

# Морфология, элементный состав и механические свойства поликристаллических слоев теллурида кадмия

© И.В. Курило<sup>¶</sup>, Г.А. Ильчук<sup>¶¶</sup>, С.В. Лукашук, И.А. Рудый, В.О. Украинец, Н.В. Чекайло

Национальный университет „Львівська політехніка“,  
79013 Львов, Украина

(Получена 16 мая 2011 г. Принята к печати 26 мая 2011 г.)

Представлены результаты исследования морфологии (размеры зерен, двойникование, акцессории роста), элементного состава и некоторых механических свойств поликристаллических слоев теллурида кадмия, осажденных на неориентирующие подложки в квазизамкнутом объеме. Установлены зависимости микротвердости от размера кристаллитов и толщины слоя. Проведены оценочные расчеты напряжений на границе раздела подложка–слой, вызванных различием значений термических коэффициентов линейного расширения.

## 1. Введение

Учитывая тенденции развития современной электронной техники, наибольший интерес для практического использования представляют не слитки, а поликристаллические слои полупроводников. По сравнению с монокристаллами и эпитаксиальными структурами получение полупроводника в виде поликристалла (слиток, слой) — более простой и более производительный технологический процесс, который не требует применения прецизионной ростовой аппаратуры и дорогих монокристаллических подложек. Все это удешевляет полупроводниковый материал и создаваемые на его основе приборы. Большой интерес к поликристаллическим слоям проявляют разработчики дешевых солнечных батарей наземного применения. Как справедливо утверждают авторы [1,2], широкое применение поликристаллических полупроводников в электронике в течение долгого времени было сильно ограничено тем, что в этих материалах существует множество протяженных дефектов, таких как границы зерен и дислокации. Однако в настоящее время изученность таких объектов возросла настолько, что их поликристалличность является скорее не проблемой, а надеждой на будущее. Границы зерен в таких полупроводниках характеризуются специфическими электрофизическими и рекомбинационными характеристиками, которые могут быть интересно реализованы в ряде приборных применений. Будучи серьезным нарушением совершенства кристаллической решетки, они играют роль эффективного внутреннего геттера, который способствует очистке объема материала от остаточных примесей и собственных точечных дефектов. Это свойство межзеренных границ играет не последнюю роль в повышении эксплуатационных характеристик, в частности, термостабильной и радиационной стойкости полупроводниковых электронных устройств [3].

Внимание многих исследователей [4,5] привлекают получение и исследование свойств слоев поликристаллического CdTe. CdTe — один из самых перспективных по-

ликристаллических материалов для создания солнечных элементов благодаря высокому коэффициенту поглощения (больше  $10^4 \text{ см}^{-1}$ ) и оптимальной энергетической щели (1.5 эВ). В работе [6] исследовали слои поли-CdTe, полученные на разных подложках физическим вакуумным осаждением, распылением и вакуумной сублимацией в закрытом реакторе. Авторы [7] исследовали слои поли-CdTe, полученные сублимацией в сверхвысоком вакууме на монокристаллические подложки Si. Интересные результаты получены в [8], где авторам удалось вырастить ориентированные (текстурированные) пленки CdTe на аморфных подложках (стекло) в резко неравновесных условиях.

В этих и ряде других работ исследованы электрические и оптические свойства слоев, которые определяют главным образом эффективность приборов на их основе. Однако далеко не последнюю роль играют механические свойства, связанные с рядом других свойств. Поскольку исследованию последних уделяется значительно меньше внимания, в настоящей статье мы представляем результаты исследований морфологии, элементного состава и некоторых механических свойств слоев поли-CdTe, осажденных на неориентирующие подложки вакуумным осаждением в квазизамкнутом объеме. В [9] отмечена важность исследования морфологии слоев CdTe в связи с сильной зависимостью эксплуатационных характеристик солнечных элементов от гетерогенности элементов, связанной со структурой и морфологией поликристаллических слоев.

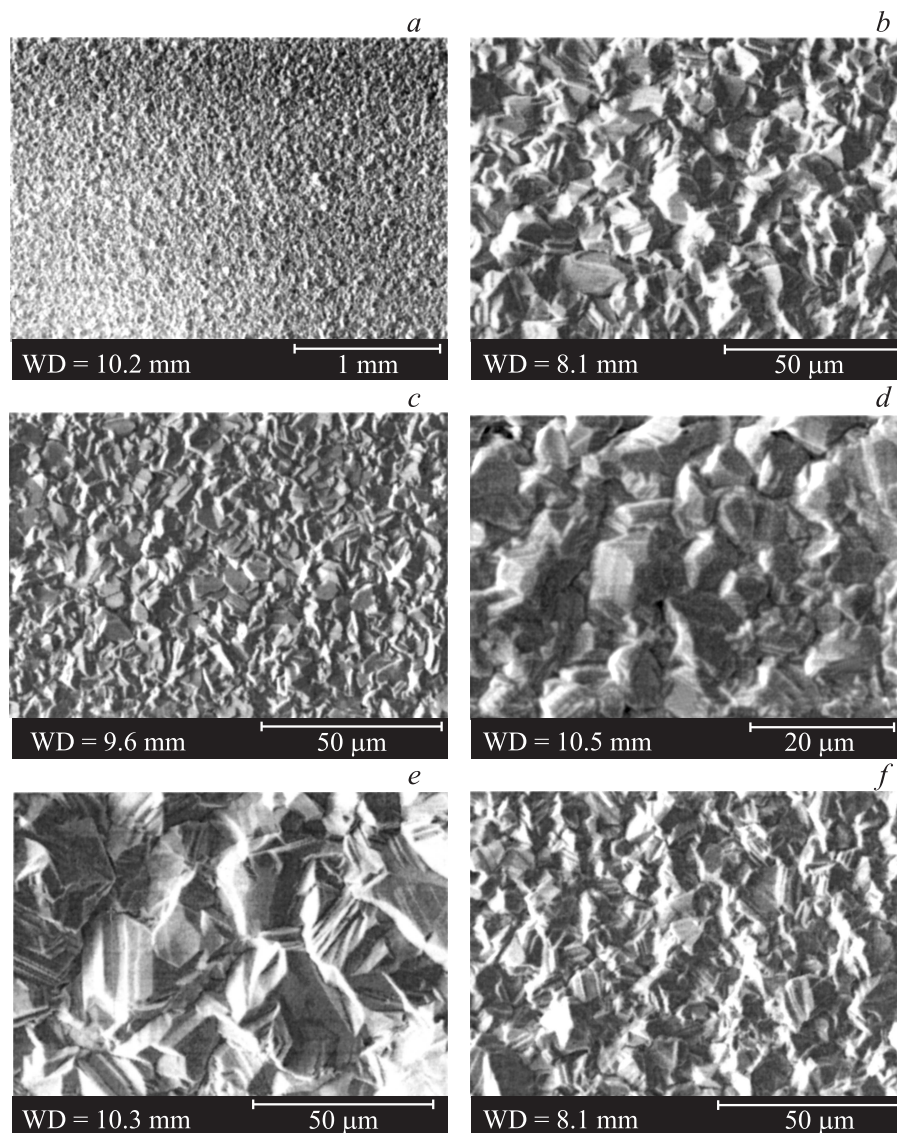
## 2. Эксперимент

### 2.1. Технология получения поликристаллических слоев

Распространенные методы получения поликристаллических пленок полупроводниковых соединений — процессы вакуумного, магнетронного и плазменного напыления. Для получения слоев поли-CdTe мы применили метод осаждения в квазизамкнутом объеме. Во избежание ориентирующего влияния подложки на осаждение

<sup>¶</sup> E-mail: kuryloiv@yahoo.com

<sup>¶¶</sup> E-mail: gilchuk@polynet.lviv.ua



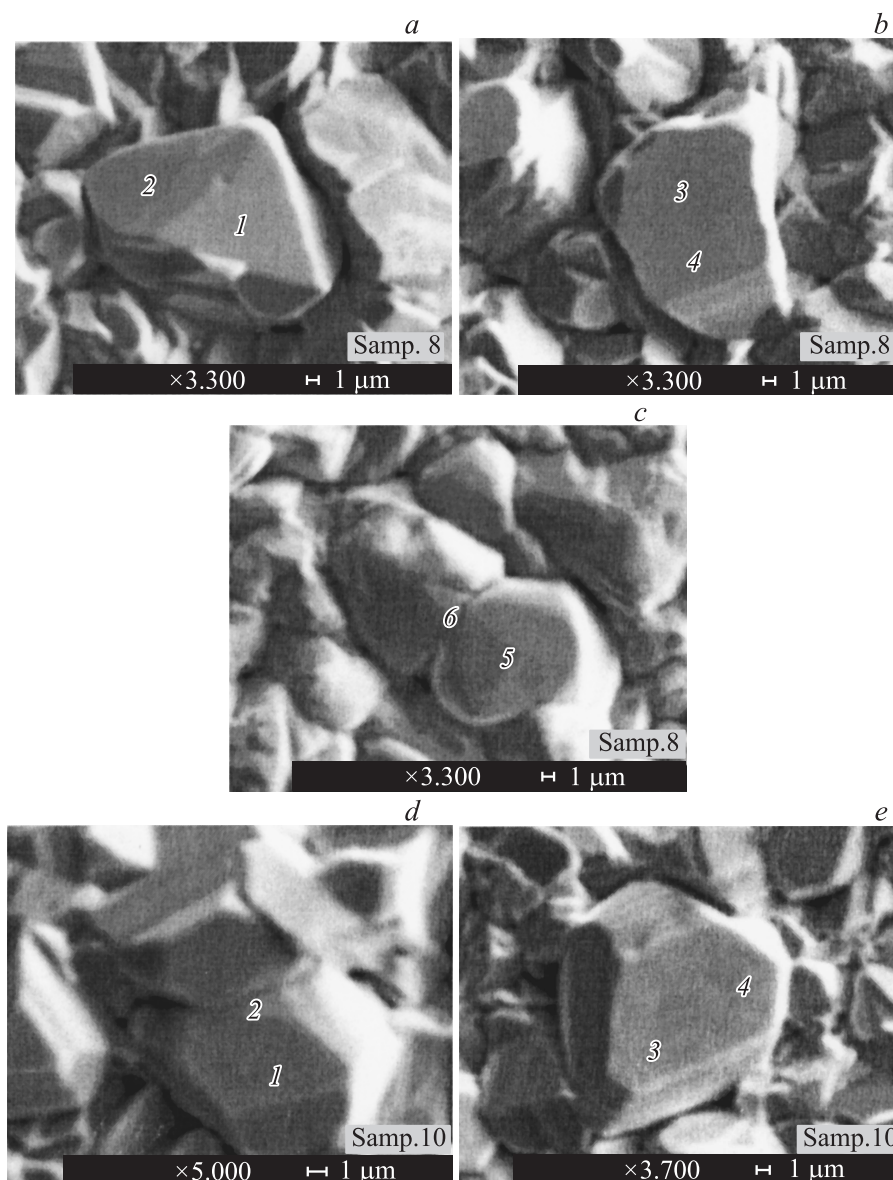
**Рис. 1.** Микрофотографии фрагментов поверхности слоев поликристаллического CdTe различной толщины (мкм): № 4 (38.52) (a), № 2 (0.76) (b), № 10 (20.06) (c), № 4 (38.52) (d), № 2 (0.76) (e), № 5 (17.99) (f). Увеличения при съемке и маркеры указаны на микрофотографиях.

слоев CdTe мы использовали аморфные подложки — стекло марки C50-1, а также стекло с нанесенным слоем ИТО. В этом случае ориентирующее влияние подложки отсутствует в результате случайного распределения центров зародышеобразования на ее поверхности. Известно, что температура подложки определяет исходное зародышеобразование. Для корректного сопоставления результатов исследований температура подложки, как и температура источника, были одинаковыми и составляли 350 и 650°C соответственно. Использование низких температур подложки приводит к высокой плотности центров зародышеобразования и слой становится сплошным при малых толщинах. Размеры и плотность зародышей обуславливают толщину, при которой слой становится сплошным. Важные параметры в диффузион-

ной теории — расстояние между источником и подложкой, состав паровой фазы, ее давление и температура источника — дают возможность независимо управлять скоростью роста.

## 2.2. Морфология

Все исследуемые слои — поликристаллические из хаотически ориентированных кристаллитов независимо от условий получения и охлаждения (рис. 1). Общий вид одного из слоев при малом увеличении представлен на рис. 1, a. Толщину слоев определяли с помощью профилометра Sloan, модель Dektak IIА (вертикальное разрешение — 5 Å). Она, при прочих равных условиях, зависит от времени осаждения. Варьированием



**Рис. 2.** Морфология фрагментов поверхности образцов 8 (*a, b, c*) и 10 (*d, e*). Цифрами обозначены участки, в которых проводили микронзондовый анализ.

времени осаждения получены слои в интервале толщин 0.76–38.52 мкм. Здесь в основном представлены результаты исследований двух групп слоев — тонких (0.76 и 0.82 мкм — в дальнейшем слои № 2 и 3) и толстых (34.58 и 20.06 мкм — слои № 8 и 10). Наблюдали как отдельные зерна с четкими межзеренными границами, так и „слияние“ отдельных зерен (рис. 2). Значительная часть кристаллитов характеризуется огранкой, другая — бесформенная. Встречаются мультиобразования — „стопки“ шестиугольных пластинок (рис. 1, *b*). На некоторых из слоев обнаружили кристаллиты в виде пластинок, чаще всего правильной формы (рис. 1, *c*). Для отдельных ограненных индивидов характерны грани гексатетраэдра, ромбододекаэдра и тригон-трететраэдра. Обнаружены такие правильные формы граней: ше-

стиугольники, прямоугольники, треугольники, трапеции (рис. 1, *d*). Довольно часто в слоях случаются сложные стростки-агрегаты, которые можно рассматривать как мульткристаллы. На всех слоях не обнаружено вициналей роста, как это наблюдали на кристаллах CdTe, выращенных методом химических транспортных реакций [10]. В местах спайности кристаллитов наблюдали вторичное зародышеобразование, которое ведет к росту сателлитных кристаллов. На отдельных кристаллитах обнаружены терасоподобные образования.

**Двойники.** Кристаллы и слои CdTe вследствие небольшого значения энергии дефекта упаковки (на порядок меньше, чем у ковалентных кристаллов) склонны к двойникованию [11,12]. Известно [13], что двойники легче образуются в процессе роста из паровой фазы, чем из

расплава. Кроме того, плотность двойниковых ламелей в слоях больше чем в  $10^5$  раз превышает плотность двойников в массивных кристаллах [14].

На микрофотографиях слоев поли-CdTe видны двойники срастания, которые различаем по наличию входных углов. Обнаружены также двойники в пределах одного зерна (см., например, рис. 1, *e, f*). Кроме того, встречаются полисинтетические двойники (двойниковые плоскости параллельны) и двойники с несколькими непараллельными плоскостями двойникования.

Установлено [12], что образование двойниковых прослоек в кристаллах CdTe вторично по сравнению с образованием границ блоков, которые являются мощными барьерами для перемещения двойниковых границ. Количество сдвойникованных кристаллов увеличивается при повышении давления переносчика в ампуле. Аналогичные зависимости получены также для ZnS — доля сдвойникованных кристаллов зависит от давления паров иода в ампуле (см. [13]). При большей концентрации переносчика перенос вещества более интенсивный и большее пересыщение его паров в зоне осаждения. Установленную закономерность с некоторой поправкой можно принять за зависимость вероятности двойникования от пересыщения.

Установлено (см. [13]), что избыток одного из компонентов увеличивает вероятность двойникования. Так, вероятность двойникования в GaAs резко растет при незначительном избытке Ga, причем небольшой избыток As предотвращает образование двойников. Увеличение избыточного As также повышает интенсивность двойникования. Там же показано, что без циклических двойников Si не становится поликристаллическим. Ввиду сходства структур Si и CdTe можно ожидать, что на ранних стадиях роста оказываются циклические двойники, которые и способствуют формированию поликристаллической структуры. Во всех выращенных нами слоях поли-CdTe наблюдаем избыток Te, а следовательно, можно полагать, что доля двойниковых кристаллитов меньше, чем в случае избытка Cd.

Известно, что кристаллы CdTe кубической модификации двойникуются по всем плоскостям  $\{111\}$ . Именно при малых толщинах преобладает кубическая модификация. Обнаружено [15], что с ростом толщины образуются двухфазные слои кубической и гексагональной модификаций, причем слои CdTe (на слюде) на начальной стадии роста состоят из двойниковых зародышей, а в процессе роста образуются первичные и вторичные двойники. Известно, что избыток Te способствует формированию кубической модификации [16]. Как будет показано далее, для всех исследованных нами слоев поли-CdTe характерно отклонение от стехиометрии именно в сторону избытка Te.

Как и точечные дефекты и дислокации, двойники являются структурными дефектами кристалла и поэтому влияют на структурно-чувствительные свойства полупроводников — время жизни носителей заряда и их подвижность. Поскольку двойникование сопровождается

другими несовершенствами кристалла, прямых результатов относительно непосредственного его влияния на электрические свойства получить трудно. Изучая распределение потенциала вдоль образца CdTe в электрическом поле, прикладываемом к его концам, авторы [17] не обнаружили резких прыжков потенциала, характерных для границы контакта двух кристаллов разной ориентации — границ зерен. В последнем случае во время измерения фотоэдс в процессе передвижения точки световой инжекции обнаружено изменение знака фотоэдс, максимальное значение которой приходится на границу раздела [18].

**Размеры зерен.** Одна из важнейших характеристик поликристаллических слоев — размеры зерен. Известно [1,19], что существенного изменения свойств поликристаллических материалов можно добиться путем изменения размеров зерен, ориентации межзеренных границ. Это в процессе роста может приводить либо к отклонениям от стехиометрии, либо к изменениям механизма сегрегации примесей. Размеры зерен определяли с помощью растрового электронного микроскопа, дополнительно — с помощью микроскопа микротвердомера ПМТ-3. Известно, что средний размер зерна зависит от температуры осаждения, состава паровой фазы, скорости кристаллизации и типа подложки. Обычно повышение температуры осаждения приводит к увеличению среднего размера зерна. Заметим, что температуры зон источника и осаждения во всех наших экспериментах составляли соответственно 650 и 350°C. Обнаружена тенденция увеличения размера зерна с увеличением толщины слоев. Таким образом, в процессе роста происходит, кроме нормального, тангенциальное разрастание зерен и „поглощение“ мелких зерен — своеобразная рекристаллизация в процессе роста. В слоях № 8 и 10 средние размеры зерен составляли приблизительно 13 и 10 мкм. О размерах зерен других слоев можно судить по рис. 1.

### 2.3. Исследование однородности по элементному составу

Для зарождения и последующего разрастания бинарных кристаллов со структурой сфалерита и вюрцита особое значение имеет стехиометрия. Элементный состав слоев и однородность по составу кристаллитов исследовали с помощью кристалл-дифракционного спектрометра WDS, установленного на электронном растровом микроскопе Jeol марки JXA-8200. Анодное напряжение составляло 15 кВ, ток пучка электронов —  $10^{-8}$  А. Диаметр пучка — около 2 мкм, что меньше средних размеров кристаллитов. Механическая и химическая обработки слоев или же напыление электропроводного слоя не проводились. Электрические заряды из поверхности слоев в процессе измерений удаляли путем заземления слоев с применением углеродной электропроводной пасты.



Концентрации элементов в толстых слоях поликристаллического CdTe

Образец	Участок анализа	Концентрации элементов					Отн. погрешность измерений $\sigma$ , %	
		C, масс.%			C, ат%			
		$C_{Cd}$	$C_{Te}$	$\Sigma_{Cd+Te}$	$C_{Cd}$	$C_{Te}$	$\sigma_{Cd}$	$\sigma_{Te}$
8	1	44.248	52.141	96.389	49.0675	50.9325	0.64	0.32
	2	46.574	44.783	91.357	54.1419	45.8581	0.62	0.32
	3	43.792	51.113	94.905	49.3065	50.6935	0.64	0.30
	4	44.049	51.072	95.121	49.4723	50.5277	0.63	0.30
10	1	47.044	54.659	101.703	49.4201	50.5799	0.61	0.29
	2	45.799	54.936	100.735	48.6233	51.3767	0.62	0.29
	3	45.255	55.597	100.852	48.0267	51.9733	0.63	0.29
	4	44.587	55.632	100.219	47.6400	52.3600	0.63	0.29

Установлено (см. таблицу), что в подавляющем большинстве случаев содержание Te в кристаллитах преобладает над содержанием Cd, что обусловлено, как это имеет место и при выращивании монокристаллов CdTe, существенной разницей парциальных давлений металла и халькогена. Характерно, что в образце 8 имеем заниженные суммарные значения концентраций основных элементов ( $\Sigma_{Cd+Te} < 100$  масс.%), тогда как в образце 10 — наоборот. Анализируемые участки анализа образцов 8 и 10 обозначены на рис. 2. По данным таблицы можно судить о степени однородности в пределах одного зерна. На примере образца 8 (участки 5 и 6 на рис. 2, c) установлено, что концентрации Te в центре кристаллита и на межзеренной границе отличаются на 0.073%, т.е. находятся в пределах точности анализа. Отметим, что на точность полученных данных относительно „локального“ содержания химических элементов в кристаллах влияют такие факторы: 1) невозможность точного обеспечения условия перпендикулярности электронного пучка к поверхности исследуемой грани зерна; 2) невозможность исключения влияния шероховатости поверхности материала и др. В наших экспериментах выполнить такое условие сложно. Это можно наблюдать на примере участка 2 на рис. 2, a — он находится на „наклоненной“ грани. Результаты анализа здесь явно занижены. Если небольшие зерна выступают над общей поверхностью, то из их открытых боковых граней получим усиленный сигнал. Такой случай наблюдали, например, на образце 10 (рис. 2, d, e). Именно методическими особенностями исследований можно объяснить противоречивые, на первый взгляд, полученные результаты.

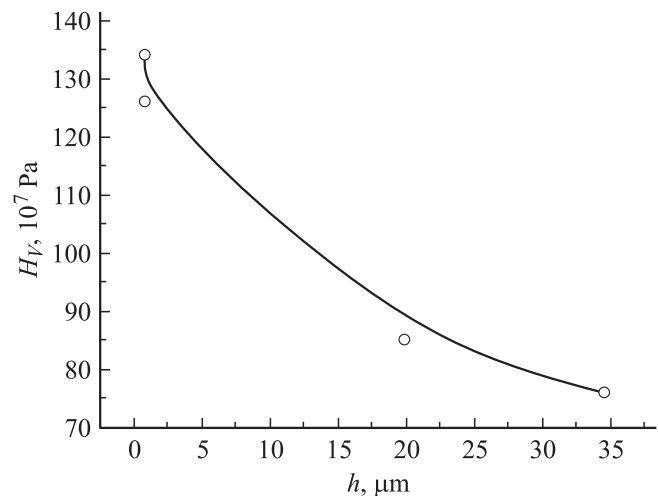
**2.4. Механические свойства**

**2.4.1. Микротвердость.** Микротвердость  $H_V$  поликристаллических слоев CdTe исследовали с помощью прибора ПМТ-3. Нагрузка  $P$  на индентор составляла 0.20 Н, что отвечает началу „горизонтальной“ части кривой  $H_V-P$ . Времена нагрузки, статического действия нагрузки и снятия нагрузки составляли по 10 с соответственно. Время статического действия выбирали с

учетом явления ползучести в этом материале, обнаруженного в [20,21]. Во избежание проявления эффекта поверхностной фотопластификации в CdTe, обнаруженного в [22], исследование проведено при одинаковом слабом освещении. Кроме того, поскольку возможно влияние адсорбируемых слоев влаги на микротвердость CdTe [22], исследование проведено при одинаковой влажности воздуха в лаборатории.

Поскольку размеры диагоналей отпечатков индентора при „рабочих“ нагрузках (0.20 Н) составляли приблизительно 20–25 мкм, для измерений выбирали преимущественно кристаллиты, размеры которых превышали эти значения. Таким образом устраняли влияние „краевых эффектов“ на результаты измерений. Если же индентировать микроагрегаты из нескольких зерен, то трудно учесть вклад в значение микротвердости границ зерен (получим завышенные значения).

Ввиду того что глубина индентирования  $h$  с использованием пирамидки Виккерса ( $h = d/7$ ,  $d$  — размер диагонали отпечатка) составляет 3–3.5 мкм, корректными



**Рис. 3.** Зависимость микротвердости образцов поликристаллического CdTe от толщины слоя при нагрузке на индентор 0.05 Н.

следует считать значения микротвердости для толстых слоев (№ 8 и 10), при индентировании которых исключается прокол слоев и в процесс внедрения не вовлекаются слои более твердой подложки. Сравнить значения микротвердостей всех исследуемых здесь слоев (толстых и тонких) можно только при малых нагрузках на индентор (в нашем случае — 0.05 Н), когда тонкие слои еще не прокалываются индентором (рис. 3). Однако в этом случае получим „кажущиеся“ (сильно завышенные) значения микротвердости, которые не отвечают рабочей нагрузке (нагрузочные кривые микротвердости  $H_V - P$  резко спадают в интервале малых нагрузок и выходят на „насыщение“ при нагрузках, которые превышают 0.20 Н). Заметим, что для тонких слоев следует также учитывать влияние напряжений на границе раздела, вызванных разницей значений термических коэффициентов линейного расширения материалов слоя и подложки, а также наличием „оборванных“ связей на границе раздела вследствие сопряжения материалов с совершенно различной структурой (кристаллическая—аморфная).

Значение микротвердости ( $P = 0.20$  Н) образца 8 составляет  $73.3 \cdot 10^7$  Па (толщина слоя 34.58 мкм), образца 10 —  $88.7 \cdot 10^7$  Па (толщина слоя 20.06 мкм). Следовательно, с увеличением толщины слоев значение микротвердости уменьшается (меньшее влияние напряжений на границе раздела). Для сравнения заметим, что усредненное значение микротвердости монокристаллов CdTe, по данным различных авторов (в том числе и наших), составляет приблизительно  $50 \cdot 10^7$  Па (учтена анизотропия микротвердости II рода). Следовательно, упрочнение в случае поликристаллических образцов 8 и 10 составляет соответственно 47 и 77%.

Зависимость микротвердости от толщины слоя  $H_V - h$ , полученная при  $P = 0.05$  Н (рис. 3), также свидетельствует об уменьшении кажущейся микротвердости с увеличением толщины слоя. Видно, что в случае толстых слоев различия в значениях микротвердости небольшие. Это можно объяснить уменьшающимся влиянием напряжений на границе раздела слой—подложка по мере удаления от границы раздела.

Заметим, что в отличие от монокристаллов CdTe со значительной долей ионной составляющей в химической связи (около 67%) в слоях поли-CdTe не обнаружено микротрещин. Скорее всего, это связано с релаксацией упругих напряжений по „стокам“ — границам зерен.

Согласно дислокационной теории закрепления дислокаций, предел текучести материала обратно пропорционален корню квадратному из среднего размера зерна (соотношение Холла—Петча):

$$\sigma_y = \sigma_0 + Ad^{-1/2},$$

где  $\sigma_0$  — напряжение трения решетки,  $d$  — средний диаметр зерна,  $A$  — постоянная. Из экспериментальной зависимости  $\sigma_y(d^{-1/2})$  следует, что  $\sigma_0 = 37.7$  МПа и  $A = 1.65 \cdot 10^3$  Н/м<sup>3/2</sup> [23]. Для образцов с размером зерен 60.4 и 38.1 мкм значения предела текучести составляют соответственно 60.8 и 63.4 МПа. Поскольку,

как известно, предел текучести слабо зависит от концентрации естественных точечных дефектов, можно считать влияние размеров зерен преобладающим.

Согласно [22], усредненное по многим измерениям значение предела текучести монокристаллов CdTe, определенное методом одноосного сжатия (скорость сжатия  $1.22 \cdot 10^{-5}$  с<sup>-1</sup>), составляет  $3.8 \cdot 10^7$ ,  $2.1 \cdot 10^7$  и  $1.1 \cdot 10^7$  Па для направлений  $\langle 100 \rangle$ ,  $\langle 111 \rangle$  и  $\langle 110 \rangle$  соответственно. Усредненное значение —  $2.33 \cdot 10^7$  Па. Там же получено значение предела текучести поликристаллических массивных образцов CdTe —  $5 \cdot 10^7$  Па. Заметим, что в [24] получено значение этого параметра приблизительно  $3 \cdot 10^7$  Па.

Поскольку для слоев на подложках нельзя провести прямые эксперименты по определению предела текучести, воспользуемся известным соотношением между микротвердостью и пределом текучести  $\sigma_y = \omega H$ . Для кристаллов CdTe, согласно [21],  $\omega = 0.05 - 0.06$ . Здесь рассматриваем толстые слои, для которых глубина индентирования значительно меньше толщины. С учетом приведенных выше значений микротвердости образцов 8 и 10 получим следующие значения предела текучести:  $\sigma_y$ (образец 8, усредненный размер зерен 10 мкм) =  $4.03 \cdot 10^7$  Па;  $\sigma_y$ (образец 10, усредненный размер зерен 13 мкм) =  $4.88 \cdot 10^7$  Па. Выявленное отклонение от соотношения Холла—Петча связано с методическими трудностями измерений микротвердости сложных поликристаллических агрегатов. Заметим, что при измерении микротвердости в центральной части сравнительно большого кристаллита в процесс индентирования вовлекается один кристаллит. Однако такой кристаллит-монокристалл не изолирован, а испытывает влияние соседних кристаллитов и межзеренных границ. Встречаются значительные трудности получения и измерения четких и неискаженных отпечатков, которые охватывают непланарный агрегат из нескольких мелких кристаллитов. В этом случае получаем сильно искаженные отпечатки. Учесть различные методические затруднения при измерении таких сложных объектов весьма проблематично.

**2.4.2. Термические напряжения.** При наращивании слоев на разного рода подложки на границе контакта возникают напряжения, вызванные разницей значений термических коэффициентов линейного расширения и несоответствием параметров решетки в паре подложка—слой. Поскольку здесь имеем дело со слоями, осажденными на аморфные подложки, оценить несоответствие не представляется возможным. Поэтому здесь оценим лишь значения напряжений, вызванных первым фактором. Заметим, что в большинстве реальных пар подложка (монокристалл)—слой напряжения, вызванные вторым фактором, в несколько раз превышают напряжения, вызванные первым фактором. Однако при высоких температурах такие напряжения в значительной мере релаксируют в процессе осаждения с образованием дислокаций несоответствия. Заметим, что термин „дис-

локации несоответствия“ здесь весьма условен, так как структура подложки не кристаллическая, а аморфная.

Термические напряжения в гетероструктурах определяются известной формулой:

$$\sigma_{\Delta\alpha} = \frac{E_f \Delta\alpha \Delta T}{1 - \nu_f}.$$

Здесь  $E_f$  и  $\nu_f$  — модуль Юнга и коэффициент Пуассона материала слоя соответственно,  $\Delta\alpha$  — разница значений термических коэффициентов линейного расширения,  $\Delta T$  — интервал температур (температура роста — температура системы после охлаждения).

Для вычислений использованы такие значения величин:  $E_f = 3.77 \cdot 10^{10}$  Па [25];  $\nu_f = 0.41$  (по данным разных авторов);  $\alpha(\text{CdTe}) = 4.9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  [26];  $\alpha'(\text{ITO}) = 10.2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  [27] и  $\alpha'' = 37.8 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$  [28];  $\alpha(\text{стекла C50-1 (из фотопластин)}) = 5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  [29].

Напряжения на границе подложка ИТО—слой (значения  $\sigma'_{\Delta\alpha}$  и  $\sigma''_{\Delta\alpha}$  соответствуют двум разным значениям  $\alpha(\text{ITO})$  —  $\alpha'$  и  $\alpha''$ ) составляют:  $\sigma'_{\Delta\alpha} = +11.18 \cdot 10^7$  Па;  $\sigma''_{\Delta\alpha} = -2.36 \cdot 10^7$  Па. Напряжение на границе подложка (стекло)—слой  $\sigma_{\Delta\alpha} = 0.21 \cdot 10^7$  Па. Следовательно, напряжения на границе раздела подложка—слой значительно больше для пары ИТО—слой. В связи с неоднозначностью значения  $\alpha(\text{ITO})$  получили неоднозначный результат касательно значений напряжений как по величине, так и по знаку. Однозначно можно утверждать, что в случае пары (поли-CdTe—стекло) слой CdTe находится в состоянии растяжения.

Рассчитанные значения напряжений на границе раздела пары стекло—слой приблизительно в 11 раз меньше значений предела текучести материала слоя. Кроме того, большее значение  $\sigma_y$  в случае массивного образца поли-CdTe по сравнению с пленочным связано с более интенсивными процессами релаксации механических напряжений в слоях CdTe вследствие небольшой толщины слоев.

### 3. Заключение

Независимо от условий получения и охлаждения получены поликристаллические слои теллурида кадмия из хаотически ориентированных кристаллитов. Толщина слоев в интервале 0.76—38.52 мкм. Выявлены двойники срастания, полисинтетические двойники и двойники с несколькими непараллельными плоскостями двойникования. Прослеживается связь между двойникованием и отклонением от стехиометрии.

Установлена тенденция увеличения размера зерна с увеличением толщины слоев.

В подавляющем большинстве случаев содержание Te в кристаллитах CdTe преобладает над содержанием Cd, что обусловлено существенной разницей парциальных давлений металла и халькогена.

Установлена зависимость микротвердости толстых слоев поли-CdTe от их толщины —  $73.3 \cdot 10^7$  Па

(34.58 мкм) и  $88.7 \cdot 10^7$  Па (20.06 мкм). Упрочнения этих слоев по сравнению с монокристаллами CdTe составляют соответственно 47 и 77%.

Определить значения микротвердости для тонких слоев не представляется возможным вследствие прокола слоя и частичного внедрения индентора в слои более твердой подложки. Кажущееся отклонение от соотношения Холла—Птеча связано с методическими особенностями измерения микротвердости сложных поликристаллических агрегатов.

Оценены значения напряжений на границе раздела слой—подложка, вызванных разностью термических коэффициентов линейного расширения. Напряжения на границе слой—ИТО значительно больше, чем в случае пары слой—стекло ( $11.18 \cdot 10^7$  и  $0.21 \cdot 10^7$  Па соответственно).

### Список литературы

- [1] С.А. Медведев, Ю.В. Клевков, С.А. Колосов, В.С. Кривонок, А.Ф. Плотников. ФТП, **36** (8), 937 (2002).
- [2] S. Pizzini, N. Butta, M. Acciary, M. Acciarri. Springer Proc. in Phys., **54**, 178 (1991).
- [3] М.Г. Мильвидский. *Полупроводниковые материалы в современной электронике* (М., Наука, 1986).
- [4] E.R. Shaaban, N. Afify, A. El-Taher. J. Alloys Comp., **482**, 400 (2009).
- [5] J. Luschnitz, B. Siepchen, J. Schaffner, K. Lakus-Wollny, G. Haindl, A. Klein, W. Jaegermann. Thin Sol. Films, **517**, 2125 (2009).
- [6] H.R. Moutinho, F.S. Hasoon, F. Abulfotuh, L.L. Kazmerski. J. Vac. Sci. Technol. A **13** (6), 2877 (1995).
- [7] Jui-Hsiang Pei, C.M. Lin, Der-San Chuu. Chinese J. Phys., **36** (1), 44 (1998).
- [8] А.П. Беляев, В.П. Рубец, И.П. Калинин. ЖТФ, **71** (4), 133 (2001).
- [9] Youn-Ok Choia, Nam-Hoon Kim, Ju-Sun Parka, Woo-Sun Leea. Mater. Sci. Eng. B, **171**, 73 (2010).
- [10] Ю.Г. Ахроменко, С.Н. Бекеша, Г.А. Ильчук, И.В. Курило, С.П. Павлишин. Физ. электроника, **29**, 51 (1984).
- [11] I.V. Kurilo, I.O. Rudyi, I.Ye. Lopatynskiy, I.S. Virt, P. Sagan, J. Zawislak, M. Kuzma. Phys. Chem. Sol. St., **5** (4), 715 (2004).
- [12] И.В. Курило, В.И. Кучма. Изв. АН СССР. Неорг. матер., **18** (4), 569 (1982).
- [13] С.А. Строителев. *Кристаллохимический аспект технологии полупроводников* (Новосибирск, Наука, 1976).
- [14] С.А. Дворецкий, В.И. Бударных, А.К. Гутаковский, В.Ю. Карасев, Н.А. Киселев, И.В. Сабина, Ю.Г. Сидоров, С.И. Стенин. Докл. АН СССР, **304** (3), 604 (1989).
- [15] И.В. Потыкевич, И.В. Завалин, В.П. Клочков, А.И. Филлипова. Физ. электроника, **8**, 45 (1974).
- [16] Л.С. Палатник, Б.Т. Бойко, В.К. Сорокин, В.Е. Виноградов. Изв. АН СССР. Неорг. матер., **7** (7), 1132 (1971).
- [17] F.A. Kröger, de Nobel. J. Electron., **1** (2), 190 (1955).
- [18] H.F. Mataré. *Defect electronics in semiconductors* (Wiley-Interscience, N.Y., a.o. 1971).
- [19] W. Schröter, I. Kronewitz, U. Gnauert, F. Riedel, M. Seibt. Phys. Rev. B, **52** (13), 726 (1995).

- [20] И.В. Курило, И.М. Спитковский, А.Д. Шнейдер. Укр. физ. журн., **19** (4), 651 (1974).
- [21] И.В. Курило. Укр. физ. журн., **23** (4), 635 (1978).
- [22] И.В. Курило, В.П. Алёхин, С.И. Булычев. *Физико-механические свойства теллуридов кадмия, ртути и их твердых растворов*. Препринт АН СССР. Ин-т металлургии им. А.А. Байкова (М., 1982).
- [23] F. Buch, C.N. Ahlquist. *J. Mater. Sci. Eng.*, **13** (2), 194 (1974).
- [24] E.Y. Gutmanas, N. Travitzky, V. Plitt, P. Haasen. *Scripta Metal.*, **4**, 293 (1979).
- [25] I.V. Kurilo, V.P. Alekhin, I.O. Rudyi, S.I. Bulychev, L.I. Osyshin. *Phys. Status Solidi A*, **163** (1), 47 (1997).
- [26] *Landolt-Börnstein, New Series*. Vol. 17/b *Semiconductors: Physics of II–VI and I–VII Compounds*, ed. O. Madelung (Berlin, Springer, 1982).
- [27] D.G. Neerincx, T.J. Vink. *Thin Sol. Films*, **278** (1–2), 12 (1996).
- [28] D. Bhattacharyya, M.J. Capter. *Thin Sol. Films*, **288** (1–2), 176 (1996).
- [29] Е.А. Коленко. *Технология лабораторного эксперимента*. Справочник (СПб., Политехника, 1994).

Редактор Т.А. Полянская

## Morphology, elemental composition and mechanical properties of polycrystalline layers of cadmium telluride

*I.V. Kurilo, H.A. Ilchuk, S.V. Lukashuk, I.O. Rudyi, V.O. Ukrainets, M.V. Chekaylo*

Lviv Polytechnic National University,  
79013 Lviv, Ukraine

**Abstract** The results of studies of the morphology (grain size, twinning, growth characteristic feature), elemental composition and some mechanical properties of polycrystalline layers of cadmium telluride deposited onto the unoriented substrates are presented. The dependences of microhardness on the crystallite size and thickness were obtained. A stresses at the interface between the substrate — a layer caused by the difference in the values of the thermal coefficients of linear expansion were calculated.