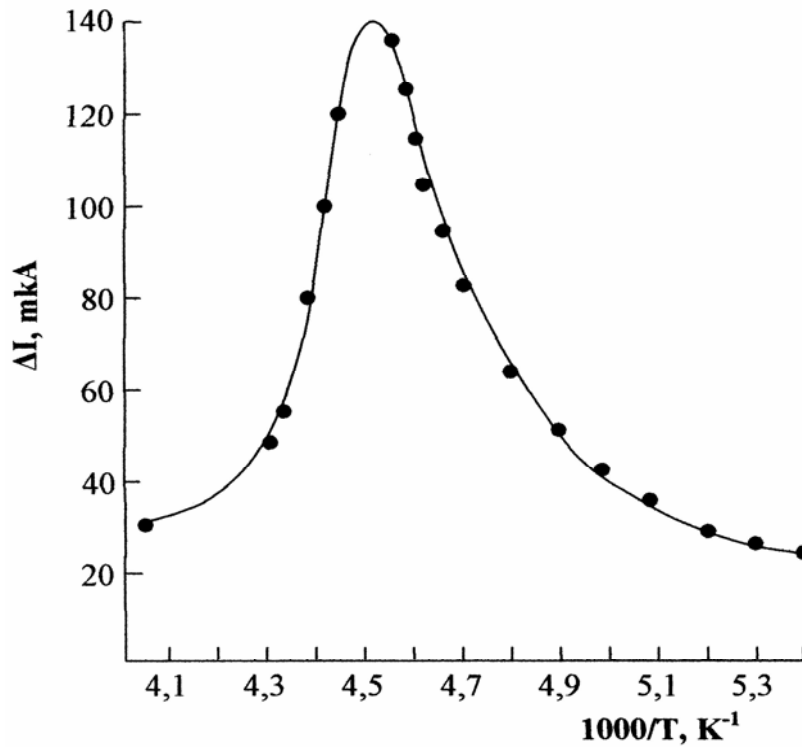


**In<sub>6</sub>S<sub>7</sub> MONOKRİSTALLİK BİRLƏŞMƏSİNDƏ  
FOTOKEÇİRİCİLİYİN DÜŞMƏ RELAKSASIYA  
ƏYRİLƏRİNİN TƏDQIQI**

**İ.M.İSMAYILOV, S.Ə.CAHANGİROVA**  
*Bakı Dövlət Universiteti*

*İşdə p-tip In<sub>6</sub>S<sub>7</sub> monokristallik birləşməsində fotocərəyanın düşmə relaksasiya əyriləri alçaq temperaturlar oblastında tədqiq edilmişdir. Göstərilmişdir ki, fotocərəyan T=180 K-dən başlayaraq temperaturun artması ilə artır, T=222-225 K temperaturlarda maksimuma çatır və sonra sürətlə azalmağa başlayır. In<sub>6</sub>S<sub>7</sub> monokristalında fotocərəyanın bu cür temperatur asılılığı relaksasiya müddətinin temperatur asılılığı ilə izah olunur. Deşiklərin relaksasiya müddətinin artan hissəsi  $\tau=A \exp(-\Delta E_i/kT)$ , temperatura görə kəskin azalan hissəsi isə  $\tau=B \exp[(E_c-E_i)/kT]$  qanunlarına tabe olurlar.*

*In<sub>6</sub>S<sub>7</sub> monokristallik birləşməsinin elektrofiziki xassələri demək olar ki, öyrənilməmişdir. Bunun səbəblərini biz In<sub>6</sub>S<sub>7</sub> birləşməsi monokristalının alınmasında mövcud olan çətinliklərdə görürük [1]. İndiyə qədər qeyd edilməmiş bir çətinlik də ondan ibarətdir ki, bu birləşmə maye halından bərk hala keçərkən yerləşdiyi qrafit konteyneri, kvars ampulanı çatladır və bunun nəticəsində yüksək temperatur altında olan In<sub>6</sub>S<sub>7</sub> məhsulu oksidləşərək yararsız hala düşür. Kvars ampulanın çatlamasının əsas səbəbi odur ki, In<sub>6</sub>S<sub>7</sub> birləşməsinin atomları kvars ampulanın atomları ilə güclü rabitə yaradaraq onları bir-birinə yapışdırır. Kvars ilə In<sub>6</sub>S<sub>7</sub>-nin istidən genişlənmə əmsalları bir-birindən kəskin fərqləndiyindən In<sub>6</sub>S<sub>7</sub> maye halından bərk hala keçdikdə kvars ampulanın kristallik quruluşunda gərginlik yaradaraq onu çatladır. In<sub>6</sub>S<sub>7</sub> ilə kvars ampula arasındakı əlaqəni kəsmək qərarına gəldik. Bunun üçün kvars ampulanın içərisini 2-3 ml aseton-benzol (50:50) mayesi ilə isladıb onu içərisinin temperaturu 1000°C olan silindrik qızdırıcının içərisinə ani olaraq daxil etdik. Aseton-benzol mayesi kvars ampulanın daxilində sürətlə alışıraq onun daxili divarında güzgü səthinə malik olan nazik karbon təbəqəsi əmələ gətirir. Alınmış nazik təbəqə In<sub>6</sub>S<sub>7</sub> birləşməsi ilə reaksiyaya girmədən onun kvars ampulanın daxili divarı ilə əlaqəsini kəsir və In<sub>6</sub>S<sub>7</sub> birləşməsinin monokristalının göyərdilməsi üçün əlverişli şərait yaradır.*



Şəkil 1.  $In_6S_7$  monokristalında fotocərəyanın temperatur asılılığı.

Yuxarıda söylənilənləri nəzərə almaqla  $In_6S_7$  birləşməsinin iri həcmli monokristalları özünəməxsus xüsusi metodla laboratoriya şəraitində alınmışdır [1,2].

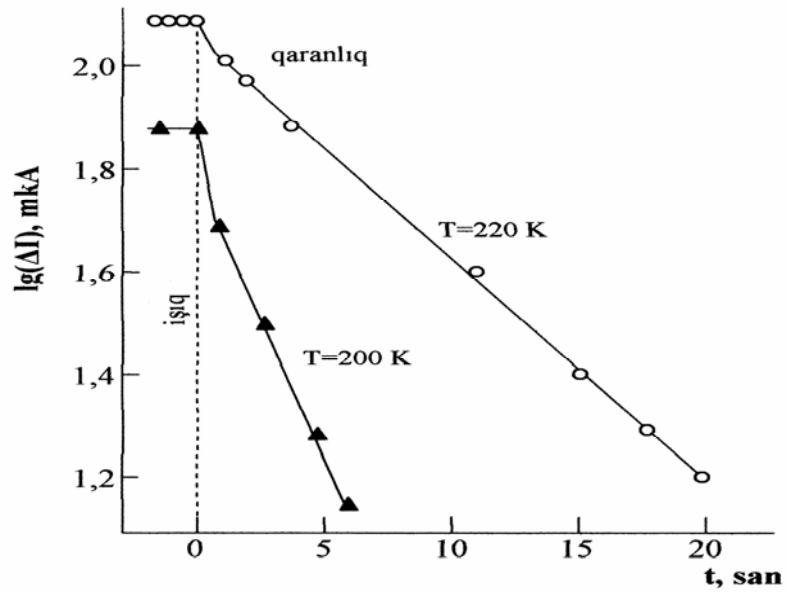
Fotokeçiricilik üçün tədqiq olunan nümunələr dəşik keçiriciliyinə malikdirlər. Dəşiklərin  $T=300K$ -də konsentrasiyası  $10^{19} \div 10^{20} m^{-3}$ ; yürüklükləri isə  $(5 \div 10) \cdot 10^{-4} m^2/v \cdot s$  qiymətlərini alır.

$In_6S_7$  monokristallıq nümunələrində fotocərəyanın qalxma əyriləri zamandan asılı olaraq alçaq temperaturdar oblastında öyrənilmiş və göstərilmişdir ki, bu əyrilər S-ə bənzərdirlər [2]. Lakin fotocərəyanın düşmə əyriləri tədqiq edilməmişdir.

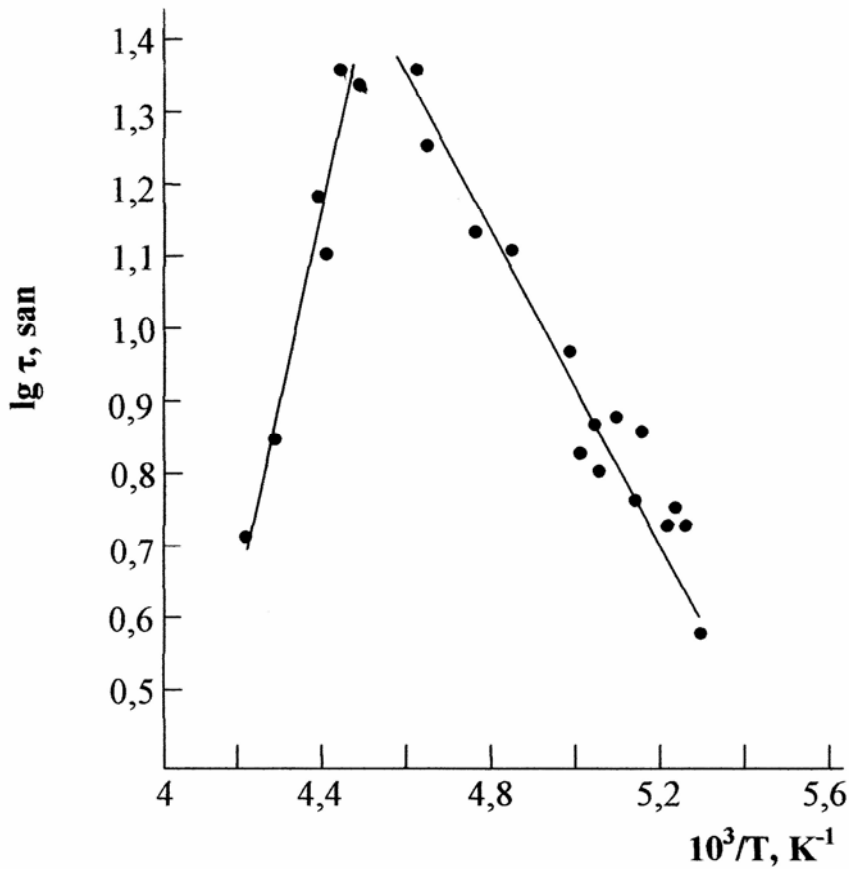
İşdə əsas məqsəd  $In_6S_7$  monokristallıq birləşməsində fotokeçiriciliyin düşmə relaksasiya əyrilərinin tədqiqi olmuşdur. Şəkil 1-də alçaq temperaturdar oblastında bütün tədqiq olunan nümunələr üçün xarakterik olan fotocərəyanın temperaturdan asılılıq əyrisi göstərilmişdir. Şəkildən görünür ki, alçaq temperaturdardan başlayaraq  $In_6S_7$  birləşməsində fotocərəyan temperaturun artması ilə artır,  $T=222 \div 225 K$  temperaturdarında maksimuma çatır və sonra azalmağa başlayır. Buna bənzər asılılıq  $In_6S_7$  birləşməsinin termostimullaşmış cərəyanında da müşahidə olunur [3].

$In_6S_7$  birləşməsində fotokeçiriciliyin bu cür temperatur asılılığı dəşiklərin yürüklüklərinin və ya onların yaşama müddətlərinin temperatur asılılıqları ilə izah oluna bilər. Dəşiklərin yürüklüyünün temperatur asılılıqlarının tədqiqi göstərdi ki,  $In_6S_7$  monokristallıq birləşməsində dəşiklər  $T < 300K$  temperaturlarda ion aşqarlarından səpilirlər ( $\mu \sim bT^{-3/2}$ ) [4]. Bu onu göstərir ki,  $In_6S_7$  birləşməsində fotocərəyanın şəkil 1-dəki kimi asılılığı dəşiklərin yürüklüyünün temperatur asılılığı ilə izah edilə bilməz. Deməli, fotokeçiriciliyin temperatur asılılığını tarazsız yükdaşıyıcıların relaksasiya müddətinin temperatur asılılığında axtarmaq lazımdır.

Şəkil 2-də iki müxtəlif temperaturlarda ( $T_1 = 200 K$  və  $T_2 = 220K$ ) fotocərəyanın loqarifminin zamandan asılılıq qrafikləri göstərilmişdir. Şəkildən görünür ki, işıq kəsildikdən sonra fotocərəyanın zamandan asılı olaraq düşmə əyriyələri iki hissədən ibarətdir. Başlanğıc hissəyə uyğun gələn relaksasiya müddəti ossilloqraf vasitəsi ilə tədqiq edilərək göstərilmişdir ki, bu hissəyə uyğun gələn relaksasiya müddəti  $10^{-2} \div 10^{-3}$  san olmaqla temperaturdan zəif asılıdır. Ancaq ikinci hissəyə (bu hissə 1 san-dən sonra başlayır) uyğun gələn relaksasiya müddətləri bir neçə saniyələrlə olur və temperaturdan asılı olaraq kəskin dəyişir. Göründüyü kimi,  $T = 200 K$ -də bu hissədə relaksasiya müddəti 10 san olduğu halda,  $T=220K$ -də bu müddət 25 saniyəyə çatır.



Şəkil 2.  $In_6S_7$  monokristalında fotocərəyanın müxtəlif temperaturlarda zamandan asılılıq qrafikləri.



Şəkil 3.  $In_6S_7$  monokristalında relaksasiya müddətinin temperatur asılılığı

Şəkil 3-də müxtəlif temperaturlarda relaksasiya müddətlərinin onluq loqarifmasının  $10^3/T$  asılılıq qrafiki qurulmuşdur. Göründüyü kimi,  $lg \tau = f(10^3/T)$  asılılığı iki düzxətli hissədən ibarətdir. Alçaq temperatur oblastında relaksasiya müddəti  $\tau = A e^{-\frac{\Delta E_t}{kT}}$ , ona nisbətən yüksək temperaturlarda  $\tau = B e^{-\frac{E_c - E_t}{kT}}$  qanunlarına malikdirlər. Alçaq temperaturlar oblastından  $\Delta E_t = 0,2 eV$ , ona nisbətən ikinci hissədən  $E_c - E_t = 0,65 eV$  qiymətləri alınır. Maraqlısı budur ki, hər iki enerjilərin cəmi  $In_6S_7$  monokristallik birləşməsinin təqribən qadağan olunmuş zolağının enini verir ( $\Delta E_g = 0,85 eV$ ). Qeyd edək ki,  $In_6S_7$  monokristalının fotokeçiriciliyində  $\Delta E_t = E_v + 0,2 eV$  səviyyəsində yerləşən mərkəzlər mühüm rol oynayır [2,5]. Onlar

temperatur intervallarından asılı olaraq özlərini yapışma və ya rekombinasiya mərkəzləri kimi aparırlar.  $In_6S_7$  birləşməsində tarazsız yükdaşıyıcıların bu mərkəzlər tərəfindən rekombinasiyasını qəbul edərək, Şokli-Rid formulundan istifadə edə bilərik [6]:

$$\tau = \tau_{p_0} \frac{n_0 + n_1 + \Delta n}{n_0 + p_0 + \Delta n} + \tau_{n_0} \frac{p_0 + p_1 + \Delta p}{n_0 + p_0 + \Delta p} \quad (1)$$

Fotokeçiriciliyin relaksasiya müddəti üçün alınmış bu ifadədə  $\tau_{n_0}, \tau_{p_0}$  – elektron və deşiklərin  $E_t$  səviyyəsinə nəzərən yaşama müddətlərini;  $n_0, p_0$  – onların qaranlıqdakı konsentrasiyalarını;  $\Delta n, \Delta p$  – işığın təsiri ilə yaranmış qeyri-tarazlıq yükdaşıyıcıların konsentrasiyalarını;  $n_1, p_1$  – keçirici ( $c$ ) və valent ( $v$ ) zolaqlarının  $E_t$  səviyyəsinə nəzərən «gətirilmiş» hal sıxlıqlarını göstərir və axırıncılar aşağıdakı kimi təyin olunurlar:

$$n_1 = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_t}{kT}\right); \quad p_1 = P_v \exp\left(-\frac{E_v - E_t}{kT}\right) \quad (2)$$

$N_c, P_v - c$  və  $v$  zolaqlarının effektiv hal sıxlıqlarıdır.

Zəif işıqlanma halında (1) ifadəsi aşağıdakı şəkllə düşür:

$$\tau = \tau_{p_0} \frac{n_0 + n_1}{n_0 + p_0} + \tau_{n_0} \frac{p_0 + p_1}{n_0 + p_0} \quad (3)$$

(3) ifadəsi bizə imkan yaradır ki,  $p$  – tip  $In_6S_7$  birləşməsində fotokeçiriciliyin relaksasiya müddətinin temperatur asılılığı haqqında fikir söyləyək. Belə ki, maye azot temperaturu ətrafında  $p-In_6S_7$  birləşməsi üçün Fermi səviyyəsi onda mövcud olan  $\Delta E_a = E_v + 0,15 eV$  akseptor səviyyəsinin yanındadır. Belə olan halda,  $p_0$  (3) ifadəsinə daxil olan parametrlərin hamısından böyükdür. Onda relaksasiya müddəti üçün  $\tau = \tau_{n_0}$  alınır.

Temperaturun artması ilə Fermi səviyyəsi qadağan olunmuş zolağın ortasına doğru sürüşür, bununla da  $E_t$  - rekombinasiya mərkəzləri elektronlarla dolmağa başlayır. Prosesin bu anından artıq (3) ifadəsində  $p_0 \gg n_0, n_1; p_1 \gg n_0, n_1$  şərtləri ödənilir və  $p_1 - i$   $p_0$ -a nəzərən atmaq olmur. Bunların nəticəsi olaraq, (3) ifadəsindən

$$\tau = \tau_{n_0} \left(1 + \frac{p_1}{p_0}\right) = \tau_{n_0} \left[1 + \frac{P_v}{p_0} \exp\left(-\frac{E_t - E_v}{kT}\right)\right] \quad (4)$$

alarıq. (4) ifadəsindən görünür ki, temperaturun artması ilə  $\tau$  eksponensial olaraq artır və  $\Delta E_t = E_t - E_v$  qəbul etməklə, şəkil 3-də alınmış təcrübi nəticələrin alçaq temperaturlar oblastındakı rolu izah olunur.

Bu oblastda relaksasiya müddətinin ( $\tau$ ) artmasının səbəbi odur ki, temperaturun artması ilə elektronlar  $v$  - zolağından rekombinasiya ( $E_t$ ) mərkəzlərinə keçərək bu zolaqda dəşiklərin konsentrasiyasını artırır. Rekombinasiya mərkəzlərinə keçmiş bu elektronlar valent zolağındakı qeyri-tarazlıq dəşikləri qəbul etsələr də, keçirici zolaqda elektronların olmaması ucbatından onlar rekombinasiya etmədən  $v$  - zolağına qayıdırlar. Temperatur artdıqca rekombinasiya mərkəzlərinə keçən elektronların sayı artır ( $v$  - zolağında dəşiklərin sayı da artır) ki, bu da öz növbəsində  $\tau$ -nün artmasına səbəb olur.  $E_t$  səviyyəsi ilə bağlı  $\tau$ -nün artması o həddə qədər davam etməlidir ki, bu səviyyə elektronlarla tamamilə dolmuş olsun.

Relaksasiya müddəti  $\tau$ -nün temperaturun artması ilə azalan hissəsində aktivləşmə enerjisi üçün  $E_c - E_t = 0,65 eV$  qiyməti alındığını qeyd etmişdik. Bu onu göstərir ki, təqribən  $T > 225$  K-dən yuxarı temperaturlarda istiliyin təsiri ilə elektronlar  $E_t$  səviyyəsindən keçirici zolağa keçməyə başlayırlar. Keçirici zolağa keçən elektronlar ani olaraq  $10^{-2} \div 10^{-3}$  san müddətində  $E_t$  - səviyyəsində və ya  $v$  - zolağında olan dəşiklərlə rekombinasiya edirlər. Relaksasiya müddətinin temperatura görə artan hissəsi  $v$ -zolağından elektronların  $E_t$ -səviyyəsinə keçməsi ilə izah olunursa, azalan hissəsi elektronların bu səviyyədən keçirici zolağa keçməsi ilə əlaqədardır.

#### ƏDƏBİYYAT

1. İsmayılov İ.M., Qurbanov E.M., Abbasov V.T. Bakı Universitetinin xəbərləri. Fizika-riyaz. elmləri seriyası, 2000, №4, s.58.
2. İsmayılov İ.M., Abbasov V.T. Fizika. IV cild, 2004, №2, s.55.
3. Тагиров В.И., Исмаилов И.М., Мурадова М.С. Известия АН Азерб. ССР. Сер. физ.-мат. наук, 1998, №1, с.65.
4. Исмаилов И.М. Электрофизические свойства полупроводников и газового разряда. Тем. сб. науч. трудов АГУ, Баку, 1989, стр. 29-32.
5. İsmayılov İ.M., Abbasov V.T., Məmmədov R.M., Vaxıqov P.Ə. Bakı Universitetinin xəbərləri, 2005, №3, s.150.
6. Shockley W., Read W.M., Jr., Phys., Rev., 1952, 87, 835.

**ИССЛЕДОВАНИЕ КРИВЫХ РЕЛАКСАЦИИ ПАДЕНИЯ  
ФОТОПРОВОДИМОСТИ В МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ  
СОЕДИНЕНИИ  $\text{In}_6\text{S}_7$**

**И.М.ИСМАИЛОВ, С.А.ДЖАХАНГИРОВА**

**РЕЗЮМЕ**

В работе исследованы кривые релаксации падения фототока монокристаллического соединения  $\text{In}_6\text{S}_7$  р-типа в области низких температур. Показано, что фототок, начиная с  $T=180$  К, растет с ростом температуры и достигает максимума при  $T=222\div 225$  К, затем начинает резко снижаться. Такая зависимость фототока от температуры в монокристаллах  $\text{In}_6\text{S}_7$ , объясняется температурной зависимостью времени релаксации. Возрастающая часть кривой времени релаксации дырок, подчиняется закону  $\tau=A \exp(-\Delta E_i/kT)$ , а резко снижающаяся от температуры часть закону  $\tau=B \exp[(E_c-E_i)/kT]$ .

**STUDY OF CURVES OF RELAXATION OF DECLINE  
IN PHOTOCONDUCTION IN MONOCRYSTAL  $\text{In}_6\text{S}_7$  COMPOUND**

**I.M.ISMAILOV, S.A.JAHANGIROVA**

**SUMMARY**

This research paper is devoted to the study of curves of relaxation of decline in photocurrent of monocrystals  $\text{In}_6\text{S}_7$  compound of p-type in the low-temperature region. It's showed that, photocurrent increases with increase of temperature stating from  $T=180$  K until maximum is found at  $T=222\div 225$  K, then starts to sharply decrease. Such temperature dependence of the photocurrent in  $\text{In}_6\text{S}_7$  monocrystals is explained by temperature dependence of the relaxation time. Increasing and sharply decreasing, caused by temperature parts of the relaxation time of holes obey the  $\tau=A \cdot \exp(-\Delta E/kT)$  and  $\tau=B \cdot \exp [(E_c-E_i)/kT]$  laws respectively.