

УДК 539

МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ CdTe

© 2021 г. В. И. Михайлов^а *, Л. Е. Поляк^а

^аИнститут кристаллографии ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН,
Москва, 117333 Россия

*e-mail: vmikh@ns.crys.ras.ru

Поступила в редакцию 15.11.2020 г.

После доработки 10.01.2021 г.

Принята к публикации 14.01.2021 г.

Адсорбцию Cd и Te на поверхности кристалла CdTe исследовали *in situ* с помощью масс-спектрометра в интервале температур 500–700 К и интенсивности падающих потоков $V_{Cd} = 10^{-2}$ –2 монослоя/с и $V_{Te} = 0.5$ –5 монослоя/с. Разработаны компьютерные программы для управления экспериментом и обработки полученной информации. Параметры роста согласуются с предложенной моделью адсорбции. Энергии активации процессов “испарения” (переход атомов из кристалла в адсорбционный слой) и десорбции атомов Cd и молекул Te₂ составили 2, 0.5 и 0.59 эВ соответственно. Установлено, что зависимость скорости роста от потока Te₂ при постоянном потоке Cd в широком диапазоне является линейной, в то время как зависимость скорости роста от потока Cd при постоянном потоке Te₂ оказалась нелинейной, достигая насыщения. Параметры роста зависели от структурных особенностей поверхности кристалла (шероховатость, поликристалличность, мозаичность), сопровождающих рост пленки при больших отклонениях от равновесия.

Ключевые слова: CdTe, масс-спектрометрия, МЛЭ, ДБЭ, адсорбция, конденсация, испарение.

DOI: 10.31857/S102809602107013X

ВВЕДЕНИЕ

Современные микроэлектроника и фотоника предъявляют все более жесткие требования к качеству и размерам многослойных структур. В ближайшей перспективе рассматривается использование 2D-наноразмерных структур. С этим связано постоянное развитие технологии молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) [1–3], проявляется повышенный интерес к исследованиям закономерностей роста пленок [4–7] (появление островков, их разрастание, плотность ступеней, скорость их движения, плотность изломов на ступенях и т.д.). Одно из направлений таких исследований – экспериментальное и теоретическое изучение адсорбции. Чтобы управлять процессом роста пленок на поверхности с расстоянием между ступенями в единицы нанометров, необходимо знание таких параметров адсорбции как, диффузионная длина пробега, время жизни частицы на поверхности, критический размер зародыша и т.д.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию процессов роста пленок на поверхности на основе простейшей модели адсорбции. Для этой цели используется специализированная сверхвысоковакуумная установка для

измерения временных параметров переходных процессов при взаимодействии молекулярных пучков с поверхностью. В этой методике рост пленки происходит через стадию адсорбции на поверхности кристаллической подложки из молекулярных пучков, а потоки десорбции с поверхности кристалла измеряются встроенным масс-спектрометром. Такие измерения позволяют определять многие характеристики адсорбции: времена жизни частиц на поверхности, длину свободного пробега, скорости поверхностной диффузии и других реакций на поверхности. Впервые такая методика была применена для исследования адсорбции атомов металлов на W [8, 9].

В нашей работе используется измерительный комплекс [10, 11] для исследования молекулярно-лучевой эпитаксии CdTe. На этой установке ранее [12, 13] были исследованы переходные процессы на поверхности кристалла CdTe в диапазоне температур 550–730 К при интенсивности потоков $V \sim 0.2$ –5 МС/с (МС – монослой). Были измерены характерные времена процессов порядка долей секунд. В дальнейшем при изучении влияния подготовки подложек из сапфира на качество растущих пленок CdTe [14] наблюдались

переходные процессы с гораздо большими временами (\sim мин). В данной работе главное внимание уделено изучению кинетики таких “медленных” процессов.

МОДЕЛЬ: ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНЫ

Основные понятия и термины на примере молекулярно-лучевой эпитаксии на кристалле CdTe достаточно подробно рассмотрены ранее в работах [12, 13]. Кратко повторим главное. На поверхности в адсорбированном состоянии находятся атомы Cd и Te, а также молекулы Te_2 (соответствующие поверхностные концентрации n_{Cd} , $n_1 = n_{\text{Te}}$ и $n_2 = n_{\text{Te}_2}$). В это состояние атомы Cd и Te попадают, “испаряясь” из кристалла. Поток атомов из кристалла в адсорбционный слой J_{ev} – поток испарения. Прибывающие на поверхность из соответствующих источников пучков (ИП) молекулы Te_2 и атомы Cd переходят в адсорбированное состояние, падающие потоки – V_{Cd} и V_{Te} . Адсорбированные атомы Cd могут либо десорбироваться, либо встроиться в кристалл, соединяясь с адсорбированными атомами Te. Атомы Te (кроме встраивания) могут объединяться, образуя молекулу Te_2 , но не десорбируются. Адсорбированные молекулы Te_2 могут десорбироваться или диссоциировать на атомы Te. Потоки десорбции пропорциональны поверхностным концентрациям: $J_{\text{Cd}} = n_{\text{Cd}}p_1 = J_1$ и $J_{\text{Te}} = n_2p_2 = J_2$, (уходящие потоки Cd и Te_2 соответственно), где p_1 – скорость десорбции атомов Cd, а p_2 – скорость десорбции молекул Te_2 . Поток ассоциации атомов Te – $K_{\text{as}}n_1^2$ (скорость ассоциации K_{as}). Поток диссоциации молекул Te_2 – $p_{\text{dis}}n_2$ (скорость диссоциации Te_2 – p_{dis}). Поток атомов, встраивающихся в кристалл или поток роста – $J_{gr} = K_{gr}n_1n_{\text{Cd}}$. Скорость встраивания K_{gr} – обобщенный параметр, который зависит от структуры поверхности, длины диффузионного пробега атомов Cd и Te, и т. д. Рассматриваются только эти процессы, влияющие главным образом на поверхностные концентрации атомов Cd и Te.

В данной методике падающие пучки Cd и Te_2 перекрывают модуляторы M_1 и M_2 . Если пучок закрыт, то $M_i = 0$, открыт $M_i = 1$. В соответствии с предложенной моделью можно записать кинетические уравнения – зависимость поверхностных концентраций n_{Cd} , n_1 и n_2 от времени при изменении состояния модуляторов:

$$dn_{\text{Cd}}/dt = J_{ev} - K_{gr}n_1n_{\text{Cd}} - p_1n_{\text{Cd}} + M_1V_{\text{Cd}}, \quad (1)$$

$$dn_1/dt = J_{ev} - K_{gr}n_1n_{\text{Cd}} - K_{\text{as}}n_1^2 + 2p_{\text{dis}}n_2, \quad (2)$$

$$dn_2/dt = K_{\text{as}}n_1^2/2 - p_{\text{dis}}n_2 - p_2n_2 + M_2V_{\text{Te}}. \quad (3)$$

Имеется четыре стационарных состояния системы уравнений (1)–(3). При изменении любого M_i происходит изменение поверхностных концентраций. Измерение потоков десорбции, которые пропорциональны поверхностным концентрациям, дает возможность измерять параметры переходного процесса между стационарными состояниями, и это составляет экспериментальную основу данной методики.

В состоянии равновесия реакции 2CdTe (кристалл) = 2Cd (пар) + Te_2 (пар) давление компонента соответствует константе равновесия $K_e^2(T) = P_e(\text{Cd})^2P_e(\text{Te}_2)$ [15–17]. Здесь T – температура в К. По кинетической теории при давлении пара P_e в замкнутом объеме на 1 см^2 поверхности падает за 1 с поток молекул $V_e = 3.5 \times 10^{22}P_e(\text{Торр})/(mT)^{1/2}$, (m – масса молекулы). Столько же молекул улетает (из условия равновесия), т.е. равны “равновесные” потоки между газовой фазой и адсорбционным слоем (падающие и уходящие потоки): $V_e = V_e(\text{Cd}) = 2V_e(\text{Te}_2) = J_e(\text{Cd}) = 2J_e(\text{Te}_2)$.

Следовательно, равны и потоки между адсорбционным слоем и кристаллом (потоки роста и испарения) $J_{gr}^e = J_{ev}(\text{Cd}) = J_{ev}(\text{Te}) = J_{ev}^e$, а также потоки на поверхности (в адсорбционном слое) $K_{\text{as}}n_1^2 = 2p_{\text{dis}}n_2$. Заметим, что по определению кинетических характеристик этой модели: $J_{gr} = K_{gr}n_1n_{\text{Cd}} = K_{gr}n_1J_{\text{Cd}}/p_1$, $n_1^2 = 2p_{\text{dis}}J_{\text{Te}}/(p_2K_{\text{as}})$.

В таком случае равновесный поток V_e (поток падающий и уходящий) и “равновесный поток испарения” J_{ev}^e (потоки роста и испарения) связаны соотношением: $J_{ev}^e = V_e(4B^2D)^{1/3}$, где $D = p_{\text{dis}}/p_2$ и $B = K_{gr}/(2p_1)(J_{ev}/K_{\text{as}})^{1/2}$ – комплексные безразмерные параметры. Можно предположить, что поток атомов из кристалла в адсорбционный слой J_{ev} не зависит от состояния адсорбционного слоя, т.е. $J_{ev} = J_{ev}^e$, при этом J_{ev} не зависит от всех n и в уравнения (1)–(3) входит как константа:

$$J_{ev} = V_e(4B^2D)^{1/3}. \quad (4)$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Методика измерений также достаточно подробно описана в работах [12–14]. Эксперименты проведены с монокристаллом CdTe. Поверхность монокристалла орошалась молекулярными пуч-

ками Cd и Te₂. Состояние поверхности кристалла контролировалось *in situ* методом дифракции быстрых электронов (ДБЭ).

В данной работе проведено измерение “медленной” кинетики поверхностных процессов в диапазоне температур кристалла 350–720 К. Интенсивность падающих потоков в диапазоне 0.1–5 МС/с задавалась температурой соответствующих ИП. Потоки десорбции с поверхности кристалла J_{Cd} и J_{Te} измерялись встроенным в камеру масс-спектрометром. Ионные токи масс-спектрометра I_{Cd}^+ и I_{Te}^+ регистрировались компьютером: $J_{Cd} = C_1 I_{Cd}^+$, $2J_{Te} = C_2 I_{Te}^+$, где C_1, C_2 – калибровочные коэффициенты. Заслонки, модулирующие падающие на кристалл пучки молекул Cd и Te₂, по заданной программе меняли свое положение. Данные, записанные в компьютер за определенный промежуток времени (при постоянных температурах кристалла и ИП) составляли кадр. Длительность кадра ~20–50 мин, в то время как при исследованиях [12, 13] длительность кадра ~20 с. Кадр разбит на интервалы с постоянными положениями модуляторов M_i .

ПРИМЕР ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКИ КАДРА

Для некоторых условий эксперимента масс-спектрометр настраивался на одну массу (Cd или Te), но основная масса данных получена в режиме совместного измерения ионных токов Cd и Te. Типичный результат измерения и обработки кадра представлен на рис. 1. Данный кадр состоит из следующих интервалов: открыты оба ИП – ($M_1 = M_2 = 1$), закрыт масс-спектрометр (измерение фона), закрыты оба ИП – ($M_1 = M_2 = 0$), закрыт ИП Cd – ($M_1 = 0, M_2 = 1$), закрыт ИП Te ($M_1 = 1, M_2 = 0$). На верхней диаграмме (рис. 1а) приведены измеренный за время одного кадра ионный ток I_{Cd}^+/A_{Cd} и теоретическая функция F_{Cd} , а на нижней диаграмме (рис. 1б) одновременно измеренный ионный ток I_{Te}^+/A_{Te} и соответствующая теоретическая функция F_{Te} . Теоретические функции получены решением системы (1)–(3). Ионные токи нормированы к 1 (A – размерный коэффициент). Суммарный поток атомов, входящий в адсорбционный слой, изменяется от интервала к интервалу при изменении M_1 или M_2 . Нормированный суммарный поток на рис. 1 обозначен пунктиром: Cd – $(V_{Cd}M_1 + J_{ev})/(V_{Cd} + J_{ev})$ (рис. 1а), Te – $2V_{Te}M_2 + J_{ev}/(2V_{Te} + J_{ev})$ (рис. 1б). На этом рисунке отчетливо видно, как закрытие одного из

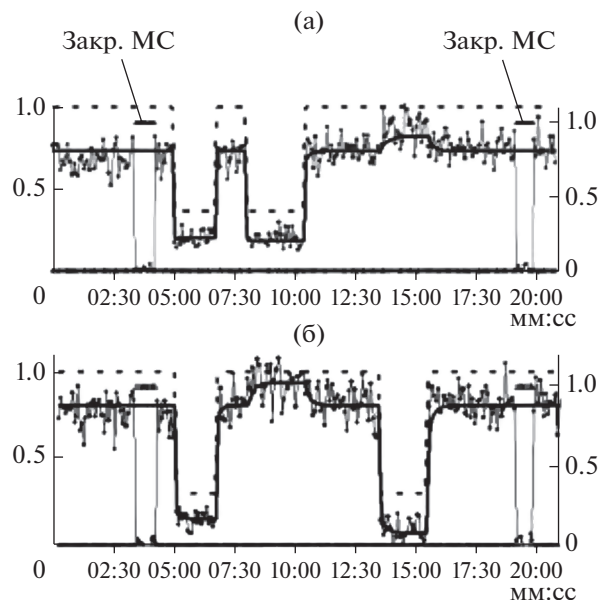


Рис. 1. Пример измерений и обработки кадра. Измеренные за время одного кадра ионные токи I_{Cd}^+ и I_{Te}^+ , падающие потоки атомов, а также теоретические функции F_{Cd} и F_{Te} . Ионные токи, потоки и теоретические функции представлены в нормированном виде: а – данные по Cd; б – по Te. Данный кадр состоит из следующих интервалов: открыты оба ИП – ($M_1 = M_2 = 1$), измерение фона (обозначение на рис.: закрыт МС), закрыты оба ИП – ($M_1 = M_2 = 0$), закрыт ИП Cd – ($M_1 = 0, M_2 = 1$), закрыт ИП Te ($M_1 = 1, M_2 = 0$).

ИП вызывает увеличение десорбции другого компонента с поверхности образца.

При решении системы (1)–(3) введена нормировка для потоков десорбции и испарения:

$$J_{Cd} = (V_{Cd} + J_{ev})F_1(t), \quad 2J_{Te} = (2V_{Te} + J_{ev})F_2(t),$$

$$J_{ev} = ev_1(V_{Cd} + J_{ev}) = ev_2(2V_{Te} + J_{ev}).$$

Нормированные функции-решения имеют общий вид:

$$F_i(t) = F_{si} + (F_i(0) - F_{si})\exp(-p_i t).$$

“Стационарный” уровень F_{si} для Cd и Te различается:

$$\text{для Cd} - F_{s1} = [(1 - ev_1)M_1 + ev_1]/[1 + 2Bf(t)],$$

$$\text{для Te} - F_{s2} = [(1 - ev_2)M_2 + ev_2 f^2(t)]/(1 + D).$$

Здесь $f(t) = n_1(K_{as}/J_{ev})^{1/2} = E(1 - R)/(1 + R) - E_0$,

где $R = R(t) = C_0 \exp[-2E(J_{ev}K_{as})^{1/2}t]$, $E = [1 + E_0^2 + (2J_{Te}/J_{ev})D]^{1/2}$, $E_0 = BJ_{Cd}/J_{ev}$.

Безразмерные параметры D и B постоянны в кадре, а E и E_0 зависят от положения модуляторов M_i .

Таблица 1. Стационарные состояния системы (1)–(3)

| M_1M_2 | $J_1 = C_1I(\text{Cd}^+)$ | $2J_2 = C_2I(\text{Te}^+)$ | Следствие |
|----------|---|--|--|
| 00 | $J_{ev} - J_{gr}(00)$ | $J_{ev} - J_{gr}(00)$ | $C_1A_1F_1(00) = C_2A_2F_2(00)$ |
| 10 | $V_{\text{Cd}} + J_{ev} - J_{gr}(01)$ | $J_{ev} - J_{gr}(01)$ | $C_1A_1F_1(10) - V_{\text{Cd}} = C_2A_2F_2(10)$ |
| 01 | $J_{ev} - J_{gr}(10)$ | $2V_{\text{Te}} + J_{ev} - J_{gr}(10)$ | $C_1A_1F_1(01) = C_2A_2F_2(01) - 2V_{\text{Te}}$ |
| 11 | $2J_2 - J_1 = 2V_{\text{Te}} - V_{\text{Cd}}$ | | $2V_{\text{Te}} - V_{\text{Cd}} = C_2A_2F_2(11) - C_1A_1F_1(11)$ |

Таким образом, для построения обеих функций $F_{\text{Cd}}(t)$ и $F_{\text{Te}}(t)$ требуется семь параметров: ev_1 , ev_2 , p_1 , p_2 , D , B и K_{as} , по-разному влияющих на вид каждой функции. Для $F_{\text{Cd}}(t)$ важнейшими являются ev_1 , p_1 и B , который определяет долю корректирующей функции $f(t)$. Для $F_{\text{Te}}(t)$ важнейшими является ev_2 , p_2 , а влияние $f(t)$ определяет D . Теоретические функции F_i вычислялась для всего кадра с общими параметрами и корректирующей функцией, но в каждом интервале в соответствии с изменением M_i , изменяются значения E и E_0 . Конечные значения $F_s(t)$ на s -ом интервале являются начальными для следующего $F_{s+1}(0)$. Для каждого кадра методом наименьших квадратов определялась константа A , связывающая экспериментально измеренный ток масс-спектрометра и расчетную функцию. Программа поиска методом перебора выбирала набор параметров по минимальному среднему квадратичному отклонению $\text{dev} = \sum_j (I^+(t_j) - AF(t_j))^2/N$, где N – полное число точек в кадре. $A = \sum_j (I^+(t_j)F(t_j))/\sum_j (F(t_j))^2$ (j – номер точки в кадре). A – для Cd и Te рассчитывается отдельно, независимо друг от друга. Однако, большинство измерений выполнено совместно для Cd и Te и надо учитывать связь между A_i . Обозначим $A_1/(2A_2) = \text{CalS}$. Отметим, что $J_{\text{Cd}} = C_1I_{\text{Cd}}^+$, $2J_{\text{Te}} = C_2I_{\text{Te}}^+$, $J_i = K_iF_i(t) = C_iI_i^+$; $I_i^+ = A_iF_i(t)$, $K_i = C_iA_i$. В табл. 1 приведены соотношения потоков для стационарных состояний системы уравнений (1)–(3). Из анализа наших данных выводим константу $C_2/C_1 = 2$. Тогда из табл. 1 получаем расчетную формулу, в которой имеются только безразмерные величины:

$$\text{CalS} = F_2(00)/F_1(00) = [F_2(10) + F_2(01) - F_2(11)]/[F_1(10) + F_1(01) - F_1(11)].$$

Это накладывает ограничения на выбор параметров для функций F_i при совместной обработке данных от Cd и Te.

Для заданных параметров можно рассчитать значения $J_{gr}(M_1M_2)$ при любой позиции модуляторов. Ранее мы полагали, что при $M_1M_2 = 00, 01$,

10 можно положить, что $C_g \ll 1$ ($C_g = J_{gr}/J_{ev}$ – коэффициент конденсации). Оказалось, что это не всегда верно. Корректно сравнение C_g с выражениями $(V_{\text{Cd}}M_1 + J_{ev})/J_{ev}$ и $(2V_{\text{Te}}M_2 + J_{ev})/J_{ev}$. Для расчета C_g составлена программа $J_{gr} = J_1n_1K_{gr}/p_1$, подставляя $J_1 = V_1M_1 + J_{ev} - J_{gr}$, $n_1 = f(t)(J_{ev}/K_{\text{as}})^{1/2}$, $f(\infty) = E - E_0$, получаем уравнение для C_g в любой позиции M_1M_2 :

$$C_g(M_1, M_2) = [2B(E - E_0)]/[1 + 2B(E - E_0)][1 - M_1(1 - ev_1)],$$

где $(E - E_0)$ зависит от C_g , $E_0 = B(1 + M_1V_{\text{Cd}}/J_{ev} - C_g)$,

$$E = [1 + (E_0)^2 + (1 + M_22V_{\text{Te}}/(J_{ev} - C_g)D)]^{1/2}.$$

Таким образом, здесь уравнение для каждого из четырех C_g (00, 01, 10, 11), в которых четыре параметра, заданные при построении $F(t)$:

$$B, D, ev_1 = J_{ev}/(J_{ev} + V_{\text{Cd}}), \quad ev_2 = J_{ev}/(J_{ev} + 2V_{\text{Te}}).$$

Решение уравнения дает значение C_g .

После первичной обработки каждого кадра, значения параметров уточнялись в последующих расчетах с учетом результатов обработки всего массива данных. Для калибровки выполнено сравнение экспериментальных данных (J_{ev} , B и D) с равновесным потоком по соотношению (4). В равновесии $C_g = 1$. Интенсивность потока испарения J_{ev} определяется температурой кристалла T_s . Интенсивность потока роста J_{gr} зависит от падающих потоков Cd и Te. При температуре равновесия уходящие и падающие потоки Cd и Te равны равновесному потоку. В наших экспериментах обработано ~90 кадров при этом рассчитанный C_g близок к единице при измеренной температуре $T_s \sim 800$ К. Равновесный поток при такой температуре: $V_e(800 \text{ К}) \cong 750$ МС/с, на порядок превосходит рассчитанные значения потоков V_{Cd} , V_{Te} . Величина равновесного потока взята из работ [12], [15–17]: $V_e = 5.9 \times 10^{14} \exp(-1.89 \text{ эВ}/k_b T_s)$ МС/с ($k_b = 8.625 \times 10^{-5}$ эВ/К – постоянная Больцмана). Интенсивность падающих потоков по нашим расчетам составляла: $V_{\text{Cd}} = 0.01$ – 2 МС/с и $V_{\text{Te}} = 0.5$ – 5 МС/с. Предполагалось, что это связано с

разностью измеренной температуры T_s и реальной температуры поверхности. Для коррекции введена поправка: $T_{кор} = T_s/1.27$, полученная на основании баланса тепловых потоков Q в образце от излучения внутрь и наружу: $Q = \sigma T^4 = 2\sigma T_{кор}^4$, $T_{кор} = T_s/(2)^{1/4} = T_s/1.27$. При дальнейшей обработке кадров за температуру образца принималось откорректированное значение, а для вычисления функций F_i параметры J_{ev} , B и D задавались с учетом соотношения (4), связывающим эти параметры с равновесным потоком. Теоретические функции с этими параметрами (рис. 2) хорошо согласуются с экспериментом и с соотношением (4) при такой коррекции в диапазоне температур образца $T = 500-700$ К.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Удовлетворительное согласие большинства экспериментальных данных (~60 кадров) с теоретическими расчетами дают значения параметров J_{ev} , p_1 , p_2 , p_{dis} , K_{as} и K_{gr} , приведенные в табл. 2. В верхней строке таблицы представлены значения параметров P при $T = 630$ К, в нижних – характеристики их экспоненциальной зависимости от температуры – $P = P_0 \exp(-E_a/k_b T)$. Величина E_a характеризует энергию активации соответствующего процесса.

Некоторые характерные примеры показаны на рис. 3–5. Параметры для расчета теоретических функций в каждом кадре вычисляются из табл. 2 по величине T . При расчете теоретических функций использовалась величина обратная скорости десорбции – среднее время адсорбции – $t_i = 1/p_i$. В табл. 3 указаны значения T , параметры теоретических функций, вычисленные из табл. 2, и результаты их расчета – калибровочные константы A_{Cd} , A_{Te} (в пикоамперах) и средние квадратичные отклонения dev_{Cd} , dev_{Te} . Кадры расположены по мере снижения температуры кристалла. При этом доля собственного испарения кристалла в общем потоке десорбции снижается со снижением температуры. При низких температурах наблюдается только десорбция падающих потоков. Кадры на рис. 4 и 5 получены при изменении отношения

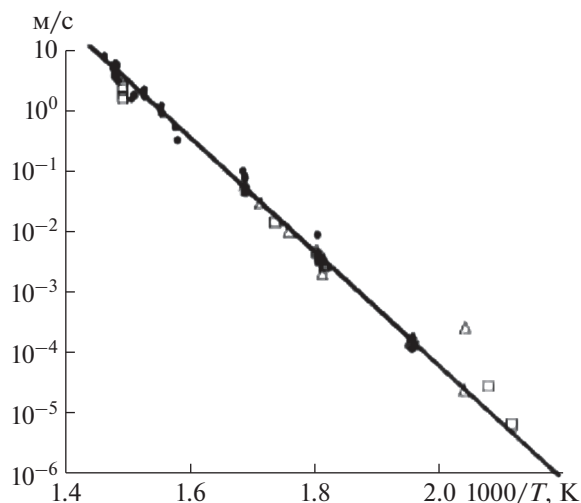


Рис. 2. Учет соотношения $J_{ev} = V_e(4B^2D)^{1/3}$. Коррекция $T_{кор} = T_s/1.27$. Равновесный поток V_e и экспериментальные точки комплексного параметра $J_{ev}/(4B^2D)^{1/3}$.

интенсивностей Cd/Te. На рис. 4 увеличивалась интенсивность падающего потока Te: $A_{Cd} = 0.18$ и 0.07 ; $A_{Te} = 0.08$ и 0.15 , а на рис. 5 уменьшалась интенсивность падающего потока Cd, в случае (a_2) – до уровня шума.

Кинетические характеристики процесса (табл. 2 и 3) J_{ev} , p_1 , p_2 входят в расчеты функции F непосредственно. Другие коэффициенты p_{dis} , K_{as} и K_{gr} извлекаются из комплексных параметров:

$$D = p_{dis}/p_2 \text{ и } B = (K_{gr}/2p_1)(J_{ev}/K_{as})^{1/2}.$$

Результаты измерений скорости десорбции молекул $Te_2(p_2)$ в диапазоне температур образца 500–700 К представлены на рис. 6. Значения p_2 изменяются на два порядка – $p_2(1/c) = 3.3 \times 10^4 \times \exp(-0.59 \text{ эВ}/k_b T)$. Энергия активации десорбции $Te_2 - E_a(p_2) = 0.59$ эВ.

Скорость десорбции атомов Cd: $p_1(1/c) = 8.33 \times 10^4 \exp(-0.5 \text{ эВ}/k_b T)$ достаточно высока и измерения проведены на пределе возможностей данной методики в небольшом диапазоне (рис. 7).

Таблица 2. Параметры процессов МЛЭ на поверхности кристалла CdTe

| | $p_1, 1/c$ | $p_2, 1/c$ | $p_{dis}, 1/c$ | $J_{ev}, \text{MC} \cdot c$ | $K_{as}, 1/(\text{MC} \cdot c)$ | $K_{gr}, 1/(\text{MC} \cdot c)$ |
|------------------|--------------------|-------------------|----------------------|-----------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| P(630 K) | 8.4 | 0.64 | 0.11 | 0.135 | 0.00166 | 0.36 |
| P_0 | 8.33×10^4 | 3.3×10^4 | 1.1×10^{10} | 1.3×10^{15} | 5.5×10^8 | 3×10^{-9} |
| $E_a, \text{эВ}$ | 0.5 | 0.59 | 1.38 | 2 | -0.56 | -1.0 |

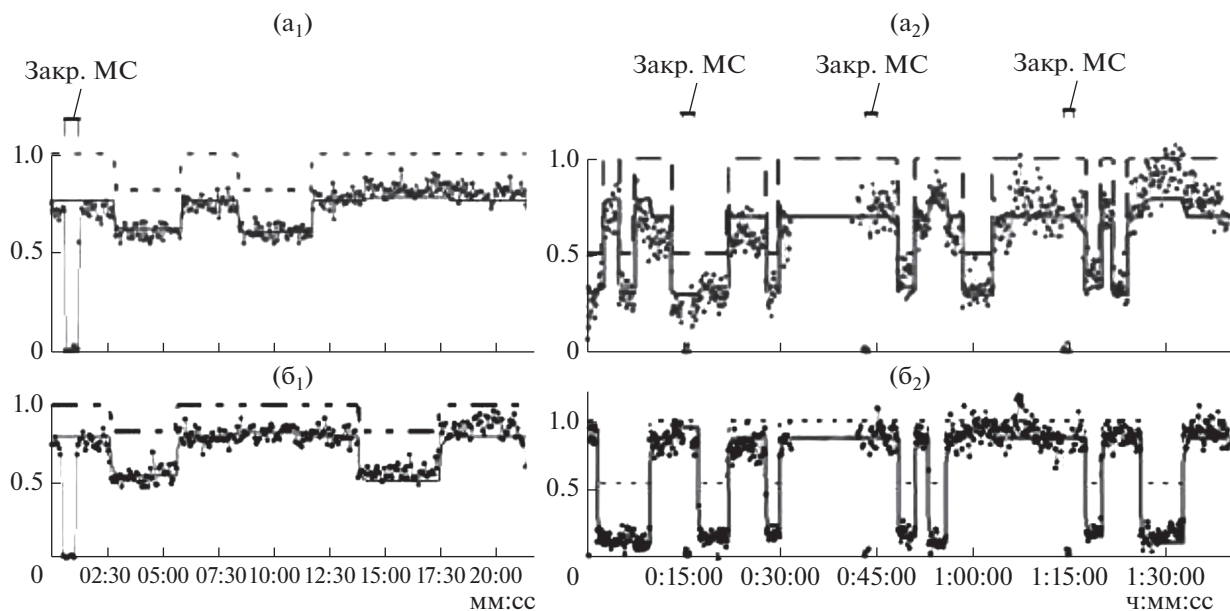


Рис. 3. Уменьшение T_s : 696 К – (а₁, б₁); 663 К – (а₂, б₂). Ионные токи Cd (а₁ и а₂) и Te (б₁ и б₂) и теоретические функции $F_{Cd}(t)$ и $F_{Te}(t)$. Обозначения такие же, как на рис. 1. Параметры в табл. 3.

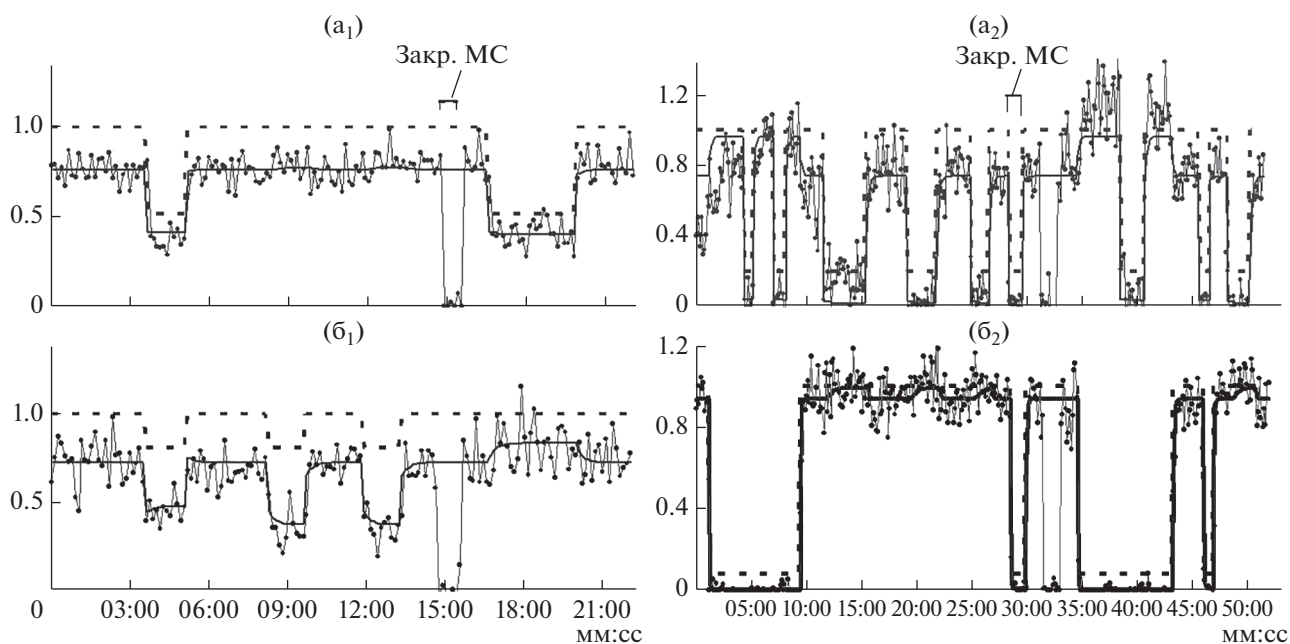


Рис. 4. Уменьшение T_s : 654 К – а₁, б₁; 592 К – а₂, б₂. Совместные измерения ионных токов Cd (а₁ и а₂) и Te (б₁ и б₂) и функции $F_{Cd}(t)$ и $F_{Te}(t)$. Обозначения такие же, как на рис. 1. Изменение отношения интенсивностей Cd/Te: $A_{Cd} = 0.18$ и 0.07 ; $A_{Te} = 0.08$ и 0.15 . Параметры в табл. 3.

Энергия активации десорбции Cd составляет $E_a(p_1) = 0.5$ эВ.

Потоки J_{ev} для Cd и Te (в атомах) равны между собой (согласно модели, в пучке Te – молекулы

Te₂, а на поверхности в реакцию с Cd вступают атомы). На рис. 8 даны экспериментально полученные значения J_{ev} и аппроксимирующая функция зависимости потока испарения от температу-

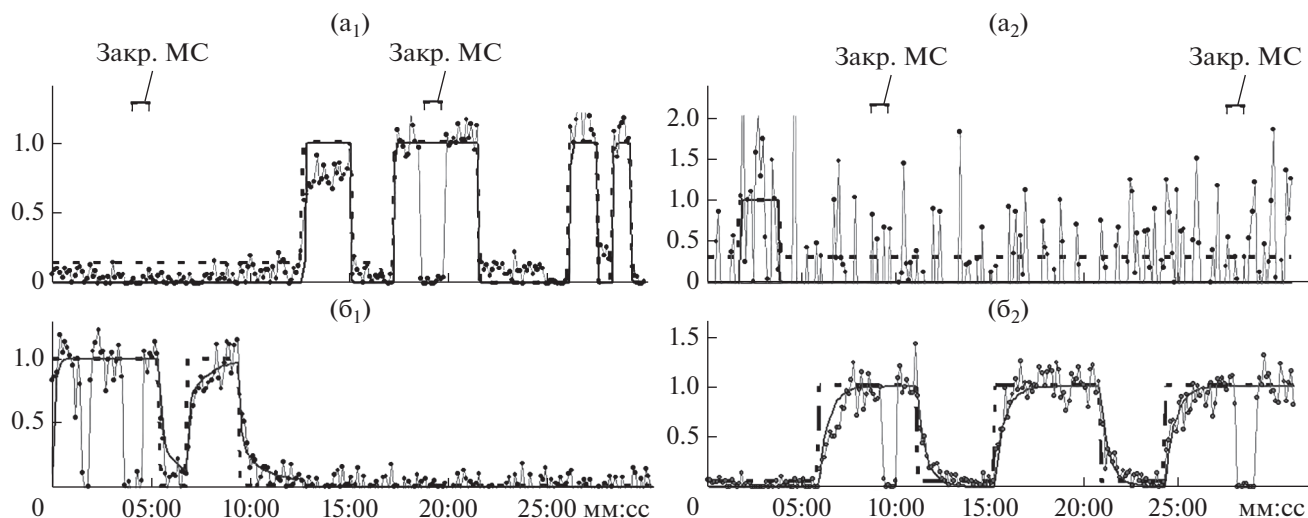


Рис. 5. Уменьшение интенсивности Cd. Совместные измерения ионных токов Cd (а₁ и а₂) и Te (б₁ и б₂) и функции $F_{Cd}(t)$ и $F_{Te}(t)$. Обозначения такие же, как на рис. 1. Параметры в табл. 3.

ры $J_{ev} - F(T) = 1.3 \times 10^{15} \exp(-2 \text{ эВ}/k_b T)$. Энергия активации процесса перехода атомов Cd и Te из кристалла в адсорбционный слой $- E_a(J_{ev}) = 2 \text{ эВ}$. Величина потока испарения $- J_{ev} (\sim 0.1-5 \text{ МС/с})$ в наших экспериментах становилась измеримой при температуре кристалла выше $T = 630 \text{ К}$ ($1000/T = 1.59$). Значения J_{ev} при более низких температурах – аппроксимация, не противоречащая эксперименту.

На рис. 9 представлены экспериментальные значения параметра D и аппроксимирующая функция $D(T) = 3.41 \times 10^5 \exp(-0.79 \text{ эВ}/k_b T)$. Отсюда, $p_{dis} = Dp_2 = 1.1 \times 10^{10} \exp(-1.38 \text{ эВ}/k_b T)$. Энергия активации диссоциации Te_2 на поверхности $- E_a(p_{dis}) = 1.38 \text{ эВ}$.

На рис. 10 показаны экспериментальные значения параметра B и аппроксимирующая функция $B(T) = 2.8 \times 10^{-3} \exp(0.23 \text{ эВ}/k_b T)$.

Скорость ассоциации атомов Te на поверхности K_{as} вычисляется из параметра $(K_{as} J_{ev})$, непосредственно входящего в расчет $F(t)$. Полученные значения параметра K_{as} в зависимости от температуры кристалла представлены на рис. 11.

На рис. 9–11 выпадающая точка при $10^3/T = 1.8$ относится к кадру, для которого дано два варианта теоретических функций $F_{Cd}(t)$ и $F_{Te}(t)$. На рис. 12 показан этот кадр: рис. 12(а₁, б₁) – $F_{Cd}(t)$ и $F_{Te}(t)$ – параметры, вычислены из табл. 2, рис. 12(а₂, б₂) – параметры подобраны отдельно для этого кадра. В верхних двух строках табл. 4 приведены их значения. Параметры B и D отличаются почти на порядок, а K_{as} даже более, чем на порядок. Оба варианта расчета этого кадра иллюстрируют работу программы и показывают величину и характер отклонений. Экспериментальные условия в данном кадре: малая интенсивность испарения, па-

Таблица 3. Уменьшение T . Параметры и результат расчета для кадров на рис. 3–5

| № рис. | $T, \text{ К}$ | t_{Cd} | t_{Te} | eV_{Cd} | eV_{Te} | K_{as} | D | B | A_{Cd} | A_{Te} | dev_{Cd} | dev_{Te} |
|-------------------------------------|----------------|----------|----------|--------------------|--------------------|--------------------|-------|------|----------|----------|--------------------|--------------------|
| 3(а ₁ , б ₁) | 696 | 0.05 | 0.56 | 0.8 | 0.7 | 6×10^{-4} | 0.65 | 0.13 | 1.13 | 0.65 | 0.0035 | 2×10^{-3} |
| 3(а ₂ , б ₂) | 663 | 0.08 | 0.90 | 0.44 | 0.19 | 9×10^{-4} | 0.34 | 0.16 | 0.16 | 0.19 | 0.0003 | 2×10^{-4} |
| 4(а ₁ , б ₁) | 654 | 0.08 | 1.04 | 0.0.5 | 0.63 | 1×10^{-3} | 0.29 | 0.16 | 0.18 | 0.08 | 0.0002 | 7×10^{-5} |
| 4(а ₂ , б ₂) | 592 | 0.22 | 3.15 | 0.04 | 0.001 | 4×10^{-3} | 0.06 | 0.25 | 0.07 | 0.15 | 0.0001 | 1×10^{-4} |
| 5(а ₁ , б ₁) | 510 | 1.02 | 19.7 | 3×10^{-5} | 2×10^{-5} | 2×10^{-2} | 0.006 | 0.52 | 0.1 | 0.07 | 1×10^{-4} | 7×10^{-5} |
| 5(а ₂ , б ₂) | 511 | 1.01 | 29.3 | 6×10^{-4} | 3×10^{-5} | 2×10^{-2} | 0.006 | 0.52 | 0.01 | 0.07 | 2×10^{-5} | 7×10^{-5} |

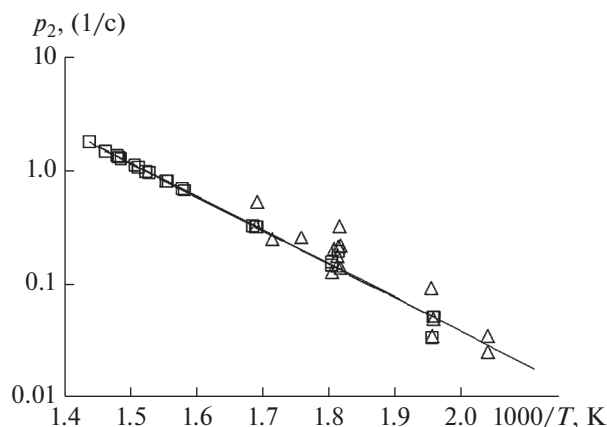


Рис. 6. Скорость десорбции молекул Te_2 – p_2 и аппроксимирующая функция. Сплошная линия – аппроксимирующая функция $p_2(1/c) = 3.3 \times 10^4 \exp(-0.59 \text{ эВ}/k_b T)$, \square – p_2 , полученная из совместных измерений Cd и Te. \triangle – p_2 , полученная из отдельных измерений Te.

дающий поток Te значительно превышает поток Cd. Различия в обработке касаются верхней части диаграмм – рис. 12 (a_1 , a_2), относящейся к Cd (с интенсивностью \sim в четыре раза меньшей). Наибольшее отличие теоретических функций от экспериментальных кривых наблюдается при $t \approx 20:00$. Экспериментальные данные по десорбции Cd в этом интервале значительно превышают значения, полученные при расчете из табл. 2. Разница среднего квадратичного отклонения для Cd – $\text{dev}_{\text{Cd}} \approx 30\%$ (табл. 4, второй столбец справа). При индивидуальном расчете интенсивность десорбции Cd также выше на $\sim 12\%$ (табл. 4, четвертый столбец справа – A_{Cd}).

Имеется ~ 20 кадров, где параметры теоретических функций не подходят к результатам, представленным в табл. 2, но достаточно хорошо согласуются с измеренными токами. Такие кадры отнесены к группе “исключения”.

На рис. 13–15 даны три пары примеров. Отклонения от табличных значений здесь гораздо сильнее (более порядка), чем в примере на рис. 12. Параметры для этих кадров также даны в табл. 4. Такое различие характеристик адсорбционного слоя может быть связано с изменением структуры поверхности кристалла (шероховатости, поликристалличность, мозаичности). В процессе экспериментов изменялись температура образца и интенсивности падающих потоков, т.е. условия роста или испарения кристалла. В этих случаях методом ДБЭ были отмечены изменения на поверхности (на дифрактограммах появлялись кольца, характерные для поликристаллической

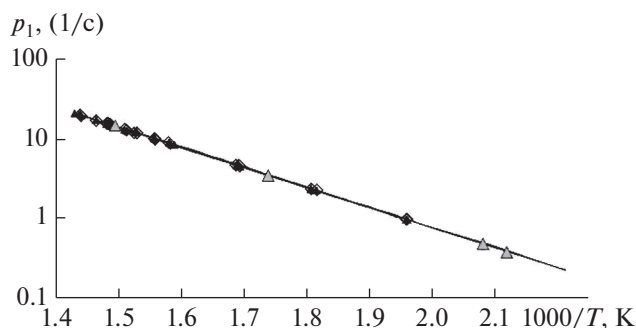


Рис. 7. Скорость десорбции атомов Cd – p_1 и аппроксимирующая функция. Сплошная линия – аппроксимирующая функция – $p_1(1/c) = 8.33 \times 10^4 \exp(-0.5 \text{ эВ}/k_b T)$; \diamond – p_1 , полученная из совместных измерений Cd и Te; \triangle – p_1 , полученная из отдельных измерений Cd.

пленки). На рис. 16 показаны дифрактограммы от поверхности образца на разных этапах экспериментов. Поверхность кристалла в начале экспериментов достаточно гладкая. Дифрактограмма с явно выраженными рефлексами (рис. 16а). После серии экспериментов с низкими температурами кристалла при больших коэффициентах конденсации C_g (поток роста значительно превышает поток испарения) на поверхности образовалась некоторая поликристаллическая пленка (рис. 16б).

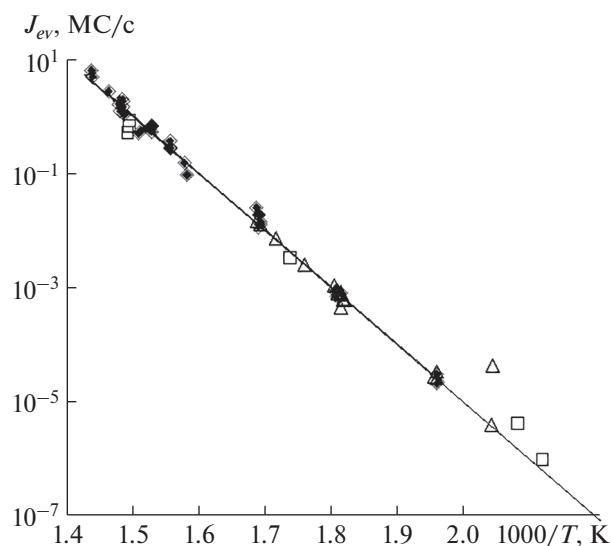


Рис. 8. Экспериментальные точки потока испарения J_{ev} (MC/c) из обработки ~ 60 кадров. Обозначения: сплошная линия – аппроксимирующая функция $J_{ev} = F(T)$; \bullet , \diamond – потоки испарения, полученные при совместном измерении Cd и Te соответственно; \square и \triangle – потоки испарения, полученные при раздельном измерении Cd и Te соответственно.

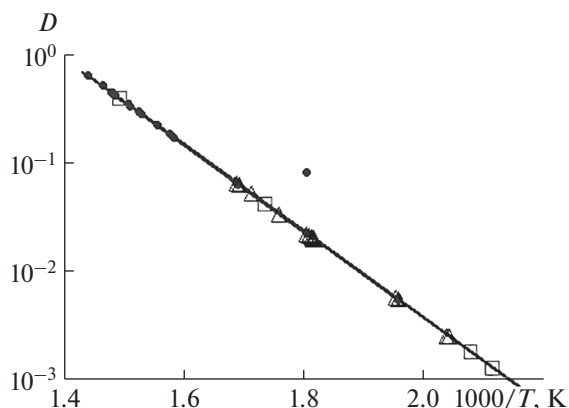


Рис. 9. Экспериментальные значения параметра D для вычисления функций F_{Cd} и F_{Te} и аппроксимирующая функция. Обозначения: сплошная линия – аппроксимирующая функция; ● – параметр D из кадров, полученных в режиме совместного измерения Cd и Te; □ и △ – из кадров, полученных при раздельном измерении Cd и Te соответственно.

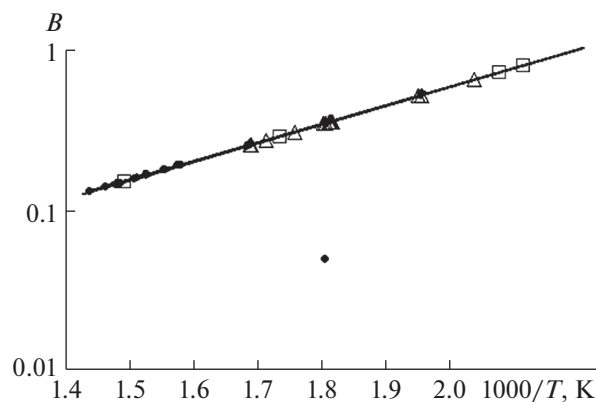


Рис. 10. Экспериментальные значения параметра B для вычисления функций F_{Cd} и F_{Te} и аппроксимирующая функция. Обозначения: сплошная линия – аппроксимирующая функция; ● – параметр B из кадров, снятых в режиме совместного измерения Cd и Te; □ и △ – из кадров, полученных при раздельном измерении Cd и Te.

Эта пленка при нагреве кристалла до высоких температур испарилась (рис. 16в).

ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ РОСТА ОТ ИНТЕНСИВНОСТИ ПАДАЮЩИХ ПОТОКОВ

Одним из важных следствий, вытекающим из результатов данной работы, является возможность рассчитать зависимость скорости роста пленки от интенсивности падающих потоков. Скорость роста = $J_{gr} - J_{ev} = (C_g - 1)J_{ev}$. На рис. 17, 18 даны примеры результатов таких расчетов для значений параметров при $T = 650$ К, $B = 0.17$, $D = 0.26$, $J_{ev} = 0.42$ МС/с. На рис. 17 показана зависимость C_g от потока Cd при фиксированном превышении потока Te над потоком испарения (в 3, 10 и 30 раз). Скорость роста пленки увеличивается пропорционально V_{Cd} (интенсивности потока Cd) до значений $V_{Cd} \sim 15J_{ev}$. При дальнейшем повышении V_{Cd} соответствующего увеличения скорости роста не происходит (насыщение на уровне ~1.6, 3.1 и 7.2 для $V_{Te}/J_{ev} = 3, 10$ и 30 соответственно). На рис. 18 зависимость C_g от потока Te, а фиксирован Cd. Скорость роста пленки от потока Te изменяется более плавно. Скорость роста пленки ~2, 6, $12J_{ev}$ при $V_{Cd}/J_{ev} = 3, 10, 30$ достигается при $V_{Te}/J_{ev} \sim 70$. Эти особенности важно учитывать при разработке технологических процессов МЛЭ для получения тонкопленочных структур.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Получены параметры процессов, происходящих на поверхности кристалла CdTe при росте и испарении в состоянии, близком к равновесию. По измеренным значениям можно оценить величины потока “встраивания”, суммарного роста и реальных заполнений в адсорбционном слое растущего кристалла. В наших экспериментах интенсивности потока $J_{ev} \sim 0.1-5$ МС/с, значения потока “встраивания” – $J_{gr}(11)$ почти везде меньше J_{ev} , т.е. фактически испарение $C_g < 1$.

Оценка заполнений в адсорбционном слое при открытых пучках Cd и Te в основной массе измерений:

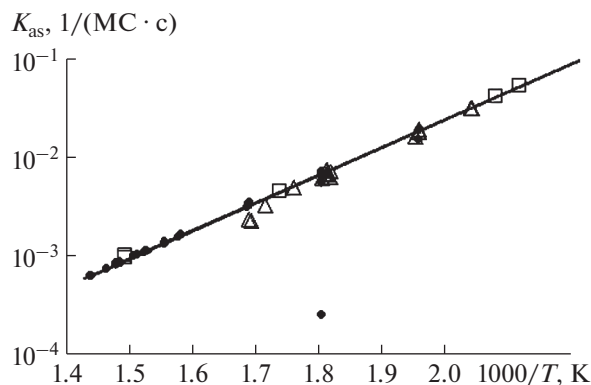


Рис. 11. Экспериментальные точки K_{as} из обработки кадров. Обозначения: сплошная линия – аппроксимирующая функция; ● – параметр K_{as} из кадров, снятых в режиме совместного измерения Cd и Te; □ и △ – K_{as} из кадров, полученных при раздельном измерении Cd и Te соответственно.

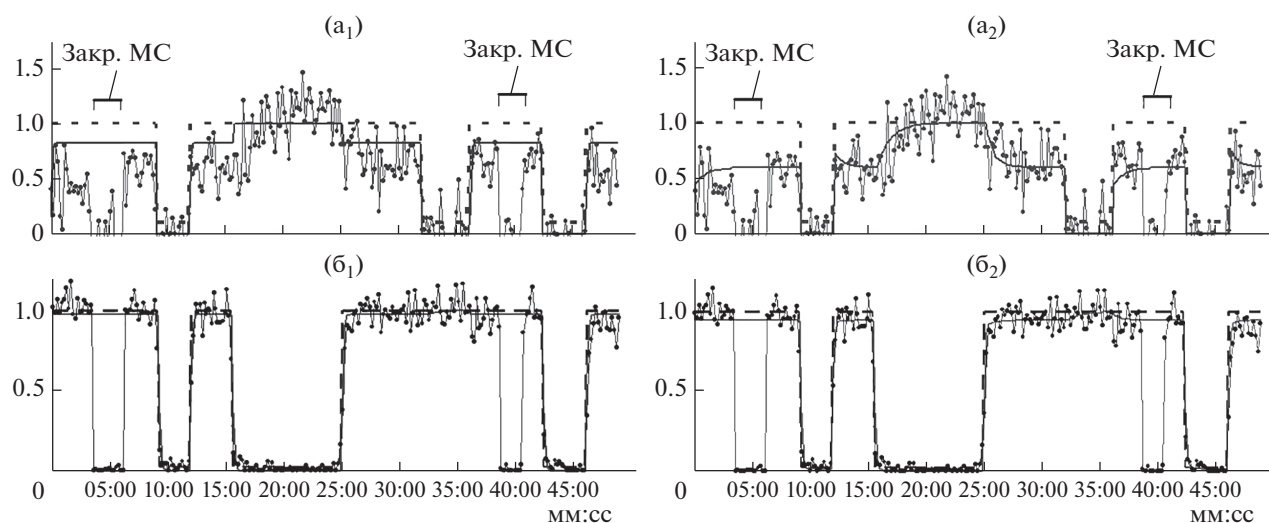


Рис. 12. Совместные измерения ионных токов Cd (а₁) и (а₂) и Te (б₁) и (б₂). Обозначения такие же, как на рис. 1. На диаграммах (а₁) и (б₁) – параметры теоретических функций $F_{Cd}(t)$ и $F_{Te}(t)$: t_{Cd} , t_{Te} , B , D и K_{as} , соответствуют табл. 2, а на (а₂) и (б₂) параметры подобраны отдельно для этого кадра. Параметры в табл. 4.

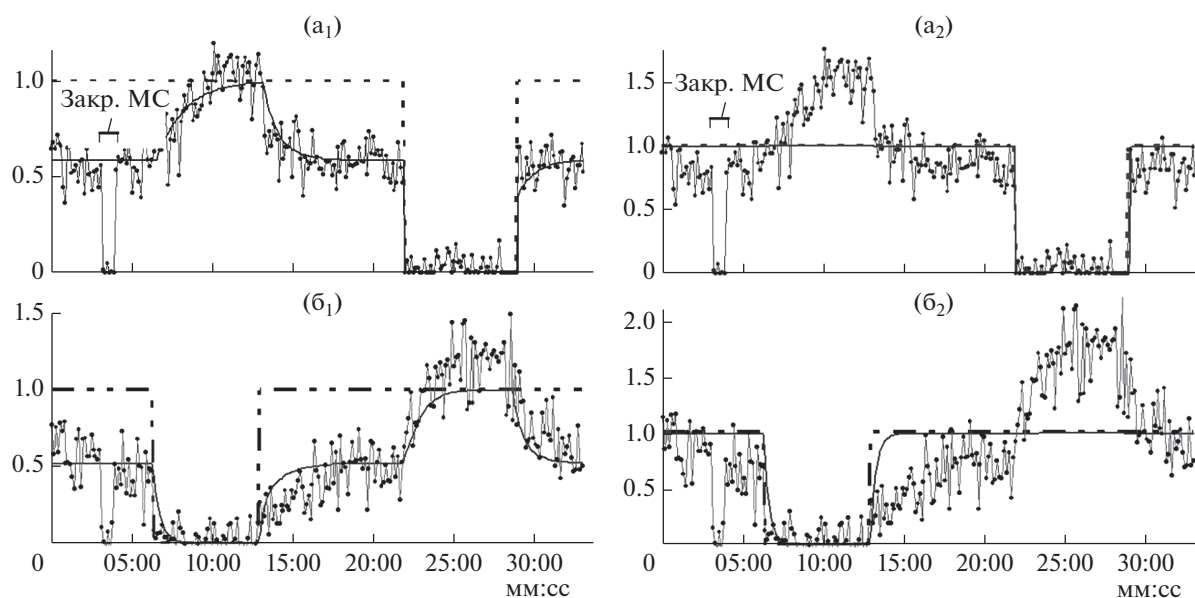


Рис. 13. Пример из группы исключения (параметры в табл. 4). Обозначения такие же, как на рис. 1. На диаграммах (а₁) и (б₁) параметры теоретических функций $F_{Cd}(t)$ и $F_{Te}(t)$ подобраны отдельно для этого кадра, а на (а₂) и (б₂) – параметры t_{Cd} , t_{Te} , B , D и K_{as} соответствуют табл. 2.

Таблица 4. Заданные параметры и результаты расчета для кадров на рис. 12–15. Результат расчета – константа A и средние квадратичные отклонения – dev

| Рис. | t_{Cd} | t_{Te} | ev_{Cd} | ev_{Te} | K_{as} | D | B | A_{Cd} | A_{Te} | dev_{Cd} | dev_{Te} |
|--------------------------------------|----------|----------|--------------------|--------------------|----------------------|--------|-------|----------|----------|----------------------|--------------------|
| 12(а ₁ , б ₁) | 0.42 | 6.52 | 3×10^{-4} | 4×10^{-4} | 0.056 | 0.0225 | 0.345 | 0.037 | 0.174 | 8.3×10^{-5} | 2×10^{-4} |
| 12(а ₂ , б ₂) | 0.42 | 6.13 | 3×10^{-4} | 4×10^{-4} | 3.9×10^{-4} | 0.0783 | 0.044 | 0.045 | 0.18 | 6×10^{-5} | 2×10^{-4} |
| 13(а ₁ , б ₁) | 0.99 | 19.1 | 2×10^{-5} | 2×10^{-5} | 8×10^{-5} | 1.7 | 0.003 | 0.13 | 0.06 | 1×10^{-4} | 7×10^{-5} |
| 13(а ₂ , б ₂) | 0.99 | 19.1 | 6×10^{-4} | 3×10^{-5} | 2×10^{-2} | 0.007 | 0.45 | 0.09 | 0.04 | 5×10^{-4} | 2×10^{-4} |
| 14(а ₁ , б ₁) | 0.95 | 19.8 | 2×10^{-5} | 1×10^{-5} | 2×10^{-3} | 0.39 | 0.23 | 0.23 | 0.17 | 4×10^{-4} | 4×10^{-4} |
| 14(а ₂ , б ₂) | 0.91 | 20.6 | 3×10^{-5} | 2×10^{-5} | 2×10^{-2} | 0.006 | 0.51 | 0.15 | 0.14 | 9×10^{-4} | 2×10^{-3} |
| 15(а ₁ , б ₁) | 0.22 | 3.2 | 2×10^{-2} | 3×10^{-2} | 2×10^{-3} | 1.6 | 0.26 | 0.15 | 0.05 | 2×10^{-4} | 8×10^{-5} |
| 15(а ₂ , б ₂) | 0.22 | 3.2 | 2×10^{-2} | 3×10^{-2} | 3×10^{-3} | 0.06 | 0.26 | 0.11 | 0.03 | 4×10^{-4} | 2×10^{-4} |

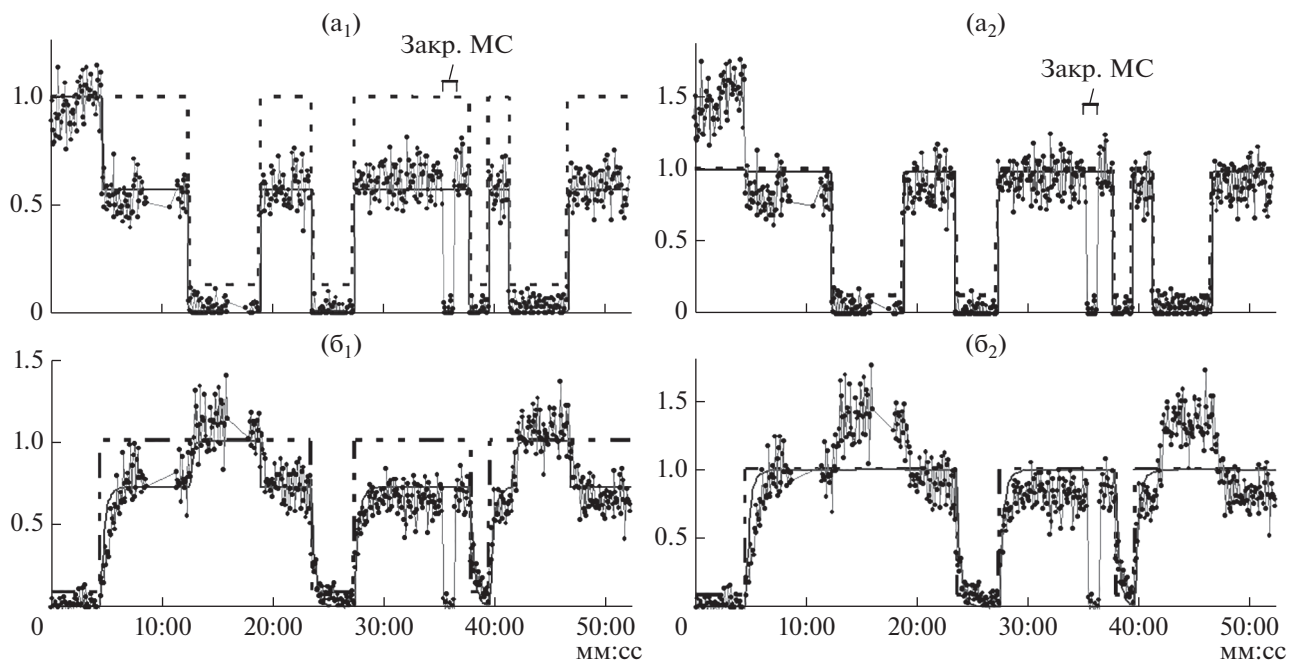


Рис. 14. Пример из группы исключения (параметры в табл. 4). Обозначения такие же, как на рис. 1. На диаграммах (а₁) и (б₁) параметры теоретических функций $F_{Cd}(t)$ и $F_{Te}(t)$ подобраны отдельно для этого кадра, а на (а₂) и (б₂) – параметры t_{Cd} , t_{Te} , B , D и K_{as} соответствуют табл. 2.

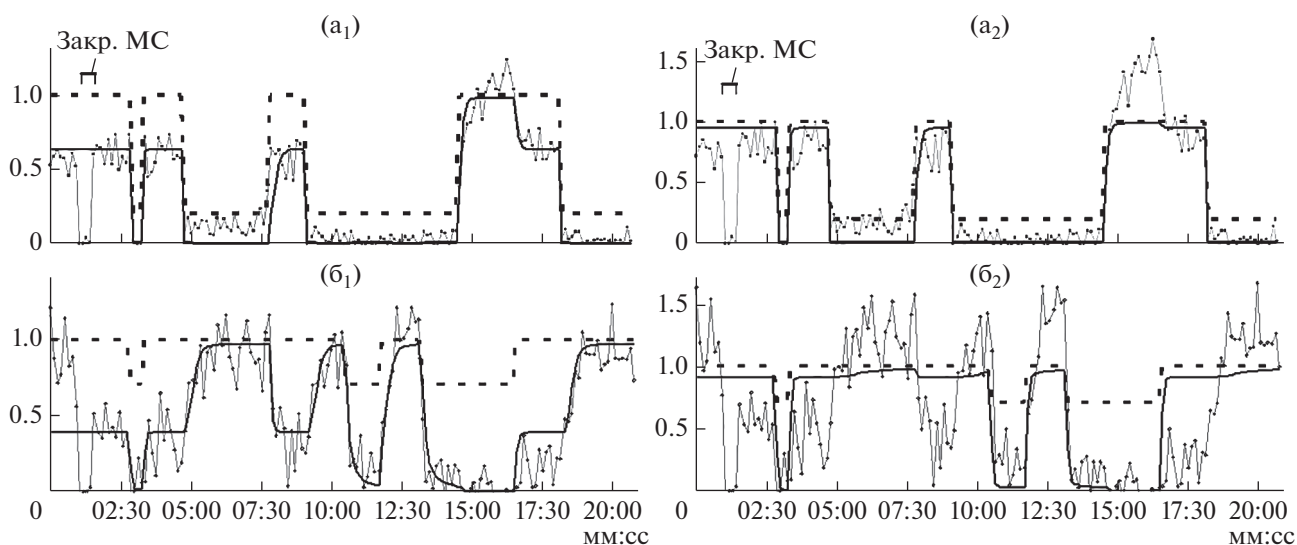


Рис. 15. Пример из группы исключения (параметры в табл. 4). Обозначения такие же, как на рис. 1. На диаграммах (а₁) и (б₁) параметры теоретических функций $F_{Cd}(t)$ и $F_{Te}(t)$ подобраны отдельно для этого кадра, а на (а₂) и (б₂) – параметры t_{Cd} , t_{Te} , B , D и K_{as} соответствуют табл. 2.

$$n_{Cd} = J_{Cd}/p_{Cd} \sim 0.1 \text{ монослой (диапазон } 0.01-1),$$

$$n_2 = J_2/p_2 \sim 1 \text{ монослой (диапазон } 1-20),$$

$$n_1 = f(t)(J_{ev}/K_{as})^{1/2} \sim 3-20 \text{ монослоев (диапазон } 0.001-100).$$

При вычислении $n_1 = (E-E_0)/(K_{as}/J_{ev})^{1/2}$ используется много параметров, поэтому величина ошибки достаточно высока. Тем не менее, надо

отметить, что заполнение атомами Те может быть более монослоя, что выходит за пределы применимости модели, и велика вероятность образования больших “агрегатов” Те. Это, возможно, требует коррекции модели и уравнений (2) и (3).

Эксперименты проведены для разных ростовых условий на поверхности: температура образца,

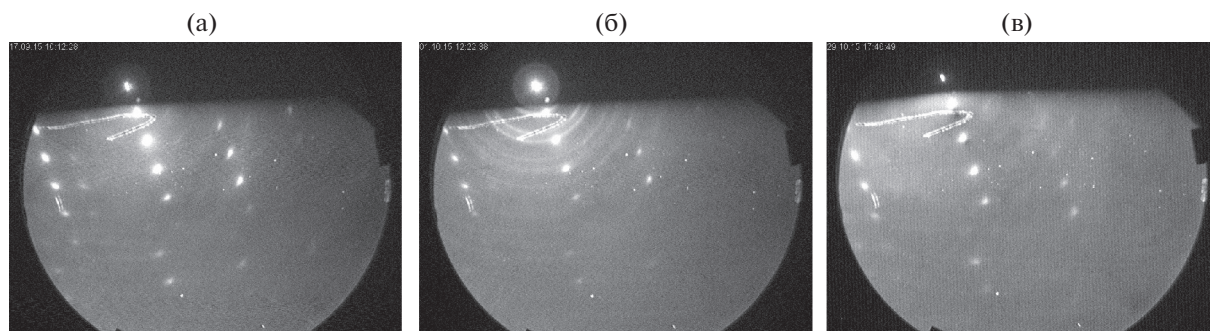


Рис. 16. Дифрактограммы от поверхности образца, полученные на разных этапах экспериментов.

интенсивности падающих потоков, модуляция. При больших отклонениях от равновесия возможно изменение структуры поверхности кри-

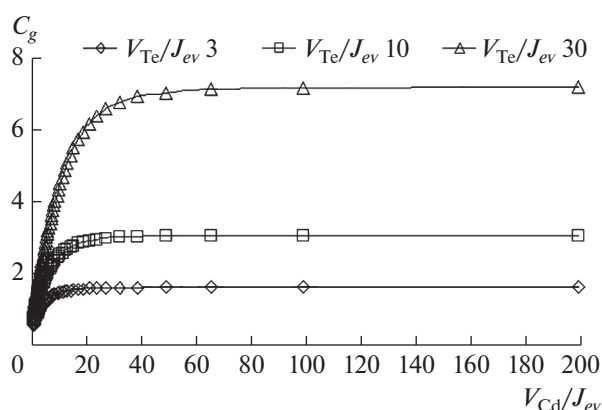


Рис. 17. Зависимость C_g от интенсивности падающего потока: Cd – потоки на поверхности, приведенные к интенсивности $J_{ev} = 0.42$ м/с при $T_s = 650$ К. Поток Те фиксирован (в 3, 10 и 30 раз превышает J_{ev}).

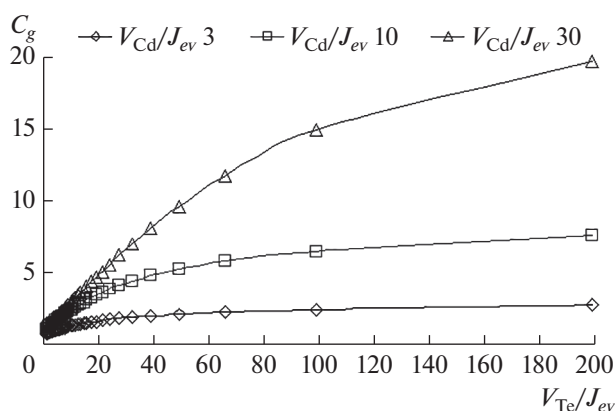


Рис. 18. Зависимость C_g от интенсивности падающего потока: потоки на поверхности, приведенные к интенсивности $J_{ev} = 0.42$ м/с при $T = 650$ К. Поток Cd фиксирован (в 3, 10 и 30 раз превышает J_{ev}).

сталла (шероховатости, поликристалличность, мозаичности). Появление поликристаллической пленки в процессе исследования наблюдалось методом ДБЭ. Поэтому наличие данных с параметрами, отличающимися от табличных, можно объяснить изменением адсорбционного слоя на поверхности в процессе измерений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено комплексное исследование процессов на поверхности CdTe при облучении молекулярными пучками Cd и Te. Разработаны методики и программы для управления условиями эксперимента и обработки получаемой информации.

Показано, что предложенная модель адсорбции может быть использована для описания процессов испарения и конденсации на поверхности CdTe в условиях роста из молекулярных пучков Cd и Te. Полученные результаты согласуются с предложенной моделью адсорбции, что позволило определить энергии активации процессов.

Показан пример использования этих результатов для расчета скорости роста в зависимости от интенсивности падающих потоков Cd и Te при заданной температуре кристалла. Данные расчеты показывают, что зависимость скорости роста от потока Te при постоянном потоке Cd в широком диапазоне близка к линейной. В то же время, при увеличении потока Cd при постоянном потоке Te происходит “быстрое насыщение” скорости роста. Эти особенности важно учитывать при разработке технологических процессов МЛЭ для получения тонкопленочных структур.

Исследованные описанным методом процессы зависят от структуры поверхности кристалла (шероховатости, поликристалличность, мозаичности). Появление поликристаллической пленки в процессе исследования наблюдалось методом ДБЭ. В связи с этим наличие данных с параметра-

ми, отличающимися от табличных, объясняется изменением адсорбционного слоя на поверхности, структура которой изменялась в процессе измерений при больших отклонениях от равновесия. Для уточнения этого предположения требуются исследования с привлечением дополнительных методов контроля поверхности образца (например, метод атомно-силовой микроскопии).

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа проводилась в рамках Госзадания ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН и по программе фундаментальных исследований Президиума РАН. Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН при поддержке Минобрнауки (проект RFMEFI62119X0035).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Arthur J.R. // Surface Science. 2002. V. 500. P. 189. [https://doi.org/10.1016/S0039-6028\(01\)01525-4](https://doi.org/10.1016/S0039-6028(01)01525-4)
2. Finnie P., Homma Y. // Surface Science. 2002. V. 500. P. 437. [https://doi.org/10.1016/S0039-6028\(01\)01730-7](https://doi.org/10.1016/S0039-6028(01)01730-7)
3. Cheng K.Y. // J. Vacuum Science & Technology. 2013. V. A 31(5). P. 050814. <https://doi.org/10.1116/1.4816932>
4. Shu T., Lu P., Zhang B., Wang M., Chen L., Fu X., Xu C., Wu H. // J. Crystal Growth. 2015. V. 420. P. 17. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2015.03.031>
5. Meinander K., Preston J.S. // Surface Science. 2015. V. 632. P. 93. <http://dx.doi.org/10.1016/j.susc.2014.09.013>
6. Neretina S., Hughes R.A., Britten J.F., Sochinskii N.V., Preston J.S., Mascher P. // Nanotechnology. 2007. V. 18. P. 275301. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/18/27/275301>
7. Herman M.A. // Thin Solid. Films. 1995. № 3. P. 267.
8. Shelton H., Cho A.Y.H. // J. Appl. Phys. 1966. V. 37. 9. P. 3544. <https://doi.org/10.1063/1.1708898>
9. Hudson J.B., Sandejas J.S. // J. Vacuum Science & Technology. 1967. V. 4. P. 230
10. Гельман Ю.А., Дымищ Ю.М., Самохвалов Ю.Ф., Сенько А.Ф., Виноградов В.Ф., Лифшиц И.Е., Станишевский Э.Я., Чернов А.А. // ПТЭ. 1994. № 5. С. 181.
11. Михайлов В.И., Поляк Л.Е. // ПТЭ. 2002. № 5. С. 160.
12. Михайлов В.И., Поляк Л.Е., Каневский В.М. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2007. № 6. С. 53.
13. Михайлов В.И., Поляк Л.Е., Каневский В.М. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2007. № 11. С. 48.
14. Михайлов В.И., Буташин А. В., Каневский В.М., Поляк Л.Е., Ракова Е.В., Муслимов А.Э., Кварталов В.Б. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2011. № 6. С. 97.
15. Goldfinger P., Jeunehomme M. // Trans. Faraday Soc. 1963. V. 59. P. 2851. <https://doi.org/10.1039/TF9635902851>
16. Smith D.L., Pickhardt V.Y. // J. Appl. Phys. 1975. V. 46. № 6. P. 2366. <https://doi.org/10.1063/1.321915>
17. Gaillard J.P. // Rev. Phys. Appl. 1987. V. 22. P. 457. <https://doi.org/10.1051/rphysap:01987002206045700>

Mass-Spectrometry Investigation of Kinetics of CdTe Molecular-Beam Epitaxy

V. I. Mikhaylov¹, L. E. Polyak^{1,*}

¹Institute of Crystallography, FSRC “Crystallography and Photonics”, RAS, Moscow, 117333 Russia

*e-mail: vmikh@ns.crys.ras.ru

The adsorption Cd and Te on the surface of the CdTe crystal was studied *in-situ* by mass-spectrometer and RHEED in the temperature range T (K) = 500–700 and intensity of the incident flows $V_{Cd} = 10^{-2}$ monolayer/s and $V_{Te} = 0.5–5$ monolayer/s. Computer programs have been developed to control the experiment and process information from instrumentation. The growth parameters obtained were consistent with the adsorption model proposed. Activation energies of the “evaporation” and Cd and Te₂ desorption were determined to be 2 eV, 0.5 eV and 0.59 eV correspondingly. The dependence of the growth rate on the Te₂ flux at a constant Cd flux over a wide range was found to be linear. The dependence of the growth rate on the Cd flux at a constant Te flux turned out to be nonlinear, reaching saturation. Growth parameters were dependent on the structural features of the crystal surface (roughness, polycrystallinity, mosaic, etc.), accompanying film growth at large deviations from equilibrium.

Keywords: CdTe, mass-spectrometry, MBE, RHEED, adsorption, condensation, evaporation.