

УДК 621.315.592

О. А. Гудаев, Э. Э. Пауль

(Новосибирск)

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ РЕКОМБИНАЦИИ НА ПАРАМЕТРЫ ПЛЕНОЧНЫХ ФОТОПРИЕМНИКОВ PbS

Показано, что температурная зависимость фотопроводимости химически осажденных слоев PbS имеет максимум, который определяется суперпозицией температурных зависимостей подвижности μ и времени жизни неравновесных носителей τ . В зависимости от технологии подготовки подложки перед осаждением фоточувствительного слоя поверхностные состояния на границе раздела пленка — подложка могут играть большую или меньшую роль в рекомбинационном процессе. Увеличение поверхностной рекомбинации приводит к уменьшению τ и μ и изменению температурной зависимости фотопроводимости.

Введение. Физические процессы, происходящие в солях свинца и определяющие работу фоточувствительных приборов на их основе, до сих пор интенсивно обсуждаются исследователями [1—5]. Дискутируется, в частности, вопрос о том, что определяет поведение температурной зависимости фотопроводимости в виде кривой с максимумом. Этот вопрос актуален не только для фотослоев из солей свинца. Аналогичное поведение имеет температурная зависимость фотопроводимости и для ряда других неупорядоченных материалов. Наиболее распространенное объяснение такого поведения фоточувствительности при изменении температуры — сравнение в максимум величин концентраций равновесных и неравновесных носителей и смена механизма рекомбинации [6]. В [5], однако, показано, что для пленок PbS это не так. Поэтому одна из задач данной работы — выяснение параметров, определяющих движение и рекомбинацию носителей, а также величину и зависимость фоточувствительности слоев PbS от температуры. Параметры фоточувствительного слоя, а именно: величина фотоотклика, температурная зависимость темпового сопротивления и фоточувствительности и т. д. — сильно зависят от технологических условий изготовления фотоприемников. Одна из определяющих причин этого — качество подготовки подложки с нанесенными на нее золотыми электродами перед осаждением фоточувствительного слоя. Неконтролируемые условия, возникающие на подложке перед стадией химического осаждения слоев PbS, приводят к сильно отличающимся для разных образцов картинам распределения фоточувствительности по площади фотоприемника, величинам фотоотклика и интенсивностям шумов. Было показано [1], что одна из причин перечисленных явлений — качество контактов электрод — пленка, возникающих при осаждении фоточувствительного слоя. Неоднородное распределение чувствительности по слою PbS, скачки потенциала у электродов, ухудшающих параметр приборов на основе слоев PbS, — еще не все причины, сильно влияющие на свойства фоточувствительного слоя. Оказалось, что и образцы с хорошим контактами могут сильно различаться по своим свойствам в зависимости от качества обработки поверхности подложки перед осаждением пленки PbS. Поэтому другой вопрос, рассмотренный в данной работе, состоит в том, как параметры фотоприемников, как и в силу каких причин изменяются при смен

технологии подготовки подложки перед осаждением фоточувствительного слоя.

Экспериментальные результаты. Для выяснения влияния качества подготовки подложек перед осаждением фоточувствительного слоя на свойства фоторезисторов была приготовлена партия образцов, в состав которых входили фотослой, полученные методом химического осаждения из раствора одного и того же состава на подложки, приготовленные по двум разным технологиям: 1) контрольный образец, 2) ионное травление (ИТ). Технология 2 включала в себя ИТ-подложки перед осаждением фоточувствительного слоя. Осаждение осуществлялось на кремниевые подложки с подслоем SiO_2 . Золотые электроды наносились на подложку до осаждения пленки. Размеры фоточувствительных площадок $\sim 50 \times 50$ мкм, толщина пленки $\sim 0,8$ мкм. Образцы имели p -тип проводимости; концентрация носителей, определенная по эффекту Холла, $\sim (1-3) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$; холловская подвижность $\sim 1 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при комнатной температуре. Проведенные измерения показали, что образцы, приготовленные по технологии 2, имели более низкую ватт-амперную чувствительность и более сильную зависимость темнового сопротивления от температуры. Чтобы выяснить причины, приводящие к этому, проведены измерения температурных зависимостей времени жизни неравновесных носителей $\tau(T)$, величины фотоотклика $\sigma_p(T)$ и темновой проводимости $\sigma(T)$ (рис. 1 и 2). Из полученных результатов следует, что времена жизни неравновесных носителей контрольного и ИТ-образцов при комнатной температуре близки, однако с понижением температуры время жизни фотоносителей для контрольного образца растет

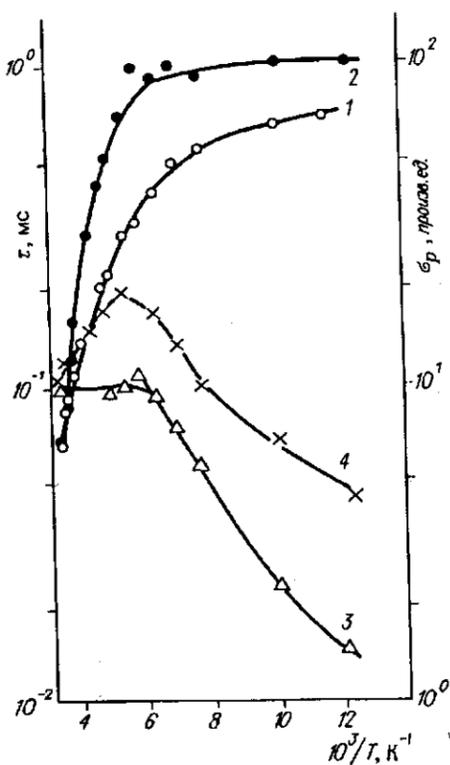


Рис. 1. Температурные зависимости фотопроводимости (кривые 3 и 4) и времени жизни неравновесных носителей (кривые 1 и 2):
1, 3 – ИТ-образцы, 2, 4 – контрольные образцы

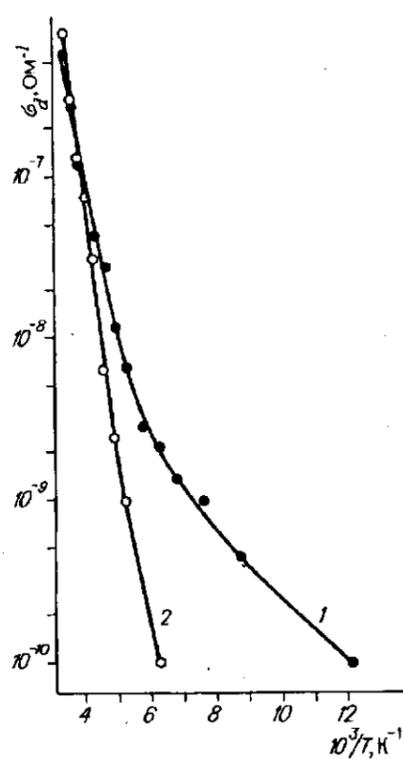


Рис. 2. Температурная зависимость темновой проводимости:
1 – контрольный образец, 2 – ИТ-образец

значительно быстрее, чем для ИТ-образца. При температуре ~ 180 К они различаются более чем в 2 раза: 0,7 и 0,3 мс. Темновая проводимость контрольного образца уменьшается с понижением температуры медленнее, чем для ИТ-образца. Фотопроводимость $\sigma_p(T)$ контрольного образца ведет себя при изменении температуры обычным для химически осажденных слоев PbS образом: вначале увеличивается до $T \sim 180$ К, а затем уменьшается при дальнейшем понижении температуры. Величина фотопроводимости ИТ-образца практически не изменяется до $T \sim 180$ К, а затем начинает уменьшаться.

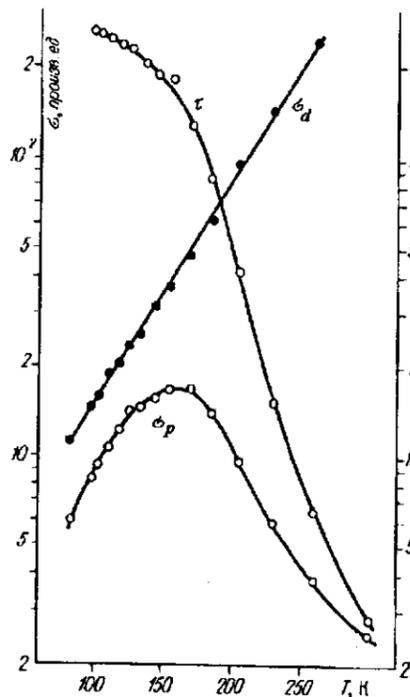
Обсуждение результатов. Величина фототока J_p материала описывается феноменологическим выражением

$$J_p = e\alpha I \mu \tau E,$$

где $J_p = \sigma_p E$ — фототок, E — приложенное поле, μ — подвижность, α — коэффициент поглощения, I — интенсивность света. При заданных значениях коэффициента поглощения α и интенсивности света I фотопроводимость σ_p определяется произведением $\mu\tau$. На рис. 3 представлены температурные зависимости темновой $\sigma_d(T)$ и фотопроводимости $\sigma_p(T)$ и времени жизни $\tau(T)$. Приведенные результаты убедительно доказывают, что в области высоких температур увеличение $\sigma_p(T)$ обусловлено в основном активационной зависимостью времени жизни $\tau(T)$, а спад при низких температурах связан с изменением эффективной подвижности $\mu(T)$. Этот вывод можно сделать в связи с тем, что для химически осажденных слоев PbS в области температур $80 + 300$ К изменение темновой проводимости $\sigma_d(T)$ связано, согласно измерениям эффекта Холла, с изменением $\mu(T)$. Концентрация носителей заряда в этом диапазоне температур изменяется мало.

Измеряя при заданной температуре текущие значения энергий активации E_{σ_p} , E_{σ_d} , E_τ , можно показать, что с хорошей точностью выполняется соотношение

$$E_{\sigma_p} = E_{\sigma_d} + E_\tau.$$



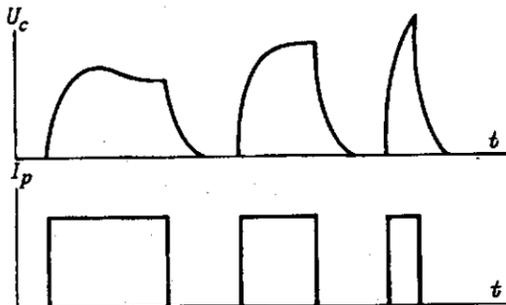
Это соотношение ранее было обнаружено и другими авторами [4].

Перечисленные выше результаты о различном поведении $\sigma_p(T)$ для контрольных и ИТ-образцов хорошо объясняются в рамках изложенных представлений о суперпозиции температурных зависимостей $\mu(T)$, $\sigma_d(T)$ и $\tau(T)$. Отсутствие увеличения фотопроводимости при понижении температуры от комнатной до 180 К для ИТ-образцов связано с более медленным ростом $\tau(T)$ и, напротив, более быстрым уменьшением $\mu(T)$. Спрашивается, чем обусловлено такое поведение $\mu(T)$ и $\tau(T)$?

Учитывая, что контрольные образцы отличаются от ИТ-образцов лишь технологией подготовки подложки перед осаждением фоточувствительного слоя, можно предпо-

Рис. 3. Температурные зависимости фотопроводимости σ_p , времени жизни фотовозбужденных носителей τ и темновой проводимости σ_d

Рис. 4. Временная диаграмма отклика фотоприемника на импульсное световое воздействие



лагать, что объемные свойства слоев PbS в этих случаях существенно не различаются. Напротив, границы раздела подложка — PbS могут различаться сильно. При ионном травлении подложки возможна такая модификация поверхности, при которой на границе раздела подложка SiO₂ — слой PbS возникает большое количество ловушек для неосновных носителей. Глубина залегания (по энергии) ловушек такова, что при комнатной температуре они не заполнены и не играют существенной роли в рекомбинационном процессе. Однако с понижением температуры ловушки захватывают неосновные носители (электроны) и неравновесные дырки начинают на них интенсивно рекомбинировать, подтягиваясь из объема. Время жизни при наличии нескольких каналов рекомбинации зависит от наиболее быстрого из них:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} + \frac{1}{\tau_s},$$

где τ_0 определяется объемным темпом рекомбинации, τ_s — рекомбинацией на поверхностных состояниях границы раздела подложка — PbS. При $\tau_s \ll \tau_0$ $\tau \approx \tau_s$.

Так как состояния ловушек на границе раздела подложка — фото-чувствительный слой достаточно глубоки, то при температуре ниже комнатной они полностью не опустошаются (возможно квазиравновесное обеднение пленки свободными носителями при понижении температуры). Как показано [5], перенос заряда в поликристаллических пленках PbS определяется движением носителей по уровню протекания в области хвоста плотности состояний валентной зоны. Уменьшение концентрации свободных носителей смещает уровень протекания в область плотности состояний с меньшей подвижностью. Все это обуславливает более сильную температурную зависимость темновой проводимости (см. рис. 2).

Отметим еще одно явление, наблюдающееся на ИТ-образцах в определенном температурном диапазоне. Если возбуждать образец световыми импульсами разной длительности, но фиксированной скважности, то для коротких импульсов амплитуда сигнала больше, чем для длинных, причем при возбуждении длинными импульсами после возрастания сигнала до максимума наблюдается некоторый его спад (рис. 4). Наблюдаемое явление хорошо объясняется в рамках предложенной модели. Действительно, если импульсы короткие, то за время между импульсами поверхностные ловушки успевают освободиться (если T не слишком низкая). Однако если импульсы длительные, а скважность остается прежней, то накопившийся на ловушках заряд уже не успевает весь освободиться и эффективное τ становится меньше.

Заключение. Таким образом, эксперименты, проведенные на образцах PbS, показали, что поведение температурной зависимости фотопроводимости в области низких температур определяется зависимостью от температуры подвижности носителей заряда, а в области высоких температур — экспоненциальной зависимостью от температуры времени жизни неравновесных носителей. Поверхностная рекомбинация на границе раздела фото-чувствительный слой — подложка может играть большую или меньшую роль в зависимости от качества обработки поверхности подложки. В тех случаях, когда поверхностная рекомбинация велика, фоточувствительность фото-приемников PbS не увеличивается при охлаждении их до рабочей температуры

~180 К. В результате этого условия наиболее эффективной эксплуатации приборов изменяются. Это обстоятельство необходимо учитывать при выборе технологических условий осаждения фоточувствительного слоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гудаев О. А., Пауль Э. Э., Седелников А. П. Локальная неоднородность фоточувствительности химически осажденных слоев PbS // Автометрия.—1989.—№ 5.
2. Петров В. И., Прохоров В. А., Юнович А. Э. Исследование локальных неоднородностей фоточувствительности и люминесценции пленок халькогенидов свинца в растровом электронном микроскопе // ФТП.—1984.—Вып. 3.
3. Гудаев О. А., Пауль Э. Э. Природа шума $1/f^\alpha$ в тонкопленочных фоторезисторах PbS // Автометрия.—1992.—№ 5.
4. Неустроев Л. Н., Осипов Р. 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. The influence of photoexcitation level on the process of charge transfer in polycrystalline PbS films // Thin Solid Films.—1991.—198.—P. 35.
6. Мотт Н., Дэвис Э. Электронные процессы в некристаллических веществах.—М.: Мир, 1983.—Т. 1, 2.

Поступила в редакцию 9 октября 1992 г.