

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
А В Т О М Е Т Р И Я

№ 4

1993

УДК 621.315.592

О. А. Гудаев, В. А. Трещихин

(Новосибирск)

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ОТЖИГ И ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ПЛЕНОК PbS

Проведены исследования низкотемпературного отжига ($T \leq 100^\circ\text{C}$) химически осажденных фотоочувствительных слоев PbS. Показано, что существует одновременно тесная корреляция фотоочувствительности времени жизни неравновесных носителей и темновой проводимости образцов. Наблюдаемые корреляции объясняются исходя из механизма переноса зарядов по уровню протекания в средах с сильными пространственными флуктуациями проводимости. На основании предложенной модели сделан вывод о том, что в процессе низкотемпературного отжига происходит уменьшение глубины флуктуаций потенциального рельефа в пленках PbS.

Введение. Фотоочувствительные пленки PbS нашли широкое применение в приборах для ближнего ИК-диапазона. Одним из основных методов их получения является химическое осаждение слоев из раствора со стехиометрическим содержанием серы и свинца. Однако в процессе выращивания возникают не только зерна PbS стехиометричного или близкого к нему состава, но захватывается большое количество кислорода, воды и окислов серы и свинца. Концентрация кислорода в пленках, полученных таким методом, особенно вблизи поверхности, может быть сравнима с концентрацией серы и свинца. Кислород содержится в слое как в составе химических соединений PbO , Pb_2O_3 , PbSO_4 , $\text{PbO} \cdot \text{PbSO}_4$, так и в несвязанном состоянии [1]. Исследования, проведенные с химически осажденными слоями, показали сильное влияние на свойства пленки адсорбированной воды [2]. Все это приводит к тому, что не только высокотемпературный, но и низкотемпературный отжиг ($T \leq 100^\circ\text{C}$) оказывает сильное влияние на физические параметры фотоочувствительных слоев PbS. В работе исследовано влияние низкотемпературного отжига химически осажденных слоев PbS в кислородосодержащей среде и вакууме на спектр и величину фотоочувствительности, темновое сопротивление, уровень шумов и т. д.

Экспериментальные результаты. Эксперименты проводились со свежеразращенными поликристаллическими (размер кристаллитов $\sim 0,1$ мкм) пленками PbS, полученными методом химического осаждения на кремниевые подложки с подслоем SiO_2 . Золотые электроды наносились на подложку до осаждения фотоочувствительного слоя. Геометрические размеры образца 50×50 мкм. Толщина пленки 0,8 мкм. Концентрация основных носителей дырок и их подвижность, измеренные по эффекту Холла при комнатной температуре, $(1-3) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $\sim 1 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Отжиг образцов проводился на воздухе в муфельной печи и непосредственно в криостате при температурах ниже 100°C . При этом получено, что отжиг при 80°C как на воздухе, так и в вакууме приводит к сильному (в несколько раз) изменению величины фотоочувствительности фотосопротивлений PbS. Продолжительный отжиг ($> 6-8$ ч) во всех случаях приводит к уменьшению величины чувствительности пленок PbS (рис. 1). Отжиг на воздухе при малых временах (1-2 ч) может

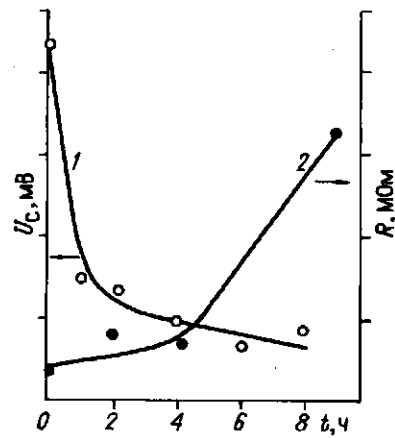


Рис. 1. Зависимость фоточувствительности (1) темного сопротивления (2) фотоприемников PbS от времени отжига на воздухе при 80 °С, $T = 180$ К

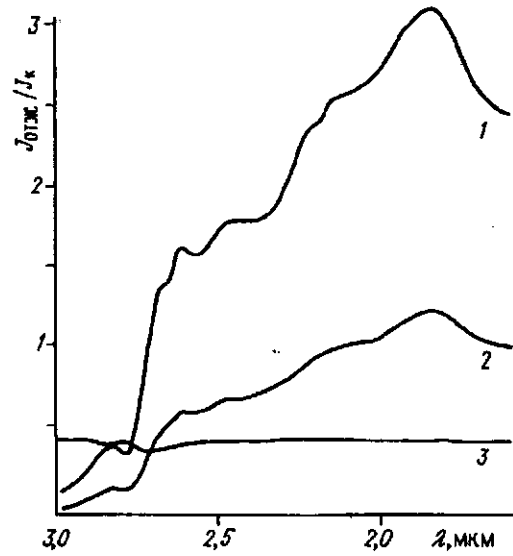


Рис. 2. Спектры фоточувствительности фотоприемников PbS до (1) и после (2) отжига и их отношение (3).
Отжиг при 80 °С 24 ч на воздухе, $T = 293$ К

приводить к некоторому увеличению токовой чувствительности. Однако это увеличение проявляется не на всех образцах и подвержено уменьшению со временем. Отжиг в вакууме при всех временах отжига приводит к уменьшению токовой чувствительности. Темновое сопротивление слоев PbS после отжига при $T = 80$ °С возрастает как на воздухе, так и в вакууме (см. рис. 1). Несмотря на сильное изменение величины фоточувствительности, заметных изменений в спектре фотопроводимости не происходит. На рис. 2 показаны типичные спектры фоточувствительности образцов PbS до и после отжига и их отношение. Видно, что изменение величины фотопроводимости одинаково на всех длинах волн в диапазоне 1,5—3,5 мкм. Проводились также измерения изменений уровня шумов в зависимости от степени низкотемпературного отжига сопротивлений PbS. При этом показано, что уровень шума при отжиге, как правило, понижается.

Обсуждение результатов. Величина фотопроводимости феноменологически описывается выражением вида

$$\sigma_p = e\alpha\tau I,$$

где I — интенсивность света, α — коэффициент поглощения, e — заряд электрона, τ — время жизни неравновесных носителей.

Учитывая, что в процессе низкотемпературного отжига в спектре фотопроводимости не происходит никаких изменений (см. рис. 2), можно сделать вывод, что коэффициент поглощения α при этом не изменяется. Изменения происходят с произведением параметров $\mu\tau$. Важно понять, что же вносит определяющий вклад в изменение фотопроводимости: изменение транспортных свойств носителей, которое должно отразиться на темновой проводимости, или изменение времени жизни неравновесных носителей, которое можно измерить независимо. Для выяснения этого вопроса исследовались корреляции темновой проводимости образцов и их фотопроводимости, а также фотопроводимости и времени жизни неравновесных носителей, измеренные по спаду фотопроводимости. Названные параметры измерялись для партий образцов с большим разбросом величины фотопроводимости. В итоге обнаружено, что между темновой проводимостью и фотопроводимостью есть прямая корреляция (рис. 3). Образцы с более высокой проводимостью обладают и

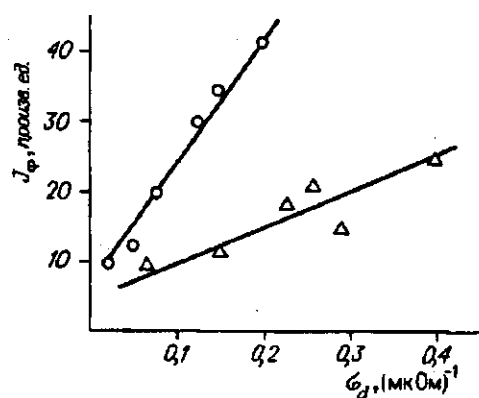


Рис. 3. Связь фоточувствительности и темновой проводимости в пленках PbS, $T = 180$ К: кружки, треугольники — серия образцов с разной технологией

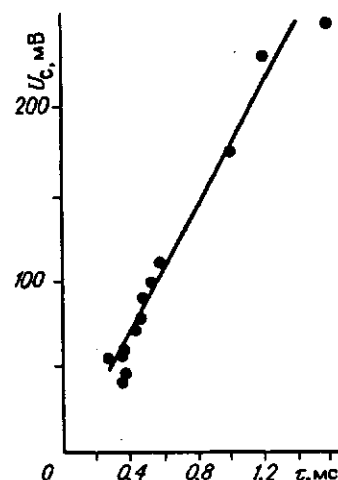


Рис. 4. Зависимость фоточувствительности от времени жизни неравновесных носителей для пленок PbS, $T = 180$ К

более высокой фотопроводимостью. Механизм переноса зарядов в поликристаллических пленках PbS до сих пор интенсивно обсуждается исследователями [3, 4]. Ряд эффектов (например, нелинейные эффекты, возникающие в сильных полях) лучше всего удается объяснить в рамках перколяционной теории. При этом учитывается, что не все потенциальные барьеры в слоях PbS играют одинаковую роль при переносе зарядов. Носители сами выбирают себе траекторию в пространстве, приводящую к наименьшему сопротивлению. При этом они обтекают наиболее высокие потенциальные горбы. Энергетический уровень, по которому носители могут пройти через весь образец, не застряв ни в одной из потенциальных ям, есть уровень протекания.

Вопрос о корреляциях между темновой и фотопроводимостью также рассматривался в рамках перколяционного подхода [5]. Показано, что если для каких-то образцов амплитуда случайных флуктуаций потенциала возрастает, это приводит к изменению положения уровня протекания относительно уровня Ферми и увеличению темновой проводимости. Таким образом, для поликристаллических пленок PbS величина фотоувствительности оказывается тесно связана с транспортными свойствами носителей.

Кроме того, наблюдается также корреляция фотопроводимости и времени жизни неравновесных носителей (рис. 4). Чем больше время жизни неравновесных носителей, тем выше фотоувствительность. Одновременное наблюдение этих двух корреляций для случайной партии образцов возможно лишь в том случае, если существует тесная взаимосвязь транспортных и рекомбинационных свойств носителей в поликристаллических пленках PbS. Эту взаимосвязь нетрудно понять. Транспорт носителей в неупорядоченных средах обусловлен движением их вблизи уровня протекания. Чем сильнее глубина флуктуаций потенциала края зоны, тем меньше расстояние между уровнем Ферми и уровнем протекания [5]. Это приводит в итоге к росту темновой проводимости. С другой стороны, в неупорядоченных материалах время жизни неравновесных носителей определяется рекомбинацией через рекомбинационные барьеры $\tau = \tau_0 \exp V_r / kT$ [6]. Чем больше глубина флуктуаций потенциала, тем выше рекомбинационные барьеры, тем больше τ .

Закключение. Таким образом, отметим, что увеличение амплитуды случайных флуктуаций потенциала приводит к изменению положения уровня протекания и увеличению темновой проводимости. Это же обстоятельство приводит к возрастанию рекомбинационных барьеров, увеличению времени жизни возбужденных носителей, а следовательно, фотоувствительности ма-

териала. При отжиге происходит уменьшение темповой проводимости и фоточувствительности пленок PbS. Это указывает на то, что при этом глубина флуктуаций потенциального рельефа уменьшается. Небольшое нестабильное увеличение фоточувствительности для некоторых образцов пленок PbS при непродолжительном отжиге в кислородосодержащей среде обусловлено, видимо, влиянием на рекомбинационный процесс поверхностных состояний, заполнение которых изменяется в результате процесса адсорбции-десорбции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковалев А. Н., Парамонов В. И. Формирование фоточувствительных слоев сульфида свинца // Поверхность. Физика, химия, механика.—1985.—8.—С. 90.
2. Физика тонких пленок /Под ред. Г. Хасса, Р. Э. Туна.—М.: Мир, 1968.
3. Атакулов Ш. В., Онаркулов К. Э. О перколяционной проводимости фоточувствительных химически осажденных слоев сернистого свинца // ФТП.—1985.—19, вып. 7.
4. Неустроев Л. Н., Осипов В. В. К теории физических свойств фоточувствительных поликристаллических пленок типа PbS // ФТП.—1986.—20, вып. 1.
5. Gudaev O. A., Malinovsky V. K., Paul E. E., Treshikhin V. A. The percolation conductivity and characteristic scale of potential in homogeneity in polycrystalline films // Solid State Commun.—1989.—72, N 8.—P. 791.
6. Шейкман М. К., Шик А. Я. Долговременные релаксации и остаточная проводимость в полупроводниках // ФТП.—1976.—10, вып. 2.

Поступила в редакцию 9 октября 1992 г.