

## Влияние метода синтеза на свойства пленок теллурида кадмия, синтезированных в резко неравновесных условиях

© А.П. Беляев<sup>¶</sup>, В.П. Рубец, В.В. Антипов, Е.О. Еремина

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет),  
190013 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 26 октября 2009 г. Принята к печати 2 ноября 2009 г.)

Сообщается о результатах сравнительных исследований электрических и гальваномагнитных свойств пленок теллурида кадмия, синтезированных в резко неравновесных условиях методом теплового экрана и методом квазизамкнутого объема. Приводятся температурные зависимости проводимости, коэффициента Холла и эффективной холловской подвижности. В результате анализа экспериментальных результатов делается вывод, что метод теплового экрана положительно влияет на стехиометрию состава и тем способствует получению пленок с меньшей концентрацией дефектов.

В [1] сообщалось о синтезе кристаллически совершенных пленок в резко неравновесных условиях методом теплового экрана, позволяющим весьма технологично из смеси одного состава получать практически весь спектр твердых растворов. Состав раствора при таком методе варьировался простым изменением температуры зоны теплового экрана — области повышенной температуры, расположенной между испарителем и подложкой. Далее приводятся результаты исследования влияния теплового экрана на свойства бинарных соединений — пленок теллурида кадмия, свойства которых при синтезе методом квазизамкнутого объема были представлены в [2].

Исследовались пленки, полученные испарением и конденсацией в вакууме в резко неравновесных условиях. Синтез пленок методом теплового экрана осуществлялся по методике, описанной в [1], а методом квазизамкнутого объема — по методике, описанной в [3]. Температура испарителя в обоих случаях составляла  $T_i = 923$  К. Температура теплового экрана на 100 К превышала температуру испарителя. В качестве подложек использовались кусочки искусственной слюды фторфлогопит. Подложки охлаждались жидким азотом (резко неравновесные условия). Конкретная температура подложки выбиралась таким образом, чтобы обеспечить наиболее высокое кристаллическое качество пленок. Согласно электронографическим исследованиям, пленки, синтезированные методом теплового экрана, ничем не отличались от пленок, полученных методом квазизамкнутого объема. Об их структуре позволяют судить рис. 1, 2, где приводятся типичная электронограмма пленки и микрофотография поверхности. Пленки росли в кубической модификации с ориентацией  $(111)[\bar{1}\bar{1}0]$  CdTe ||  $(0001)[1\bar{1}\bar{2}0]$  слюды. Они специально не легировались и не отжигались. Толщина исследованных пленок составляла несколько мкм.

Электрические и гальваномагнитные измерения осуществлялись в планарной геометрии. Для измерений использовались золотые контакты, нанесенные методом вакуумного напыления. Расстояние между токовыми контактами составляло 0.6 см, а между холловскими —

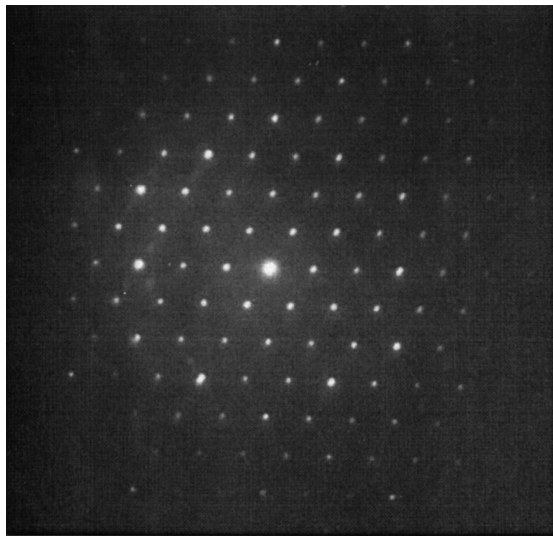
0.3 см. Проводимость измерялась с помощью электрометра В7-30 в токовом режиме. Минимальный регистрируемый ток составлял величину  $10^{-14}$  А. Эффект Холла исследовался на переменном токе с частотой 8 Гц, позволявшем регистрировать минимальную холловскую подвижность в  $0.5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ . Тип проводимости определялся по знаку эдс. Все измерения осуществлялись в вакууме при остаточном давлении  $\sim 10^{-3}$  Па. Температура ( $T$ ) поддерживалась терморегулятором с точностью 0.1 К.

Основные результаты исследования представлены на рис. 3–5. На рис. 3 приведены температурные зависимости проводимости  $\sigma$ . Кривая 1 отражает температурную зависимость образца, полученного методом теплового экрана. Как можно видеть, она имеет вид простой экспоненты, с энергией активации  $E_\sigma = 0.73$  эВ. Кривая 2 соответствует температурной зависимости пленки, синтезированной методом квазизамкнутого объема; для нее характерен более сложный вид: наличие двух экспоненциальных участков — высокотемпературного с энергией активации  $E_{\sigma 1} = 0.54$  эВ и низкотемпературного с энергией активации  $E_{\sigma 2} = 0.34$  эВ. Удельное сопротивление образцов, полученных методом теплового экрана, во всем исследованном температурном диапазоне было более чем на порядок выше сопротивления образцов, синтезированных методом квазизамкнутого объема.

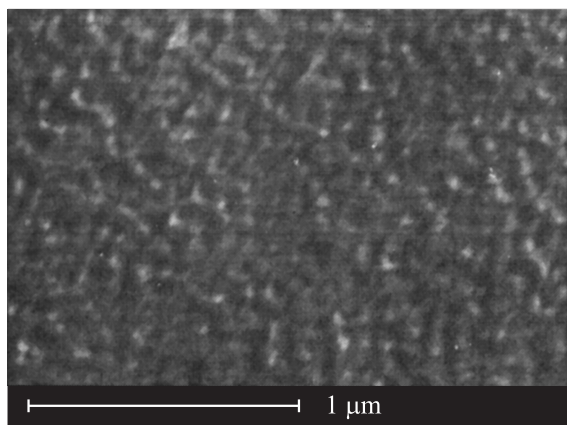
На рис. 4 приведены зависимости от температуры коэффициента Холла  $R_H$ . Кривая 1 соответствует образцу, полученному методом теплового экрана; она близка к экспоненциальной зависимости. Кривая 2 отражает температурную зависимость  $R_H$  образца, синтезированного методом квазизамкнутого объема; ее вид соответствует так называемой „двухзонной модели“ [4] — содержит максимум. Значения  $R_H$  были всегда положительными и всегда более высокими для образцов, синтезированных методом теплового экрана.

На рис. 5 представлены температурные зависимости эффективной холловской подвижности  $\mu_H$ . При высоких температурах  $\mu_H$  обоих образцов почти не зависела от температуры, а при низких резко уменьшалась с уменьшением температуры; ее значения для образцов, синтезированных методом теплового экрана, не превы-

<sup>¶</sup> E-mail: Belyaev@lti-gti.ru, Belyaev@tu.spb.ru, Belyaev@spcpa.ru



**Рис. 1.** Типичная электронограмма пленки теллурида кадмия, синтезированной в резко неравновесных условиях.



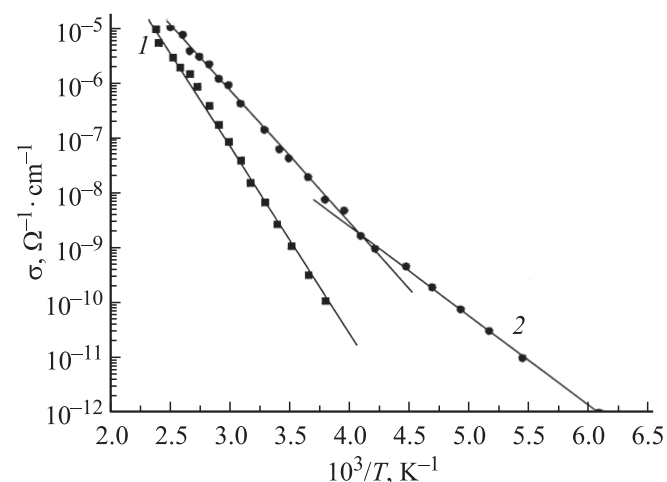
**Рис. 2.** Микрофотография поверхности пленки теллурида кадмия, синтезированной в резко неравновесных условиях.

шали нескольких сотен  $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ , а для образцов, полученных методом квазизамкнутого объема, — нескольких десятков  $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ .

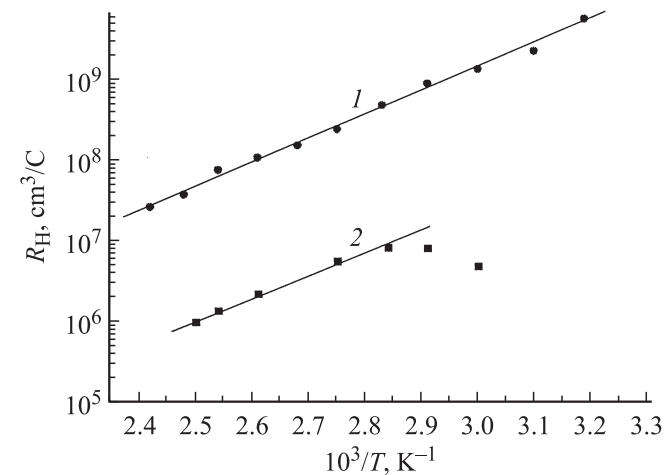
Электрофизические свойства пленок теллурида кадмия, синтезированных в резко неравновесных условиях методом квазизамкнутого объема, обсуждались в работе [2]. Авторами было показано, что объект исследования является сильно компенсированным полупроводником, зоны которого содержат случайный потенциал, благодаря чему процессы токопереноса осуществляются по уровню протекания: при высоких температурах — по уровню протекания валентной зоны, а при низких — по уровню протекания примесной зоны. Его электрическая проводимость носит активационный характер, а роль энергии активации выполняет энергетическое расстояние от уровня Ферми до уровня протекания. Сильная компенсация объясняет большое значение энергии активации проводимости (уровень Ферми расположен глубо-

ко в запрещенной зоне) и низкое значение эффективной холловской подвижности (большая концентрация дефектов). Наличие токопереноса по примесям объясняет вид температурной зависимости коэффициента Холла (вид, характерный для двухзонной модели) и наличие двух экспоненциальных участков на температурной зависимости проводимости (один соответствует токопереносу по валентной зоне, другой — по примесной зоне).

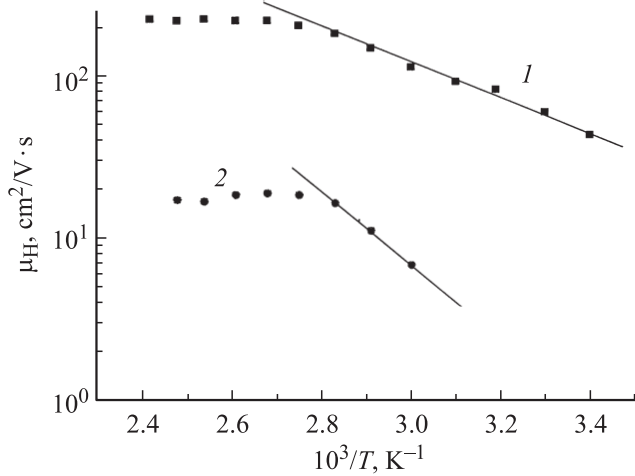
Свойства образцов, синтезированных методом теплового экрана, качественно подобны описанным в [2]. Чтобы убедиться в этом, достаточно сравнить кривые 1 и 2 на рис. 3–5. Различие заключается лишь в величинах проводимости и подвижности. Следовательно, можно полагать, что и механизмы токопереноса в обеих системах имеют одинаковый характер, но тогда более высокие значения подвижности носителей в пленках, синтезированных методом теплового экрана, свидетель-



**Рис. 3.** Температурные зависимости проводимости пленок теллурида кадмия, синтезированных методом теплового экрана (1) и методом квазизамкнутого объема (2).



**Рис. 4.** Температурные зависимости коэффициента Холла пленок теллурида кадмия, синтезированных методом теплового экрана (1) и методом квазизамкнутого объема (2).



**Рис. 5.** Температурные зависимости эффективной холловской подвижности пленок теллурида кадмия, синтезированных методом теплового экрана (1) и методом квазизамкнутого объема (2).

ствуют о меньшей концентрации дефектов в них. Об этом же говорит их большее удельное сопротивление и большая энергия активации проводимости, так как за счет меньшего количества дефектов уровень Ферми приближается к середине запрещенной зоны и энергетическое расстояние от него до уровня протекания увеличивается. Меньшей концентрацией дефектов объясняется и отсутствие второго экспоненциального участка на температурной кривой проводимости (см. кривую 1 на рис. 3). При малой концентрации дефектов примесная зона либо вообще не возникает, либо обладает очень малой проводимостью, поэтому ее вклад в суммарную проводимость пленки будет существенным только при очень низких температурах, когда основные зоны оказываются почти полностью пустыми.

Дефекты, влияющие на подвижность носителей в рассматриваемых пленках, очевидно, являются точечными. В противном случае они должны были бы проявиться при электронографических исследованиях и электронограммы от пленок с носителями разной подвижности были бы разными. Доминирующими точечными дефектами в CdTe дырочной проводимости являются вакансии кадмия [5], а при синтезе из паровой фазы в резко неравновесных условиях они обусловлены избытком теллура [6]. Отсюда следует, что тепловой экран способствует формированию стехиометрической паровой фазы. Горячие стенки теплового экрана повышают динамическое давление в системе и тем, согласно [6], приближают испарение теллурида кадмия к конгруэнтному.

Таким образом, результаты, представленные в настоящей работе, позволяют констатировать, что метод теплового экрана при синтезе пленок теллурида кадмия в резко неравновесных условиях положительно влияет на стехиометрию состава и тем способствует получению пленок с меньшей концентрацией дефектов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 07-03-00366).

## Список литературы

- [1] А.П. Беляев, В.П. Рубец, В.В. Антипов, Х.А. Тошходжаев. ФТП, **43** (6), 735 (2009).
- [2] А.П. Беляев, В.П. Рубец, В.В. Антипов, В.В. Гришин. ФТП, **42** (11), 1309 (2008).
- [3] А.П. Беляев, В.П. Рубец, И.П. Калинин. ФТТ, **39** (2), 382 (1997).
- [4] Б.И. Шкловский, А.Л. Эфрос. *Электронные свойства легированных полупроводников* (М., Наука, 1979).
- [5] *Физика соединений  $A^2B^6$* , под ред А.Н. Георгобидани, М.К. Шейнкмана (М., Наука, 1986).
- [6] А.П. Беляев, В.П. Рубец, М.Ю. Нуждин, И.П. Калинин. ФТП, **37**, 641 (2003).

Редактор Л.В. Шаронова

## Influence of the synthesis method on the properties of the cadmium telluride films synthesized in sharp non-equilibrium conditions

A.P. Belyaev, V.P. Rubets, V.V. Antipov, E.O. Eremina

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

**Abstract** It is presented the results of comparative analysis of electric and galvanomagnetic properties of the cadmium telluride films synthesized in sharp non-equilibrium conditions by means of methods of a thermal screen and of a quasi-closed volume. Temperature dependences of conductivity, Hall coefficient and effective Hall mobility are presented. As follows from the analysis of the results, the thermal screen method influences positively on composition stoichiometry and thus favours of formation of films with the less defect concentration.