

## İNDİUM MONOTELLURİDİ VƏ $(\text{InTe})_{1-x}(\text{TlGaTe}_2)_x$ BƏRK MƏHLUL KRİSTALLARINDA ELEKTRON VƏ FONON SƏPİLMƏSİNİN TƏBİƏTİ

M.Ş. HƏSƏNOVA, Ç.İ. ƏBİLOV

Azərbaycan Texniki Universiteti

AZ 1073, Bakı ş., H. Cavid pr., 25.

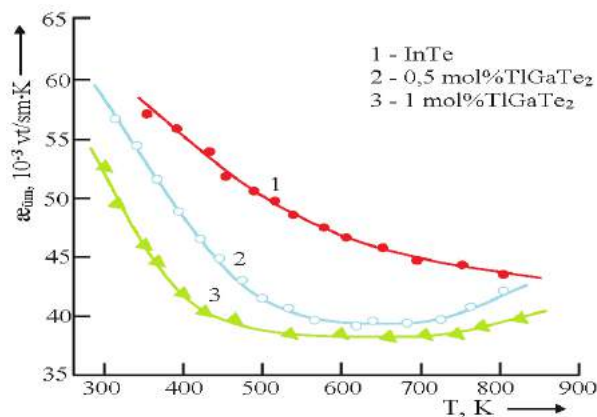
e-mail: mhsh28@mail.ru; [cabilov@yahoo.com](mailto:cabilov@yahoo.com)

InTe birləşməsində və  $(\text{InTe})_{1-x}(\text{TlGaTe}_2)_x$  bərk məhlul kristallarında istilik keçiriciliyinin və yükdaşıyıcılarının Holl yürüklüyünün temperatur asılılıqları tədqiq edilmişdir. Göstərilmişdir ki, həm birləşmədə, həm də bərk məhlul kristallarında istiliyin daşınması birfononlu mexanizm üzrə baş verir. Yüksək temperaturlarda istilik keçiriciliyində mürəkkəb mexanizmlər dominantlıq edir. Yükdaşıyıcıların səpilməsi isə aşağı temperaturlarda ionlaşan aşqar atomlarından, yüksək temperaturlarda isə kristallik qəfəsin istilik rəqslərindən baş verdiyi aşkar edilmişdir.

**Açar sözlər:** birfononlu mexanizm, ionlaşan aşqar atomları, kristallik qəfəsin istilik müqaviməti, istilik rəqslərindən səpilmə.

**PACS:** 09.09.29

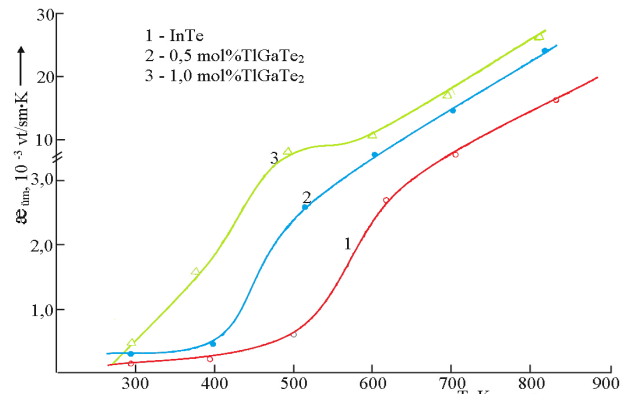
InTe-TlGaTe<sub>2</sub> sistemində faza tarazlığının təbiəti araşdırılarkən indium monotelluridi əsasında bərk məhlul sahəsinin mövcud olduğu aşkar edilmiş, onların bəzi fiziki-kimyəvi və elektrofiziki xassələri [1, 2]-də tədqiq olunmuşdur. Lakin bu materialın istilik xassələri haqqında ədəbiyyat məlumatları olmadığından bu istiqamətdə tədqiqatların yerinə yetirilməsi elmi və təbii əhəmiyyət kəsb edə bilər. Bu məqsədlə,  $(\text{InTe})_{1-x}(\text{TlGaTe}_2)_x$  bərk məhlul kristallarının iki tərkibində ümumi istilikkeçiriciliyinin və Holl yürüklüyünün temperatur asılılıqları ölçülmüşdür. Ölçmələr 300-850K temperatur intervalında [3]-də verilən metodikaya əsasən aparılmışdır. Təmiz InTe-un istilikkeçiriciliyinin temperatur asılılığı ~673÷1473 K temperatur intervalında [4] işinin müəllifləri tərəfindən yerinə yetirilmişdir ki, burada da ~923 K temperaturundan yüksəkdə birləşmə ərimiş halda olmuşdur. Əriməyə yaxın temperaturlarda isə, istilikkeçirmə əmsalı temperaturdan asılı olaraq, çox zəif düzxətli azalmaya meyl göstərir. Bizim ölçmələrdə də istilikkeçirmə əmsalının bu temperatur intervalındakı dəyişməsi, demək olar ki, eyni təbiətlidir (şəkil 1).



Şəkil 1. İndium monotelluridi və onun əsasında aşkar edilən  $(\text{InTe})_{1-x}(\text{TlGaTe}_2)_x$  bərk məhlul kristallarının ümumi istilik keçiriciliyinin temperatur asılılıqları.

Lakin 300-673 K intervalında  $\alpha_{im}$ -nin temperaturda dəyişməsi bir qədər güclüdür. Şəkil 1-dəki digər iki əyri  $(\text{InTe})_{1-x}(\text{TlGaTe}_2)_x$  bərk məhlullarının iki tərkibinə aiddir. Göründüyü kimi, hər iki bərk məhlul kristallarında 300-

600 K temperatur intervalında  $\alpha_{im}$ -nin dəyişməsi mənfi üstlü qanun üzrə dəyişir. Lakin ~623 K-dən yüksəkdə hər iki bərk məhlul tərkiblərində istilikkeçiriciliyinin artması müşahidə olunur. Ədəbiyyat məlumatlarından məlumdur ki, belə hal nümunələrdə bipolyar istilikkeçiriciliyinin yaranması ilə əlaqədar ola bilər [5]. Tədqiq edilən kristallarda istiliyin daşınma mexanizmini aydınlaşdırmaq məqsədilə ümumi istilikkeçiriciliyinin tərkib hissələri yəni, elektronlara və fononlara görə olan istilikkeçiriciliyi hesablanmış və onlar bir qədər geniş analiz edilmişdir. Burada əsasən Videman-Frans qanunundan və bipolyar istilikkeçiriciliyi üçün olan  $\alpha_{b-p} = 2L_0\sigma T \left( \frac{AE}{4kT} + 1 \right)^2$  düsturundan istifadə edilmişdir. 2-ci şəkildə InTe birləşməsinin və  $(\text{InTe})_{1-x}(\text{TlGaTe}_2)_x$  bərk məhlul kristallarının elektronlara görə baş verən istilikkeçiriciliyinin temperatur asılılıqları verilmişdir.

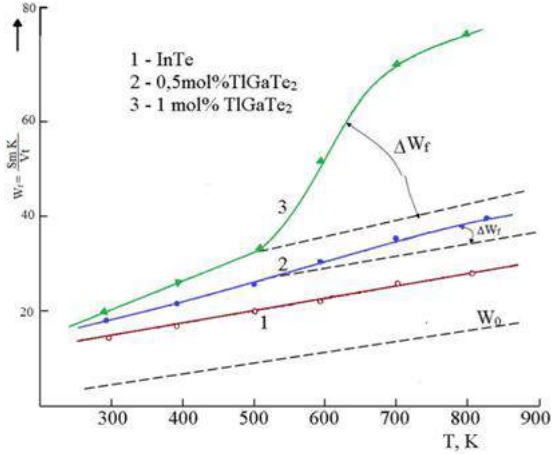


Şəkil 2. InTe və  $(\text{InTe})_{1-x}(\text{TlGaTe}_2)_x$  bərk məhlul kristallarının elektronlara görə istilikkeçiriciliyinin temperatur asılılıqları.

Göründüyü kimi, temperaturun yüksəlməsi elektronlara görə olan istilikkeçiriciliyinin artmasına səbəb olur. Hər üç nümunədə  $\alpha_{el}$  əmsalı temperaturdan asılı olaraq kəskin artıma malikdir. Görünür, yüksək temperaturlarda istilikkeçiriciliyində elektronların rolu nəzərə çarpacaq dərəcədədir. Lakin, fikrimizcə, kristallarda istiliyin daşınmasında əsas rol fononlara məxsusdur. Bu səbəbdən, tədqiq edilən nümunələrin fonon istilikkeçiriciliyi hesablan-

mış, onun tərs qiymətinə əsasən fonon istilik müqaviməti tapılmış və temperatur asılılığı qurulmuşdur (şəkil 3).

Göründüyü kimi, hər üç nümunədə temperaturun yüksəlməsi ilə kristallik qəfəsin istilik müqaviməti də artır. Lakin belə artma aşqarsız InTe-də istilik müqavimətinin nəzəri hesablanmış qiymətinə ( $W_0$ ) uyğun olaraq düzxətlidirsə, tərkibində TlGaTe<sub>2</sub> olan nümunələrdə belə uyğunluq yalnız aşağı temperaturlarda (~500 K-ə qədər) ödənilir.



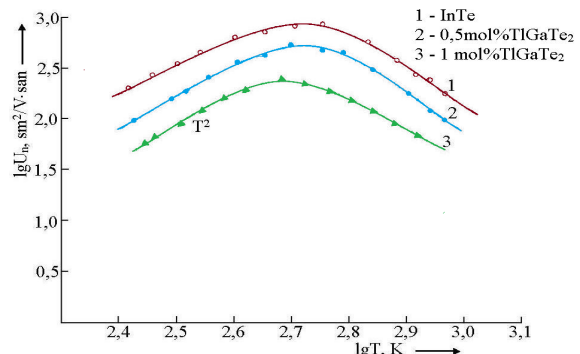
Şəkil 3. InTe və  $(\text{InTe})_{1-x}(\text{TlGaTe}_2)_x$  bərk məhlul kristallarının fonon istilik müqavimətinin temperatur asılılıqları.

Temperaturun sonrakı yüksəlməsi əlavə fonon istilik müqavimətinin ( $\Delta W_f$ ) yaranması ilə müşahidə olunur. Lakin bərk məhlulun birinci tərkibində (0,5 mol% TlGaTe<sub>2</sub>) əlavə fonon istilik müqavimətinin qiyməti kiçikdir. Tərkibində ikinci komponentin miqdarı çox olan nümunədə isə fonon istilik müqavimətinin qiyməti daha böyükdür. Hesablamalardan məlum olmuşdur ki,  $(\text{InTe})_{0,995}(\text{TlGaTe}_2)_{0,005}$  tərkibli nümunədə istiliyin daşınması  $T^{-0,01}$  qanunu,  $(\text{InTe})_{0,99}(\text{TlGaTe}_2)_{0,01}$  tərkibli nümunələrdə isə 500 K-ə qədər  $T^{-0,05}$  daha yüksək temperaturlarda isə  $T^{-0,16}$  qanunu üzrə baş verir. Yəni, burada birfononlu istilik daşınması hadisələri üstünlük təşkil edir. Üst əmsallarının qiymətlərinə görə isə belə bir nəticəyə gəlmək olar ki, göstərilən nümunələrdə fonon səpilməsində dislokasiyalardan olan səpilmə də özünə yer tapır [6]. Tədqiq edilən məhlulların anizotropluğa malik InTe birləşməsi əsasında alınmasını nəzərə alsaq, kristallik quruluşda dislokasiya tipli defektlərin mövcudluğu şübhə doğurmamalıdır. Bərk məhlul nümunələrində əmələ gələn əlavə fonon müqavimətinin qiymətini kəmiyyətə  $\Delta W = W_f - W_{\text{birfonon}}$  düsturu ilə qiymətləndirmək olar. Yuxarıda qeyd edildiyi kimi, yüksək temperaturlarda bərk məhlul kristallarında istilik keçiriciliyinin böyüməsi müşahidə olunur. Adətən, belə hadisəni bipolyar istilik keçiriciliyi

ilə əlaqələndirirlər [ 5,6]. Lakin  $\alpha_{b-p} = 2L_0\sigma T \left( \frac{\Delta E}{4kT} + 1 \right)^2$

ifadəsindən istifadə edərək yerinə yetirilən hesablamalar müsbət (qənaətbəxş) nəticələr vermədiyindən, tədqiq edilən bərk məhlul tərkiblərində yüksək temperaturlarda istilik keçiriciliyində digər mexanizmlərin mövcudluğu qənaətinə gəlmək olar. Belə ki, [5,6]-də göstərilir ki, GaTe, GaSe, InSe və s. kimi yarımkeçiricilərdə yüksək tem-

peraturlarda ( $T > 480$  K) əlavə istilikkeçiriciliyi yaranır ki, o da temperaturla eksponensial olaraq artır. Bu eksitonlara görə olan istilikkeçiriciliyidir. Digər tərəfdən göstərilir ki,  $A^{III}B^{VI}$  tipli birləşmələrdə yüksək temperaturlarda bu mexanizmlər zəifləyir [5] və əvəzində elektron keçidlərinin aktivləşən enerjilərinin güclənməsi hesabına istilikkeçiriciliyi yüksəlməsi prosesi baş verir. Fikrimizcə, tədqiq edilən  $(\text{InTe})_{1-x}(\text{TlGaTe}_2)_x$  bərk məhlullarında GaTe tərkibli çox kiçik ölçülü assosiatlar əmələ gələ bilər və onlar da ümumi istilikkeçiriciliyinə göstərilən mexanizmlərlə təsir edə bilərlər. Nəhayət, yüksək temperaturlarda  $A^{III}B^{VI}$  tipli birləşmələrdə istilikkeçiriciliyinin yüksəlməsinin bir səbəbi də eksitonlara görə yaranan istilikkeçiriciliyidir ki, bu mexanizm  $(\text{InTe})_{1-x}(\text{TlGaTe}_2)_x$  bərk məhlul kristallarında da yarana bilər. Təəssüf ki, sonuncu bu iki mexanizmin ümumi istilikkeçiriciliyindəki payının kəmiyyətə hesablanması mümkün olmamışdır. Lakin, 2-ci şəkildən göründüyü kimi, elektronlara görə olan istilikkeçiriciliyinin artması, xüsusilə də ~600 K temperaturundan yüksəkdə belə artmanın kəskin eksponensial olması, göstərilən sonuncu üç mexanizmdən tədqiq edilən kristallarda birincisinin, yəni yüksək temperaturlarda elektron keçidlərinin aktivləşən enerjiləri mexanizminin hesabına ümumi istilikkeçiriciliyinin yüksəlməyə meyli göstərməsi mövcudluğunu real qəbul etmək olar. Bu mexanizmin modelinə görə enerjinin rezonans ötürülməsi hesabına yüksək temperaturlarda istilikkeçiriciliyi arta bilər [7,8]. Modelin özünü isə aydınlaşdırmaq üçün, fərz etmək olar ki, tədqiq edilən nümunələrdə iki lokallaşmış donor vəziyyəti yaranıb. Onlardan biri elektronla zəbt olunmuş, digəri isə boşdur. Yükdaşıyıcıların qarşılıqlı təsiri nəticəsində donor səviyyəsində və keçiricilik zonasında rezonans keçidləri baş verir. Bu zaman elektron donor səviyyəsindən keçiricilik zonasına həyacanlanır və eyni zamanda keçiricilik zonasında elektron sərbəst donor tərəfindən tutulur, donor vəziyyətinin ionlaşma enerjisi ( $E_{don}$ ) ikinci donordan birinci donora ötürülür. Əgər donorun iki vəziyyəti arasında  $\Delta T$  temperatur fərqi mövcudursa, o zaman ionlaşma enerjisinin daşınması baş verir. Belə enerjinin istilikkeçiriciliyindəki payını hesablamaq çətinidir, lakin [5]-də onun kəmiyyətə hesablanma ifadəsi verilmişdir.



Şəkil 4. InTe birləşməsi və  $(\text{InTe})_{1-x}(\text{TlGaTe}_2)_x$  bərk məhlul kristallarında yükdaşıyıcılarının Holl yürüklüyünün temperatur asılılıqları.

$(\text{InTe})_{1-x}(\text{TlGaTe}_2)_x$  bərk məhlul kristallarında və InTe birləşməsində yükdaşıyıcılarının səpilmə mexanizmi Holl yürüklüyünün temperatur asılılığından (şəkil 4) aydınlaşdırılmışdır.

Şəkildən göründüyü kimi, aşağı temperaturlarda (~400K-ə qədər) yükdaşıyıcılarının yürüklüyü  $T^{(1,4 \pm 2,0)}$  qanunu üzrə dəyişir ki, bu da səpilmənin ionlaşmış aşqar atomlarından baş verdiyini göstərir. Lakin ~450K temperaturundan yüksəkdə yürüklük  $T^{3,3}$  qanununa tabe olur. Yəni bu zaman səpilmə kristallik qəfəsin istilik rəqsləri-

nin nəticəsi olaraq meydana gəlir.  $lgU_N \sim f lg(T)$  qrafiklərinin yayılmış maksimuma malik olması yükdaşıyıcılarının səpilməsində daha bir mexanizmin mövcudluğunu, yəni burada polyarlaşmış optik rəqslərdən səpilmənin olduğunu göstərir.

- [1] M.Ş. Həsənova, Ç.İ. Əbilov. InTe-TlGaTe<sub>2</sub> sistemi ərintilərinin fiziki-kimyəvi və bəzi Elektrofiziki xassələri. «Elmin fundamental və tətbiqi problemləri», VI Beynəlxalq simpoziumunun materialları. Moskva, 2011, MCHT tiqrafiyası, cild 1, s. 46-51.
- [2] Ç.İ. Əbilov, A.N. Məmmədov, M.Ş. Həsənova, S.Ə. Quliyeva. InTe-TlGaTe<sub>2</sub> sistemində faza-mələgəlməsi. «Kimya elminin müasir problemləri və formasiyası». Ümumrosiya konfransının materialları. Rusiya, Çeboksari, 2014, ÇDU-nun tiqrafiyası, s.12.
- [3] M.A. Kretova, E.C. Avilov, B.C. Zemkov. Введение в методику экспериментов. Результаты и их обсуждения. М., 2004, Наука, 196 с.
- [4] В.И. Федоров, В.И. Мачуев. ФТТ, 1968, том 8, №12, с.2263-2265.
- [5] В.М. Мозилевский, А.Ф. Чудновский. Теплопроводность полупроводников М., 1972, Наука, 536 с.
- [6] В.С. Оскотски, И.А. Смирнов. Дефекты в кристаллах и теплопроводность М.,1972, Наука,160 с.
- [7] S. Koshino. J. Phys. Soc. Japan. 1960, vol. 15, p.1538.
- [8] S. Koshino, T. Ando. J. Phys. Soc. Japan. 1961, vol. 16, p. 1151.

**M.Sh. Hasanova, Ch.I. Abilov**

**THE NATURE OF THE ELECTRON AND PHONON SCATTERING IN CRYSTALS OF INDIUM MONOTELLURIDE AND SOLID SOLUTIONS (InTe)<sub>1-x</sub>(TlGaTe<sub>2</sub>)<sub>x</sub>**

The temperature dependences of the total thermal conductivity and Hall mobility of carriers in InTe crystals and (InTe)<sub>1-x</sub>(TlGaTe<sub>2</sub>)<sub>x</sub> solid solutions are investigated. It is shown that both in crystals and compounds of solid solutions the heat transfer occurs by single background mechanism. Complex mechanisms dominate in the thermal conductivity at high temperatures. It is observed that the scattering of carriers is carried out by ionized impurity atoms at low temperatures and by thermal vibrations of the crystal lattice at high temperatures

**М.Ш. Гасанова, Ч.И. Абилов**

**ПРИРОДА ЭЛЕКТРОННОГО И ФОНОННОГО РАССЕЯНИЯ В КРИСТАЛЛАХ МОНОТЕЛЛУРИДА ИНДИЯ И ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ (InTe)<sub>1-x</sub>(TlGaTe<sub>2</sub>)<sub>x</sub>**

В кристаллах соединения InTe и твердых растворов (InTe)<sub>1-x</sub>(TlGaTe<sub>2</sub>)<sub>x</sub> исследованы температурные зависимости общей теплопроводности и Холловской подвижности носителей тока. Показано, что как в соединении, так и в кристаллах твердых растворов перенос тепла осуществляется однофонным механизмом. При высоких температурах в теплопроводности доминируют сложные механизмы. Выявлено, что рассеяние токоносителей при низких температурах осуществляется от ионизированных примесных атомов, а при высоких температурах от тепловых колебаний кристаллической решетки.

*Qəbul olunma tarixi: 23.09.2016*