

**In_6S_7 MONOKRİSTALINDA FOTOKEÇİRİCİLİYİN QALXMA
RELAKSASIYA ƏYRİLƏRİNƏ XARİCİ ELEKTRİK SAHƏSİNİN TƏSİRİ**

İ.M.İSMAYILOV, Ə.O.ƏLİYEV
Bakı Dövlət Universiteti

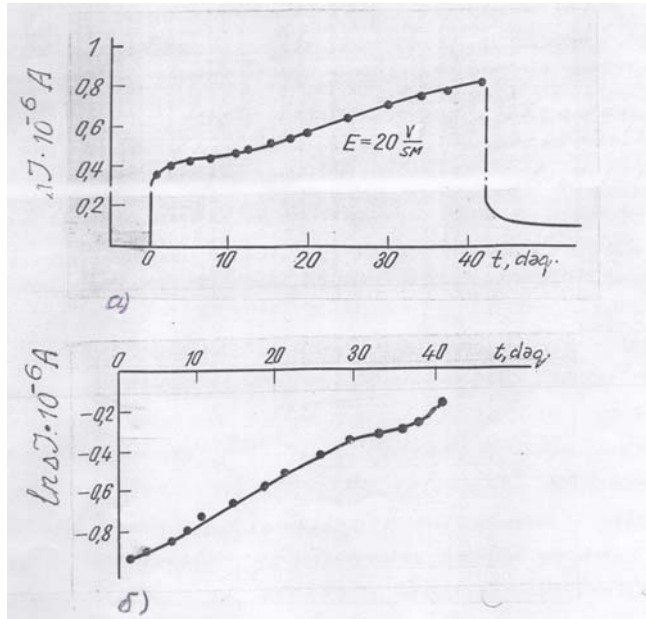
İşdə p -tip In_6S_7 monokristallik birləşməsində fotokeçiriciliyin qalxma relaksasiya əyrilərinə alçaq temperaturlarda ($T \approx 80K$) xarici elektrik sahəsinin təsiri tədqiq edilmişdir. Göstərilmişdir ki, fotokeçiriciliyin relaksasiya əyriləri «yavaş» və «sürətli» rekombinasiya mərkəzlərinin iştirakı ilə formalaşır. Xarici elektrik sahəsi yalnız «yavaş» rekombinasiya mərkəzlərinə təsir göstərərək, onunla bağlı relaksasiya müddətini $\tau = \exp(\alpha E)$ qanuna tabe edir. İşdə $\tau = f(E)$ asılılığındakı qanunauyğunluğun mexanizmi təklif olunur.

In_6S_7 monokristallik nümunələrdə fotokeçiriciliyin zamandan asılı olaraq qalxma və düşmə relaksasiya əyriləri maye-azot temperaturu ətrafında tədqiq olunmuşdur [1,2]. Birləşmədə fotokeçiriciliyin qalxma relaksasiya əyriləri $T = 80K$ -də bir astanaya (S -ə bənzərliyə) malikdirlər. Ancaq nümunələr uzun müddətli əlavə «kölgə» işığı ilə işıqlandırıldıqda relaksasiya əyriləri iki astanaya (ikiqat S -ə bənzərliyə) malik olurlar. Fotokeçiriciliyin düşmə əyrilərdən təyin olunmuş relaksasiya müddətləri $80 \div 225K$ temperatur intervalında $\tau = A \exp(-0,2/kT)$ və $T > 225$ temperaturlarda isə $\tau = B \exp(0,65/KT)$ qanunlarına tabe olurlar [2].

Lakin bu birləşmədə fotokeçiriciliyin relaksasiya əyrilərinə xarici elektrik sahəsinin təsiri öyrənilməmişdir. Bu işdə məqsədimiz In_6S_7 monokristallik birləşmədə fotocərəyanın zamandan asılı olaraq qalxma relaksasiya əyrilərinə xarici elektrik sahəsinin təsirini öyrənməkdir.

Tədqiq olunan nümunələr dəşik keçiriciliyinə malik olub otaq temperaturunda konsentrasiyaları $10^{19} \div 10^{20} m^{-3}$ yürüklükləri isə $(5 \div 10) \cdot 10^{-4} m^2 / V.s.$ qiymətlərinə malikdirlər.

In_6S_7 monokristallik nümunələrin $T = 300K$ -də qaranlıqdakı müqavimətinin işıqdakı müqavimətinə nisbəti $300 lks$ -də $R_q/R_i = 10 \div 20$ bərabərdir. Lakin temperaturun azalması ilə bu nisbət kəskin artaraq $R_q/R_i \approx 10^4 \div 10^5$ qiymətlərini alır.



Şəkil 1. a) fotocərəyanın qalxmada relaksasiya əyrisi;
b) fotocərəyanın natural loqarifminin zamandan asılılıq qrafiki.

Fotokeçiriciliyin qalxma relaksasiya əyrilərini xarici sahənin müxtəlif intensivliklərində tədqiq etmək üçün həssaslığı $10^{-8} A$ olan M1200 mikroamometrindən, UİP-2 markalı sabit cərəyan mənbəyindən və saniyəölçəndən istifadə edilmişdir. Şəkil 1-də In_6S_7 monokristallik nümunəsi üçün

maye azot temperaturunda fotocərəyanın elektrik sahəsinin $E = 20 \frac{V}{sm}$ qiymətində

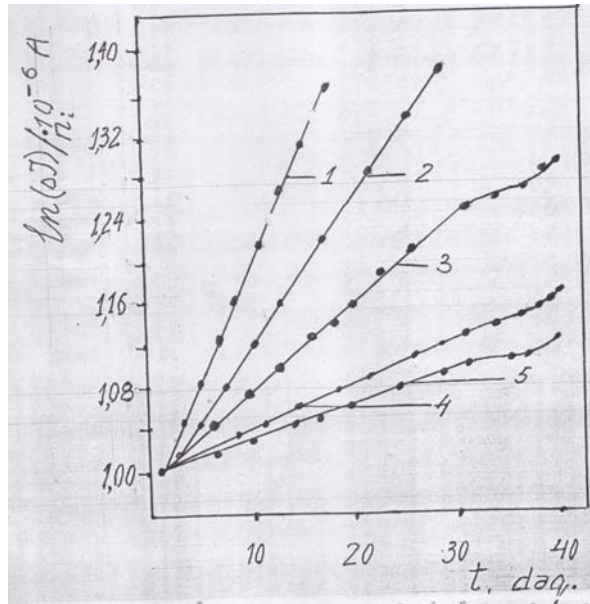
qalxma relaksasiya əyrisi (Şəkil 1, a) və onun natural loqarifminin zamandan asılılıq qrafikləri göstərilmişdir (Şəkil 1, b). Fotocərəyanın zamandan asılılıq $[\Delta J = f(t)]$ əyrisindən görünür ki, o iki hissədən ibarətdir. Başlangıç hissəyə uyğun gələn relaksasiya müddəti ossiloqraf vasitəsilə tədqiq edilərək təyin edilmişdir ki, bu hissəyə uyğun gələn relaksasiya müddətləri 10^{-2} ç 10^{-3} saniyədir. İkinci hissəyə (bu hissə $\Delta J = f(t)$ asılılığında 1 san.-dan sonra başlayır) uyğun gələn relaksasiya müddətləri bir neçə onluq dəqiqələrə çatır və elektrik sahəsinin intensivliyindən kəskin asılı olur. Beləliklə, keçirici zolaqda olan elektronların bir hissəsi «sürətli», digər hissəsi isə «yavaş» rekombinasiya kanalları vasitəsi ilə valent zolağında olan deşiklərlə rekombinasiya edirlər.

In_6S_7 birləşməsində bu şəraiti yaradan səviyyələr (aşqar mərkəzləri) mövcuddur [1]. Şəkil 1.b-də $\ln \Delta J = f(t)$ asılılığının düzxətli hissəsindən (2÷28 dəq arasında) «yavaş» rekombinasiya kanalına məxsus relaksasiya müddəti təyin olunur $\tau = \Delta t / \Delta [\ln(\Delta J)]$. Şəkil 2-də xarici elektrik sahəsinin müxtəlif qiymətlərində ($1-E=20V/sm, 2-40V/sm, 3-80V/sm, 12V/sm$ və $5-160V/sm$) fotocərəyanın natural loqarifminin zamandan asılılıq qrafikləri qurulmuşdur. Asılılıqların qurulması zamanı relaksasiya əyrilərinin hər bir

təcrübi qiyməti elə onun başlanğıc nöqtəsindəki qiymətinə bölünmüşdür. Bu, relaksasiya müddətinin elektrik sahəsinin qiymətindən asılı olaraq dəyişməsinə əyani şəkildə görünməsinə şərait yaradır. Şəkildən görünür ki, elektrik sahəsinin intensivliyinin artması ilə $\ln \Delta J = f(t)$ asılılıqlarında düzxətli hissələrin meylləri kəskin azalır, bu isə öz növbəsində «yavaş» rekombinasiya kanalına məxsus relaksasiya müddətinin sürətlə böyüməsi deməkdir. Relaksasiya müddətinin artması onu göstərir ki, elektrik sahəsinin təsiri ilə elektronlar valent zolağından ΔE_i yapışma səviyyələrinə keçərək zolaqda dəşiklərin konsentrasiyalarını artırır. Keçirici zolaqda bu dəşikləri kompensə edən kifayət qədər elektronlar olmadığından onların relaksasiya müddətləri böyüyür.

«Yavaş» rekombinasiya kanalına malik olan hissədə relaksasiya müddətinin sərbəst dəşiklərin konsentrasiyasından asılılığını görməkdən ötəri $\ln_0 S_7$ -də yapışma mərkəzlərində bağlı dəşiklərin zamana görə dəyişmə kinetik tənliyini yazmaq [3]:

$$\frac{dp_t}{dt} = p_d(N_t - p_t)S_p \cdot v - p_t \cdot P_v \cdot e^{-\frac{\Delta E_i}{kT \cdot Sv}} \quad (1)$$



Şəkil 2. E-nin müxtəlif qiymətlərində fotocərəyanın natural loqarifminin zamandan asılılıq qrafikləri (1- E=20V/sm; 2 - 40; 3 - 80; 4 - 120; 5 - 160 V/sm).

Burada N_t - yapışma mərkəzlərinin konsentrasiyası, P_v - valent zolağının effektiv hal sıxlığı, ΔE_i - yapışma mərkəzlərinin ionlaşma enerjisi, S_p - yapışma mərkəzlərinin dəşikləri tutma en kəsiklərinin sahəsi və p_d - sərbəst dəşiklərin konsentrasiyasıdır. Stasionar halda dəşiklərin konsentrasiyasının dəyişməzliyini və tarazsız dəşiklərin rekombinasiya

əmsalının $(S \cdot v)$ yapışma mərkəzlərinin rekombinasiya əmsalından $(S_p \cdot v)$ çox-çox böyüklüyünü $(S \cdot v \gg S_p \cdot v)$ [1] nəzərə alsaq, (1) kinetik tənliyinin həllindən aşağıdakı kimi ifadə alınır [4]:

$$S_p \cdot v = \frac{1}{p_d} \left(\frac{1}{\tau_0} - \frac{1}{\tau_g} \right) \quad (2)$$

Burada τ_0 -yapışma mərkəzləri tərəfindən sərbəst dəşikləri zəbt etmə

$$\tau_0 = 1/S_p v (N_t - p_t) \quad (3)$$

τ_g - isə zəbt olunmuş dəşiklərin yenidən azad olunma vaxtlarıdır.

$$\tau_g = \frac{1}{P_v \cdot S_p \cdot v} \exp\left(\frac{\Delta E_t}{kT}\right) \quad (4)$$

Bu ifadələri (2)-də nəzərə alsaq,

$$\tau_g - \tau_0 = \frac{p_d \cdot \exp\left(\frac{\Delta E_t}{kT}\right)}{S_p \cdot v \cdot P_v (N_t - p_t)} \quad (5)$$

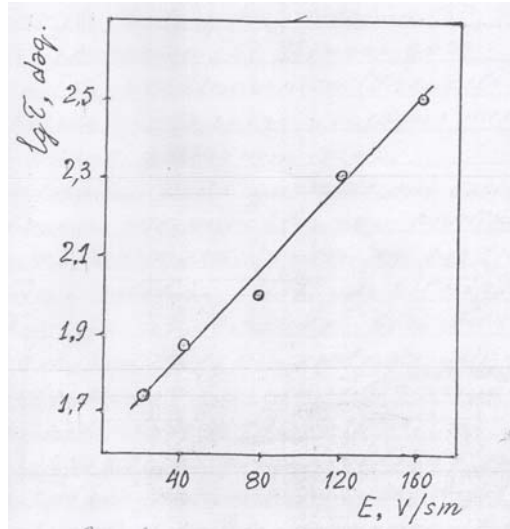
münasibətini alırıq. (5) ifadəsi göstərir ki, $\tau_g - \tau_0$ fərqi valent zolağında dəşiklərin konsentrasiyası ilə düz mütənasibdir. (4)-(3) ifadələrinə görə τ_g və τ_0 -ın $T=80K$ -də aldığı təqribi qiymətləri hesablamaq olar.

Bunun üçün qəbul edək ki, In_6S_7 üçün $m_p = m_0$; $P_v \approx 10^{19} sm^{-3}$; $S_p \approx 1,6 \cdot 10^{-20} sm^{-2}$ [1]; $\Delta E_t = 0,2 eV$ [2] və $v = 10^6 sm/san$. Onda $\tau_g = 3100 san. \approx 51,6$ dəq. alırıq. Tədqiq olunan In_6S_7 nümunələrində $N_t - P_t \approx 10^{12} sm^{-3}$ tərtibdə olduğunu [1] nəzərə alaraq (3) ifadəsindən $\tau_0 \approx 60 san. \approx 1$ dəq. alınır.

Hesablamalardan belə nəticəyə gəlmək olar ki, dəşiklərin yapışma mərkəzlərindən yenidən azad olunma müddəti onları zəbt etmə müddətindən təqribən 50 dəfə böyükdür. Bu münasibətə görə biz $\tau_g - \tau_0$ fərqi «yavaş» rekombinasiya kanalı üçün relaksasiya müddəti kimi qəbul edə bilərik.

Şəkil 3-də fotocərəyanın zamandan asılılıq $\ln J = f(t)$ düz xətlərindən təyin olunmuş relaksasiya müddətlərinin onluq loqarifminin $\lg \tau = f(E)$ xarici elektrik sahəsinin intensivliyindən asılılıq qrafiki qurulmuşdur. Şəkildən görünür ki, $\lg \tau = f(E)$ asılılığı düz xətt verir. Bu onu göstərir ki, $T=80K$ -də In_6S_7 monokristalında fotocərəyanın zamandan asılı olaraq qalxma əyrisindən təyin olunmuş relaksasiya müddəti xarici elektrik sahəsinin intensivliyindən eksponensial şəkildə asılıdır.

$$\tau \sim \exp(\alpha E) \quad (6)$$



Şəkil 3. Relaksasiya müddətinin onluq loqarifminin xarici elektrik sahəsinin intensivliyindən asılılığı.

Relaksasiya müddətinin bu cür dəyişməsinin səbəbi (5) ifadəsinə daxil olan p_d -nin xarici elektrik sahəsinin təsiri ilə eksponensial olaraq artması ola bilər. Xarici elektrik sahəsinin təsiri ilə sərbəst yükdaşıyıcıların konsentrasiyası artırılacaq mexanizmlər mövcuddur. Bunlardan elektrik sahəsinin təsiri ilə Pula görə ionlaşma [5], zərbə ilə ionlaşma [6], Zinerə görə, ionlaşma [7], elektrostatik (Frenkelə görə) ionlaşma [8] və sairə ionlaşma mexanizmlərini misal göstərmək olar.

In_6S_7 birləşməsi üçün yuxarıda adı çəkilən ionlaşma mexanizmlərinin analizi göstərir ki, bu mexanizmlərdən heç biri şəkil 3-dəki asılılığı izah edə bilmir. Bunun başlıca səbəblərindən biri odur ki, adı çəkilən mexanizmlərdə yükdaşıyıcıların ionlaşma prosesi yarımkeçiricilərdə yüksək gərginliklərdə ($10^3 \div 10^7 V/cm$) baş verir və kiçik gərginliklərdə yükdaşıyıcıların konsentrasiyası dəyişməz qalmalıdır. Elə mexanizmlər də var ki, ionlaşma ehtimalı xarici elektrik sahəsi intensivliyinin birinci dərəcəsi ilə eksponensial asılı deyildir [6,8].

Çox ehtimal ki, $\tau \sim \exp(\alpha E)$ və ya (5) münasibətindən $p_d \sim \exp(\alpha E)$ asılılığını aşağıdakı kimi izah etmək olar. Məlumdur ki, istənilən yarımkeçiricidə cərəyan kontaktlarından ona xarici elektrik sahəsində sərbəst yükdaşıyıcılar daxil (inyeksiya) oluna bilər. Əgər yarımkeçiricidə dərin yapışma mərkəzləri varsa, onda inyeksiya olunmuş sərbəst yükdaşıyıcıların bir hissəsi bu səviyyə tərəfindən tutulur, digər hissəsi isə zonalarda qalır. Bu prosesin nəticəsində Fermi səviyyəsinin vəziyyətinin dəyişməsi aşağıdakı kimi təyin olunur [9]:

$$\Delta E_f \approx \frac{Q/e}{N_t \cdot d} \quad (7)$$

Burada Q - cərəyan kontaktlarının vahid səthindən inyeksiya olunan elektrik yükünün miqdarı, N_t - const enerji zolağının $1eV$ - na düşən yapışma mərkəzlərinin konsentrasiyası, d - kontaktlar arasındakı məsafə və e - yükdaşıyıcıların yüküdür.

Qeyd olunduğu kimi, In_6S_7 birləşməsi p - tip keçiriciliyə malikdir. Onda inyeksiyanı da nəzərə almaqla valent zolağındakı sərbəst dəşiklərin konsentrasiyası üçün aşağıdakı məlum ifadəni yazmaqla bilirik:

$$P_d = P_v \left[\exp \left[\frac{-(E_f - E_v - \Delta E_f)}{kT} \right] \right] \quad (8)$$

və ya

$$P_d = P_v e^{-\frac{(E_f - E_v)}{kT}} \cdot e^{\frac{\Delta E_f}{kT}} \quad (9)$$

(9) ifadəsinin sağ tərəfinin birinci vuruğu verilmiş temperaturda sərbəst dəşiklərin qaranlıq konsentrasiyasıdır (P_{d_0}). Onda

$$P_d = P_{d_0} \cdot e^{\frac{\Delta E_f}{kT}} \quad (10)$$

münasibətini yazmaqla bilirik. (10) ifadəsində ΔE_f -in (7)-dəki münasibətini nəzərə alsaq,

$$P_d = P_{d_0} \cdot \exp \left[\frac{Q}{N_t} \cdot ed \cdot kT \right] = P_{d_0} \cdot \exp \left[\frac{CV}{N_t} \cdot ed \cdot kT \right] \quad (11)$$

Burada C - tədqiq olunan nümunənin elektrik tutumudur. V - isə nümunəyə tətbiq olunan gərginlikdir.

(11) münasibətindən görünür ki, valent zolağındakı dəşiklərin konsentrasiyası xarici sahənin intensivliyindən eksponensial şəkildə asılıdır və $\tau = \tau_g - \tau_0$ -in təcrübi eksponensial asılılığı kimidir. (11) ifadəsinə daxil olan düzbucaqlı nümunənin elektrik tutumunu $e = \varepsilon S / 4\pi d$ - kimi qəbul etmək olar (ε - nümunənin dielektrik sabiti, S - nümunənin en kəsiyinin sahəsi və d - elektrik kontaktları arasındakı məsafədir). Onda (11) ifadəsi aşağıdakı şəkli alar:

$$P_d = P_{d_0} \exp \left[\varepsilon S v / 4\pi d^2 e k T N_t \right] \quad (12)$$

P_d -nin (12)-dəki qiymətini (5) ifadəsində yerinə yazsaq, $\tau = \tau_g - \tau_0$ üçün

$$\tau = \tau_g - \tau_0 = \frac{e^{\frac{\Delta E}{kT}} \cdot P_{d_0} \exp \left[\varepsilon S v / 4\pi d^2 e k T N_t \right]}{S_p \cdot v \cdot P_v (N_t - p_t)} \quad (13)$$

In_6S_7 monokristallik birləşməsində əvvəlcədən söyləndiyi kimi [1], iki yapışma mərkəzləri mövcuddur. Onlar In_6S_7 -nin valent zolağından $E_{t_1} = E_v + 0,1$ və $E_{t_2} = E_v + 0,2 eV$ enerji məsafələrində yerləşirlər. Bu səviyyələrdən birincisi E_{t_1} fotokimyəvi reaksiya nəticəsində əmələ gəlir

[1]. Tədqiq olunan nümunələr əvvəlcədən uzunmüddətli kölgə (fon) işığı ilə işıqlanmadığından E_{t_1} səviyyəsi əmələ gəlmir. Yarımkeçirici kontakından olan inyeksiya olunan dəşiklərin paylanma prosesində yalnız Fermi səviyyəsindən yuxarıda duran $E_{t_2} = E_t = E_v + 0,2 eV$ [2] səviyyəsində yerləşən mərkəzlər iştirak edir. Prosesdə iki səviyyə iştirak edərsə, onda (13) ifadəsindəki N_t -ni $N_{t_1} \cdot N_{t_2} / (N_{t_1} + N_{t_2})$ -ilə əvəz etməli olardıq. In_6S_7 monokristallıq birləşməsində $\Delta E_{t_2} = \Delta E_t$ səviyyəsi onun valent zolağına injeksiya olunan dəşiklərin yenidən paylanmasında iştirak Fermi səviyyəsinin yerini dəyişdirir. Beləliklə, (13) ifadəsi In_6S_7 birləşməsi üçün tətbiq oluna bilər. Onu aşağıdakı kimi yazmaq olar:

$$\tau = \tau' \exp \left[\frac{\varepsilon S}{4\pi d^2 \cdot ekTN_t} \cdot V \right] \quad (14)$$

Burada - $\tau' = p_{a_0} e^{\Delta E_t / kT} / S_p \cdot v \cdot P_v (N_t - p_t)$ olub, xarici elektrik sahəsinin gərginliyi sıfıra bərabər olduqda ($V = 0$) fotokeçiriciliyin relaksasiya müddətidir. Göründüyü kimi, (14) ifadəsində $\lg \tau = f(v)$ asılılığı düz xətt verir və düz xəttin meyl bucağının tangensi:

$$\operatorname{tg} \alpha = 0,43 \frac{\varepsilon S}{4\pi d^2 ekTN_t} \quad (15)$$

ifadəsinə bərabərdir. (15) ifadəsi N_t -nin verilmiş qiymətində dielektrik sabiti ε -nu və ya əksinə, verilmiş ε -da N_t -ni təyin etməyə imkan verir.

Tədqiq olunan nümunələrin biri üçün $\operatorname{tg} \alpha = 5,3 \cdot 10^{-3}$; $S/d^2 = 0,3$; $kT = 0,68 \cdot 10^{-2} eV$; $N_t = 6 \cdot 10^{12} \frac{sm^{-3}}{eV}$ (bu qiymət [1] işində cədvəlin ikinci sütunundan götürülmüşdür) qiymətlərini nəzərə alsaq, (15) ifadəsindən $\varepsilon \approx 10$ alınır. Qeyd etmək ki, ε üçün alınan bu qiymət spektrin infraqırmızı oblastında işığı qəfəs əks etdirməsindən alınan qiymətlə ($\varepsilon \approx 9,1$) [10] pis uyğunlaşmır.

ƏDƏBİYYAT

1. İsmayılov İ.M., Abbasov B.T. In_6S_7 monokristallıq birləşməsində fotokeçiriciliyin düşmə relaksasiya əyrilərinin tədqiqi. Fizika, cild IV, № 2, s. 55-57, 1998.
2. İsmayılov İ.M., Cahangirova S.Ə. In_6S_7 monokristallının fotokeçiriciliyinin temperatur asılılığının tədqiqi. Bakı Universitetinin Xəbərləri, fizika-riyaz. elmləri ser. № 1, s. 144-150, 2006.
3. Gamal G.A. On the conduction mechanism and thermoelectric phenomena in In_6S_7 layer crystals. Crystal Research and Technology. 032/05/1997, page 723/732.
4. Вавилов В.С. Действие излучений на полупроводники. Физ.-мат. Лит., Москва, 1963. ст. 98.

5. Qassawi A.F. Light illumination effect on the electrical and photovoltaic properties of In_6S_7 crystals. J. Phys. Condens Matter 18, 2006, p.4609-4614.
6. Шалимова К.В. Физика полупроводников. Москва, 1985, Энергоатомиздат, 1985. ст. 194.
7. Madleung O., Hissler U.R. and Schulz M. Substances contained in this document $In(x)S(y)$: Properties of In_6S_7 – Crystal Research and Technology. V.32, Issue 5, pages 723-731. 2006
8. Abdallah H. Ben. Benseur R. Electronic structure of the hexaindium heptasulfide In_6S_7 . Physical, Physics of Condensed Matter; Vol. 382, Issue 1-2, 2006, p.181-188.
9. Абдуллаев Г.Б., Абдинов Д.Ш. Физика селена, Се. из. «Элм», Баку – 1975. ст. 286.
10. Виноградов Е.А., Гасанлы Н.М. и др. ФТТ, том 22, 1980, ст. 2847.

**ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА КРИВЫЕ
НАРАСТАНИЯ ФОТОПРОВОДИМОСТИ МОНОКРИСТАЛЛОВ In_6S_7**

И.М.ИСМАЙЛОВ, А.О.АЛИЕВ

РЕЗЮМЕ

В работе исследованы влияние внешнего электрического поля на кривые нарастания фотопроводимости монокристаллов соединения In_6S_7 P - типа при $T = 80K$. Показано, что кривые нарастания фотопроводимости формулируются из «быстрых» и «медленных» центров рекомбинации. Внешнее электрическое поле изменяет только время релаксации «медленных» центров рекомбинации и оно экспоненциально растет с ростом напряженности электрического поля. Предложен механизм увеличения времени релаксации связанным «медленным» каналом рекомбинации.

**EFFECT OF EXTERNAL ELECTRICAL FIELD ON THE CURVES
OF RISE OF PHOTOCONDUCTIVITY OF THE IN_6S_7 SINGLE CRYSTALS**

I.M.ISMAYILOV, A.O.ALIYEV

SUMMARY

In this paper the effect of external electrical field on the curves of rise of photoconductivity of the In_6S_7 single crystals have been investigated at $T=80K$. It is shown, that the rise of curves of photoconductivity is formed from “fast” and “slow” centers of recombination. The external electrical field changes only the time of relaxation of the “slow” centers of recombination and increases exponentially with intensity of electrical field. The mechanism explaining the increases of the relaxation time lauding to “slow” recombination camel has been proposed.