

УДК 621.315.592

**ФОТОПРОВОДИМОСТЬ ЭФФЕКТИВНОГО МАТЕРИАЛА
ДЛЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ p-GaSe,
ЛЕГИРОВАННОГО РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ****АБДИНОВ А.Ш., БАБАЕВА Р.Ф., БАГИРОВА А.Т.,
РЗАЕВ Р.М., АЛЛАХВЕРДИЕВ Ш.А.***Бакинский Государственный Университет*

Исследованы зависимости спектра и кинетики собственной фотопроводимости в кристаллах p-GaSe от температуры (при $T=77\div 350\text{K}$), а также уровня легирования ($N_{\text{PЗЭ}}\approx 0\div 10^{-1}$ ат.%) и химической природы введенной примеси редкоземельных элементов типа Gd, Ho и Dy. Установлено, что с понижением температуры до 77K спектр собственной фотопроводимости несколько расширяется, а максимум его смещается в сторону относительно длинных волн. Ширина и максимум fotocувствительности при относительно низких температур зависит также от $N_{\text{PЗЭ}}$. Однако эта зависимость имеет немонотонный характер. Предполагается, что обнаруженные результаты обусловлены зависимостью степени неупорядоченности монокристаллов p-GaSe от температуры и уровня легирования.

Обладание значительной fotocувствительностью почти во всем видимом диапазоне спектра ($0.35\leq\lambda\leq 0.65$ мкм) при температурах вплоть до ~ 350 K в сочетании с другими уникальными свойствами, в том числе со слоистостью, делает монокристаллы селенида галлия (p-GaSe) одним из перспективных материалов для оптоэлектроники и солнечной энергетики.

Ранее [1] сообщалось о некоторых особенностях влияния легирования атомами диспрозия (Dy) на кинетику собственной фотопроводимости в этом полупроводнике.

В представленной работе приводятся результаты проведенного нами комплексного исследования влияния легирования редкоземельными элементами (PЗЭ) типа гадолиния (Gd), гольмия (Ho) и диспрозия (Dy) при различных значениях введенной примеси ($N_{\text{PЗЭ}}\approx 0; 10^{-5}; 10^{-4}; 10^{-3}; 10^{-2}$ и 10^{-1} ат.%) на фотоэлектрические свойства p-GaSe.

При этом установлено, что спектральное распределение собственной фотопроводимости нелегированных специально (чистых) монокристаллов p-GaSe заметным образом зависит от температуры (рис.1). При 77 K спектр собственной фотопроводимости охватывает диапазон $0.35\leq\lambda\leq 0.65$ мкм оптического спектра и на кривых $I_{\text{ф}}(\lambda)$ помимо основного максимума на коротковолновой ветви проявляется также некоторое плато. С ростом температуры до 300 K максимум спектрального распределения собственной фотопроводимости, хотя незначительно, но все же смещается в сторону относительно коротких длин волн.

При легировании PЗЭ вышеуказанных типов с $N_{\text{PЗЭ}}\approx 10^{-5}\div 10^{-4}$ ат.% отличие спектров для различных температур проявляется еще ярче. Однако, с дальнейшим ростом $N_{\text{PЗЭ}}$ до 10^{-1} ат.% эти отличия постепенно исчезают.

Оказалось, что при 300 K спектр собственной фотопроводимости p-GaSe от легирования PЗЭ почти не зависит. При этом, несколько отличается лишь численное значение, а также степень стабильности и воспроизводимости $I_{\text{ф}}$. В отличие от этого, при

77 К наблюдается значительное влияние уровня легирования РЗЭ на спектр собственной фотопроводимости.

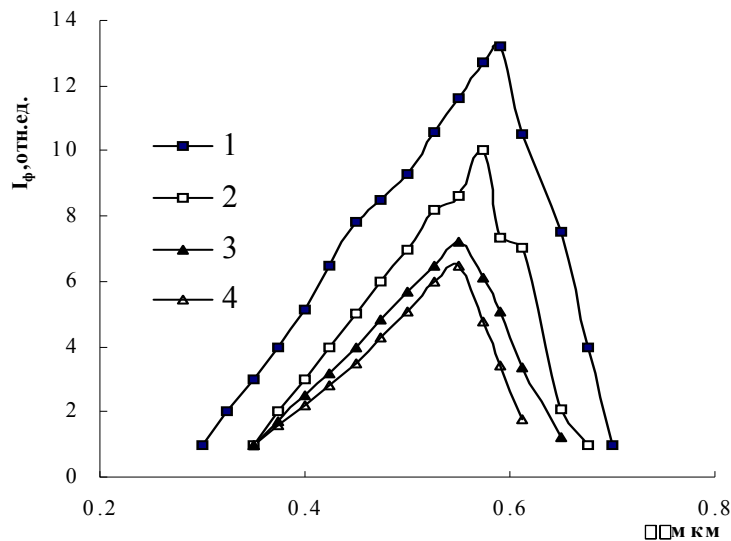


Рис. 1. Спектральное распределение собственной фоточувствительности монокристаллов р-GaSe при различных температурах.

Т, К: 1 - 77; 2 - 100; 3 - 150; 4 - 250; 5 - 300; 6 - 350; 7 - 400.

В частности, с ростом $N_{\text{РЗЭ}}$ сначала (при $N_{\text{РЗЭ}} \leq 10^{-4}$ ат.%) помимо увеличения $I_{\text{ф}}$, также максимум спектра смещается в сторону относительно длинных волн и более ярко проявляется дополнительное плато на коротковолновой ветви. При этом также увеличивается ширина спектра как со стороны длинных, так и со стороны коротких длин волн. Далее, с ростом $N_{\text{РЗЭ}}$ до $\sim 10^{-1}$ ат.% ширина спектра уменьшаясь приближается к исходному, дополнительное плато на коротковолновой ветви спектра постепенно исчезает, максимум спектра приближается к исходному (характерному для нелегированных кристаллов). На длинноволновой ветви спектра недалеко от основного максимума появляется дополнительное плато. С ростом температуры, сначала это плато несколько увеличивается, а далее постепенно исчезает.

Установлено, что при изменении $N_{\text{РЗЭ}}$ от 10^{-5} ат.% до 10^{-1} ат.% положение основного максимума спектрального распределения собственной фотопроводимости, а также его коротковолновая и длинноволновая границы колеблются в пределах $0.580 \div 0.630$ мкм (почти на $0.15 \div 0.18$ эВ), $0.300 \div 0.350$ мкм (почти на $0,48$ эВ), $0.640 \div 0.740$ мкм (почти на 0.21 эВ).

Положение обнаруженного на длинноволновой ветви плато в зависимости от $N_{\text{РЗЭ}}$ менялось в пределах $\sim 0.600 \div 0.700$ мкм, а плато на коротковолновой ветви $0.500 \div 0.550$ мкм.

Исследовано также влияние уровня легирования РЗЭ на процессы установления ($\tau_{\text{у}}$) и исчезновения ($\tau_{\text{и}}$) собственной фотопроводимости при включении и выключении собственного света соответственно. Оказалось, что в изучаемых кристаллах, хотя $\tau_{\text{у}}$ почти не зависит от $N_{\text{РЗЭ}}$, однако наблюдается значительное влияние $N_{\text{РЗЭ}}$ на $\tau_{\text{и}}$ - с ростом $N_{\text{РЗЭ}}$ величина $\tau_{\text{и}}$ сначала почти на порядок увеличивается относительно исходного, а далее (при $N_{\text{РЗЭ}} > 10^{-3}$ ат.%) постепенно уменьшается. При $N_{\text{РЗЭ}} \approx 10^{-2} \div 10^{-1}$ ат.% иногда в изучаемых кристаллах медленно-релаксирующий характер собственной фотопроводимости почти не проявляется ($\tau_{\text{и}}$ - падает от нескольких часов до нескольких секунд). С ростом температуры влияние легирования на $\tau_{\text{и}}$ ослабляется и при $T=300$ К оно почти совсем исчезает.

Легирование РЗЭ почти не влияет на спектральное распределение, а также температурную зависимость ИК-гашения собственной фотопроводимости в изучаемых кристаллах р-GaSe. При этом не наблюдается также влияние легирования на спектральное распределение отрицательной фотопроводимости и ее температурной зависимости. Однако наблюдаются зависимости кинетики отрицательной фотопроводимости и ИК гашения собственной фотопроводимости от $N_{PЗЭ}$.

Из полученных результатов следует, что при этом меняются также степень стабильности и воспроизводимости фотоэлектрических параметров р-GaSe. Хотя в рассмотренном интервале изменения $N_{PЗЭ}$ эти зависимости имеют немонотонный характер, однако при $N_{PЗЭ} \geq 10^{-3}$ ат.% наблюдается тенденция повышения степени стабильности и воспроизводимости рассмотренных фотоэлектрических параметров и характеристик.

Кроме того, из полученных в представленной работе результатов следует, что путем легирования РЗЭ типа Gd, Ho и Dy монокристаллов р-GaSe можно целенаправленно управлять энергетическим положением максимумов, а также шириной оптического диапазона fotocувствительности этого полупроводника. В частности, при $N_{PЗЭ} \approx 10^{-2} \div 10^{-1}$ ат.% максимум fotocувствительности р-GaSe<PЗЭ> хорошо соответствует длине волны света ($\lambda \approx 0.555$ мкм), которому наиболее чувствителен человеческий глаз. При этом спектр собственной фотопроводимости кристаллов р-GaSe<PЗЭ> тоже очень хорошо совпадает со спектром чувствительности человеческого глаза. С другой стороны, при $N_{PЗЭ} \approx 10^{-4} \div 10^{-3}$ ат.% спектр fotocувствительности р-GaSe<PЗЭ> значительно расширяется и охватывает ($0.30 \leq \lambda \leq 0.75$ мкм) весь видимый диапазон. Этот спектр хорошо охватывает также часть спектра солнечного излучения, обладающая значительно большим энергетическим потенциалом.

Следует отметить, что при рассмотренных нами условиях заметная зависимость фотоэлектрических свойств монокристаллов р-GaSe от химической природы (материала) введенной примеси РЗЭ вышеуказанных типов не обнаружена. Поэтому характерные кривые спектрального распределения собственной фотопроводимости на рис. 2 приведены лишь для кристаллов р-GaSe<Dy>.

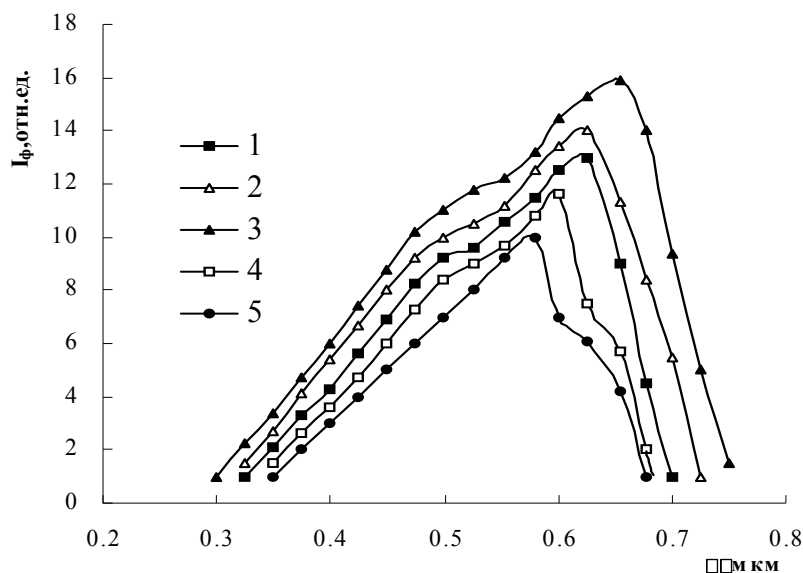


Рис. 2. Спектральное распределение собственной fotocувствительности р-GaSe<PЗЭ> при различных уровнях легирования.

$N_{PЗЭ}$, ат.%: 1 - 0; 2 - 10^{-5} ; 3 - 10^{-4} ; 4 - 10^{-3} ; 5 - 10^{-2} ; 6 - 10^{-1} . $T = 77$ К.

Согласно результатам ранних исследований [2], нелегированные специально высокоомные монокристаллы р-GaSe, можно описывать двухбарьерной моделью полу-

проводника [3], в запрещенной зоне которого существуют локальные энергетические уровни различного типа: α - и β -уровни прилипания, г- и S-центры рекомбинации [4]. При относительно малых $N_{P3Э}$, вследствие скопления введенных ионов P3Э вокруг исходных высокоомных включений, степень неупорядоченности кристаллов и соответственно связанные с ней процессы усиливаются. С дальнейшим ростом $N_{P3Э}$ ситуация меняется - скопления ионов P3Э вокруг исходных макроскопических дефектов насыщаются и уже введенные ионы P3Э начинают распределяться по всему объему кристалла, в результате чего начинается упорядочение образцов.

В рамках выдвинутой модели смещение максимума и красной границы спектра собственной фотопроводимости с изменением $N_{P3Э}$ может объясняться зависимостью вероятности фотопроводимости, облегченной туннелированием через рекомбинационные барьеры от $N_{P3Э}$. С ростом $N_{P3Э}$, из-за увеличения степени упорядочения изучаемого образца, постепенно уменьшается вероятность туннельного механизма генерации носителей и поэтому красная граница спектра собственной фотопроводимости заново смещается в сторону более коротких длин волн (спектр собственной фотопроводимости начинает сужаться).

Появления дополнительных пиков на длинноволновой ветви кривых спектра собственной фотопроводимости в рамках предложенной модели может объясняться распадом экситонов [5] и опустошением глубоких уровней β - прилипания. Стирания неупорядоченности структуры кристаллов p-GaSe<P3Э> при относительно больших $N_{P3Э}$, помимо уменьшения вероятности туннельного механизма собственной фотопроводимости обуславливает также генерации свободных экситонов, которые далее вследствие взаимодействия с различными точечными дефектами распадаются или подвергаются термической диссоциации и создают фоточувствительность (дополнительный пик) на длинноволновом краю спектра. Предполагаем, что плато на коротковолновой ветви спектра обусловлено наличием потенциального (рекомбинационного) барьера на приповерхностной части образца [6].

1. *Abdinov A. Sh., Jafarov M.A., Rzayev R.M.* // Fizika -1998-№1- p. 7-8.
2. *Абдинов А.Ш., Кязым-заде А.Г.* // ФТП-1975 -Т.9-№11- С. 2135-2138.
3. *Шейнкман М.К., Шук А.Я.* // ФТП-1976 -Т.10-№2- С. 209-232.
4. *Рывкин С.М.* Фотоэлектрические явления в полупроводниках. М.: Наука, 1963. – 494с.
5. *Панков Ж.* Оптические процессы в полупроводниках. М.: Мир, 1973. - 393 с.
6. *Абдинов А.Ш., Бабаева Р.Ф., Рзаев Р.М. Эйвазова Г.Х.* // Проблемы энергетики- 2001-№1-С. 66-71.

GÜNƏŞ ENERJETİKASI VƏ OPTOELEKTRONİKA ÜÇÜN EFFEKTİV MATERIAL OLAN NADİR TORPAQ ELEMENTLƏRİ İLƏ AŞQARLANMIŞ p-GaSe MONOKRİSTALLARININ FOTOKEÇİRİCİLİYİ

**ABDİNOV Ə.Ş., BABAYEVA R.F., BAĞIROVA A.T., RZAYEV R.M.,
ALLAHVERDİYEV Ş.A.**

p-GaSe monokristallarında məxsusi fotokeçiriciliyin spektr və kinetikasının temperaturdan ($T=77\div 350K$), eləcə də aşqarlanma dərəcəsiindən ($N_{NTE}\approx 0\div 10^{-1}$ at.%) və daxil edilən Gd, Ho və Dy tipli nadir torpaq elementlərinin kimyəvi təbiətindən asılılığı tədqiq edilmişdir. Müəyyən edilmişdir ki, temperaturun 77K-ə qədər azalması ilə məxsusi fotokeçiriciliyin spektri bir qədər genişlənir, onun maksimumu isə daha uzun dalğa oblastına tərəf sürüşür. Nisbətən aşağı temperaturlarda fotohəssaslığın maksimumu və eni həmçinin aşqarlanma dərəcəsiindən də asılıdır. Lakin bu asılılıq qeyri monoton xarakter daşıyır.

Fərz edilir ki, aşkar edilmiş nəticələr p-GaSe monokristallarının nizamsızlıq dərəcəsinin temperaturdan və aşqarlanma dərəcəsindən asılılığı ilə şərtlənmişdir.

**PHOTOCONDUCTIVITY OF p-GaSe EFFECTIVE MATERIALS
FOR SOLAR ENERGETICS AND OPTOELECTRONICS,
DOPED BY RARE-EARTH ELEMENTS**

**ABDINOV A.Sh., BABAIEVA R.F., BAGIROVA A.T., RZAEV R.M.,
ALLAHVERDIEV Sh.A.**

The dependences of spectrum and kinetics of intrinsic photoconductivity on the temperature (at $T=77-350K$), and also on the doping level ($N_{RE} \approx 0-10^{-1}$ at. %) and chemical nature of the entered impurity rare-earth elements as Gd, Ho and Dy have been investigated in crystals p-GaSe. It is established, that with decreasing temperature up to 77K the spectrum of intrinsic photoconductivity a little extends, and the maximum it shifts to the long wavelength region. Width and maximum of photosensitivity at rather low temperatures depends also on the N_{RE} . However this dependence has monotonous character.

It is supposed, that the found out results are due to dependence of non-homogeneity degree of monocrystals p-GaSe on the temperature and doping level.