

УДК 539.37 : 539.398

ПЛАСТИЧНОСТЬ ТЕЛЛУРИДА КАДМИЯ ПРИ 77 К, НАБЛЮДАЕМАЯ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫМИ МЕТОДАМИ

Н. И. Тарбаев, Г. А. Шепельский, Ю. Шрайбер¹

Методами растровой электронной микроскопии и фотолюминесценции (ФЛ) установлена пластичность монокристаллов теллурида кадмия при низкой температуре ($T \approx 77$ К), определена действующая система скольжения дислокаций при низких температурах. Обнаружена и исследована структура спектров дислокационных полос ФЛ при 4.2–77 К.

Известно, что кристаллы теллурида кадмия являются основным материалом подложек для нанесения эпитаксиальных слоев ряда твердых растворов $Cd_yHg_{1-x}Te$. Полупроводниковые приборы на основе этих слоев ввиду малости ширины запрещенной зоны работают наиболее эффективно при низких температурах. Этим обусловлен интерес к исследованиям физико-механических свойств монокристаллов теллурида кадмия при температурах жидкого азота и ниже. В частности, важно выяснить, возможна ли пластическая деформация CdTe при $T \approx 77$ К под воздействием механической нагрузки, поскольку остаточная деформация подложки может стать источником механических напряжений либо пластической деформации в функционально важных слоях полупроводникового прибора и в итоге привести к изменению его параметров.

До настоящего времени не имелось сообщений о прямых наблюдениях пластичности теллурида кадмия в диапазоне азотных температур. В работе [1] указывалось на возможность низкотемпературной пластичности на основании анализа результатов исследований фотолюминесценции CdTe при 77 К. Настоящая работа посвящена исследованию люминесцентными методами специально нелегированных объемных монокристаллов CdTe, деформированных при воздействии сосредоточенной нагрузки при 77 К. Были использованы два метода исследования дефектных областей вокруг отпечатков пирамиды Виккерса: 1) пространственно разрешающий метод растровой электронной микроскопии (РЭМ) в режиме регистрации катодолюминесценции (разрешение 1 мкм), 2) спектрально разрешающий метод наблюдения низкотемпературной фотолюминесценции (ФЛ) при зона-зонном возбуждении сфокусированным излучением гелий-неонового лазера (диаметр пучка 50 мкм).

Образцы для исследований, вырезанные перпендикулярно $\langle 111 \rangle$ в виде плоскопараллельных пластинок толщиной около 1 мм, шлифовались, полировались механически, затем химически для снятия наклепанного слоя раствором брома в метаноле. Индентирование образцов, установленных на массивном металлическом держателе и погруженных в жидкий азот, проводилось алмазной пирамидой с помощью установки ПМТ-3. Нагрузка на индентор составляла 30 Г, время воздействия индентора на поверхности образца 1 мин.

На рис. 1, а представлена микрофотография распределения интегральной катодолюминесценции (КЛ) при 77 К вокруг серии 3×3 отпечатков

¹ Университет им. Мартина Лютера. Галле, ГДР.

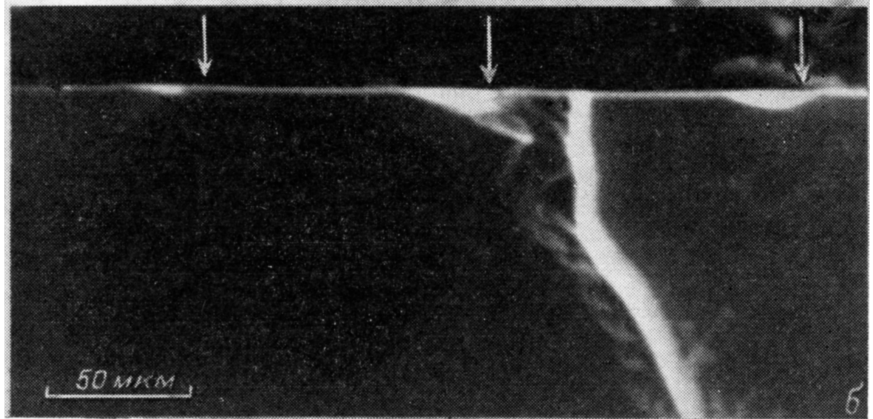
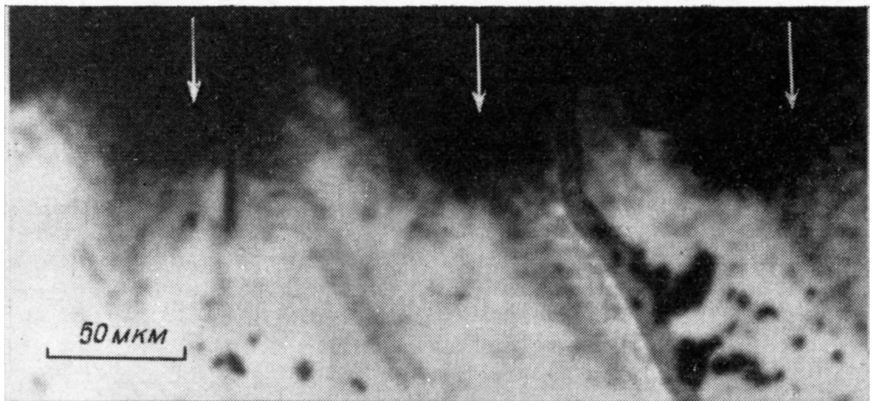
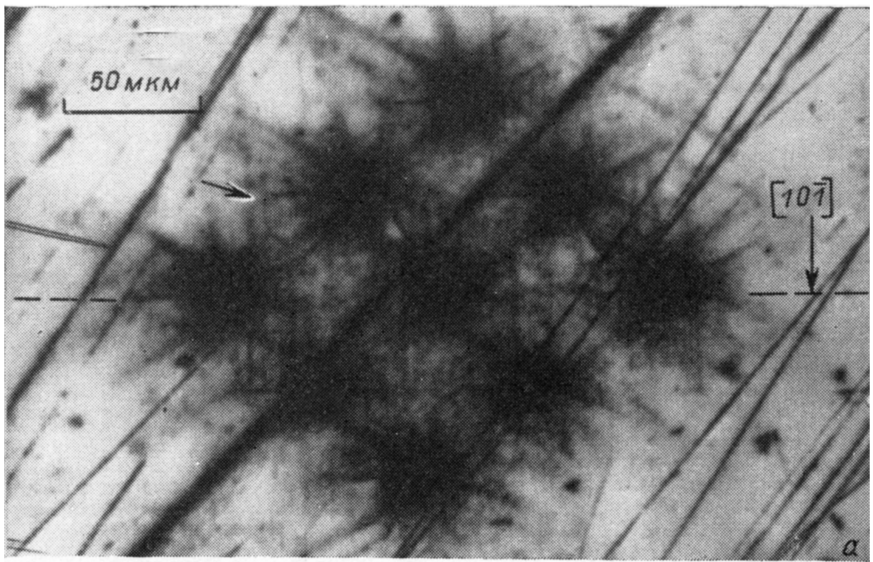


Рис. 1. РЭМ фотографии областей CdTe, индентированных при 77 К.

a — распределение КЛ на поверхности (111) при 77 К. Штрихами обозначена линия последующего раскола, стрелкой указана трещина; *б* — изображение поверхности раскола (101) во вторичных электронах (внизу) и в режиме КЛ при 77 К (вверху). Стрелки указывают направления и места индентирования; *в* — распределение КЛ при 77 К на индентированной поверхности (101).

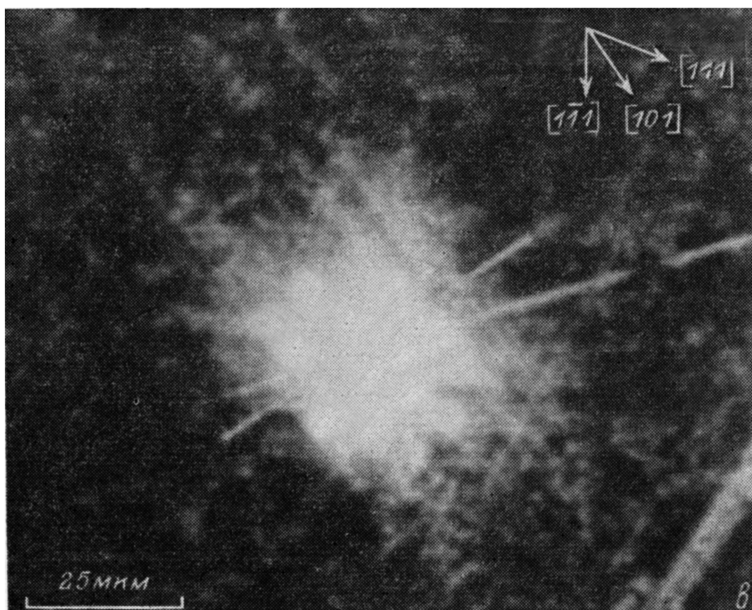


Рис. 1 (продолжение).

индентора на грани $(1\bar{1}1)$ CdTe. На фотографии отчетливо различимы лучи из темных точек, расходящиеся от каждого из отпечатков по всем трем эквивалентным направлениям типа $\langle 10\bar{1} \rangle$. Полученное пространственное распределение КЛ иллюстрирует типичную картину пластической деформации, происшедшей в области воздействия сосредоточенной нагрузки. Изображение формируется благодаря повышенному темпу безызлучательной рекомбинации возбужденных электронным пучком дырок и электронов как непосредственно в областях ядер, введенных при индентировании дислокаций, так и на точечных дефектах, генерируемых при пластической деформации. Помимо лучей скольжения дислокаций, на рис. 1, а имеются изображения микротрещин в виде непрерывных коротких резко обрывающихся темных отрезков, исходящих от краев отпечатков, лежащих в плоскостях спайности типа $\{10\bar{1}\}$.²

Для определения плоскостей скольжения, по которым развивается пластическая деформация в рассматриваемом случае, исследуемый образец был расколот по плоскости $(10\bar{1})$, проходящей через отпечатки индентора (рис. 1, а). На рис. 1, б внизу приведено изображение рельефа поверхности раскола, где заметны три отпечатка индентора и ступенька скола. Распределение КЛ того же участка скола (рис. 1, б, вверху) обнаруживает как бесструктурные области наклепа, окружающие отпечатки индентора, так и ряд лучей, состоящих из отдельных выходов дислокаций на поверхность скола — следов полос скольжения на поверхности $(10\bar{1})$. Направление лучей на рис. 1, б составляет угол 35° с нормалью к лицевой грани $(1\bar{1}1)$, что соответствует кристаллографическому направлению $[101]$, для которого этот угол должен равняться $36^\circ 16'$. Систему следов на гранях $(1\bar{1}1)$ и $(10\bar{1})$ с определенной выше ориентацией могут составить лишь наборы эквивалентных плоскостей либо $\{010\}$, либо $\{11\bar{1}\}$. Однако рассмотрение полос скольжения, полученных индентированием грани $(10\bar{1})$ (рис. 1, в), однозначно определяет, что при низкой температуре теллурид кадмия пластически деформируется только по системе скольжения $\{111\}$

² Изображения отпечатков индентора имели правильную форму при наблюдении контраста во вторичных электронах.

$\langle 10\bar{1} \rangle$. Это следует из анализа ориентации полос скольжения: два набора полос, перпендикулярных направлениям $[111]$ и $[\bar{1}\bar{1}1]$, соответствуют выходам плоскостей (111) и $(\bar{1}\bar{1}1)$ нормально к лицевой поверхности $(10\bar{1})$; набор полос вдоль $[011]$ соответствует выходам плоскостей $(\bar{1}11)$ и $(11\bar{1})$ под углом $\sim 55^\circ$ к лицевой грани.

При исследовании спектрального распределения ФЛ индетированных при 77 К образцов CdTe установлено, что областям кристалла, где прошла пластическая деформация, соответствуют особые полосы излучения (как правило, в интервале $4.2 \text{ К} < T < 77 \text{ К}$ наблюдаются две такие полосы). Эти полосы расположены вблизи края собственного поглощения и отсутствуют как в исходных кристаллах, так и в смежных недеформированных

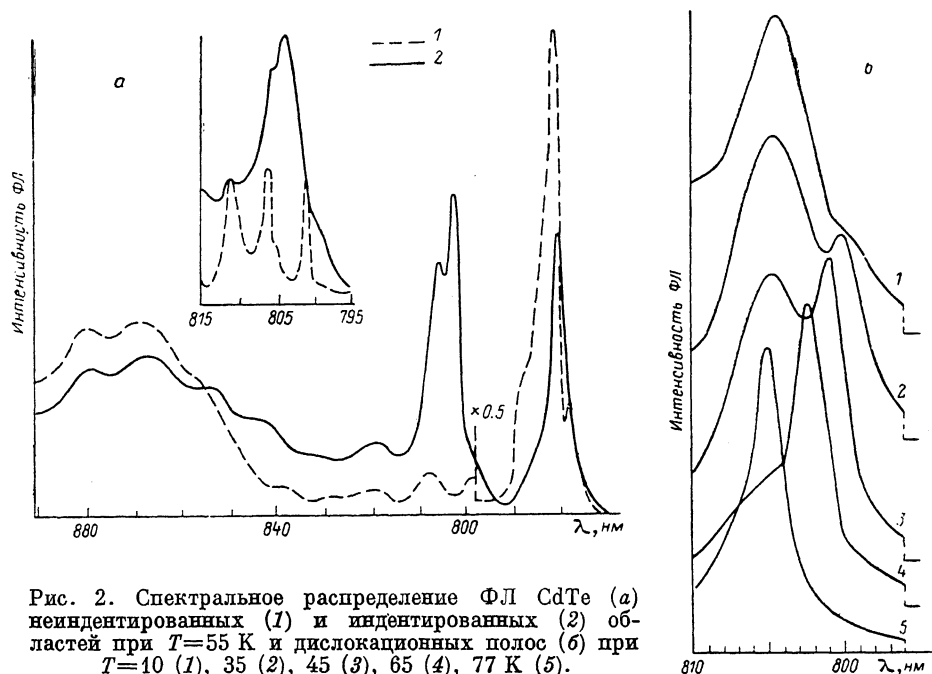


Рис. 2. Спектральное распределение ФЛ CdTe (а) неидентифицированных (1) и идентифицированных (2) областей при $T=55 \text{ К}$ и дислокационных полос (б) при $T=10$ (1), 35 (2), 45 (3), 65 (4), 77 К (5).

областях. Одновременно наблюдается гашение интенсивности исходных полос излучения (рис. 2, а). При температуре 4.2 К доминирует длинноволновая полоса 804.2 нм (1.542 эВ) (вставка к рис. 2, а). Энергетическое положение коротковолновой полосы при 4.2 К (800 нм (1.55 эВ)) ввиду ее малой интенсивности удается определить только аппроксимацией зависимости энергетического положения этой полосы из области более высоких температур, где она отчетливо проявляется. Характерной особенностью полос, связанных с областями вокруг отпечатков индентора, является их нестабильность: полная деградация (гашение) в результате выдержки образца при комнатной температуре уже в течение менее часа и отсутствие заметных изменений при низких температурах, например при 77 К.³ По ряду признаков, таких как отмеченная нестабильность, спектральное положение по отношению к краю поглощения, полуширина полосы и др., можно отнести эти полосы к аналогам так называемых дислокационных полос ФЛ, обнаруженных и исследованных впервые в кристаллах сульфида кадмия [2, 3], а несколько позднее — и в кристаллах селенида кадмия [4], пластически деформированных при низкой температуре. Эти полосы ФЛ связаны с рекомбинацией на метастабильных дефектах структуры, генерируемых движущимися дислокациями. По аналогии полосы ФЛ теллурида кадмия 1.542 и 1.55 эВ будем в дальнейшем называть также дислокационными полосами (ДП).

³ Распределение КЛ, приведенное на рис. 1, снято после деградации.

В низкотемпературных спектрах (4.2—30 К) полосы 1.542 и 1.55 эВ располагаются в области бесфононных полос краевых серий ФЛ CdTe, и поэтому ДП со своей структурой отчетливо заметны лишь на образцах с малой исходной интенсивностью ФЛ в этом спектральном диапазоне (вставка к рис. 2, а).

При повышении температуры, помимо температурного сдвига ДП из-за сужения запрещенной зоны, наблюдаются увеличение интенсивности коротковолновой полосы ДП и ослабление длинноволновой вплоть до полного исчезновения последней. При температуре 77 К наблюдается только коротковолновая полоса (рис. 2, б). Аналогичный порядок гашения полос ДП наблюдался ранее и у групп ДП в CdS и CdSe, что также является дополнительным аргументом, указывающим на единую природу дефектов, ответственных за появление ДП в спектрах ФЛ у этого ряда полупроводниковых соединений.

Таким образом, в настоящей работе прямыми наблюдениями доказана возможность низкотемпературного (77 К) пластического течения монокристаллического теллурида кадмия, установлена действующая система скольжения дислокаций при низких температурах, обнаружена и исследована структура спектров ДП ФЛ при 4.2—77 К областей кристалла, подвергнутых низкотемпературной пластической деформации.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Тарбаев Н. И., Сальков Е. А., Шепельский Г. А. // ФТП. 1988. Т. 22. № 8. С. 1428—1433.
- [2] Негрий В. Д., Осипьян Ю. А. // ФТТ. 1978. Т. 20. № 3. С. 744—752.
- [3] Гринь В. Ф., Марков Е. В., Сальков Е. А., Тарбаев Н. И., Шепельский Г. А. // ФТТ. 1978. Т. 20. № 7. С. 2188—2190.
- [4] Сальков Е. А., Тарбаев Н. И., Шепельский Г. А. // Тез. докл. V Междунар. конф. «Свойства и структура дислокаций в полупроводниках». М., 1986. С. 162.

Институт полупроводников АН УССР
Киев

Поступило в Редакцию
5 сентября 1988 г.

В окончательной редакции
13 февраля 1989 г.