

# Эффект переключения в гетеропереходах Si–CdS, синтезированных в резко неравновесных условиях

© А.П. Беляев<sup>¶</sup>, В.П. Рубец

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

(Получена 5 декабря 2001 г. Принята к печати 19 декабря 2001 г.)

Сообщается о результатах исследования электрических свойств и процессов формирования гетеропереходов на охлажденной до отрицательных температур подложке из кристаллического кремния. Приводятся данные технологических, электронографических и электрических исследований. Выявлен эффект переключения проводимости в гетеропереходах на основе двухфазных пленок сульфида кадмия и определены режимы формирования аморфных и аморфных с кристаллическими включениями пленок CdS. Показано соответствие результатов солитонной модели.

## 1. Введение

Развитие электроники стимулирует исследователей к поиску новых перспективных материалов, к изучению возможностей получения материалов и систем электроники в нетривиальных условиях. К числу перспективных нетривиальных условий относятся, в частности, резко неравновесные условия. Изучение механизмов формирования пленочных систем в резко неравновесных условиях только в течение последних нескольких лет позволило выявить такие процессы, как солитонная эпитаксия [1–4], проводимость, стимулированная осцилляциями температуры [5]. Настоящая работа сообщает о новых экспериментальных данных, связанных с процессами формирования структуры и свойств пленок в резко неравновесных условиях — в частности, о возможности получения в резко неравновесных условиях такой перспективной для электроники структуры, как биустойчивая система.

## 2. Исследованные образцы и методика эксперимента

Исследовались образцы, синтезированные методом квазизамкнутого объема на подложке из кремния, охлаждаемой жидким азотом [1,2]. Толщина пленок для разных образцов составляла величину 0.8–1.2 мкм. В качестве подложек использовались пластины кремния КДБ-10 толщиной 0.3 мм с ориентацией поверхности (100).

Толщина пленок измерялась с помощью микроинтерферометра МИИ-4. Электронографические исследования проводились на электронографе ЭМР-100. Для электрических измерений вакуумным напылением на образцы наносились золотые контакты размером  $4 \times 4$  мм<sup>2</sup>. Все электрические измерения проводились в вакууме при остаточном давлении  $\sim 10^{-3}$  Па. Вольт-амперные

характеристики измерялись с помощью электрометра У5-9; вольт-фарадные — с помощью измерителя импеданса ВМ-507.

## 3. Результаты эксперимента

Исследовались процессы формирования пленок сульфида кадмия на подложке из кристаллического кремния в резко неравновесных условиях и электрические характеристики образующихся между Si и CdS гетеропереходов (ГП). Изучение процессов формирования строилось на основе технологических экспериментов и электронографических исследований. Электрические характеристики исследовались на основе измерений вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик.

В результате было установлено, что на подложке, охлажденной до температуры  $T_r \approx 215$  и 150 К растут эпитаксиальные кристаллические пленки CdS (рис. 1, *a*). При  $T_r < 100$  К пленки получались аморфными (рис. 1, *b*). В области температур  $100 < T_r < 150$  К структура пленок была двухфазной: наряду с аморфной фазой они содержали кристаллические включения (рис. 1, *c*).

Прямые ветви вольт-амперных характеристик  $I(U)$  всех разновидностей ГП (с ориентированной, аморфной и двухфазной пленками) были экспоненциальными. Вид обратных ветвей характеристик зависел от структуры пленки CdS (рис. 2). Вольт-амперная характеристика (ВАХ) ГП с эпитаксиальной пленкой имела вид, характерный для выпрямляющего контакта (кривая 1); обратная ветвь ВАХ ГП с аморфной пленкой почти не отличалась от прямой ветви (кривая 2); обратная ветвь ВАХ ГП с двухфазной пленкой отличалась наличием двух устойчивых состояний, различавшихся по проводимости на несколько порядков (кривая 3). До момента переключения проводимости ВАХ ГП с двухфазной и эпитаксиальной пленками были качественно подобны. Напряжение переключения зависело от толщины пленки сульфида кадмия. Переключение происходило при напряженности электрического поля  $E \sim 10^5$  В/см. Начало переключения проводимости сопровождалось токовыми неустойчивостями в виде осцилляций.

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

Зависимость емкости от приложенного напряжения для ГП с эпитаксиальной и двухфазной пленками имела вид, характерный для случая резкого распределения примесей.

#### 4. Обсуждение результатов

При синтезе пленок из паровой фазы в резко неравновесных условиях пленка растет главным образом из дисперсных частиц (ДЧ), сформировавшихся в паровой фазе в результате флуктуаций первого рода [1,2,6]. Время рассеяния избыточной энергии ДЧ при их конденсации на подложку конечно. Оно определяется размером ДЧ [1,2,7]

$$\tau \propto r^2/\chi, \quad (1)$$

где  $\tau$  — характерное время рассеяния избыточной энергии,  $\chi$  — температуропроводность,  $r$  — радиус ДЧ, и температурой подложки (точнее разностью температур ДЧ и подложки).

Поэтому сразу после конденсации температура ДЧ будет определяться ее размером. В зависимости от температуры ДЧ она окажется либо докритической, либо закритической [4]. ДЧ докритического размера реиспарятся, а ДЧ закритического размера стремятся принять коррелированное с подложкой (энергетически оптимальное) положение. Наиболее реальным механизмом ориентации ДЧ на охлажденной подложке является солитонный механизм [1–3,6]. Солитонный механизм представляет собой перемещения ДЧ за счет движения дислокаций несоответствия между ДЧ и подложкой, причем движения своеобразного — 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 решетку. 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.

Для возникновения солитонов, как показано в [1,2], требуется определенное соотношение между параметрами решеток ДЧ  $b(T_f)$  и подложки  $a(T_r)$

$$\frac{a(T_r) - b(T_f)}{b(T_f)} > (2/\pi)^{3/2} \sqrt{(f/\lambda)a(T_r)}, \quad (2)$$

которое при близости  $b(T_f)$  и  $a(T_r)$  может быть достигнуто варьированием температуры подложки  $T_r$  или

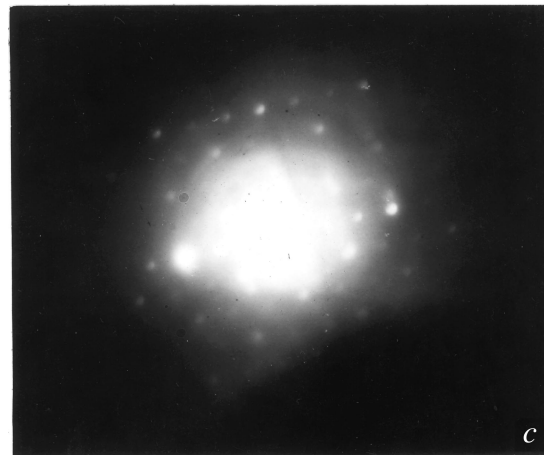
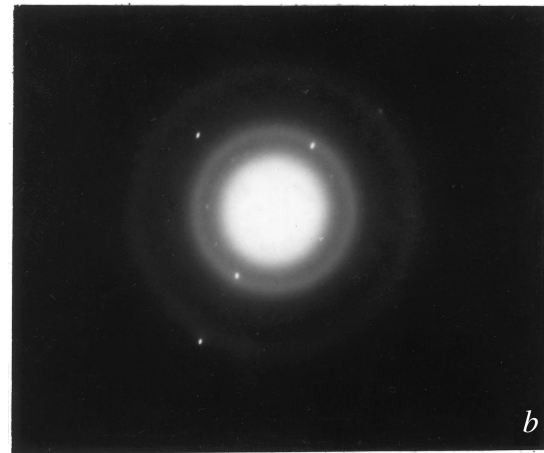
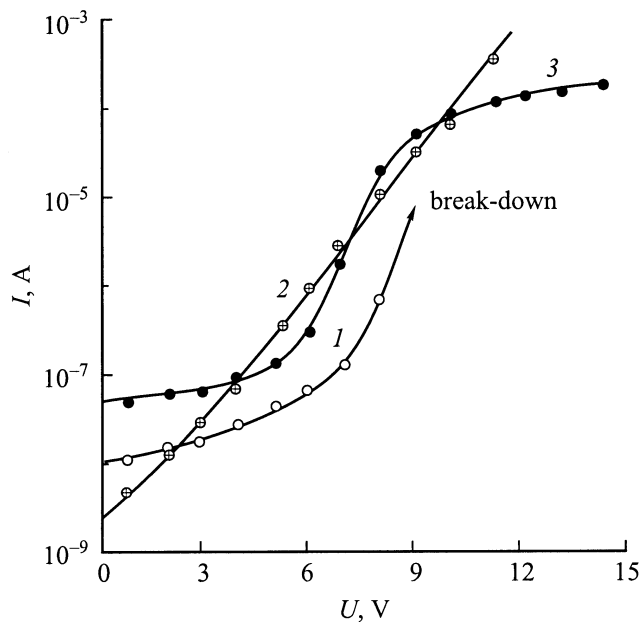


Рис. 1. Электрограммы эпитаксиальных (а), аморфных (b) и двухфазных (с) пленок сульфида кадмия, выращенных в резко неравновесных условиях на кристаллической подложке из кремния.

температуры ДЧ  $T_f$ . Здесь  $f$  и  $\lambda$  — параметры, характеризующие силы взаимодействия между атомами ДЧ и подложки и силы взаимодействия между атомами подложки соответственно.

Разная температура ДЧ при одной и той же температуре подложки, приводит к разным условиям для



**Рис. 2.** Обратные ветви вольт-амперных характеристик гетеропереходов Si-CdS, сформированных на основе эпитаксиальной (1), аморфной (2) и двухфазной (3) пленок сульфида кадмия.

упорядочения закритических ДЧ разного размера. В результате ДЧ одного размера оказываются на подложке расположенными коррелированно, другого — некоррелированно.

Функция распределения ДЧ в пространстве размеров при формировании пленок в резко неравновесных условиях близка к  $\delta$ -образной [1,2]. Это обусловлено, с одной стороны, указанным выше реиспарением докритических ДЧ, а с другой — флуктуационным механизмом их возникновения (вероятность флуктуации падает с увеличением ее размера). Характер распределения в виде  $\delta$ -функции приводит к тому, что только в ограниченном температурном диапазоне пленки формируются кристаллически совершенными. За пределами этого диапазона условия возникновения для солитонов не выполняются и вследствие этого возникает неупорядоченная структура формирующихся пленок.

Однако реальная функция распределения имеет „хвосты“. Поэтому ДЧ, размер которых попадает в „хвосты“, могут коррелированно ориентироваться на подложке за пределами температурного диапазона, соответствующего формированию совершенных пленок. Отсюда можно ожидать, что на границе температурного диапазона совершенного роста может формироваться смешанная структура, в которой наряду с неупорядоченной фазой будет присутствовать кристаллически совершенная фаза.

Описанные выше представления полностью коррелируют с результатами обсуждаемого эксперимента. Только в ограниченном температурном диапазоне формировались аморфные пленки, содержащие кристаллическую

фазу. При более высоких температурах росли эпитаксиальные пленки, а при более низких — аморфные (рис. 1).

Электрические свойства ГП непротиворечиво объясняются в рамках рассмотренной выше модели. Действительно, при формировании аморфных пленок граница раздела между пленкой и подложкой содержит множество дефектов. В результате свойства образующегося ГП будут определяться главным образом этими поверхностными состояниями [8]. Ожидаемая в этом случае ВАХ должна быть близка к симметричной, что и наблюдалось нами в эксперименте. При формировании на подложке совершенных слоев влияние границы не столь существенно. Здесь свойства ГП определяются характеристиками контактирующих материалов. ВАХ ГП Si-CdS согласно теории должна быть асимметрична, что опять-таки наблюдалось нами в ГП с эпитаксиальными пленками, выращенными в резко неравновесных условиях.

Механизм формирования ВАХ ГП с двухфазной пленкой еще требует детальных исследований. Исходя из полученных нами результатов можно высказать лишь некоторые предположения.

Первое касается области ВАХ до точки переключения проводимости. Здесь ВАХ ГП с двухфазной и эпитаксиальными пленками качественно подобны. Следовательно, можно полагать, что в этой области напряжений ВАХ формируется контактом кремневой подложки с кристаллическими включениями двухфазной пленки.

Второе предположение касается механизма переключения. Учитывая наличие токовых неустойчивостей и величину электрического поля в момент переключения ( $E \sim 10^5$  В/см), можно предположить, что переключение связано с лавинным пробоем ГП подложки с кристаллической фазой. В этих условиях второе устойчивое по проводимости состояние, очевидно, будет связано с наличием аморфной фазы, выполняющей функции балластного сопротивления, не позволяющего лавине развиваться до уровня, приводящего к необратимым изменениям в ГП.

## 5. Заключение

На основе представленных результатов можно сделать следующие выводы.

1) Резко неравновесные условия синтеза, в зависимости от конкретных режимов, позволяют сформироваться на кристаллической подложке как однофазным аморфным пленкам, так и двухфазным пленкам, содержащим наряду с аморфной фазой кристаллические включения.

2) Гетеропереход между кристаллической подложкой из кремния и двухфазной пленкой сульфида кадмия, выращенной в резко неравновесных условиях, при обратном включении содержит два состояния, отличающиеся по проводимости на несколько порядков.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 02-03-32405).

## Список литературы

- [1] А.П. Беляев, В.П. Рубец, И.П. Калинин. ФТТ, **39** (2), 382 (1997).
- [2] А.П. Беляев, В.П. Рубец, И.П. Калинин. Неорг. матер., **34** (3), 281 (1998).
- [3] А.П. Беляев, В.П. Рубец. ФТП, **35** (3), 294 (2001).
- [4] С.А. Кукушкин, А.В. Осипов. УФН, **168** (10), 1083 (1998).
- [5] А.П. Беляев, В.П. Рубец, И.П. Калинин. ФТП, **31** (8), 966 (1997).
- [6] А.П. Беляев, В.П. Рубец, И.П. Калинин. ЖТФ, **71** (4), 133 (2001).
- [7] Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. *Теоретическая физика. Теория упругости* (М., Наука, 1987).
- [8] А. Милнс, Д. Фойхт. *Гетеропереходы и переходы металл-полупроводник* (М., Мир, 1975).

*Редактор Л.В. Шаронова*

## The effect of switching in heterojunction of Si–CdS, synthesized in sharply non-equilibrium conditions

*A.P. Belyaev, V.P. Rubets*

Saint Petersburg State Technological Institute  
(Technical University),  
198013 St. Petersburg, Russia

**Abstract** This paper reports the results of a study of electrical properties and processes of formation of heterojunctions on the cooled-up-to-negative-temperature substrate of crystalline silicon. Data on technological, and electrical investigation are presented. The authors have found the effect of switching conductivity in heterojunction on the basis of two-phases cadmium sulfide films and conditions of formation of both amorphous and crystalline containing CdS films. Results obtained agree well with the soliton model.