

# Фотолюминесценция рекристаллизованного наносекундным лазерным облучением теллурида кадмия

© В.Н. Бабенцов, Н.И. Тарбаев

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

(Получена 28 января 1997 г. Принята к печати 25 февраля 1997 г.)

Исследовано влияние лазерного облучения наносекундной длительности на морфологию и низкотемпературную фотолюминесценцию  $n$ -CdTe при плотностях мощности, приводящих к плавлению материала ( $0.2 \div 0.5$  Дж/см<sup>2</sup>). После перекристаллизации материал имеет поверхность типа "апельсиновой корки". Спектр низкотемпературной фотолюминесценции соответствует монокристаллическому  $p$ -CdTe низкого качества с большим содержанием дислокаций и комплексов точечных дефектов. Лазерное воздействие производит эффект дальнего действия и приводит к существенному изменению примесно-дефектной системы, характерному для конверсии типа проводимости  $n \rightarrow p$ , на расстоянии более 50 мкм от места поглощения излучения.

## Введение

Ранее мы исследовали воздействие на примесно-дефектную систему теллурида кадмия импульсного лазерного излучения (ИЛИ) с относительно малой плотностью энергии в импульсе (до 150 мДж/см<sup>2</sup>) [1,2]. Такое излучение в зависимости от предыстории образца и режимов ИЛИ может создавать новые или отжигать уже имевшиеся в кристалле CdTe дефекты.

Было показано, что до достижения порога плавления CdTe ( $0.2 \div 0.3$  Дж/см<sup>2</sup>) на его поверхности образуется тонкий слой аморфного теллура (толщиной  $10 \div 20$  нм), который со временем кристаллизуется, образуя поликристаллическую пленку. Под этой пленкой располагается слой материала, обедненный кадмием на глубину  $30 \div 40$  нм и представляющий собой нестехиометрическое соединение  $Cd_xTe_{1-x}$ , где  $x = 0.3 \div 0.5$ .

Под слоем нестехиометрического теллурида кадмия расположен слой материала, в котором в процессе релаксации упругих напряжений образуется дислокационная сетка [3]. Низкотемпературная фотолюминесценция (ФЛ) и электрофизические свойства в этой области сильно отличаются от свойств исходного материала, в общем случае проявляя тенденцию к уменьшению проводимости и появлению в спектре низкотемпературной ФЛ новых полос, связанных с рекомбинацией на комплексных дефектах, таких как  $nV_{Cd}$  или  $nV_{Cd} + M_{Cd}$ , где  $n$  — количество одиночных вакансий,  $M$  — примесь I группы. В данной работе исследовано влияние ИЛИ наносекундной длительности на морфологию и низкотемпературную ФЛ  $n$ -CdTe при плотностях мощности, приводящих к плавлению материала ( $0.2 \div 0.5$  Дж/см<sup>2</sup>). Показано, что после перекристаллизации материала его поверхностный слой теряет свою исходную зеркальность и приобретает морфологию типа "апельсиновой корки". На нем наблюдается спектр низкотемпературной ФЛ, соответствующий монокристаллическому  $p$ -CdTe с большим содержанием дислокаций и комплексов точечных дефектов.

## Методика эксперимента

Образцы  $n$ -CdTe получали путем отжига при температуре  $T_a = 500 \div 600^\circ\text{C}$  пластин специально не легированного  $p$ -CdTe с концентрацией дырок  $p < 10^{15}$  см<sup>-3</sup> в атмосфере насыщенных паров кадмия в запаянной ампуле, содержащей образец и навеску кадмия [4].

После удаления поверхностного слоя отожженной пластины на глубину  $100 \div 200$  мкм полированием в растворе брома в метаноле оставшаяся часть пластины представляла собой однородно легированный по толщине материал  $n$ -типа проводимости с концентрацией электронов  $n = (2 \div 5) \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>.

Ориентация пластин соответствовала плоскости {111}.

Образцы перед обработкой помещались на держатель, позволяющий линейно перемещать их перпендикулярно направлению лазерного луча со скоростью  $V = 100 \div 200$  мкм/с.

Обработка образцов ИЛИ проводилась при комнатной температуре на воздухе с использованием YAG:Nd-лазера (работающего в режиме модулированной добротности с частотой повторения 10 Гц и длительностью импульса 20 нс, длина волны излучения  $\lambda = 0.63$  мкм) через щель шириной 80 мкм, расположенную на расстоянии  $50 \div 100$  мкм от поверхности образца.

При фокусировке лазерного луча в пятно диаметром 20 мкм используемая частота повторения импульсов обеспечивала условия, когда каждая точка образца обрабатывалась  $10 \div 20$  импульсами при заданной скорости перемещения лазерного луча вдоль щели и образовывалась полоса обработанного материала. После получения одной полосы щель параллельно смещали на  $100 \div 200$  мкм и повторяли обработку. Так получали последовательно чередующиеся полосы обработанного и необработанного материала.

После лазерной обработки поверхность образца исследовали на электронном микроскопе (контраст во вторичных электронах). Далее на них измеряли спек-

тры низкотемпературной фотолюминесценции (температура измерения  $T = 4.2$  К). Для получения пространственного распределения излучения фотолюминесценции с заданной длиной волны область фотовозбуждения (сфокусированное в пятно диаметром 50 мкм излучение He-Ne-лазера мощностью 40 мВт с длиной волны  $\lambda = 632.8$  нм) перемещали по образцу в направлении, перпендикулярном обработанным лазером дорожкам таким образом, что регистрируемое излучение всегда было сфокусировано на входную щель спектрального прибора МДР-23.

## Экспериментальные результаты и обсуждение

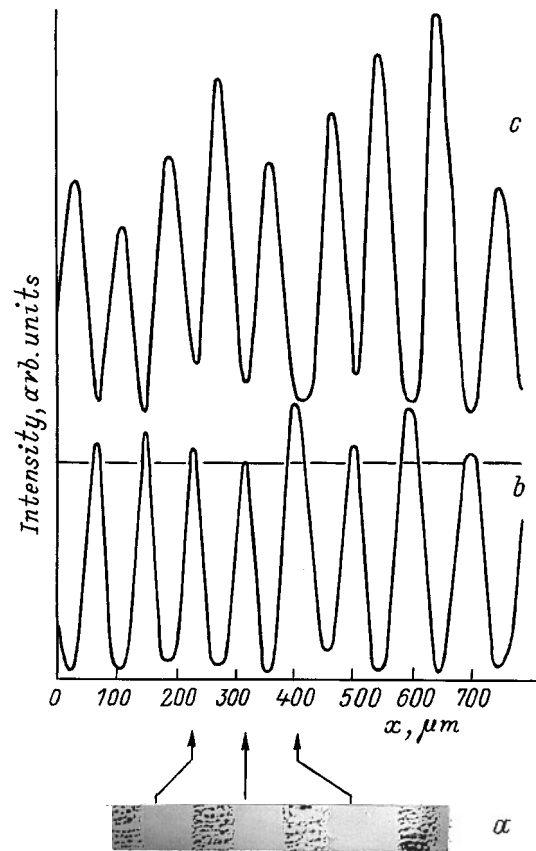
1. *Морфология поверхности.* На рис. 1, *a* представлена фотография поверхности образца *p*-CdTe во вторичных электронах после его обработки лазерным излучением. Дорожки, поверхность которых напоминает апельсиновую корку, образовались в результате переплавки материала лазерным излучением и его последующей кристаллизацией на воздухе. Между ними расположены дорожки необработанной поверхности исходного материала, которые оставались зеркально гладкими. Ширина обработанных и необработанных дорожек на поверхности образца составляет  $80 \div 120$  мкм.

2. *Низкотемпературная фотолюминесценция.* На рис. 2, *a* показан спектр низкотемпературной ФЛ исходного *n*-CdTe, который содержит в области связанных экситонов две сравнимые по интенсивности линии экситонов:  $I_1$  — линию экситонов, связанных на нейтральных мелких акцепторах ( $\text{Li}_{\text{Cd}}$ ,  $\text{Na}_{\text{Cd}}$ ,  $\text{Cu}_{\text{Cd}}$ ,  $\text{P}_{\text{Te}}$ ), и  $I_2$  — линию экситонов, связанных на нейтральных мелких донорах ( $\text{Li}_i$ ,  $\text{Na}_i$ ,  $\text{Cu}_i$ ) [5].

В области краевой донорно-акцепторной (Д-А) фотолюминесценции признаком *n*-типа проводимости CdTe является полоса с максимумом 810 нм, связанная с акцепторным состоянием фосфора  $\text{P}_{\text{Te}}$ , доминирующая в области длин волн  $800 \div 820$  нм [4].

После лазерной обработки спектр ФЛ радикально изменяется не только в области переплавленного материала (дорожки с поверхностью апельсиновой корки), но и между этими областями (рис. 2, спектры *b, c*), т. е. там, где переплавки материала не происходило.

Основным изменением в спектре переплавленного материала в сравнении с исходным является сильное (в  $20 \div 40$  раз) уменьшение интенсивности излучения в области связанных экситонов и в области Д-А излучения  $800 \div 820$  нм. При этом в спектре ФЛ появилась доминирующая по интенсивности новая полоса с максимумом 840 нм, обусловленная, как принято считать, рекомбинацией на комплексных дефектах, включающих в себя вакансии кадмия и атомы остаточных примесей металлов I группы [6], которая индуцируется также пластической деформацией объемного материала или абразивной обработкой его поверхности [7]. Весьма



**Рис. 1.** Пространственное распределение вторичных электронов в электронном микроскопе при возбуждении поверхности обработанного лазерным излучением образца *n*-CdTe (*a*), а также интенсивностей полос низкотемпературной фотолюминесценции 780 нм (*b*) и 840 нм (*c*) при сканировании по координате  $x$  в направлении, перпендикулярном полоскам обработанного материала.

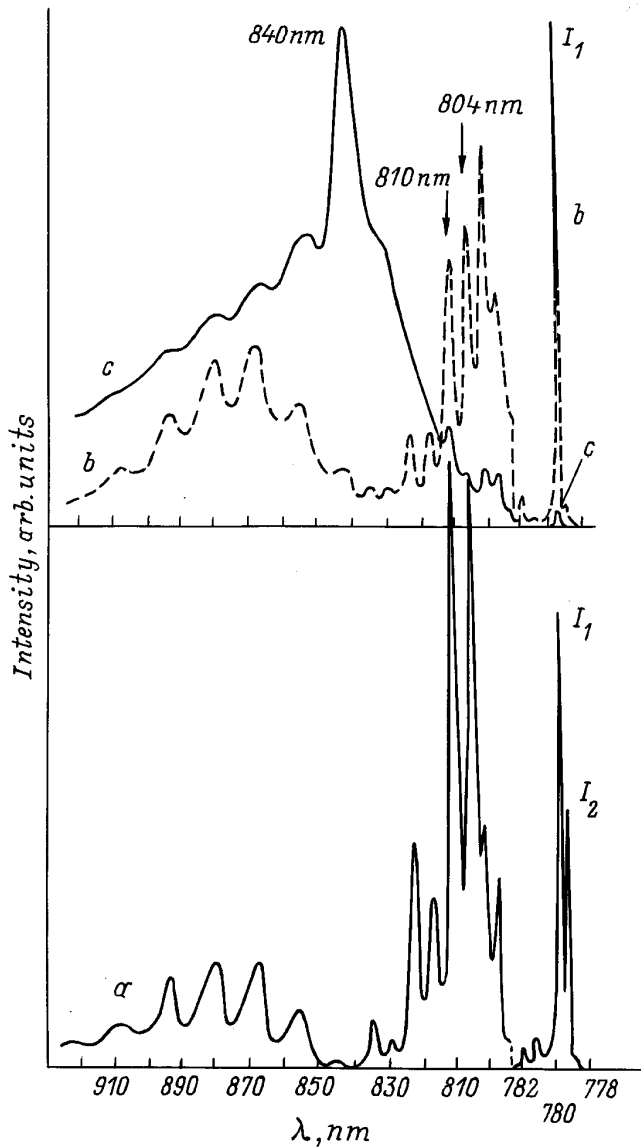
примечательно при этом, что в спектре полностью исчезла линия  $I_2$ , что характерно для материала *p*-типа проводимости [4].

На рис. 1, *b, c* приведены профили распределения интенсивности низкотемпературной ФЛ полос в области 840 и 780 нм, полученные в результате сканирования пятном возбуждения перпендикулярно дорожкам, полученным лазерной обработкой.

Пространственная корреляция экстремумов полос свидетельствует о взаимосвязи рекомбинационных механизмов в этих полосах.

Значительные изменения спектра низкотемпературной ФЛ произошли также и в областях, где материал не был переплавлен вследствие нагрева лазерным излучением, т. е. там, где максимальна интенсивность линии  $I_1$ .

В точке, равноудаленной от соседних дорожек переплавленного CdTe, в спектре ФЛ линия  $I_2$  также практически отсутствует, а полоса Д-А излучения 810 нм уже не является доминирующей в области  $800 \div 820$  нм (рис. 2, спектр *b*). В спектре доминирует полоса 804 нм, что характерно для материала *p*-типа проводимости [4].



**Рис. 2.** Спектры низкотемпературной фотолюминесценции CdTe: *a* — исходный необработанный материал *n*-типа проводимости; *b* — участок, расположенный в середине между дорожками обработанного лазерным излучением материала; *c* — перекристаллизованный материал, имеющий морфологию поверхности типа апельсиновой корки.

Таким образом, на основании анализа спектров низкотемпературной ФЛ можно заключить, что лазерный нагрев материал *n*-CdTe, обогащенного атомами избыточного кадмия, приводит к преимущественному удалению из него кадмия и образованию вакансий кадмия.

Такой же результат был получен ранее [8] при измерении на масс-спектрометре состава потока атомов, вылетающих при лазерной обработке теллурида кадмия. Как было показано в этой работе, при установлении стационарного потока количество атомов кадмия в потоке в четыре раза превышает количество атомов теллура. Таким образом, приповерхностный слой материала при

лазерном облучении обедняется кадмием, а на поверхности образуется пленка аморфного теллура.

Вакансии кадмия, образующиеся в приповерхностном слое, диффундируют в глубину и в стороны от обработанных лазерным излучением участков материала. Они заполняются атомами остаточных примесей I группы, создавая однозарядные акцепторы, обуславливающие *p*-тип проводимости.

В области переплавленного материала "пересыщенный твердый раствор" вакансий кадмия конденсируется, приводя к образованию дислокационных петель и комплексных дефектов, что, с одной стороны, приводит к падению квантового выхода излучательной рекомбинации, а с другой — к появлению новой полосы 840 нм, не наблюдавшейся в ФЛ исходного, близкого к стехиометрическому, теллурида кадмия.

Сканирование точки возбуждения ФЛ поперек обработанных ИЛИ полос показывает, что эффект лазерной обработки является весьма дальнедействующим и распространяется вдоль поверхности образца на расстояние, превышающее 50 мкм (профили интенсивностей линии  $I_1$  и полосы 840 нм приведены на рис. 1, *b, c*).

Столь большое расстояние, на которое действует лазерная обработка, очень трудно объяснить распространением теплового потока от наносекундного лазерного импульса. По-видимому, более существенными являются в данном случае диффузия вакансий кадмия и активная роль в этом процессе дислокаций (обычно плотность дислокаций составляет  $(0.5 \div 1.0) \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$ ).

## Заключение

В работе показано, что:

- 1) лазерная перекристаллизация *n*-CdTe на воздухе приводит к получению материала, имеющего спектр низкотемпературной ФЛ, характерный для теллурида кадмия *p*-типа проводимости низкого качества (большое количество дислокаций, двойников, точечных комплексных дефектов и т.д.);
- 2) лазерная обработка импульсами наносекундной длительности производит эффект дальнего действия; изменение спектра ФЛ в точке, более чем на 50 мкм отстоящей от места поглощения лазерного излучения, свидетельствует о существенном изменении примесно-дефектной системы, характерном для конверсии типа проводимости  $n \rightarrow p$ .

## Список литературы

- [1] В.Н. Бабенцов, А. Байдуллаева, Б.М. Булах, С.И. Горбань, П.Е. Мозоль, Б.К. Даулетмуратов. Поверхность. Физика, химия, механика, **12**, 144 (1988)
- [2] А. Байдуллаева, Б.М. Булах, Б.К. Даулетмуратов, Б.Р. Джумаев, Н.Е. Корсунская, П.Е. Мозоль, Г. Гарягдыев. ФТП, **26**, 801 (1992).
- [3] В.Н. Бабенцов, А. Байдуллаева, А.И. Власенко, С.И. Горбань, Б.К. Даулетмуратов, П.Е. Мозоль. ФТП, **27**, 1618 (1993).

- [4] Н.В. Агринская, В.В. Шашкова. ФТП, **22**, 1248 (1988).
- [5] E. Molva, J.P. Chamonal, J.L. Pautrat. Phys. St. Sol. (b), **109**, 635 (1982).
- [6] В.Н. Бабенцов, Б.М. Булах, С.И. Горбань, Л.В. Рашковецкий, Е.А. Сальков. ФТП, **23**, 1560 (1989).
- [7] В.Н. Бабенцов, С.И. Горбань, Е.А. Сальков, Н.И. Тарбаев. ФТП, **21**, 1724 (1987).
- [8] J.J. Dubovski, P.K. Bhat, D.F. Williams, P. Becla. J. Vac. Sci. Technol. A, **4**, 1879 (1986).

*Редактор Л.В. Шаронова*

**Photoluminescence of cadmium telluride  
after recrystallization by nanosecond laser  
irradiation**

V.N. Babentsov, N.I. Tarbaev

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