

## DOPİNG OLUNMUŞ $(\text{TlGaSe}_2)_{1-x}(\text{Nd}_2\text{Se}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0,007$ ) MONOKRİSTALLARININ BƏZİ FİZİKİ XASSƏLƏRİ

P.H. İSMAYİLOVA, N.Z. HƏSƏNOV, K.M. HÜSEYNOVA,  
S.B. KAZIMOV, Ə.B. MƏHƏRROMOV

Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Fizika İnstitutu

H.Cavid pr. 131, AZ 1143, Bakı, Azərbaycan

e-mail: [p.ismayilova@physics.science.az](mailto:p.ismayilova@physics.science.az)

Temperaturun 77-300 K intervalında üçqat  $\text{TlGaSe}_2$  yarımkəçirici birləşməsinin nadir torpaq elementi olan neodimlə aşqarlanmasının kristalın optik və fotoelektrik xassələrinə təsiri tədqiq olunmuşdur.  $(\text{TlGaSe}_2)_{1-x}(\text{Nd}_2\text{Se}_3)_x$  – da ( $0 \leq x \leq 0,007$ )  $x$ -in artması ilə fotokeçiriciliyin spektrində fotocərəyanın maksimumunun kiçik enerjilərə doğru yer dəyişdiyi müəyyən olunmuşdur ki, bu da dərin olmayan aşqar mərkəzlərinin meydana çıxması ilə bağlıdır. Optik udulma sərhədinin tədqiqi  $(\text{TlGaSe}_2)_{0,997}(\text{Nd}_2\text{Se}_3)_{0,003}$  birləşmənin qadağan zonasının enini  $E_g$  təyin etməyə imkan verdi. Belə ki,  $E_g$  öyrənilən temperatur intervalında  $\text{TlGaSe}_2$  –yə nəzərən ortalama 75 meV azdır. Həmçinin neodimlə aşqarlanmanın  $E_g$  –nin temperatur asılılığına təsiri də öyrənilmişdir.

**Açar sözlər:** bərk məhlul, nadir torpaq elementi, optik udulma sərhədi, fotokeçiricilik

**PACS:** 82.33.Pt; 72.40.+w; 78.20.Ci

Son illər nadir torpaq elementləri ilə doping olunmuş yarımkəçiricilərin tədqiqinə həsr olunmuş işlərin sayı çoxalır. Nadir torpaq elementləri daxil olmuş birləşmə və bərk məhlullar qeyri adi fiziki – kimyəvi xassələrə malik olmaları ilə böyük maraq doğurur. Yarımkəçirici materiallara nadir torpaq elementlərinin doping olunması aşqar oblastdakı fətohəssaslığı, fotoluminesensiyanı yüksəldir [1-5]. Öyrəndiyimiz  $(\text{TlGaSe}_2)_{1-x}(\text{Nd}_2\text{Se}_3)_x$  sistem bu baxımdan da effektiv material hesab olunur.

$(\text{TlGaSe}_2)_{1-x}(\text{Nd}_2\text{Se}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0,007$ ) sistemində qarşılıqlı təsiri təyin etmək üçün  $\text{TlGaSe}_2$  birləşməsinin əsasında yaranan bərk məhlulun hal diaqramı tədqiq olunmuşdur. Fiziki-kimyəvi analizlərin nəticələrinə əsasən  $(\text{TlGaSe}_2)_{1-x}(\text{Nd}_2\text{Se}_3)_x$ -in hal diaqramında evtektika müşahidə edilmişdir.  $(\text{TlGaSe}_2)_{1-x}(\text{Nd}_2\text{Se}_3)_x$  sisteminin evtektikası 1050 K-də 20 mol%  $\text{Nd}_2\text{Se}_3$  olur. Bu temperaturda  $\text{Nd}_2\text{Se}_3$ -ün  $\text{TlGaSe}_2$ -də həll olması 7mol%-ə qədər olur [6].

$(\text{TlGaSe}_2)_{1-x}(\text{Nd}_2\text{Se}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0,007$ ) monokristalları Bricmen Stokbarger metodu ilə alınmışdır. Alınmış monokristal nümunələrinin temperaturun 77-300K, fotonların enerjisinin 0,8-3 eV oblastunda fotokeçiriciliyi öyrənilmişdir. Elektrik sahəsi laylar boyunca, işıq isə laylara perpendikulyar istiqamətdə yönəlmişdir. Nümunəyə indium ilə omik kontaktı qoyulmuşdur.

Cədvəl 1.

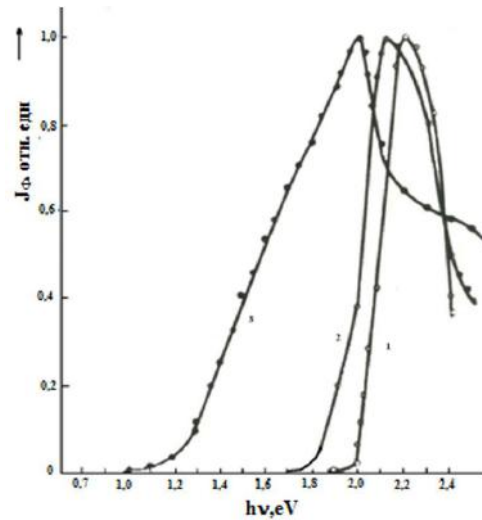
$(\text{TlGaSe}_2)_{1-x}(\text{Nd}_2\text{Se}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0,007$ ) monokristallarının bəzi fotoelektrik parametrləri.

x	$\rho$ , Om · sm 300K	$R_q/R_i$ , 100 lk	
		300K	77K
0	$5 \cdot 10^6$	2	$10^2$
0,003		1-1,5	1-1,5
0,005	$2-3 \cdot 10^5$	5-10	$10^2-10^3$
0,007	$3-5 \cdot 10^3$	10-20	$10^2-10^3$

Cədvəl 1-də  $(\text{TlGaSe}_2)_{1-x}(\text{Nd}_2\text{Se}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0,007$ ) monokristallarının bəzi fotoelektrik parametrləri veril-

mişdir. Bu cədvəldə  $\rho$  - xüsusi qaranlıq müqaviməti,  $R_i$  və  $R_q$  işıq və qaranlıq müqavimətləridir.

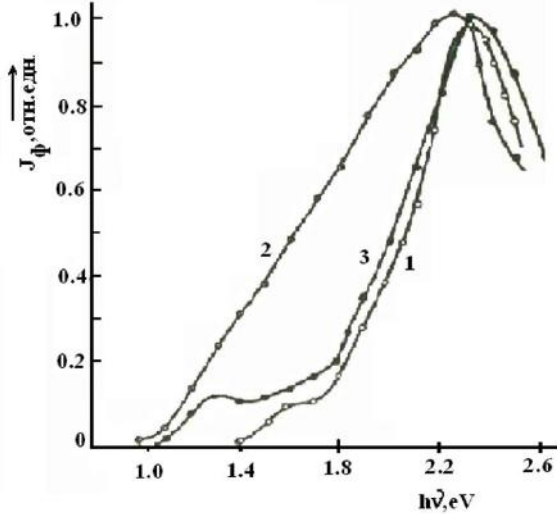
77-300K temperaturlarda  $(\text{TlGaSe}_2)_{1-x}(\text{Nd}_2\text{Se}_3)_x$  monokristallarının FK spektral paylanması şəkil 1 və şəkil 2-də verilmişdir.



Şəkil 1.  $(\text{TlGaSe}_2)_{1-x}(\text{Nd}_2\text{Se}_3)_x$  monokristallarının 77K-də fotokeçiriciliyinin spektral paylanması.  
1)  $x=0$ ; 2)  $x=0,005$ ; 3)  $x=0,007$ .

77 K temperaturda tərkibin ( $x$ )  $0 \div 0,007$  artması ilə fotokeçiriciliyin spektrindəki fotocərəyanın maksimumu aşağı enerjilərə doğru sürüşür (şəkil 1). Belə görünür ki, tərkibin dəyişməsi ilə fotokeçiriciliyin əyriyədəki sürüşmə kiçik fətohəssas aşqar mərkəzlərinin meydana çıxması ilə bağlıdır. Temperaturun 300 K-ə qədər yüksəlməsi zamanı fotokeçiriciliyin spektrində aşqar fotokeçiriciliyə uyğun uzundalğalı uzantı yaranır (şəkil 2).  $x=0,007$  kristalları üçün 300 K-də qırmızı sərhədləri 1,0; 1,2; 1,6 eV olan aşqar zolağı nəzərə çarpır.  $x=0,005$  tərkibində kristallarda fotokeçiriciliyin spektrində qırmızı sərhədi 1,0 eV olan kifayət qədər enli uzundalğalı uzantı müşahidə olunur.  $\text{TlGaSe}_2$  kristallarında ancaq 1,75 və 1,45 eV enerjili aşqar səviyyələri

mövcuddür. Buradan belə aydın olur ki, dərin səviyyələr (TlGaSe<sub>2</sub>)<sub>1-x</sub>(Nd<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>)<sub>x</sub> bərk məhlullarında nadir torpaq elementinin təsirindən yaranır. Nd<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>-in TlGaSe<sub>2</sub>-də miqdarının artması, aşqar fotokeçiriciliyin spektral paylanmasıdakı uzundalğalı uzantı kiçik enerjilərə tərəf yerini dəyişir. 77 K-də (TlGaSe<sub>2</sub>)<sub>1-x</sub>(Nd<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>)<sub>x</sub> nümunələrinin aşqar oblastındaki fotohəssaslığı ancaq güclü elektrik sahəsində  $E=10^3\div 10^4$  V/sm meydana çıxır və enerji oblasti  $0,4\div 1,7$  eV əhatə edir. Bu tədqiq olunan kristallarda elektrik sahəsi ilə induksiya olunan aşqar fotokeçiriciliyin mövcud olduğunu göstərir.



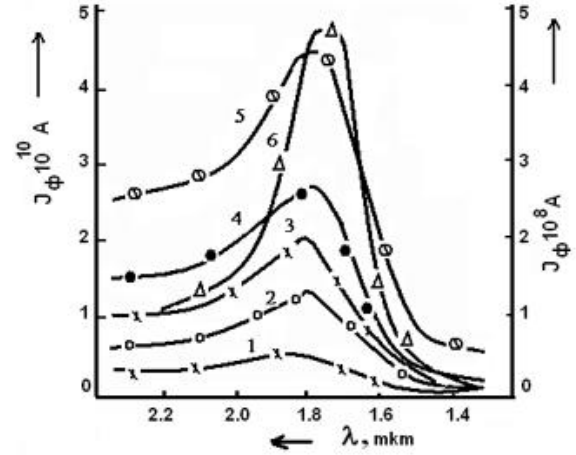
Şəkil 2. (TlGaSe<sub>2</sub>)<sub>1-x</sub>(Nd<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>)<sub>x</sub> monokristallarının 300K-də fotokeçiriciliyinin spektral paylanması. 1) x=0; 2) x=0,005; 3) x=0,007.

Şəkil 3-də x=0,007 üçün aşqar fotokeçiriciliyin paylanması verilmişdir. Göründüyü kimi bu tərkib üçün gərginliyin 30-260 V qiymətlərində aşqar fotokeçiricilik xətti olaraq yüksəlir. 280 V gərginlikdə aşqar fotocərəyanın qiyməti kəskin olaraq iki tərtib yüksəlir (şəkil 3, əyri 6). Buna görə də, aşqar fotokeçiriciliyin paylanma əyrisi daralır, qırmızı sərhəd spektrin qısa dalğalı oblastına doğru yerini dəyişir.

Yuxarıdakı təcrübə nəticələri nadir torpaq elementli monokristalların aşqar fotokeçiriciliyinin əsas xüsusiyyətlərini aşkar edir. Belə ki, temperaturun artması ilə onlarda aşqar səviyyələri tükənir, əsas yükdaşıyıcılarla dolur, nəticədə aşqar fotokeçiriciliyin mütləq qiyməti artır. TlGaSe<sub>2</sub> kristallarına nadir torpaq elementinin daxil edilməsi ilə əmələ gələn aşqar mərkəzləri bir sıra maraqlı xüsusiyyətlərə malikdirlər. Adı aşqar mərkəzlərindən fərqli olaraq nadir torpaq elementinin yaratdığı səviyyələrdə sərbəst yükdaşıyıcılar üçün potensial baryer mövcuddur. Buna görə də, sərbəst yükdaşıyıcılar bu mərkəzləri doldurmaq üçün baryeri aşmalıdırlar. Aşağı temperaturalarda və zəif sahələrdə yükdaşıyıcıların enerjisi baryeri aşmağa kifayət etmir, onlar yalnız səviyyəni doldura bilirlər. Bu səbəbdən də mərkəzlərin aşqar fotokeçiriciliyi yoxdur.

Temperaturun yüksəlməsi ilə baryerin hündürlüyü kiçilir, istilik enerjisi yükdaşıyıcıların bu mərkəzləri tutmasına imkan verir. Güclü elektrik sahəsinin mövcudluğu zamanı baryerin daralması hesabına aşağı

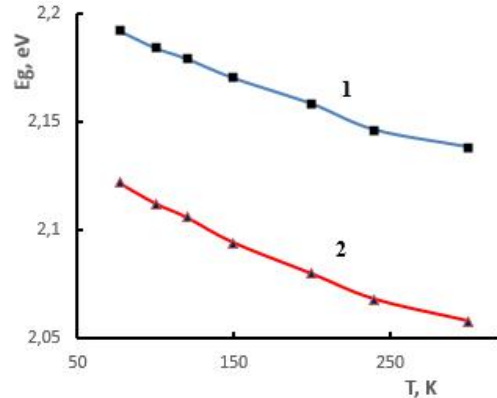
temperaturlarda belə sərbəst yükdaşıyıcılar tunel effektiv nəticəsində bu mərkəzləri doldura bilirlər.



Şəkil 3. (TlGaSe<sub>2</sub>)<sub>1-x</sub>(Nd<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>)<sub>x</sub> x=0,007 monokristalında gərginliyin müxtəlif qiymətlərində aşqar fotokeçiriciliyin spektral paylanması. Verilmiş gərginliklərin 3, 60, 105, 150, 260 və 280 V qiymətlərinə 1, 2, 3, 4, 5, 6 əyri uyğundur.

Temperaturun 77-300 K diapazonunda TlGaSe<sub>2</sub> və (TlGaSe<sub>2</sub>)<sub>0,997</sub>(Nd<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>)<sub>0,003</sub> monokristallarının optik udulma sərhədi tədqiq edilmişdir. Nümunələr monokristal külçədən nazik lövhələr şəklində 20-120 mkm qalınlığında kəsilmişdir. Işıq nümunənin kristalloqrafik C oxuna paralel yönəldilmişdir. Optik buraxma spektrlərinin tədqiqi MDR-23 monoxromatoru və azot kriostatı olan qurğunun köməyi ilə aparılmışdır. Qurğunun ayırdetmə qabiliyyəti 2Å-dən az deyildir.

$1\cdot 10^5$  sm<sup>-1</sup> intervalında optik udulma əmsalının  $\alpha$  hesablanması üçün işıq selinin intensivliyinin qiymətləndirilməsi istifadə edilmişdir, belə ki, bütün intervalı əhatə etmək üçün, onu üç hissəyə bölərək üç cüt müxtəlif qalınlıqlı nümunələrdən keçən işıq seli nəzərə alınmışdır. Hər bir sahə üçün  $\alpha$ ,  $\alpha=1/(d_2-d_1)\ln(I_1/I_2)$  düsturu ilə hesablanmışdır. Burada  $d_1$  və  $d_2$  nümunələrin qalınlığı,  $I_1$  və  $I_2$  onlardan keçən işığın intensivliyidir. Hər bir nümunə üçün, ona uyğun sahədə ( $\alpha d$ ) hasilə vahiddən böyük olduğundan, kristal lövhənin arxa səthindən əks olunan və keçən işıq selinin interferensiyası çox zəif olmuş və təcrübədən müşahidə olunmamışdır.



Şəkil 4. TlGaSe<sub>2</sub> (1) və (TlGaSe<sub>2</sub>)<sub>0,997</sub>(Nd<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>)<sub>0,003</sub> (2) monokristallarının qadağan zonasının temperaturdan asılılığı.

Şəkil 4-də TlGaSe<sub>2</sub> və (TlGaSe<sub>2</sub>)<sub>0,997</sub>(Nd<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>)<sub>0,003</sub> monokristallarının qadağan zonasının temperaturdan asılılığı verilmişdir. Tədqiq olunan kristalların qadağan zonasının eni  $E_g$  ( $\alpha h\nu$ )<sup>2</sup>-nin düşən fotonun enerjisindən ( $h\nu$ ) asılılığı əyrisinin düzxətli hissəsinin ekstrapolyasiyası nəticəsində absis oxu ilə kəsişmə nöqtəsinə görə müəyyən edilmişdir. Göstərilmiş asılılıq nəzərə çarpacaq dərəcədə düzxətli hissəyə malikdir və bu rentgen məlumatlarına uyğun olaraq yetişdirilmiş kristalların tarazlığını sübut edir. Buraxma spektrinin analizi 77-300 K temperatur intervalında TlGaSe<sub>2</sub> və (TlGaSe<sub>2</sub>)<sub>0,997</sub>(Nd<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>)<sub>0,003</sub> kristallarının qadağan zonasının eninin temperatur asılılığını izləməyə imkan verir. Eksperiment göstərdi ki, temperaturun

azalması ilə udulma kənarı yüksək enerjilərə doğru yerini dəyişir.

Temperaturun 77-300 K intervalında (TlGaSe<sub>2</sub>)<sub>0,997</sub>(Nd<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>)<sub>0,003</sub> üçün qadağan zonanın eninin orta temperatur əmsalı  $\frac{\partial E_g}{\partial T}$  hesablanmışdır. Bu əmsal TlGaSe<sub>2</sub>-də olduğu kimi mənfi işarəlidir [7], ancaq modulca bir az böyük olub. TlGaSe<sub>2</sub> üçün - 2,42 · 10<sup>-4</sup> V/K; (TlGaSe<sub>2</sub>)<sub>0,997</sub>(Nd<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>)<sub>0,003</sub> üçün isə - 2,87 · 10<sup>-4</sup> eV/K.

(TlGaSe<sub>2</sub>)<sub>0,997</sub>(Nd<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>)<sub>0,003</sub> birləşməsinin qadağan zonasının eni TlGaSe<sub>2</sub>-yə nisbətən ortalama 75 meV azdır, udulma əmsalının qiyməti isə nəzərə çarpacaq dərəcədə böyükdür.

- [1] Физические свойства халькогенидов редкоземельных элементов, под ред. Жузе, Изд-во Л., «Наука», с.304, 1973.
- [2] *Е.М. Керимова, N.Z. Həsənov, A.İ. Həsənov, К.М. Hüseynoვა, А.Ə. İsayeva.* Fizika, 2012, cild XVIII, №2, section: Az. S.36-38.
- [3] *А.М. Пауаев, С.Н. Мустафаева, Э.М. Керимова, Н.З. Гасанов.* Диэлектрические и оптические свойства легированных редкоземельными элементами монокристаллов TlInS<sub>2</sub> и TlInSe<sub>2</sub>. Ученые записки Национальной Академии Авиации. 2014, т. 16, № 3, с. 29-37.
- [4] *Э.М. Керимова, Н.З. Гасанов.* Кристаллофизика сложных полупроводников на основе

соединений типа TlB<sup>III</sup>C<sub>2</sub><sup>VI</sup>, включающих редкоземельные элементы и переходные металлы. АМЕА Xəbərлər, Fizika və Astronomiya seriyası. 2017, №2, с.12-26.

- [5] *Е.М. Керимова, N.Z. Gasanov, F.M. Seidov.* Some physical properties of the TlGaSe<sub>2</sub>-TlTmSe<sub>2</sub> system. Milli Aviasiya Akademiyası. Elmi Məcmuələr, 2018, с.20, N4, s.51-53.
- [6] *Э.М. Керимова.* Кристаллофизика низкоразмерных халькогенидов. Баку, «Елм», 712с., 2012.
- [7] *Н.З. Гасанов, Э.М. Керимова, А.И. Гасанов, Ю.Г. Асадов.* Физика Низких Температур, т.33, 2007, стр.115-118.

**Р.Н.İsmailova, N.Z.Gasanov, К.М.Huseinova, S.B.Kazimov, А.В.Маһarramov**

### **SOME PHYSICAL PROPERTIES OF DOPED (TlGaSe<sub>2</sub>)<sub>1-x</sub>(Nd<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>)<sub>x</sub> (0 ≤ x ≤ 0,007) SINGLE CRYSTALS**

The effect of doping with the rare-earth element neodymium of the ternary semiconductor compound TlGaSe<sub>2</sub> on its photoelectric and optical properties in the temperature range of 77-300 K has been studied. It has been established that by increasing x in (TlGaSe<sub>2</sub>)<sub>1-x</sub>(Nd<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>)<sub>x</sub> from 0 to 0.007, the position of the photocurrent maximum in the photoconductivity spectrum shifts toward lower energies, which is related to the appearance of shallow impurity centers. The study of the optical absorption edge made it possible to determine the band gap width  $E_g$  of the compound (TlGaSe<sub>2</sub>)<sub>0,997</sub>(Nd<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>)<sub>0,003</sub>, which turned out, in the temperature range under study, to be on average 75 MeV lower than in TlGaSe<sub>2</sub>. The effect of doping with neodymium on the temperature dependence of  $E_g$  was also studied.

**П.Г. Исмаилова, Н.З. Гасанов, К.М. Гусейнова, С.Б. Кязимов, А.Б. Магеррамов**

### **НЕКОТОРЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛЕГИРОВАННЫХ МОНОКРИСТАЛЛОВ (TlGaSe<sub>2</sub>)<sub>1-x</sub>(Nd<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>)<sub>x</sub> (0 ≤ x ≤ 0,007)**

Исследовано влияние легирования редкоземельным элементом неодимом тройного полупроводникового соединения TlGaSe<sub>2</sub> на его фотоэлектрические и оптические свойства в интервале температур 77-300 К. Установлено, что с увеличением x в соединении (TlGaSe<sub>2</sub>)<sub>1-x</sub>(Nd<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>)<sub>x</sub> от 0 до 0,007 положение максимума фототока в спектре фотопроводимости смещается в сторону меньших энергий, что связывается с появлением неглубоких примесных центров. Исследование края оптического поглощения позволило определить ширину запрещенной зоны  $E_g$  соединения (TlGaSe<sub>2</sub>)<sub>0,997</sub>(Nd<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>)<sub>0,003</sub>, которая оказалась в изученном температурном интервале в среднем на 75 мэВ меньше, чем в TlGaSe<sub>2</sub>. Изучено также влияние легирования неодимом на температурную зависимость  $E_g$ .