

Влияние лазерного излучения на формирование ориентированных слоев сульфида кадмия в резко неравновесных условиях

© А.П. Беляев[¶], В.П. Рубец, В.В. Антипов

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет),
198013 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 16 февраля 2004 г. Принята к печати 14 апреля 2004 г.)

Сообщается о результатах исследования влияния лазерного излучения малой мощности на формирование ориентированных слоев сульфида кадмия из паровой фазы на подложке, охлажденной жидким азотом (резко неравновесные условия).

Приводятся результаты технологических экспериментов, результаты исследования дифракции электронов (электронограммы) и данные о диаграмме конденсации. Выявлено, что в зависимости от температуры подложки лазерное излучение может как способствовать повышению кристаллического совершенства пленок, так и оказывать отрицательное воздействие. Показано, что диаграмма конденсации слоев сульфида кадмия при облучении подложки лазерным излучением малой мощности сдвинута относительно диаграммы конденсации, полученной без воздействия лазерного излучения, в сторону более высоких температур. Результаты эксперимента интерпретируются в рамках модели солитонной гетероэпитаксии.

В [1–9] сообщалось об исследованиях процессов формирования слоев бинарных соединений $A^{II}B^{VI}$ при вакуумной конденсации из паровой фазы на подложку, охлажденную жидким азотом (резко неравновесные условия (РНУ)). Результаты этих исследований позволили впервые синтезировать при столь низких температурах подложки полупроводниковые эпитаксиальные пленки на ориентирующей подложке и ориентированные пленки на аморфной подложке, получить структуры, обладающие нетривиальными свойствами. В связи с этим далее приводятся данные о изучении влияния лазерного излучения малой мощности на процессы формирования слоев сульфида кадмия в РНУ.

1. Исследованные образцы и методика эксперимента

Исследованные образцы синтезировались в вакууме 10^{-3} Па на подложке из слюды-мусковит, охлаждаемой жидким азотом по методике, описанной в [2,3]. Для синтеза использовалось открытое испарение, при котором испаритель-реактор с порошком сульфида кадмия располагался над подложкой на расстоянии порядка 50 мм. Его температура составляла 900 К. Контроль температуры испарителя и подложки осуществлялся медьконстантановыми термопарами. Возможность перегрева поверхности подложки контролировалась по методике [2,3]. Интегральные скорости роста вычислялись исходя из опытных данных о толщине пленки и времени формирования этой толщины в пленке.

Измерение толщины пленок осуществлялось на интерферометре МИИ-4, исследование структуры — на электронографе ЭМР-100.

Толщина исследованных слоев составляла величину ~ 0.2 мкм.

Для синтеза в лазерном излучении применялся газовый лазер ИЛГИ-503 мощностью 3 мВт и частотой следования импульсов 100 Гц на длине волны $\lambda = 337$ нм. Излучение от лазера с помощью специальной оптической системы проецировалось под углом на подложку в виде „пятна“ диаметром ~ 2 мм.

2. Результаты эксперимента

Исследовались процессы формирования пленок сульфида кадмия РНУ, т.е. при синтезе на подложку, охлаждаемую жидким азотом. Исследования включали технологические эксперименты, снятие диаграмм конденсации (зависимости скорости роста от температуры подложки) и изучение дифракции электронов.

Диаграмма конденсации исследованной системы качественно имела вид, подобный диаграмме конденсации слоев теллурида кадмия [9]. Она содержала области с аномально низкой скоростью конденсации, в которых интегральная скорость роста пленок уменьшалась на несколько порядков. Пленки, синтезированные в этих режимах, отличались высоким кристаллическим совершенством. Это демонстрирует рис. 1, а, на котором представлена электронограмма от образца, полученного при оптимальной для ориентированного роста температуре подложки $T_s^{\text{opt}} = 200$ К. При синтезе в том же технологическом режиме, но при облучении подложки лазером, структура пленок ухудшалась (рис. 1, б), а скорость роста несколько возрастала (возрастание на $\sim 10\%$). При повышении температуры подложки несколько выше T_s^{opt} ситуация изменялась на обратную. Действие лазера улучшало совершенство кристаллической структуры пленки, а скорость роста пленок несколько уменьшалась (уменьшение на $\sim 10\%$). Этот факт демонстрируется рис. 2, 3, на которых представлены типичные электро-

[¶] E-mail: Belyaev@tu.spb.ru

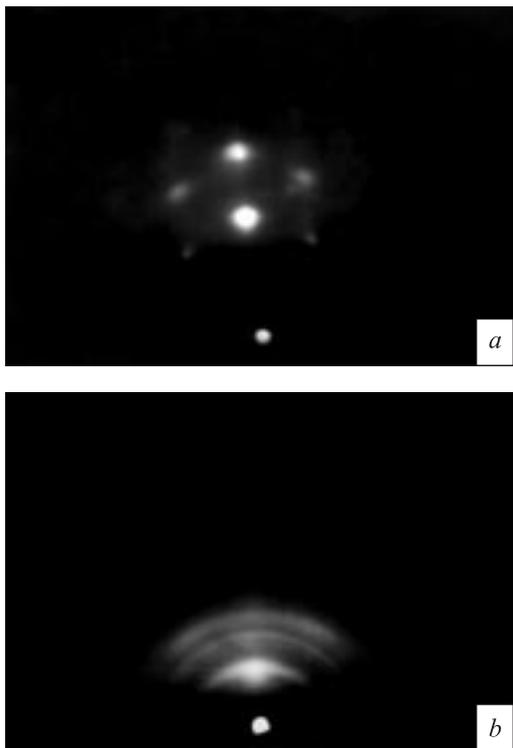


Рис. 1. Электронограммы от пленок сульфида кадмия, синтезированных при температуре подложки $T_s = 200$ К без действия лазерного излучения (a) и под действием лазерного излучения (b).

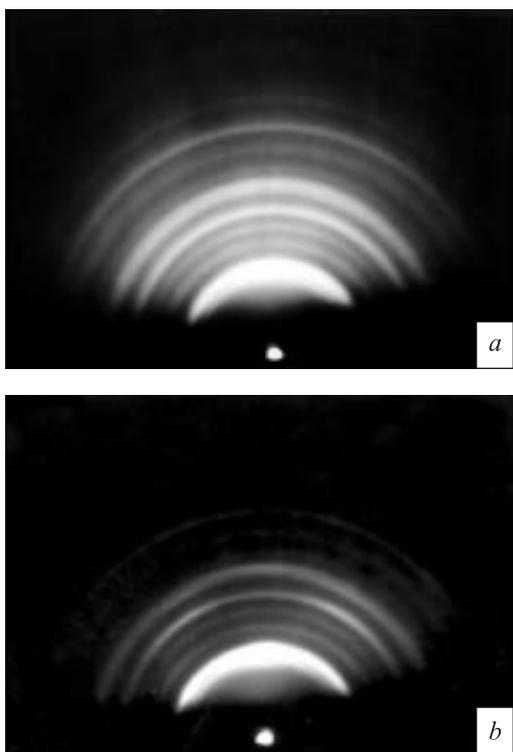


Рис. 2. Электронограммы от пленок сульфида кадмия, синтезированных при температуре подложки $T_s = 220$ К без действия лазерного излучения (a) и под действием лазерного излучения (b).

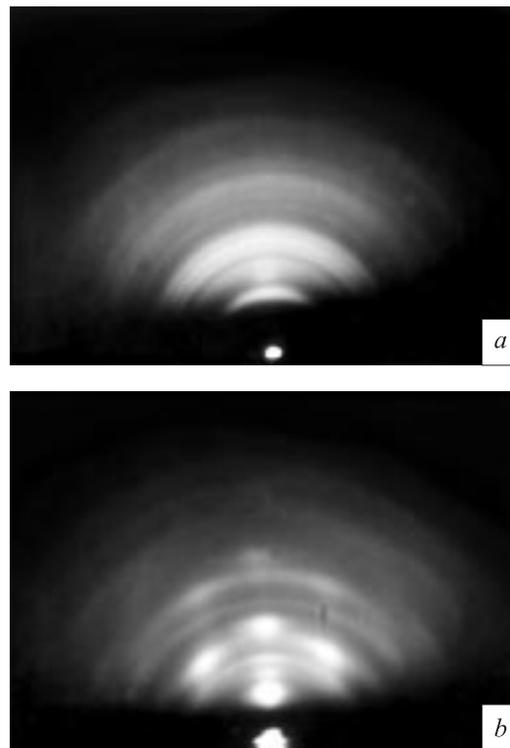


Рис. 3. Электронограммы от пленок сульфида кадмия, синтезированных при температуре подложки $T_s = 230$ К без действия лазерного излучения (a) и под действием лазерного излучения (b).

нограммы от пленок, синтезированных соответственно при $T_s = 220$ К и $T_s = 230$ К без лазерного излучения (a), и от пленок, синтезированных при тех же температурах подложки, но при облучении подложки лазером (b).

3. Обсуждение результатов

Как известно [2,3,5,6,9], процесс формирования ориентированного слоя на ориентирующей подложке в РНУ содержит в себе зародышеобразование, конденсацию (образование дисперсных частиц (ДЧ) на подложке), встраивание, слияние в сплошной слой. Отличительные особенности формирования в РНУ содержатся в зародышеобразовании и встраивании. Зародышеобразование при столь высоких пересыщениях происходит в паровой фазе, а встраивание ДЧ в кристаллическую решетку, при столь *низких температурах*, осуществляется *бездиффузионным путем* — за счет солитонного механизма переноса массы. Совместное действие этих особенностей приводит к коррелированной ориентации ДЧ и низкой скорости формирования слоя.

Солитонный механизм переноса массы представляет собой перемещение ДЧ за счет движения дислокаций несоответствия между ДЧ и подложкой. Причем движения своеобразного: движения в виде частицеподобных

волн (солитонов). При таком способе движения происходит последовательное перемещение атомов в плоскости ДЧ–подложка. В каждый момент времени почти все атомы ДЧ остаются неподвижными относительно подложки, а двигается только очень небольшая группа атомов. Атомы перед фронтом волны не двигаются, потому что до них волна еще не дошла, атомы за фронтом не двигаются, потому что через них волна уже распространилась. В перемещении участвуют только атомы, составляющие в данный момент фронт волны. При прохождении такой волны (одного солитона) ДЧ сдвигается на одну постоянную решетки. При низких температурах, когда коэффициент диффузии атомов очень мал, бездиффузионный, солитонный механизм становится предпочтительнее по сравнению с другими механизмами массопереноса, в силу способности солитонов распространяться с малыми потерями энергии.

Возникновение солитонов обусловлено определенным соотношением между постоянными решеток ДЧ $a(T_r)$ и подложки $b(T_s)$. Это соотношение следует из условия, выполнение которого необходимо для возникновения солитонов и которое теоретически было получено в работе [10]:

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

Здесь f и λ — параметры, характеризующие силы взаимодействия между атомами ДЧ и подложки и силы взаимодействия между атомами подложки соответственно.

При близости $a(T_r)$ и $b(T_s)$ необходимого соотношения между ними можно достигнуть варьированием температуры подложки T_s и температуры ДЧ T_r .

В работах, в которых ранее исследовались процессы формирования слоев в РНУ [2–9], выполнение условия (1) обеспечивалось варьированием температуры подложки T_s . В обсуждаемом эксперименте добавляется еще одна степень свободы — лазерное излучение. Излучение будет главным образом влиять на температуру ДЧ T_r . Это можно видеть, даже не проводя оценочных расчетов, поскольку поверхность ДЧ, через которую поглощается излучение, в несколько раз больше поверхности, контактирующей с подложкой, и через которую отводится тепло. В то время как для подложки выполняется обратное соотношение, так как часть ее поверхности, обращенной к излучению, оказывается занятой ДЧ.

Поскольку необходимое для возникновения солитонов соотношение между постоянными решеток подложки и ДЧ достигается за счет разности температур подложки и ДЧ, повышенная лазерным излучением температура ДЧ T_r должна привести к тому, что соотношение (1) будет выполняться при более высокой температуре подложки T_s .

Предлагаемая модель полностью согласуется с результатами эксперимента. Действительно, кристаллическая структура пленок, выращенных под действием лазерного

излучения при температурах подложки более высоких, чем T_s^{opt} , улучшалась в сравнении со структурой пленок, синтезированных в тех же режимах, но без излучения (ср. рис. 2, *a*, 3, *a* и 2, *b*, 3, *b*). Наоборот, при оптимальной температуре подложки T_s^{opt} лазерное излучение приводило к ухудшению кристаллического совершенства пленок (ср. рис. 1, *a* и *b*). Понижение скорости роста в первом случае, естественно, объясняется повышенным реиспарением, обусловленным более высокой температурой ДЧ, а повышение скорости роста при T_s^{opt} — объясняется нарушением условия (1), в силу чего имеет место более высокое, чем при оптимальной температуре, рассеяние энергии и, как следствие, более низкая температура ДЧ. Кривая диаграммы конденсации как бы сдвигается под действием лазерного излучения в сторону более высоких температур.

4. Заключение

1. При синтезе слоев сульфида кадмия в резко неравновесных условиях лазерное излучение малой мощности вызывает сдвиг оптимальной для ориентированного роста температуры подложки в область более высоких температур.

2. Процессы формирования слоев сульфида кадмия в резко неравновесных условиях в присутствии лазерного излучения малой мощности непротиворечиво объясняются в рамках модели солитонной гетероэпитаксии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 02-03-40432).

Список литературы

- [1] А.П. Беляев, В.П. Рубец, И.П. Калинин. ФТП, **31** (8), 966 (1997).
- [2] А.П. Беляев, В.П. Рубец, И.П. Калинин. ФТТ, **39** (2), 382 (1997).
- [3] А.П. Беляев, В.П. Рубец, И.П. Калинин. Неорг. матер., **34** (3), 238 (1998).
- [4] А.П. Беляев, В.П. Рубец, М.Ю. Нуждин. ФТП, **34** (10), 1208 (2000).
- [5] А.П. Беляев, В.П. Рубец. ФТП, **35** (3), 294 (2001).
- [6] А.П. Беляев, В.П. Рубец, И.П. Калинин. ЖТФ, **71** (4), 133 (2001).
- [7] А.П. Беляев, В.П. Рубец. ФТП, **36** (7), 843 (2002).
- [8] А.П. Беляев, В.П. Рубец, М.Ю. Нуждин, И.П. Калинин. ФТП, **37** (6), 641 (2003).
- [9] А.П. Беляев, В.П. Рубец, И.П. Калинин, М.Ю. Нуждин. ЖФХ, **77** (10), 1883 (2003).
- [10] С.А. Кукушкин, А.В. Осипов. ФТТ, **36** (5), 1461 (1994).

Редактор Л.В. Беляков

The influence of laser radiation on formation of oriented layers of cadmium sulfide under strongly non-equilibrium conditions

A.P. Belyaev, V.P. Rubets, V.V. Antipov

St. Petersburg State Technological Institute
(Technical University),
190013 St. Petersburg, Russia

Abstract This contribution presents the results of investigations of the influence of the low power laser radiation on formation of oriented layers of cadmium sulfide from vapor phase on the substrate cooled by liquid nitrogen (strongly non-equilibrium conditions). Results of technological experiments, investigations of the electron diffraction, and data on the condensation diagram are presented. It has been revealed that, depending on the temperature of substrate, laser radiation can either improve the films quality or damage them.