

УДК 621.315.592

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЕМКОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
СОЛНЕЧНЫХ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ  
АНИЗОТИПНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР p-GaSe<PЗЭ>/n-InSe<PЗЭ>****АБДИНОВ А.Ш., БАБАЕВА Р.Ф., БАГИРОВА А.Т., РЗАЕВ Р.М.,  
АЛЛАХВЕРДИЕВ Ш.А.***Бакинский Государственный Университет*

Сообщается о результатах исследований электрических и емкостных характеристик гетероструктурных солнечных фотоэлементов, созданных на базе легированных редкоземельными элементами (PЗЭ) типа гадолиния, гольмия и диспрозия с различным процентным содержанием введенной примеси ( $N_{PЗЭ}=0; 10^{-5}; 10^{-4}; 10^{-3}; 10^{-2}; 10^{-1}$  ат.%) слоистых кристаллов соединений  $A_3B_6$ .

Уникальные электронные свойства слоистых кристаллов селенида галлия привлекают внимания исследователей и конструкторов также с точки зрения изучения контактных явлений и создания различных структур на их основе. В ранних работах сообщалось об изотипных и анизотипных гетеропереходах, одними из контактирующих компонент которых являются нелегированные специально монокристаллы p-GaSe [1-3].

В данной работе приводятся результаты, полученные нами при исследовании электрических и емкостных характеристик гетероструктурных солнечных фотоэлементов на базе легированных редкоземельными элементами (PЗЭ) типа гадолиния (Gd), гольмия (Ho) и диспрозия (Dy) с  $N_{PЗЭ}=10^{-5}; 10^{-4}; 10^{-3}; 10^{-2}$  и  $10^{-1}$  ат.% кристаллов p-GaSe.

В качестве второго контактирующего компонента брались монокристаллы n-InSe<PЗЭ> с  $N_{PЗЭ}=0; 10^{-5}; 10^{-4}; 10^{-3}; 10^{-2}$  и  $10^{-1}$  ат.%. Поскольку монокристаллы p-GaSe<PЗЭ> обладают значительной фоточувствительностью почти во всем видимом ( $0.30 \leq \lambda \leq 0.70$  мкм), а монокристаллы n-InSe<PЗЭ> во всей видимой и начальной части ближнего ИК диапазона ( $0.30 \leq \lambda \leq 1.40$  мкм) оптического спектра в широком диапазоне температуры (вплоть до 350÷400 К), гетероструктуры на их основе являются перспективными для создания высокоэффективных фотоэлектрических преобразователей энергии солнечного излучения в электрическую (солнечных фотоэлементов), а также высокочувствительных и не требующих специального охлаждения фотоприемников.

Толщина и поперечные размеры контактирующих слоев составляли ~50÷200 мкм и 2÷6 мм соответственно.

Геометрия изучаемых структур выбралась так, чтобы в рабочем режиме ток протекал вдоль оси «С» (перпендикулярно естественным слоям и плоскости гетероструктуры). Измерения проводились в интервале 77÷400 К.

Снимались темновые статические ВАХ структур p-GaSe<PЗЭ>/n-InSe<PЗЭ> при различных уровнях легирования (рис. 1) и температурах (рис. 2). Установлено, что изучаемые структуры при рассмотренных нами условиях имеют ярко выраженный диодный характер, а пропускное направление их соответствует случаю, когда положительная полярность внешнего электрического напряжения приложена к слою селенида галлия. При ~4÷5 В коэффициент выпрямления составляет ~3÷10 для различных структур. Прямые ветви темновой ВАХ при всех рассмотренных нами условиях в области относительно малых напряжений подчиняется зависимости [4]

$$I = I_0 \left\{ \exp \frac{eU}{\beta kT} - 1 \right\}, \quad (1)$$

где  $e$  - заряд электрона,  $U$  - приложенное напряжение,  $k$  - постоянная Больцмана,  $T$  - абсолютная температура,  $I_0$  - обратный ток,  $\beta$  - некоторый характеристический параметр ( $\beta \approx 2 \div 5$  для различных структур). При относительно больших напряжениях ( $U \geq 3.0$  В) экспоненциальный ход темновой ВАХ заменяется линейным

$$U = U_{oc} + R_0 I. \quad (2)$$

Здесь  $U_{oc}$  - напряжение отсечки, а  $R_0$  - остаточное сопротивление рассмотренного гетероперехода и при 300К в зависимости от  $N_{P3Э}$  составляют  $\sim 1.0 \div 1.5$  В и  $\sim 10^5 \div 3 \cdot 10^6$  Ом соответственно. Величина  $U_{oc}$  в первом приближении соответствует высоте потенциального барьера ( $eU_{oc} = e\phi_0$ ), а значение  $R_0$  с понижением температуры до 77 К сильно возрастает. При более высоких обратных напряжениях ( $U_{об}$ ) ВАХ изучаемых структур подчиняются степенным законам, характерным для режима токов, ограниченных объемным зарядом (ТООЗ), а при достижении определенного значения приложенного напряжения ( $U_{об} = U_{пер}$ ) - структура скачком переходит из высокоомного состояния в низкоомное (происходит эффект бистабильного переключения).

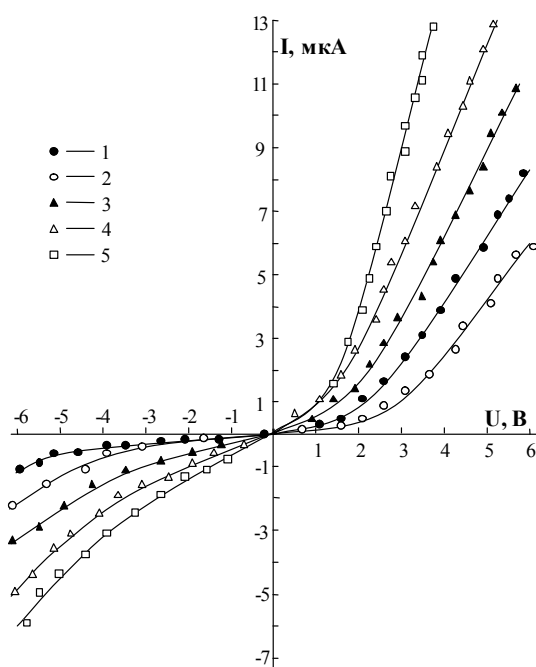


Рис. 1. Статические ВАХ структур p-GaSe<P3Э>/n-InSe<P3Э> при различных уровнях легирования.  
 $N_{P3Э}$ , ат. %: 1 - 0; 2 -  $10^{-4}$ ; 3 -  $10^{-3}$ ; 4 -  $10^{-2}$ ; 5 -  $10^{-1}$ ;  $T=77$ К

Из-за значительного роста  $R_0$  с понижением температуры, иногда в структурах, созданных на основе относительно толстых слоев, провести измерения темновых ВАХ оказался невозможным. Следует отметить, что это не унижает ценность исследуемых структур, т.к. и фотоприемники света и солнечные преобразователи обычно эксплуатируются при температурах в окрестностях 300К.

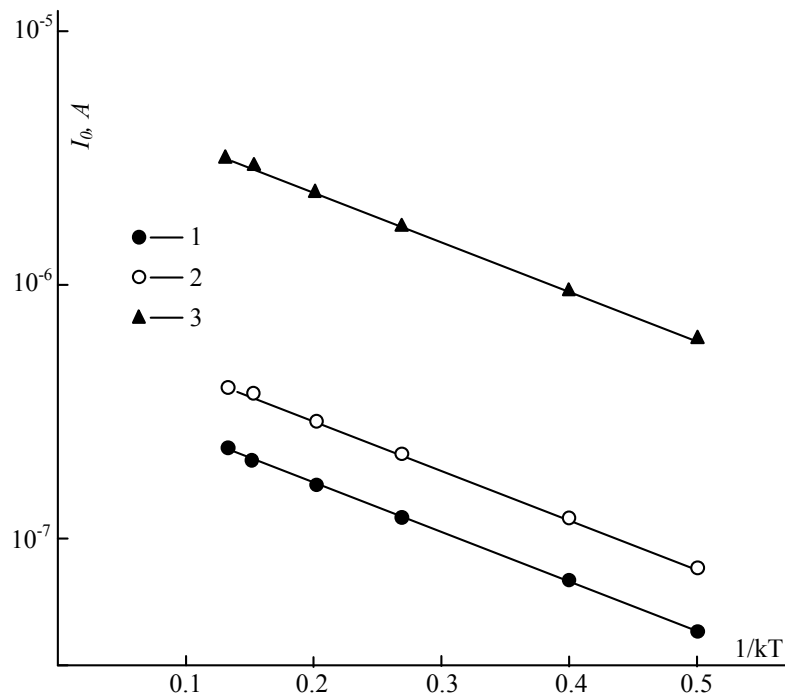


Рис. 2. Зависимость тока насыщения  $\ln I_0$  от  $\frac{1}{kT}$  в структурах p-GaSe<PЗЭ>/n-InSe<PЗЭ>;  $N_{PЗЭ}$ , ат. %: 1 - 0; 2 -  $10^{-4}$ ; 3 -  $10^{-1}$

Установлено что, значения, а также степени стабильности и воспроизводимости диодных параметров рассмотренных структур заметно меняются с  $N_{PЗЭ}$  (рис. 1), а от химической природы введенной примеси не зависят. Полученные нами экспериментальные результаты свидетельствуют также о немонотонном изменении сопротивления контактирующих компонентов в зависимости от  $N_{PЗЭ}$ . В частности, с ростом  $N_{PЗЭ}$  сначала (при  $N_{PЗЭ} \leq 10^{-4}$  ат. %) сопротивления этих материалов почти на порядок увеличиваются относительно исходного (имеющегося место в нелегированных специально кристаллах), а далее (при  $N_{PЗЭ} > 10^{-3}$  ат. %) заново уменьшаются и при  $N_{PЗЭ} \geq 10^{-2}$  ат. % становятся даже меньше, чем исходное. С изменением  $N_{PЗЭ}$  немонотонно меняются (сначала ухудшаются, а затем улучшаются относительно исходного) также степени стабильности и воспроизводимости электрических параметров изучаемых структур.

Установлено, что в исследуемых гетероструктурах входящий в (1) параметр  $I_0$  меняется с температурой по закону  $I_0 \approx \exp\left(-\frac{\Delta\varepsilon}{kT}\right)$  и найденное из зависимости  $\ln I_0$  от

$\frac{1}{kT}$  значение  $\Delta\varepsilon$  (рис. 2) составляет  $\sim 0.40$  эВ. Это значение совпадает с найденной по ТООЗ энергетической глубиной залегания мелких уровней  $\alpha$ -прилипания в кристаллах p-GaSe<PЗЭ> и не зависит от  $N_{PЗЭ}$ .

При исследованиях вольт-фарадных характеристик (ВФХ) изучаемых структур установлено, что при рассмотренных нами условиях независимо от  $N_{PЗЭ}$  экспериментальные точки следуют зависимости  $\frac{1}{c^2} \sim U$ . Этот результат однозначно показывает, что структуры p-GaSe<PЗЭ>/n-InSe<PЗЭ> являются резкими анизотипными гетеропереходами [4]. Определенный по пересечению прямой  $\frac{1}{c^2} = f(U)$  с осью U суммарный изгиб

зон в области перехода составляет  $\sim 0.50$  эВ почти для всех изучаемых структур. Полученные при этом результаты свидетельствуют также о незначительности плотности состояний на границе раздела в созданных на основе кристаллов р-GaSe<P3Э> гетероструктур. С учетом найденных нами по емкостным и другим независимым измерениям положения уровня Ферми в контактирующих материалах построена энергетическая – зонная диаграмма (модель) гетероструктур на их основе. Оказалось, что, как и в случае р-GaSe/n-InSe, при этом в обеих разрешенных зонах (в зоне проводимости и валентной зоне) возникают значительно большие разрывы ( $\Delta\varepsilon_c \approx 1.20$  эВ и  $\Delta\varepsilon_v \approx 0.45$  эВ в зоне проводимости и в валентной зоне соответственно). Этот установленный нами факт полезен для объяснения механизма токопрохождения в рассмотренных структурах.

Переходя к обсуждению полученных нами результатов, прежде всего, следует отметить, что независимость от температуры входящего в (1) множителя  $\frac{e}{\beta kT} = A$ , кото-

рый определяет характер протекания тока [4], позволяет сказать, что в исследуемых структурах доминирует туннельный механизм переноса носителей через переход. Однако при этом не исключается также роль наличия локальных центров в запрещенной зоне контактирующих полупроводников. Увеличение значения обратного тока при прочих одинаковых условиях с ростом  $N_{P3Э}$  (рис. 1) свидетельствует о том, что ионы P3Э входят в р-GaSe и n-InSe как мелкие уровни для основных носителей тока. При этом необходимо учесть также зависимость степени неупорядоченности кристаллов р-GaSe и n-InSe от уровня легирования P3Э. В пользу правильности этого предположения свидетельствуют также результаты, полученные при исследовании ТООЗ в кристаллах р-GaSe<Dy> и n-InSe<Dy>. Отклонение темновой ВАХ изучаемых гетероструктур от экспоненциального при относительно больших значениях прямого напряжения, по всей вероятности, обусловлено влиянием балластного сопротивления структур, которое соединено последовательно с переходом. Из-за высокоомности  $\square$ нокристаллов р-GaSe<P3Э> и n-InSe<P3Э> значение прямого тока в изучаемых структурах тоже незначительно. Это особенно ярко проявляется при относительно низких температурах ( $T \approx 77$  К). По-видимому, именно с этим связано также относительно низкое значение коэффициента выпрямления в изучаемых гетероструктурах.

Предполагается, что начальный слабый рост обратного тока в изучаемых гетероструктурах обусловлен вкладом тока утечки в переносе носителей заряда.

Наблюдаемые разбросы в величинах остаточного и обратного сопротивления могут объясняться отличием исходных темновых удельных сопротивлений контактирующих материалов. При этом, наиболее высокая воспроизводимость наблюдается для значений напряжения отсечки ( $U_0$ ), которые хорошо совпадают с соответствующими значениями фотонапряжения насыщения. Предполагается, что изменение величины  $U_0$  с ростом  $N_{P3Э}$  связано с зависимостью степени неупорядоченности монокристаллов р-GaSe<P3Э> и n-InSe<P3Э> от  $N_{P3Э}$ .

- 
1. Кязым-заде А.Г., Джафаров Д.Х., Тагиров В.И. // ФТП-1979-Т.13-№8- С. 1990-1993.
  2. Бакуменко В.Л., Ковалюк З.Д., Курбатов Л.Н., Тагиев В.Г., Чижко В.Ф. // ФТП-1980-Т.14-№6- С. 1115-1119.
  3. Драпак С.И., Орлецкий В.Б., Ковалюк З.Д. // ФТП-2004 -Т.38-№5- С. 566-570.
  4. Шарма Б.Л. Пурохит Р.К. Полупроводниковые гетеропереходы. М.: Изд-во "Сов. Радио", 1979. - 228с.

**p-GaSe<RZG>/n-InSe<RZG> ANİZOTİP HETEROSTRUKTURLARININ  
ƏSASINDA GÜNƏŞ FOTOÇEVİRİCİLƏRİNİN ELEKTRİK VƏ  
TUTUM XARAKTERİSTİKALARI**

**Abdinov Ə.Ş., Babayeva R.F., Bağirova A.T., Rzayev R.M., Allahverdiyev Ş.A.**

İşdə müxtəlif miqdarda ( $N_{NTE}=0; 10^{-5}; 10^{-4}; 10^{-3}; 10^{-2}; 10^{-1}$  at.%) gadolinium, holmium, disprozium tipli nadir torpaq elementləri ilə aşqarlanmış  $A_3B_6$  birləşməli laylı kristallarının əsasında yaradılmış heterostruktur günəş fotoelementlərinin elektrik və tutum xarakteristikalarının tədqiqi zamanı alınmış nəticələr haqqında məlumat verilir.

**ELECTRIC AND CAPACITANCE CHARACTERISTICS  
OF SOLAR PHOTOCONVERTERS ON THE BASIS  
OF ANYSOTYPIC HETEROSTRUCTURES p-GaSe<RE>/n-InSe<RE>**

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

In this paper the results of investigations of electrical and photoelectrical characteristics of the heterojunction solar cells manufactured on the basis of layered crystals of  $A_2B_6$  doped by rare-earth elements (RE) as gadolinium, holmium and dysprosium with various percentage of entered impurity ( $N_{RE}=0; 10^{-5}; 10^{-4}; 10^{-3}; 10^{-2}; 10^{-1}$  at.%) are reported.