

UOT 621.315.592

***Er* və *Dy* ELEMENTLƏRİ İLƏ AŞQARLANMIŞ *p-SnSe*
BİRLƏŞMƏSİNDƏ BƏZİ TERMOMAQNİT EFFEKTlər VƏ
ELEKTRON-FONON QARŞILIQLI TƏSİRİNİN TƏBİƏTİ**

**C.İ.HÜSEYNOV*, M.İ.MURQUZOV*, Ş.S. İSMAYILOV*,
R.F.MƏMMƏDOVA*, E.M.QOCAYEV****

**Azərbaycan Dövlət Pedaqoji Universiteti,*

***Azərbaycan Texniki Universiteti*

cih_58@mail.ru

Erbium (Er) və Disproziyum (Dy) elementləri ilə aşqarlanmış p-SnSe birləşməsində termo-e.h.q.-si əmsalı, eninə və uzununa Nernst-Ettinhausen (N-E) effektləri 77-700 K temperatur intervalında tədqiq olunmuşdur. 77-200 K temperatur intervalında diferensial termo-e.h.q.-sinin xəttlikdən kənara çıxması və eninə N-E effekt əmsalının işarəsinin dəyişməsi müşahidə olunur. Qeyri-tarazlıq halında elektron-fonon qarşılıqlı təsirində uzundalğalı akustik fononlarla yanaşı anharmonik toplananın mövcudluğundan bir-biri ilə zəif qarşılıqlı təsirdə olan eninə və uzununa polarizəlanmış "optik" fononlar da iştirak etdiyi müəyyən olunmuşdur. Hər iki sistemdə diferensial termo-e.h.q.-sinin xəttlikdən güclü kənara çıxması əsasən yükdaşıyıcıların fonon sövqü α_ϕ ilə bağlı olduğu müəyyənləşdirilmiş, elektron sövqünün statistik qüvvəsi $A_\phi(\epsilon)$ qiymətləndirilmişdir.

Açar sözlər: termomaqnit effektlər, elektron-fonon qarşılıqlı təsiri, sövq qüvvəsi

$A^{IV}B^{IV}$ tipli kristalların kvazilokal səviyyələr yaradan aşqarlarla legirəlməsi onların praktiki tətbiq imkanlarını genişləndirdiyindən, uyğun tədqiqatlar həm fundamental fizika, həm də tətbiq baxımından xüsusi əhəmiyyət kəsb edir. Bu baxımdan Nadir Torpaq Metallarından olan Er və Dy elementləri ilə aşqarlanmış *p-SnSe* birləşməsində termo-e.h.q.-si əmsalı, eninə və uzununa Nernst-Ettinhausen effektlərinin tədqiqi və elektron fonon qarşılıqlı təsirinin araşdırılması xüsusi maraq doğurur.

SnSe tipli materiallarda və onların analoqları olan termoelektrik materialların fiziki xassələrinin öyrənilməsinə çoxlu işlər həsr olunmuşdur [1-3]. Bu qrup kristallar həm termoelektrik, həm də optik materiallar kimi tətbiq olunurlar. Aralıq mövqedə olan, 0,9 eV qadağan olunmuş zonaya malik olan SnSe

hər iki xassəyə meyillidir [4,5]. Mürəkkəb ion-kovalent kimyəvi rabitəyə malik olan **SnSe** deformasiya olunmuş NaCl tipli quruluşda kristallaşır, yüksək dərəcədə deffektlərə və hər iki alt qəfəsin vakansiyalarına malikdir [3,4]. Bu defektlərin, xüsusilə qalay vakansiyalarının ($\sim 10^{17} \text{ sm}^{-3}$) yüksək konsentrasiyası **SnSe**-də müsbət tip keçiriciliyin formalaşmasına gətirir. Digər tərəfdən NTM özünəməxsus spesifik xassələri ilə fərqlənirlər [6]. Onların elektron quruluşunda daxili $4f$ səviyyələrində mütəhərrik elektronların olması hesabına asanlıqla $f-d-s$ keçidi baş verir ki, bu da onlarda dəyişkən valentliyin yaranmasına gətirir. NTM üçvalentli olmasına baxmayaraq elektron səviyyələri arasındakı bu keçidlər hesabına aralıq valentlik yaranır ki, bu da onların iştirakı ilə alınmış materiallarda kinetik xassələrə ciddi təsir göstərir. Qalayın qismən Nadir torpaq metalları (NTM) ilə əvəz olunması **SnSe**-də defektəmələgəlmənin təbiəti və defektlərin qarşılıqlı təsirinin mürəkkəb xarakteri ilə şərtlənən bir sıra fiziki xüsusiyyətlərin yaranmasına səbəb olur.

Dy_xSn_{1-x}Se və **Er_xSn_{1-x}Se** sistem ərintilərinin elektrofiziki xassələri əvvəlki illərdə tərəfimizdən tədqiq olunmuşdur [7-10]. Alınmış nümunələrin qalvanomaqnit xassələri geniş temperatur intervalında tədqiq olunmuş, maqnit müqavimətinin dəyişməsinə baxılmışdır. Nümunələrin tərkibində **DySe** və **ErSe**-nin faizlə miqdarı artdıqca xüsusi müqavimət və Holl əmsalı artır, əsas yükdaşıyıcıların konsentrasiyası və yürüklüyü isə azalır, Holl əmsalının və termo e.h.q.-nin işarələri üst-üstə düşür. **(SnSe)_{1-x}(LnSe)_x** sistem ərintilərinin quruluş xüsusiyyətləri göstərir ki, tədqiq olunan tərkiblər qalay atomlarının qismən **Ln-Dy**, **Er** atomları ilə əvəz olunması ilə kristallaşır. Bu əvəz olunma prosesinin kristal qəfəsdə heterovalent izomorfizm çevrilməsi ilə baş verdiyi ehtimal olunur. **(SnSe)_{1-x}(LnSe)_x** sistem ərintilərində əvəz edən NTM-nin müəyyən miqdarında (uyğun olaraq $x=0,0025$ və $x=0,004$ tərkibli ərintilərdə) keçiricilik tipini dəyişərək n -tip keçiriciliyin yaranması **SnSe** nümunələrində qismən öz-özünə kompensasiyanın baş verdiyini göstərir. **Ln_xSn_{1-x}Se** ərintilərində erbiumun və disproziyumun miqdarı artdıqca sıxlığın zəif dəyişməsi müşahidə olunur. Bu bilavasitə **Ln_xSn_{1-x}Se** ərintilərinə daxil edilən **Dy** və **Er** atomlarının ilk növbədə kristalda düyünlərarası vakant yerlərini tutmasını, Frenkel defektəmələgəlməsini göstərir.

Erbiumun konsentrasiyasının artımı ilə termo-ehq-si (α) azalır və $x \geq 0,004$ % də işarəsini p -tipdən n -tipə dəyişərək maksimumdan keçərək **Er_xSn_{1-x}Se** bərk məhlullarında mütləq qiyməti stabilləşir. **Er_xSn_{1-x}Se** sistem ərintilərində ikitərəfli elektron mübadiləsi baş verir: bir tərəfdən erbium atomları iki $6s$ valent elektronlarını halkogenə verir, bir $5d$ valent elektronu delokallaşır və metallik rabitədə iştirak edir. Üçvalentli **Er** halkogenidlərində **(Er³⁺ Se²⁻)e⁻** tipli kompensə olunmamış valentlik quruluşu yaranır ki, bu da keçirici elektronların yüksək konsentrasiyasını yaratmaq imkanı verir [8]. **(SnSe)_{1-x}(LnSe)_x** sistem ərintilərində köçürmə hadisələri qismən tədqiq olunmasına baxmayaraq, bu ərintilərdə yük və istilik daşıyıcılarının səpilmə

mexanizmlərinin təbiəti tam aydınlaşdırılmamış qalır, kinetik parametrlərə təsir edən elektron-fonon və fonon-fonon qarşılıqlı təsiri haqqında əsaslı təsəvvür yoxdur.

Tetromaqnit effektlərin ikinci növ yükdaşıyıcıların yaranmasına və materialda defektlərin təbiətinə daha həssas olduğundan bu effektlərin tədqiqi maraqlıdır. Buna görə də $(SnSe)_{1-x}(ErSe)_x$ və $(LnSe)_x$ sistem ərintilərində tetromo-e.h.q.-si (α), eninə $- (E_y)$ və uzununa $(\frac{\Delta\alpha}{\alpha_0})$ Nernst-Ettingşqauzen effekt-

ləri 80÷700 K temperatur intervalında tədqiq olunmuşdur.

Təcrübi hissə

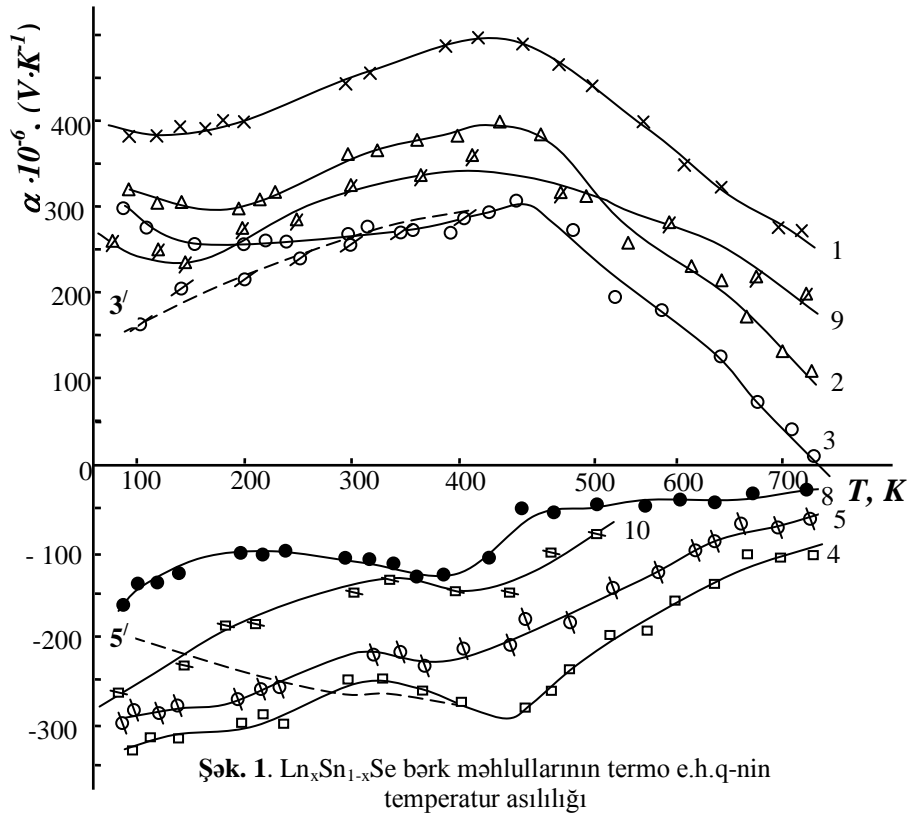
$(SnSe)_{1-x}(ErSe)_x$ və $(SnSe)_{1-y}(DySe)_y$ bərk məhlul ərintiləri ($x=0,0$; $2-x=0,0010$; $3-x=0,0025$; $4-x=0,0050$; $5-x=0,0100$; $6-x=0,0150$; $7-x=0,0250$; $8-x=0,0500$; $9-y=0,002$; $10-y=0,0025$; $11-y=0,0035$) komponentlərinin birbaşa əridilməsi yolu ilə sintez edilmişdir [7,9]. Alınmış nümunələr sintezdən sonra uzunmüddətli tablama qoyulmuşdur. Tablama əvvəlcə $760^\circ C$ -də 3 saat, sonra isə temperatur tədricən $480^\circ C$ -yə qədər azaldılaraq 48 saat saxlanılmaqla aparılmışdır.

Termo-e.h.q.-si və tetromaqnit əmsalları mütləq stasionar şəraitdə kompensasiya metodu ilə ölçülmüşdür [12]. 11 kEr maqnit sahəsi [001] istiqamətində, sabit cərəyan isə [100] istiqamətində yönəldilmişdir. Tetromo-e.h.q.-si, eninə və uzununa N-E effektlərinin ölçülməsindəki xətlər ~4,0% tərtibində olur.

Nəticələrin təhlili

Tədqiq olunan nümunələrinin termo-e.h.q.-sinin temperatur asılılıqları şəkil 1-də verilmişdir. № 1-3, 9 nömrəli nümunələr ($SnSe$ başlanğıc maddə də olmaqla) $T=300K$ temperaturda $1,5,7 \cdot 10^{18} \text{ sm}^{-3}$, $3,3,91 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$, $9,1,2 \cdot 10^{18} \text{ sm}^{-3}$ konsentrasiyalı dəşik, № 4-8, 10 və 11 nümunələri isə elektron keçiriciliyinə malikdirlər, nümunələrdə NTM-ın miqdarı artdıqca keçirici elektronların konsentrasiyası $1,4 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ -dən $4,3 \cdot 10^{17} \text{ sm}^{-3}$ qiymətinə kimi artır. Şəkildən görüldüyü kimi $T > 440 K$ oblastında temperaturun artımı ilə $\alpha(T)$ asılılığı müntəzəm olaraq azalır, dəşik keçiricilikli nümunələrdə azalma elektron keçiricilikdəki nümunələrdəkinə nisbətən daha kəskin olur.

$T = (77 \div 440) K$ temperatur intervalında $\alpha(T)$ asılılığı qeyri-adi dəyişmə xarakterinə malikdir, temperaturun azalması ilə ($T \rightarrow 0$) termo-e.h.q.-nin qiyməti qanunauyğun olaraq minimuma qədər azalmalıdır. Şəkildən görüldüyü kimi, göstərilən temperatur intervalında bütün nümunələrdə α kifayət qədər böyük qiymət alır və temperatur asılılığı mürəkkəbdir. Adətən qarışıq keçiriciliyə malik nümunələrdə termo-e.h.q.-si az olmalıdır [11], lakin tədqiq olunan nümunələrdə gözlənilməyincə böyük alınır.



Tədqiq olunan nümunələrdə $\alpha(T)$ asılılığı parabolik izotrop zonalar üçün ($m^* = \text{const}$ olduqda)

$$\alpha = \pm \frac{k_0}{e} \left[\frac{(r+2)F_{r+1}(\bar{\mu})}{(r+1)F_r(\bar{\mu})} - \bar{\mu} \right] \quad (1)$$

düsturundan № 3,5 nümunələri üçün hesablanmış nəzəri asılılıqdan xeyli fərqlənir (3',5'-alınmış nəzəri asılılıqlardır). Fonon səvqünün baş vermədiyi $T > 300 \text{ K}$ temperatur intervalında Fermi səviyyəsi Holl əmsalından, r -səpilmə parametri isə uzununa N-E və yürüklükdən təyin edilir. $T = 77 \div 300 \text{ K}$ temperatur intervalında yükdaşıyıcıların əsasən ionlaşmış aşqarlardan səpilməsi baş verir [8], və bu intervalda $r = 2,0$ qəbul olunmuşdur ($L \propto \varepsilon^r$ ifadəsindən).

Qeyri-adi $\alpha(T)$ asılılığını araşdırmaq üçün $\frac{\alpha(T)}{T}$ nisbətində baxılmışdır.

Tədqiq olunan nümunələrdə $\frac{\alpha}{T}$ nisbətinin temperatur asılılığı şəkil 2-də verilmişdir. Şəkildən görüldüyü kimi $\frac{\alpha(T)}{T}$ asılılığı 400 K-dən aşağı temperatur

oblastında xətti asılılıqdan ciddi kənarçıxma müşahidə olunur. 80÷440 K temperatur intervalında $\frac{\alpha(T)}{T}$ asılılığının xəttlikdən kənara çıxmasını təbiəti tam aydın olmayan, əlavə səpilmə mexanizmlərinin mövcudluğu ilə əlaqələndirmək olar.

Dy və *Er* elementləri oxşar elektron konfigurasiyalarına malik (analoq) olduğundan $(SnSe)_{1-x}(ErSe)_x$ və $(SnSe)_{1-y}(DySe)_y$ bərk məhlul ərintilərində tərkibdən asılı olaraq parametrlərin keyfiyyətə dəyişməsi oxşardır. Ona görə də alınan nəticələrin təhlili əsasən $(SnSe)_{1-x}(ErSe)_x$ ərintiləri üzərində qurulmuşdur. Termo-e.h.q.-nin anomal böyük qiyməti və xarakteristik Debay temperaturundan ($T_{\theta} \approx 220$ K) aşağı intervalında $\frac{\alpha(T)}{T}$ asılılığının xəttlikdən kə-

nara çıxması qismən elektronların fononlardan sövqü effekti ilə, yuxarı temperatur intervalında isə cırlaşmanın aradan qalxdığı sərbəst elektronlar modeli ilə izah oluna bilər [10]. Metallardan fərqli olaraq yarımkəçiricilərdə termo-e.h.q.-sinə əsasən yükdaşıyıcıların uzundalğalı fononlarla qarşılıqlı təsiri rol oynayır. Herrinqə görə tədqiq olunan nümunələrdə əlavə yaranan termo-e.h.q.-sini və yükdaşıyıcıların yalnız akustik qəfəs rəqslərindən səpildiyini nəzərə alsaq ümumi termo-e.h.q.-sini (α) aşağıdakı kimi yazmaq olar [14]:

$$\alpha = \alpha_{\phi} + \alpha_{\text{эл}} = \pm \frac{k_0}{|e|} (2 - \mu^*) \pm \frac{\nu_0 L_{\phi}}{TU_{\pm}} \quad (2)$$

burada $\alpha_{\text{эл}}$ – adi diffuzuya termo-e.h.q.-si; α_{ϕ} – fononların sövqü hesabına yaranan əlavə termo-e.h.q.-si; ν_0 – səsin sürəti, L_{ϕ} – yükdaşıyıcıların yalnız akustik qəfəs rəqslərindən səpildiyini nəzərə almaqla fononların uzunluğu; μ^* – gətirilmiş kimyəvi potensialdır. Deyilənlərdən aydın olur ki, “sövq” prosesində yalnız nisbətən böyük uçuş məsafəsi ilə ($L = \tau \nu_0$) xarakterizə olunan fonon spektri aktiv rol oynayır. Bu səbəbdən fononların relaksasiya müddəti τ_{ϕ} bir neçə tərtib orta relaksasiya müddətindən $\bar{\tau}$ böyük olur ($\bar{\tau}_{\phi} > \bar{\tau}$), uyğun olaraq α_{ϕ} gözlənilməyindən böyük alınır. Aşağı temperaturlarda $\tau_{\phi} \sim T^{-3}$ və yüksək temperaturlarda – $\tau_{\phi} \sim T^{-1}$ olduğunu nəzərə alsaq:

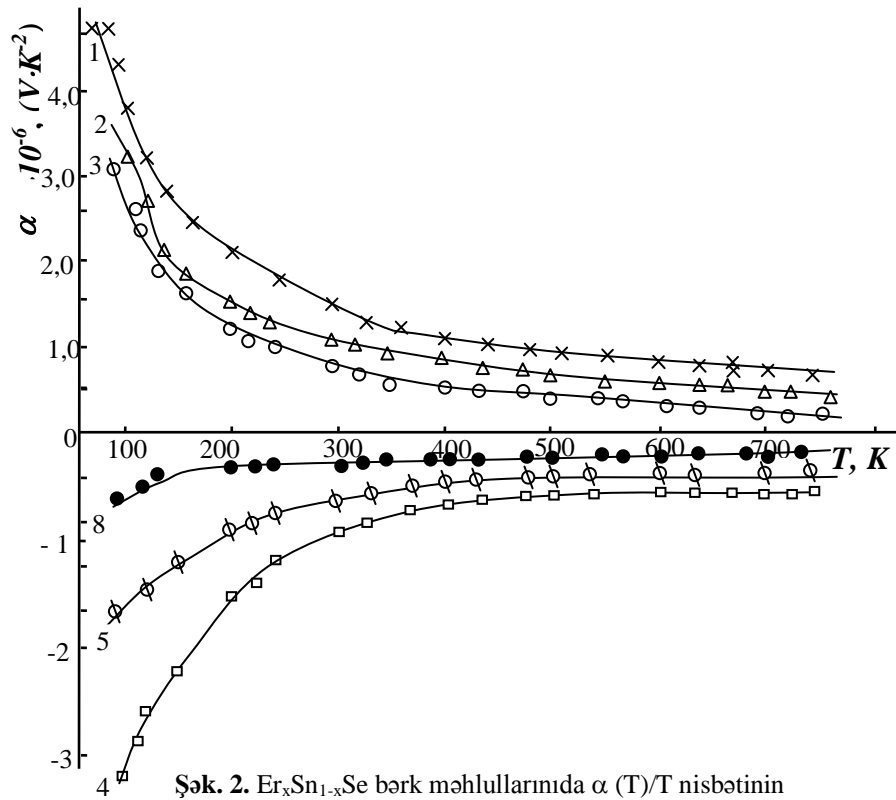
$$\alpha_{\phi} = \frac{k_0 m^* \nu_0^2 \tau_{\phi}}{|e| \zeta k_0 T \tau_{\text{el}}} \quad (3)$$

burada ν_0 – uzundalğalı fononların qrup sürətidir. Düsturdan göründüyü kimi $\alpha_{\phi}(T)$ bilavasitə $\tau_{\phi} / \tau_{\text{эл}}$ nisbəti ilə mütənasibdir. $\alpha_{\phi}(T)$ təyin etmək üçün $\tau_{\text{эл}} \sim T^{-3/2}$ ($U = e \frac{\tau_{\text{эл}}}{m^*}$) qəbul olunmuşdur, bu yükdaşıyıcıların akustik fononlardan səpilməsinə uyğundur. (3) düsturundakı digər parametrlər tempera-

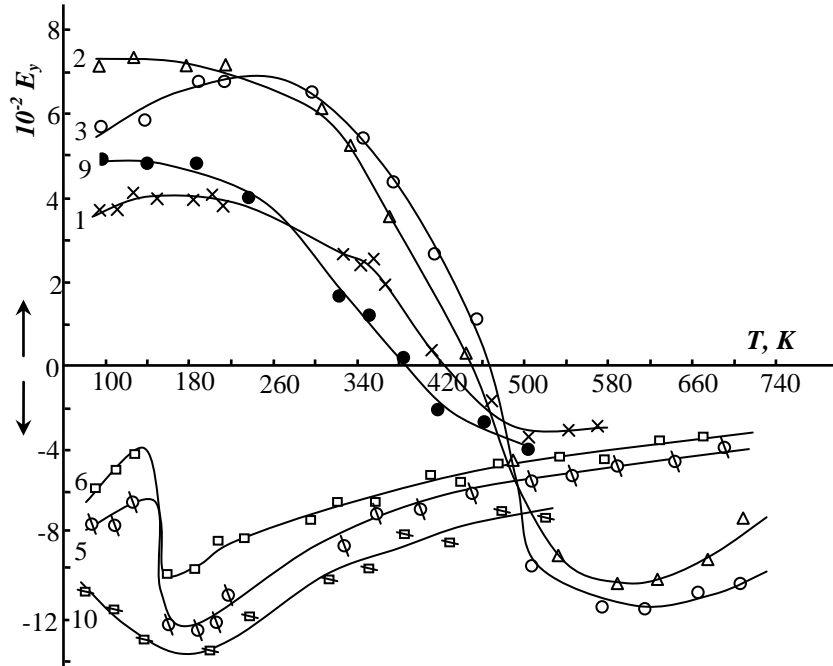
turdan zəif asılı olduqlarından onları nəzərə almamaq olar. Elektron-fonon qarşılıqlı təsiri haqqında inandırıcı məlumat almaq üçün eninə

$$E_y = Q_N^\perp H \frac{\partial T}{\partial x} \quad (4)$$

və uzununa $\frac{\Delta\alpha}{\alpha_0} = \frac{\alpha(H) - \alpha(0)}{\alpha(0)}$ N-E effektlərinə baxılmışdır. Alınan nəticələr şəkil 3 və 4-də təsvir olunmuşdur. E_y ölçülməklə (4) düsturundan Q^\perp əmsalı təyin edilmişdir.



Şəkil 2. $Er_xSn_{1-x}Se$ bərk məhlullarında $\alpha(T)/T$ nisbətinin temperatur asılılığı



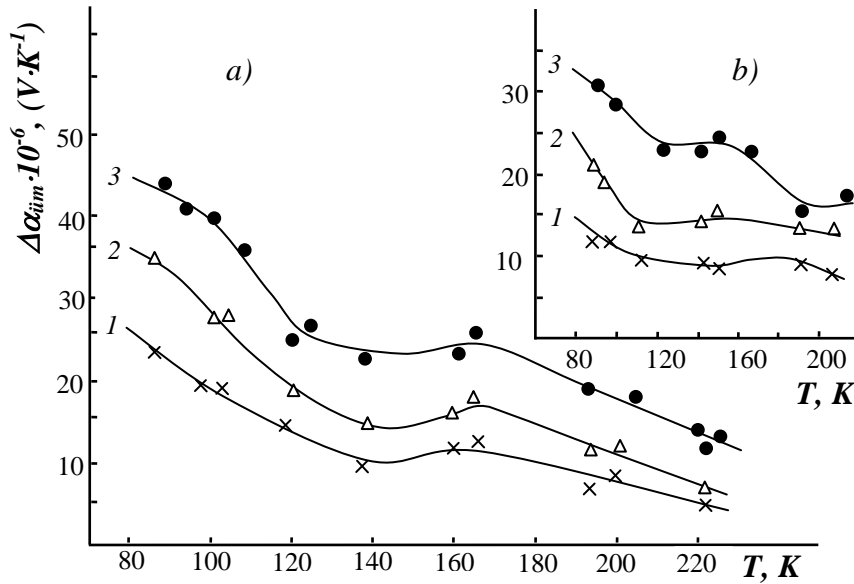
Şəkil 3. $Er_xSn_{1-x}Se$ bərk məhlulları üçün eninə Nernst-Ettingauzen sahəsinin temperatur asılılığı

$$Q^{\perp} = -\frac{E_y}{H \frac{\partial T}{\partial x}} \quad (5)$$

Təcrübi nəticələr göstərir ki (şəkil 3), deşik keçiricilikli nümunələrdə (№ 1, 2, 3, 9) E_y sahəsi $T \approx 450K$ temperatürə qədər müsbətdir, temperaturun sonrakı artımında isə E_y mənfi olur. E_y maksimal müsbət qiymətini $T \approx 180 \div 220K$ temperatur yaxınlığında alır və temperaturun artımı ilə mənfi qiymətinə kimi azalır. Elektron keçiricilikli nümunələrdə (№ 5, 6, 8, 10, 11) $E_y(T)$ qiyməti mənfi olur və mütləq qiymətinin maksimumu $T \approx (150 \div 160) K$ temperatur intervalına düşür. $Er_xSn_{1-x}Se$ sistem ərintilərində erbiumun miqdarının artması ilə inversiya temperaturu yüksək temperatur oblastına tərəf sürüşür. Təbii ki, E_y müsbət işarəsi dəşiklərin kristal qəfəsin akustik fononları ilə qarşılıqlı təsirinin üstünlük təşkil etməsi ilə şərtlənir. Bu zaman N-E sahəsi və həmçinin dəşiklərin holl yürüklüyü temperaturun artımı ilə artır və 220 K də $E_y = 0,074$ -ə çatır. 450 K-ə qədər temperaturun artması ilə yürüklüyün və E_y N-E sahəsinin asılılıq xarakteri və inversiya nöqtəsindən keçməklə işarəsini mənfiyə dəyişməsi dəşiklərin fononlarla sövqünün təsiri, onların ion aşqarlarından səpilməsi,

həmçinin keçirici elektronların yaranması ilə bağlı ola bilər. Bu faktları şəkil 2 də təsdiq edir, №1,2,3 nümunələrində $\frac{\alpha(T)}{T}$ asılılığı xəttildən çox fərqlənir. Lakin №1,2,3 nümunələrində $T=77\div 450$ K oblastında müşahidə olunan E_y temperatur asılılığını temperaturun azalması ilə akustik fononların iştirakı ilə ion aşqarlarından səpilmənin üstünlük təşkil etməsini təsəvvür etməklə izah etmək olar.

Şəkil 4-də № 3 və 5 nümunələri üçün maqnit sahəsinin müxtəlif qiymətlərində uzununa N-E effektinin $\Delta\alpha(TH)$ temperatur asılılıqları göstərilmişdir. Şəkildən görüldüyü kimi maqnit sahəsinin verilmiş qiymətində $\Delta\alpha\sim H$ temperaturun artımı ilə azalır. Digər p - və n - tipli nümunələrdə də analogi effekt müşahidə olunur.



Şək. 4. $Er_xSn_{1-x}Se$ bərk məhlullarında N3 və N5 nümunələrində $\Delta\alpha_{üm}(T)$ müxtəlif maqnit sahələrində temperatur asılılığı.

Termo-e.h.q.-sinin və termomaqnit effektlərin temperatur və maqnit sahəsindən asılılıqlarının birlikdə təhlili və $|E_y|$ mütləq qiymətinin böyük olması elektrikkeçiriciliyində yüngül və ağır yükdaşıyıcıların iştirak etdiyini göstərir və maqnit sahəsinin təsiri ilə diffuziya termo-e.h.q.-si xeyli azalır. Alınan nəticələr şəkil 5-də təsvir olunur və 90 K temperatur üçün cədvəl 1-də verilmişdir.

Cədvəl 1

| Обр. № | $p(n), (cm^{-3})$ | $U, cm^2/B \cdot c$ | $\alpha_{обш} (\alpha_D) 10^{-6}, B/K$ | $\alpha_{теор} 10^{-6}, B/K$ | $\alpha(H) 10^{-6}, B/K$ | $\Delta\alpha$ | $\Delta\alpha(H)_{ЭК} c$ |
|--------|---------------------|---------------------|--|------------------------------|--------------------------|----------------|--------------------------|
| 1 | $5,7 \cdot 10^{18}$ | 130 | 220 | 160 | 196 | 36 | 24 |
| 3 | $3,9 \cdot 10^{16}$ | 30 | 280 | 160 | 248 | 88 | 32 |
| 5 | $3,6 \cdot 10^{16}$ | 19 | -290 | 200 | -252 | 90 | 38 |
| 8 | $2,3 \cdot 10^{17}$ | 45 | -152 | 200 | -131 | 48 | 21 |
| 9 | $1,2 \cdot 10^{18}$ | 60 | 286 | | 269 | 109 | 17 |
| 10 | $8,1 \cdot 10^{16}$ | 33 | -296 | 200 | -236 | 60 | 36 |
| 11 | $4,3 \cdot 10^{17}$ | 26 | -128 | 200 | -101 | 27 | 99 |

Herrinq nəzəriyyəsinə uyğun olaraq termo-e.h.q.-nin fonon hissəsini aşağıdakı kimi, təsvir etmək olar [15]:

$$\alpha_{\Phi}(H) = \frac{k_0}{e} \frac{1}{D} \left[\left(\frac{\tau}{m} \cdot \frac{1}{1+\gamma^2} \right) \left(\frac{\tau}{m} \cdot \frac{A_{\Phi}(\varepsilon)}{1+\gamma^2} \right) + \left(\frac{\tau}{m} \cdot \frac{1}{1+\gamma^2} \right) \left(\frac{\tau}{m} \cdot \frac{\mathcal{G} A_{\Phi}(\varepsilon)}{1+\gamma^2} \right) \right] \quad (5)$$

burada D - 13.30 düsturu ilə verilir [13], $\gamma = \frac{UH}{c}$. Göründüyü kimi, $\alpha_{\Phi}(HT)$

təyin etmək üçün $A_{\Phi}(\varepsilon)$ sövqün statistik qüvvəsi kəmiyyətini bilmək lazımdır.

$A_{\Phi} \sim A'_1 \sim T^4$ və ya $A_{\Phi} \sim A'_2 \sim T^3$ olduğundan [13], aşağı temperaturlarda və yuxarıda göstərilən şərtlərdə fonon termo-e.h.q.-si α_{Φ} adi diffuziya termo-e.h.q.-sindən α_D üstün ola bilər. Buna görə də, təcrübi nəticələri aşağı temperaturlarda $\Delta\alpha_{\infty} = \alpha_{\infty} - \alpha_D = \Delta\alpha(H) \cdot \frac{(1+uH)^2}{(uH)^2}$ düsturunu nəzərə almaqla aşağıdakı şəkildə yazmaq olar [16]:

$$\alpha(H) = \alpha_D \pm \Delta\alpha(H) = \alpha_D(0) \pm \frac{\gamma^2}{1+\gamma^2} \cdot \Delta\alpha(H) \quad (6)$$

$\alpha_{\Phi}(H)$ ümumi ifadəsindən görünür ki, zona parabolik olduqda keçirici elektronların çirəşmə dərəcəsi asılı olmayaraq termo-e.h.q.-sini bu şəkildə yazmaq olar [13]

$$\alpha_{\Phi}(T) = -\frac{k_0}{e} \frac{2}{3\pi} \frac{E_1^2 m_n^2}{\hbar^3 \Lambda_1 \rho} \quad (7)$$

burada ρ - sıxlıq və $\Lambda_1 \sim T^4$. Bütün səpilmə mexanizmlərində $A_{\Phi}(\varepsilon) \sim m(\varepsilon)$ və qeyri-parabolik zonalarda yükdaşıyıcıların fononlarla sövqü effekti əsas rol oynayır. Maqnit sahəsində ($\gamma \gg 1$) α_{Φ} diffuziya termo-e.h.q.-si α_D kimi yükdaşıyıcıların səpilmə mexanizmindən asılı olmur, lakin temperaturdan güclü asılı olur və orta sövq qüvvəsi ilə aşağıdakı düsturla təyin olunur [17]:

$$\alpha_{\Phi}(\infty, T) = -\frac{k_0}{e} \frac{2}{3\pi} \langle A_{\Phi}(\varepsilon) \rangle \quad (8)$$

α_{Φ} qiymətini bilməklə güclü sahələrdə qarşılıqlı təsir sabitini qiymətləndirməyə imkan verən, $\langle A_{\Phi}(\varepsilon) \rangle$ orta sövq qüvvəsini bilavasitə tapmaq olar. Maqnit sahəsi olmadıqda ($\gamma = 0$) termo-e.h.q.-si $\alpha_{\delta}(0)$ aşağıdakı düsturla təyin olunur

$$\alpha_{\delta}(0) = \frac{k_0}{e} \frac{\langle A_{\Phi}(\varepsilon) \frac{\tau}{m} \rangle}{\langle \frac{\tau}{m} \rangle} \quad (9)$$

Burada $\alpha(0)$ - maqnit sahəsi olmadıqda ($H = 0$) adi diffuziya termo-e.h.q.-sidir. (9) ifadəsindən görüldüyü kimi cırılma dərəcəsinin artımı ilə

$$\frac{\alpha_{\Phi}(0)}{\alpha_D} = \frac{\langle \frac{\tau}{m} A_{\Phi}(\varepsilon) \rangle / \langle \frac{\tau}{m} \rangle}{\langle \frac{x\tau}{m} \rangle / \langle \frac{\tau}{m} \rangle - \eta} \quad (10)$$

nisbəti artır.

Elektronların fonon sövqünün xüsusiyyətlərini araşdırmaq üçün güclü maqnit sahəsində $\alpha_{\Phi}(\gamma)$ parametrini hesablamaq, daha sonra $\alpha_{\Phi}(T, \zeta)$, $f(\gamma)$ sahə asılılığını təyin etmək lazımdır.

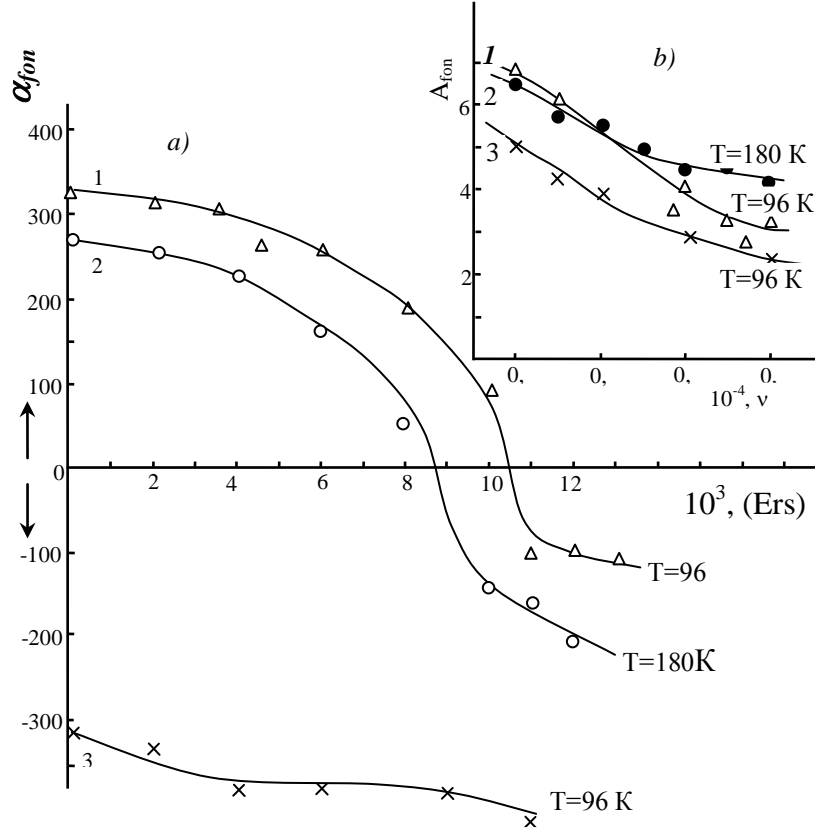
96, 180 və 300 K temperaturlarda №3 və №5 nümunələri üçün hesablanmış $\alpha_{\Phi}(TH)$ və $\alpha_{\Phi}(H)$ (Şəkil 5.a) γ parametrindən asılılığı əsasında $\alpha_{\Phi}(TH)$ hesablandığı həmin temperaturlarda $A_{\Phi}(\gamma, T)$ hesablanmışdır (Şəkil 5 b). γ -nın artımı ilə $A_{\Phi}(T, \varepsilon)$ azaldığı aşkar edilmişdir, 96 K də $\alpha_{\Phi}(\gamma)$ və $A_{\Phi}(T, \varepsilon)$ azalması (əyri 3) 180 K temperaturdakından (əyri 1) daha kəskin olur ki, bu da birqiymətli olaraq α_{Φ} sövq qüvvəsinin təsiri ilə izah olunur.

Təcrübi nəticələr əsasında aparılmış hesablamalar göstərir ki, effektiv sahənin qiymətinin artımı ilə sövq qüvvəsi xeyli azalır, bu da bütövlükdə effektin azalmasına gətirir. Sövq qüvvəsinin orta qiymətini $\langle A_{\Phi}(\varepsilon) \rangle$ təyin etmək üçün uzununa termomaqnit N-E $\Delta\alpha_{\infty}(H)$ $\alpha_{\infty} = \alpha_0 + |\Delta\alpha_{\infty}|$ effektinin təyini metodikasından istifadə olunmuşdur, nəzəriyyəyə görə [18].

$$\Delta\alpha_{\infty}(\nu) = \Delta\alpha_{\infty}(\nu) \frac{1 + \gamma^2}{\gamma^2} \quad (11)$$

Təcrübələr göstərir ki, tədqiq olunan temperatur oblastında, maqnit sahəsində α_{∞} azalır, yəni $\Delta\alpha_{\infty}(\nu)$ mənfi işarəyə malik olur. (10) düsturundan $\Delta\alpha_{\infty}$ hesablanmış və müxtəlif temperaturlarda orta sövq qüvvəsi parametrinin qiyməti təyin edilmiş, uyğun olaraq $T=90 K$ temperaturda $\langle A_{\Phi}(\varepsilon) \rangle = 7,4$, $T=180K$, $\langle A_{\Phi}(\varepsilon) \rangle = 6,2$ və $T=300K$, $\langle A_{\Phi}(\varepsilon) \rangle = 6,5$ qiymətləri alınmışdır. Həmin temperaturlarda $\frac{\alpha_{\delta}(0)}{\alpha_D(0)}$ nisbəti hesablanmış və təcrübi nəticələrə

uyğun olaraq 96; 150; 180 K temperaturlarında azaldıqları müəyyən olunmuşdur. Bu yükdaşıyıcıların cırlaşma dərəcəsinin artımı ilə temperatur azaldıqda (10) nisbətinin qiymətinin artdığını göstərir.



Şəkl. 5. $Er_xSn_{1-x}Se$ bərk məhlullarında N3 və N5 nümunələrində $A_\Phi(\gamma, T) \Delta\alpha_{\text{üm}}(T)$ müxtəlif maqnit sahələrində temperatur asılılığı.

Qeyd edək ki, $Er_xSn_{1-x}Se$ sistem ərintilərində yükdaşıyıcılar kiçik yürüklüyə malikdirlər, bu da yalnız sərbəst uçuş məsafəsinin uzunluğu ilə deyil, həm də böyük m^* effektiv kütləsi ilə bağlıdır. Bu zaman relaksasiya müddəti $kT > (\hbar/\tau)$ kriteriyasını ödəyəcək qədər böyük ola bilər. Yuxarıda göstərilən nəticələri və $Er_xSn_{1-x}Se$ sistem ərintilərinin mürəkkəb quruluşunu nəzərə alaraq fərz etmək olar ki, qeyri-tarazlıq halında müşahidə olunan sövq effektinin termomaqnit xassələrə təsiri nazik kanalla yönəlmiş və yükdaşıyıcıların uzununa uzundalğalı optik fononlarla güclü qarşılıqlı təsirinə gətirən, qəfəsin optik rəqslərinin polyarizasiyası ilə bağlıdır. Anharmonik toplananlar mövcud olduğundan polyarizəlanmış optik rəqslər bir-birləri ilə zəif qarşılıqlı təsirdə olurlar, “optik” rəqslərin eninə və uzununa polyarizələnməsini bilavasitə əlaqələndirirlər.

NƏTİCƏLƏR

77÷220 K temperatur intervalında $\frac{\Delta\alpha}{\alpha_0}$ xətti asılılıqdan müşahidə olu-

nan meyliliyə səbəb yəqin ki, yükdaşıyıcıların yalnız uzundalğalı akustik fononlarla sövqü deyil, həm də prosesdə optik fononlarda iştirak edir. Rəqsləri eninə və uzununa ayırmaq mümkün deyil. Qeyri-tarazlıq şəraitində qarşılıqlı təsir prosesində uzununa fononlar da rol oynayır. $Er_xSn_{1-x}Se$ sistem ərintilərində tədqiq olunan temperatur intervalında akustik fononlardan səpilmə ilə yanaşı, ondan da vacib olan başqa səpilmə də iştirak edir. Paramaqnit Er^{3+} ionları qismən polyarizasiya yaratmaqla uzununa akustik fononlardan üstün olan, uzundalğalı optik fononlar oyadır. Uzununa və eninə polyarizəlanmış optik rəqsləri bilavasitə əlaqələndirən, anharmonik toplananlar mövcud olduğundan polyarizəlanmış optik rəqslər bir birləri ilə zəif qarşılıqlı təsirdə olurlar. Bu halda $w(K, K')$ keçid ehtimalı K' -in cüt funksiyası ola bilər, yəni $w(K, K') = w(K, -K')$ və relaksasiya müddətini hətda qeyri-elastiki səpilmədə də daxil etmək olar. 220 K-dən yuxarı temperaturalarda, $k_0T > \hbar\omega_0$ olduqda qeyri-elastikliyi nəzərə almamaq olar və relaksasiya müddəti yükdaşıyıcıların cırlaşma dərəcəsiindən asılı olmur.

ƏDƏBİYYAT

1. Абрикосов Х.Х., Шелимова Л.Е. Полупроводниковые материалы на основе соединений $A^{IV}B^{VI}$. М.: Наука 1975, с. 210
2. Прокофьева Л.В., Равич Ю.И., Пшенай-Северин Д.А., Константинов П.П., Шабалдин А.А., Легирование полупроводников $A^{IV}B^{VI}$ и энергетический спектр дырок с учетом резонансных состояний. ФТП 2010, т.44, в. 6, с. 742-748
3. Равич Ю.И., Немов С.А., Прыжковая проводимость по сильно локализованным примесным состояниям индия в $PbTe$ и твердых растворах на его основе. ФТП 2002. т. 35, №1 с 3-23.
4. Донецких В.И., Загайнов Е.Ф., Зломанов В.П., Крочтору С.Г., Кулюхина Е.А., Соболев В.В., Штанов В.И. Спектры отражения кристаллов $SnSe, SnS_2, SnSe$ и SnS в области 1-12 Эв. в сб. Химическая связь в кристаллах и их физические свойства. Т.П. Минск, Наука и Техника, 1976, 280 с.
5. Дмитриев А.В., Звягин И.П. Современные тенденции развития физики термоэлектрических материалов. УФН 2010, т.180 №8, с. 821-837
6. Ирхин В.Ю., Ирхин Ю.П. Электронная структура, физические свойства и корреляционные эффекты в d- и f-металлах и их соединениях. М.: Наука, 2011.
7. Гусейнов Д.И., Мургузов М.И., Исмаилов Ш.С. Теплопроводность сплавов системы $Er_xSn_{1-x}Se$ Изв. РАН неорг. Мат. 2008, Е 44. №5 с. 542
8. Гусейнов Д.И., Мургузов М.И., Исмаилов Ш.С, Особенности самокомпенсации в твердых растворах $Er_xSn_{1-x}Se$ ФТП 2013, Е 47, в. 3, с 298-301.
9. Hüseynov C.İ., Ваграмов R.B., Мəммədov A.M., Vəliyev V.Q. $SnSe-DySe$ system ərintilərinin fiziki-kimyəvi xassələri "Kimya problemləri", Bakı, AMEA, 2009, №1, 110-113
10. Алиев И.И., Гусейнов Дж.И., Мургузов М.И., Исмаилов Ш.С., Годжаев Э.М. Диаграмма состояния и свойства сплавов системы $SnSe-DySe$ // «Неорганические материалы» Известия АН России, **50**, 259 (2014).

11. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников. М. Физматлит, 1978 с.615
12. Цидильковский И.М. Термомагнитные явления в полупроводниках. М.: Физмат лит. 1960 с. 396
13. Аскеров Б.М. Электронные явления переноса в полупроводниках. М.: Наука 1985 с. 318
14. Herring C.. Role of Low/ Energy Phonos in Thermal Conduction , Phys. Rev., 1954,V 95,№4 P 954-965
15. Алиев С. А., Зульфигаров Э. И. Термомагнитные и термоэлектрические явления в науке и технике Баку: Элм. 2009
16. Равич Ю.И., Ефимова Б.А., Смирнов И.А. Методы исследования полупроводников в применении к халькогенидам свинца *PbTe*, *PbSe*, *PbS*. М.: Наука
17. Гуревич Л.Э., Недлик Г.П. Квантовые кинетические уравнения при наличии взаимного увлечения электронов и фононов. ЖЭТФ 1961. Е 40 №3 с. 809-818
18. Кригер Э.Д., Кравченко А.Ф., Скок Э.М. Фононное увлечение в электронном арсениде галлия. ФТП, 1971, е 5, в. 8, с. 1605-1606
19. Гуляев Ю.В., Шкердин Г.Н. Взаимодействие электронов с направленным потоком оптических фононов. ФТТ, 1979, т. 21, в. 9, с 2695-2697.

**НЕКОТОРЫЕ ТЕРМОМАГНИТНЫЕ ЭФФЕКТЫ И ПРИРОДА
ЭЛЕКТРОН- ФОНОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В СОЕДИНЕНИЕ
р- SnSe, ЛЕГИРОВАННЫЕ ЭЛЕМЕНТАМИ Er и Dy**

**Дж.И.ГУСЕЙНОВ, М.И.МУРГУЗОВ, Ш.С.ИСМАИЛОВ,
Р.Ф.МАМЕДОВА, Э.М.ГОДЖАЕВ**

РЕЗЮМЕ

Были исследованы коэффициенты термо-э.д.с., продольный и поперечный эффекты Нернста-Эттингсгаузена (Н-Э) в интервале температур 77-700К, для соединений р-SnSe, легированные элементами эрбий (Er) и диспрозий (Dy). В температурном интервале 77-200К наблюдается отклонение от линейной зависимости дифференциальной термо-э.д.с. и изменение знака коэффициента поперечного эффекта Н-Э. Было определено, что наряду с длиноволновыми акустическими фононами, при взаимодействии электрон-фонон в неравновесном состоянии, имеются в наличии продольно и поперечно поляризованные «оптические» фононы, находящиеся друг с другом в слабом взаимодействии. Сильное отклонение от линейной зависимости дифференциальной термо-э.д.с. α_{ϕ} , во обеих системах, было определено в основном в связи с увлечением фононов носителей заряда, а так же оценены статистические силы электронного увлечения $A_{\phi}(E)$.

Ключевые слова: термомагнитные эффекты, электрон-фононные взаимодействия, силы увлечения

**SOME TERMOMAGNETIC EFFECTS AND NATURE
OF ELECTRON-PHONON INTERACTION IN *p-SnSe*
COMPOUNDS DOPED WITH *Er* AND *Dy* ELEMENTS**

**J.I.HUSEYNOV, M.LMURGUZOV, Sh.S.ISMAYILOV,
R.F.MAMMADOVA, E.M.QODZHAYEV**

SUMMARY

Termo-emf coefficients, longitudinal and transverse effects of Nernst-Ettingshauzen (N-E) for *p-SnSe* compounds doped with erbium (Er) and dysprosium (Dy) elements in the 77÷700 K temperature range have been investigated. A deviation of differential termo-emf from linear dependence in the 77÷200 K range and a change of sign of transverse N-E effect coefficient are observed. It was found out that along with long-wave acoustic phonons there are longitudinally and transversally polarized “optic” phonons, that are in weak interaction in an unbalanced state. A strong deviation of differential termo-emf from linear dependence in both systems was mainly due to entrainment of charge carriers by phonons. Statistical forces of electronic entrainment A_{ph} have also been assessed.

Key words: thermomagnetic effects, electron-phonon interaction, entrainment forces

Redaksiyaya daxil oldu: 09.10.2014 z.

Çapa imzalandı: 24.11.2014 z.