

МЕХАНИЗМЫ ОБРАЗОВАНИЯ НАРУШЕННОГО СЛОЯ В p -CdTe ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ НАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

В. Н. Бабенцов, А. Байдуллаева, А. И. Власенко, С. И. Горбань,
Б. К. Даулетмуратов, П. Е. Мозоль

Институт полупроводников Академии наук Украины, 252650, Киев, Украина
(Получена 30 ноября 1992 г. Принята к печати 19 марта 1993 г.)

Измерены спектры низкотемпературной фотолюминесценции до и после облучения p -CdTe импульсами излучения рубинового лазера наносекундной длительности с плотностью мощности излучения ниже порога плавления материала. Показано, что по мере увеличения дозы облучения в приповерхностной области материала происходит накопление механических напряжений, которые при достижении порога пластичности кристалла приводят к образованию дислокационной сетки, способствующей релаксации напряжений.

Ранее было показано, что по мере облучения монокристаллов p -CdTe импульсами излучения рубинового лазера допороговой мощности наблюдается критическая доза облучения, при которой начинается образование на поверхности образца дислокационной сетки. При этом пороговым образом изменяются электропроводность и спектр низкотемпературной фотолюминесценции (НФЛ) [1].

В данной работе проведено исследование состава приповерхностной области образца, включающей пленку теллура и слой теллурида кадмия с дислокационной сеткой, и изучены спектральные изменения НФЛ при дозах облучения, не приводящих к размножению дислокаций.

Методика эксперимента и результаты

Для исследования использовались образцы пластинчатых монокристаллов p -CdTe, имеющие ровную плоскость [111], которая подвергалась облучению несколькими импульсами излучения рубинового лазера наносекундной длительности с плотностью мощности в импульсе 2 МВт/см² при $T = 300$ К.

НФЛ при 4.2 К возбуждалась излучением He—Ne-лазера ($\lambda = 632.8$ нм, $P = 1$ мВт/см²) и регистрировалась монохроматором МДР-23 со спектральным разрешением 0.7 Å.

Селективное травление осуществлялось в растворе HNO₃/K₂Cr₂O₇ с добавкой Ag⁺.

Измерение времени жизни фотоносителей проводилось по кривой спада фототока, возбужденного наносекундным импульсом излучения того же рубинового лазера. Плотность мощности излучения в импульсе при измерении кинетики затухания фототока выбиралась на порядок ниже, чем при обработке (0.2 МВт/см²).

Оже-спектральный анализ относительного распределения кадмия и теллура по глубине нарушенного слоя p -CdTe проводился на образцах, подвергнутых дозе облучения $D = 8 \cdot D_0$, где $D_0 = 4 \cdot 10^{-2}$ Дж/см² при плотности мощности

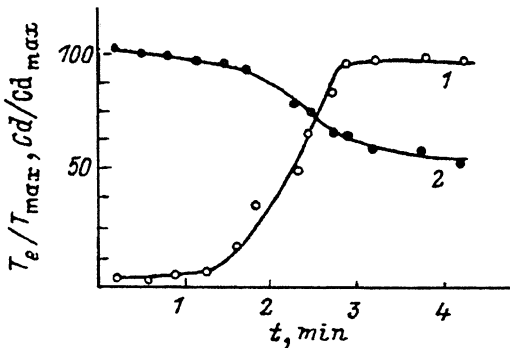


Рис. 1. Распределение относительных концентраций в нарушенном слое p -CdTe: 1 — кадмия, 2 — теллура.

одионого импульса $I_0 = 2$ МВт/см². Указанная доза облучения набиралась последовательным облучением восемью импульсами излучения рубинового лазера при комнатной температуре и соответствовала такой дозе облучения, при которой образовывалась пленка теллура на поверхности кристалла и дислокационная сетка в приповерхностном слое материала [2].

На рис. 1 представлены кривые относительных изменений оже-сигналов кадмия и теллура от времени травливания нарушенного слоя пучком ионов Ag^+ , ускоренных до энергии 4 кэВ, что обеспечивало (при давлении в камере оже-спектрометра, равном $6.7 \cdot 10^{-3}$ Па) скорость травливания около 5 нм/мин. Толщина нарушенной области образца, в которой теллур находится в избытке в виде поликристаллической пленки и нестехиометрического соединения $Cd_{1-y}Te_y$ ($y > 0.5$), составляет 12—15 нм.

В оже-спектре присутствовали также линии углерода и кислорода, интенсивности которых были малы в сравнении с интенсивностями кадмия и теллура, а их изменения не могли достоверно регистрироваться.

Спектр ФЛ исходных кристаллов CdTe при 4.2 К в экситонной области характеризовался наличием линий свободного экситона $\lambda = 776$ нм и экситонов, связанных на донорах I_2 (778.2 нм) и акцепторах I_1 (779.8 нм). Линия I_1 превышала по интенсивности линию I_2 в 50—100 раз. Она обусловлена наличием в образцах в основном неконтролируемой примеси меди в узлах кадмия [3]. Полуширина линии I_1 в исходных образцах была ~0.2 мэВ (рис. 2).

После облучения образцов двумя импульсами излучения лазера с плотностью мощности $I_0 = 2$ МВт/см² в спектре ФЛ, как правило, наблюдалось длинноволновое смещение максимумов линий связанных экситонов и их уширение. Интенсивности линий I_1 и I_2 уменьшались, более сильно падала интенсивность линии I_2 (рис. 2).

Последующее облучение образцов еще двумя импульсами приводило к образованию на поверхности слоя теллура; под которым наблюдалась сетка дислокаций (рис. 3). В спектре краевой ФЛ возникла интенсивная полоса с $\lambda = 840$ нм, а спектральное положение линии I_1 вновь соответствовало ее положению в исходных образцах при слегка увеличенной по сравнению с исходным полушириной линии.

Данные о положении и полуширине линии I_1 , полученные для четырех образцов p -CdTe по мере их облучения, приведены в таблице. Там же отмечено наличие или отсутствие после облучения полосы $\lambda = 840$ нм.

Анализ полученных результатов проведен в предположении о накоплении в результате облучения механических напряжений решетки в тонкой приповерхностной области, расположенной в плоскости [111]. Такие напряжения могут возникать при термическом нагреве в момент воздействия лазерного импульса за счет неравномерного по толщине изменения параметра решетки теллурида кадмия, причиной которого является изменение отклонения от стехиометрии,

№ образца	Количество импульсов облучения	Положение максимума, эВ	Полуширина линии I_1 , мэВ	Напряжение, кбар	Наличие полосы, 840 нм
21	9	1.5889	0.3	0	Нет
	2	1.5878	1.6	0.057	»
	4	1.5887	0.4	0	Есть
27	0	1.5891	0.3	0	Нет
	2	1.5880	0.8	0.058	Есть, слабая
	4	1.5889	0.4	0	Есть, доминирует в спектре
30	0	1.5889	0.3	0	Нет
	2	1.5878	1.7	0.058	»
	4	1.5883	1.0	0	Есть
23	0	1.5891	0.4	0	Нет
	2	1.5889	0.4	0	»
	4	1.5891	0.8	0	Есть

появление включений второй фазы или легирование (например, кислородом или углеродом).

Поскольку длинноволновое смещение максимума линии I_1 после облучения образцов 21, 27, 30 составляет величину $\Delta E = 1$ мэВ, а уширение линии при этом не превышает значения ~ 1.7 мэВ (см. таблицу), можно утверждать, что лазерное облучение приводит к неравномерному по толщине накоплению напряжений растяжения. Напряжения сжатия смещают в CdTe линии связанных экситонов в область коротких длин волн [4].

Воспользовавшись данными [5] по расщеплению линии свободного экситона в поле одноосного напряжения в плоскости [111] и полагая, что положение линии I_1 в напряженном кристалле отслеживает положение легких дырок, запишем $\Delta E = d \cdot S_{nn} \sigma / \sqrt{3}$, где d — деформационный потенциал для напряжения, приложенного в плоскости [111]; S_{nn} — деформационная константа, величина, обратная константе упругости. Для CdTe при $d = 5.1$ эВ [5], $S_{nn} = 5 \cdot 10^{-11}$ м⁻² Н [6] получим напряжение растяжения в плоскости [111] $\sigma = 0.06$ кбар.

В спектре ФЛ длинноволновое крыло линии I_1 простирается до энергий на 3—5 мэВ, отличающихся от энергии излучения I_1 в исходных образцах, не содержащих напряженных областей (рис. 2). Это указывает на то, что реально величина локальных напряжений после облучения может превышать в

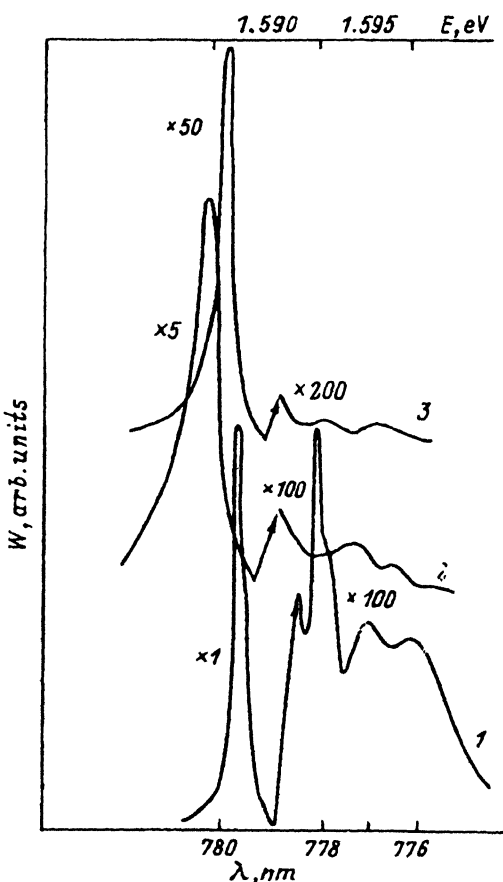


Рис. 2. Спектр экситонной фотолуминесценции CdTe при 4.2 К: 1 — исходный; 2, 3 — после облучения 2 и 4 импульсами излучения рубинового лазера при $I_0 = 2$ МВт/см².

3—5 раз величину среднего напряжения, оцененного по сдвигу максимума линии I_1 . Добавим, что в ряде случаев (например, образец 23 в таблице) импульсное облучение не приводило к сдвигу линии I_1 , а только уширяло ее, что также свидетельствует о хаотическом распределении в этом образце напряжений растяжения и сжатия.

Плотность ямок травления на исходных образцах составляла величину 10^2 см $^{-2}$. После лазерной обработки двумя импульсами происходило небольшое увеличение плотности ямок травления без образования дислокационной сетки, которая проявлялась после облучения четырьмя импульсами. При этом плотность ямок достигает величины 10^6 — 10^7 см $^{-2}$ (рис. 3).

Время жизни фотоносителей в исходном образце, определенное по затуханию быстрой составляющей фототока, составляло $1 \cdot 10^{-8}$ с. После появления дислокационной сетки в результате облучения оно уменьшилось в 1.5—2.0 раза.

Обсуждение результатов

Результаты оже-спектрального анализа показывают, что лазерное облучение приводит к образованию на поверхности CdTe пленки теллура, под которой

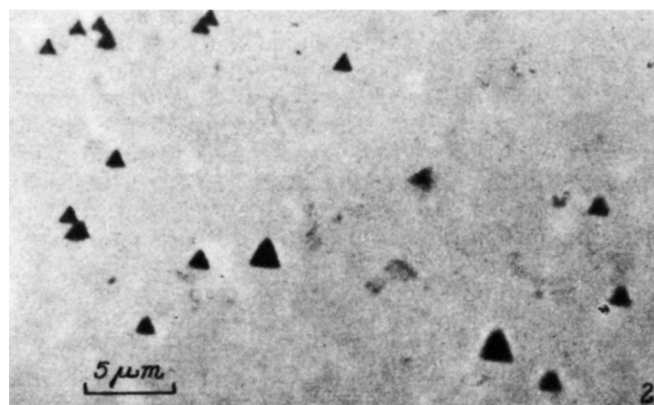
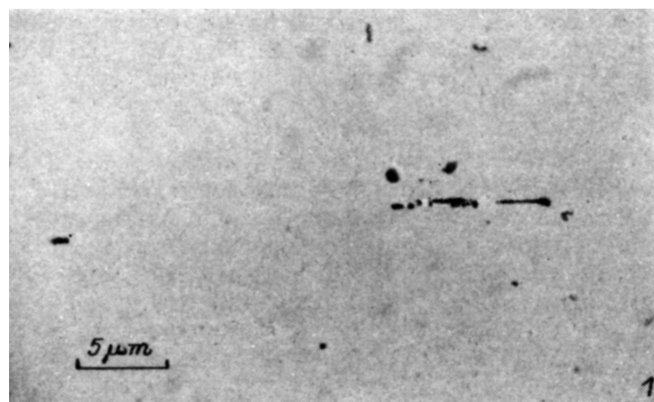


Рис. 3. Распределение дислокационных ямок травления на поверхности [111] CdTe: 1 — исходный; 2, 3 и 4 — после облучения 2, 4 и 8 импульсами излучения рубинового лазера при $I_0 = 2$ МВт/см 2 .

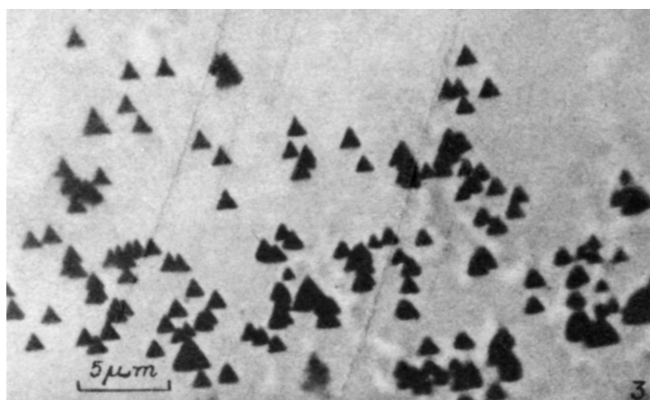


Рис. 3 (продолжение).

находится тонкий (12—15 нм) слой нестехиометрического соединения $Cd_{1-y}Te_y$ ($y > 0.5$), содержащего избыток теллура. Поскольку исходный образец был p - $CdTe$ состава, близкого к стехиометрическому, можно полагать, что в результате лазерного облучения происходил разрыв связей Cd и Te в решетке и кадмий уходил в атмосферу. Теллур же накапливался, вследствие этого на поверхности и в тонкой приповерхностной области, толщиной, много меньшей, чем толщина области поглощения света.

В этой области генерация точечных дефектов (преимущественно V_{Cd} и V_{Te}) привела к возникновению напряжений на кристаллической решетке, которые распространялись в глубь кристалла на 2—3 мкм и, при достижении критической дозы облучения, т. е. накоплении соответствующей величины напряжений, релаксировали с образованием дислокационной сетки. Промежуточным состоянием облученной области образца является состояние с возросшей плотностью хаотически распределенных по поверхности ямок травления, обусловленных либо возникновением преципитатов Te или кластеров V_{Cd} , либо появлением неупорядоченных в сетку дислокаций.

В любом случае возрастает количество безызлучательных центров рекомбинации и, как следствие этого, уменьшается время жизни фотоносителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] В. Н. Бабенцов, А. Байдуллаева, В. М. Булах и др. Поверхность. Физика, химия, механика 144 (1988).
- [2] В. В. Артамонов, М. Я. Валах, В. В. Стрельчук и др. ЖПС, 48, 990 (1988).
- [3] N. Molva, J. L. Pautrat, K. Saminadayar et al. Phys. Rev. B, 80, 3344 (1974).
- [4] L. S. Dang, J. Cibert, J. Gobii, K. Seminadayar, S. Tatarenko. Appl. Phys. Lett., 55, 235 (1989).
- [5] D. J. Thomas. Appl. Phys., 32, 2298 (1961).
- [6] D. Berlincourt, H. Jaffe, L. P. Shiozawa. Phys. Rev., 129, 1009 (1963).

Редактор В. В. Чалдышев
