

# Физико-химическая модель эффектов памяти и переключения в тонкопленочных элементах $CdSe_{1-x}Te_x$

М.А. Джафаров, Э.Ф. Насиров

Бакинский Государственный Университет, г. Баку, Азербайджан,

maarif.jafarov@mail.ru

**Аннотация** — Исследованы эффекты переключения и памяти в полученных методом химического осаждения пленках  $CdSe_{1-x}Te_x$  ( $0 \leq x \leq 0.5$ ) на алюминиевых подложках толщиной  $0,6 \div 1,2$  мкм. Показано, что переход тонкопленочных элементов в метастабильное состояние с квазиметаллическим типом проводимости сопровождается структурными преобразованиями, при которых в результате перераспределения атомов разной валентности по узлам кристаллической решетки в структуре появляется зарядовое упорядочение электронной плотности.

**Ключевые слова** — тонкие пленки, метод химического осаждения, эффект переключения.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время, когда развитие вычислительной техники определяет научно-технический потенциал стран, а также перспективы их развития, одной из важнейших становится задача не только кратковременного хранения постоянных числовых массивов, стандартных программ ЭВМ, микрокоманд, микропрограмм и т.д., но и сохранения больших объемов информации в течении длительного времени, т.е. создание банков данных, архивной памяти и т.д. Существующие в настоящий момент традиционные способы хранения информации не могут обеспечить требуемые потребителем параметры: высокую плотность записи, возможность перезаписи больших объемов информации, длительное хранение записанной информации. Одним из перспективных методов улучшения характеристик уже существующих носителей информации является поиск новых материалов для изготовления накопителей информации. В этом направлении сейчас ведутся работы в большинстве ведущих фирм у нас в стране и за рубежом. К таким новым материалам прежде всего относятся халькогенидные полупроводники [1-2].

## II. ЭКСПЕРИМЕНТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

МДП структуры на основе пленок  $CdSe_{1-x}Te_x$ , осажденных из раствора в качестве фотоприемников диапазона  $0,95 \div 1,30$  мкм, могут успешно конкурировать с фотодиодами на p-n переходах, причем введение диэлектрического слоя между металлом и полупроводником существенно уменьшает величину темнового тока, позволяя, в принципе,

повысить пороговую чувствительность прибора. В данной статье приводятся результаты исследований МДП-структур с различной толщиной диэлектрического слоя, изготовленных на основе пленок  $CdSe_{1-x}Te_x$ , пригодных для создания приемников излучения [3]. Пленки  $CdSe_{1-x}Te_x$  с толщиной  $0,6 \div 1,2$  мкм получены методом электрохимического осаждения из раствора, содержащего хлорид кадмия, селенид натрия и диоксид теллура. Исследованы структуры трех типов. В структурах I типа толщина диэлектрического слоя составляла  $d < 50 \text{ \AA}$ , для II типа  $50 \leq d \leq 150 \text{ \AA}$ , и III типа  $d > 200 \text{ \AA}$ , а площадь всех структур составляет  $1 \times 2 \text{ см}^2$ .

Прямые и обратные ветви вольт-амперной характеристики (ВАХ) типичных МДП структур I и II типа приведены на рис.1. На прямых отрезках ветви ВАХ структур I типа можно выделить три характерных участка. На первом участке ( $0 \leq U \leq 0.4 \text{ В}$ ) ВАХ имеет омический характер. На втором участке ( $0.4 \leq U \leq 1.2 \text{ В}$ ) ВАХ хорошо описывается известным соотношением:

$$j = j_s \left( e^{qU/\beta kT} - 1 \right) \quad (1)$$

где ток насыщения:

$$j_s = A^* T^2 e^{-q\phi_b/kT}$$

$A^*$  - эффективная постоянная Ричардсона,  $\phi_b$  - энергетическая высота барьера,  $\beta$  - коэффициент неидеальности. Оценка  $\beta$  по наклону дает значение  $\beta \approx 2 \div 4$  для второго участка. Из значения плотности тока насыщения  $j_s = 10^{-8} \text{ А/см}^2$ , определенного путем экстраполяции по формуле при  $m^*/m_0 = 0.225$ , оценена высота потенциального барьера  $\phi_b = 0.230 \div 0.270 \text{ эВ}$ . На третьем участке зависимость отклоняется от прямой. Это связано с изменением падения напряжения на последовательно включенном сопротивлении  $R$ , обусловленном нейтральной областью объема полупроводника.

Обратную часть ветви ВАХ структур I типа после омического участка можно представить в виде  $j \sim U^\alpha$ . При значениях напряжений  $5 \leq U \leq 6 \text{ В}$  показатель

степени  $\alpha$  имеет значение  $1.8 \div 2.3$ , что соответствует активационному механизму протекания тока с генерацией в области объемного заряда. Такой механизм является возможным из-за достаточно большой ширины области пространственного заряда (ОПЗ)  $W$ , обусловленной низкой концентрацией носителей заряда  $n$  в пленке.

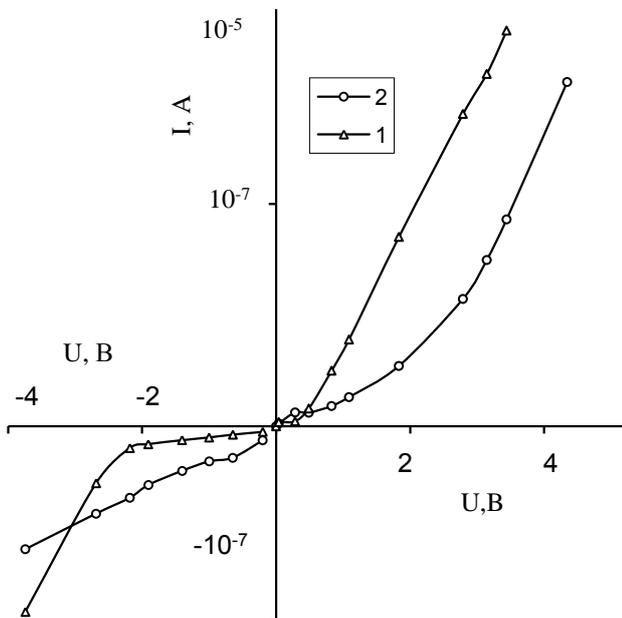


Рис. 1. ВАХ структур I (кривая 1) и II (кривая 2) типа на основе  $\text{Al-Al}_2\text{O}_3\text{-CdSe}_{0.6}\text{Te}_{0.4}$ , при  $T = 300 \text{ K}$

Сравнение вольт-фарадной характеристики (ВФХ) с расчетной для идеальной МДП структуры позволяет определить зависимость полного заряда этих центров от смещения (рис.2).

С обогащением приповерхностного слоя носителями заряда происходит быстрое увеличение полного заряда глубоких центров, а с уменьшением приложенного смещения начинается их истощение. Оценка при  $U=0$  значения концентрации носителей заряда, определенной из ВФХ,  $n=10^{14} \text{ см}^{-3}$ , а при  $\phi_B = 0.230 \text{ эВ}$  дает  $W = 0.6 \text{ мкм}$ , при этом время жизни неосновных носителей заряда составляет  $\tau = 2.3 \cdot 10^{-8} \text{ с}$ . Увеличение коэффициента  $\alpha$  при больших обратных напряжениях можно связать с наличием промежуточного, вероятно, окисного слоя, который приводит к уменьшению эффективной высоты барьера при увеличении смещения. На существование промежуточного слоя указывает и большое значение коэффициента неидеальности на прямых ветвях ВАХ. Выражение:

$$\beta = 1 + \frac{d}{\varepsilon_i} \left( \frac{\varepsilon_n}{W} + qN_s \right) \quad (2)$$

описывающее коэффициент неидеальности в структурах, позволяет оценить параметры этого

промежуточного слоя. Здесь  $N_s$  - плотность поверхностных состояний, находящихся в равновесии с полупроводником,  $\varepsilon_n$  и  $\varepsilon_i$  - диэлектрические проницаемости полупроводника и диэлектрика, соответственно,  $d$  - толщина промежуточного слоя. Оценка при  $d = 50 \text{ \AA}$  дает  $N_s \approx 1.2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{В}^{-1}$ .

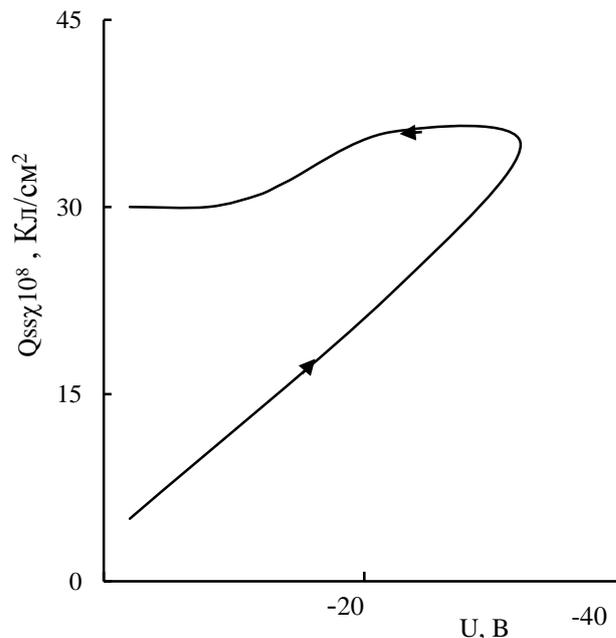


Рис. 2. Зависимость полного заряда центров от смещения в структуре типа  $\text{Al-Al}_2\text{O}_3\text{-CdS}_{0.6}\text{Se}_{0.4}$  при  $T = 300 \text{ K}$

Увеличение коэффициента неидеальности при больших напряжениях ( $\beta > 4.8$ ) на третьем участке указывает на то, что рекомбинационные механизмы и промежуточные энергетические уровни в ОПЗ начинают играть большую роль в процессе токопрохождения. Влияние промежуточного слоя на увеличение коэффициента неидеальности сказывается более существенно в структурах II типа, где толщина промежуточного слоя составляет около  $50 \leq d \leq 150 \text{ \AA}$ . Так, на втором участке прямой ветви вольт-амперной характеристики  $j \sim U^{1.8}$ , а на третьем при описании ВАХ с помощью феноменологического выражения -  $\beta > 1$ . Уменьшение абсолютной величины тока в структурах II типа наряду с возрастанием коэффициента неидеальности можно объяснить в модели, предполагающей, что промежуточный слой представляет собой диэлектрик с уровнями прилипания для электронов. Присутствие электронных уровней прилипания приводит к сильному уменьшению тока при низких уровнях инжекции, так как эти уровни, являясь первоначально пустыми, захватывают инжектированные полем носители заряда. С увеличением напряжения заметные отклонения от закона Ома возникают тогда, когда средняя концентрация инжектированных неравновесных носителей заряда становится сравнимой с концентрацией равновесных носителей.

При этом ВАХ описывается участком тока, ограниченного пространственными зарядами (ТОПЗ) (т.е. при наличии ловушек). По значению напряжения перехода от линейного участка к квадратичному определена величина  $\theta = 1.2 \cdot 10^{-10}$ . Нарушение квадратичного закона и резкий рост тока происходит после заполнения ловушек инжектированными носителями, концентрация которых, определенная из значения напряжения перехода по формулам ТОПЗ, оказалось равной  $N_t = 10^{12} \text{ см}^{-3}$ . Обратную характеристику структур II типа после омического участка можно представить в виде  $j \sim U^\alpha$ . Такое поведение ВАХ объясняется механизмом ТОПЗ при ограниченной эмиссионной способности контакта. При этом ВАХ определяются объемными свойствами изолятора и свойствами инжектирующего контакта, а величина полного тока при слабой инжекции равна току, ограниченному эмиссией носителей заряда из контакта, а при сильной - току, ограниченному пространственным зарядом [4].

На ВАХ структур III типа наблюдается эффект переключения: обратимый переход из низкопроводящего (НП) в высокопроводящего (ВП) состояние (рис.3).

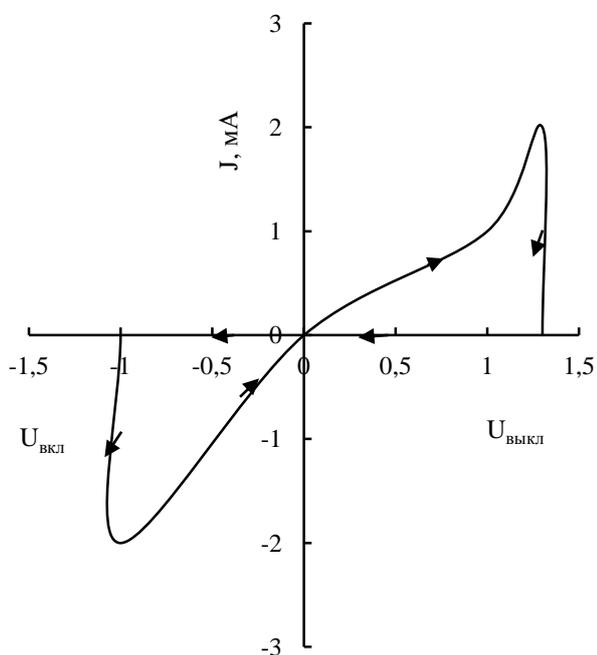


Рис. 3. Эффект переключения в структуре типа  $\text{Al-Al}_2\text{O}_3\text{-CdSe}_{0.6}\text{Te}_{0.4}$  при  $T=300 \text{ K}$

Переход в состояние ВП происходит при определенном пороговом значении обратного смещения  $U_{\text{вкл}}$ , соответствующем обеднению приповерхностной области основными носителями заряда. Для переключения структуры из состояния ВП в состояние НП необходимо подать смещение обратной полярности выше порогового значения

$U_{\text{выкл}}$ . В состоянии НП сквозной ток через структуру не превышает  $10^{-10} \text{ A}$  (рис.4.), а во включенном состоянии - десятых долей миллиампера. Эффект переключения обладает памятью: вид ВАХ для любого состояния (НП, ВП) сохраняется при выключенном питании длительное время.

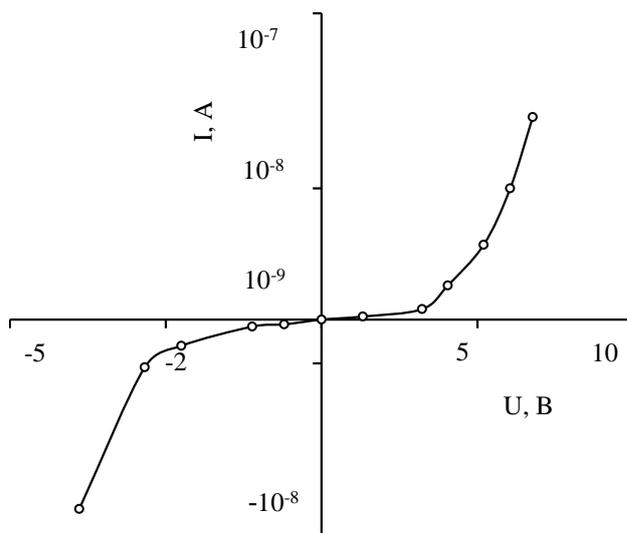


Рис. 4. ВАХ структур III типа на основе  $\text{Al-Al}_2\text{O}_3\text{-CdS}_{0.6}\text{Se}_{0.4}$ , с толщиной диэлектрического слоя  $d = 200 \text{ \AA}$  при  $T = 300 \text{ K}$

В структурах III-типа ВФХ имеет вид гистерезиса (рис.5).

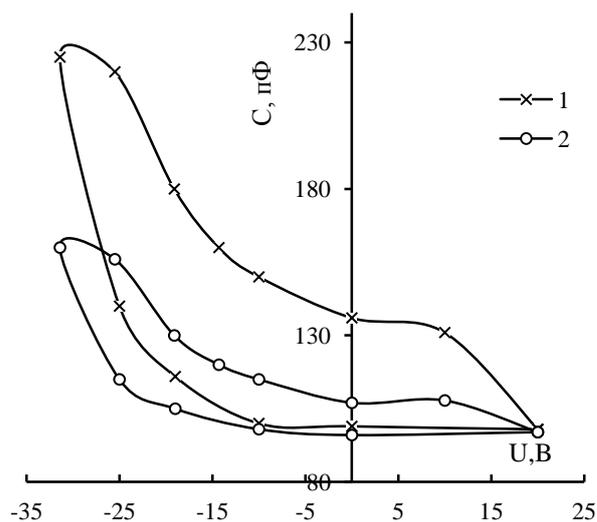


Рис. 5. ВФХ структур III типа на основе  $\text{Al-Al}_2\text{O}_3\text{-CdSe}_{0.6}\text{Te}_{0.4}$ , при  $T = 300 \text{ K}$ ,  $d, \text{ \AA}$ : 1 - 200; 2 - 700

Наблюдаемый гистерезис ВФХ указывает на наличие в окисном слое и (или) на границе раздела окисел - полупроводник глубоких центров (ловушек). Поскольку в структурах I и II типа эти эффекты не

наблюдаются, их можно связать с образованием переходного слоя в процессе анодного окисления. Наличие ловушек в переходном слое между окислом и полупроводником может быть связано с присутствием избыточного кислорода, который образует глубокие центры в пленках  $CdSe_{1-x}Te_x$ . Изменение зарядового состояния этих центров при приложении внешнего смещения может являться причиной гистерезиса. Сравнение ВФХ с рассчитанной для идеальной МДП структуры позволяет определить зависимость полного заряда этих центров от смещения. С обогащением приповерхностного слоя полупроводника носителями заряда происходит быстрое увеличение полного заряда глубоких центров, а с уменьшением приложенного смещения начинается их медленное истощение.

Основные черты эффекта переключения сходны с наблюдаемыми в МДП структурах  $Au-GeO_2-Si$ , а также в барьерах Шоттки, в материал базы которых проведена диффузия меди. В первом случае объяснение наблюдаемого эффекта заключалось в фазовом переходе, происходящем в диэлектрике, который приводит к перестройке энергетической структуры атомов в диэлектрике и образованию проводящих сквозных каналов - "шнуров тока" [4].

Зависимость плотности тока от толщины структуры во включенном состоянии ставит в нашем случае под сомнение модель шнурования тока, а тот факт, что эффект переключения наблюдается только в структурах III типа, указывает на его связь с наличием диэлектрического слоя достаточной толщины. Мы предполагаем, что эффект переключения обусловлен наличием ловушек для электронов, которые, в отличие от [4], расположены не в объеме, а на границе раздела. Зависимость плотности тока от толщины структуры во включенном состоянии ставит в нашем случае под сомнение модель шнурования тока, а тот факт, что эффект переключения наблюдается только в структурах III типа, указывает на его связь с наличием диэлектрического слоя достаточной толщины. Мы предполагаем, что эффект переключения сопровождается структурными преобразованиями, в результате перераспределения атомов разной валентности в диэлектрике или на границе раздела диэлектрик - полупроводник. При приложении смещения в прямом направлении инжектированные электроны захватываются на эти ловушки, и образующиеся области отрицательного заряда препятствуют протеканию сквозного тока. При достижении определенной величины обратного смещения электрическое поле становится достаточно большим, чтобы опустошить ловушки путем ударной ионизации по Френкелю-Пулу, разрешить области пространственного заряда и переключить структуру в проводящее состояние. В пользу такого объяснения эффекта переключения свидетельствует тот факт, что ВАХ структур III типа во включенном состоянии подобны ВАХ структур без промежуточного слоя и также описываются ТОПЗ. При этом концентрация уровней прилипания составляла  $N_l=3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$  и уменьшалась с ростом толщины анодного окисла, что

может быть связано с перемещением границы диэлектрик - полупроводник в глубь полупроводника, где пленки более совершенные. Поскольку процесс выключения в предлагаемой модели характеризуется накоплением заряда на ловушках, то структура должна переходить в состояние НП постепенно, причем тем быстрее, чем больше величина тока в прямом направлении.

В пользу предложенной модели переключения говорит также осуществление медленного перехода изучаемой структур из высокопроводящего в низкопроводящее состояние через длительное время и без приложения внешнего смещения. В частности, это явление можно связать с заполнением ловушек путем активационного механизма при комнатной температуре.

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы эффекты переключения и памяти в полученных методом химического осаждения пленках  $CdSe_{1-x}Te_x$  ( $0 \leq x \leq 0.5$ ) на алюминиевых подложках толщиной  $0,6 \div 1,2$  мкм. Показано, что переход тонкопленочных элементов в метастабильное состояние с квазиметаллическим типом проводимости сопровождается структурными преобразованиями, при которых в результате перераспределения атомов разной валентности по узлам кристаллической решетки в структуре появляется зарядовое упорядочение электронной плотности.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Абилов Ч.И., Искендерзаде З.А., Джафаров М.А. и др. Эффект переключения в монокристаллах  $(In_2Te_3)(FeTe)$  // Неорганические материалы, - 1996, - т.32, - вып.1, - С.34-35.
- [2] Абдинов А.Ш., Джафаров М.А., Функциональные возможности пленок  $CdSe_{1-x}Te_x$ , осажденных из водного раствора, в ИК области спектра // Прикладная физика, -2008, - №5, - С.103-106.
- [3] Абдинов А.Ш., Джафаров М.А., Мамедова С.А. Рекомбинационные процессы в пленках  $CdSe_{1-x}Te_x$ , осажденных из раствора // Неорганические материалы, -2007, - вып.3, - С.1-3.
- [4] Зюганов А.Н., Свечников С.В. Инжекционно-контактные явления в полупроводниках. Киев: Науково Думка, - 1981, - 256 с.