

10. Волчецкий, А. Л. Кристаллизация и кристаллография: медико-биологические аспекты / А. Л. Волчецкий, Л. Г. Рувинова, Б. А. Спасенников [и др.]. – Архангельск, 1999. – 374 с.
11. Шатохина С.Н. Морфологическая картина ротовой жидкости: диагностические возможности / С.Н.Шатохина, С.Н.Разумова, В.Н.Шабалин // Стоматология. - 2006. - №4. - С. 14-17.

### ДОЛГОВРЕМЕННАЯ РЕЛАКСАЦИЯ ФОТОЭЛЕКТРЕТНОГО СОСТОЯНИЯ ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИХ ПЛЕНОК CdTe:(Ag, Cu, Cd) И Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>:Se

Нурматов О.Р., Рахимжонов Ж.С., Толабоев Д.Х., Турсунов И.М., Юлдашев Н.Х.  
Ферганский политехнический институт, [uzferfizika@mail.ru](mailto:uzferfizika@mail.ru)

**Аннотация.** Приводятся результаты экспериментальных исследований долговременной релаксации фотоэлектретного состояния (ФЭС) в пленках CdTe:(Ag, Cu, Cd) и Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>:Se. Показано, что в активированных пленках ФЭС обусловлено с глубокими примесными уровнями или комплексами, в которых входит примесные атомы и собственные дефекты.

**Ключевые слова:** тонкие легированные пленки, аномальное фотонапряжение, фотоэлектретное состояние, долговременная релаксация.

Исследование долговременной релаксации аномального фотонапряжения (*АФН*) при темновой деполяризации фотоэлектретов от условий поляризации является наиболее существенным при анализе процессов, лежащих на основе образования фотоэлектретного состояния (*ФЭС*) без внешнего поля в полупроводниковых пленках [1-3]. В данной работе рассмотрены релаксационные процессы в пленках CdTe:(Ag, Cu, Cd) и Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>:Se, для чего снимались деполяризационные кривые аномального и фотоэлектретного напряжений в темноте в режиме холостого хода после фотополяризации.

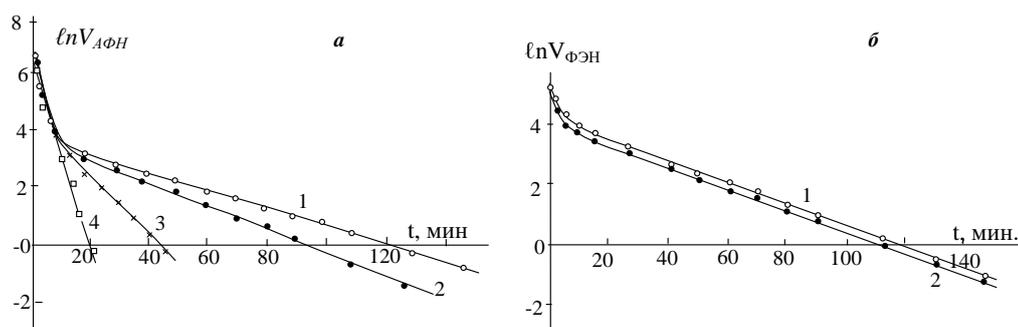


Рис. 1. Кривые релаксации  $V_{AFN}$  для *АФН* пленок CdTe : Ag (1, 2, 3), CdTe (4) (а) и кривые деполяризации «чистого»  $V_{ФЭН}$  для двух *АФН* пленок CdTe : Ag, полученных одновременно (б).  $T = 293 K$ .

На рис. 1,а приведены в полулогарифмических координатах зависимости  $V_{AFN}$  от времени релаксации для пленок CdTe : Ag (1, 2, 3) и CdTe (4). Кривые 1 и 2 соответствуют релаксацию  $V_{AFN}$  в пленках CdTe : Ag в воздухе и в вакууме  $10^{-2}$  мм.рт.ст., а кривая 3 представляет собою релаксацию фотонапряжения этой же пленки после неполной её фотополяризации (время поляризации 2–3 с). Кривая 4 характеризует ход релаксации  $V_{AFN}$  контрольного нелегированного образца, полученного одновременно с активированными

пленками. Из кривых релаксации видно, что время спада  $A\Phi H$  легированной пленки значительно больше времени релаксации контрольной пленки теллурида кадмия. Время релаксации  $A\Phi H$  в контрольной пленке практически совпадало с начальным временем релаксации нелегированных пленок и определялось временем максвелловской релаксации. Время релаксации одной и той же  $A\Phi H$  пленки  $CdTe:Ag$  на воздухе и в вакууме различаются на десятки мин. Это объясняется тем, что в процессе исследования  $\Phi Э С$  пленок, находящихся на воздухе или в атмосфере других газов, на значение фотополяризации влияют адсорбированные на поверхность образца ионы и электроны.

Для отделения «чистого» фотоэлектрического напряжения ( $\Phi Э Н$ ) от  $A\Phi H$  контакты фотополяризованного образца короткозамыкались на 2–3 с. Когда пленка вновь подключалась к электрометру, то через  $\sim 10$  с. устанавливалось стационарное  $\Phi Э Н$ .

На рис. 1,б представлены кривые деполяризации «чистого» фотоэлектрического напряжения в полулогарифмическом масштабе для двух активированных  $A\Phi H$  пленок  $CdTe:Ag$ , полученных в одинаковых технологических условиях. Из кривых деполяризации  $V_{\Phi Э Н}$  видно, что у каждой из них проявляются два прямолинейных участка, для которых деполяризация фотонапряжения описывается зависимостью вида

$$V_{\Phi Э Н} = V_{\Phi Э Н}^{CT} \exp(-t/\tau^*) \quad , \quad (1)$$

где  $V_{\Phi Э Н}^{CT}$  - начальное значение стационарного  $\Phi Э Н$ ,  $\tau^*$  - характеристическое время жизни неосновных носителей заряда на глубоких примесных уровнях, значение которого различно для участка кривых с различными наклонами. Начальный участок релаксационных кривых соответствует сравнительно быстрому спаду  $V_{\Phi Э Н}$  ( $\tau = \tau_{нач}$ ) и видимо связан с максвелловским временем релаксации, в тоже время также может проявляться наличие в пленках неглубоких уровней, а второй участок с долговременной релаксацией фотонапряжения ( $\tau = \tau^*$ ) и обусловлен более глубоким уровнем прилипания.

На рис. 2 приведены кривые релаксации  $V_{\Phi Э Н}$  для пленок  $CdTe: Cd$  (1),  $CdTe: Cu$  (2),  $Sb_2Se_3: Se$  (3) после полной фотополяризации с  $L = 8 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/см}^2$ . Участок

сравнительно быстрого спада  $V_{\Phi Э Н}$  во всех исследованных образцах имеет качественно одинаковый характер и мало зависит от экспозиции (сравните рис. 1,б, и 2). Второй участок кривых, соответствующий долговременному

спаду  $V_{\Phi Э Н}$ , сильно зависит от экспозиции. Насыщение  $V_{\Phi Э Н}$  наступает, например, в случае  $A\Phi H$  пленки  $CdTe: Ag$  при  $Z = 20 \frac{\text{Вм} \cdot \text{с}}{\text{см}^2}$ . Значения  $\tau_{нач}$  и  $\tau^*$  определились по углам наклона

кривых темновой деполяризации  $V_{\Phi Э Н}$ , т.е. как

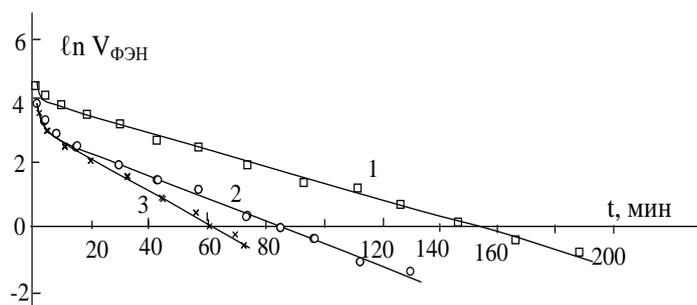


Рис. 2. Кривые деполяризации  $V_{\Phi Э Н}$  для  $A\Phi H$  пленок  $CdTe: Cd$  (кривая 1),  $CdTe: Cu$  (2) и  $Sb_2Se_3: Se$  (3) при  $T = 293 \text{ К}$ .

$$\tau = t / \ln \frac{V_{\PhiЭН}^{CT}}{V_{\PhiЭН}(t)}. \quad (2)$$

На рис. 3 приведены зависимости  $\tau_{нач.}$  и  $\tau^*$  от времени фото-поляризации, полученные в результате возбуждения светом интенсивности  $L = 8 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/см}^2$  исследуемых АФН пленок при комнатной температуре. Как видно из рисунка,  $\tau^*$  для пленок  $CdTe: Cd$ ,  $CdTe: Ag$  и  $Sb_2Se_3: Se$  доходило соответственно до значений 40–45, 30–35 и 20–25 мин, тогда как  $\tau_{нач.}$  было несколько минут. Отметим, что с понижением температуры значение  $\tau^*$  резко возрастало и измерялось часами, а значение  $\tau_{нач.}$  мало зависело от температуры. Рост измеряемой величины  $\tau^*$ , по-видимому, связан с изменением времени релаксации на уровни чувствительности аппаратуры, а не временем релаксации на заключительном этапе процесса. Экспериментальное значение  $\tau^*$  позволяет с помощью выражения

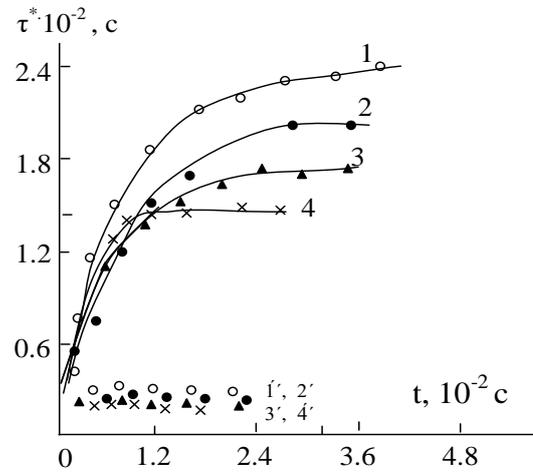


Рис.3. Зависимости  $\tau_{нач.}$  и (1-4) и  $\tau^*$  от времени фотополяризации для плёнок  $CdTe: Cd$  (1, 1'),  $CdTe: Ag$  (2, 2'),  $Sb_2Se_3: Se$  (3, 3')  $CdTe: Cu$  (4, 4').

$$\tau = \lambda \tau' = \frac{M}{N_v} \exp \frac{\epsilon_l - \epsilon_v}{kT} \cdot \tau' \quad (3)$$

определить энергию активации глубоких уровней прилипания, ответственных за ФЭС в исследуемой пленке.

Из второго линейного участка зависимости  $V_{\PhiЭН}(t)$  находим характеристическое время релаксации  $\tau = \tau^* = 35 \text{ мин}$ . Если считать, что этот основной участок релаксационной кривой ФЭН связан с захватом дырок на глубокий примесный уровень в  $n$ - областях АФН пленки, то принимая для этого уровня  $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ,  $\tau = 10^{-7} \text{ с}$ , получим следующее значение её глубины залегания:

$$\epsilon_{л_2} = \epsilon_v + 0,25 \text{ эВ} (40 - 15 \cdot 2,3 + 7,69) = \epsilon_v + 0,33 \pm 0,05 \text{ эВ}, \quad (4)$$

что хорошо совпадает с положением основного примесного уровня  $Ag$  в кристаллах  $CdTe$ . Это значение энергии активации подтверждается ещё и по

результатам исследований температурной зависимости  $\tau^*(T)$  (рис. 4), в которой в температурной области 300–400<sup>0</sup> K проявляется уровень  $0,35 \pm 0,05$  эВ, а в пределах температур 200–250 K, описываемое зависимостью  $\ln \tau \sim T^{-1/4}$  (предполагается, что  $\tau^*$  определяется электропроводностью как в неупорядоченном полупроводнике (закон Мотта), что наблюдается в сильно компенсированном CdTe [4]) - один мелкий уровень  $0,05 \div 0,11 \pm 0,05$  эВ.

Первый и второй энергетические уровни наблюдаются и по температурным зависимостям  $R_{nl}(T)$ ,  $V_{\phi\Phi H}(T)$  и  $\tau^*(T)$ . Уровень с энергией активацией 0,32 эВ в пределах погрешности также наблюдается в спектральных зависимостях фотоэлектрического напряжения  $V_{\phi\Phi H}(\lambda)$  и тока короткого замыкания  $I_{к.з.}(\lambda)$ . Отсюда заключаем, что ФЭС активированных АФН пленок CdTe: Ag обусловлено с глубокими примесными уровнями Ag или комплексом, в которой входит Ag.

Экспериментальные релаксационные кривые  $V_{\phi\Phi H}$  кроме этого позволили определить эффективные значения ёмкости активированных АФН пленок. Ёмкость пленки ( $C_{nl}$ ) определялась из формулы  $\tau^* = R_{nl}(C_{cx} + C_{nl})$ , где  $C_{cx}$  – схемная емкость (в наших измерениях  $C_{cx} \approx 3n\phi$ ).

### Литература

1. Адирович Э.И., Матов Э.М., Мирзамахмудов Т., Найманбоев Р., Рубинов., Шакиров Н., Юабов В.М. В сб.: «Фотоэлектрические явления и оптоэлектроника». Изд. «Фан», Ташкент, 1972. с.143.
2. Эргашев Ж., Юлдашев Н.Х. Фотоэлектрический эффект в полупроводниковых пленочных структурах. Монография.. «Техника», Фергана-2017, 180 с.
3. Нурматов, О. Р., Абдуллаев, Ш. Ш., & Юлдашев, Н. Х. (2021). Временная релаксация фотоэлектрического состояния в фотовольтаических пленках cdte: ag, cd, cu и sb2se3: se. Central Asian Journal of Theoretical and Applied Science, 2(12), 315-322.
4. Юлдашев, Н. Х., Ахмаджонов, М. Ф., Мирзаев, В. Т., & Нурматов, О. Р. У. (2019). Фотоэлектрические пленки CdTe: Ag и Sb2Se3 при собственном и примесном поглощении света share\* MERGEFORMAT. Евразийский Союз Ученых, (3-4 (60)), 72-78.

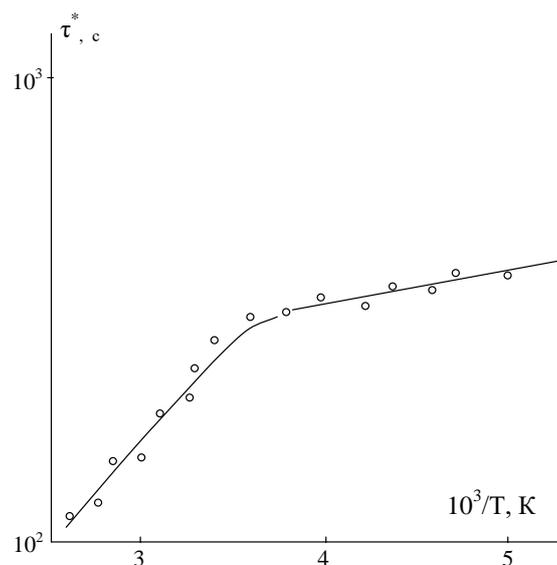


Рис. 4. Температурная зависимость  $\tau^*$  для АФН пленок CdTe: Ag.