

ВЛИЯНИЕ СИЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ХАЛЬКОГЕНИДНОГО СТЕКЛОБРАЗНОГО ПОЛУПРОВОДНИКА

$\text{As}_{40}\text{S}_{30}\text{Se}_{30}$

Бордовский Г. А., Савинова Н. А.

Исследовано влияние сильного электрического поля на характеристики фотопроводимости пленок стеклообразного полупроводника $\text{As}_{40}\text{S}_{30}\text{Se}_{30}$. Обнаружен существенный рост электронной компоненты фототока в сильном электрическом поле, приводящий к изменению спектральных, вольтамперных, кинетических и температурных характеристик фототока. Изучено влияние контактов на полевой эффект. Предлагается модель, рассматривающая рост электронного фототока вследствие термополевого высвобождения электронов с ловушек.

Многочисленные исследования фотоэлектрических свойств халькогенидных стеклообразных полупроводников (ХСП) позволили сделать вывод о дырочном типе фотопроводимости в широком круге мышьяксодержащих ХСП [1], который справедлив, однако, только в области слабых полей ($E < 10^7$ В/м). В настоящей работе изучалось влияние сильного электрического поля на характеристики фотопроводимости, которые, как было обнаружено, изменялись вследствие значительного возрастания электронной компоненты фототока.

Исследовались пленки ХСП $\text{As}_{40}\text{S}_{30}\text{Se}_{30}$ толщиной 2—4 мкм, используемые в электрографических и фототермопластических носителях информации [2, 3], которые нащупались на промышленной установке по отработанной технологии. Основные результаты были получены для структуры Cu_2Se —ХСП—(In—Ga) при освещении через нижний прозрачный Cu_2Se . В качестве нижнего электрода вместо Cu_2Se также использовались полупрозрачные Al и Bi; в качестве верхнего электрода вместо (In—Ga)—эвтектики Al и аквадаг.

Экспериментальные результаты

Приведем фотоэлектрические характеристики структуры Cu_2Se —ХСП—(In—Ga).

а) *Спектральные характеристики.* Изоквантовые спектральные характеристики стационарной фотопроводимости при комнатной температуре показаны на рис. 1. Максимум спектральной чувствительности ХСП соответствует области сильного оптического поглощения. При малых напряжениях кривые спектрального распределения фотопроводимости (СРФ) типичны для дырочных фотопроводников: в длинноволновой области спектра кривые СРФ для двух полярностей напряжения совпадают, а в коротковолновой — наблюдается сильное фотовыпрямление ($I_{\phi+} \gg I_{\phi-}$). С ростом напряжения величина фотовыпрямления $I_{\phi+}/I_{\phi-}$ в коротковолновой области спектра уменьшается, а затем становится меньше 1, т. е. электронная компонента фототока начинает превышать дырочную. Для более высокой температуры (90 °С) переход к доминированию электронного фототока происходит при меньших напряжениях.

б) *Вольтамперные характеристики.* При изучении вольтамперных характеристик (ВАХ) в области сильных полей ($E > 5 \cdot 10^7$ В/м) был обнаружен участок резкого роста фототока при освещении сильнопоглощаемым светом

$\lambda=500$ нм) отрицательно смещенного нижнего электрода Cu_2Se (рис. 2), при этом переход от линейного участка к сверхлинейному в фото-ВАХ происходит при меньшем напряжении, чем для темновой ВАХ ($U_{\text{кр} \phi} < U_{\text{кр} \tau}$). При освещении более длинноволновым светом ($\lambda=600$ нм) также наблюдается сверх-

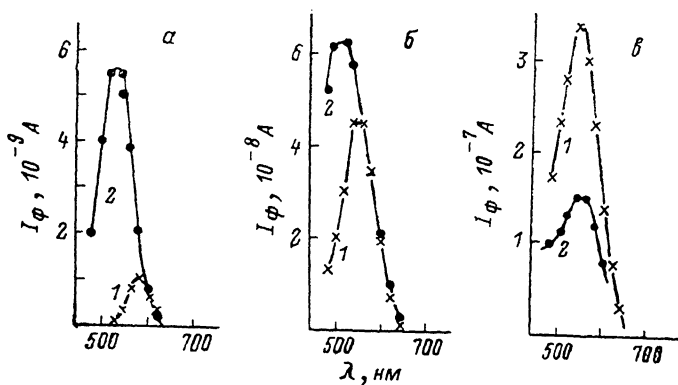


Рис. 1. Изоквантовые кривые СРФ структуры $\text{Cu}_2\text{Se}-\text{XCP}-(\text{In}-\text{Ga})$.

$T=293$ К. $U, \text{В}$: а) 1 — -20, 2 — +20; б) 1 — -100, 2 — +100; в) 1 — -150, 2 — +150.

линейная фото-ВАХ, однако с меньшим показателем степени, чем в предыдущем случае. В то же время фото-ВАХ при положительной полярности напряжения были близки к линейным. Видно, что в области сильных полей исчезает диполярность, характерная для дырочных фотопроводников ($I_{\phi+} \gg I_{\phi-}$), и реализуется ситуация, когда $I_{\phi-} > I_{\phi+}$, что приводит к изменению кривых СРФ.

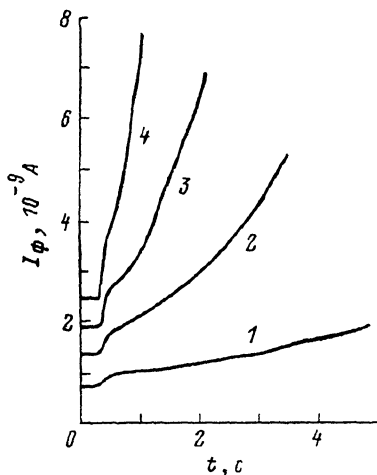
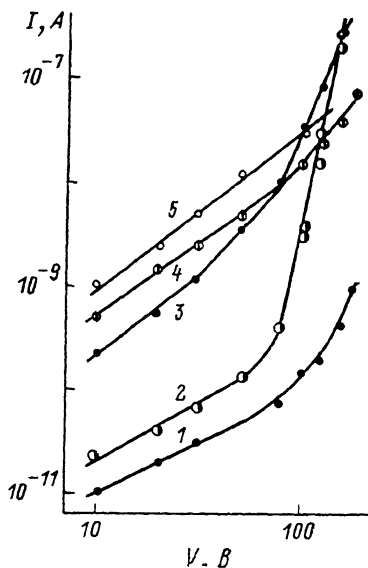


Рис. 2. ВАХ структуры $\text{Cu}_2\text{Se}-\text{XCP}-(\text{In}-\text{Ga})$.

Рис. 3. Кинетика нарастания фототока для разных интенсивностей света.

1 — I_{τ} ; 2, 3 — $-U$; 4, 5 — $+U$; $\lambda, \text{нм}$: 2, 5 — 500;

$\lambda=500$ нм, $U=-150$ В. $J \cdot 10^{-16}$, кв/с·м²: 1 — 1; 2 — 2.3; 3 — 3.8; 4 — 6.

в) *Кинетика фотопроводимости.* Исследование кинетики фотопроводимости при возбуждении одиночным полубесконечным импульсом света показало, что характер ее длинновременной составляющей зависит от длины волны света, величины и полярности напряжения. Так, при возбуждении сильнопоглощаемым светом ($\lambda=500$ нм) наблюдается явная асимметрия кинетических кривых для двух полярностей напряжения. При отрицательной полярности напряже-

ния на освещенном электроде кинетика спада фототока значительно медленнее, чем при положительной полярности, что может указывать на эффекты накопления заряда.

С повышением напряжения $U > U_{кр\phi}$ при отрицательной полярности на протяжении на освещенном электроде проявляется S-образный характер кривы нарастания фототока (рис. 3), которые имели участок быстрого нарастания, платообразный участок или участок перегиба и второй участок нарастания фототока. Основной вклад в величину стационарного фототока в этой области напряжений вносит вторая, более медленно

Зависимость критических напряжений полевого эффекта от материала верхнего электрода в структуре $Cu_2Se-XCN-Me$

$U_{кр, В}$	Верхний электрод		
	In—Ga	Al	аквадаг
$U_{кр\tau}$	100	150	75
$U_{кр\phi}$	70	120	20

нарастающая компонента фототока, величина которой сверхлинейно зависит от напряжения. Область напряжений, в которой проявляется S-образная кинетика, соответствует участку сверхлинейного роста фототока в фото-ВАХ, связанного с существенным увеличением электронной составляющей фототока.

Форму S-образных кривых нарастания фототока (величину коротковременной составляющей, продолжительность платообразного участка) можно было изменять, варьируя длину волны и интенсивность света. С ростом

интенсивности света увеличивается коротковременная составляющая, уменьшается продолжительность платообразного участка, а скорость нарастания фототока после участка плато и величина стационарного фототока растут.

Таким образом, установлено, что сильное электрическое поле ($E > 5 \cdot 10^7$ В/м) вызывает в исследуемой структуре существенный рост электронной компоненты стационарного фототока и изменение спектральных, вольт-амперных и кинетических характеристик фототока.

Влияние контактов на полевой эффект. При исследовании структур с различными электродами было обнаружено, что в структурах с нижним электродом из Cu_2Se при замене верхнего электрода (In—Ga)-эвтектики на Al или аквадаг описанные выше закономерности полевого эффекта сохраняются, однако изменяются величины $U_{кр\tau}$ и $U_{кр\phi}$. Из таблицы видно, что наибольшие значения $U_{кр}$ наблюдаются для Al-электрода, а наименьшие — для аквадагового.

Для оценки относительной величины загиба зон в приконтактных областях

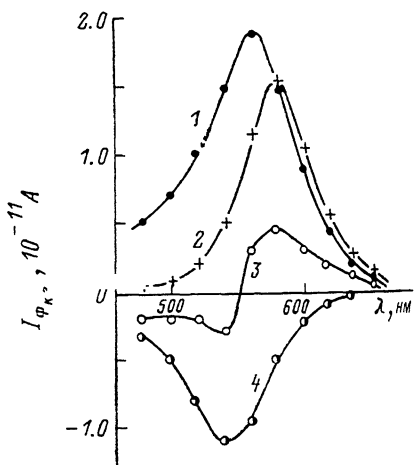


Рис. 4. Спектры фототока короткого замыкания в структурах с разными электродами.

Освещены электроды: 1 — Al (верхний), 2 — Cu_2Se нижний (верхний Al), 3 — Cu_2Se нижний (верхний In—Ga), 4 — Cu_2Se нижний (верхний аквадаг).

с разными верхними электродами в рассмотренных структурах изучался фотовольтаический эффект. Исследовались спектральные зависимости фототока в режиме короткого замыкания, представленные на рис. 4. Поскольку при освещении снизу длинноволновый свет вследствие слабого поглощения проникает до верхнего контакта, величина и направление фототока в этой области спектра определяются верхним контактным барьером и изменяются в соответствии с величиной и направлением приконтактного загиба зон. По этим данным можно составить ряд, в котором контакт с аквадагом образует минимальный барьер для дырок, а контакт с Al — максимальный (контакты с Cu_2Se и In—Ga занимают промежуточное положение). Эти оценки коррелируют с рядом значений $U_{кр\tau, \phi}$, полученных из ВАХ для разных структур: минимальные $U_{кр}$ для структуры с аквадаговым электродом, а максимальные $U_{кр}$ — для струк-

туры с Al-электродом. Отсюда можно сделать вывод, что наблюдаемый полевой эффект в определенной степени контролируется верхним контактным барьером. Чем больше высота верхнего барьера и падение напряжения на нем, тем большее внешнее поле требуется приложить, чтобы обеспечить критическую величину электрического поля.

В структуре Cu_2Se —ХСП—Al были проведены фотоэлектрические измерения при освещении верхнего полупрозрачного Al-электрода, которые показали, что эффект резкого возрастания электронного фототока в сильном электрическом поле присутствует независимо от того, освещается нижний или верхний контакт. Кроме того, изменение нижнего электрода Cu_2Se на Al или Bi также не сказывается существенно на фотоэлектрических характеристиках. Приведенные результаты указывают на объемный характер полевого эффекта.

Обсуждение результатов

Для объяснения описанного выше полевого эффекта можно предложить следующую модель. При освещении структуры происходит преимущественный захват на ловушки фотогенерированных электронов, что, как принято считать, определяет более высокую дырочную подвижность по сравнению с электронной в большинстве ХСП. В сильном электрическом поле вследствие эффекта Пуля—Френкеля захваченные фотоэлектроны могут высвободиться и давать вклад в стационарный фототок. Повышение температуры, очевидно, способствует высвобождению электронов из ловушек, и величина $U_{кр\phi}$ уменьшается. Сложная форма кинетики нарастания фототока в этом случае (S -образные кривые нарастания фототока), вероятно, связана с особенностями электронного спектра локальных состояний и, в частности, определяется нелинейными процессами релаксации при сильном заполнении уровней приращения [4].

Эффект термополевого высвобождения электронов с ловушек может нарушить симметрию температурных зависимостей фототока для двух полярностей напряжения: энергия активации фототока должна измениться вследствие различия спектров электронных и дырочных ловушек. Действительно, в температурных зависимостях фототока при коротковолновом освещении наряду с малыми энергиями активации (0.15—0.35 эВ), типичными в области слабых полей, в сильном поле при отрицательном смещении на освещенном электроде наблюдается участок с $\Delta\mathcal{E}_n \sim 0.8$ эВ.

Изменение степени заполнения ловушек электронами вызывает существенный рост эффективной подвижности электронов (μ_n). Можно оценить изменение μ_n в сильном электрическом поле ($E > 5 \cdot 10^7$ В/м) за счет понижения величины потенциального барьера для электрона, находящегося на ловушке,

$$\Delta\mathcal{E} = \beta_{RF} \sqrt{E},$$

где β_{RF} — коэффициент Пуля—Френкеля, который можно найти по наклону прямой в координатах $\ln(I/U) - \sqrt{U}$. Величина β_{RF} оказалась равной $\beta_{RF} = (3 \div 7) \cdot 10^{-5}$ эВ·(м/В)^{1/2}. Отсюда $\Delta\mathcal{E} = 0.2 - 0.3$ эВ, а подвижность

$$\mu_n = \mu_{n_0} \exp(\Delta\mathcal{E}/kT)$$

увеличивается в $10^3 - 10^4$ раз, т. е. оценка показывает, что сближение величин μ_n и μ_p вполне реально.

Авторы благодарят В. М. Любина за полезные замечания и внимание к работе.

Список литературы

- [1] Kolomiets B. T., Lyubin V. M. // Phys. St. Sol. (a). 1973. V. 17. N 1. P. 11—46.
- [2] Бекичева Л. И., Бордовский Г. А., Каничев М. Р., Савинова Н. А., Степанов В. В. // ЖНПФик. 1987. Т. 32. В. 2. С. 123—128.
- [3] Бекичева Л. И., Бордовский Г. А., Каничев М. Р., Савинова Н. А., Степанов В. В. // Тез. докл. Всес. конф. «Электрография-88». М., 1988. С. 202—205.
- [4] Рывкин С. М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. М., 1963. 494 с.