

**In₆S₇ MONOKRİSTALLİK BİRLƏŞMƏSİNİN
LÜKS-AMPER XARAKTERİSTİKASI**

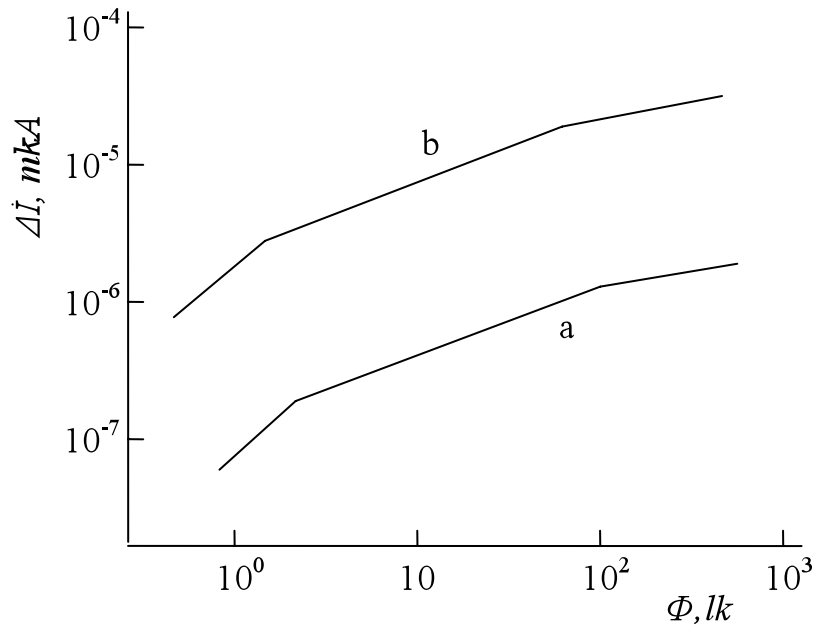
**İ.M.İSMAYİLOV, V.T.ABBASOV,
R.M.MƏMMƏDOV, P.Ə.BAXIŞOV**
Bakı Dövlət Universiteti

Məqalədə 80K-də In₆S₇ monokristallik nümunələrin lüks-amper xarakteristikaları tədqiq edilmişdir. Digər tərəfdən tədqiqat zamanı aydın olmuşdur ki, nümunələr 80K-də uzun müddət işıqlandırıldıqda onların fətohəssaslığı 50-60 dəfə artır. Bu onunla izah olunur ki, işıqlanma nəticəsində nümunələrdə fotokimyəvi reaksiya nəticəsində yeni kiçik en kəsiyinə malik tutma mərkəzləri yaranır.

In₆S₇ birləşməsinin iri həcmli monokristalları özünə məxsus xüsusi metodla laboratoriya şəraitində alınmışdır [1,2]. Alınmış monokristallik birləşmə p-tip keçiriciliyə malikdir və onlarda dəşiklərin konsentrasiyası otaq temperaturunda $10^{19} \div 10^{20} \text{sm}^{-3}$ yüüklüyü isə $(5 \div 10) \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}^2}{V \cdot \text{san}}$ qiymətlərini alır. In₆S₇ monokristallardan hazırlanmış nümunələrin otaq temperaturunda fətohəssaslığı o qədər də böyük deyildir. Nümunələr T = 300K-də intensivliyi 300 lk olan işıqla işıqlandırıldıqda onların qaranlıqdakı müqavimətinin işıqdakı müqavimətə nisbəti $R_q / R_t = 10 \div 20$, inteqral həssaslıqları isə $400 \div 500 \text{mkA/lm} \cdot V$ qiymətlərini alır.

Temperaturun azalması ilə fətohəssaslıq kəskin artmağa başlayır və T=80K-də $R_q / R_t = 10^4 \div 10^5$ -ə çatır. Bu parametrlərin qiymətləri yarımkeçirici birləşmələr içərisində ən böyük fətohəssaslığa malik CdS və CdSe birləşmələrindəki fətohəssaslığa yaxındır.

In₆S₇ monokristallik nümunələrin 80K-də lüks-amper xarakteristikaları (LAX) ölçülmüşdür. Nümunələrin LAX-nı çıxarmaq üçün közərmə lampasından, dəşiklərinin ölçüləri müxtəlif olan metallik torlardan, işıq süzgəclərindən (svetofiltrlərdən), fotocərəyanı ölçmək üçün həssaslığı 10^{-8}A olan M1200 markalı ampermetrdən və işığın intensivliyini qiymətləndirmək üçün isə həssaslığı 1 lüks olan lüksmetrdən (lx) istifadə olunur.



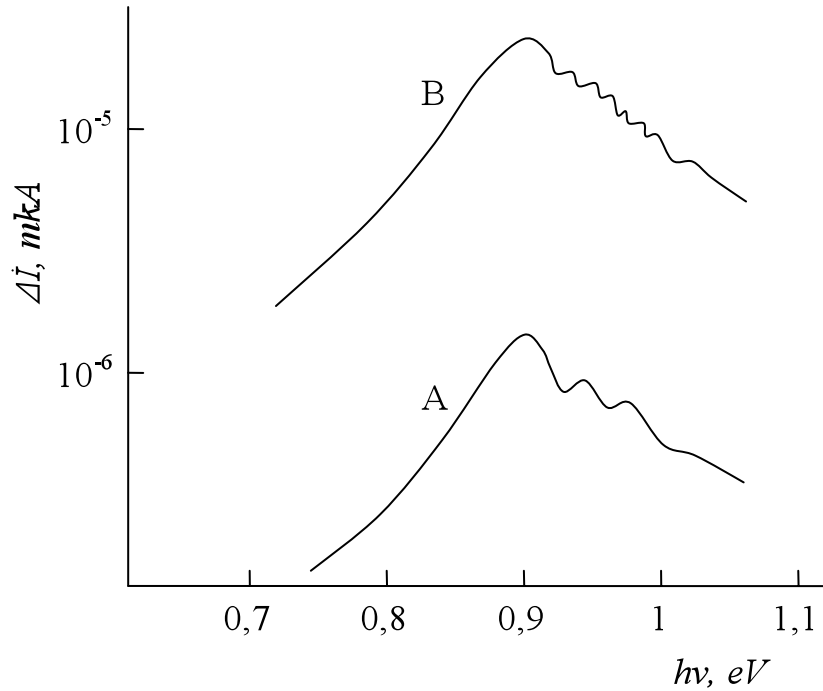
Şəkil 1. In_6S_7 monokristallik birləşməsinin lüks-ampere xarakteristikası. a – nümunə qabaqcadan işıqlanmamışdır, b – nümunə $T=80\text{K}$ -də qabaqcadan 50 dəqiqə müddətində işıqlanmışdır.

Şəkil 1-də In_6S_7 monokristallik nümunələrdən biri üçün LAX-ları verilmişdir. Şəkilə göstərilən a) – əyrisi nümunə qaranlıqda soyudulduğu hal üçün, b) – əyrisi isə nümunə $T=80\text{K}$ -də uzun müddət (50 dəqiqədən çox) işıqlandırıldığı hal üçündür. Şəkildən görüldüyü kimi, ikiqat loqarifmik miqyasda qurulmuş fotocərəyanın düşən işıq intensivliyindən asılılıqları hər iki rejim üçün eyni qanunauyğunluqlara malikdir. Yeganə fərq ondan ibarətdir ki, işıq intensivliyinin eyni qiymətində qaranlıqda uzun müddət ərzində işıqlanan nümunənin fotocərəyanı əvvəlcədən işıqlanmayan hala nisbətən 40-50 dəfə böyükdür. Bu fərq özünü spektral paylanma əyrilərində də göstərir (şəkil 2).

Şəkil 1-dən görünür ki, fotocərəyanın düşən işıq intensivliyindən asılılıqları hər iki hal üçün üç oblastdan ibarətdir:

- 1) $\Delta J_{\Phi} \sim \Phi^{\alpha=1}$ (zəif işıqlanma halı),
- 2) $\Delta J_{\Phi} \sim \Phi^{\alpha=0,5}$ (orta işıqlanma halı),
- 3) $\Delta J_{\Phi} \sim \Phi^{\alpha<0,5}$ (güclü işıqlanma halı).

Burada ΔJ_{Φ} – fotocərəyanın, Φ – düşən işıq intensivliyidir.



Şəkil 2. $T=80\text{K}$ -də a və b rejimlərində In_6S_7 birləşməsinin spektral paylanma ayrılırları.

In_6S_7 monokristallik birləşməsində fotokeçiriciliyin temperaturdan asılılığı, fotocərəyanın relaksasiya ayrılarının tədqiqi [2] və termostimullaşmış cərəyanın analizi [3] göstərdi ki, bu birləşmədə yapışma (t) və rekombinasiya (s) mərkəzləri mövcuddur. Yapışma mərkəzləri In_6S_7 -nin qadağan olunmuş zolağı daxilində $\Delta E_t = E_v + 0,2\text{eV}$ enerji məsafəsində yerləşir [3]. S-mərkəzlərinin qadağan olunmuş zolağın daxilində yeri dəqiq məlum deyildir, lakin fotokeçiriciliyin relaksasiya ayrılarında dəşiklərin böyük yaşama müddətində ($\tau_t > 60\text{san}$) uyğun gələn qolla yanaşı kiçik yaşama müddətinə ($\tau_s < 10^{-3}\text{san}$) uyğun gələn qol da mövcuddur. Bu axırıncısı «sürətli» rekombinasiya mərkəzlərinin In_6S_7 -də mövcudluğundan xəbər verir. Bu mərkəzlərin qadağan olunmuş zolağın daxilində vəziyyətinə gəldikdə onu deyə bilərik ki, bizim tərəfimizdən In_6S_7 monokristallik nümunələrdə fotokeçiriciliyin spektral paylanma ayrılırları istər məxsusi və istərsə də aşqarlı keçid oblastlarında tədqiq edilmişdir. Aşqarlı keçid oblastında spektral paylanma ayrılırları $T=80\text{K}$ -də düşən fotonun enerjisinin $h\nu=0,4\text{eV}$ qiymətinə qədər uzanır. Bu temperaturda Fermi səviyyəsi təqribən $E_f = E_v + 0,1\text{eV}$ enerji məsafəsində olduğundan qəbul etmək olar ki, aşqarlı fotokeçiriciliyin uzun dalğalı sərhədinin $h\nu=0,4\text{eV}$ -a qədər uzanması elektronların valent zolağından S-rekombinasiya səviyyəsinə keçidin nəticəsidir. Həmin səviyyənin In_6S_7 -nin

qadağan olunmuş zolağının ($E_g=0,86\text{eV}$) təqribən ortasında yerləşdiyini güman etmək olar ($E_s= E_v+0,4\text{eV}$).

Beləliklə, In_6S_7 monokristallik birləşməsində s-, t-mərkəzlərinin mövcudluğunu və sərbəst yükdaşıyıcıların həm də tutma mərkəzləri tərəfindən rekombinasiya etdiyini qəbul edərək, nümunələrin LAX-da müşahidə olunan qanunauyğunluqları izah edən ifadə almaq olar. Bunun üçün nümunələrin məxsusi işıqlanma oblastında elektron keçidlərinin kinetik tənliklərini yazaq:

$$\frac{dn}{dt} = \Phi - (R_{ns}P_s + R_{nt}P_t) n, \quad (1)$$

$$\frac{dP_t}{dt} = R_{pt}N_t p - R_{nt}P_t n, \quad (2)$$

$$\frac{dP_s}{dt} = R_{ps}N_s p - R_{ns}P_s n, \quad (3)$$

$$\frac{dP}{dt} = \Phi - (R_p N_t + R_{ps} N_s) p, \quad (4)$$

Burada n, p – uyğun olaraq keçirici və valent zolaqlarında sərbəst elektron və deşiklərin, N_s, N_t, P_s, P_t – rekombinasiya və yapışma səviyyələrində elektron və deşiklərlə tutulmuş mərkəzlərin konsentrasiyalarıdır, $R_{ns}, R_{nt}, R_{ps}, R_{pt}$ – isə uyğun keçidlərin rekombinasiya əmsalındır, Φ – zona-zona keçidi yaradan işığın intensivliyidir.

Yuxarıda göstərilən məqsəd üçün (1) – (4) tənliklərinin həllərinə elektronneytrallıq şərtini də əlavə etməliyik, çünki tənliklərə daxil olan n, p və P_{st} biri o birinə bağlıdır.

In_6S_7 monokristallik birləşməsində deşiklərin yaşama müddəti sərbəst elektronlarınkına nisbətən böyük ($\tau_p \gg \tau_n$) olduğundan bu birləşməni güclü monopolyar fotokecirici kimi qəbul etmək olar (p-tip). Onda bizim birləşmə məxsusi işıqla işıqlandıqdan sonra aşağıdakı elektronneytrallıq şərtinə malik olur.

$$n_t + n_s = p, \quad (5)$$

(5) ifadəsi nümunələrin işıqlanması zamanı N_t^0, N_s^0 və p_0 qaranlıq konsentrasiyalara əlavələrdir. Nümunələr fotonun enerjisi qadağan olunmuş zolağın enindən böyük olan işıqla işıqlandırıldıqda keçirici zolaqda olan fotoelektronlar kiçik τ_n vaxtında t, s - səviyyələri tərəfindən tutulurlar. Tutulmaların nisbi sellərini aşağıdakı [4] kimi yazı bilərik:

$$g_t = \frac{R_{nt}P_t}{R_{nt}P_t + R_{ns}P_s};$$

$$g_s = \frac{R_{ns}P_s}{R_{nt}P_t + R_{ns}P_s}, \quad g_t + g_s = 1 \quad (6)$$

(6) ifadəsi fotoelektronların rekombinasiya kanallar vasitəsilə necə paylandığını göstərir. Digər tərəfdən t- və s- səviyyələrinə valent zolağından gələn dəşiklərin seli mövcuddur. Stasionar halda t- və s- səviyyələrinə keçirici və valent zolaqlarından gələn sellər bir-birini tarazlaşdırır. Belə olan halda LAX aşağıdakı iki formula şəklində yazıla bilər:

$$\left. \begin{aligned} g_t \Phi &= R_{pt} \cdot p \cdot N_t \\ g_{ts} \Phi &= R_{ps} \cdot p \cdot N_s \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Buradan

$$\Phi = p \cdot (R_{pt} N_z + R_{ps} N_s), \quad (8)$$

Məsələnin həllinin sadələşməsi üçün qəbul edək ki, $n_s \ll n_t$. Bu münasibətin doğruluğuna təminat verən səbəblərdən biri də Fermi səviyyəsinin rekombinasiya mərkəzlərindən çox uzaqda (aşağıda) yerləşməsidir. Onda alçaq temperaturda oblastında (5) neytrallıq şərtini $n_s \ll n_t \approx p$ kimi qəbul etməklə (7) ifadəsindəki N_t vuruğunu $N_t = N_t^0 + n_s \approx N_t^0 + p$ şəklində yazmaq olar (burada N_t^0 – qaranlıqda elektronlarla zəbt olunmuş yapışma mərkəzlərinin konsentrasiyasıdır). Belə olduqda In_6S_7 -də LAX aşağıdakı şəkildə olur:

$$R_{pt} \cdot p(N_t^0 + p) = g_t(p)\Phi, \quad (9)$$

Zəif işıqlanma halında $p \ll p_t^0 N_t^0$ olduğundan $g_t(p) = g_t^0$ -yə, yəni zəif işıqlanma halındakı selin qaranlıqdakı selə bərabər olduğunu qəbul edə bilərik. Bu halda (9) ifadəsi aşağıdakı şəkildə düşər:

$$p = \frac{g_t^0}{R_{pt} N_t^0} \cdot \Phi, \quad (10)$$

(10) ifadəsindən görünür ki, fotocərəyan $\Delta J \sim p \sim \Phi$ işıqlanmanın birinci dərəcəsi ilə mütənəsbdir (LAX-nın başlanğıc hissəsi).

LAX-nın ikinci hissəsi, yəni $\Delta J \sim \Phi^{1/2}$ asılılığı işığın intensivliyinin orta qiymətlərində müşahidə olunur. İşığın intensivliyinin bu qiymətlərində $N_t^0 \leq p \leq P_t^0$, $g_t(p) = g_t^0$ münasibətləri ödənilir. Bu halda (9) ifadəsindən aşağıdakı münasibət alınır:

$$P = \left(\frac{g_t^0}{C_m} \right)^{1/2} \cdot \Phi^{1/2} \quad (11)$$

(10) və (11) ifadələrindən görünür ki, $\Delta J \sim \Phi$ asılılığından $\Delta J \sim \Phi^{1/2}$ asılılığına keçid nöqtəsində $p = N_t^0$ olur. In_6S_7 -nin LAX-dan təyin olunan bu konsentrasiya [a] – asılılığı üçün $N_t^0 = 10^{18} \text{ m}^{-3}$ bərabərdir.

Güclü işıqlanma halında, yəni LAX-nın üçüncü hissəsində $p \gg N_t^0$ və $g_t(p)$ monoton azalaraq sıfıra, fotocərəyan isə doyma halında yaxınlaşır.

Qeyd etdik ki, nümunələr 80K-də uzun müddət işıqlandırıldıqda onların fotohəssaslığı 40-50 dəfə artır. Fotohəssaslığın artmasının üç səbəbi ola bilər. Onlardan birincisi odur ki, nümunə uzun müddət işıqlandıqdan sonra g_t rekombinasiya selinin ümumi rekombinasiyada payı artır. Bu isə o zaman baş verər ki, a) fotokimyəvi reaksiya nəticəsində t-yapışma mərkəzlərinin konsentrasiyasını artıran yeni mərkəzlər yaranır; b) fotokimyəvi reaksiya nəticəsində «sürətli» s-rekombinasiya mərkəzləri dağılmış olsun.

İkinci səbəb isə fotokimyəvi reaksiya nəticəsində yapışma (t) mərkəzlərini kompensə edən akseptor mərkəzlərinin yaranması da ola bilər.

Bizim tərəfinizdən aparılan təcrübələr In_6S_7 monokristallik birləşməsində fotohəssaslığı artırma biləcək bu iki mexanizmin mövcudluğunu inkar edir.

Fotohəssaslığı artırma biləcək üçüncü mexanizm onu nəzərdə tutur ki, fotokimyəvi reaksiya nəticəsində yeni yapışma mərkəzləri yaranır və bu mərkəzlərin dəyişləri tutma en kəsiyin sahəsi ($S_{tp}^{(2)}$) köhnə yapışma mərkəzlərinin dəyişləri tutma en kəsiklərinin sahəsindən ($S_{tp}^{(1)}$) kiçikdir [2].

Əvvəlcə onu qeyd edək ki, In_6S_7 monokristallik nümunələri uzun müddət (80K-də) işıqlandırdıqda termostimullaşmış cərəyanın (TSC) temperatur asılılığında ikinci maksimum əmələ gəlir [2]. TSC-əyrisində bu yeni maksimum 93K-də, əvvəlki maksimum isə 170K temperaturda müşahidə olunur. Hər iki yapışma mərkəzlərinin ionlaşma enerjiləri $E_{t2} = E_v + 0,1\text{eV}$ və $E_{t1} = E_v + 0,2\text{eV}$ kimi təyin edilmişdir [2-3]. In_6S_7 monokristalında bu iki yapışma mərkəzlərinin varlığını qəbul edərək, elektron keçidləri kinetik tənliklərinin analizindən fotokimyəvi reaksiya nəticəsində ikinci yapışma səviyyəsi (E_{t2}) yarandıqdan sonrakı fotocərəyan üçün aşağıdakı ifadə alınır:

$$\Delta J_2 = \Delta J_1 \frac{S_{tp}^{(1)}}{S_{tp}^{(2)}}$$

Təcrübələr göstərir ki, In_6S_7 monokristalında $S_{tp}^{(1)} \approx 10^{-24} m^2$ və $S_{tp}^{(2)} \approx 10^{-26} m^2$ -dir [2]. Bu qiymətlərə görə fotokimyəvi reaksiyadan sonra fotocərəyanda ~ 100 dəfə artım olmalıdır.

ƏDƏBİYYAT

1. İ.M.İsmayılov, E.M.Qurbanov, V.T.Abbasov. In_6S_7 birləşməsi monokristalının alınması. BDU-nun xəbərləri, fiz.-riyaz. ser., №4, s. 58-62, 2000.
2. İ.M.İsmayılov, V.T.Abbasov. Fizika, cild 4, №2, s. 55-57, 1998.
3. В.И.Тадиров, И.М.Исмаилов, М.С.Мурадова Изв. АН Азерб. ССР, сер. физ.-мат. наук, №1, с. 65-68, 1979.
4. В.Е.Лашкарев, А.В.Любченко, М.К.Шейнкман Неравновесные процессы в фотопроводниках. Киев «Наукова Думка», 1981.

**ЛЮКС-АМПЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА
МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СОЕДИНЕНИЯ In_6S_7**

И.М.ИСМАЙЛОВ, В.Т.АББАСОВ, Р.М.МАМЕДОВ, П.А.БАХЬШОВ

АННОТАЦИЯ

В статье исследованы люкс-амперные характеристики монокристаллических образцов In_6S_7 при температуре 80К.

Во время эксперимента обнаружено, что при длительном освещении кристаллов (при температуре 80К) их фоточувствительность увеличивается в 50-60 раз. Это объясняется тем, что при освещении в кристаллах, в результате фотохимической реакции, появляются центры – ловушки с малым поперечным сечением.

**CURRENT – LIGHT CHARACTERISTICS OF THE SINGLE
CRYSTALS OF In_6S_7**

I.M.ISMAYILOV, V.T.ABBASOV, R.M.MAMMADOV, P.A.BAKHISHOV

ABSTRACT

In this paper the current-light characteristics of single crystals of In_6S_7 was investigated at temperature of 80K.

It has been observed in experiments, that at illumination of crystals in a long time (at temperature of 80K) the photosensitivity of samples is increased about 50-60 order.

It explains that at illumination as a result of photochemical reaction there appears the low centers-trups.