

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРУЮЩЕЙ ПРИМЕСИ НА ОБРАЗОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ДЕФЕКТОВ В CdTe, ОБЛУЧЕННОМ ЭЛЕКТРОНАМИ И ИОНАМИ

© Ю.Ю. Логинов, П.Д. Браун*, К.Дж. Хамфрейс*

Красноярский государственный университет,

660062 Красноярск, Россия

*Кембриджский университет, Кембридж, Великобритания

(Поступила в Редакцию 24 февраля 1995 г.)

В окончательной редакции 10 ноября 1995 г.)

Методами просвечивающей (ПЭМ) высокоразрешающей электронной микроскопии (ВРЭМ), а также слабого пучка исследовано влияние легирующей примеси Cu, P, In и Cl на образование структурных дефектов в CdTe, облученном ионами Ag^+ и I^+ с энергиями 3–5 keV, а также электронами с энергией 400 keV. Обнаружено, что в легированных образцах кроме «обычных» дислокационных петель формируются пластинчатые выделения, которые по данным анализа муарового контраста представляют собой соединения типа примесь–Cd в CdTe(P) и примесь–Te в CdTe(In, Cu).

Актуальность изучения поведения примесей в CdTe обусловлена широким его применением в производстве оптоэлектронных приборов, детекторов ионизирующих излучений, модулей солнечных элементов [1]. CdTe является также базовым материалом для производства таких соединений, как CdHgTe, CdZnTe и CdMnTe, служит основой для выращивания многих эпитаксиальных пленок и сверхструктур [2].

Известно, что облучение CdTe электронами с энергиями выше порога образования пар Френкеля ($E > E_{th}$) [3–5], а также с подпороговыми энергиями ($E < E_{th}$) [6,7] сопровождается формированием мелких дислокационных петель и пор. Ионное травление CdTe ионами Ag^+ и I^+ также вызывает образование мелких дислокационных петель с большой плотностью [7,8].

Интерес к изучению взаимодействия примесей и точечных дефектов, генерируемых в процессе облучения, влияния легирования на процессы образования структурных дефектов в облученном ионами и электронами CdTe определяется с точки зрения фундаментальных вопросов, а также принципиальной возможностью инверсии типа проводимости в полупроводниках A_2B_6 под воздействием ионов низких энергий [9–11] и электронов [12] с последующим формированием p - n -переходов нетрадиционными методом.

Целью данной работы являлось исследование влияния легирующей примеси (In, Cu, P, Cl) на процессы дефектообразования в p - и n -CdTe при ионном травлении ионами Ag^+ , I^+ и облучении электронами, а также установление природы примесных образований.

1. Экспериментальная часть

Эксперименты проводились с CdTe, легированным индием (n -тип; $\rho = 10 \Omega \cdot \text{cm}$), фосфором (p -тип; $\rho = 80$ и $800 \Omega \cdot \text{cm}$), медью (p -тип; $\rho = 80 \Omega \cdot \text{cm}$) и хлором (p -тип; $\rho = 4 \cdot 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$), а также с нелегированным CdTe ($\rho \cong 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$).

Образцы для электронно-микроскопических исследований утончались вначале механически, затем химически в стандартном растворе брома-метанола, а затем обычным методом ионного травления ионами Ag^+ с заключительным травлением ионами I^+ на конечной стадии приготовления образцов [8]. Облучение ионами Ag^+ проводилось на установке ионного травления DUAL ION MILL-600 с энергией ионов 4–5 keV и токе 0.5 mA (токи пучков 10–30 μA), а ионами I^+ — с энергией 3 keV и токе 0.5 mA (токи пучков 5–6 μA) на установке «ION TECH» в течение 10–15 min. Для полного устранения поверхностных дефектов, образующихся в результате ионного травления, в необходимых случаях тонкую фольгу подвергали химической полировке в течение 2–3 s в слабом растворе брома-метанола.

Облучение электронами с энергией 400 keV проводилось in situ в колонне электронного микроскопа JEM-4000 EX 11 при плотности тока электронного пучка 9.4 A/cm^2 ($6 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Ток измеряли при помощи цилиндра Фарадея. Расчет температуры нагрева образцов электронным пучком и экспериментальную оценку этого эффекта проводили ранее для энергий электронов 100 keV в [6], где было показано, что при данных условиях облучения нагрев является несущественным. В обоих случаях облучали тонкую фольгу, приготовленную для исследований в электронном микроскопе.

Электронно-микроскопические исследования проводились на приборах JEM-100CX и JEM-4000 EX 11.

2. Результаты и обсуждение

1) Э л е к т р о н ы. Облучение CdTe электронами сопровождается прежде всего образованием мелких дислокационных петель (рис. 1) и пор (рис. 2). Шриховой линией на рис. 1,а обозначена граница облученной и необлученной областей CdTe. Из анализа изображения дислокационных петель на снимках, полученных с высоким разрешением, следует, что дислокационные петли расположены в плоскостях $\{112\}$ и $\{111\}$ с векторами Бюргерса $\mathbf{b} = a/2\langle 110 \rangle$ и $a/3\langle 111 \rangle$ соответственно. Формирование пор в облученном электронами CdTe ранее обсуждалось в работах [6,7]. Кроме указанных дефектов в облученных кристаллах образуются пластинчатые выделения с характерным контрастом полос муара (рис. 1–3).

Причиной муарового контраста является разориентация решеток матрицы и выделения. Согласно [13], период муарового контраста D , возникающий при повороте решеток с параметрами межплоскостных расстояний d_1 и d_2 на угол α , может быть определен из формул

$$D = d_1 d_2 / (d_1^2 + d_2^2 - 2d_1 d_2 \cos \alpha)^{1/2} \quad (1)$$

или

$$D = d_1 d_2 / (d_1 - d_2), \quad \alpha = 0. \quad (2)$$

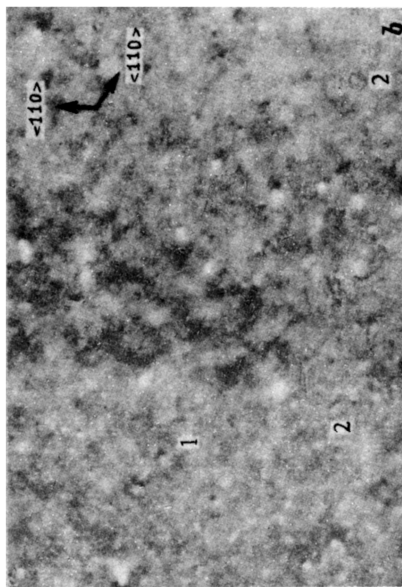
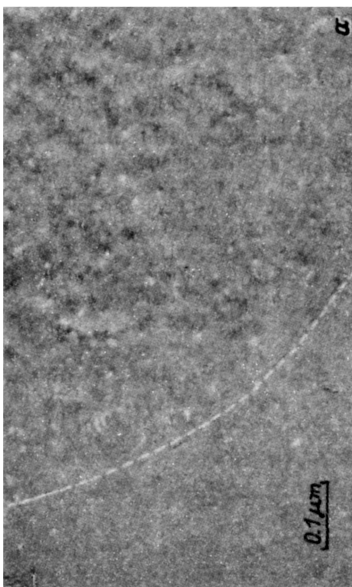


Рис. 1. Образование мелких дислокационных петель и частиц выделений CdTe в $\text{CdTe}(\text{Cl})$, облученном электронами с энергией 400 keV в течение 45 min. Ориентация фольги $\{111\}$. Изображение в слабом пучке. *a* — граница облученной области, *b* — выделения 1 и 2.

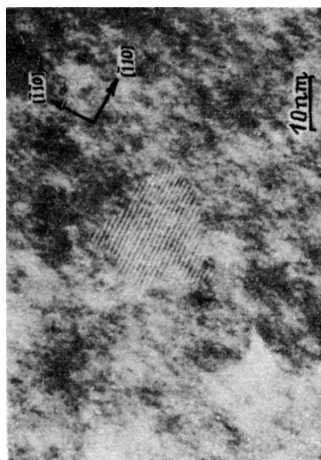
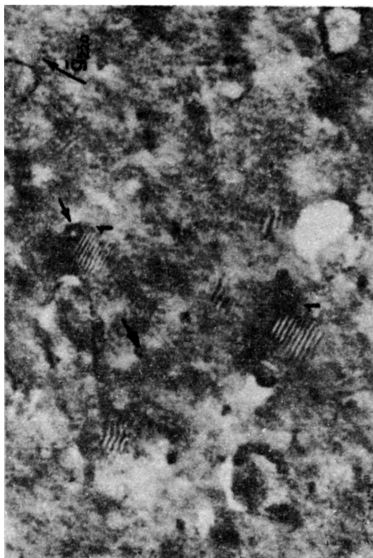


Рис. 2. Образование пластинчатых выделений Cu_2Te (1) и пор (отмечено стрелками) в $\text{CdTe}(\text{Cu})$, облученном электронами в течение 45 min. Ориентация фольги (001). Изображение в слабом пучке.

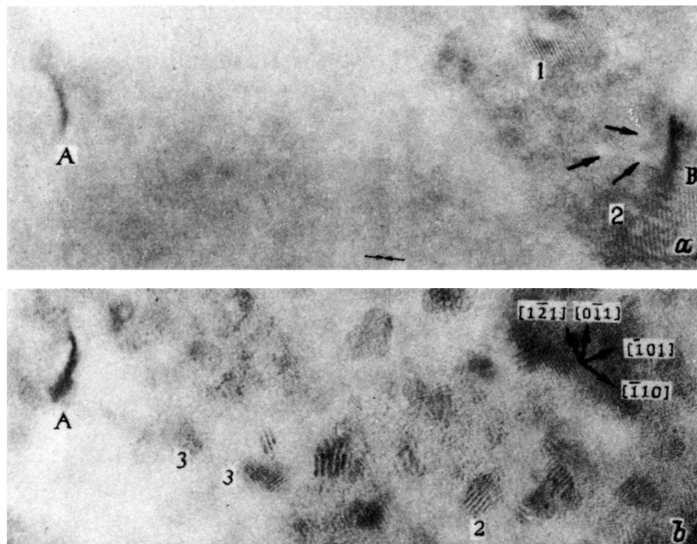


Рис. 3. ВРЭМ-снимки CdTe(In), облученного электронами вдоль направления $\langle 111 \rangle$.

Время облучения (min): а — 5, б — 35.

Используя эти формулы, зная межплоскостные расстояния d_{hkl} CdTe для определенных плоскостей отражения, соответствующих векторам дифракции g_{hkl} , а также экспериментально измеренные периоды D_i , можно рассчитать межплоскостные расстояния d_{hkl} кристаллической решетки выделения. Расчетные и табличные данные таких величин приведены в таблице.

На рис. 1, б показаны два типа выделений (обозначены цифрами 1 и 2) с периодами муарового контраста $D1 = 1.32 \text{ nm}$ и $D2 = 2.6 \text{ nm}$, образующихся в CdTe, легированном хлором. Из таблицы следует, что выделениям 1 могут соответствовать с наибольшей вероятностью частицы CdTe (гексаг.), а выделениям 2 — CdTe (гексаг. или тетраг.).

Облучение электронами CdTe, легированного медью, сопровождается формированием большого числа выделений с периодами $D_{1220} = 0.92 \text{ nm}$ и $D_{2200} = 7.37 \text{ nm}$, а также мелких пор (рис. 2). Образование выделений с периодом $D2$ не показано на снимке. Из таблицы следует, что выделениям 1 с периодом 0.92 nm может соответствовать фаза Cu_2Te (кубич.) или CuTe (гексаг.), а выделениям 2 — соединение CuTe (гексаг.) или $\text{Cu}_{1.44}\text{Te}$ (орторомб.). В предположении, что кристаллическая решетка выделения имеет кубическую структуру, можно также идентифицировать выделения 2 как Cu_2Te . Оценка числа атомов в пластинчатых выделениях, показанных на рис. 2, дает величину $3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, что соответствует порядку концентрации меди в CdTe(Cu).

Формирование примесных выделений в CdTe, легированном индием, было изучено для серии электронно-микроскопических снимков, полученных с высоким разрешением (ВРЭМ-снимки), при облучении CdTe(In) вдоль различных кристаллографических направлений ($\langle 111 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ и $\langle 112 \rangle$), что также позволяло провести более комплексный анализ возможного рода образований (см. таблицу и рис. 3).

Экспериментальные значения периода муарового контраста D и сравнение расчетных d_x и известных d величин межплоскостных расстояний и параметров решетки a_x , a (значения a_x рассчитаны в предположении кубической решетки выделения)

Номер рисунка	Данные настоящей работы			Литературные данные [14]				
	D, nm	hkl	d_x, nm	d, nm	Соединение	Тип решетки	hkl	Относительная интенсивность $I/I_0, \%$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
CdTe(Cl); {111}								
1, b	1.32	220	0.195	0.193	CdTe	Тетраг.	211	50
				0.1995	CdTe	Гексаг.	112	75
	2.60	220	0.21	0.203	CdTe	Тетраг.	220	100
				0.2115	CdTe	Гексаг.	103	80
CdTe(Cl); {001}								
2	0.92	220	0.1834	0.184	Cu ₂ Te	Кубич.	113	70
				0.1803	CuTe	Гексаг.	222/004	75
				0.18	Cu ₂ Te	»	600	50
	7.37	200	0.3104	0.322	CuTe	»	201/102	95
				0.306	Cu _{1.44} Te	Орторомб.	004	75
				0.324	Cu ₂ Te	Гексаг.	303	60
$a_x = 0.621 \text{ nm}$				$a(\text{Cu}_2\text{Te}, \text{кубич.}) = 0,611 \text{ nm}$ [15]				
CdTe(In); {111}								
3, a	0.663	110	0.271	0.2712	InTe	Тетраг.	022	100
				0.2712	CdO	Кубич.	111	100
	0.833	112	$\alpha = 10^\circ$	0.212	InTe	Тетраг.	220	100
				0.2128	In ₃ Te ₄	Гексаг.	110	70
				0.2115	CdTe	»	103	80
3, b	0.60	112	0.183	0.181	InTe	Тетраг.	042	60
				0.1855	In ₂ Te ₃	Кубич.	933	80
	1.24	112	0.218	0.217	InTe	»	220	80
				0.214	InTe	Тетраг.	220	100
CdTe(In); {110}								
	2.116	220	0.207	0.214	InTe	Тетраг.	220	100
				0.201	InTe	»	123/330	60
	1.954	200	0.278	0.2712	InTe	»	022	100
				0.278	In ₂ Te ₃	Кубич.	622	50
				0.2715	In	Тетраг.	101	100
				0.2712	CdO	Кубич.	11	100

1	2	3	4	5	6	7	8	9
CdTe(In); {110}								
2.28	111	0.347	0.354	In ₂ Te ₃	Кубич.	333		100
	$\alpha = 8^\circ$		0.3324	InTe	Тетраг.	121		90
0.933	002	0.24	0.2345	Cd	Гексаг.	101		100
			0.2349	CdO	Кубич.	200		88
$a_x = 0.481 \text{ nm}$			$a(\text{CdO, кубич.}) = 0.477 \text{ nm} [^{15}]$					
CdTe(In); {112}								
1.238	111	0.333	0.3324	InTe	Тетраг.	121		90
	$\alpha = 15^\circ$		0.354	In ₂ Te ₃	Кубич.	333		100
			0.328	TeO ₂	Орторомб.	121		100
CdTe(нелегированный); {111}								
1.04	112	0.272	0.2712	CdO	Кубич.	111		100
	$\alpha = 15^\circ$							
0.628	112	0.204	0.1995	CdTe	Гексаг.	112		75
	$\alpha = 15^\circ$		0.203	CdTe	Тетраг.	220		100
CdTe(In)								
5, a	3.08	200	0.294	0.2976	InTe	Тетраг.	220	80
	2.60	220	0.212	0.214	InTe	»	220	100
				0.2128	In ₃ Te ₄	Гексаг.	110	70
				0.217	InTe	Кубич.	220	80
				0.2115	CdTe	Гексаг.	103	80
CdTe(P)								
5, b	2.83	220	0.212	0.215	Cd ₃ P ₂	Тетраг.	202	100
$a_x = 0.6 \text{ nm}$			$a(\text{Cd}_3\text{P}_2, \text{кубич.}) = 0,607 \text{ nm} [^{15}]$					
CdTe(Cl)								
5, c	4.38	220	0.213	0.2115	CdTe	Гексаг.	103	80
	1.78	224	0.123	Не идентифицировано				

Так, выделениям 1-4 на рис. 3 с периодами 0.663, 0.833, 0.6 и 1.24 nm соответственно с наибольшей вероятностью соответствуют InTe (тетраг.) и CdO (кубич.); InTe (тетраг.) и In₃Te₄ (гексаг.); InTe (тетраг.) и In₂Te₃ (кубич.); InTe (кубич., тетраг.) (см. таблицу). Стрелками на рис. 3, а показаны поры. Буквами А и В обозначены ростовые дислокации.

В случае облучения CdTe(In) электронами вдоль направления $\langle 110 \rangle$ в течение 30 min в нем формируются выделения с периодами муа-

рогового контраста 2.116 и 1.954 nm, что соответствует InTe (тетраг.) и InTe (тетраг.) и In (тетраг.) или CdO (кубич.) (см. таблицу). На ВРЭМ-снимках также наблюдаются выделения с $D_{111} = 2.28$ nm и $D_{2002} = 0.933$ nm, которые можно интерпретировать как InTe (тетраг.) или In_2Te_3 (кубич.) и CdO (кубич.) или Cd (гексаг.) соответственно.

В случае облучения CdTe(In) электронами вдоль направления $\langle 112 \rangle$ в течение 30 min в нем обнаружено образование выделений с $D_{111} = 1.238$ nm ($\alpha = 15^\circ$ к $\{111\}$), которые могут соответствовать InTe (тетраг.), In_2Te_3 (кубич.) или, наконец, TeO_2 (орторм.) (см. таблицу).

Образование примесных пластинчатых выделений практически не наблюдается в нелегированном CdTe при идентичных условиях электронного облучения и является отражением влияния легирующей примеси на процессы вторичного дефектообразования в CdTe. В то же время при продолжительном облучении могут формироваться частицы окиси кадмия (кубич.) и CdTe (гексаг. или тетраг.).

Таким образом, в зависимости от типа примеси в CdTe могут образовываться соединения типа примесь-Cd или примесь-Te. В обоих случаях часть образовавшихся при облучении междоузельных атомов Cd или Te будет растрачиваться на образование соединений с примесью. В нелегированных кристаллах междоузельные атомы Cd и Te могут с большей вероятностью взаимодействовать друг с другом с образованием частиц CdTe, в том числе гексагональной и тетрагональной фаз. Это может являться одним из факторов, объясняющих почему частицы CdTe формируются преимущественно в нелегированных кристаллах.

Преимущественное формирование окислов CdO и CdO₂ по сравнению с окислами теллура можно объяснить тем, что в процессе облучения атомы Te легко испаряются с поверхности, а их окислы менее стабильны, чем окислы кадмия. Это согласуется с данными электронно-зондового энергодисперсионного анализа об уменьшении содержания теллура в тонкой фольге CdTe, облучаемой электронами с энергией 300 keV в электронном микроскопе [5], а также с результатами работы [16], в которой показано, что после продолжительного облучения полупроводников A₂B₆ электронами в просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на поверхности образцов могут образовываться окисные пленки катионов. Образования окислов анионов не наблюдалось, что связывалось с атермическим процессом выбивания анионов под воздействием электронов и их нестабильностью, а также нестабильностью их окислов типа SO₂, SO₃, TeO₂ [16].

На основании данных таблицы можно также предположить, что формирование окислов кадмия будет менее интенсивно в образцах CdTe, легированных примесью (P, Cl), которая может образовывать соединения с атомами Cd (например, Cd₃P₂ и CdCl₂). Аналогично примесь (In, Cu), преимущественно образующая соединения с Te, будет связывать атомы теллура, препятствуя в процессе облучения его выходу на поверхность тонкой фольги и последующему испарению. В частности, это может являться основной причиной, на наш взгляд, формирования пор меньших размеров в CdTe, легированном медью, и большей его радиационной стойкости по сравнению с неле-

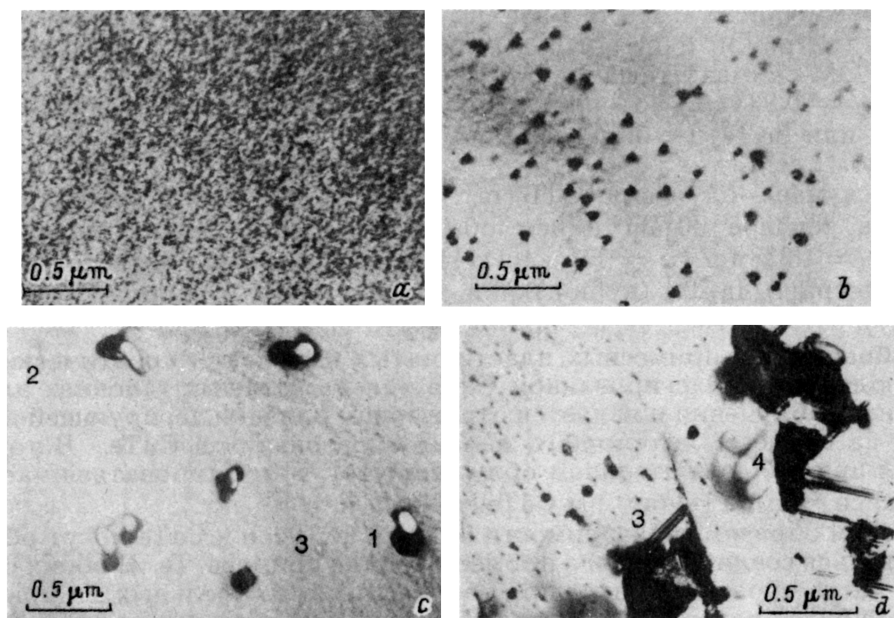


Рис. 4. Изменение структурных дефектов при отжиге в облученном ионами Ag^+ CdTe .

a — до отжига, b, d — 450°C (10 min), c — 520°C (5 min). $a-c$ — нелегированный CdTe , d — CdTe , легированный фосфором. Светлопольные изображения в рефлексе типа 220.

гированным CdTe при облучении электронами с энергией 400 keV , что наблюдалось экспериментально и требует отдельного обсуждения.

2) И о н ы. Необходимо учитывать, что воздействие ионов низких энергий на полупроводниковые соединения A_2B_6 сразу же выявляет принципиальное отличие в образовании структурных дефектов в этих материалах по сравнению с такими хорошо изученными полупроводниками, как Si , Ge и GaAs . Во-первых, в полупроводниках A_2B_6 после травления ионами Ag^+ и I^+ с энергиями $3-10\text{ keV}$ образуются мелкие дислокационные петли с высокой плотностью ($\geq 10^{10}\text{ cm}^{-2}$) [7,8,17,18], в то время как в Si , Ge и GaAs при тех же условиях ионного облучения образование дислокационных петель или других дефектов не наблюдается [8]. Во-вторых, дислокационные петли в материалах A_2B_6 расположены на глубине, значительно превышающую среднюю проекцию пробега ионов (\bar{R}_p) [18-21]. Этот факт известен всем, кто работает с халькогенидами и приготавливает образцы для исследования в ПЭМ-методом ионного травления.

а) И о н ы Ag^+ . Обнаружено, что бомбардировка CdTe ионами Ag^+ в процессе ионного травления при комнатной температуре или в условиях азотного охлаждения не вызывала каких-либо заметных различий в образовании остаточных дефектов в легированных образцах по сравнению с нелегированными, что объясняется высокой плотностью структурных нарушений в ионно-бомбардированных образцах. Типичная картина распределения дефектов в CdTe после травления ионами Ag^+ с энергией 5 keV и токами пучков $20\text{ }\mu\text{A}$ показана на рис. 4, a . Концентрация мелких дислокационных петель $> 10^{10}\text{ cm}^{-2}$.

Электронно-микроскопические исследования с высоким разрешением показали, что в большинстве случаев дислокационные петли лежат в плоскостях $\{110\}$ и $\{111\}$ с векторами Бюргерса $\mathbf{b} = a/2\langle 110 \rangle$ и $\mathbf{b} = a/6\langle 112 \rangle$ соответственно.

Последующий термоотжиг в печи тонкой фольги CdTe сразу после ионного травления в атмосфере аргона при 450–520°C выявляет различие в предварительно легированных и нелегированных кристаллах (рис. 4, *b-d*).

Во-первых, в легированных кристаллах при отжиге образуются крупные выделения (типа 3 и 4 на рис. 4, *d*), вокруг которых формируются дислокации и дефекты упаковки, являющиеся результатом релаксации упругих напряжений между матрицей и выделением. Размеры выделений, образующихся при 450°C, достигают 0.5 μm при плотности $3 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2}$ за время отжига 10 min.

Во-вторых, в легированных кристаллах размеры пор, формирующихся при 500°C в течение 10 min, лежат в интервале диаметров 4–30 nm, что значительно меньше размеров пор (140 nm), образующихся при этой температуре в нелегированном CdTe (поры отмечены цифрами 1–3 на рис. 4, *c*). Кроме того, плотность пор в легированном фосфором CdTe $\cong 10^{10} \text{ cm}^{-2}$, что выше на два порядка, чем в нелегированном ($\cong 10^8 \text{ cm}^{-2}$).

В-третьих, в легированном CdTe размер дислокационных петель, введенных в результате бомбардировки ионами Ag^+ , увеличиваются при последующем отжиге до дефектов с размерами около 40 nm при плотности $2 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ (рис. 4, *d*), в то время как в нелегированном CdTe размеры аналогичных дефектов достигали 65 nm, а их плотность уменьшалась до $2 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$ (рис. 4, *b*).

Различие в формировании скоплений точечных дефектов в легированных и нелегированных кристаллах при отжиге, по-видимому, можно объяснить гетерогенным зарождением дефектов на зародышах, включающих в себя атомы фосфора, но оно требует дальнейшего изучения.

б) Ионы I^+ . В случае травления CdTe ионами I^+ с энергией 3 keV плотность дефектов, обусловленных ионным травлением, незначительна по сравнению со случаем травления ионами аргона [8], что позволяет обнаружить влияние легирующей примеси сразу после бомбардировки ионами.

Установлено, что в легированных кристаллах после бомбардировки ионами иода кроме известных дефектов, таких как мелкие дислокационные петли [8], образуются также пластинчатые выделения с характерным муаровым контрастом (рис. 5). В правом углу рис. 5, *a, c* дополнительно показаны примеры свойственных данным образцам выделений при таком же увеличении, что и на основных снимках.

В случае CdTe(In) необходимо отметить два вида муарового контраста: 1) от дефектов с четко выраженной формой (период $D_{200} = 3.08 \text{ nm}$; отмечено цифрой 2 на рис. 5, *a*); 2) от дефектов, не имеющих четкой формы ($D_{220} = 2.6 \text{ nm}$; отмечено цифрой 1). Из таблицы следует, что периоду D_{200} соответствует InTe (тетраг.), а D_{220} могут соответствовать частицы выделений InTe (тетраг.) или CdTe (гексаг.).

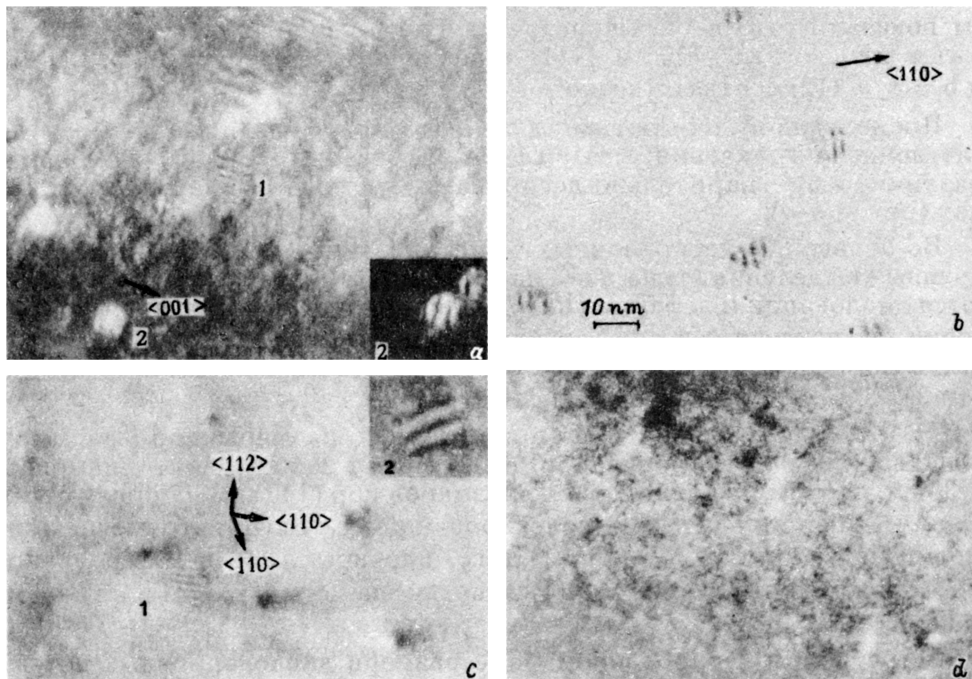


Рис. 5. Образование примесных выделений в CdTe легированном индием (а), фосфором (b) и хлором (с) после ионного травления ионами I^+ .

d — нелегированный CdTe. Изображения в слабом пучке.

В случае CdTe(P) пластинчатые выделения, по-видимому, можно идентифицировать как Cd_3P_2 .

Для CdTe(Cl) наблюдаются преимущественно два типа выделений с периодами муарового контраста D_{220} (отмечено цифрой 2 на рис. 5, с) и D_{224} (отмечено цифрой 1). Выделение типа 2 можно идентифицировать как CdTe (гексаг.), в то время как выделение типа 1 не удалось идентифицировать. Возможно, этот вид дефекта связан с соединением хлора и кадмия.

Таким образом, предварительное легирование примесью (P, In, Cl) не влияет на образование остаточных после бомбардировки ионами Ag^+ структурных дефектов в CdTe, если бомбардировка осуществляется при низкой или комнатной температуре. Последующий термоотжиг выявляет особенности в дефектообразовании в предварительно легированных образцах, заключающиеся в формировании в этих кристаллах пор меньших размеров, дефектов упаковки и выделений. В образцах, бомбардированных ионами I^+ , заметно влияние легирующей примеси уже сразу после облучения ионами, что проявляется в виде формирования пластинчатых выделений типа Cd_3P_2 (тетраг., кубич.) в CdTe, легированном фосфором, и InTe (тетраг., кубич.) в CdTe, легированном индием.

Облучение CdTe электронами также сопровождается образованием выделений типа примесь-Te и примесь-Cd в легированных кристаллах. Кроме того, формируются частицы CdO и CdTe. Можно ожидать,

что формирующие частиц CdTe (гексаг., тетраг.) будет протекать более интенсивно в нелегированном CdTe, чем в *n*- или *p*-типах CdTe, а образование окислов кадмия будет менее выражено в кристаллах, легированных примесью, образующей соединения с Cd. Наиболее часто встречающимися фазами, которые образуются в облученных электронами кристаллах CdTe, являются следующие: CdO (кубич.) в нелегированном CdTe; CdTe (гексаг. или тетраг.) в нелегированном и легированном хлором CdTe; Cu₂Te (кубич., гексаг.) и CuTe (гексаг.) в CdTe, легированном медью; InTe (тетраг., кубич.) и In₂Te₃ (кубич.) в CdTe легированном индием.

Различие между легированными и нелегированными кристаллами не основано на различных механизмах точечных дефектов при облучении, а может быть объяснено посредством вторичных процессов их гетерогенной нуклеации.

В заключение авторы благодарят Королевское общество Великобритании за финансовую поддержку работы, доктора К. Дьюроуза и Н. Томпсона (университет г. Дарем, Великобритания), а также фирму Маркони (GEC-Marconi Infra-Red Ltd) за предоставленные образцы CdTe.

Список литературы

- [1] Wald F.V. Rev. Phys. Appl. **12**, 2, 277 (1977).
- [2] Brown P.D., Loginov Y.Y., Mullins J.T., Durose K., Brinkman A.W., Humphreys C.J. J. Cryst. Growth **138**, 2, 538 (1994).
- [3] Yoshiie T., Iwanaga H., Shibata N., Suzuki K., Ichihara M., Takeuchi S. Phil. Mag. **A47**, 3, 315 (1983).
- [4] Kiessling F.M., Leipner H.S. J. Cryst. Growth **128**, 1, 599 (1993).
- [5] Libatique N., Sasaki A., Choi D., Wada S., Rastogi A.C., Kimata M., Kaneko K., Takashima M. J. Cryst. Growth **127**, 1, 296 (1993).
- [6] Loginov Y.Y., Brown P.D., Thompson N. Phys. Stat. Sol. (a) **126**, 1-2, 63 (1991).
- [7] Loginov Yu.Yu., Brown P.D. Phys. Stat. Sol. (a) **132**, 1, 323 (1992).
- [8] Chew N.G., Cullis A.G. Ultramicroscopy **23**, 2, 175 (1987).
- [9] Rolland S., Granger R., Triboulet J. Cryst. Growth **117**, 1, 208 (1992).
- [10] Belas E., Hoschl P., Grill R., Franc J., Moravec P., Lischka K., Sitter H., Toth A. J. Cryst. Growth **138**, 2, 940 (1994).
- [11] Hastings M.P., Maxey C.D., Matthews B.E., Metcalfe N.E., Capper P., Jones C.L., Gable I.G. J. Cryst. Growth **138**, 1, 917 (1994).
- [12] Barbot J.F., Kronewitz J., Schroter W. Appl. Phys. Lett. **57**, 25, 2689 (1990).
- [13] Хирш П., Хови А., Николсон Р., Пёшли Д., Уилан М. Электронная микроскопия тонких кристаллов. М. (1967). 574 с.
- [14] Selected powder diffraction data for metals and alloys. Data book. JCPDS Swarthmore, Pennsylvania (1978). V. 1,2. 1929 p.
- [15] Crystal data. Determinative tables / Ed. J.D.H. Donnay. Americ. Crystal. Assoc. Washington (1963). 1302 p.
- [16] Thangaraj N., Wessels B.W. J. Appl. Phys. **67**, 3, 1535 (1990).
- [17] Lu G., Niu F., Wang R. Radiat. Eff. **116**, 3, 81 (1991).
- [18] Lunn M.A., Dobson P.S. J. Cryst. Growth **73**, 1-2, 379 (1985).
- [19] Leo G., Drigo A.V., Traverse A. Mater. Sci. Eng. **B16**, 1, 123 (1993).
- [20] Shatov K.V. Phys. Stat. Sol. (a) **130**, 2, 293 (1992).
- [21] Бабенцов В.Н., Бекетов Г.В., Горбань С.И. ФТП **27**, 3, 504 (1993).