

6. Jimenez, D., Jimenez, J. J. Saenz, Iniguez, B., Sune, J., Marsal, L. F., Pallares, J., Modeling nanoscale gate-all-around MOSFETs, IEEE Electron Device Letter 25(5) (2004) 314-316. <https://doi.org/10.1109/LED.2004.826526>.

7. S. Bangsaruntip, "Density scaling with gate-all-around silicon nanowire MOSFETs for the 10 nm node and beyond," in Proc. IEEE Electron Devices Meeting (IEDM), Washington, DC, USA, Dec. 2013, pp. 20.2.1–20.2.4

## ТЕРМИЧЕСКИЕ ДИФФУЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СЛОЯХ PbTe И PbSe

М.Х.Рахманкулов,

Ферганский государственный университет

**Аннотация:** В статье исследуется влияние термической диффузионные процессы обработки на в слоях халькогенида свинца.

**Ключевые слова:** халькогенид свинца, термообработка, кислородная среда, процесс диффузии, граница кристаллов, свободный поверхность.

Поликристаллические пленки PbTe толщиной 2 мкм получали на кварцевые и слюдяные подложки термическим испарением в вакууме  $\sim 10^{-4}$  Па. Температуру испарителя ( $T_{и}$ ) изменяли от 953 до 1073 К, а температуру подложки ( $T_{п}$ ) от 393 до 473 К. Пленки получались исходно n-тип проводимости. которые после термоотжига на воздухе переходили в p-тип. Поликристаллические слои PbSe получались химическим осаждением из раствора, содержащего селеномочевину на кварцевые подложки. Фоточувствительность слоев измеряли непосредственно после осаждения и на тех же образцах после отжига на воздухе при  $T_{отж} = 673$  К в течение 3 часов. Все исследованные образцы после осаждения заметной фоточувствительностью не обладали и только после высокотемпературного термоотжига стали фоточувствительными. Измерялись темновая проводимость ( $\sigma_T$ ), отношение напряжения фотосигнала ( $U_c$ ) к шуму ( $U_{ш}$ ) и коэффициент термоэдс ( $\alpha$ ) до и после термической обработки (ТО) при температуре  $T_{т} = 360 - 420$  К [1-5].

На рис. 13 и 14 приведены изменения ( $\sigma_T$ ),  $\alpha$  и ( $U_c$ )/( $U_{ш}$ ) образцов от времени ТО при температуре  $T_{т} = 330$  К (рис 14) и  $T_{т} = 423$  К (рис 15) на воздухе, типичные для всех исследованных образцов. Из рис 13 и 14 видно, что при ТО характер изменений типичен для тех изменений, которые происходят в результате диффузионных процессов [6-8].

Обсуждение полученных экспериментальных результатов делим на два этапа: 1) термоотжиг пленок и появление фоточувствительности, 2) изменение свойств пленок при ТО.

Как было отмечено, халькогениды свинца очень чувствительны к присутствию кислорода или его комплексов. Поэтому появление фоточувствительности в пленках PbTe и PbSe при термоотжиге на воздухе связано с адсорбцией кислорода и поверхностным окислением. По данным рентгенофазового анализа, в фоточувствительных пленках PbTe наряду с основной фазой имеются и оксидные фазы:  $\alpha$  - PbTe  $O_3$ , Pb $_3$  O $_4$ , Te O $_2$ , а в пленках PbSe: Pb $_3$  O $_4$ , PbSeO $_3$ . Кроме оксидных фаз в поликристаллических пленках

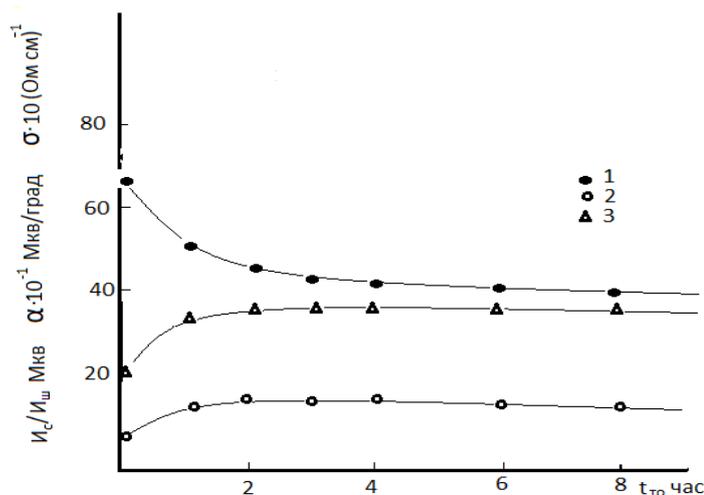


Рис.1. Изменение электропроводности (1), отношение напряжения сигнала к шуму (2) и коэффициента термоэдс (3) при термической обработке при  $T_{то} = 330$  К.

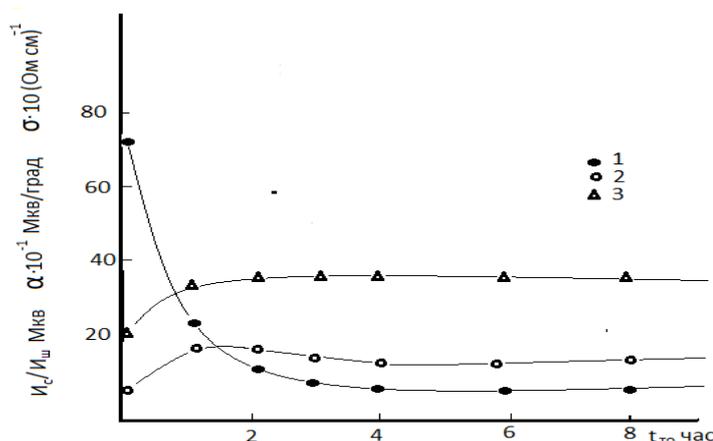


Рис.2. Изменение электропроводности (1), отношение напряжения сигнала к шуму (2) и коэффициента термоэдс (3) при термической обработке при  $T_{то} = 423$  К.

содержится адсорбированный кислород, который играет существенную роль в фоточувствительности [9-10]. Об этом свидетельствуют еще следующие факты. После проведения длительного вакуумирования некоторые фоточувствительные слои теряют фоточувствительность и при дальнейшем хранении на воздухе пленки вновь становятся фоточувствительными.

Для халькогенидов свинца кислород является примесью, создающей акцепторные состояния как в объеме, так и на поверхности. Известно [11], что фоточувствительные поликристаллические пленки на основе халькогенидов свинца близки по своим физическим свойствам. Поэтому для интерпретации особенностей электрофизических, фотоэлектрических и гальваномагнитных явлений в этих пленках обычно используются одни и те же модельные представления.

В настоящее время в фоточувствительных слоях типа PbS вполне однозначно установлены внутренняя структура и характер электронных явлений, протекающие в них [12], которые заключаются в следующем.

На поверхности кристаллитов р-типа проводимости имеются образованные в процессе окисления акцепторные поверхностные состояния. Захват электронов из объема кристаллитов на эти состояния приводит к инверсионному изгибу зон у границ кристаллитов. Электроны

запираются в объеме у границ кристаллитов высокими барьерами p- p-переходов, токоперенос осуществляется дырками вдоль инверсионных каналов у поверхности кристаллитов. При освещении фотодырки, генерируемые светом скапливаются у поверхности кристаллитов в инверсионных каналах, а фотоэлектроны - у границ кристаллитов. Фотопроводимость слоев PbS обусловлена увеличением концентрации дырок в проводящих каналах и времени их жизни. Время жизни фотоносителей в слоях возрастает в сравнении со случаем объемных кристаллов за счет пространственного разделения фотоносителей различного знака потенциальным барьером p-p-перехода.

Появление фоточувствительности в слоях PbTe и PbSe также объясняется аналогичным образом. Дополнительным подтверждением такого предположения является обнаружение долговременной релаксации фотопроводимости, которое авторы [13] связывают с захватом фотоэлектронов на акцепторные состояния, образовавшиеся вследствие адсорбции кислорода в межблочных границах или на поверхности пленки.

Как выше отмечено, при термоотжиге на воздухе на поверхности пленки образуются окисные слои. Далее поликристалличность структуры вносит дополнительные особенности в диффузионные процессы из-за неодинаковости интенсивностей проникновения кислорода в объем кристаллитов и их границы. Интенсивность изменения параметров существенно возрастает при повышении температуры ТО (сравнение рис.14 и 15), что также указывает на диффузионную природу деградационных явлений.

Далее предположим, что за время  $\Delta t$  концентрация кислородных состояний на ГК увеличилась на величину  $N_s$ , и, причем, все эти состояния заполнились электронами. Тогда при условии, что  $\Delta N \ll N_s$  можно оценить изменения высоты барьера:

$$\varphi_s(0, t + \Delta t) = \varphi_s + \frac{e^2 N_s}{2\epsilon\epsilon_0 N_d} \cdot \Delta N_s \quad (1)$$

Второе слагаемое в правой части (1) указывает изменение  $\varphi_s$  за время  $\Delta t$ .

В пленках распределение кислорода вдоль ГК по толщине в процессе диффузии неоднородно и зависит от координаты по толщине пленки ( $y=0$  соответствует поверхности пленки). Поэтому концентрация кислородных состояний на ГК и ее изменение в момент времени  $t$  является функцией  $y$ :

$$\Delta N_s(\Delta t) = \Delta N_s(\Delta t, y) \quad (2)$$

Таким образом, зная в (30) величину  $N_s$ , по экспериментальным зависимостям  $\ln\sigma_T(t)$  можно найти  $D_{rk}$ , а исследуя кинетику изменения электропроводности при различных температурах в процессе ТО на воздухе, согласно соотношению:

$$D_{rk} = D_{rk} \cdot \exp(-\Delta E_D/kT) \quad (3),$$

определить параметры диффузии вдоль ГК.

В работе [65] приведены численные значения параметров диффузии вдоль ГК в физических и химических слоях PbS :  $D_k = 5,0 \cdot 10^{-12}$  см<sup>2</sup>/с;  $D_k = 0,5 \cdot 10^{-13}$  см<sup>2</sup>/с при  $T_{то} = 320$  К и  $D_k = 9,2 \cdot 10^{-12}$  см<sup>2</sup>/с;  $D_k = 2,0 \cdot 10^{-13}$  см<sup>2</sup>/с при  $T_{то} = 370$  К соответственно для слоев полученных термовакuumным испарением и химическим осаждением. Рассчитанные энергии активации диффузии оказались равными  $\Delta E_D = (1.7 \pm 0.3) \cdot 10^{-1}$  эВ в физических слоях и  $(2.9 \pm 0.3) \cdot 10^{-1}$  эВ в химических слоях.

Обработка кривых  $\sigma_T$  рис.12 и 13 дали следующие значения:  $D_{rk} = 0,5 \cdot 10^{-13}$  см<sup>2</sup>/с;  $9,0 \cdot 10^{-14}$  см<sup>2</sup>/с при 420 К и 360 К для PbTe и  $D_{rk} = 2,0 \cdot 10^{-13}$  см<sup>2</sup>/с;  $0,3 \cdot 10^{-13}$  см<sup>2</sup>/с для PbSe.

Как отмечено в работе [63], энергия активации диффузии в химических слоях больше, чем в физических слоях. Это связано с принципиальным отличием технологий их получения. По-видимому, в химических слоях межкристаллитными примесями являются кислородные комплексы и они менее подвижны по ГК, чем атомарный кислород.

Таким образом, можно отметить, что в поликристаллических слоях халькогенидов свинца изменение свойств при воздействии температуры определяется диффузией межкристаллитной примеси по границам кристаллитов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шьюмон П. Диффузия в твердых телах. М., «Металлургия», 1966.
2. Болтакс Б. И. Диффузия и точечные дефекты в полупроводниках. Л., «Наука», 1972.
3. Малкович Р.Ш. О расчете коэффициента диффузии в твердых телах. ФТТ.1959, т. I, № 4, с. 605.
4. Levine H. S., Maccallum C. J. Grain Boundary and Lattice Diffusion in Polycrystalline Bodies. – J. appl. Phys., 1960, v 31, N 3, p. 565.
5. Климкова О. А., Ниязова О. Р. Радиационно-ускоренная диффузия золота в кремнии. ФТТ, 1970, т. 12, № 7, с 2199.
6. Малкович Р.Ш., Нистирюк И. В., Савин Э. А. Попытка обнаружения миграции золота в кремнии под влиянием  $\gamma$ -облучения. ФТТ, 1975, т. 17, № 8, с. 2415.
7. Зайтов Ф. А., Горшков А. В., Шаляпина Г. М. К вопросу о радиационно-стимулированной диффузии в теллуриде ртути и  $Cd_xHg_{1-x}Te$ . ФТТ, 1979, т. 21, № 7, с. 2138.
8. Зейтц Ф. в сб. «Действие излучений на полупроводники и изоляторы» под ред. С. М. Рывкина, стр. 9, ИЛ (1954).
9. Омонов, Б. У. (2022). ТЕРМИЧЕСКАЯ ДЕГРАДАЦИЯ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СЛОЕВ PЬS. *IJODKOR O'QITUVCHI*, 2(19), 24-28.
10. Omonov, B. U., & Muhammadaminov, S. (2022). OYNING SINODIK DAVRINING SIDERIK DAVRIDAN UZUNLIGINI TUSHUNTIRISH. *IJODKOR O'QITUVCHI*, 2(19), 20-23.
11. Юлдашев, А. А., Хошимов, Х. А. Ў., & Омонов, Б. У. Ў. (2022). ОПТРОНЛАР ЯРАТИШНИНГ ХОСЛИКЛАРИ. *Scientific progress*, 3(2), 827-832.
12. O'G'Li, B. U. B. (2020). UMUMIY O'RTA TA'LIM MAKTABLARIDA "OY TUTILISHI VA UNING SHARTLARI" MAVZUSINI O'QITISHDA INTERFAOL METODLARDAN FOYDALANISH. *Science and Education*, 1(7), 160-164.
13. Рахмонкулов, М. Х., Ахмедова, Д., & Омонов, Б. (2022). ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В МАССИВНЫХ И ПЛЕНОЧНЫХ ХАЛЬКОГЕНИДАХ СВИНЦА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С КИСЛОРОДОМ. *PEDAGOG*, 5(7), 22-25.

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА АФН В НЕОДНОРОДНЫХ ТОНКИХ ПЛЕНКАХ

Ш.А.Юлдашев, Ш.А.Юлдашева, Р.Т.Туланова

Ферганский государственный университета

**Аннотация:** Поликристаллическая неоднородная структура, но дефектность самых кристаллитов являются факторами аномальности в АФН-элементах. очень чувствительным к неоднородностям в АФН-элементе являются АФН, АФМН и другие магнитооптические, электрооптические эффекты. В которой они по величине АФН-эффекта в пленках CdTe судили однородном микрокристаллическом пленке.