

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 $Sb_2Se_3:Se$

Нурматов О.Р., Рахимжонов Ж.С., Толабоев Д.Х., Турсунов И.М., Юлдашев Н.Х.
Ферганский политехнический институт, uzferfizika@mail.ru

Аннотация. Приводятся результаты экспериментальных исследований долговременной релаксации фотоэлектретного состояния (ФЭС) в пленках $CdTe:(Ag, Cu, Cd)$ и $Sb_2Se_3:Se$. 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 ($A\Phi H$) при темновой деполяризации фотоэлектретов от условий поляризации является наиболее существенным при анализе процессов, лежащих на основе образования фотоэлектретного состояния ($\Phi Э С$) без внешнего поля в полупроводниковых пленках [1-3]. В данной работе рассмотрены релаксационные процессы в пленках $CdTe:(Ag, Cu, Cd)$ и $Sb_2Se_3:Se$, для чего снимались деполяризационные кривые аномального и фотоэлектретного напряжений в темноте в режиме холостого хода после фотополяризации.

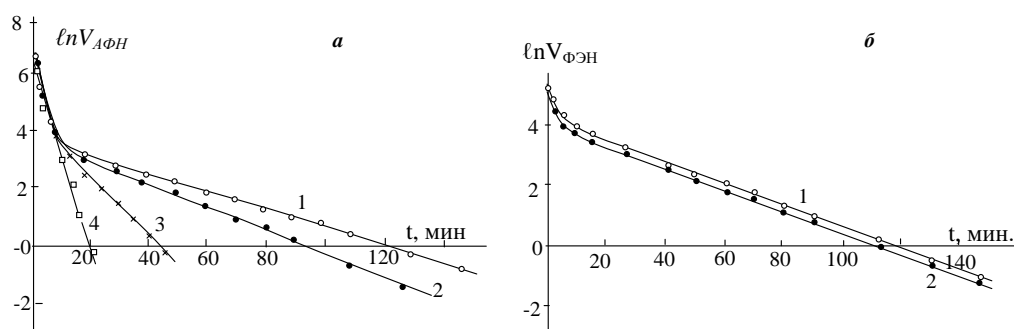


Рис. 1. Кривые релаксации $V_{A\Phi H}$ для $A\Phi H$ пленок $CdTe:Ag$ (1, 2, 3), $CdTe$ (4) (а) и кривые деполяризации «чистого» $V_{\Phi Э Н}$ для двух $A\Phi H$ пленок $CdTe:Ag$, полученных одновременно (б). $T = 293 K$.

На рис. 1,а приведены в полулогарифмических координатах зависимости $V_{A\Phi H}$ от времени релаксации для пленок $CdTe:Ag$ (1, 2, 3) и $CdTe$ (4). Кривые 1 и 2 соответствуют релаксацию $V_{A\Phi H}$ 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 $V_{A\Phi H}$ 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 ~ 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 $\Phi Э Н$, τ^* - 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 τ^* определились по углам наклона

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

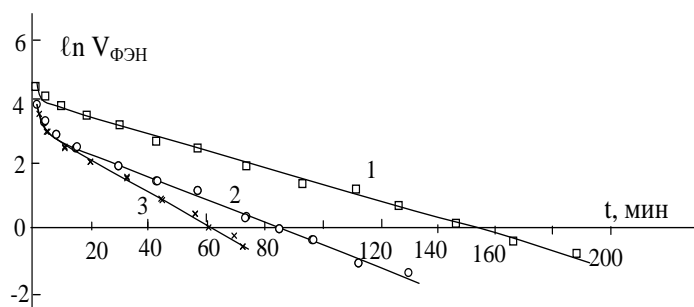


Рис. 2. Кривые деполяризации $V_{\Phi Э Н}$ для $A\Phi H$ пленок $CdTe: Cd$ (кривая 1), $CdTe: Cu$ (2) и $Sb_2Se_3: Se$ (3) при $T = 293 \text{ К}$.

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

На рис. 3 приведены зависимости $\tau_{нач.}$ и τ^* 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, τ^* 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 τ^* резко возрастало и измерялось часами, а значение $\tau_{нач.}$ мало зависело от температуры. Рост измеряемой величины τ^* , по-видимому, связан с изменением времени релаксации на уровне чувствительности аппаратуры, а не временем релаксации на заключительном этапе процесса. Экспериментальное значение τ^* позволяет с помощью выражения

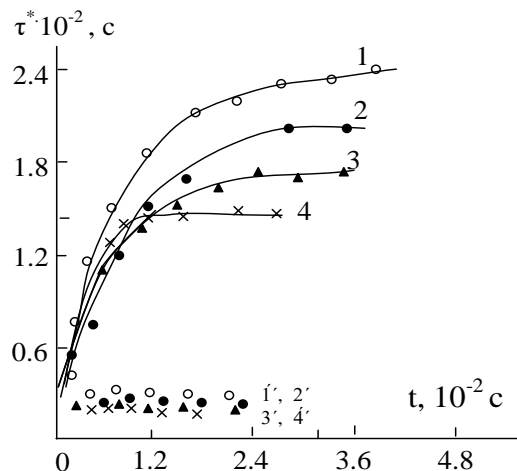


Рис.3. Зависимости $\tau_{нач.}$ и (1-4) и τ^* от времени фотополяризации для плёнок $CdTe: Cd$ (1, 1'), $CdTe: Ag$ (2, 2'), $Sb_2Se_3: Se$ (3, 3') $CdTe: Cu$ (4, 4').

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

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

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:

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

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 300–400⁰ 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 τ^* 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 $R_{nl}(T)$, $V_{\phi\Delta H}(T)$ и $\tau^*(T)$. Уровень с энергией активацией 0,32 эВ в пределах погрешности также наблюдается в спектральных зависимостях фотоэлектрического напряжения $V_{\phi\Delta H}(\lambda)$ и тока короткого замыкания $I_{к.з.}(\lambda)$. Отсюда заключаем, что ФЭС активизированных АФН пленок CdTe: Ag обусловлено с глубокими примесными уровнями Ag или комплексом, в которой входит Ag.

Экспериментальные релаксационные кривые $V_{\phi\Delta H}$ 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.

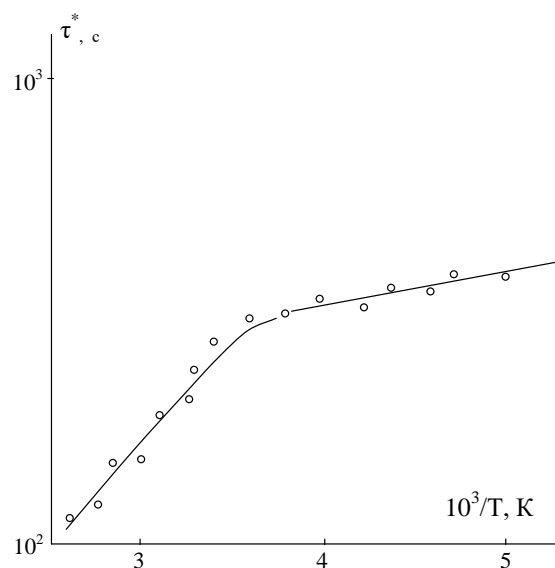


Рис. 4. Температурная зависимость τ^* для АФН пленок CdTe: Ag.