

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СЛОЕВ ХАЛЬКОГЕНИДОВ СВИНЦА

<https://doi.org/10.5281/zenodo.11530083>

Рахмонкулов М

Алимов Н.Э

Омонов Б

*Ферганский государственный университет,
Узбекистан, г.Фергана ул. Мураббийлар 19, 150100
email: alllnod@mail.ru*

Термический нагрев существенно влияет на диффузионные процессы в твердом теле, ускоряя их. В поликристаллах такие процессы имеют дополнительную особенность из-за неодинаковости коэффициентов диффузии примесей в объеме кристаллитов $D_{об}$ и на их границах кристаллитов $D_{гк}$. Поэтому в слоях халькогенидов свинца локализованные на поверхности кристаллитов кислородосодержащие центры весьма подвижны вдоль ГК. Нагрев слоев стимулирует диффузионные процессы, а условие $D_{гк} \gg D_{об}$ обеспечивает их наивысшую интенсивность вдоль ГК. При этом может происходить перераспределение концентрации примесей на ГК (они диффундируют из областей с большей концентрацией в области, где она меньше [1]). Кроме того, если нагрев достаточно длительный, примеси могут удаляться с ГК через поверхность слоев в среду.

Нами изучалось влияние прогрева на фотослои PbS двух типов слоев, полученных химическим и физическим (термовакuumным испарением) способами. На Рис.1. представлена кинетика изменения параметров фотослоев PbS, полученных химическим способом, при прогреве на воздухе и в вакууме.

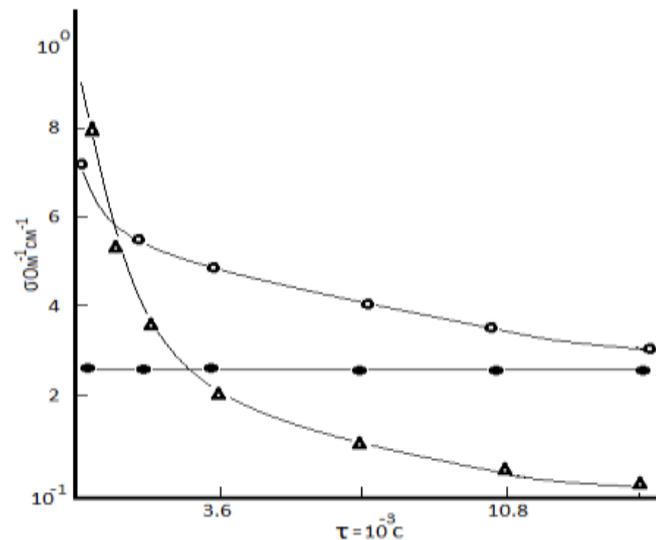


Рис.1. Кинетика изменения электропроводности фотослоев, полученных химическим способом при прогреве в вакууме. Температура прогрева T , К: 1-300; 2-340; 3 – 385.

Характер изменений типичен для тех изменений, которые происходят в результате диффузионных процессов. Наиболее отчетливо об этом свидетельствуют кинетика изменения электропроводности σ . Уменьшение σ -слоев при прогреве обусловлено падением концентрации носителей заряда (дырок) и сужением инверсионного канала проводимости из-за уменьшения амплитуды изгиба зон у ГК, вызванного диффузионным истощением ГК акцепторной примесью. Об уменьшении амплитуды изгиба зон свидетельствуют изменения в энергиях активации различных параметров слоев, определенных из температурных зависимостей этих параметров. При увеличении температуры прогрева процесс изменения параметров слоев ускоряется, но при этом основные закономерности в кинетике процесса сохраняются.

Диффузионный характер термической деградации свойств фотослоев PbS обсуждается давно. В [2] были приведены данные, подтверждающие такой взгляд на физическую природу влияния прогрева на слои PbS. Там же по кинетике изменения параметров слоев, полученных физическим способом, при прогреве в вакууме сделаны количественные оценки коэффициента диффузии кислорода вдоль ГК. Оценки производились в предположении, что истощение ГК кислородом при прогреве происходит по соотношению Гринберга:

$$N_s(\tau) \approx \text{const} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{rk} \tau}{4d^2}\right) \quad (1)$$

где $N_s(\tau)$ количество остаточного кислорода в слое в момент времени τ после начала диффузионного истощения, d - толщина слоя.

Численная обработка экспериментальных данных в [2] была проведена в рамках ничем не обоснованного предположения, что параметры фотослоев, такие как электропроводность, фотопроводимость и ее постоянная времени пропорциональны $N_s(\tau)$ и были получены следующие оценки: $D_{rk} \approx 0,7 \cdot 10^{10}$ см²/с при 305 К и $D_{rk} \approx 10^{10}$ см²/с при 313 К, энергия активации диффузии порядка нескольких десятых эВ. Анализируя работу [3] легко показать, что зависимости электрических и фотоэлектрических параметров слоев PbS от $N_s(\tau)$ более сложные. В частности, электропроводность фотослоя описывается выражением:

$$\sigma \approx \frac{e \mu_p d}{L} \frac{n_i^2}{N_d} \frac{kT}{\varphi} \exp\left(\frac{\varphi}{kT}\right) \quad (2)$$

где φ амплитуда изгиба зон у ГК, d - ширина инверсионного канала, L - средний размер кристаллитов, N_d - уровень легирования в кристаллитах, μ_p - подвижность дырок, n_i - собственная концентрация носителей заряда в PbS. Амплитуда изгиба зон в случае моноэлектрических поверхностных состояний на ГК определяется соотношением:

$$\varphi = \frac{e^2 f^2 N_s^2(\tau)}{8 \epsilon \epsilon_0 N_d} \quad (3)$$

Здесь f - функция заполнения состояний электронами. $\epsilon \epsilon_0$ диэлектрическая проницаемость PbS. Полагая $f=1$ (все состояния заполнены) и объединив (1) - (2), можно получить количественное выражение закона, описывающего кинетику изменения электропроводности при диффузионном истощении ГК кислородом. Не приводя здесь математической формулы для $\sigma(\tau)$, укажем, что через нее можно вывести расчетную формулу определения D_{rk} посредством измерения σ в трех различных моментах после начала диффузионного процесса:

$$D_{rk} \approx \frac{2d^2}{\pi^2 \Delta \tau} \ln \frac{\ln \sigma(\tau_1) - \ln \sigma(\tau_2)}{\ln \sigma(\tau_2) - \ln \sigma(\tau_3)} \quad (4)$$

где $\Delta \tau = \tau_2 - \tau_1 = \tau_3 - \tau_2$.

Перерасчет, согласно (4), экспериментальных данных [2] показал, что $D_{rk} \approx 2,5 \cdot 10^{-12}$ см²/с при 305 К и $D_{rk} \approx 3,1 \cdot 10^{-12}$ см²/с при 313 К. Эти данные прекрасно коррелируют с результатами, полученными с использованием другой методики расчета, на сути которой мы остановимся далее.

В свежеприготовленных фотослоях PbS ГК сильно насыщены активирующей примесью, поэтому на границе раздела поверхность слоя - среда существует резкий градиент ее концентрации.

Процесс истощения ГК примесью при прогреве полностью соответствует случаю диффузии из слоя конечной толщины в полуограниченную среду, когда граница последней - отражающая. (Для пленок отражающей границей является граница раздела пленка-подложка). Уравнение диффузии при этом имеет вид:

$$N_s(x, \tau) = \frac{N_s}{2} \left(\operatorname{erf} \frac{d+x}{2\sqrt{D_{ГК}\tau}} + \operatorname{erf} \frac{d-x}{2\sqrt{D_{ГК}\tau}} \right) \quad (5)$$

где N_{s0} - концентрация примеси на ГК в момент времени $t=0$.

Используя (1), (2) и (5), можно получить аппроксимацию кинетики изменения электропроводности слоя при истощении ГК примесью:

$$\ln \frac{\sigma(0)}{\sigma(\tau)} \approx \frac{\varphi(0)}{kT} \operatorname{erfc} \frac{d}{2\sqrt{D_{ГК}\tau}} \quad (6)$$

По расчетным формулам (5) и (6) были обработаны все кривые $\sigma(\tau)$, приведенные на рис. 12, а также экспериментальные данные работы [2] и экспериментов по прогреву слоев PbS, полученных физическим способом. Энергии активации диффузии, рассчитанные по этим данным, равны $(1,7 \pm 0,3) \cdot 10^{-1}$ и $(2,9 \pm 0,3) \cdot 10^{-1}$ эВ в слоях, полученных соответственно физическим и химическим способами. Заметное различие в диффузионных параметрах слоев двух типов связано с принципиальным отличием технологий их получения. Действительно, в слоях, полученных физическим способом, активирующей примесью является кислород, а в слоях, полученных химическим способом, его комплексы. По-видимому, кислородные комплексы менее подвижны вдоль ГК, чем атомарный кислород, что и обеспечивает более высокие $D_{ГК}$ и меньшую энергию активации диффузионного процесса в слоях, полученных физическим способом.

Отметим, что значения $D_{ГК}$, определяемые нами для слоев, полученных физическим способом, из экспериментальных данных по диффузионному истощению ГК примесью, очень близки к значениям $D_{ГК}$, приведенным в [68] для случая диффузионного заполнения ГК кислородом при сенсibiliзирующем отжиге слоев PbS.

ЛИТЕРАТУРА

1. Атакулов Ш.Б. , Онаркулов К.Э. , Рахмонкулов М.Х. ФТП. 1986. Т.25. В.4. с.633 -636.
2. Рывкин С.М.// КТФ. 1952. Т.22. В 12. С.1930 - 1944.
3. Неустров Л.Н. , Осипов В.В.// ФТП. ФТП. 1986. Т.20. В.1 с. 59 - 72.