

05;06;11;12

## Формирование ориентированных пленок теллурида кадмия на аморфной подложке в резко неравновесных условиях

© А.П. Беляев, В.П. Рубец, И.П. Калинин

Санкт-Петербургский государственный технологический институт  
198013 Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: Belyaev@tu.spb.ru

(Поступило в Редакцию 20 июня 2000 г.)

Сообщается о первых экспериментах по выращиванию ориентированных пленок теллурида кадмия на неориентирующей подложке (стекло), охлажденной до отрицательной температуры (в резко неравновесных условиях). Представлены данные технологических, электронографических и рентгеновских исследований. Получена диаграмма конденсации, отличающаяся наличием двух температурных областей с аномально низкой скоростью формирования пленок. Показано, что пленки, синтезированные в режимах с аномально низкой скоростью формирования, имеют достаточно хорошее кристаллическое совершенство (текстура). Процессы формирования ориентированных пленок на аморфной подложке при резко неравновесных условиях успешно интерпретируются в рамках солитонной модели гетероэпитаксии.

### Введение

Как правило, ориентированные пленки получают при повышенных температурах (для обеспечения нужной подвижности частиц) в условиях, близких к равновесным. Однако в последнее время появились исключения. В частности, в [1,2] приводились неожиданные результаты о получении высокоориентированных пленок при конденсации теллурида кадмия на охлажденную подложку из слюды (резко неравновесные условия). Продолжая исследования, нам удалось синтезировать тем же методом достаточно хорошо ориентированные пленки, но уже на аморфной подложке. В связи с этим ниже представлены данные, информирующие о первых результатах изучения этого явления.

### Методика эксперимента

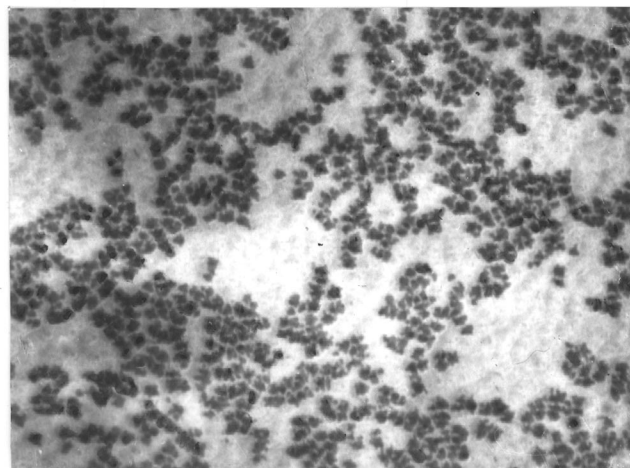
Исследованные образцы синтезировались в вакууме  $10^{-3}$  Па методом квазизамкнутого объема на подложке из стекла, охлажденной жидким азотом [1]. Температура реактора-испарителя составляла 900 К. Контроль температуры подложки осуществлялся медь-константовыми термодарами. Перегрев поверхности подложки контролировался по методике [2]. Интегральные скорости роста вычислялись исходя из опытных данных о толщине и времени формирования этой толщины в пленке.

Измерения толщины осуществлялись на интерферометре МИИ-4, исследование структур — на электронографе ЭМР-100 и рентгенодифрактометре ДРОН-4 при комнатной температуре в  $\text{CuK}_\alpha$ -излучении; исследование морфологии поверхности — на электронном микроскопе ПЭМ-100.

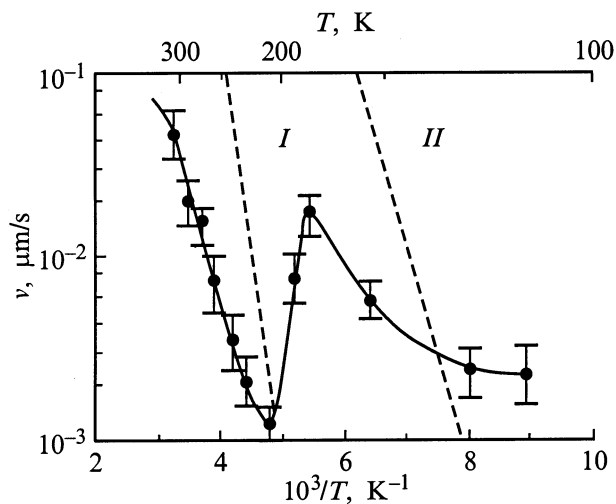
### Результаты эксперимента

Исследовались процессы формирования пленок в резко неравновесных условиях (РНУ) при конденсации теллурида кадмия на подложку из стекла. Исследования включали технологические эксперименты, изучение морфологии поверхности в электронном микроскопе и изучение дифракции рентгеновского излучения и электронов. Основные результаты исследований представлены на рис. 1–4.

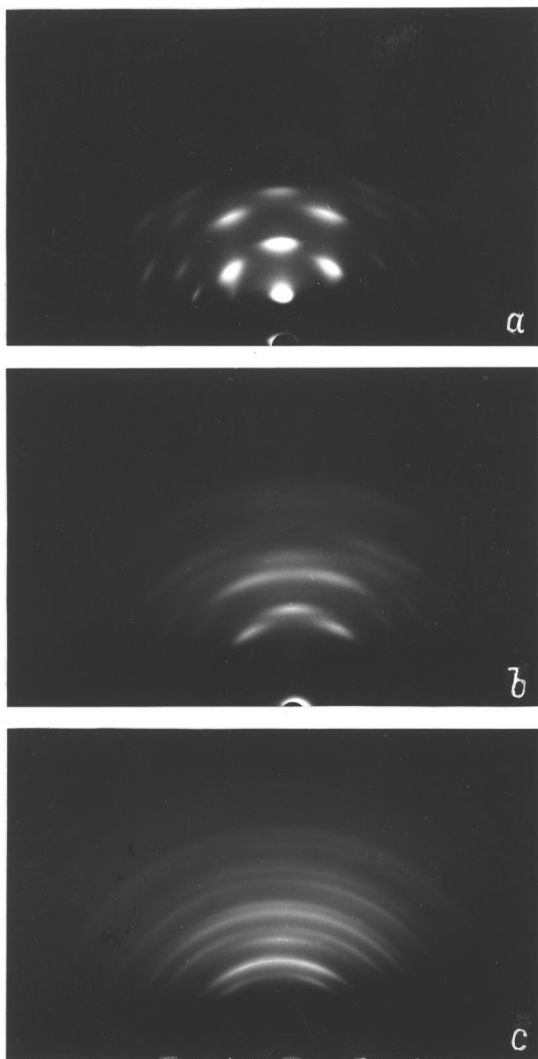
На рис. 1 представлена типичная поверхность пленки на поздней стадии роста. Рисунок демонстрирует сплошность и нормальность формирования. На поверхности уже сформировавшегося сплошного слоя пленки отчетливо видны зародыши — дисперсные частицы (ДЧ) нового слоя.



**Рис. 1.** Фрагмент типичной поверхности пленки теллурида кадмия на поздней стадии роста. Температура подложки  $T_s = 210$  К,  $\times 70000$ .



**Рис. 2.** Диаграмма конденсации пленок теллурида кадмия на стеклянной подложке в резко неравновесных условиях.



**Рис. 3.** Электронограммы пленок теллурида кадмия толщиной  $h$ , синтезированных в резко неравновесных условиях на подложке из стекла при температуре  $T_s = 210$  (a, b); 250 К (c);  $h = 0.8$  (a, c);  $0.1 \mu\text{m}$  (b).

На рис. 2 представлена диаграмма конденсации. Ее отличает наличие двух областей с аномально низкой скоростью конденсации. Здесь интегральная скорость роста пленок уменьшалась на несколько порядков. Толстые пленки (толщиной более  $0.8 \mu\text{m}$ ), синтезированные в этих режимах, отличались достаточно хорошим кристаллическим совершенством. Это демонстрирует рис. 3, a, на котором представлена типичная электронограмма пленки толщиной  $0.8 \mu\text{m}$ . На более ранних стадиях роста совершенство кристаллической структуры той же пленки было гораздо хуже. Это демонстрирует рис. 3, b, на котором показана типичная электронограмма пленки толщиной  $0.1 \mu\text{m}$ . Ранние стадии роста пленок отличались еще и тем, что скорость формирования слоя здесь была очень высокой. Нам не удалось получить островковой пленки непосредственно на стеклянной подложке при любом из режимов, охватываемых диаграммой конденсации на рис. 2.

Пленки, синтезированные вне режимов аномальной скорости конденсации, имели поликристаллическую структуру даже при большой толщине. Это демонстрирует рис. 3, c, на котором представлена типичная электронограмма от пленки толщиной  $0.8 \mu\text{m}$ , выращенной при температуре подложки  $T_s = 250$  К.

Рис. 4 демонстрирует различие в структуре ориентированных пленок, выращенных в разных областях аномальной скорости конденсации. Рис. 4, a отражает фрагмент типичной рентгенограммы от пленки, выращенной при температуре подложки  $T_s = 140$  К, а рис. 4, b — рентгенограмму от пленки, выращенной при температуре подложки  $T_s = 210$  К. Сравнивая рентгенограммы можно видеть, что пленки имеют разные кристаллографические направления роста.

## Обсуждение результатов

Процесс формирования ориентированного слоя на ориентирующей подложке в резко неравновесных условиях (РНУ) включает в себя зародышеобразование, конденсацию, встраивание, коалесценцию, слияние в сплошной слой. Отличительные особенности процесса скрываются в зародышеобразовании и встраивании [1,2]. Зародышеобразование при столь высоких пересыщениях происходит в паровой фазе, а встраивание при столь низких температурах обусловлено движением ДЧ новой фазы за счет солитонного механизма переноса массы [3]. Совместное действие этих особенностей приводит к коррелированной ориентации ДЧ и низкой скорости формирования слоя.

Возникновение солитонов обусловлено определенным соотношением между постоянными решеток ДЧ  $a(T_r)$  и подложки  $b(T_s)$ . При близости  $a(T_r)$  и  $b(T_s)$  необходимое соотношение между ними можно достигнуть варьированием температуры подложки  $T_s$  в силу отличия последней от температуры ДЧ  $T_r$ .

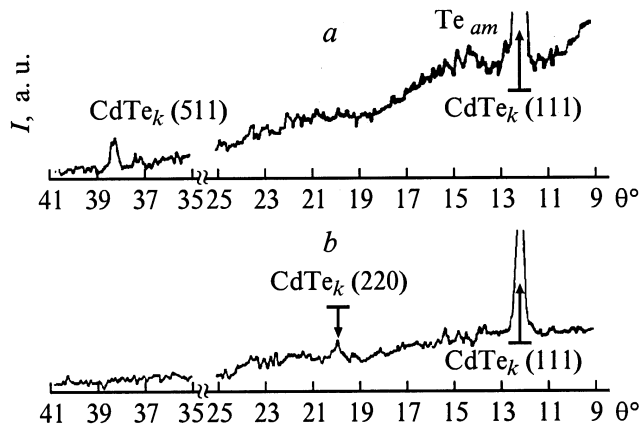


Рис. 4. Фрагмент рентгенограммы пленок теллурида кадмия толщиной  $1 \mu\text{m}$ , синтезированных при температуре подложки  $T_s = 140$  (a),  $210$  K (b).

Теоретически необходимое условие возникновения солитонов было получено только для одномерной модели. Конкретный его вид с учетом температурной зависимости параметров решеток  $a(T_r)$  и  $b(T_s)$  такой [2]:

$$\frac{a(T_r) - b(T_s)}{b(T_s)} > (2/\pi)^{3/2} \sqrt{f/\lambda \cdot a(T_r)} \dots \quad (1)$$

Здесь  $f$  и  $\lambda$  — параметры, характеризующие силы взаимодействия между атомами ДЧ и подложки и силы взаимодействия между атомами подложки. При формировании пленок на аморфной подложке процесс начинается на подложке лишенной регулярной кристаллической решетки и, следовательно, здесь возникновение солитонов невозможно. Однако если пленка будет расти путем нормального послойного роста, то слои пленки, следующие за первым, будут формироваться уже на кристаллической подложке, пусть и сильно дефектной (напомним, что при РНУ слои формируются путем конденсации ДЧ, а не отдельных атомов). Значит, здесь при определенных температурах подложки  $T_s$ , ведущих к выполнению условий типа (1), уже могут возникать солитоны. Последние в силу своих особенностей [4] должны будут повышать подвижность ДЧ, на конечное время задерживать рассеяние избыточной энергии ДЧ и тем самым способствовать низкому коэффициенту аккомодации и формированию ориентированных слоев.

Обсуждаемый эксперимент полностью соответствует вышесказанному. Рост ориентированных пленок имел место только при строго определенных температурах подложки (когда выполнялись условия типа (1)). Интегральная скорость роста при формировании ориентированных слоев резко понижалась (рис. 2, энергия солитонов рассеивалась медленно, температура ДЧ конечное время оставалась высокой, отсюда низкий коэффициент аккомодации). Кристаллическое совершенство пленки возрастало вместе с ее толщиной (рис. 3, пленка росла послойно, с каждым новым слоем происходило "залечи-

вание" дефектов предыдущего слоя). Начальные стадии роста отличались высокой скоростью (когда солитоны еще не могли возникнуть), двум температурным областям I, II ориентированного роста пленок соответствовало два разных кристаллографических направления роста слоев (на рис. 2 и 4 в разных температурных областях в плоскости совмещения решеток были разные постоянные  $a(T_r)$  и  $b(T_s)$ ).

## Выводы

1. Резко неравновесные условия конденсации пленок на аморфной охлажденной подложке включают в себя режимы, реализация которых приводит к формированию ориентированных слоев.

2. Процессы формирования ориентированных пленок на аморфной подложке при резко неравновесных условиях успешно интерпретируются в рамках солитонной модели гетероэпитаксии.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№ 99-03-32676).

## Список литературы

- [1] Беляев А.П., Рубец В.П., Калинин И.П. // ФТТ. 1997. Т. 39. Вып. 2. С. 383–386.
- [2] Беляев А.П., Рубец В.П., Калинин И.П. // Неорганические материалы. 1998. Т. 34. № 3. С. 281–287.
- [3] Кукушкин С.А., Осипов А.В. // ФТТ. 1994. Т. 36. Вып. 5. С. 1461–1469.
- [4] Додд Р., Эйлбек Дж., Гиббон Дж., Моррис Х. Солитоны и нелинейные волновые уравнения. М.: Мир, 1988. 696 с.