

# Электрические свойства пленок теллурида кадмия, синтезированных в тепловом поле градиента температуры

© А.П. Беляев<sup>¶</sup>, В.П. Рубец, М.Ю. Нуждин

Санкт-Петербургский государственный технологический институт,  
198013 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 10 ноября 2002 г. Принята к печати 4 декабря 2002 г.)

Сообщается о результатах изучения электрических свойств пленок CdTe, синтезированных в тепловом поле градиента температуры, в зависимости от кристаллической структуры, давления окружающей атмосферы и толщины пленок. Представлены результаты исследования пленок с различной структурой: от поликристаллической до состоящей из блоков кристалла. Выявлено возрастание удельной проводимости с ростом кристаллического совершенства пленок, с повышением давления окружающей атмосферы и уменьшением толщины пленок. Продемонстрирована возможность удовлетворительного описания эксперимента в рамках модели неоднородного полупроводника с межкристаллитными барьерами.

## 1. Введение

Электрические свойства пленок очень сильно зависят от способа и условий синтеза. Не являются исключением и пленки теллурида кадмия, о нетривиальном способе получения и структуре которых сообщалось в работах [1,2]. В этой связи, учитывая особый интерес опто- и микроэлектроники к CdTe, далее представлены результаты изучения электрических свойств пленок теллурида кадмия, синтезированных в тепловом поле градиента температуры.

## 2. Исследованные образцы и методика эксперимента

Все исследованные образцы синтезировались на подложке из слюды мусковит в тепловом поле градиента температуры по методике [2]. В зависимости от конкретного режима их кристаллическая структура изменялась от поликристаллической до эпитаксиальной. Пленки состояли из отдельных блоков (кристаллитов) столбчатого вида, размер и взаимная разориентация которых определяли совершенство кристаллической структуры того или иного образца. Образцы, близкие к поликристаллическим, состояли из кристаллитов с характерным размером  $\sim 0.3$  мкм, эпитаксиальные пленки — из блоков кристалла размером  $\sim 1.0$  мкм с взаимной разориентацией 2–15°.

Тип проводимости образцов, согласно знаку термоэдс, соответствовал электронному типу.

Электрические измерения проводились в планарной геометрии в токовом режиме с помощью электрометра В7-30. Использовались индиевые контакты. Омичность контактов контролировалась по начальным участкам вольт-амперных характеристик (ВАХ).

Структурные исследования проводились на электронографе ЭМР-100 и электронном микроскопе ПЭМ-100.

Толщина пленок измерялась на микроинтерферометре МИИ-4, обеспечивающем измерение с точностью  $\pm 0.03$  мкм.

## 3. Результаты эксперимента

Экспериментальные исследования включали в себя измерения удельного сопротивления пленок в планарной геометрии, а также изучение влияния кристаллической структуры, давления окружающей атмосферы и толщины пленок на проводимость.

Проводимость образцов возрастала от  $\sim 10^{-8}$  Ом<sup>-1</sup>см<sup>-1</sup> для пленок со структурой, близкой к поликристаллической (рис. 1, а), до  $\sim 10^{-7}$  Ом<sup>-1</sup>см<sup>-1</sup> — для эпитаксиальных пленок (рис. 1, д). Проводимость зависела также от окружающей атмосферы. В вакууме ( $\sim 10^{-3}$  Па) значения проводимости уменьшались, в сравнении с вышеприведенными данными, примерно на порядок.

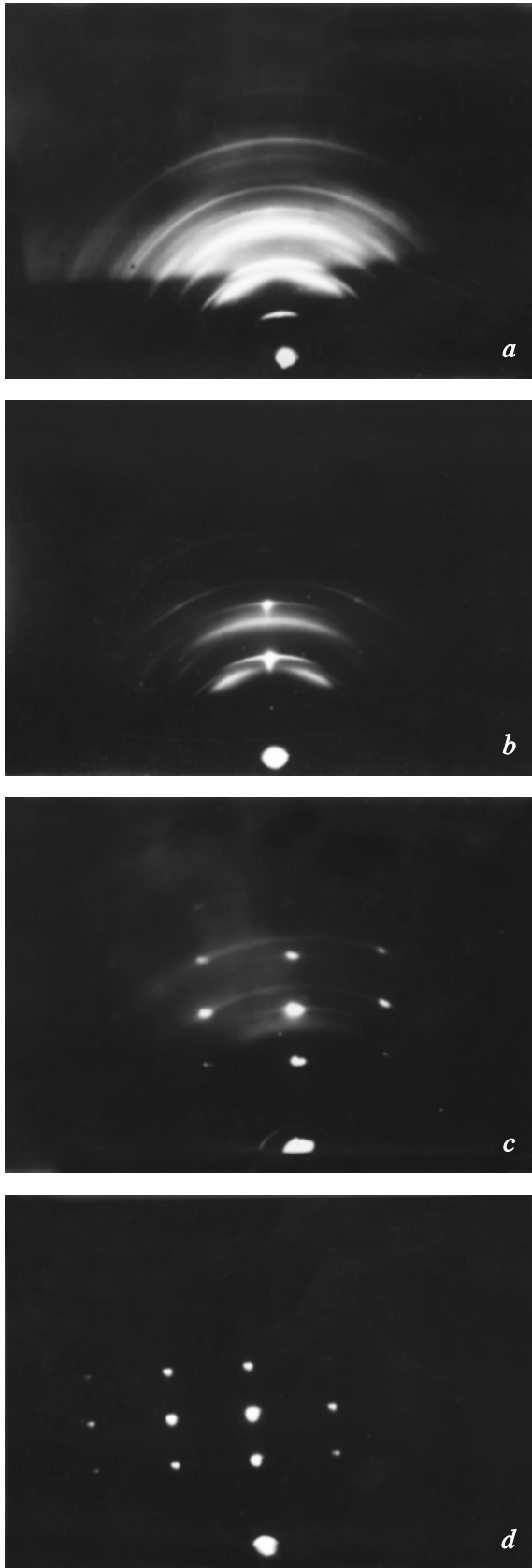
Удельная проводимость образцов зависела от их толщины. Результатам, представленным на рис. 1, соответствует толщина пленок  $d \approx 0.5$  мкм. Детально влияние толщины пленок на удельную проводимость исследовалось на образцах с поликристаллической структурой (рис. 1, а). Результаты исследования отражает рис. 2. Увеличение толщины приводило к понижению удельной электропроводности от  $\sim 2 \cdot 10^{-8}$  до  $\sim 5 \cdot 10^{-9}$  Ом<sup>-1</sup>см<sup>-1</sup>.

Процесс установления равновесного значения проводимости во всех образцах был связан с долговременными релаксациями. Характерное время релаксаций  $\tau$  достигало  $\sim 100$  с.

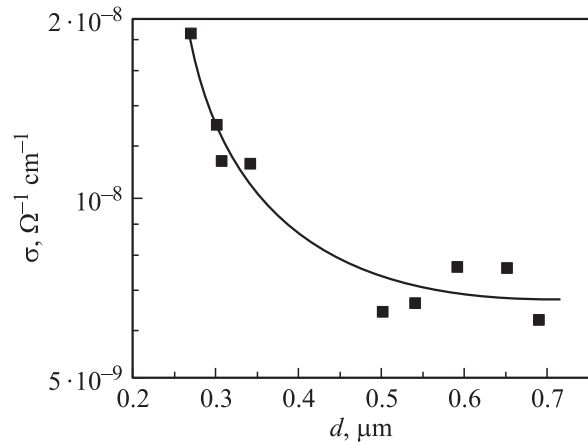
Температурная зависимость проводимости описывалась простой экспонентой с энергией активации  $\sim (0.70-0.72)$  эВ.

Все исследованные образцы обладали слабой фоточувствительностью. Под влиянием света от лампы накаливания мощностью 50 Вт проводимость возрастала не более чем в 2 раза.

<sup>¶</sup> E-mail: belyaev@tu.spb.ru



**Рис. 1.** Электронограммы пленок CdTe, синтезированных в тепловом поле градиента температуры, с удельной электропроводностью  $\sigma$ ,  $10^{-8} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$ : *a* — 1,2, *b* — 1.4, *c* — 2.0, *d* — 16.



**Рис. 2.** Зависимость удельной проводимости пленок CdTe, синтезированных в тепловом поле градиента температуры, от толщины пленки.

#### 4. Обсуждение результатов

Известно, что конденсированные пленки, как правило, относятся к неупорядоченным системам [3]. Как свидетельствуют экспериментальные результаты, не являются исключением и пленки теллурида кадмия, синтезированные в тепловом поле градиента температур. Низкая удельная проводимость ( $\sigma \approx 10^{-8} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$ ), высокая энергия активации проводимости ( $\sim 0.7 \text{ эВ}$ ), наличие долговременных релаксаций проводимости ( $\tau \approx 100 \text{ с}$ ), а также малое увеличение проводимости при освещении (малая кратность фотопроводимости) однозначно свидетельствуют, что все исследованные пленки CdTe являются неоднородными полупроводниками [4–6].

Токоперенос в неоднородных полупроводниках осуществляется по уровню протекания и проводимость при относительно высоких температурах описывается выражением

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-E/kT), \quad (1)$$

которое качественно соответствует исследованным образцам CdTe. Здесь  $E$  отражает энергетическое расстояние до уровня протекания, отсчитанное от энергии Ферми;  $\sigma_0$  — предэкспоненциальный множитель;  $k$  — постоянная Больцмана;  $T$  — абсолютная температура.

Положение уровня протекания зависит от характера и амплитуды случайного потенциала, существующего в образце. Для структуры, подобной структуре исследованных пленок, случайное поле формируется главным образом на границах кристаллитов [6,7]. Многократно проверено, что подобные границы в ковалентных кристаллах  $A^{IV}B^{VI}$  [8] играют роль акцепторов. Они аккумулируют на поверхностных состояниях отрицательный заряд и тем самым формируют межкристаллитные барьеры. Усредненное влияние межкристаллитных барьеров на проводимость учитывается введением уровня протекания, который характеризует минимальную энергию носителей тока, достаточную для протекания

сквозь образец по классическим траекториям. Чем выше межкристаллитные барьеры, тем больше энергия уровня протекания, а следовательно, меньше концентрация носителей тока на этом уровне.

Токоперенос по уровню протекания для исследованных образцов, помимо прочего, подтверждается зависимостью проводимости от совершенства кристаллической структуры (рис. 1). Большая взаимная разориентация кристаллитов пленки способствует возрастанию межкристаллитных барьеров и тем самым приводит к понижению проводимости.

Влияние атмосферы воздуха на проводимость пленок также подтверждает концепцию неоднородного полупроводника. Это можно увидеть, если принять во внимание, что любая из исследованных однофазных пленок представляет собой квазигетерогенную трехслойную систему. Первый слой, сравнительно тонкий, — переходный, дефектный слой. Второй слой, очевидно, самый толстый — это основной слой пленки, по совершенству структуры которого мы судим о кристаллическом совершенстве структуры всей пленки. Третий слой — слой поверхностный. Свойства этого слоя определяются, в значительной мере, влиянием атмосферы.

Таким образом, удельную проводимость пленки  $\sigma$  можно представить в виде суммы:

$$\sigma = \frac{1}{d} (d_1\sigma_1 + d_2\sigma_2 + d_3\sigma_3), \quad (2)$$

где  $\sigma_i$  и  $d_i$  — удельная проводимость и толщина  $i$ -го слоя соответственно.

Проводимость  $\sigma_3$ , казалось бы, должна в атмосфере воздуха уменьшаться, поскольку известно, что кислород, адсорбируясь на поверхности, образует также уровни акцепторного типа. Однако многократный опыт показал [8], что при длительном пребывании в воздушной атмосфере на поверхности пленки адсорбируется столь большое количество кислорода, что возможна инверсия типа проводимости поверхностного слоя пленки. При этом, естественно, проводимость поверхностного слоя, как и общая проводимость образца, будет возрастать вместе с возрастанием концентрации адсорбированного кислорода. Подобное поведение коррелирует не только с выявленным влиянием атмосферы, но и с влиянием толщины пленки на ее удельную проводимость (рис. 2). Проводимость падает с толщиной в силу уменьшения вклада  $\sigma_3 d_3 / \sigma d$  в суммарную проводимость низкоомного поверхностного слоя, см. (2).

Выявленные в эксперименте долговременные релаксации проводимости в рамках модели неоднородного полупроводника с межкристаллитными барьерами объясняются инерционностью установления равновесия между носителями, разделенными потенциальными барьерами [7]; низкая кратность фотопроводимости — высокой дефектностью структуры, сокращающей время жизни неосновных носителей.

## 5. Заключение

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Проводимость пленок теллурида кадмия, синтезированных в тепловом поле градиента температуры, зависит от совершенства кристаллической структуры, толщины пленок и окружающей атмосферы. Увеличению проводимости способствует возрастание кристаллического совершенства структуры, уменьшение толщины пленок и повышение давления окружающей атмосферы.

2. Проводимость пленок теллурида кадмия при токопереносе в планарной геометрии удовлетворительно описывается моделью неоднородного полупроводника с межкристаллитными барьерами на границах блоков, из которых состоят пленки.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 02-03-32405.

## Список литературы

- [1] А.П. Беляев, В.П. Рубец, М.Ю. Нуждин, И.П. Калинин. ФТТ, **43** (4), 745 (2001).
- [2] А.П. Беляев, В.П. Рубец, М.Ю. Нуждин, И.П. Калинин. ЖТФ, **72** (4), 120 (2002).
- [3] Н. Мотт, Э. Дэвис. *Электронные процессы в некристаллических веществах* (М., Мир, 1982).
- [4] В.И. Шкловский, А.Л. Эфрос. *Электронные свойства легированных полупроводников* (М., Наука, 1979).
- [5] А.Я. Шик. ЖЭТФ, **71** (9), 1159 (1976).
- [6] А.Р. Belyaev, I.P. Kalinkin. Thin Sol. Films, **158**, 25 (1988).
- [7] А.П. Беляев, И.П. Калинин, В.А. Санитаров. ФТП, **18** (11), 1975 (1984).
- [8] Yu.A. Ossipyan, V.F. Petrenko, A.V. Zaretskii. Adv. Phys., **35**, 115 (1986).

Редактор Т.А. Полянская

## Influence of sharply non-equilibrium conditions on stoichiometry of the layer composition of cadmium telluride condensed from vapour phase

A.P. Belyaev, V.P. Rubets, M.Yu. Nuzhdin, I.P. Kalinkin

St. Petersburg State Technological Institute,  
198013 St. Petersburg, Russia