

YARIMKEÇİRİCİ-METAL TIPLİ KOMPOZİTLƏRİN ELEKTRON VƏ FONON PROSESLƏRİNDƏ FAZALARARASI ZONALARIN ROLU

R.N.RƏHİMOV

*Azərbaycan MEA-nın Fizika İnstitutu
AZ 1143, Bakı şəh.. H.Javid pr., 33*

Yarımkəçirici-metal tipli GaSb-FeGa_{1,3}, InSb-MnSb və InSb-FeSb evtektik kompozitlərin elektrik və istilik keçiriciliyinin eksperimental bilgiləri “effektiv mühit nəzəriyyəsi” və Kallavey-Klemens modeli əsasında fazalararası qarşılıqlı təsir nəzərə alınaraq analiz edilmişdir. Metal iynələrin müxtəlif istiqamətlərində elektrik keçiriciliyinin anizotropluğuна səbəb olan qısaqapanma prosesində fazalararası zonaların mühüm rol oynadığı müəyyən edilmiş, istilik keçiriciliyin anizotroplığunda və GaSb-FeGa_{1,3} evtektik kompozitin fonon termoelektrik hərəkət qüvvəsinin təsirinin zəifləməsində uzununa uzundalğalı fononların fazalararası zonaların sərhədindən səpilməsinin başlıca amil olduğu göstərilmişdir.

GİRİŞ

III-V qrup yarımkəçirici birləşmələr və 3d keçid elementləri əsasında istiqamətli kristallaşma üsulu ilə alınan evtektik kompozitlərdə metal faza matrisada iynələr şəklində bircins və paralel paylandığından, onların bir çox fiziki xassələrində anizotropluq müşahidə olunur [1-5]. Belə kompozitlərin həm yarımkəçirici, həm də metal xassələrini özündə cəmləşdirməsi və həmçinin xarici təsirlərlə (elektrik və maqnit sahələri, işıq, temperatur, təzyiq və müxtəlif aşqarlar) idarə olunması onların elm və texnikanın müxtəlif sahələrində tətbiq dairəsini genişləndirir [6-9].

Məlumdur ki, evtektik kompozitə sadəcə mexaniki qarışıq kimi baxmaq olmaz. Bircinsli mühitdən fərqli olaraq, kompozitlərdə fiziki parametrlər koordinatın funksiyasıdır. Çox fazalı sistemlərdə bu funksiya kəsiləndir. Yarımkəçirici-metal tipli evtektik kompozitlərdə aşağı simmetriyalı qəfəsə malik olan metal fazanın yarımkəçirici matrisa içərisində mövcudluğu fazalararası sərhəddə qəfəsin güclü təhrifinə gətirir. Bundan başqa fazalararası qarşılıqlı təsir güclü nizamsızlığa gətirərək qəfəsin periodik potensialını dəyişdirə bilər [1-5, 10-12] və nəticədə elektron və fonon proseslərində bir sıra xüsusiyyətlər yaradır.

Fazaların sərhəd səthlərində yaranan struktur və elektron-enerji halları fazaların həcmi üçün xarakterik olmadığından elektrik yükünün və istiliyin daşınmasında fazalararası qarşılıqlı təsirin nəzərə alınması, qeyri bircinsliliklə bağlı bir sıra məsələlərin həlli, o cümlədən effektiv keçiriciliyin hesablanması vacib məsələlərdən sayılır. Lakin qeyri-bircins mühit üçün effektiv parametrlərin hesablanması, bircinsli mühitdən fərqli olaraq, əlavə riyazi çətinliklərə gətirir. Belə sistemlərdə parametrlərin effektiv qiymətinin təyini məsələsi Maksvel-Qarnetdən [13] başlayaraq uzun müddət ərzində müzakirə obyektinə olmasına baxmayaraq, hələ də bu məsələni həll edən yetkin nəzəriyyə yaradılmamışdır. Mühitin qeyri bircinslilik dərəcəsi asılı olaraq bu nəzəriyyələr müxtəlif hallar üçün işlənmişdir. Sistemin qeyri-bircinslilik dərəcəsi (heterogenliliyi) az olduqda Herrinqin “həyəcanlanma” (perurbation) nəzəriyyəsi [14], qeyri-bircinslilik dərəcəsi yüksək olduqda “süzülmə” (perkolation) nəzəriyyəsi [15-17], aralıq hallarda isə Bruqqemanın “effektiv mühit nəzəriyyəsi” [18, 19] tətbiq edilir. Tərkibdən asılı olaraq fiziki parametrlərin dəyişməsinə öncədən təyin etmək üçün yararlı olan belə modellər daha çox praktiki əhəmiyyət kəsb edir.

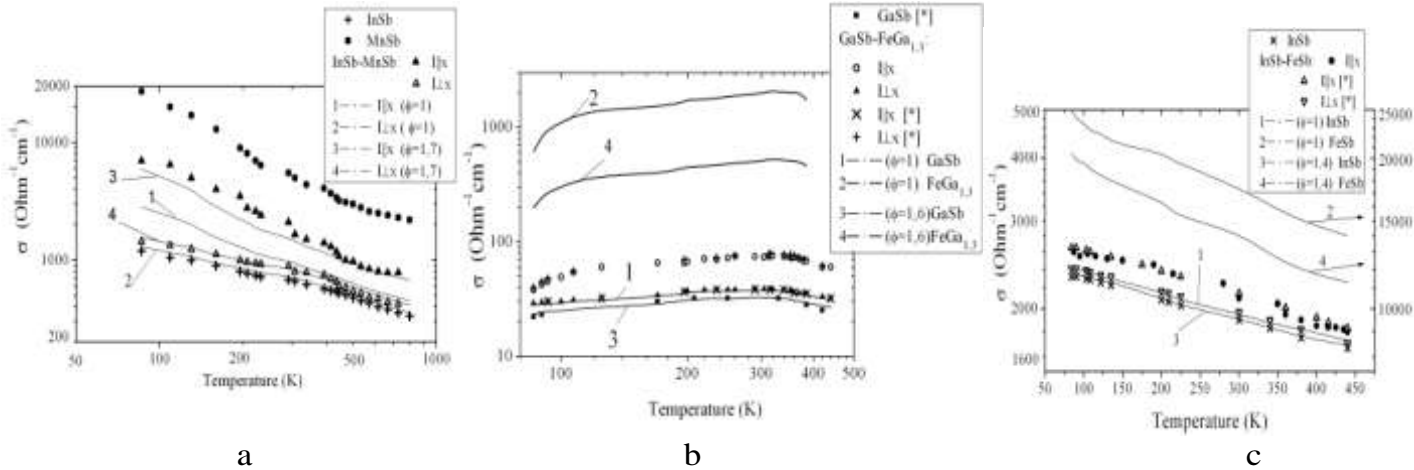
Yarımkəçirici-metal tipli evtektik kompozitlərin parametrləri metal iynələrin ölçülərinin və sıxlığının dəyişdirilməsi ilə idarə olunmasının mümkünlüyü və onlardan optik polarizatorlar, infraqırmızı şüaların detektorunda və tenzoresistorlarda həssas element kimi istifadə olunması bu maddələrdə fazalararası qarşılıqlı təsirin

öyrənilməsinin aktuallığını artırır. Bu işdə GaSb-FeGa_{1,3}, InSb-MnSb, InSb-FeSb evtektik kompozitlərdə fazalararası zonaların elektron və fonon proseslərində yaratdığı xüsusiyyətlər araşdırılaraq, onları doğuran səbəblər nəzəri modellər əsasında müəyyən edilmişdir.

TƏDQIQATLARIN APARILMASI

InSb, GaSb yarımkeçirici birləşmələr və 3d keçid metallar əsasında yaranan evtektik kompozitlərin alınma texnologiyası əvvəllər dərc olunmuş işlərimizdə [1-5] təsvir olunmuş, “PhilipsTM” markalı elektron mikroskopu (SEM) və EDAXTM rentgen spektroqrafı tətbiq olunaraq GaSb-FeGa_{1,3}, InSb-FeSb və InSb-MnSb evtektik kompozitlərin mikrostrukturunu tədqiq olunmuşdur. Müəyyən olunmuşdur ki, kristallaşma oxu boyunca bir-birinə paralel düzülərək əsas matrisa içərisində bərabər paylanan iynəşəkilli metal fazaların ətrafında qeyri bərabər şəkildə örtük yaranır: fazalar arası zona adlandırılan belə örtük kələ-kötür quruluşa malik olmaqla yanaşı, onların ölçüləri iynələr boyunca hiss olunacaq dərəcədə fərqlənir [1, 2]. Rentgen spektral (EDX) analizi ilə GaSb-FeGa_{1,3} kompozitində matrisanın Ga və Sb atomlarından, metal iynələrin Fe, Ga atomları ilə yanaşı Sb (5-6 çəki%) atomlarından təşkil olunduğu, fazalar arası zonaların isə Sb (32 çəki %), Fe (16 çəki %) və Ga (50 çəki %) atomlarından ibarət olduğu müəyyən edilmişdir [1].

1-ci şəkildə GaSb-FeGa_{1,3} (a), InSb-MnSb (b) və InSb-FeSb (c) üçün cərəyanın (I) və iynələrin (x) müxtəlif qarşılıqlı istiqamətlərində kompensasiya üsulu ilə ölçülmüş elektrik keçiriciliyin temperatur asılılığı verilmişdir. Şəkillərdə [1,4,5] işlərindən götürülmüş eksperimental nəticələr də verilmişdir. Yarımkeçirici matrisada nizamlı düzülmüş metal iynələrin olması elektrik keçiriciliyin anizotropluğuna səbəb olur [1-3]. LLx olduqda evtektik ərinti üçün $\sigma(T)$ asılılığı, eyni konsentrasiyalı GaSb və InSb üçün $\sigma(T)$ asılılığına uyğundur. I||x olduqda isə evtektik kompozitin keçiriciliyi artır.

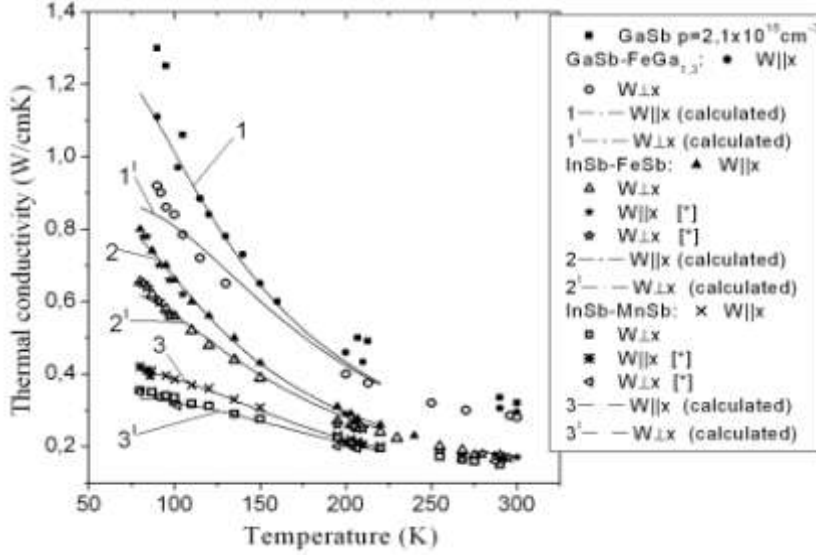


Şəkil 1.

InSb-MnSb (a), GaSb-FeGa_{1,3} (b) və InSb-FeSb (c) üçün, cərəyanın (I) və iynələrin (x) müxtəlif qarşılıqlı istiqamətlərində elektrik keçiriciliyin temperatur asılılığı. [*] bilgiləri uyğun olaraq [5,1,4] işlərindən götürülmüşdür. 1, 2, 3, 4 ayrıları (3), (4) və (6) ifadələri ilə hesablanmışdır.

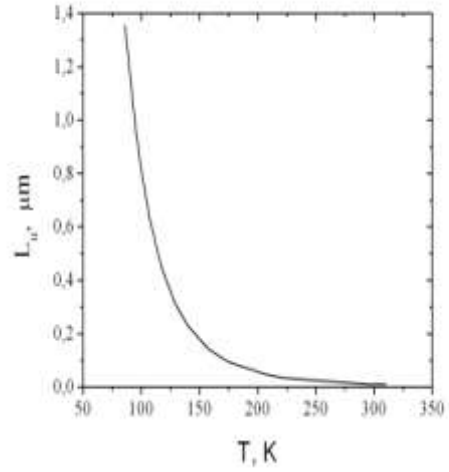
Göstərilən kompozitlərin istilik keçiriciliyi stasionar istilik seli üsulu ilə, temperatur keçiriciliyi isə işıq impulsu ilə ölçülmüşdür [2]. Temperatur keçiriciliyin bilgiləri əsasında hər üç kompozit üçün istilik keçiriciliyin hesablanmış qiymətləri 2-cü şəkildə verilmişdir. Şəkildə InSb-FeSb və InSb-MnSb evtektik kompozitləri üçün [4,5] işdən götürülmüş eksperimental nəticələr də verilmişdir. Metal fazanın və istilik selinin qarşılıqlı istiqamətindən asılı olaraq müşahidə olunan anizotropluğun dərəcəsi 80K temperaturda InSb-FeSb və InSb-MnSb evtektik kompozitləri üçün 1.2 və GaSb-FeGa_{1,3} kompoziti üçün 1.3 olmuşdur. Temperatur artdıqca anizotropluq azalır və yuxarı

temperaturalarda yox olur. Bu kompozitlərdə elektron istilik keçiriciliyi cüzidir və istilik əsasən qəfəs rəqsləri ilə daşınır.



Şəkil 2.

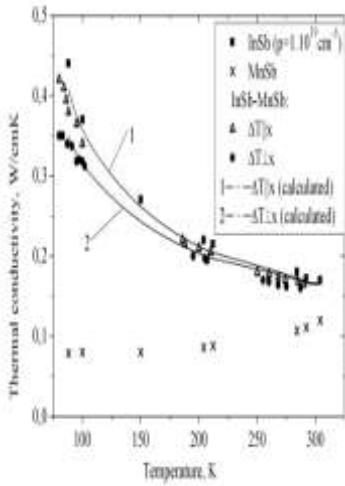
GaSb-FeGa_{1.3}, InSb-FeSb və InSb-MnSb üçün istilik keçiriciliyin temperatur asılılığı. Bütöv əyriyə (10) və (11) ifadələri ilə hesablanmışdır. [*] bilgiləri [4,5] işdən götürülmüşdür.



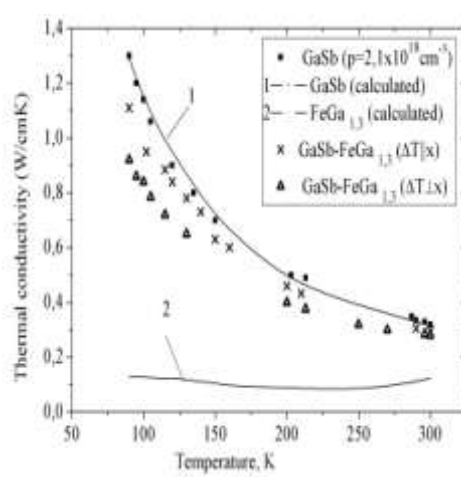
Şəkil 3.

Uzundalğalı fononların sərbəst qaçış yolunun temperatur asılılığı.

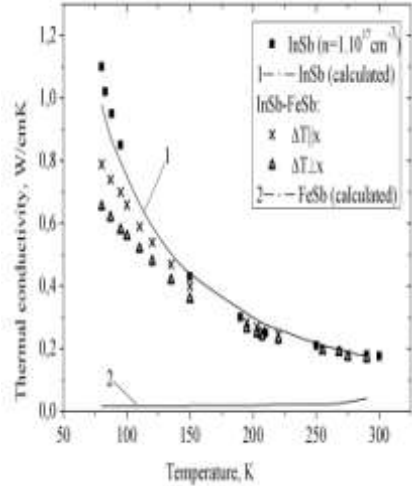
5-cı şəkildə GaSb-FeGa_{1.3} kompoziti üçün termoelektrik hərəkət qüvvəsinin temperatur asılılığı verilmişdir. İynələrin və istilik selinin müxtəlif istiqamətlərində termoelektrik hərəkət qüvvəsinin temperatur asılılığında müşahidə olunan anizotropluq dərəcəsi $\alpha_{\perp} / \alpha_{\parallel} = 2.2$ olur. $\Delta T || x$ halında iynələrlə qısaqapanma hadisəsi termoelektrik hərəkət qüvvəsini azaldır.



a



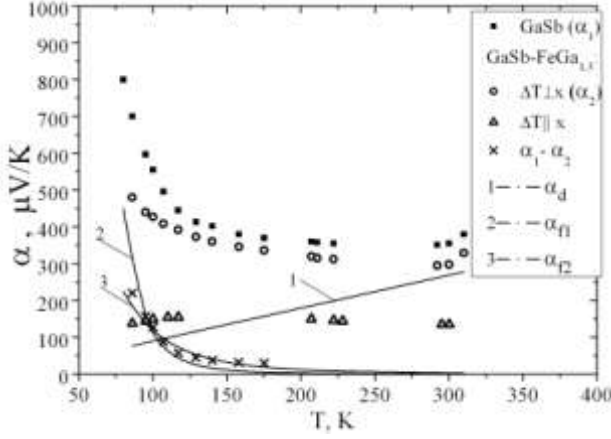
b



c

Şəkil 4.

InSb-MnSb (a), GaSb-FeGa_{1.3} (b) və InSb-FeSb (c) üçün istilik keçiriciliyin temperatur asılılığı. Əyriyə (6) və (12) tənlikləri ilə hesablanmışdır.



Şəkil 5.

GaSb ($p=2.1 \cdot 10^{18} \text{ sm}^{-3}$) [49] və GaSb-FeGa_{1,3} üçün termoelektrik hərəkət qüvvəsinin temperatur asılılığı. 1(α_d) əyrisi (14) düsturu ilə, 2 (α_{f1}) əyrisi (10), (16) və (15) ifadələri ilə, 3 (α_{f2}) əyrisi (12), (16) və (15) ifadələri ilə hesablanmışdır.

NƏTİCƏLƏRİN MÜZAKİRƏSİ

Kinetik parametrlərdə müşahidə olunan anizotropluğu doğuran səbəbləri və fazalararası zonaların oynadığı rolunu araşdırmaq üçün mövcud olan nəzəriyyələr və modellər əsasında evtektik kompozitin hər bir parametri hesablanaraq eksperimental bilgilərlə müqayisə edilməlidir.

Məlumdur ki, qeyri bircins sistemlərdə, xüsusən kompozit materiallarda, qatmaların (*inclusions*) konsentrasiyası az olduqda, başqa sözlə komponentlərdən biri özünü matrisa kimi, digəri isə kiçik miqdarda onun içərisində izolə olunmuş qatmalar şəklində olarsa, belə sistem üçün Maksvel-Qarnet modeli [13] doğrudur. Kompozit mühiti matrisaya və qatmalara ayırmaq mümkün olmadıqda (statistik mühit halında) daha çox Bruqqeman modeli [18] istifadə olunur. Bu modeldə fərz olunur ki, hər bir zərrəcik matrisada deyil, parametrləri hər bir komponentin parametrlərindən fərqlənən effektiv mühiddə yerləşir.

Real kompozitdə qatmaların konfigurasiyası müxtəlif formada olur və effektiv mühit modeli istifadə olunarkən onların forma və ölçülərinin nəzərə alınması mühüm şərtədir. Effektiv keçiriciliyin hesablanmasına həsr olunmuş küllü miqdarda tədqiqat işlərində bu modellər daha çox ikinci fazası kürə və ya ellipsoid şəklində olan kompozitlər üçün işlənərək inkişaf etdirilmişdir [18-24]. Balaqurovun [25] təklif etdiyi metodda isə effektiv keçiriciliyi hesablayarkən ikinci faza müstəvi halında (dairə formasında) götürülür. Kryuk və b. isə [26] yarımkeçirici və yarımmetal kompozitlər üçün məsələni həll edərək sirkulyasiya cərəyanlarının keçiriciliyə təsirini nəzərə alan model vermişlər. Metal fazası silindrik şəkildə olan və anizotrop xassəyə malik heterogen sistemlərin effektiv keçiriciliyinə həsr olunmuş işlərin sayı çox deyildir [24,27,28]. Yarımkeçirici matrisadan və onun içərisində paralel düzülmiş metal qatmalardan ibarət heterogen sistemlərin ümumiləşdirilmiş keçiriciliyini hesablamaq üçün Odelevskiyin təklif etdiyi model daha əlverişlidir. Odelevskiy [27] sadə matrisadan ibarət struktura baxmış və qatmaların böyük konsentrasiyalarında sistemin ümumiləşdirilmiş keçiriciliyini hesablamaq üçün ifadələr vermişdir. Onun modelinə görə fazanın müqavimətindən və cərəyanın istiqamətindən asılı olaraq hər bir fazanın keçiriciliyi və ya müqaviməti toplanılır. Liebman və Müller [28] və həmçinin Leonov və b. görə [29] $I \parallel x$ olduqda evtektik struktura iki paralel keçirici kimi, $I \perp x$ olduqda isə ardıcıl və paralel birləşmiş keçiricilərin kombinasiyası kimi baxmaq olar. Kristallaşma istiqamətində (σ_{\parallel}) və ona perpendikulyar istiqamətdə (σ_{\perp}) elektrik keçiriciliyin effektiv qiymətləri üçün aşağıdakı ifadələr verilmişdir [27]

$$\sigma_{\parallel} = \sigma_1 \frac{1}{1+c} + \sigma_2 \frac{c}{1+c} \quad (3)$$

$$\sigma_{\perp} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)(1 - \sqrt{c/(1+c)}) + \sigma_1 \sqrt{(1+c)/c}}{1 + (\sigma_2/\sigma_1)(\sqrt{(1+c)/c} - 1)}, \quad (4)$$

burada σ_1 və σ_2 - matrisanın və metal fazanın elektrik keçiriciliyi, c - metal iynələrin ümumi həcmnin matrisanın həcminə nisbətidir

$$c = \frac{V_i N_i}{1 - V_i N_i}, \quad (5)$$

burada N_i - metal fazanın sıxlığı, V_i - bir metal iynənin həcmidir.

İstilik selinin metal iynələrə paralel və perpendikulyar istiqamətlərində istilik keçiriciliyin effektiv qiyməti üçün aşağıdakı düsturlardan istifadə olunmuşdur [29]:

$$K_{\parallel} = K_2 + (1-c)(K_1 - K_2); \quad K_{\perp} = K_2 + \frac{2K_2(1-c)(K_1 - K_2)}{2K_2 + c(K_1 - K_2)}, \quad (6)$$

burada, K_1 və K_2 - uyğun olaraq matrisanın və metal fazanın istilik keçiriciliyi, K_{\parallel} və K_{\perp} - istilik selinin iynələrə paralel və perpendikulyar istiqamətlərində evtektik kompozitin istilik keçiriciliyidir. Bu formulların köməyi ilə həm kompozitin, həm də ayrı-ayrı komponentlərin effektiv istilik keçiriciliyini təyin etmək mümkündür.

Qeyd etmək lazımdır ki, effektiv parametrləri hesablamaq üçün təklif olunan bu və digər ifadələrə kompoziti təşkil edən komponentlərin parametrləri və onların həcmi fraksiyaları daxil olduğu halda, fazalararası qarşılıqlı təsiri və ya fazalararası zonaların rolunu nəzərə alan parametr daxil deyil. Bu səbəbdən də əvvəllər aparılmış hesablamalarla təcrübi nəticələr arasında yaxşı uyğunluq alınmamışdır [1].

Son onillikdə polimer əsaslı kompozitlərdə və çox zərrəciklərdən ibarət mikrostrukturlu betonda kinetik parametrlərin effektiv qiymətini təyin etmək üçün fazalararası qarşılıqlı təsirin nəzərə alınması məsələsi intensivləşmişdir [28,31-37]. Kalnin [31] kompozitin diffuziya əmsalını hesablamaq üçün nüvə-örtük modelinə (core-shell model) əsasən Maksvell-Qarnet tənliyinə düzəliş etmişdir. O, kompoziti təşkil edən müxtəlif ölçülü kürəvi zərrəciklərin hər birinin ətrafında örtük yarandığını qəbul edərək, örtüyün və kürənin radiusları nisbətini diffuziya əmsalının ifadəsinə daxil etmişdir. Felske [32] effektiv istilik keçiriciliyini təyin etmək üçün “özü razılaşıdırılmış sahə” modelinə əsaslanmış, köpüklü sintaktik kompoziti kəsilməz mühitlə əhatə olunmuş kürəvi nüvələr kimi təsvir etmişdir. Nüvə ilə mühit arasında mövcud olan kontaktın istilik müqaviməti istilik keçiriciliyin ifadəsində nəzərə alınmışdır. [28] işində müəlliflər Reley modelindən istifadə edərək dairəvi silindir şəkilli qatmalardan ibarət üç fazalı kompozitin istilik keçiriciliyini hesablamışlar. Hazırda kompozit maddələrin keçiriciliyini öncədən söyləmək üçün bu modellər inkişaf etdirilərək yeni diferensial effektiv mühit nəzəriyyəsi təklif olunmuşdur. [34,35] işində “diferensial effektiv mühit nəzəriyyəsi” əsasında fazalararası keçirici zonaların keçiricilikdə mühüm rol oynadığı göstərilmişdir. [36] işin müəllifləri isə sferik qatmalardan ibarət kompozit üçün yeni model təklif etmişlər. Onların modelində hər bir qatma fərqli elastiklik moduluna malik olan və radiusun dəyişməsi ilə müntəzəm dəyişən lokal regionla əhatə olunmuşdur. Mürəkkəb zərrəciklər ətrafında yaranan bu region kompozitlərdə fazalararası zona, betonda isə keçirici zona adlandırılır. Kompozitin effektiv keçiriciliyi hesablanarkən fazalararası zonaların heterogen, onların keçiriciliyinin isə matrisanınkına bərabər olduğu hesab edilir. [37] işin müəllifləri effektiv keçiriciliyi hesablayarkən ikinci fazanın həcmi deyil, onun effektiv həcmnin götürülməsini təklif etmişlər. Son dövrlərdə “nüvə-örtük” modeli kompozit materialların tədqiqatında geniş tətbiq olunur [33,34,36,38,39]. [39] işin müəllifləri hətta eksperimental olaraq “nüvə-örtük” tipli nanozərrəciklər müşahidə etmişlər.

Polimer əsaslı kompozitlərə və mikrostrukturlu beton kompozitlərə nisbətən yarımkeçirici-metal tipli evtektik kompozitlərdə bu məsələnin həlli daha çətinidir. Xüsusi keçiriciliyin təhrifi təkcə metal fazanın daxilində deyil, həm də onun hüdudlarından kənar da baş verir. Əgər ikinci faza metaldırsa, onda o, emitterləşdirici (şüalandırıcı) elektrod rolunu oynayaraq, yarımkeçiriciyə bitişik layda elektronların müəyyən n

konsentrasiyasını yaradacaqdır. Yarımkəçiricidə yükdaşıyıcıların (elektron və deşiklər) həcmi konsentrasiyası n və ya p qiymətindən fərqləndiyindən, metal fazadan l məsafədə keçiriciliyi artmış, ya da azalmış lay yaranacaq. Əgər ikinci faza qeyri-metaldırsa, onda yarımkəçiricidən ona emitterlənmiş elektrik yükü kifayət dərəcədə az olacaq və yarımkəçiricinin l layında keçiriciliyin təhrifi çox olmayacaqdır. Metal qatmalar və matrisa müxtəlif konsentrasiyalı yükdaşıyıcılara malik olduqda yükdaşıyıcıların diffuziyası baş verəcək, əks işarəli yükdaşıyıcılara malik olduqda isə fazalar arasında p-n keçidi yarana bilər. Belə keçidlərin kontakt müqaviməti elektrik yükünün və istiliyin daşınma hadisələrinə ciddi təsir edərək bir sıra xüsusiyyətlər yaradır.

GaSb-FeGa_{1,3} evtektik kompoziti üçün elektron mikroskopundan aldığımız mikroqrafika təsvirləri əsasında metal iynələr ətrafında matrisa və metal fazanın elementlərindən təşkil olunmuş fazalararası zonaların yarandığı müəyyən olunmuşdur [2]. Parametrlərin effektiv qiyməti hesablanarkən fazalararası qarşılıqlı təsir fazalararası zonaların həcmi fraksiyasının daxil edilməsi ilə nəzərə alın bilər. Digər kompozitlərdən [36] fərqli olaraq, yarımkəçirici-metal tipli kompozitlərdə biz fazalararası zonanın keçiriciliyini metal qatmaların keçiriciliyi tərtibində götürmüşük. Hesablamalarda fazalararası zonaların rolunu nəzərə almaq üçün metal iynələr və onun ətrafındakı örtüklər (fazalararası zonalar) bir-birinin içərisinə yerləşdirilmiş a və b radiuslu silindirlər şəklində təsvir olunaraq, (5) ifadəsində V_i həcmi V_{ef} effektiv həcmi ilə əvəz edilmişdir [2]

$$V_{ef} = V_i \phi^2 \quad \text{və} \quad c_{ef} = \frac{V_i N_i \phi^2}{1 - V_i N_i \phi^2}, \quad (7)$$

burada, $\phi = b/a$.

A. ELEKTRİK KEÇİRİCİLİYİNDƏ FAZALARARASI ZONALARIN ROLU

Elektrik keçiriciliyində müşahidə olunan anizotrop luq metal iynələrlə qısaqapanma nəticəsində yarandığı ilkin işlərdə söylənmiş, (3) və (4) ifadələri ilə aparılmış hesablamalar uğurlu nəticə verməmişdir [1]. Ona görə də (6) ifadəsi (3) və, (4) ifadələrində nəzərə alınaraq hesablama aparılmış və ϕ - əmsalı aproksimasiya yolu ilə eksperimental nöqtələrə uyğun seçilmişdir.

InSb və MnSb birləşmələrin elektrik keçiriciliyi məlum olduğundan hesablamalar ilkin olaraq InSb-MnSb evtektik kompoziti üçün aparılmışdır. Hesablama zamanı (7) ifadəsindəki ϕ əmsalı üçün 1.0–dən 2.0–dək qiymətləri götürülmüş və alınmış nəticələr Şəkil 1a - da 1, 2, 3 və 4 bütöv əyriləri ilə verilmişdir. $\phi=1.7$ qiymətində hesablanmış əyri və σ_{\perp} , σ_{\parallel} üçün təcrübi nöqtələr arasında yaxşı uyğunluq alınmışdır (2 və 4 əyriləri). Bu onu göstərir ki, qısaqapanma prosesində metal iynələrlə yanaşı fazalararası zonalar da iştirak edir və metal iynələrlə fazalararası zonanın birlikdə radiusu iynələrin radiusundan ~ 1.7 dəfə çoxdur.

Qeyd etmək lazımdır ki, elmi ədəbiyyatda ancaq FeGa₃ [44] və FeSb₂ [45] birləşmələrin kinetik parametrləri öyrənilmişdir. FeGa_{1,3} və FeSb üçün elektrik keçiriciliyinə aid ayrıca eksperimental bilgiler olmadığından, GaSb-FeGa_{1,3} və InSb-FeSb evtektik ərintiləri üçün hesablamalar aparılması mümkün deyil. Ona görə (3), (4) tənlikləri birgə həll edilərək, həmçinin, iynələrin və cərəyanın müxtəlif istiqamətlərində GaSb-FeGa_{1,3} və InSb-FeSb evtektik kompozitin elektrik keçiriciliyinin eksperimental σ_{\parallel} və σ_{\perp} qiymətlərindən, metal fazanın və fazalararası zonanın həcmə payları nisbətindən istifadə olunaraq matrisanın və metal fazanın elektrik keçiriciliyi hesablanmışdır. Hesablanmış nəticələrlə eksperimental bilgiler arasında yaxşı uyğunluq alınmışdır. Aproksimasiya nəticəsində GaSb-FeGa_{1,3} üçün $\phi=1.6$ (Şəkil 1b – 3, 4 əyriləri) və InSb-FeSb üçün $\phi=1.4$ (Şəkil 1c – 3, 4 əyriləri) alınmışdır. GaSb-FeGa_{1,3} üçün təyin olunmuş $\phi=1.6$ qiyməti elektron mikroqrafika təsvirlərindən alınan nəticələrə uyğun gəlir. Başqa

sözlə, metal iynələrin diametri üçün $\sim 1\mu\text{m}$ və fazalar arası zonanın eni üçün $\sim 0.3\mu\text{m}$ alınmışdır.

Hesablamalar göstərir ki, qısaqapanma prosesində iştirak edən effektiv zonanın radiusu metal iynələrin real radiusundan GaSb-FeGa_{1,3} evtektik kompozitində ~ 1.6 dəfə, InSb-MnSb evtektik kompozitində ~ 1.7 dəfə, InSb-FeSb evtektik kompozitində isə ~ 1.4 dəfə çoxdur.

Beləliklə, elektrik keçiriciliyin anizotropluğuna səbəb olan qısaqapanma prosesində fazalararası zonalar mühüm rol oynayır.

B. İSTILIK KEÇİRİCİLİYİNDƏ FAZALARARASI ZONALARIN ROLU

İstilik seli ilə metal iynələrin müxtəlif qarşılıqlı istiqamətlərində $T < 200\text{K}$ temperaturlarda istilik keçiriciliyində anizotropluğa gətirə biləcək amillər aşağıdakılar ola bilər: elektronların istilik keçiriciliyindəki payı, fononların nöqtəvi defektlərdən səpilməsi, fononların fazalararası zonaların sərhədindən səpilməsi və ya metal fazanın istilik keçiriciliyinə verdiyi pay.

Tədqiq olunan GaSb-FeGa_{1,3}, InSb-FeSb və InSb-MnSb evtektikalarda yükdaşıyıcıların payına düşən istilik keçiriciliyi Videman-Frans düsturu ilə hesablanmış və o kiçik qiymətə malik ($\sim 0.04K_{im}$ qədər) olduğundan istiliyin əsasən fononlarla daşındığı qəbul olunur [3]. Ona görə də istilik keçiriciliyində müşahidə olunan anizotropluq elektron istilik keçiriciliyi hesabına yaranma bilməz.

Evtektik kompozitlər sintez olunarkən yarımkeçirici GaSb və InSb matrisaların 3d keçid elementləri ilə aşqarlanması baş verir. Bu aşqarlar öz ətrafında kristal qəfəsi təhrif edərək sıxlığı və elastiki xassələri dəyişir və verilən temperatur bölümündə istilik fononların aktiv səpilməsinə səbəb olur. Fononların aşqarlardan (nöqtəvi defektlərdən) səpilməsi hesabına yaranan istilik müqaviməti $T > \theta_D$ bölümündə

$$W_i = \frac{\pi^2}{3} \frac{\theta_D x(1-x)(M_2 - M_1)^2}{h\bar{v}^2 N\bar{M}^2} \quad (8)$$

$T < \theta_D$ bölümündə isə

$$W_i = \frac{\pi^2}{0.9} \frac{x(1-x)(M_2 - M_1)^2 T}{h\bar{v}^2 N\bar{M}^2} \quad (9)$$

kimi ifadə olunur [40]. Burada, N- vahid həcmdəki atomların sayı, M_1, M_2 - iki müxtəlif izotopların kütləsi, θ_D -Debay temperaturudur. Orta atom çəkisi $\bar{M} = xM_1 + (1-x)M_2$ kimi təyin olunur.

Hesablamalar göstərmişdir ki, 80K temperaturda fononların aşqarlardan səpilməsi hesabına yaranan istilik müqaviməti (W_i) təcrübədə müşahidə olunan əlavə istilik müqavimətinin (ΔW_{eks}) əsas hissəsini təşkil edir: InSb-MnSb üçün - $W_i = 0,6 \text{ Vt}^{-1}\text{smK}$; $\Delta W_{eks} = 1,1 \text{ Vt}^{-1}\text{smK}$; InSb-FeSb üçün - $W_i = 0,38 \text{ Vt}^{-1}\text{smK}$; $\Delta W_{eks} = 0,6 \text{ Vt}^{-1}\text{smK}$; GaSb-FeGa_{1,3} üçün - $W_i = 0,19 \text{ Vt}^{-1}\text{smK}$; $\Delta W_{eks} = 0,23 \text{ Vt}^{-1}\text{smK}$.

(Hesablamalara lazım olan parametrlər matrisanın kimi götürülmüşdür [43] və ancaq defektlər ətrafında sıxlığın dəyişməsi nəzərə alınmışdır). Qısdaldığı fononların nöqtəvi defektlərdən səpilməsi ancaq matrisada baş verdiyindən və istilik selinin istiqamətindən asılı olmadığından müşahidə olunan anizotropluq fononların aşqarlardan səpilməsi ilə də izah oluna bilməz.

İstilik fononları nöqtəvi defektlərdən intensiv səpildiyindən, uzundalğalı fononların istilik keçiriciliyinə verdiyi pay kifayət dərəcədə çox olur. Digər tərəfdən, uzundalğalı fononların bir qismi metal fazalardan səpilə bilər. Yarımkeçirici-metal tipli evtektik kompozitlərdə fazalararası qarşılıqlı təsir güclü nizamsızlıq yaradaraq qəfəs potensialının periodikliyinə dəyişdiriyindən, fonon proseslərində metal fazanın və fazalararası zonaların ölçülərini nəzərə almaq vacibdir. Ona görə istilik fononların sərbəst yolunun orta uzunluğu və uzununa uzundalğalı fononların sərbəst yolunu

müəyyənləşdirilərək metal fazanın və fazalararası zonaların ölçüləri ilə müqayisə etmək lazımdır.

Fononların sərbəst qaçış yolunun orta uzunluğu Debay düsturu ilə ($L=3K/Cv$, burada C - 1sm^3 maddənin istilik tutumu, v -səsin kristalda yayılma sürətidir) qiymətləndirilmiş və 80K temperaturda $0.1\mu\text{m}$, 300K temperaturda $0.04\mu\text{m}$ alınmışdır.

Uzunalğalı fononların sərbəst qaçış yolu isə relaksasiya müddəti üçün Landau-Rumer ifadəsinin köməyi ilə tapılmışdır [41]:

$$L = v\tau ; \quad \tau_f^{-1} = (\hbar / \rho)(k_0 T / \hbar v)^4 q \quad (10)$$

burada ρ - maddənin sıxlığı, q - fononların dalğa vektorudur.

Uzunalğalı fononların sərbəst qaçış yolu (10) düsturuna uyğun olaraq

$$L_u = \frac{2\rho_0}{3\sqrt{2mk_0T}} \left(\frac{\hbar v}{k_0 T} \right)^4 v$$

düsturu ilə hesablanmış və onun temperaturdan asılı olaraq dəyişməsi 3-cü şəkildə verilmişdir. Göründüyü kimi aşağı temperaturlarda uzununa uzunalğalı akustik fononların sərbəst qaçış yolu fazalararası zonaların diametri ($d=1.6\mu\text{m}$) ilə eyni tərtibdə olduğundan onların səpilmə ehtimalı daha çoxdur. $W_{\perp x}$ istiqamətində uzunalğalı akustik fononların fazalararası zonadan səpilməsi $W_{\parallel x}$ istiqamətinə nisbətən daha intensiv olacaqdır.

Araşdırılan evtektik kompozitlərin qəfəs istilik keçiriciliyi Klemens-Kallavey [42] modeli əsasında hesablanmış və mümkün olan bütün səpilmə prosesləri, o cümlədən, istilik selinin metal iynələrə paralel və perpendikulyar istiqamətlərində fononların fazalararası zonaların sərhəddən səpilməsi nəzərə alınmalıdır

$$K_i = \frac{k}{2\pi v} \left(\frac{2\pi k}{\hbar} \right)^3 T^3 \int_0^{\theta/T} \frac{\tau_c z^4 e^z}{(e^z - 1)^2} dz. \quad (11)$$

Ümumi relaksasiya müddəti τ_c aşağıdakı kimi ifadə olunur

$$\tau_c^{-1} = C_i + A\omega^4 + (B_N + B_U)\omega^2 T^3, \quad (12)$$

burada $z = \frac{\hbar\omega}{k_0 T}$, A , B_N , B_U - uyğun olaraq, fononların nöqtəvi defektlərdən səpilməsinin,

üç fononlu normal və atılma proseslərin güc əmsallarıdır və onların qiymətləri kompozitin konsentrasiyasına uyğun gələn matrisa elementi üçün götürülmüşdür [43]; ω – fononların tezliyidir. C_i - istilik selinin metal iynələrə paralel (C_1) və perpendikulyar (C_2) istiqamətində fononların sərhəddən səpilməsini ifadə edən parametrdir və onlar eksperimental qiymətlərə uyğun aproksimasiya edilmişdir.

Qeyd edək ki, InSb və GaSb birləşmələrində üçfononlu normal və atılma proseslərdə müxtəlif polyarizasiyalı fononların qarşılıqlı təsiri üstünlük təşkil etdiyindən, bu birləşmələr əsasında alınmış evtektik kompozitlərdə də uzununa uzunalğalı fononların tezlik və temperatur asılılığı üçün Herrinq ifadəsindən ((12) ifadəsində üçüncü toplanan) istifadə etmişik.

2-ci şəkildə (11) və (12) ifadələri ilə hesablanmış əyrilər temperatur keçiriciliyin qiymətlərinə əsasən müəyyən edilmiş istilik keçiriciliyi və [4, 5] işindən götürülmüş təcrübi nöqtələrlə müqayisəli şəkildə verilmişdir. Şəkildən göründüyü kimi, A , B_N , B_U , C_1 və C_2 parametrlərinin 1-ci cədvəldə verilmiş qiymətlərində hesablanmış əyrilər təcrübi nöqtələrə uyğun gəlir.

Bu qiymətlərdən görünür ki, sərhəddən səpilmə parametri istilik selinin iynələrə perpendikulyar istiqamətində (C_2) paralel istiqamətə (C_1) nisbətən bir tərtibə qədər çox olur. Bu isə metal iynələrin perpendikulyar istiqamətdə paralel istiqamətə nisbətən daha çox istilik müqaviməti yaratdığını, başqa sözlə istilik keçiriciliyində müşahidə olunan

anizotropluğu uzununa uzundalğalı fononların fazalararası zonaların sərhədindən səpilməsi ilə əlaqədar olduğunu göstərir.

Cədvəl1.

Evtetik kompozitlər üçün səpilmə mexanizmlərinin güc əmsalları.

A, (c ³)	InSb-FeSb 4.05·10 ⁻⁴³	InSb-MnSb 3·10 ⁻⁴²	CaSb-FeGa _{1.3} 2.35·10 ⁻⁴³
B, (cK ⁻³)	6.947·10 ⁻²⁴	8.684·10 ⁻²⁴	2.316·10 ⁻²⁴
C ₁ , (c ⁻¹)	5·10 ⁸	0.8·10 ⁸	2·10 ⁸
C ₂ , (c ⁻¹)	20·10 ⁸	3·10 ⁸	23·10 ⁸

Metal iynələrin müxtəlif istiqamətlərdə yaratdığı istilik müqavimətini “effektiv mühit yaxınlaşmasının” ifadələri ilə də hesablamaq olar.

Evtetik kompozitlərin effektiv istilik keçiriciliyi üçün (6) ifadələri əsasında aparılmış ilkin hesablamalar [1] uğurlu nəticə verməmiş və anizotropluğun yaranmasında metal iynələrin mühüm rolunu göstərmək mümkün olmamışdır. Uğursuzluğun başlıca səbəbi aparılan hesablamalarda fazalararası qarşılıqlı təsirin nəzərə alınmaması olmuşdur. Fazalararası qarşılıqlı təsiri nəzərə almaq üçün (6) ifadələrində (elektrik keçiriciliyin hesablamalarında olduğu kimi) metal iynələrin c həcmi fraksiyası c_{ef} effektiv həcmi fraksiya ilə ((7) ifadəsi) əvəz olunmuşdur.

InSb-MnSb evtektik kompozitin ayrı-ayrı komponentləri (InSb və MnSb birləşmələri) üçün istilik keçiriciliyi məlum olduğundan, ilk növbədə bu kompozit üçün metal iynələrin istilik selinə paralel və perpendikulyar istiqamətində istilik keçiriciliyin effektiv qiyməti hesablanmışdır. 4-cü (a) şəkildə hesablanmış nəticələr (1 və 2 bütöv əyriləri) eksperimental nöqtələrlə yanaşı verilmişdir. Şəkildən görüldüyü kimi $\phi=1.7$; $c_{ef}=0.12$ qiymətlərində istilik keçiriciliyin eksperimental qiymətləri və hesablanmış effektiv qiymətlər arasında yaxşı uyğunluq alınır. ϕ -in qiyməti elektrik keçiriciliyin tədqiqatlarından alınmış nəticələrə uyğun gəlir.

Yuxarıda qeyd olunduğu kimi FeGa_{1.3} və FeSb komponentləri haqqında ayrılıqda eksperimental bilgilər mövcud deyildir və elmi ədəbiyyatda ancaq FeGa₃ [44] və FeSb₂ [45] birləşmələrin çox kiçik istilik keçiriciliyinə malik olduqları göstərilmişdir. Ona görə də (12) tənlikləri birgə həll olunaraq, matrisa və qatmaların istilik keçiriciliyi üçün ifadələr alınmışdır. Kompozitlərin $K_{||}$ və K_{\perp} eksperimental bilgilərindən və bu ifadələrdən istifadə edərək həm GaSb və InSb matrisaların, həm də FeGa_{1.3} və FeSb birləşmələrin istilik keçiriciliyi hesablanmışdır. 80-300K temperatur bölümündə aparılmış hesablamaların nəticələri eksperimental nəticələrlə birlikdə 4-cü (b) və (c) şəkillərdə verilmişdir. GaSb-FeGa_{1.3} üçün $\phi=1.6$; $c_{ef}=0.089$ və InSb-FeSb üçün $\phi=1.4$; $c_{ef}=0.01$ qiymətləri seçildikdə GaSb və InSb üçün hesablanmış qiymətlər onların eksperimental bilgilərinə uyğundur. Qatmalar üçün hesablanmış qiymətləri FeGa_{1.3} və FeSb birləşmələrin istilik keçiriciliyinin qiymətləri hesab etmək olar.

Beləliklə, həm Kallavey-Klemens modeli, həm də effektiv mühit yaxınlaşması əsasında aparılan hesablamalar bir-birini təsdiq edir və belə nəticəyə gəlməyə əsas verir ki, fazalararası zonalar, elektron proseslərində olduğu kimi, metal iynələrin və istilik selinin müxtəlif istiqamətlərində istilik keçiriciliyində müşahidə olunan anizotropluğun yaranmasında başlıca amildir; uzununa uzundalğalı fononların bir qismi fazalararası zonaların sərhədindən intensiv səpilir.

C. TERMoeLEKTRİK HƏRƏKƏT QÜVVƏSİNƏ FAZALARARASI ZONALARIN TƏSİRİ

Fazalararası zonalar fonon proseslərində mühüm rol oynadığından, onların termoelektrik hərəkət qüvvəsinə təsirini araşdırmaq mühüm məsələlərdən biridir. InSb kristallarına nisbətən GaSb kristallarında fonon termoelektrik hərəkət qüvvəsi nisbətən

yuxarı temperaturlarda baş verdiyindən biz ancaq GaSb-FeGa_{1,3} evtektik kompoziti üçün termoelektrik hərəkət qüvvəsini araşdıracağıq.

GaSb-FeGa_{1,3} evtektik kompoziti üçün termoelektrik hərəkət qüvvəsinin temperatur asılılığı $\Delta T \perp x$ halında daha çox maraq doğurur. 5-cı şəkildən görüldüyü kimi, 200K-dən aşağı temperaturlarda temperatur azaldıqca α_{\perp} artır və onun temperatur asılılığı 140K – dən aşağı temperaturlarda $\alpha_{\perp} \sim T^{-0.8}$ kimi dəyişir. GaSb ($p=2.1 \times 10^{18} \text{sm}^{-3}$) üçün α_{\perp} 80-130K bölümündə daha kəskin olur və temperaturdan $\alpha \sim T^{-1.5}$ kimi asılıdır. Termoelektrik hərəkət qüvvəsinin belə artımı, homogen GaSb kristalında olduğu kimi [46], dəşiklərin fononlar tərəfindən sövq edilməsi ilə bağlıdır. GaSb-FeGa_{1,3} evtektik kompozitin fonon termoelektrik hərəkət qüvvəsinin GaSb kristalına nisbətən zəifləməsi, istilik keçiriciliyində olduğu kimi, uzundalğalı fononların fazalararası zonalardan səpilməsi ilə bağlı ola bilər.

Metallarda bütün fononlar elektron qazı ilə qarşılıqlı təsirdə ola bilər, lakin yarımkeçiricilərdə ancaq $q \leq 2k$ (q və k – Fermi səviyyəsində fononun və elektronun dalğa vektorudur) şərtini ödəyən uzundalğalı fononlar yükdaşıyıcılarla qarşılıqlı təsirdə ola bilər. Fononlarla sövq olunma hesabına yaranan termoelektrik hərəkət qüvvəsi aşağı temperaturlarda daha böyük qiymət alır. Lakin, Klemensin [47] göstərdiyi kimi, yükdaşıyıcıların konsentrasiyası fonon-elektron qarşılıqlı təsir üçün kifayət edəcək dərəcədə yüksək olarsa, yuxarı temperaturlarda sövqetmə hiss olunacaq dərəcədə baş verə bilər.

Yükdaşıyıcıların fononlarla sövq edilməsi baş verdiyi halda nümunədə yaranan termoelektrik hərəkət qüvvəsi iki toplanandan ibarət olur [48]

$$\alpha = \alpha_d + \alpha_f, \quad (13)$$

burada α_d - diffuziya termoelektrik hərəkət qüvvəsi, α_f - yükdaşıyıcıların fononlar tərəfindən sövq edilməsi nəticəsində yaranan termoelektrik hərəkət qüvvəsidir.

Bir növ cırlaşmış yükdaşıyıcılardan ibarət olan və dispersiya qanununu Keyn modelinə uyğun gələn yarımkeçiricilər üçün diffuziya termoelektrik hərəkət qüvvəsi (α_d) aşağıdakı kimi təyin olunur [49, 50]:

$$\alpha_d = \frac{\pi^{2/3} k_0 T m}{e \hbar (3n)^{2/3}} (1 + \gamma), \quad (14)$$

burada γ - qeyri parabolikliyi ifadə edən parametrdir. (14) düsturu ilə hesablanmış diffuziya termoelektrik hərəkət qüvvəsinin qiymətləri 5-cı şəkildə 1 (α_d) xətti ilə verilmişdir.

Fonon termoelektrik hərəkət qüvvəsinin ifadəsi aşağıdakı kimi təyin olunur [50]

$$\alpha_f = -\frac{1}{3} \frac{k_0 m_p v^2 \langle \tau_f \rangle}{e k_0 T \tau_p}, \quad (15)$$

burada v – kristalda səsin sürəti, k_0 – Bolsman sabiti, m_p – yükdaşıyıcıların effektiv kütləsi, τ_f uzun dalğalı fononların orta relaksasiya müddəti, τ_p - yük daşıyıcıların relaksasiya müddətidir. Yükdaşıyıcılar uzundalğalı akustik fononlardan səpildiyi halda onların relaksasiya müddəti belə ifadə olunur [41]

$$\tau_{p(ak)} = \frac{2\pi \hbar^4 \rho v^2}{E_d^2 (2m_p k T)^{3/2}} \xi^{-1/2}, \quad (16)$$

burada E_d – deformasiya potensialı, ξ - kimyəvi potensialdır.

Uzundalğalı fononların relaksasiya müddəti üçün Landau-Rumer ifadəsi (10) götürülmüşdür. (15), (16) və (10) ifadələri ilə aparılmış hesablamalar 5-cı şəkildə 2 (α_{f1}) əyrisi ilə verilmişdir. Görüldüyü kimi nəzəri əyri eksperimental nəticələrə nisbətən temperaturdan daha kəskin asılıdır.

Yükdaşıyıcıların fononlarla sövq edilməsi ilə yaranan termoelektrik hadisəsi əsasən aşağı temperaturlarda baş verir və burada əksər səpilmə prosesləri donmuş olur. İndiki halda isə proses orta temperatur bölümündə baş verdiyindən, fonon proseslərində digər səpilmə proseslərin iştirakı daha çox ehtimallıdır və hesablamalarda onların nəzərə alınması vacibdir.

Son zamanlar yük daşıyıcıların fononlarla sövq edilməsi ilə yaranan termoelektrik hadisələrinə normal fonon-fonon səpilmə proseslərin təsirinin öyrənilməsinə diqqət artmışdır. Məlumdur ki, normal səpilmə proseslərində fononların impulsu saxlanılır və onlar bilavasitə istilik müqaviməti yaratmır. Fonon relaksasiyasının əksər mexanizmləri fononların tezliyindən asılı olduğundan, N-proseslər enerjini və impulsu müxtəlif modalar arasında yenidən paylayaraq, hər bir modada tarazlıq vəziyyətindən güclü kənara çıxmanın qarşısını alır. Rezistiv səpilmə proseslərində fononların səpilməsi fonon sisteminin impulsunun relaksasiyasına gətirir. N- proseslər isə impulsu müxtəlif fonon modaları arasında paylayaraq fononların dreyfinə gətirir [51-54]. N- proseslərdə iştirak edən fononların relaksasiya tezliyi rezistiv proseslərdəki fononların tezliklərindən çox və ya müqayisə olunacaq dərəcədə olarsa, onlar nəzərə alınmalıdır. Fonon sistemin N proseslərlə bağlı dreyfinin nəzərə alınması fononların relaksasiyasının effektiv tezliyinin azalmasına və buna uyğun olaraq fononların yükdaşıyıcılara verdiyi impulsun payının artmasına gətirir. Beləliklə normal fonon-fonon səpilməsi ilə bağlı yaranan fononların dreyfi yükdaşıyıcıların və fononların qarşılıqlı sövq prosesini gücləndirir və nəticədə (13) ifadəsindəki termoelektrik hərəkət qüvvəsinin fonon toplananı artır.

Adətən fononların sərhəddən səpilməsi aşağı temperaturlarda baş verir. İndiki halda, yəni metal fazası matrisada paralel paylanmış evtektik kompozitlərdə fazalararası zonanın ölçüləri mikrometr tərtibində olduğundan, orta temperaturlarda da fononların sərhəddən səpilməsi baş verə bilər.

Yuxarıda deyilənləri nəzərə alaraq fononların səpilməsində iştirak edən bütün mexanizmlər nəzərə alınmışdır. Fonon-fonon qarşılıqlı təsirlərdə Herring mexanizminin [51] üstünlük təşkil etdiyini nəzərə alaraq (15) ifadəsinə daxil olan fononların relaksasiya tezliyi τ_f (12) düsturu ilə ifadə olunmuşdur. Fonon termoelektrik hərəkət qüvvəsində fazalararası qarşılıqlı təsiri nəzərə almaq üçün fazalararası zonaların sərhədindən səpilmə fononların ümumi relaksasiya müddətində nəzərə alınmışdır.

(12), (15) və (16) düsturları ilə aparılan hesablamaların nəticəsi 5-cı şəkildə 3 (α_{f2}) əyrisi ilə verilmişdir. C , A , B_U , B_N və ξ ($\xi=1.4$) əmsalları üçün qiymətlər matrisaya uyğun olaraq [2] işindən götürülmüş, $E_d = -20\text{eV}$ seçilmişdir. Şəkildən görüldüyü kimi yükdaşıyıcıların və uzundalğalı fononların relaksasiya müddəti üçün (16) və (12) düsturu götürüldükdə (15) ifadəsi ilə hesablanmış 3 (α_{f2}) əyrisi GaSb və kompozit üçün termoelektrik hərəkət qüvvəsinin eksperimental qiymətlərinin fərqinə uyğun gəlir. Bu isə fazalararası zonaların termoelektrik hərəkət qüvvəsində mühüm rol oynadığını göstərir.

Beləliklə eyni konsentrasiyalı homogen GaSb kristalına nisbətən evtektik ərintidə fonon sövqü ilə bağlı olan termoelektrik hərəkət qüvvəsinin zəifləməsi uzununa uzundalğalı fononların fazalararası zonaların sərhədindən səpilməsi ilə bağlıdır. Həmçinin üç fononlu normal proseslərdə müxtəlif polyarizasiyalı fononların qarşılıqlı təsirinin üstünlük təşkil etdiyi (impulsun saxlanması müxtəlif rəqs budaqlarına məxsus fononların qarşılıqlı təsirində baş verir) göstərilmişdir.

1. M.I.Aliyev, A.A.Khalilova, D.H.Arasly, R.N.Rahimov, M.Tanoglu, L.Ozyuzer, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **36** (2003) 2627.
2. M.I.Əliyev, A.Ə.Xəlilova, D.H.Arasly, R.N.Rəhimov, M.Tanoğlu, L.Özyüzər, *Fizika*, **13** №4 (2007) 8.
3. M.I.Aliyev, D.H.Arasly, R.N.Rahimov, A.A.Khalilova, I.Kh.Mammadov, R.M.Jabbarov, *Transaction of Azerbaijan Academy of Sciences, series of FMTS*, (2007), no2, p.72.

4. Д.Г.Араслы, Р.М.Джаббаров, Р.Н.Рагимов, М.И.Алиев, *ВИНИТИ*, (1988) (№5851-1388) 9.
5. М.И.Алиев, Д.Г.Араслы, Р.Э.Гусейнов, Р.М.Джаббаров, *Неорганические материалы*, 11 (1975) 1135; 15 (1979) 1320.
6. R.N.Rahimov, A.A.Khalilova, D.H.Arasly, M.I.Aliyev, M.Tanoglu, L.Ozyuzer, *Sensors and actuators. A: Physical*, **147** (2008) 436.
7. Р.Н.Рагимов, И.Х.Мамедов, Д.Г.Араслы, А.А.Халилова, Р.М.Джаббаров, *Прикладная физика*, №5 (2006) 86.
8. M.I.Aliyev, A.A.Khalilova, D.H.Arasly, R.N.Rahimov, M.Tanoglu, L.Ozyuzer, *Appl. Phys. A*, **79** (2004) 2075.
9. М.А.Сиповская, Ю.С.Сметанникова, *Физика и Техника Полупроводников*, **21** (1987) 1242.
10. H.Wagini, M.Wilhelm, *Naturforsch.*, Fd21a (1966) 329.
11. К.Ш.Кахраманов, А.П.Алиева, *Transactions of Azerbaijan Academy of Sciences, Series of Physical-mathematical and Technical sciences, Physics and Astronomy*, **XX** №2 (2000) 77.
12. К.Ш.Кахраманов, В.В.Дидык, *Металлофизика*, **3** №2 (1981) 31.
13. J.Maxwell-Garnett, *C. Phil.Trans. R.Soc. London*, 203 (1904) 385.
14. C.Herring, *J.Appl.Phys.*, 31 (1960) 1939.
15. V.K.S.Shante, S.Kirpatrick, *Adv.Phys.*, **20** (1971) 325.
16. S.Kirpatrick, *Rev. Mod. Phys.*, **45** (1973) 574.
17. Б.И.Шкловский, А.Л.Эфрос, *Успехи Физических Наук*, **117** (1975) 401.
18. A.G.Bruggeman, *Ann. Phys. (Leipzig)*, **24** (1935) 636.
19. B.Sareni, I.Krahenbuhl, A.Beroual, *J.Appl.Phys.*, **81** (1997) 2375.
20. H.L.Duan, B.L.Karihaloo, *Phys.Rev. B*, **75** (2007) 064206.
21. H.L.Duan, B.L.Karihaloo, J. Yi X.Wang, *Phys.Rev. B*, **73** (2006) 174203.
22. W.R.Jagji, R.V.Sing, *Bull. Matter. Sci. (Indian Academy of Science)*, **27** (2004) 373.
23. V.M.Levin, M.G.Markov, *Journal of Electrostatics*, **61** issue 2 (2004) 129.
24. M.E.Rodriguez, J.J.Perez-Bueno, O.Zelaya-Angel, Conzalez-Hernandez., *J. Materials Letters*, **36** (1998) 95.
25. Б.Я.Балагуров, *ЖЭТФ*, **119** (2001) 142.
26. В.В.Крюк, Д.А.Молодцев, А.В.Пилюгин, А.А.Повзнер, *Журн.Техн.Физики*, **73** в.8 (2003) 78.
27. В.И.Оделевский, *Журн.Техн.Физики*, **21** (1951) 667.
28. W.K.Liebman, and E.A.Miller, *J. Appl. Phys.*, **34** (1963) 2653.
29. В.В.Леонов, Е.Н.Чунарев, Ю.Е.Спектор, *Кн.: Физико-химические процессы в гетерогенных системах. – Красноярск*, (1977) 68.
30. J.R.Kalnin, E.Kotomin, *J.Phys.A: Math. Gem.*, **31** (1998) 7227.
31. J.D.Felske, *Int. Jour. Heat and Mass Transfer*, **47** (2004) 3453.
32. А.Моосави, Р.Саркомаа, *J.Phys.D:Appl.Phys.*, **36** (2003) 1644.
33. О.О.Мукхайлык, А.Дж.Риан, N.W.Tzokova, *J.Appl.Cryst.*, **40** (2007) 506.
34. E.J.Garboczi, J.G.Beryman, *Concrete Science and Engineering*, **2** (2000) 88.
35. K.I.Hadjov, D.Dontchev, *Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy*, **43** (2008) 438.
36. M.P.Lutz, R.W.Zimmerman, *Int. Journal of Solids and Structures*, **42** (2005) 429.
37. X.Qingzhong, *Physica B*, **325** (2003) 195.
38. Б.Б.Бохонов, М.А. Корчагин, *2^я Всероссийская конф. по наноматериалам «Нано 2007» Новосибирск*, (2007) 268.
39. Т.В.Лютый, А.Ю.Поляков, А.В.Рот-Серв, *Вестник Сумский Гос. Университет*, №9 (2006) 63.

40. Д. Драбл, Г. Голдсמיד, *Теплопроводность полупроводников*, Москва, ИЛ, (1963) 266.
41. В.М. Аскеров, *Electron Transport Phenomena in Semiconductors*, Singapore. *World Scientific*, (1994) 412.
42. J. Callaway, *Phys.Rev.*, **113** (1959) 1046.
43. Р.Н. Рагимов, Д.Г. Араслы, А.А. Халилова, М.И. Алиев, *Transactions of Azerbaijan Academy of Sciences, Series of Physical-mathematical and Technical sciences, Physics and Astronomy*, **XXV** №5 (2005) 38.
44. Y. Amaga, A. Yamamoto., C.H. Lee, *Materials Research Society, Symp.Proc.*, **793** (2004) S8.38.1.
45. A. Benten, S. Johnsen, G.H. Madsen, B.B. Iversen, F. Steglich, *EPL (A Letters Journals Exploring, The Frontiers of Physics)*, **80** (2007) 17008.
46. М.И. Алиев, З.А. Джафаров, М.А. Алиева, *Физика и Техника Полупроводников*, **5** (1971) 337.
47. P.G. Klemens, *Thermoelectrics, Fifteenth International Conference on Pasadena, CA, USA*, (1996) 206.
48. И.А. Смирнов, Б.И. Смирнов, Е.Н. Мохов, *Физика Твердого Тела*, **50** (2008) 1355.
49. Т.А. Алиев, Ф.М. Гашимзаде, С.А. Алиев, Т.Г. Гаджиев, Э.М. Алиев, М.И. Алиев, *Физика и Техника Полупроводников*, **5** (1971) 323.
50. Т.С. Ставицкая, Л.С. Стильбанс, *Журн. Техн. Физ.*, **28** (1958) 484.
51. И.Г. Кулеев, *Физика Твердого Тела*, **41** (1999) 101753.
52. И.Г. Кулеев, *Физика Твердого Тела*, **42** (2000) 1952.
53. И.Г. Кулеев, *Физика Твердого Тела*, **44** (2002) 2215.
54. I.G. Kuleev, I.I. Kuleev, A.N. Taldenkov, A.V. Inyushkin, V.I. Ozhogin, K.M. Itoh, E. Ehaller, *J. Exper. and Theor. Phys.*, **96** (2003) 1078.

ROLE OF INTERPHASE ZONE IN ELECTRON AND PHONON PROCESSES IN SEMICONDUCTOR-METAL TYPE EUTECTIC COMPOSITIONS

R.N. RAHIMOV

The experimental data of electrical and thermal conductivity of GaSb-FeGa_{1,3}, InSb-MnSb and InSb-FeSb eutectic composites in the framework of the effective medium theory and Callaway-Klemens model taking into account the interphase interaction has been analyzed. The essential role of interphase zone in short-circuiting process causing anisotropy of electrical conductivity at the different orientation of metallic inclusions has been shown. The longitudinal long-wave phonon scattering at interphase zone boundaries is main factor causing anisotropy of thermal conductivity of indicated composites and also weakening of phonon drag thermopower in GaSb-FeGa_{1,3} composite.

РОЛЬ МЕЖФАЗНЫХ ЗОН В ЭЛЕКТРОННЫХ И ФОНОННЫХ ПРОЦЕССАХ В ЭВТЕКТИЧЕСКИХ КОМПОЗИТАХ ТИПА ПОЛУПРОВОДНИК-МЕТАЛЛ

Р.Н. РАГИМОВ

Результаты исследования электропроводности, теплопроводности и термо-э.д.с. эвтектических композитов GaSb-FeGa_{1,3}, InSb-MnSb и InSb-FeSb анализированы в рамках «теории эффективных сред» и по модели Каллауэя-Клеменса с учетом межфазных взаимодействий. Установлена существенная роль межфазных зон в процессах короткого замыкания, приводящих к анизотропии электропроводности при различных направлениях металлических игл и электрического тока. Показано, что рассеяние продольных длинноволновых фононов на границах межфазных зон является одним из основных факторов, приводящих к анизотропии теплопроводности в указанных композитах при различных направлениях теплового потока и ориентации игл, а также к ослаблению эффекта увлечения носителей тока фононами в GaSb-FeGa_{1,3}.

Редактор: М.Бабаев