $\lambda = 780$  нм), краевую полосу ( $\lambda = 800 \div 810$  нм) и полосу в области  $\lambda = 850 \div 950$  нм. После возбуждения УВ наблюдается гашение исходных полос ФЛ и появле-

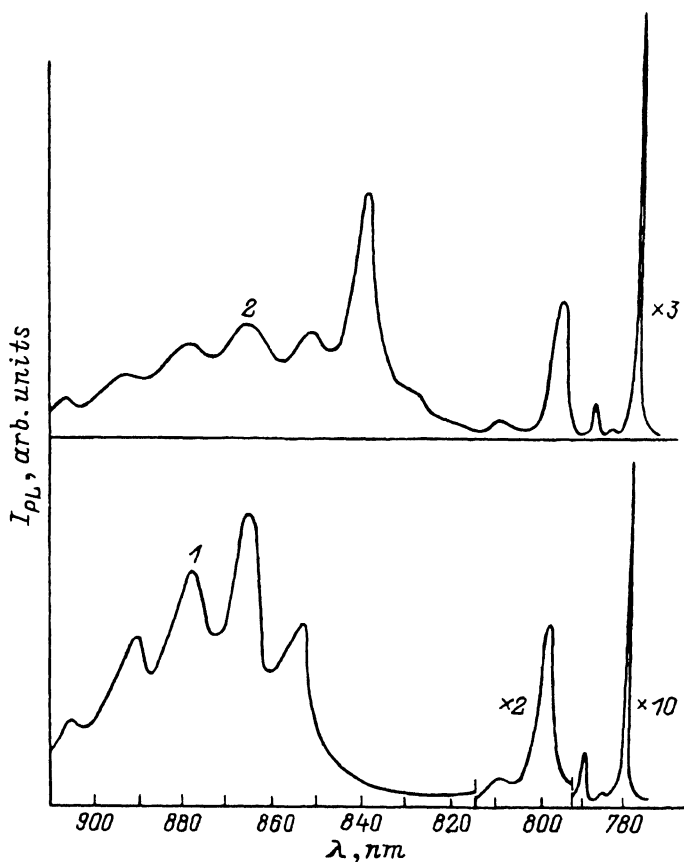


Рис. 5. Спектры интенсивности ФЛ  $I_{PL}$   $p$ -CdTe до (1) и после (2) прохождения УВ.

ние новой полосы  $\lambda = 840$  нм (рис. 5). Начало гашения исходных полос ФЛ и появление новой полосы происходят при одной и той же дозе облучения, соответствующей порогу образования УВ. Полоса 840 нм связана с рекомбинацией носителей на протяженных дефектах (типа дислокационной петли) [12].

### Обсуждение результатов

Изменение проводимости монокристаллов  $p$ -CdTe, облученных импульсами излучения лазера наносекундной длительности, возможно при генерации дополнительных носителей вследствие: фотоэффекта, возбуждаемого рассеянным излучением лазера; нагрева кристалла; пьезоэффекта и образования дополнительных дефектов структуры. Вклад подвижности носителей вследствие переключения механизма рассеяния маловероятен. Условия эксперимента позволяли устранить попадание света на образец и соответственно исключить фотогенерацию носителей. Более того, исследование фотопроводимости, возбуждаемой излучением рубинового лазера, показало, что характерные времена релаксации составляли  $\sim 10^{-7} \div 10^{-8}$  с, что на  $3 \div 4$

порядка меньше, чем наблюдаемые значения  $t_1$ . Объяснение наличи-ем пьезоэффекта отпадает, так как при отключенном питании сигнал отсутствовал. Наблюдаемое увеличение проводимости не может быть обусловлено нагревом образца, так как тепловая волна от лазерного импульса за время его воздействия распространяется на глубину  $\sim 2$  мкм и не выходит из фольги. Остается допустить, что одним из возможных объяснений наблюдаемого эффекта является генерация неравновесных носителей тока с глубоководных точечных дефектов (ловушек) ударной волной.

Механизм образования УВ под действием импульса излучения лазера описан в работах [11,13]. При облучении поверхности фольги на границе раздела образуются тонкий слой металлического пара и слабо ионизированной плазмы, который при расширении в объем среды гонит перед собой волны механического сжатия. УВ можно представить как направленный поток фононов, которые испытывают рассеяние на нерегулярностях решетки. При этом центр рассеяния приобретает импульс, который может оказаться достаточным для образования дефектов и эти дефекты могут быть к тому же ионизированы, так как решетка, сжатая УВ, находится вблизи предела устойчивости.

Увеличение проводимости в момент образования УВ (рис. 1) соответствует ионизации глубоких акцепторных уровней. Уменьшение остаточной проводимости после воздействия УВ (рис. 2, кривая 2 и рис. 3,а) сопровождается увеличением плотности дислокаций, на что указывают как появление полосы ФЛ  $\lambda = 840$  нм, связанной с рекомбинацией носителей на протяженных дефектах типа дислокационной петли, так и непосредственно микроскопические исследования (см. рис. 4,5).

В кристаллах CdTe  $p$ -типа проводимости имеется взаимосвязь между значением проводимости и плотностью дислокаций. В кристаллах с большей плотностью дислокаций проводимость меньше [7]. Поэтому можно предположить, что уменьшение проводимости после прохождения УВ связано с увеличением плотности дислокаций. Дислокации являются стоками для дефектов акцепторного типа, определяющими величину проводимости. При малой плотности дислокаций значительная часть этих дефектов остается не захваченной дислокациями и с ростом плотности дислокаций должна уменьшаться.

### Список литературы

- [1] А. Байдуллаева, И.Я. Городецкий, Н.Е. Корсунская, П.Е. Мозоль, Г.Н. Полисский. ФТТ, **26**, 1334 (1984).
- [2] А. Байдуллаева, П.Е. Мозоль, Е.А. Сальков, Н.И. Витриховский. ФТТ, **28**, 3561 (1986).
- [3] В.В. Артамонов, А. Байдуллаева, М.Я. Валах, П.Е. Мозоль, В.В. Стрельчук. Изв. АН СССР. Сер. физ., **52**, 1834 (1988).
- [4] В.В. Мартынов, А.Н. Соловьев, П.Е. Мозоль, А.В. Любченко, А. Байдуллаева. Кристаллография, **32**, 1539 (1987).
- [5] В.В. Артамонов, А. Байдуллаева, М.Я. Валах, П.Е. Мозоль, В.В. Стрельчук. ЖПС, **48**, 990 (1988).
- [6] A. Baidullaeva, B.K. Dauletmuratov, V.A. Gnatyk, P.E. Mozol. Phys. St. Sol. (a), **122**, 243 (1990).
- [7] А. Байдуллаева, Б.М. Булах, Б.К. Даулетмуратов, Б.Р. Джумаев, Н.Е. Корсунская, П.Е. Мозоль, Г. Гарягдыев. ФТП, **26**, 801 (1992).

- [8] Л.И. Иванов, Ю.Н. Никифоров, В.А. Янушкевич. ЖЭТФ, **67**, 147 (1974).  
[9] А.В. Полянинов, К.П. Гуров, В.А. Янушкевич. ЖЭТФ, **75**, 617 (1978).  
[10] В.Д. Хвостикова, В.А. Янушкевич, Е.Г. Пруцков. Физика и химия обраб. материалов, вып. 4, 53 (1984).  
[11] В.А. Янушкевич. Физика и химия обраб. материалов, вып. 5, 9 (1975).  
[12] В.Н. Бабенцов, А. Байдуллаева, Б.М. Булах, С.И. Горбань, П.Е. Мозоль. Поверхность. Физика, химия, механика, вып. 12, 144 (1988).  
[13] В.А. Янушкевич, А.В. Полянинов, Е.Г. Пруцков, Г.А. Польшанов. Изв. АН СССР. Сер. физ., **49**, 1146 (1985).

Редактор Л.В. Шаронова

## Changes in electrophysical properties of CdTe single crystals under laser emission pulse shock wave passing

*A. Baidullaeva, A.I. Vlasenko, Yu.V. Vlasenko, B.K. Dauletmuratov, P.E. Mozol'*

Institute of Semiconductor Physics, Ukrainian Academy of Sciences,  
252650 Kiev, the Ukraine

A study has been made of how the electroconductivity, photoluminescence and dislocation structure of *p*-CdTe single crystals change under the influence of shock wave arising due to interaction of laser emission (power density  $10^8$  W/cm<sup>2</sup>) with an absorbing material. It is shown that the electroconductivity of *p*-CdTe single crystals rises at the moment of SW passing and falls afterwards. Relaxation time of this process is 156  $\mu$ s. An increase in the number of dislocations is observed alongside with the increase in power density of the laser emission, which correlates with an increase in sample residual resistance. The photoluminescence band of 840 nm that appears after shock wave passing is linked with recombination of free carriers on extended defects. Reasons for effects observed are being considered.

---