

GETE–SB₂TE₃–PBTE KVAZİ-ÜÇLÜ SİSTEMİNDƏ YENİ GEPBSB₄TE₈ DÖRDLÜ BİRLƏŞMƏSİ

Fidan Məmməd RZAYEVA 

Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti
Magistr tələbəsi
E-mail: rzayeva8273@gmail.com

Mehparə Babaverdi ADIGÖZƏLOVA 

Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti
Professor
E-mail: mehpara.adigozalova@asoiu.edu.az

Almaz Xurban QURBANOVA 

Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti
Laboratoriya müdiri

Received: 18 Mai 2026

Revised: 9 June 2026

Accepted: 25 June 2026

UOT: 546.289:546.86

DOI: <https://doi.org/10.32010/KPKX9467>

Xülasə: Son dövrlərdə qalay, stinbium və bismut elementlərini özündə birləşdirən üçlü və dördlü birləşmələrin öyrənilməsinə maraq əhəmiyyətli dərəcədə artmışdır. Bu materiallar zəngin fiziki xüsusiyyətlərə malik olduqları üçün müasir materialşünaslıq sahəsində perspektivli tədqiqat obyektləri kimi xüsusi diqqət cəlb edir. Məlumdur ki, yüksək funksional xüsusiyyətli kristalların sintezi müasir elmin qarşısında duran əsas problemlərdən biri hesab olunur və bu istiqamətdə əldə olunan nailiyyətlər elmi-texniki tərəqqinin sürətlənməsində mühüm rol oynayır. Kristalların əldə olunması və tədqiqi radioelektronika, yarımkeçirici texnologiyaları, kvant elektronika, texniki optika və akustika kimi mühüm tətbiqi sahələrin inkişafına birbaşa təsir göstərir və onların texnoloji potensialını əhəmiyyətli dərəcədə artırır.

İlk dəfə olaraq, germanium tellurid *GeTe*-stibium tellurid *Sb₂Te₃*-qurğuşun tellurid *PbTe* kvaziüçlü sistemin *GeSb₂Te₄*–*PbSb₂Te₄* kəsiyi mürəkkəb fiziki-kimyəvi analiz metodlarından (DTA, rentgen difraksiyası, mikroquruluş analiz, mikrobərklik ölçmələri və sıxlığın təyini) istifadə edilərək öyrənilmiş və faza diaqramı qurulmuşdur. Müəyyən edilmişdir ki, kəsik *GeTe*–*Sb₂Te₃*–*PbTe* kvaziüçlü sisteminin qismən kvazibnar hissəsidir. *GeSb₂Te₄* əsaslı bərk məhlulların (15% (mol.) *PbSb₂Te₄*) bir sahəsi müəyyən edilmişdir. İlkin komponentlərin 1:1 nisbətində, konqruent əriyən *GePbSb₄Te₈* birləşməsinin əmələ gəlməsi müşahidə olunur. *GePbSb₄Te₈* dördlü birləşməsinin monokristalları kimyəvi daşınma reaksiyalarından istifadə edilərək əldə edilmişdir. Ortorombik sistemdə kristallaşan *GePbSb₄Te₈*-in qəfəs parametrləri təyin edilmişdir: *a*=5.05Å, *b*=9.93Å, *c*=11.61Å. *GePbSb₄Te₈* birləşməsinin və (*GeSb₂Te₄*)_{*x*}–(*PbSb₂Te₄*)_{1–*x*} bərk məhlulunun bəzi elektrofiziki parametrlərinin temperaturdan asılılıqlarının öyrənilməsi ərintilərin keçiriciliyin *p* tipinə aid olduğunu göstərmişdir.

Açar sözlər: kvaziüçlü sistemlər, monokristal birləşmələr, fiziki-kimyəvi analiz metodları, bərk məhlullar, kimyəvi daşınma reaksiyaları.

Giriş

Yarımqeçirici materialların tətbiq səviyyəsi global texnoloji inkişafın əsas göstəricilərindən biridir. Onlar müasir elektron texnologiyalarının təməlini təşkil edir. Və bu gün elmi və texnoloji tərəqqinin əhəmiyyətli hissəsidir. Mikroelektronikanın, xüsusilə də bərk cisimlər elektronikasının inkişaf etməsilə çox geniş miqyaslı kompüterləşdirilmə, müasir kommunikasiya, enerji çevirmə sistemləri, eyni zamanda müxtəlif məişət, tibbi, ixtisaslaşdırılmaqla yanaşı avtomatlaşdırılmış elektron avadanlıqların həm yaradılması, həm də istifadəsilə əlaqəli problemlərin uğurlu şəkildə həll olmasına nail olunmuşdur. Bu materiallar ekoloji cəhətdən təmiz enerji və soyuducu texnologiyalarının inkişafı, müasir ətraf mühitin çirklənməsinin monitorinq sistemlərinin yaradılması və geniş tətbiq sahələri üçün yüksək həssas sensor texnologiyası kimi problemlərin həllində böyük rol oynayır [1-3].

Çoxkomponentli bərk məhlullar müasir yarımqeçirici cihazların yaradılması üçün getdikcə daha çox istifadə olunur. Bərk fazada əhəmiyyətli dərəcədə həllolma qabiliyyətinə malik sistemlərdə çoxkomponentli yarımqeçirici bərk məhlullar ənənəvi olaraq intensiv tədqiqatların mövzusu olmuşdur, çünki onlar bir çox xüsusiyyətlərdə (məsələn, qadağan olunmuş enerji zonası, qəfəs parametrləri) təkrarlanan dəyişikliklərlə xarakterizə olunur ki, bu da materialın tərkibini dəyişdirərək funksional xüsusiyyətlərini dəyişdirməyə imkan verir [4,5].

Yarımqeçirici bərk məhlullar perspektivli optoelektronik və termoelektrik materiallardır.

Kvaziüçlü bərk məhlullar yarımqeçirici texnologiyası üçün maraq doğurur, çünki onların istifadəsi iki bərk məhlul parametrlərinin, məsələn, zolaq boşluğu və vahid element parametrlərinin müstəqil idarə olunmasına imkan verir [6].

Vismut və stibium xalkogenidlərinin bərk məhlulları 77 ilə 620K arasında temperatur diapazonunda istifadə edilə bilən termoelektrik materiallardır. Bu materiallar soyutma və temperaturu sabitləşdirən cihazlarda, eləcə də termoelektrik generatorlarda istifadə olunur. Bu materialların geniş tətbiq dairəsi həm bərk məhlul tərkibini, həm də yük daşıyıcısının konsentrasiyasını dəyişdirməklə onların termoelektrik xüsusiyyətlərini idarə etmək qabiliyyəti ilə müəyyən edilir [7].

Səmərəli termoelektrik materiallar üzrə yeni bir tədqiqat sahəsi hazırda aktiv təkmilləşdirilmə mərhələsindədir. Tədqiqat işi mürəkkəb kristal strukturuna malik çoxkomponentli (üçlü və ya dördlü) darzolaqlı xalkogenid yarımqeçiricilərin sintezi və alınma texnologiyasını əhatə edir [8-10]. Xalkogenid yarımqeçiriciləri üçün istilikkeçiriciliyinin aşağı qiymətləri xarakterikdir. Adətən kükürd-selen sırası elementərə məxsus mürəkkəb və böyük elementar qəfəs strukturlarının material daxilində istilik daşıyıcısı olan fononların yayılmasının sürətinin məhdudlaşdırılması ilə izah olunur. Bundan əlavə, laylı quruluşlar arasındakı rabitələr nisbətən zəifləməsinə və böyük atom kütləli elementlərdə də istilikkeçiriciliyinin kəskin azalmasına səbəb olur [11-16]. Xalkogenidlərin, xüsusilə de telluridlərin topooloji izolyatorların formalaşdırılmasındakı rolu müasir elmdə diqqət mərkəzindədir [17-19]. Bu baxımdan, dördlü tellurid sistemlərinin mono kristallarının sintez olunaraq yetişdirilməsi istiqamətində elmi cəhətdən əsaslı texnoloji üsulların işlənilməsi əhəmiyyətli dərəcədə aktualdır. Başlanğıc komponentlərin kristalstruktur parametrləri Cədvəl 1-də ümumiləşdirilmişdir.

İşin məqsədi yeni mürəkkəb yarımqeçirici birləşmələrin alınmasıdır.

Cədvəl 1 Başlanğıc komponentlərin kristal -quruluş xüsusiyyətləri

Birəşmə	Sinqoniya	Pr. qr,	Qəfəs parametrləri, Å ⁰		
			a	c	Ərimə temperaturu, K
GeSb ₂ Te ₄	Altıbucaqlı	$R\bar{3}m$	4,221	40,58	886
PbSb ₂ Te ₄	Rombedik	$R\bar{3}m$	4,350	41,710	850

Metodlar

$GeSb_2Te_4 - PbSb_2Te_4$ polikristal ərinti nümunələri ərintinin tərkibindən asılı olaraq 1051-1201K temperaturda müvafiq nisbətlərdə götürülmüş elementlərdən hermetik kvarts ampulalarda sintez edilmiş, ardınca 6K/dəq sürətlə 651K-a qədər soyudulmuşdur. Bu temperaturdan ərintilər havada soyudulmuşdur. İstifadə olunan başlanğıc materiallar ən azı 99.999% əsas material tərkibi olan yüksək təmizlikli Pb, Ge, Sb və Te, eləcə də 40 Om·sm müqavimətə malik Ge olmuşdur. Nəticədə yaranan polikristal nümunələr 651K-də 10 gün (240 saat) qızdırılmış, sonra buzlu suda söndürülmüşdür.

Dördlü telluridləri müəyyən etmək üçün bu tədqiqatda müxtəlif fiziki-kimyəvi analiz metodlarından, o cümlədən diferensial termiki analizi (DTA), mikroquruluş analizi (MQ), rentgen difraksiyası (XRD), mikrobərkliyin ölçülməsi, sıxlığın təyini və elektrofiziki ölçmə metodlarından istifadə edilmişdir.

Rentgen analizi DRON-UM avtomatik difraktometri (qrafit monoformatoru, CuK_{α} şüalanması, 0,05⁰ addımlarla nöqtələrdə intensivlik qeydi ilə 2 Θ - Θ - skan edilməsi), eləcə də həmçinin Syntex PI monokristal difraktometri vasitəsilə (CuK_{α} şüalanması), ω -skan etmə metodu ilə (skan sürəti dəyişkən olub 2–8 dərəcə/dəqiqə təşkil etmişdir) istifadə edilərək aparılmışdır. Rentgen analizi üçün monokristal lövhəciklər külçələrdən (001) əsas müstəviləri boyunca ayrılmışdır. NTR-73 pirometrində DTA qeyd etmək üçün Pt-Pt/Rh termocütlərindən istifadə edilmişdir. 0,1 Pa-a qədər evakuasiya edilmiş Stepanov kvarts qablarında qızdırma və soyutma ayrılırları qeyd edilmişdir. Közərdilmiş Al₂O₃ etalon kimi götürülmüşdür. Qızdırma sürəti 10 dərəcə/dəq

olmuşdur. Cilalanmış və aşındırılmış şliflərin MQA analizi MİM-8 mikroskopu istifadə olunmaqla aparılmışdır. Mikrobərklik HV (100) mikrobərklik test cihazı ilə ölçülmüşdür. Ərintinin sıxlığını doldurucu kimi toluol (C₇H₈) istifadə edilərək piknometrik çəkilmə yolu ilə müəyyən edilmişdir.

$GeSb_2Te_4 - PbSb_2Te_4$ sistemindəki laylı nümunələr konik dibli kvarts ampulalarında şaquli Bridgman metodu ilə yetişdirilmişdir. Kristallaşma sürəti 0,25 mm/dəq, kristallaşma sərhəddindəki qradient isə ~60 K/sm³ idi. Təxminən 6 sm uzunluğunda və 0,7-0,8 sm diametrində külçələr əldə edilmişdir.

Elektrik keçiriciliyinin, istilik keçiriciliyinin və termoelektrik əmsalının ölçülməsi elektrik cərəyanının və istilik axınının istiqamətləndirildiyi parçalanma müstəviləri boyunca aparılmışdır. Bu parametrlərin bütün ölçmələri [19] birbaşa cərəyan istifadə edilərək aparılmışdır.

Nəticələr və müzakirə

Tədqiqatların aparılması məqsədilə $GeSb_2Te_4 - PbSb_2Te_4$ sistemindəki ərintilər elementlərdən ampula üsulu ilə hazırlanmışdır. Başlanğıc komponentlərin üç qramından ibarət bir dəstə, 1 x 10⁻³ mm cəvə sütununa qədər boşaldıldıqdan sonra peçə qoyularaq temperatur 900-905K-nə qədər qızdırılmışdır. Bu temperaturda başlanğıc maddələr arasında kimyəvi reaksiyanın başa çatması üçün 40-50 dəqiqəlik müddət kifayət edir. Reaksiyanın sonlanmasından sonra peç 120 OK temperatura qədər yüksəldilərək 40 dəqiqə saxlanılmışdır, sonra 30-320 K/saat sürətlə 650 K-yə qədər azaldılmışdır. Nümunələr bu temperaturda 10 gün ərzində közərdilmişdir. Bu rejimdən istifadə edərək müxtəlif tərkibli on dörd ərinti sintez edilmişdir (Cədvəl 2).

Cədvəl 2 $GeSb_2Te_4 - PbSb_2Te_4$ sistem ərintilərinin, sıxlığı və mikrosərtliliyi, diferensial termiki analizin nəticələri

№	Ərintinin mol tərkibi, %		Termiki istilik effekti, K	Mikrobərklik, MPa	Sıxlıq, q/sm ³
	$GeSb_2Te_4$	$PbSb_2Te_4$			
1	100	0.0	901	674	6.46
2	95.0	5.0	875,91	684	6.50
3	90.0	10.0	805,89	698	6.53
4	85.0	15.0	775,874	718	6.56
5	80.0	20.0	755,86	741	6.61
6	70.0	30.0	750,78	723	6.68
7	65.0	35.0	evtektika 751		
8	60.0	40.0	751-981	756	6.76
9	50.0	50.0	1001	724	6,84
10	40.0	60.0	650,98	734	6.92
11	30.0	70.0	650,88	745	7.02
12	20.0	80.0	651,774,994	756	7.11
13	10.0	90.0	651,824,1061	767	7.18
14	0.0	100	851,1154	771	7,27

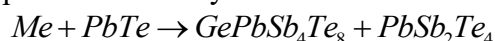
Nəticədə əldə edilən nümunələr vahid görünüşlü, boz rəngdə və metal parıltılı olmuşdur. $GeSb_2Te_4 - PbSb_2Te_4$ kəsik ərintiləri otaq temperaturunda su, oksigen və hava ilə müqayisədə nisbətən sabitdir. Onlar $NaOH$, KOH və H_2SO_4 -da həll olmasa da qatı HCl və HNO_3 turşusu məhlullarında həll olurlar.

$GeSb_2Te_4 - PbSb_2Te_4$ kəsiyində kimyəvi qarşılıqlı təsirlərin təbiəti rentgen difraksiyası, diferensial istilik analizi və mikroquruluş analizi istifadə edilərək tədqiq edilmişdir. Mövcud fazalarda mikrobərk də müəyyən olunmuşdur. Aşındırıcı agent rolunda duru HNO_3 və $K_2Cr_2O_7$ + qatı $H_2SO_4 + H_2O$ qarışığı istifadə edilmişdir.

Əldə edilən nəticələrə əsasən, $GeTe - Sb_2Te_3 - PbTe$ kvaziüçlü sisteminin $GeSb_2Te_4 - PbSb_2Te_4$ kəsiyinin faza diaqramı qurulmuşdur (Şəkil 1). Şəkildən göründüyü kimi, $GeSb_2Te_4 - PbSb_2Te_4$ kəsiyi qismən kvazibinardır. İlkin $GeSb_2Te_4 : PbSb_2Te_4$ komponentlərinin 1:1 nisbətində, $1000 \pm 5K$ temperaturda əriyən $GePbSb_4Te_8$ tərkibli konqruent görünüşlü birləşmənin əmələ gəlməsi müəyyən

edilmişdir. Birləşmənin homogen hissəsi praktik olaraq yoxdur.

$GeSb_2Te_4 : PbSb_2Te_4$ sistemi iki altsistemdən (yarımsistem) ibarətdir: $GeSb_2Te_4 - GePbSb_4Te_8$ və $GePbSb_4Te_8 - PbSb_2Te_4$. Birinci altsistem, $GeSb_2Te_4$ əsaslanan məhdud həllolma qabiliyyətinə malik evtektik tiplidir. 751 K və 35%(mol) $GeSb_2Te_4$ evtektikanın koordinatların göstərir. İkinci altsistem, $PbSb_2Te_4$ -ün inkonquruyent (uyğunsuz) əriməsi səbəbindən mürəkkəbdir və kvazi binar olmayan hissələrə aiddir. $PbSb_2Te_4$ -ün inkonquruyent ərimə nöqtəsindən yuxarıda kvazibinarlılığı pozulur. Temperaturun 850-dən 650 K-yə düşməsilə, maye peritektik reaksiya ilə itir:



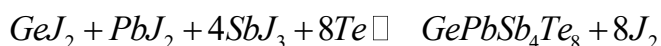
$GePbSb_4Te_8$ -ün monokristalları qaz fazasından 0,133 Pa-ya qədər evakuasiya edilmiş kvars ampulalarında kimyəvi daşınma reaksiyaları (KDR) [19] istifadə edilərək əldə edilmişdir. Legirlənmiş ampulalar üfüqi iki hissəli sobaya yerləşdirilmişdir. Temperatur xromel-alumel termocütü istifadə edilərək ölçülmüşdür.

$GePbSb_4Te_8$ -ün monokristallarının KDR metodu ilə yetişdirilməsi üçün optimal parametrlər Cədvəl 3-də verilmişdir.

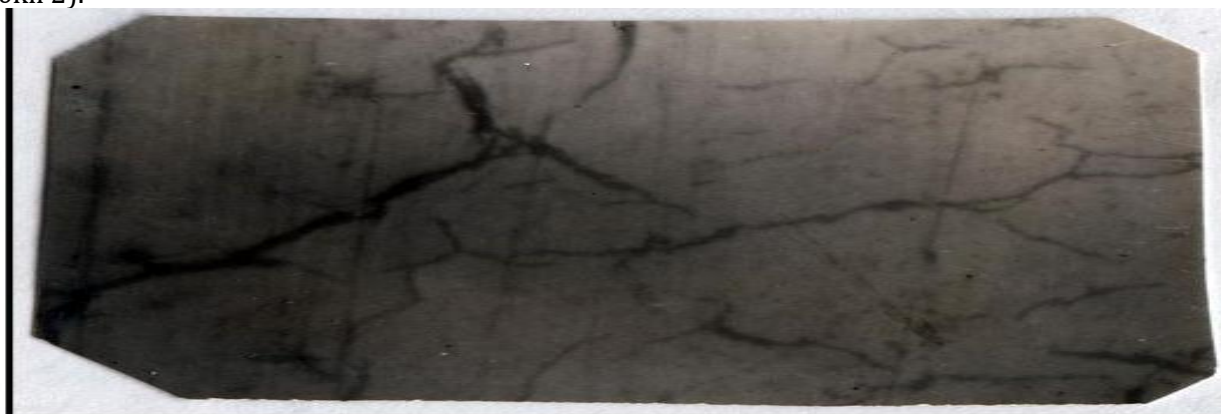
Cədvəl 3. $GePbSb_4Te_8$ monokristalların yetişdirilməsinin parametrləri

Birləşmə	T_{er}	Rejim temp		Daşıyıcı, $5m\text{q} / sm$	Vaxt, saat	Monokristalların ölçüsü, mm^3
		T_1, K	T_2, K			
$GePbSb_4Te_8$	1000	701	801	J_2	72	$2 \times 6 \times 7$

KDR metodu ilə $GePbSb_4Te_8$ monokristallarının alınma mexanizmi aşağıdakı tənliklə təmsil oluna bilər:



Mikroquruluş təhlili nəticəsində $GePbSb_4Te_8$ ərintisinin monofazlı olduğu müəyyən olunmuşdur (Şəkil 2).



Şəkil 2. $GePbSb_4Te_8$ birləşməsinin ərintilərinin mikroquruluşu

Yetişdirilmiş monokristalların rentgen difraksiya tədqiqatları $GePbSb_4Te_8$ -in rombik qəfəslərdə kristallaşdığını göstərir: $a=5.05\text{\AA}$, $b=9.93\text{\AA}$, $c=11.61\text{\AA}$, kristal quruluşun simmetriya qrupu $Z=2$, $V=584.44\text{\AA}^3$.

Nəticə

1. $GeTe-Sb_2Te_3-PbTe$ kvaziüçlü sisteminin $GeSb_2Te_4-PbSb_2Te_4$ kvaziikili kəsiyi fiziki-kimyəvi analizdən istifadə edilərək öyrənilmiş $GeSb_2Te_4 : PbSb_2Te_4 = 1:1$ isbatında $GePbSb_4Te_8$ tərkibli konqruent əriyən dördlü birləşmə əmələ gəlir.

2. $GePbSb_4Te_8$ birləşməsinin iynəvari monokristalları kimyəvi daşınma reaksiyalarından istifadə edilərək əldə edilmişdir. Ortorombik sistemdə kristallaşan $GePbSb_4Te_8$ monokristalının qəfəs parametrləri təyin edilmişdir: $a=5.05\text{\AA}$, $b=9.93\text{\AA}$, $c=11.61\text{\AA}$.

ƏDƏBİYYAT SIYAHISI

1. Волыхов А.А., Яшина Л.В., Штанов В.И. Взаимодействии халькогенидов Ge, Sn и Pb в квази бинарных системах.

Неорганические Материалы; 2006.72 (6.): с.662-671.

2. Gurbanov G.R., Mamedov Sh.G., Adygezalova M.B. Section $Sn_2Sb_6Se_{11}-Bi_2Se_3$ Section of a quasi-ternary system. $Sb_2Se_3-SnSe-Bi_2Se_3$. Inorganic chemistry; 2017: 62(11),1530-1534 DOI: <https://doi.org/10.7868/S0044457X17110174>

3. Zhang, Y., et al. Recent progress in Ge-Sb-Te phase-change materials. Advanced Functional Materials; 2021,31(35): 2101234. <https://doi.org/10.1002/adfm.202101234>

4. Gurbanov G.R., Thermoelectric properties of layered tetradymite-like materials of the quasi-ternary system $Sb_2Te_3-GeTe-Bi_2Te_3$. Inorganic materials; 2017: 53(7),691-697 <https://doi.org/10.7868/S0002337X1707003X>

5. Gurbanov G.R., Mamedov Sh.G. et all..The nature of interaction in the system $Sn_2Sb_6S_{11}-PbSnSb_4S_8$. Inorganic chemistry; 2016:61(9),1240-243. <https://doi.org/10.7868/S0044457X1609014>

6. Иванова Л.Д., Петрова Л.И., Гранаткина Ю.В., Никулин Д.С., Райкина О.А. Кристаллизация и механические свойства твёрдых растворов между халькогенидами висмута и сурьмы. Неорганические материалы; 2016,52(3): 248–255.
7. Gurbanov G.R. Adygezalova M.B. et all. Synthesis Crystal structure and thermodynamic functions of $GeSnSb_4Te_8$. Moscow University Chemistry Bulletin; 2019, 74(3): 134–137. DOI: 10.3103/S0027131419030064
8. West A.R. Solid state chemistry and its applications West A.R. Solid State Chemistry. Applications 2nd edition/ Wiley. 2014. 584.
9. İvanova İ.D., Petrova L.L., Granatkina Yu.V. et all. Crystallization and mechanical properties of solid solutions between bismuth and antimony chalcogenides. Inorganics materials; 2016:52(3): 248–255. DOI: 10.7868/S0002337X16030040
10. Gao, Y., et al. Neutron diffraction and high-temperature phase transitions of $GeTe$. Journal of Applied Physics; 2019;126(12), 125110.
11. Huang, Z., et al. Thermal conductivity suppression in Sb_2Te_3 layered systems. Nature Materials; 2024: 23, 512–520.
12. Kanatzidis M.G.. The role of solid state chemistry in the discovery of new thermoelectric materials. Semiconductors and semimetals; Ed. Terry M. Tritt. San Diego; San Francisco; N.Y.; Boston; London; Sydney; Tokyo: Academ. Press.: 2001,69: p. 57–98.
13. Kannan K., Satyaman Tari Chalcogenide based materials for optoelectronics, energy and sustainability. 2025, Publisher: IGI Global Publishing, DOI: 10.4018/979-8-3373-3962-7
14. Chen J., et al. Phase stability and lattice dynamics in $GeTe-Sb_2Te_3$ superlattices. Nature Communications; 2022: 13(1), 5678
15. Menshchikova T.V., Ereemeeva S.V., Chulkov E.V. Electronic structure of Electronic structure of $SnSb_2Te_4$ and $PbSb_2Te_4$ topological insulators. Applied Surface Science; 2013,267: p. 1–3. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.04.048>
16. Caputo M., Panighel M., et all. Manipulating the topological interface by molecular adsorbates: adsorption of Co-Phtalocyanine on Bi_2Se_3 . Nano Letters.; 2016, 16: p.3409–3414. DOI: 10.1021/acs.nanolett.5b02635.
17. Papagno M., Ereemeev S.V., Babanly M.B. et all. Multiple coexisting dirac surface states in three-dimensional topological insulator $PbBi_6Te_{10}$ ACS. Nano; 2016,10: p.3518–3524. <https://doi.org/10.1021/acsnano.5b07750>
18. Ağazadə, A. İ. $PbTe-Bi_2Te_3-Sb_2Te_3$ sisteminin $PbBi_2Te_4-PbSb_2Te_4$ kəsiyi üzrə faza tənzimliliyi və bərk məhlulların bəzi xassələri. Azərbaycan Kimya Jurnalı; 2021, 291–297.
19. Гурбанов Г.Р., Адыезалова М.Б. Разрезы $GePbSb_4Te_8-GeTe$ и $GePbSb_4Te_8-SnTe$ квазитройной системы $GeTe-Sb_2Te_3-SnTe$. Журнал неорганической химии; 2018,63(1): с.106–110. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0044457X18010154>

Fidan Mammad RZAYEVA
Azerbaijan State Oil and Industry University
Master's Student
E-mail: rzayeva8273@gmail.com

Mehpara Babaverdi ADYGEZALOVA
Professor
Azerbaijan State Oil and Industry University
E-mail: mehpara.adigozalova@asoiu.edu.az

Almaz Khurban GURBANOVA
Azerbaijan State Oil and Industry University
Laboratory Manager

Abstract: Recently, interest in the study of ternary and quaternary compounds containing tin, stibium and bismuth has increased significantly. These materials, due to their rich physical properties, attract special attention as promising research objects in the field of modern materials science. Developing high-performance crystals remains a cornerstone of contemporary scientific research, with advancements in this field serving as a primary catalyst for technological and industrial progress. The production and study of crystals directly affects the development of important application areas such as radioelectronics, semiconductor technologies, quantum electronics, technical optics and acoustics, and significantly increases their technological potential. A comprehensive physicochemical investigation—employing DTA, X-ray diffraction, microstructural analysis, microhardness measurements, and density determination—was conducted to map the germanium antimony telluride ($GeSb_2Te_4$) - lead antimony telluride ($PbSb_2Te_4$) cross-section of the the germanium tellurid $GeTe$ antimon tellurid Sb_2Te_3 - lead telluride $PbTe$ quasi-ternary system for the first time. The resulting phase diagram reveals that this cross-section behaves as a partial quasi-non-ternary segment of the overarching system

It was determined that cross-section is a partial quasi-non-ternary part of the $GeTe-Sb_2Te_3-PbTe$ quasi-ternary system. A region of germanium antimony telluride -based solid solutions (a molar concentration of 15% lead antimony telluride) was identified. At a 1:1 ratio of the initial components, the formation of a congruent phase transition of germanium lead antimony telluride from solid to liquid is observed.

Chemical transport reactions were successfully employed to grow single crystals of the quaternary germanium antimony telluride $GePbSb_4Te_8$ compound. Structural analysis revealed that germanium antimony telluride crystallizes in an orthorhombic lattice with the following unit cell parameters: $a=5.05\text{\AA}$, $b=9.93\text{\AA}$ and $c=11.61\text{\AA}$. Furthermore, investigations into the temperature-dependent electrophysical properties of both the pristine germanium antimony telluride phase and the $(GeSb_2Te_4)_x$ lead antimony telluride $-(PbSb_2Te_4)_{1-x}$ solid solutions confirmed that these synthesized alloys exhibit p-type semiconducting conductivity

Keywords: quasi-ternary systems, single-crystalline compounds, physicochemical analysis methods, substitutional solid solutions, chemical transport reactions.

**НОВОЕ ЧЕТВЕРНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ГЕРБСВ₄ТЕ₈ В КВАЗИТРОЙНОЙ СИСТЕМЕ ГЕТЕ–
SB₂TE₃–PBTE**

Фидан Мамед РЗАЕВА

Магистрант

Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности

E-mail: rzayeva8273@gmail.com

Мехпара Бабаверди АДЫГЕЗАЛОВА

Профессор

Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности

E-mail: mehpara.adigozalova@asoiu.edu.az

Алмаз Хурбан ГУРБАНОВА

Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности

Заведующая лабораторией

Резюме: В последнее время значительно возрос интерес к изучению тройных и четвертичных соединений, содержащих олово, стинбий и висмут. Эти материалы, благодаря своим богатым физическим свойствам, привлекают особое внимание как перспективные объекты исследований в области современного материаловедения. Известно, что синтез кристаллов с высокими функциональными свойствами считается одной из главных задач современной науки, и достижения в этом направлении играют важную роль в ускорении научно-технического прогресса. Производство и изучение кристаллов напрямую влияют на развитие важных областей применения, таких как радиоэлектроника, полупроводниковые технологии, квантовая электроника, техническая оптика и акустика, и значительно повышают их технологический потенциал.

Впервые поперечное сечение $GeSb_2Te_4 - PbSb_2Te_4$ квазитройной системы $GeTe - Sb_2Te_3 - PbTe$ было изучено с использованием комплексных физико-химических методов анализа (ДТА, рентгеновская дифракция, анализ микроструктуры, измерения микротвердости и определение плотности), и была построена фазовая диаграмма. Было установлено, что поперечное сечение представляет собой частичную квазинетройную часть квазитройной системы $GeTe - Sb_2Te_3 - PbTe$. Анализ фазовых равновесий позволил установить область существования твердых растворов на основе $GeSb_2Te_4$ достигающую 15% (мол) $PbSb_2Te_4$. При мольном соотношении исходных компонентов 1:1 в системе образуется конгруэнтно плавящееся соединение $GePbSb_4Te_8$. Монокристаллы четвертичного соединения $GePbSb_4Te_8$ были получены с использованием реакций химического переноса. Были определены параметры решетки $GePbSb_4Te_8$, кристаллизованного в орторомбической системе: $a = 5,05 \text{ \AA}$, $b = 9,93 \text{ \AA}$, $c = 11,61 \text{ \AA}$. Анализ электрических свойств твердых растворов $(GeSb_2Te_4)_x - (PbSb_2Te_4)_{1-x}$ и $GePbSb_4Te_8$ свидетельствует о преобладании p-типа проводимости во всем исследованном интервале составов.

Ключевые слова: квазитройные системы, монокристаллы, физико-химические анализы, твердые растворы, реакции химического переноса.

Ключевые слова: квазитройные системы, монокристаллические соединения, физико-химические методы анализа, твердые растворы замещения, реакция химического транспорта.