

УДК 54. 546.6-548.7

## TlInTe<sub>2</sub>-Te KRİSTALLARINDA KEÇİRİCİLİYİN ANİZOTROPİYASINA ELEKTRİK SAHƏSİNİN VƏ TEMPERATURUN TƏSİRİ

R.S. MƏDƏTOV, K.H. XƏLİLOVA\*, A.I. NƏCƏFOV, M.A. MƏMMƏDOV,  
G.M. İSGƏNDƏROVA\*, M.M.ŞİRİNOV\*

AMEA Radiasiya problemləri İnstitutu

AZ 1143, Bakı, B.Vahabzadə pr. 9

AMEA Fizika İnstitutu\*

AZ 1143, Bakı, H.Cavid pr. 131

a.najafov@mail.ru

Daxil olub: 07.01.2021

Çapa verilib: 25.02.2021

Açar sözlər: monokristal, elektrik keçiriciliyinin anizotropiyası, elektrik keçiriciliyi, ion keçiriciliyi

### REFERAT

TlInTe<sub>2</sub> və TlInTe<sub>2</sub>-Te (4at.%) kristallarında xüsusi elektrik-keçiriciliyi zəncir müstəvisinə paralel və perpendikulyar istiqamətlərdə 100-300K və 10<sup>-10</sup>V/sm intervalında tədqiq edilmişdir. Müəyyən edilmişdir ki, TlInTe<sub>2</sub>-Te sistemində stexiometriyadan artıq Te-atomunun tallium atomları arasındakı oktaedrik boşluqda oturməsi kation qəfəsində ion-kovalent rabitəni gücləndirir və c kristallik oxu istiqamətində isə, keçiriciliyi azaldır. Bu isə, elektrik sahə intensivliyinin E<sub>c</sub> < 40V/sm qiymətlərində keçiriciliyin anizotropiyasının qismən azalmasına və yüksək sahə intensivliklərində isə, kəskin artmasına səbəb olur. σ=f(T) asılılıqlarından InTe<sub>2</sub> zəncirlərinə paralel və perpendikulyar istiqamətdə energetik səviyələrin aktivləşmə enerjiləri təyin edilmişdir, bu enerjilərin qiymətləri uyğun olaraq 0,12eV; 0,35eV isə 0,10eV; 0,32eV-dir.

### GİRİŞ

Superion keçiricilərin tətbiq sahələrinin artması yeni xüsusiyyətli materialların sintezinə və tədqiqinə marağı artırır [1-3]. Belə materialların sintezi zamanı onların elektrofiziki xassələrinin, o cümlədən superion faza keçidi temperaturunun məqsədyönlü idarə edilməsi məqsədilə metal tipli aşqar atomları əlavə edilir [4-5]. [6]-işdə göstərilir ki, Li<sub>2</sub>Ge<sub>7</sub>O<sub>15</sub> superion materiallarını Cr atomu ilə aşqarlanması superion fazada keçiriciliyi artırır. Digər [7] işdə isə, Li<sup>+</sup> ionları ilə aşqarlanmış AgI kristalında superion fazaya keçid temperaturunun dəyişdirildiyi göstərilir. [7,8] işlərdə göstərilir ki, qeyd olunan xüsusiyyət kristalın quruluşundan, tərkib komponentləri arasında mövcud olan kimyəvi rabitənin növündən və kristallik qəfəsin ni-zamsızlıq dərəcəsiindən (ionların dayanıqlılığın-dan) asılıdır.

Qeyd olunan xüsusiyyətləri özündə birləşdirən materiallardan biri də A<sup>3</sup>B<sup>3</sup>C<sub>2</sub><sup>6</sup> (A-Tl; B-Ga,In; C-S,Se,Te) qrup birləşmələrinə daxil olan TlInTe<sub>2</sub> birləşməsidir. TlInTe<sub>2</sub> kristalları TlSe quruluş tipində (I4/mcm) kristallaşır və aşağıda göstərilən parametrlərə malikdir: a=8,494 Å; c=7,181Å; c/a=0,845; Z=4; d=7,36 q/sm<sup>3</sup>. TlInTe<sub>2</sub> kristallarında kimyəvi əlaqə ion-kovalent xarakterlidir. [9]. TlSe quruluş tipində kristallaşan A<sup>3</sup>B<sup>3</sup>C<sub>2</sub><sup>6</sup> kristalları defektli kristallardır, onlarda defektlərin qatılığı ~10<sup>18</sup>-10<sup>20</sup>/sm<sup>3</sup> təşkil edir [10].

A<sup>3</sup>B<sup>3</sup>C<sub>2</sub><sup>6</sup> tip kristallarının elektrik keçiriciliyi strukturda olan aşqar atomlarının və vakansiyaların mövcudluğuna hassasdır. TlGaTe<sub>2</sub> və TlInTe<sub>2</sub> kristallarında 300K-dən yuxarı temperaturlarda ion keçiriciliyinin aşkar edilməsi bu kristalların elektrofiziki xassələrinə müxtəlif aşqarların təsirinə tədqiqini aktual edir [11-14].

Fiziki-kimyəvi tədqiqatlar A<sup>3</sup>B<sup>3</sup>C<sub>2</sub><sup>6</sup> tip birləşmələrin və onların ikili analoglarının (TlS,

TlSe özində xalkogenin stexiometriyadan artıq miqdarını həll etdiyini göstərmişdir [15-16]. [15-17] işlərdə artıq miqdar xalkogenin bu birləşmələrdə struktur fəza keçidində səbəb olduğu müəyyən edilmişdir. [18] işdə tellurun  $TlGaTe_2$ ,  $TlInTe_2$  birləşmələrində həll olması müəyyən edilmiş və həll olan tellurun birləşmələrin elementar qəfəsində tallium sütunlarındakı oktaedrik boşluqlarda yerləşdiyini və ana maddə ilə daşıılma bərk məhlulları əmələ gətirdiyi göstərilmişdir.

Ədəbiyyatda  $TlInTe_2$  birləşməsinin elektrik xassələrinin tədqiqinə həsr olunmuş işlər çoxdur [10-14]. Bu işlərin nəticələrinə əsasən,  $TlInTe_2$  kristallarında müxtəlif kristallik istiqamətlərdə xüsusi müqavimət anizotrop xüsusiyyətlə malikdir və cərəyanın keçmə mexanizmi sıçrayışlı keçidlərlə müəyyən olunur. [10-14] işdə  $TlInTe_2$  birləşməsinin tetraqonal qəfəs quruluşu, simmetriya qrupu, qəfəs parametrləri və superior keçiriciliyi haqqında məlumatlar verilmişdir. Göstərilmişdir ki, bu tipli kristallarda  $T > 400K$  temperaturalarda müşahidə olunan superior keçiriciliyi tallium qəfəsində  $Tl^{3+}$  ionun nanozəncirləri arasında vakansiyalar üzrə diffuziyası nəticəsində yaranır.

[18] işdə isə, superior fəza keçidində uyğun temperaturun və keçiriciliyin məqsədyönlü idarə etmək məqsədilə xalkogen atomunun (Te)  $TlInTe_2$  kristalında həllolma dərəcəsi müəyyən edilmiş və onun  $T > 300K$  temperaturalarda  $TlInTe_2$  kristallarının keçiriciliyinə təsiri  $f = 100khs$  tezliyində araşdırılmışdır. Göstərilmişdir ki, müşahidə olunan superior keçiriciliyin qiyməti aşqarlanma dərəcəsiindən və kristalloqrafik istiqamətdən asılıdır. Yuxarıda qeyd olunan tədqiqatlarla əsas məqsəd  $A^3B^2C_6$  birləşmələri arasında yeni superior keçiricilikli materialların sintezinə və onların fiziki-kimyəvi xarakteristikalarının öyrənilməsinə yönəldiyindən, superior keçiriciliyin mexanizmi haqqında yekun model verilməmişdir. Bu faktları və  $T > 100K$  temperaturalarda və yüksək elektrik sahəsində kristalın anizotropik xüsusiyyətlərini nəzərə almaqla  $TlInTe_2$ -Te sistemində keçiriciliyin mexanizminin öyrənilməsi üçün nəticələrin tamamlanmasına yardım etmiş olar. Bu səbəbdən tədqim olunan işdə xalkogen atomu əlavə olunmuş (4at.%)  $TlInTe_2$ -Te sistemində keçiriciliyin anizotropik xüsusiyyətlərinə elektrik sahəsinin və tempe-

raturun təsirinə öyrənilməsindən alınan nəticələr verilmişdir.

## NÜMUNƏNİN ALINMASI VƏ TƏCRÜBƏNİN APARILMA METODIKASI

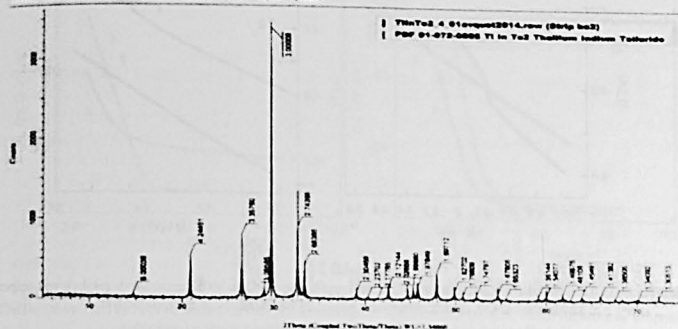
$TlInTe_2$ -Te sisteminin tədqiqi üçün  $1,0 \pm 10,0at.\%$  Te tərkibli xəlitələr sintez edilmişdir. Xəlitələr, təmizlik dərəcəsi 99,999% olan komponentlərdən istifadə etməklə  $10^2 Pa$  təzyiqlə qədr havasızlaşdırılmış kvarts ampullarda birbaşa sintez üsulundan istifadə etməklə hazırlanmış polikristallik  $TlInTe_2$  və təmizlik dərəcəsi 99,999% olan Te komponentindən elektrik sobasında əridilməklə alınmış və sonra üç həftə ərzində  $200 \pm 5^\circ C$  temperaturda dənə qoyulmuşdur. Həm  $TlInTe_2$  birləşməsinin, həm də 4,0at.% Te həll olmuş  $TlInTe_2$ -Te tərkibli birləşmə nümunələrini  $p$ -tipi keçiriciliyə və kristalloqrafik oxlar üzrə uyğun olaraq aşağıdakı xüsusi müqavimətə malik olmuşlar:  $\rho_{||} = 795Om$ ;  $\rho_{\perp} = 77350Om$  və  $\rho_{||} = 1,6Om$ ;  $\rho_{\perp} = 1645Om$ . Xəlitələrdə fazaların tarazlıq halının yaranması rentgenfəza və mikroquruluş analizləri vasitəsi ilə müəyyən edilmişdir.  $TlInTe_2$ -Te tərkibli xəlitələr, differensial termik (DTA), rentgenfəza (RFA) və mikroquruluş (MQA) analizləri vasitəsi ilə tədqiq edilmiş və sistemin hal diaqramı qurulmuşdur.  $TlInTe_2$  birləşməsi əsasında tellurun  $700^\circ C$  temperaturunda  $\sim 8,0at.\%$  otaq temperaturunda isə  $5,0at.\%$  miqdarında həllolma oblastı müəyyən edilmişdir. Cilalanmış nümunələr üzərində mikroquruluş analizi aparılmış və alınmış nəticələrə görə  $1,0-5,0at.\%$  Te tərkibli xəlitələr biricinsil olmaqla  $TlInTe_2$  birləşməsi əsasında bərk məhlul oblastına aiddirlər.

$TlInTe_2$ -Te sistemi xəlitələrinin rentgen difraksiogramlarının tədqiqi nəticəsində müəyyən edilmişdir ki, bərk məhlul oblastından olan nümunələrin qəfəs parametrlərində  $TlInTe_2$  kristalları ilə müqayisədə ( $a = 8,494A$ ,  $c = 7,181A$ ) cüzi dəyişmə müşahidə edilir (Şəkil.1). Tərkibində 4,0at.% Te olan bərk məhlul polikristallardan çəkilmiş toz difraksiogramına əsasən qəfəs parametrləri aşağıdakı kimidir

$$a = 8,4850A, c = 7,1924A.$$

Göründüyü kimi, elementar qəfəsin  $a$ -parametrinin kiçilməsi, və  $c$ -parametrinin isə cüzi böyüməsi müşahidə olunur.

Commander Sample ID (Coupled TwoTheta/Theta)



Şəkil 1

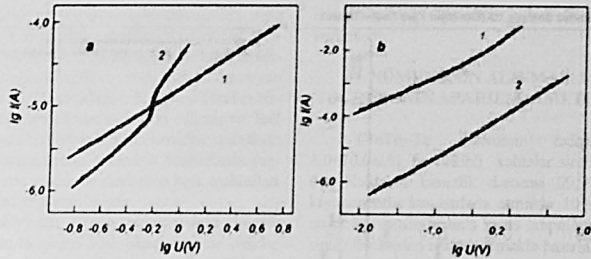
4,0 at.% Te həll olmuş  $TlInTe_2$ -Te tərkibli nümunənin tozdan çəkilmiş difraksiogramı.

Monokristal halında yetişdirilmiş  $TlInTe_2$  kristalından ölçüləri  $4,1 \times 1,0 \times 0,6mm$  ( $c$  oxuna paralel istiqamətdə aparılacaq ölçmələr üçün) və  $3,5 \times 1,7 \times 0,8mm$  ( $c$  oxuna perpendikulyar istiqamətdə aparılacaq ölçmələr üçün) olan paralelipiped formalı nümunələr kəsilərək hazırlanmışdır. 4,0at.% Te həll olmuş  $TlInTe_2$  kristallarından isə ölçüləri  $2,9 \times 0,8 \times 0,6mm$  ( $c$  oxuna paralel istiqamətdə aparılacaq ölçmələr üçün) və,  $3,7 \times 1,5 \times 1,1mm$  ( $c$  oxuna perpendikulyar istiqamətdə aparılacaq ölçmələr üçün) olan paralelipiped formalı nümunələr hazırlanmışdır. Nümunələrə kontaktlar gümüş pastası vasitəsilə qoyulmuşdur. Onların volt-ampere xarakteristikaları və elektrikkəçiriciliyi  $100-300K$  temperatur və  $0-5V$  gərginlik intervalında [19] işdə göstərilən metodika əsasında tədqiq edilmişdir.

## TƏCRÜBİ NƏTİCƏLƏR VƏ ONLARIN İZAHİ

$TlInTe_2$ -Te sistemi kristallarında kristallik oxlar istiqamətində defekt (aşqar) səviyyələrinin paylanmasının cərəyanın keçmə mexanizminə təsiri  $100-300K$  intervalında və elektrik sahəsinin  $E < 10^2 V/cm$  qiymətlərində araşdırılmışdır.

Şəkil 2(a,b)-də  $T = 300-K$  temperaturda  $TlInTe_2$  və  $TlInTe_2$ -Te birləşmələrində müxtəlif kristallik istiqamətlərdə  $(001)$ -zəncir müstəvisinə paralel və  $(110)$ -perpendikulyar volt-ampere xarakteristikaları verilmişdir. Şəkil 2-dən gördürük ki,  $I(U)$  asılılığı  $TlInTe_2$  zəncir istiqamətində xətti xarakter daşıyır və defekt səviyyəsinin termik ionlaşması ilə bağlıdır, zəncir müstəvisinə perpendikulyar istiqamətdə isə bu asılılıq eksponensial xarakter daşıyır, gərginliyin  $0,5-0,8V$  intervalında sıçrayışlı keçid və sonrakı artımda isə yenidən kvadratik oblast (Şəkil 2a, 2-əyri) müşahidə olunur. Belə keçid [20]-də müşahidə olunmuş və səbəb yükdaşıyıcıların lokal oblastlar arası keçidi ilə izah edilmişdir. Aşqarlanmış  $TlInTe_2$ -Te sistemi kristallarında isə, hər iki kristalloqrafik istiqamətdə omik oblastda uyğun xətti asılılıq müşahidə olunmuşdur (Şəkil 2b). Şəkil 2-də göstərilən  $I(U)$  ayrılıqlarının müqayisəsi göstərir ki,  $TlInTe_2$  (Şəkil 2a, 2-ci əyri) kristalında zəncir müstəvisinə paralel istiqamətdə lokal səviyyələrin sıxlığı daha yüksək sahənin müəyyən qiymətlərində səviyyələr arası aşqar-zona keçidlərinə nisbətən üstünlük təşkil edir və nəticədə sıçrayışlı keçiricilik müşahidə olunur. Belə keçidlər anizotrop xüsusiyyətə malik laylı  $InSe$  və zəncirvan  $TlInSe_2$  kristallarında da müşahidə olunmuşdur [21].



Şəkil 2

TlInTe<sub>2</sub> (a) və TlInTe<sub>2</sub>-Te (b) kristallarının müxtəlif kristalloqrafik istiqamətlərdə 300K temperaturda çəkilmiş volt-ampere xarakteristikaları: 1 - zəncir müstəvisinə paralel; 2 - zəncir müstəvisinə perpendikulyar.

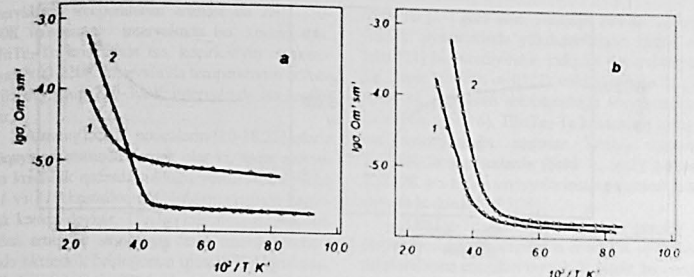
Şəkil 3(a,b)-də TlInTe<sub>2</sub> və TlInTe<sub>2</sub>-Te sistemi üçün zəncir müstəvisinə paralel (1) və perpendikulyar (2) istiqamətlərdə keçiriciliyin temperatur asılılığı göstərilmişdir. Şəkil 3 (a)-dan gördüyümüz kimi, 100<T<220K temperaturlarda paralel istiqamətdə (elektrik sahəsinin kiçik qiymətlərində) xüsusi elektrik keçiriciliyinin perpendikulyar istiqamətə nəzərən qismən azalması, baş vermiş, aşağı temperatur intervalında çox zəif artımı və 230-300K temperatur intervalında isə eksponensial artımı baş verir. Öyrinin düzətli hissəsinin meylinə əsasən aşağı temperatur intervalında hesablanmış aşcar səviyyəsinin aktivləşmə enerjisi  $e_1=0,12\text{eV}$ , yüksək temperatur oblatından hesablanmış lokal səviyyənin aktivləşmə enerjisi  $e_2=0,35\text{eV}$ , uyğun olaraq perpendikulyar istiqamətə isə  $e_1=0,1\text{eV}$  və  $e_2=0,32\text{eV}$  olmuşdur. Te atomu əlavə edilmiş TlInTe<sub>2</sub>-Te sistemində

( $\lg[\sigma] - \frac{10^3}{T}$ ) asılılığında 100-200K temperatur in-

tervalında xüsusi elektrik keçiriciliyi praktiki olaraq dəyişmir, T>200K isə, cərəyanın artması müşahidə olunur. Şəkil 3b-dən görünür ki, paralel istiqamətdə cərəyanın artması (1-əyri) perpendikulyar istiqamətə nəzərən (2-ci əyriyə) daha yüksək temperaturda başlayır (T≈210K), bu isə həyəcənlanmış səviyyələrin konsentrasiyasının fərqli olduğunu göstərir. Şəkil 3 b-dən hər iki əyri üçün hesablanmış aktivləşmə enerjiləri uyğun olaraq 0,10 və 0,30eV (1-ci əyri); 0,10 və 0,32eV (2-ci əyri)

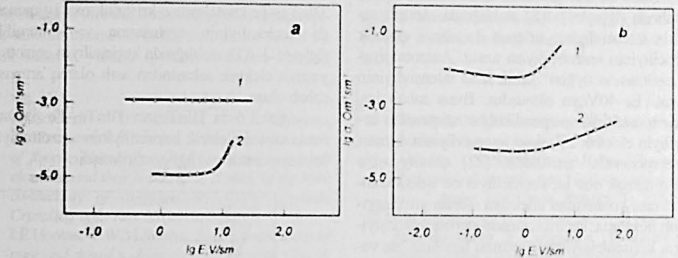
olmuşdur.  $\lg[\sigma] - \frac{10^3}{T}$  asılılıqlarının müqayisəsindən görünür ki, cərəyanın kəskin artması (T≈170K) Te atomunun TlInTe<sub>2</sub> birləşməsinə əlavə edilməsi nəticəsində zəncir müstəvisinə perpendikulyar istiqamətdə yükdaşıyıcıların yürtlüklüyünün artması səbəbindən ola bilər. Bu məqsədlə keçiriciliyin tətbiq olunan elektrik sahəsinin intensivliyindən asılılığı öyrənilmişdir.

Şəkil 4 a-dan görünür ki, TlInTe<sub>2</sub> kristalında paralel istiqamətdə (1-əyri) tətbiq edilmiş elektrik sahəsinin kiçik qiymətlərində (E<40V/sm) xüsusi elektrik keçiriciliyinin qiyməti dəyişmir və sahə intensivliyinin bu intervalında Om qanununa tabe olur. Zəncir müstəvisinə perpendikulyar istiqamətdə (2-əyri) elektrik sahəsinin kiçik qiymətlərində xüsusi elektrik keçiriciliyi dəyişir, sonrakı artma zamanı isə xüsusi keçiriciliyin kəskin artması müşahidə olunur. Müşahidə olunan keçiriciliyin anomaliyası defektlərin tetraqonal kristallik c oxuna nəzərən nizamsız paylanması ilə bağlıdır. Lampert [22] nəzəriyyəsi əsasında demək olar ki, sahə intensivliyinin aşağı qiymətlərində perpendikulyar istiqamətdə xüsusi elektrik keçiriciliyinin qiymətinin paralel istiqamətdəki ilə müqayisədə xeyli kiçik olması (~10<sup>2</sup> dəfə), perpendikulyar istiqamətdə hərəkət edən yükdaşıyıcılar üçün potensial çəpərin mövcud olduğunu göstərir. Bu səbəbdən TlInTe<sub>2</sub> kristalında da, [10-14,23] işlərdə olduğu kimi, keçiriciliyin anizotropiyası müşahidə olunur.



Şəkil 3

TlInTe<sub>2</sub> (a) və TlInTe<sub>2</sub>-Te (b) kristallarında müxtəlif kristalloqrafik istiqamətlərdə çəkilmiş xüsusi keçiriciliyin temperatur asılılıqları: 1 - zəncir müstəvisinə paralel; 2 - zəncir müstəvisinə perpendikulyar.



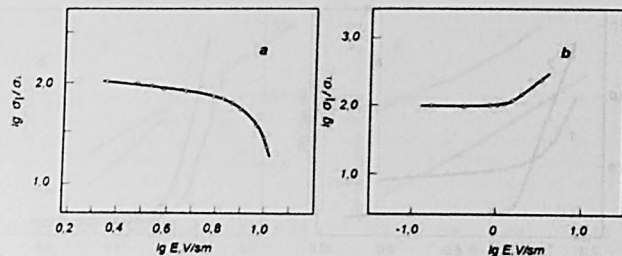
Şəkil 4

TlInTe<sub>2</sub> (a) və TlInTe<sub>2</sub>-Te (b) kristallarında müxtəlif kristalloqrafik istiqamətlərdə xüsusi keçiriciliyin elektrik sahəsinin intensivliyindən asılılığı: 1 - zəncir müstəvisinə paralel; 2 - zəncir müstəvisinə perpendikulyar.

TlInTe<sub>2</sub>-Te kristalında xüsusi elektrik keçiriciliyinin sahənin intensivliyindən asılılığı Şəkil 4b-də verilmişdir. Şəkil 4b-dən görünür ki, TlInTe<sub>2</sub>-Te sistemində stexiometrik miqdardan artıq Te atomunun əlavə edilməsi nəticəsində hər iki kristallik istiqamətlərdə keçiricilik artır və  $\sigma-f(E)$  asılılığında Frenkel şərti ödənilir, zəif elektrik sahələrində keçiricilik lokal səviyyələrin termo-elektron emissiyası ilə müəyyən edilir [24]. Şəkil 4a və 4b-də 1 və 2 əyrilərinin müqayisəsi göstərir ki, Te atomunun əlavə edilməsi TlInTe<sub>2</sub>-Te kristalında hər iki istiqamətdə defektlərin paylanması nizamları və nəticədə kristalın keçiriciliyi artır. Bu fakt gös-

tərir ki, TlInTe<sub>2</sub> birləşməsinə əlavə edilən Te atomunun miqdarını dəyişməklə xüsusi elektrik keçiriciliyinin qiyməti və istiqamətini tetraqonal ox nəzərən paralel, həm də perpendikulyar istiqamətə idarə etmək mümkündür.

Şəkil 5a və 5b-də TlInTe<sub>2</sub> və TlInTe<sub>2</sub>-Te kristalları üçün T=300K temperaturda keçiriciliyinin anizotropiyasının elektrik sahəsinin intensivliyindən asılılığı verilmişdir. Şəkil 5-də verilən əyrilərin müqayisəsi əsasında demək olar ki, otaq temperaturunda keçiriciliyin elektrik sahəsinin intensivliyindən asılılığında nəzəri qanunauyğunluqdan [24] kənarçıxmalar müşahidə olunur.



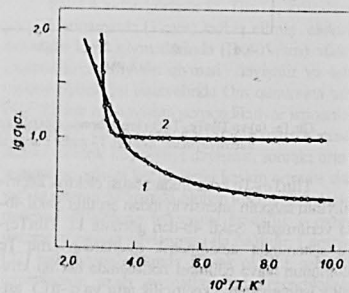
Şəkil 5

TlInTe<sub>2</sub> (a) və TlInTe<sub>2</sub>-Te (b) kristallarında birləşmənin xüsusi elektrik keçiriciliyinin anizotropiyasının elektrik sahəsinin intensivliyindən asılılığı.

Şəkil 5a-dan görünür ki, aşqarsız TlInTe<sub>2</sub> kristalında  $\lg(\sigma/\sigma_0) \sim f(E)$  asılılığında elektrik sahəsinin intensivliyinin artması ilə xüsusi elektrik keçiriciliyinin anizotropiyası azalır. Anizotropiyanın azalmasına uyğun kritik sahə intensivliyinin qiyməti  $E_c \sim 40$  V/sm olmuşdur. Buna səbəb isə, zəncir müstəvisinə perpendikulyar istiqamətdə keçiriciliyin elektrik sahəsinin intensivliyinin artması ilə eksponensial artmasıdır. [22] nəzəriyyəsinə əsasən demək olar ki, keçiriciliyin  $\sigma$ - $f(E)$  istiqamətində artması kontaktdan injeksiya olunan yükdaşıyıcıların hesabına, keçirici zonada sərbəst yükdaşıyıcıların konsentrasiyasının artması hesabına baş verir. TlInTe<sub>2</sub> kristalına aşqar Te atomu daxil edildikdə isə, keçiriciliyin anizotropiyasının artması müşahidə olunur, yəni zəncir müstəvisinə perpendikulyar istiqamətdə (c kristallik oxu istiqamətində) kristalın keçiriciliyi azalır. Qrafikdən (Şəkil 5b) keçiriciliyin anizotropiyanın artmasına uyğun kritik sahə intensivliyinin hesablanmış qiyməti  $E_c \sim 50$  V/sm olmuşdur. Bu isə, biza [25,26] alınan nəticələrə əsaslanaraq deməyə imkan verir ki, aşqar atomunun yaratdığı energetik səviyyə zəif sahələrdə tutma mərkəzi rolunu oynayır, kritik sahələrdə isə Frenkel effekti hesabına termoelektron ionlaşmasına məruz qalır. Bu isə, yüksək sahə intensivliklərində keçiriciliyin kəskin artmasına səbəb olur. Şəkil 5a və 5b-nin müqayisəsindən demək olar ki, TlInTe<sub>2</sub> kristalına stixiometriyadan əlavə daxil edilən Te atomunun Tl<sup>+</sup> ionunu əhatə edən oktaedrik boşluqda yerləşməsi kation qəfəsal-

ında ion-kovalent rabitəsini gücləndirir. Bu isə, TlInTe<sub>2</sub>-Te kristalında c-kristallik oxu istiqamətində keçiriciliyinin azalmasına və ümumilikdə  $\lg(\sigma/\sigma_0) \sim f(E)$  asılılığında keçiriciliyin anizotropiyasının elektrik sahəsindən əslilə olaraq artmasına səbəb olur.

Şəkil 6-da TlInTe<sub>2</sub> və TlInTe<sub>2</sub>-Te kristallarında xüsusi elektrik keçiriciliyinin anizotropiyasının temperatur asılılığı göstərilmişdir.



Şəkil 6

TlInTe<sub>2</sub> (1) və TlInTe<sub>2</sub>-Te (2) kristallarında xüsusi elektrik keçiriciliyinin anizotropiyasının temperatur asılılığı.

Şəkil 6-da göstərilən  $\lg(\sigma/\sigma_0) \sim f(1/T)$  asılıqların müqayisəsindən görünür ki, TlInTe<sub>2</sub> kristalında keçiriciliyin anizotropiyası 100-250K

intervalında temperaturun artması ilə zəif, 250-300K temperatur intervalında isə, kəskin artır. TlInTe<sub>2</sub>-Te kristalında isə, keçiriciliyin anizotropiyası 100-220K intervalında temperaturun artması ilə dəyişir, 220-300K intervalında isə kəskin artır.

Alınmış təcrübə nəticələrin [10-18,23] işlərlə müqayisəsi əsasında demək olar ki, aşqar atomunun kristallik qəfəsdə tutduğu yerden əslilə olaraq 001 və 110 kristalloqrafik istiqamətlərində keçiricilik kəskin dəyişir. TlInTe<sub>2</sub> kristalına stixiometriyadan artıq Te atomunun daxil edilməsi kristalında oktaedrik boşluğunun qismən doldurulması, 110 istiqamətində Tl<sup>+</sup> ionlarının sərbəst hərəkəti üçün əlavə potensial qəpər yaradır. Bu isə, kristallik ox istiqamətində cərəyanın azalmasına səbəb olur. Kristala potensial sahə tədbiq edilən zaman potensial qəpərin hündürlüyü  $E_c < E$  qiymətlərində kompensasiya olunduğundan cərəyanın anizotropiyası sahənin intensivliyindən əslilə olur (Şəkil 5), kritik sahənin yüksək qiymətlərində isə Frenkel

effektinə [24] görə artır. Tədqiqat zamanı sahənin yüksək qiymətlərində yükdaşıyıcıların qızma effekti [21] baş verdiyindən tədqiqat dayandırılmışdır. Digər tərəfdən  $\sigma \sim f(1/T)$  asılıqlarından da görünür ki, cərəyanın anizotropluğu temperaturdan da asılıdır (Şəkil 6). TlInTe<sub>2</sub>-Te kristalında cərəyanın anizotropluğu aşqarsız kristala nəzərən  $T < 250$ K temperaturlarda (Şəkil 6, əy.2) qismən,  $T > 250$ K isə aşqar səviyyəsinin ionlaşması nəticəsində kəskin artır [25,26].

TlInTe<sub>2</sub>-Te kristalında c-oxuna paralel və perpendikulyar istiqamətlərdə energetik səviyyələrin aktivləşmə enerjiləri təyin edilmişdir, bu enerjilərin qiymətləri uyğun olaraq 0,12eV; 0,35eV isə 0,10eV; 0,32eV-dur.

Alınmış nəticələrin təhlili göstərir ki, zəncirvan quruluşu malik kristallarda aşqar atomunun artıqlıq materialının anizotrop xassələrinin məqsədyönlü idarə etməyə imkan verir və bu metod əldə çevirici sistemlərin hazırlanmasında istifadə oluna bilər.

1. N.I.Sorokin, D.N.Karimov, E.A.Sulyanova, Z.I.Zhmurova, B.P.Sobolev. *Nanostructured crystals of fluorite phases Sr<sub>1-x</sub>R<sub>x</sub>F<sub>2-x</sub> (Rare rare earth elements) and their ordering*. 5. A study of the ionic conductivity of as-grown Sr<sub>1-x</sub>R<sub>x</sub>F<sub>2-x</sub> crystals. *Crystallography Rep.* 55 (2010) 662-667.
2. I.E.Hooton, P.W.M.Jacobs. *Ionic conductivity of pure and doped sodium chloride crystals*. *Can. J. Chem.* 66 (1988) 830-835.
3. P.J.Walker. *Crystal growth of SrCl<sub>2</sub> and solid solutions of SrCl<sub>2</sub>-PrCl<sub>3</sub> and SrCl<sub>2</sub>-GdCl<sub>3</sub>*. *Crystal Growth*, 44 (1978) 187-189.
4. C.Tien, E.V.Chamayay, A.B.Sherman. *Fluorine mobility in an aluminum-doped CeF<sub>3</sub> crystal: NMR and conductivity studies*. *Phys. Solid State*, 46 (2004) 1627-1630.
5. W.L.Roth, R.E.Benenson, C.J.Wielanski, B.Dunn. *Particle scattering studies on foreign ions in superionic conductors*. *Solid State Ionics*, 9-10 (1983) 1459-1464.
6. M.П.Грубицын, М.Д.Вольнянский, А.Х.Обайда. *Ионная проводимость в кристаллах Li<sub>2</sub>Ge<sub>2</sub>O<sub>7</sub> допированных ионами Cr и Mn*. *ФТТ*, 50 (2008) 1184-1187.
7. E.Kartini, T.Sakuma, K.Bazar, M.Ishah. *Mixed cation effect on silver-lithium solid electrolyte (Ag<sub>2</sub>)<sub>0.5</sub>(LiPO)<sub>0.5</sub>*. *Solid State Ionics*, 179 (2008) 706-711.
8. Под. Ред. М.Б.Соломонова. *Физика суперионных проводников*. Рязань (1982) 316.
9. D.Muller, G.Eulenberger, H.Hahn. *Über ternäre Thalliumhalogenide mit Thallium selenidstruktur*. *Z. Anorg. Allg. Chem.* 398 (1973) 207-220.
10. P.M.Sardarlıy, O.A.Samedov, A.I.Nadirkafrov, A.P.Abdullayev, Ə.A.Zeynaldov, D.I.Əbdəbarov. *Анизотропия пружковской проводимости в монокристалле TlGaTe<sub>2</sub>*. *Transactions of National Academy of Science of Azerbaijan, series of physics-mathematical and technical sciences, Physics and Astronomy*, XXV №5 (2005) 45-50.
11. P.M.Sardarlıy, O.A.Samedov, A.P.Abdullayev, Ə.K.Гусейнов, Ф.Т.Салманов, И.А.Алиева, P.Ш.Атаева. *Ионная проводимость и dielektrическая релаксация в кристаллах TlGaTe<sub>2</sub> облученных гамма-квантами*. *ФТТ*, 47 (2013) 696-702.
12. P.M.Sardarlıy, O.A.Samedov, A.P.Abdullayev, Ф.Т.Салманов. *Гигантская dielektrическая релаксация в кристаллах TlGaTe<sub>2</sub>*. *ФТТ*, 53 (2013) 1488-1492.
13. P.M.Sardarlıy, O.A.Samedov, A.P.Abdullayev, Ə.K.Гусейнов, Э.М.Годжаев, Ф.Т.Салманов. *Суперионная проводимость в кристаллах TlGaTe<sub>2</sub>*. *ФТТ*, 45 (2011) 1009.
14. P.M.Sardarlıy, O.A.Samedov, A.P.Abdullayev, Ф.Т.Салманов, O.З.Алекперов, Ə.K.Гусейнов,

- Н.А.Алиева Суперионная проводимость, эффекты переключения и памяти в кристаллах  $\text{PbInSe}_2$  и  $\text{PbInTe}_2$ , ФТП, **45** (2011) 1441-1447.
15. А.И.Наджафов, О.З.Алекперов, Г.Г.Гусейнов, А.П.Абдуллаев. Получение и свойства твердого раствора  $(\text{PbInSe}_2)_{0.98}\text{Se}_{0.02}$ . Неорг. Материалы, **48** (2012) 1309-1313.
  16. А.И.Наджафов, Г.Г.Гусейнов, О.З.Алекперов, Р.М.Сардарлы, А.П.Абдуллаев, Н.А.Эюбова. Полиморфное превращение в  $\text{PbSe}$  и электрофизические свойства фаз. Кристаллография, **53** (2008) 864-868.
  17. О.З.Алекперов, А.И.Наджафов, Г.Г.Гусейнов, А.П.Абдуллаев. Полиморфное превращение в кристаллах  $\text{PbInSe}_2$  и электрофизические свойства фаз, Transactions of National Academy of Science of Azerbaijan, series of physics-mathematical and technical sciences, Physics and Astronomy, **XXX** №5 (2010) 189-194.
  18. А.И.Наджафов, Н.А.Алиева, К.Г.Халилова. Растворимость теллура в кристаллах  $\text{PbGaTe}_2$ ,  $\text{PbInTe}_2$  и электрофизические свойства твердых растворов, Физика твердого тела, **60** (2018) 1656-1661.
  19. Е.А.Ермоленко. Классификация методов измерения вольт-амперных характеристик полупроводниковых приборов. Технология и конструирование в электронной аппаратуре, **2-3** (2014) 3-11.
  20. С.Н.Мустафаева, В.А.Алиев, М.М.Асадов. Анизотропия прыжковой проводимости в монокристаллах  $\text{PbGaSe}_2$ , ФТП, **40** (1998) 48-51.
  21. Р.С.Мадагов, А.И.Наджафов, М.Р.Газанфаров. Влияние ионизирующего излучения на механизм электропроводности монокристаллов  $\text{PbInSe}_2$ , Материалы Электронной Техники, **3** (2012) 31-36.
  22. М.Ламперт, П.Марк. Инжекционные токи в твердых телах, Мир, М., (1973) 413.
  23. Ф.И.Абдуллаев, Т.Г.Керимова, И.А.Абдуллаев. Анизотропия проводимости и локализации носителей заряда в монокристаллах  $\text{PbInTe}_2$ , ФТП, **47** (2005) 1180-1185.
  24. Ya.I.Frenkel. Collection of Selected Works, Moscow-Leningrad, (1958) 217.
  25. А.М.Пашасв, Б.Г.Тагиев, О.Б.Тагиев. Эффект Пула-Френкеля в халькогенидных полупроводниках с различными кристаллическими структурами, ФТП, **55** (2013) 861-865.
  26. R.S.Madotov, A.I.Najafov, T.B.Taghiyev, M.R.Gazanfarov. The Mechanism of a Current Passing in  $\text{PbInSe}_2$  Monocrystals in Strong Fields Surf. Engin. and Applied Electrochemistry, **46** (2010) 497-502.

## EFFECT OF ELECTRIC FIELD AND TEMPERATURE ON CONDUCTION ANISOTROPY IN $\text{PbInTe}_2\text{-Te}$ CRYSTALS

R.S.MADATOV, K.H.XALILOVA, A.I.NAJAFOV, M.A.MAMMADOV, G.M.ISGENDEROVA, M.M.SHIRINOV

The specific electrical conductivity of  $\text{PbInTe}_2$  and  $\text{PbInTe}_2\text{-Te}$  (4at.%) crystals has been studied in the range of 100-300K and 10-102V/cm in the directions parallel and perpendicular to the plane of the chain. It has been found that in the  $\text{PbInTe}_2\text{-Te}$  system, more than stoichiometry, the presence of a Te-atom in the octahedral space between thallium atoms enhances the ion-covalent bond in the cation cage and reduces the conductivity in the direction of the c crystal axis. This lead to a partial decrease in the anisotropy of the conduction at values of electric field intensity  $E_k < 40\text{V/cm}$ , and a sharp increase at high field intensities. The activation energy of the energy levels in the direction parallel and perpendicular to the  $\text{InTe}_4$  chains were determined, the values of these energies 0.12eV; 0.35eV and 0.10eV; 0.32eV.

## ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ НА АНИЗОТРОПИЮ ПРОВОДИМОСТИ КРИСТАЛЛОВ $\text{PbInTe}_2\text{-Te}$

Р.С.МАДАТОВ, К.Г.ХАЛИЛОВА, А.И.НАДЖАФОВ, М.А. МАМЕДОВ, Г.МИСКЕНДЕРОВА, М.М.ШИРИНОВ

Удельная электропроводность кристаллов  $\text{PbInTe}_2$  и  $\text{PbInTe}_2\text{-Te}$  (4at.%) исследована в диапазоне от 100 до 300K и от 10 до 102 В/см в направлениях, параллельном и перпендикулярном плоскости цепочки. Обнаружено, что сверхстехиометрическое количество атомов Те в кристаллах  $\text{PbInTe}_2$  усиливает ионно-ковалентную связь в катионной решетке и снижает проводимость в направлении кристаллической оси с. Это приводит к частичному уменьшению анизотропии проводимости при значительных напряженности электрического поля  $E < 40\text{В/см}$  и резкому увеличению при высоких значениях поля. Определены энергии активации энергетических уровней в направлении параллельном и перпендикулярном цепочкам  $\text{InTe}_4$ , значения этих энергий равны: 0,12эВ; 0,35эВ и 0,10эВ; 0,32эВ, соответственно.