

Təbiət elmləri

UOT 546.681.815.659. 22.23

R.M.Ağayeva

Azərbaycan Dövlət Pedaqoji Universiteti
agayeva.reyhan@mail.ru

PbGa₂S₄-SmGa₂S₄(Se₄) və SmGa₂S₄-SmGa₂Se₄ SİSTEMLƏRİNDƏ FAZA TARAZLIQLARININ TƏDQIQI

<https://doi.org/10.30546/2520-2049.73.2.2025.212>

Açar sözlər: istem, kvazibinar, elementar qəfəs, parametr, dəyişən tərkibli faza
Fiziki-kimyəvi analiz (DTA, RFA, MQA həmçinin mikrobərkliyin və sıxlığın ölçülməsi) metodlarının nəticələrinə əsasən PbGa₂S₄-SmGa₂S₄ (Se₄) və SmGa₂S₄-SmGa₂Se₄ sistemlərində faza faza tarazlıqları tədqiq edilmiş və onların T-x faza diaqramları qurulmuşdur. Müəyyən edilmişdir ki, başlanğıc komponentlər izoquruluş olduqları üçün sistemlərdə fasiləsiz bərk məhlullar sırası əmələ gəlir. Müəyyən edilmişdir ki, PbGa₂S₄ - SmGa₂S₄ sistemi kvazibinar, digərləri kəsiklər isə qismən kvazibinar kəsiklərdir. Pb_{1-x}Sm_xGa₂S₄, Pb_{1-x}Sm_xGa₂S_{4-y}Se_y və SmGa₂S_{4-x}Se_x dəyişən tərkibli fazaların elementar qəfəslərinin parametrləri hesablanmış, onların sıxlıqları və mikrobərklikləri təyin edilmişdir.

P.M.Agaeva

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВОГО РАВНОВЕСИЯ В СИСТЕМАХ PbGa₂S₄-SmGa₂S₄(Se₄) И SmGa₂S₄-SmGa₂Se₄

Ключевые слова: система, квазибинарная система, элементарная решетка, параметр, переменная фаза

На основании результатов физико-химического анализа (DTA, рентгеноструктурного анализа, микроструктурного анализа, а также измерений микротвердости и плотности) изучены фазовые равновесия в системах PbGa₂S₄-SmGa₂S₄(Se₄) и SmGa₂S₄-SmGa₂Se₄ и построены их T-x фазовые диаграммы. Установлено, что, поскольку исходные компоненты изоструктурные, в системах образуется непрерывный ряд твердых растворов. Установлено, что, поскольку исходные компоненты являются изоструктурными, в системах образуется непрерывный ряд твердых растворов. Установлено, что система PbGa₂S₄ – SmGa₂S₄ является квазибинарной, а остальные сечение – частично

квазибинарными. Рассчитаны параметры элементарных решеток фаз $Pb_{1-x}Sm_xGa_2S_4$, $Pb_{1-x}Sm_xGa_2S_{4-y}Se_y$ и $SmGa_2S_{4-x}Se_x$ переменного состава, определены их плотности и микротвердость.

R.M.Agaeva

INVESTIGATION OF PHASE EQUILIBRIUM IN PbGa₂S₄-SmGa₂S₄(Se₄) AND SmGa₂S₄-SmGa₂Se₄ SYSTEMS

Keywords: *system, quasi-binary system, elementary lattice, parameter, variable phase*

Based on the results of physicochemical analysis (DTA, X-ray diffraction, microarray analysis, as well as microhardness and density measurements), phase equilibria in $PbGa_2S_4$ - $SmGa_2S_4$ (Se_4) and $SmGa_2S_4$ - $SmGa_2Se_4$ systems were studied and their T-x phase diagrams were constructed. It was found that, since the initial components are isostructures, a continuous series of solid solutions is formed in the systems. It was found that the $PbGa_2S_4$ - $SmGa_2S_4$ system is quasi-binary, and the others sections are partially quasi-binary. The parameters of the elementary lattices of the $Pb_{1-x}Sm_xGa_2S_4$, $Pb_{1-x}Sm_xGa_2S_{4-y}Se_y$ and $SmGa_2S_{4-x}Se_x$ phases of variable composition were calculated, their densities and microhardness were determined.

Giriş

Hal-hazırda elmi texniki tərəqqi funksional xassəyə malik materialların alınması və tədqiqini tələb edir [1-8]. Belə xassələrə malik yarımkeçirici materialların alınması isə yeni sistemlərin tədqiqi, ya da hazırda tətbiq olunan və ya tətbiq üçün perspektivli hesab olunan yarımkeçirici materialların xassələrinin kation-anion əvəzləməli ilə yerinə yetirilə bilər. Qeyd etmək lazımdır ki, hazırda bütün dünyada karbon emissiyasının azaldılması və global istiləşmənin qarşısını almaq məqsədi ilə alternativ enerjiyə keçid prioritet istiqamət hesab edilir. Ona görə də yeni effektiv materialların, xüsusilə fotoelektrik, termoelektrik, maqnit və digər enerji çeviricilərinin axtarışı dünyanın aktual problemidir [2, 3, 5].

Samarium və qurğuşun xalkogenidləri, yeni ekoloji təmiz funksional xassəli materialların alınması üçün baza birləşmə kimi götürülə bilər. Belə ki, samarium və qurğuşun birləşmələrinin əksəriyyəti yüksək termoelektrik, fotoelektrik, optiki, lazer, maqnit və s. xassələrə malik olmaqla, müasir enerji çeviricilərində istifadə olunur və ya istifadə üçün perspektivli hesab olunur. İzoquruluşlu birləşmələr arasında kimyəvi qarşılıqlı təsirin tədqiqi, yuxarıda qeyd olunan xassələrə malik funksional materialların alınmasında çox perspektivli hesab oluna bilər.

İlkin komponentlər olan PbGa_2S_4 , SmGa_2S_4 və SmGa_2Se_4 birləşmələri ədəbiyyatda geniş tədqiq olunmuşdur [10-18]. Flao və başqalarına [11] görə PbGa_2S_4 birləşməsi peritektik reaksiya üzrə əmələ gəlir və inkonqruent əriyir. Son məlumatlara [14] görə isə PbGa_2S_4 birləşməsi 1163 K temperaturda parçalanmadan əriyir. PbGa_2S_4 birləşməsinin kristal quruluşu öyrənilmiş və müəyyən edilmişdir ki, birləşmə ortorombik sinqoniyada kristallaşır və qəfəs parametrləri: $a=20,44$; $b=20,64$; $c=12,09$ Å olub EuGa_2S_4 quruluş tipinə aiddir [11,13]. Birləşmənin qəfəs parametri [19] işinə görə $a=20,706$; $b=20,380$; $c=12,156$ Å, fəza qrupu $Fddd$, $Z=32$ təşkil edir.

SmGa_2S_4 və SmGa_2Se_4 birləşmələri də ortorombik sinqoniyada kristallaşır və EuGa_2S_4 kini EuGa_2S_4 quruluş tipinə aidirlər. SmGa_2S_4 birləşməsinin qəfəs parametrləri: $a=20,745$; $b=20,464$; $c=12,236$ Å, SmGa_2Se_4 birləşməsi üçün qəfəs parametrləri: $a=21,78$; $b=21,23$; $c=12,39$ Å -dir. SmGa_2S_4 1750 K-də konqruent əriyir, SmGa_2Se_4 birləşməsi isə 1200 K-də inkonqruent əriyir. Dy^{+3} ionları ilə aşqarlanmış PbGa_2S_4 optiki həssas material olub, lazer xassələrinə malikdir [20,21]. SmGa_2S_4 və SmGa_2Se_4 birləşmələri yarımkeçirici birləşmələr olub, qadağan olunmuş zolaqlarının eni müvafiq olaraq $\Delta E=2,20$ eV və $\Delta E=1,40$ eV təşkil edir.

Hazırkı tədqiqat işinin məqsədi $\text{PbGa}_2\text{S}_4\text{-SmGa}_2\text{S}_4(\text{Se}_4)$ və $\text{PbGa}_2\text{S}_4\text{-SmGa}_2\text{Se}_4$ sistemlərində faza tarazlıqlarının tədqiqindən ibarətdir.

Təcrübi hissə

$\text{PbGa}_2\text{S}_4\text{-SmGa}_2\text{S}_4$, $\text{PbGa}_2\text{S}_4\text{ – SmGa}_2\text{S}_4(\text{SmGa}_2\text{Se}_4)$ sistemlərində faza tarazlıqlarının tədqiqi məqsədilə ərintilər yüksək təmizliyə malik elementlərdən istifadə etməklə sintez edilmişdir. Sintez 0,133 Pa təzyiqinə kimi havası sorulmuş kvarts ampulalarda ağzı qaz-oksigen alovunda bağlanılmaqla aparılmışdır. Sintezin optimal temperaturu tərkibdən asılı olaraq, 1250-1400 K təşkil etmişdir. Maksimal temperaturda bir saat müddətində saxlanıldıqdan sonra temperatur tədricən 900-1000 K-ə çatdırılmış və bu şəraitdə 500 saat müddətində termiki emal edilmişdir. Reaksiya nəticəsində fiziki-kimyəvi analiz üçün yararlı olan və xarici görünüşünə görə bircinsli ərintilər alınmışdır.

Ərintilər diferensial-termiki (DTA), rentgenfaza (RFA), mikroquruluş (MQA), mikrobərklik və sıxlığın təyini metodları ilə analiz edilmişdir. DTA analizi HTR-73 pirometrində xromel-alümel termocütü ilə aparılmış, qızma sürəti 10°C/dəq olmuşdur. Etalon olaraq Al_2O_3 götürülmüşdür. Rentgenfaza analizi D2 PHASER rentgen difraktometrində aparılmış, şüalandırıcı olaraq $\text{CuK}\alpha$ və Ni filtrdən istifadə edilmişdir. Mikroquruluş analizi MİM-8 markalı mikroskopda aparılmışdır. Ərintilərin mikrobərklikləri PMT-3 mikrobərklik ölçən cihazda aparılmışdır. Sıxlıq piknometrik üsulla aparılmış, doldurucu məhlul olaraq toluol götürülmüşdür.

Alınmış nəticələr və onların müzakirəsi

Termiki emaldan sonra 950-1000 K temperatur intervalında tablandırılmış ərintilərin rentgenoqrafik analizi göstərir ki, PbGa₂S₄-SmGa₂S₄ sisteminin tədqiq olunan qatılıq intervalında ilkin komponentlər də (PbGa₂S₄ və SmGa₂S₄) daxil olmaqla bütün ərintilər ortorombik simmetriya üçün xarakterik olan difraksiya mənzərəsinə malikdir. Bu onu göstərir ki, PbGa₂S₄-SmGa₂S₄ sistemində başlanğıc komponentlər arasında ortorombik quruluşlu qeyri-məhdud bərk məhlullar sırası əmələ gəlir.

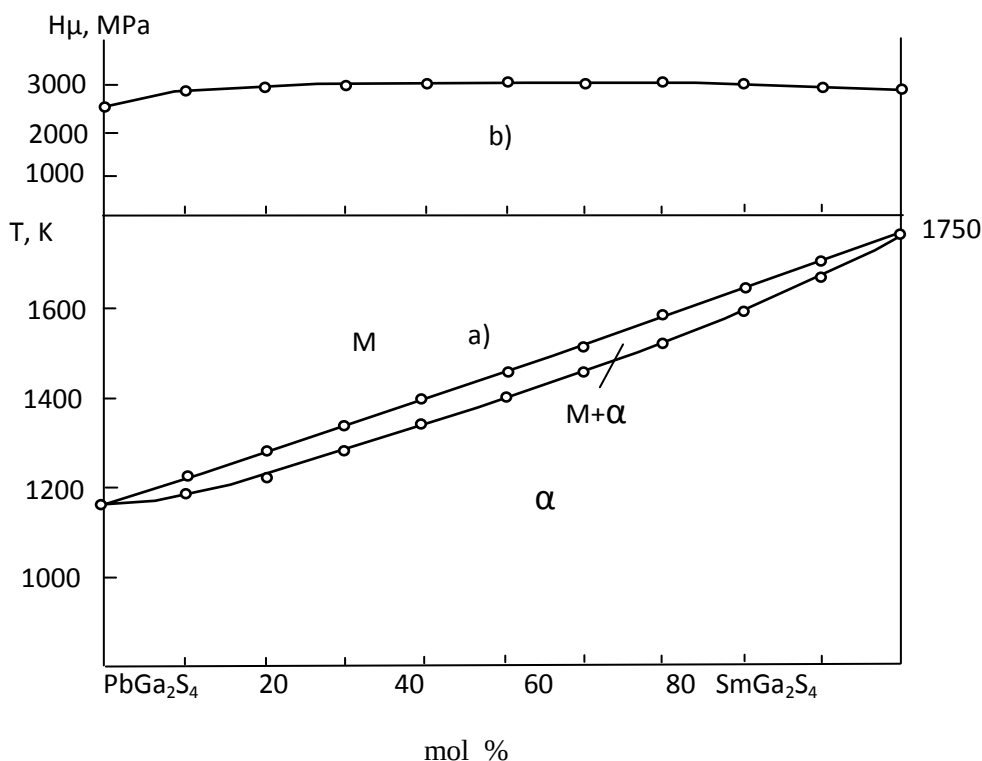
Sistemdə əmələ gələn bərk məhlulların toz difraktoqramları əsasında hesablanmış elementar qəfəs parametrləri cədvəl 1-də verilmişdir. Kiçik sürətlə soyudulmuş ərintilərin qızma əyrilərindən alınmış DTA-nın nəticələri cədvəl 1-də verilmişdir.

Bu nəticələr əsasında rentgenfaza analizinin nəticələrini nəzərə almaqla PbGa₂S₄-SmGa₂S₄ sisteminin T-x diaqramı qurulmuş və şəkil 1-də verilmişdir. Şəkildən göründüyü kimi sistem komponentlərin həm bərk, həm də maye halında bir-birində tamqarşılıqlı həllolması ilə xarakterizə olunur. DTA, və rentgenfaza analizinin nəticələrini nəzərə alaraq PbGa₂S₄-SmGa₂S₄ sisteminin T-x faza diaqramı qurulmuşdur. Sistemin faza diaqramı Rozeboma görə [22] birinci tipə aiddir.

Cədvəl 1

Pb_{1-x}Sm_xGa₂S₄ tipli bərk məhlulların DTA və PFA analizinin, mikrobərkliyin və sıxlığın təyininin nəticələri

Ərintilərin tərkibi, mol % SmGa ₂ S ₄	Termiki qızma effektləri, K	Qəfəs parametrləri, Å			H _μ , MPa	Sıxlıq, q/sm ³
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>		
PbGa ₂ S ₄	1163	20,706	20,380	12,156	2650	4,94
10	1205,1225	20,708	20,378	12,164	2700	4,85
20	1230,1260	20,712	20,384	12,180	2750	4,70
40	1320,1350	20,716	20,420	12,198	2780	4,56
50	1390,1410	20,728	20,425	12,218	2780	4,48
60	1455,1480	20,732	20,440	12,220	2790	4,36
80	1575,1610	20,736	20,460	12,226	2800	4,32
90	1660,1680	20,740	20,462	12,234	2800	4,30
SmGa ₂ S ₄	1750	20,745	20,464	12,236	2800	4,28



Şəkil 1. $PbGa_2S_4$ - $SmGa_2S_4$ sisteminin T - x diaqramı (a) və mikrobərkliyin tərkibdən asılılığı (b)

$PbGa_2S_4$ - $SmGa_2S_4$ sisteminin likvidus və solidus əyriləri üzərində, göründüyü kimi ekstremum nöqtəsi yoxdur, onların temperaturu ilkin komponentlərin ($PbGa_2S_4$ və $SmGa_2S_4$) əriməsinə uyğun distektika nöqtəsi arasında fasiləsiz və monoton olaraq dəyişir. Bərk məhlulların ərimə temperatur intervalı, yəni likvidus və solidus temperaturları arasında maksimal fərq 20-30 K –dən artıq deyil (Şəkil 1). Ona görə də $PbGa_2S_4$ - $SmGa_2S_4$ sistemində likvidus və solidus əyriləri üzərində ümumi ekstremum (minimum və ya maksimum) nöqtələrinin olmasını gözləmək olardı.

Digər tərəfdən onu da qeyd etmək lazımdır ki, Pozeboma görə birinci tipə aid faza diaqramı, adətən elə sistemlərdə reallaşır ki, onlarda həm maye, həm də bərk məhlullarda qarışma termodinamiki funksiyaları çox kiçik qiymətlərə malik olsunlar və ya ədədi qiymətcə bir-birinə çox yaxın olsunlar.

Tədqiq olunan $PbGa_2S_4$ - $SmGa_2S_4$ sistemində başlanğıc $PbGa_2S_4$ və $SmGa_2S_4$ birləşmələrində kimyəvi rabitənin təbiəti kəskin fərqlənmir (ion-kovalent rabitə ilə xarakterizə olunurlar), onlar tərkiblərinə görə yalnız kationla (Pb-Sm) fərqlənilir. Ona görə də sistemin maye məhlulunda birləşmələrin ($PbGa_2S_4$ və

SmGa₂S₄) qızma istilikləri kiçik qiymətə malikdir. Digər tərəfdən başlanğıc birləşmələrin (PbGa₂S₄ və SmGa₂S₄) kristal qəfəs parametrləri 8-10 %-dən çox fərqlənir. Bu qiymət məlum Rozebom şərtindən kiçikdir. Ona görə də bərk məhlulların əmələ gəlməsi zamanı kristal qəfəs çox zəif deformasiyaya uğrayır. Sistemdə komponentlərin qarşılıqlı həll olmasını təmin etmək üçün kristal qəfəs parametrlərinin tərkibdən asılılıq ayrılarda qiymətli informasiya verir (Cədvəl 1). Cədvəldən göründüyü kimi 900-1000 K-də tablandırılmış ərintilərin ortorombik kristal qəfəs parametrləri tərkibin praktiki olaraq xətti funksiyadır, yəni həllolma arası kəsilməzdir və bərk məhlullar Veqar qaydasını ödəyir.

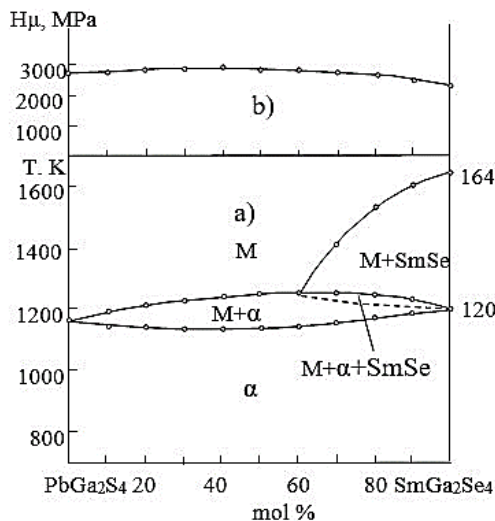
PbGa₂S₄-SmGa₂Se₄ sistemi SmGa₂S₄ birləşməsinin inkonqruent əriməsi səbəbindən qismən kvazibinar olub, aşağı temperaturda geniş intervalda EuGa₂S₄ tipli bərk məhlul sırasının əmələ gəlməsi ilə xarakterizə olunur (Şəkil 3 a). 0-40 mol % PbGa₂S₄ qatılıq intervalında məhluldan α-bərk məhlulların ilkin kristallarının çökməsi müşahidə olunur. SmGa₂Se₄-ün qatılığı yüksək olan sahədə SmSe birləşməsinin kristallaşması M+SmSe monovariant peritektik reaksiyası nəticəsində 1200 K temperaturda M+α+SmSe üçfazlı kristallaşma sahəsi əmələ gəlməlidir. Lakin bu sahə kiçik temperatur intervalı səbəbindən, təcrübi olaraq temperatur effektləri tutulmadığından T-x diaqramında punktirlə göstərilmişdir. 1200 K temperaturdan aşağıda isə komponentlər arasında fasiləsiz bərk məhlullar sahəsi əmələ gəlir. Bərk məhlulların ortorombik qəfəs sabitləri hesablanmış və cədvəl 2-də verilmişdir.

Cədvəl 2
PbGa₂S₄-SmGa₂Se₄ sisteminin bərk məhlul ərintilərinin DTA və PFA analizinin, mikrobərkliyin və sıxlığın təyininin nəticələri

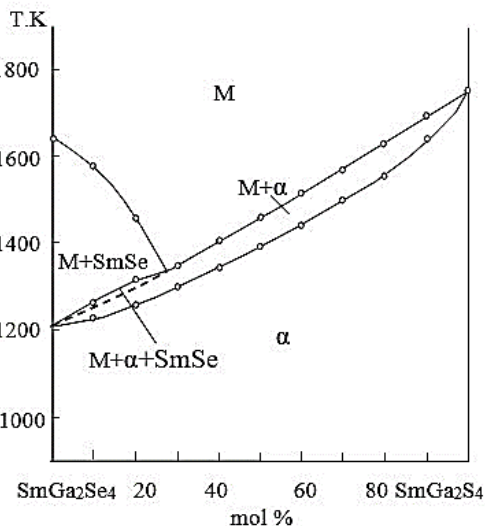
Ərintilərin tərkibi, mol % SmGa ₂ Se ₄	Termiki qızma effektləri, K	Qəfəs parametrləri, Å			H _μ , MPa	Sıxlıq, q/sm ³
		a	b	c		
PbGa ₂ S ₄	1163	20,706	20,380	12,156	2650	4,94
20	1140, 1200	20,820	20,644	12,244	2800	5,06
40	1140,1230	20,904	20,780	12,260	2610	5,25
50	1130,1240	21,308	20,864	12,282	2590	5,48
60	1150,1250	21,652	20,982	12,304	2470	5,75
80	1170, 1190,1520	21,706	21,185	12,365	2420	5,86
SmGa ₂ Se ₄	1200,1640	21,780	21,230	12,390	2220	6.02

Nümunələrin mikrobərkliklərinin tərkibdən asılılığı yastı maksimumdan keçən əyri ilə xarakterizə olunur. Bu isə fasiləsiz bərk məhlul əmələ gətirən sistemlər üçün xarakterikdir (Şəkil 2, b). PbGa₂S₄-SmGa₂Se₄ sisteminin faza diaqramı isə şəkil 2 a-da verilmişdir.

SmGa_2S_4 - SmGa_2Se_4 sistemi də SmGa_2Se_4 birləşməsinin parçalandığı üçün sistem qismən kvazibinardır (Şəkil 3 a). Sistemin likvidusu SmSe və SmGa_2Se_4 fazalarının ilkin kristallaşma əyrilərindən ibarətdir.



Şəkil 2. PbGa_2S_4 - SmGa_2Se_4 sisteminin faza diagramı(a), və sistemin ərintilərinin mikrobərkliklərinin tərkibdən asılılığı (b).



Şəkil 3. SmGa_2Se_4 - SmGa_2S_4 sisteminin T-x faza diagramı.

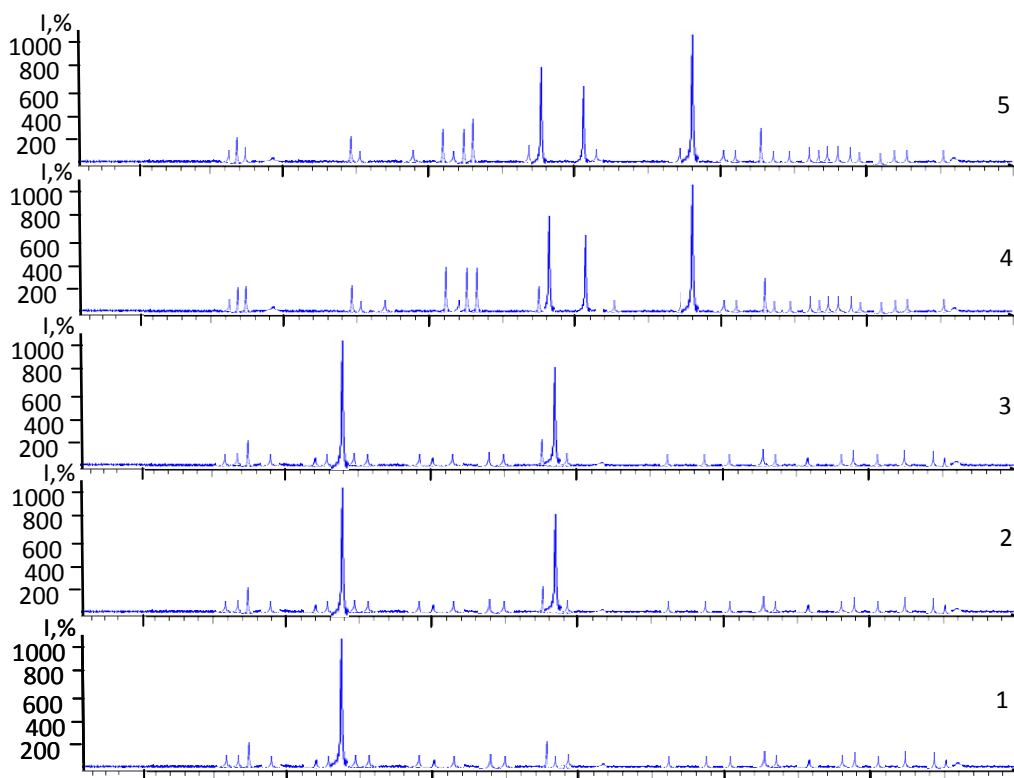
Rentgenfaza analizinin nəticələri (şək. 4) faza diagramı ilə tam uyğunluq təşkil edir.

SmGa_2S_4 - SmGa_2Se_4 sistemində ilkin birləşmələr və tərkibləri 40, 50 və 80 mol % SmGa_2S_4 olan ərintilərin difraktoqramları analogi olub, reflekslərin kiçik sürüşməsi ilə xarakterizə olunur. $\text{SmGa}_2\text{S}_{4-x}\text{Se}_x$ ərintilərin qəfəs parametrləri cədvəl 3-də verilmişdir.

Cədvəl 3

$\text{SmGa}_2\text{S}_{4-x}\text{Se}_x$ sisteminin bərk məhlul ərintilərinin DTA və PFA analizinin, mikrobərkliyin və sıxlığın təyininin nəticələri

Ərintilərin tərkibi, mol % SmGa_2S_4	Termiki qızma effektləri, K	Qəfəs parametrləri, Å			H μ , MPa	Sıxlıq, q/sm ³
		a	b	c		
SmGa_2Se_4	1200,1640	21,780	21,230	12,390	2220	6,02
20	1270,1290	21,700	21,088	12,360	2350	5,96
40	1350,1390	21,844	21,946	12,324	2360	5,54
50	1400,1440	21,466	20,850	12,280	2480	4,68
60	1460,1500	20,984	20,645	12,252	2600	4,46
80	1560,1640	20851	20,520	12,240	2740	4,38
SmGa_2S_4	1750	20,745	20,464	12,236	2800	4,28



Şəkil 4. *SmGa₂S₄ - SmGa₂Se₄ sisteminin ərintilərinin difraktoqramları.*
 1- SmGa₂S₄, 2-40, 3-50, 4-80, 5-100 mol % SmGa₂Se₄

Cədvəl 3-dən göründüyü kimi SmGa₂S₄ - SmGa₂Se₄ sisteminin ərintilərinin qəfəs parametrlərinin tərkibdən asılılığı Vegard qanuna tabedir. Bu onu göstərir ki, sistemdə bütün qatılıq intervalında anion əvəzləməsi ilə gedən bərk məhlullar sırası əmələ gəlir.

Nəticə

Beləliklə, ilk dəfə olaraq PbGa₂S₄ - SmGa₂S₄, PbGa₂S₄ - SmGa₂Se₄ və SmGa₂S₄ - SmGa₂Se₄ sistemləri tədqiq edilmiş və onların T-x faza diaqramları qurulmuşdur. Müəyyən edilmişdir ki, PbGa₂S₄ - SmGa₂S₄ sistemi kvazibinar, digərləri isə qismən kvazibinar kəsiklərdir.

Tədqiq edilən sistemlər bütün qatılıq intervalında arasıkəsilməz bərk məhlullar əmələ gəlməsi ilə xarakterizə olunurlar. Bərk məhlulların ortorombik qəfəs sabitləri hesablanmış, onların sıxlıq və mikrobərklikləri təyin olunmuşdur.

ƏDƏBİYYAT

1. Achariya S., Pandey J., Soni A. Enhancement of power factor for inherently poor thermal conductor by replacing Ge with Sn // ACS. Appl. Energy Mater. 2019. V. 2. № 21. P. 654-660.
2. Chonds S., Sharma P. Synthesis and characterization of Ag chalcogenide nanoparticles for possible applications in photovoltaic's // Mater. Science Poland. 2018. V. 36. № 3. P. 371-380.
3. Ortokov M.M., Klimovski I.I., Bentmann H. et.al. Prediction and observation of the first antiferromagnetic topological insulator // Materials Science. 2019. P. 416-421.
4. Shevelkov A.V. Chemical aspects of the thermoelectric materials engineering // Russian Chemical Review. 2008. V. 77. P. 1-19.
5. Wang Y., Zhao Y., Ding X. et al. Recent advances in the chemistry of layered post transition metal chalcogenides nonmaterial's for hydrogen evolution reaction // J. of Energy Chemistry. 2021. V. 60. № 1. p. 451-479.
6. Marshall J.M. Photovoltaic and photoactive materials, properties, technology and applications // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2012. № 1. p. 309.
7. Amiraslanova A.J., Imamaliyeva S.Z. Phase equilibria in the Ag₈Si₆-Ag₈Si₆ System and Characterization of solid solutions Ag₈Si₆-xTex // Applied Engineering. 2023. V. 6(2). P. 1-9.
8. Chalcogenides: Advances in Research and Application ed. Woodrow P. // Nova Science Publisher. 2018. 103 p.
9. Help B.K., Welldert K.S., Krytiak Y. et al. High electron mobility and disorder induced by samarium ion migration lead to good thermoelectric performance in the argirodite Ag₈Si₆Se₆ // Chemistry of Materials. 2017. V. 29. № 11. P. 4833-4839.
10. Du B., Zhang R., Lin M. et al. Crystal structure and improved thermoelectric performance of iron stabilized orthorhombic PbGa₂S₄ compound // Material Chemistry. 2019. V. 7. P. 394-404,
11. Eholiye R., Kom I.K., Flahaut J. Diagram de phase PbS-Ga₂S₃ system // C.r. Acad. Science. 1969. V. 268. P. 700-702.
12. Головей В.М., Оболончик В.А., Головей М.И. Система Ga₂S₃- PbS // Журн. Неорган. Химии. 1981. Т. 26. № 7. С. 1976-1978.
13. Chibouet Par A., Mazurier A., Cuittard M. Diagram de phase PbS-Ga₂S₃, etude crystallographique // Mater. Res. Bull. 1979. V.7. С. 1119-1124.
14. Бадиков Д., Бадиков В., Дорошенко Г. Новый низкофононный кристалл титгаллата свинца в качестве матрицы для лазеров среднего ИК-диапазона // Фотоника. 2008. № 4. С. 24-27.
15. Рустамов П.Г., Алиев О.М., Эйнуллаев А.В., Алиев И.П. Хальколантанаты редких элементов. Москва. Наука. 1989. 284 с.
16. Aliev O.M., Alieva O.A. SmS-Ga₂S₃ system // Bull.Soc. chim. Franse. 1986. № 1. P. 29-31.

17. Алиев О.М., Алиева О.А., Эйнуллаев А.В. Проекция поверхности ликвидуса тройной системы. Sm-Ga-Se // Журн. неорган. химии. 1993. Т. 38. № 8. С. 1418-1423.
18. Алиев О.М., Алиева О.А., Алиев И.П. Синтез и физико-химические свойства халькогаллатов и халькоиндатов самария // Неорган. Материалы. 1993. Т. 29. № 6. С. 831-833.
19. Badikov V., Badikov D., Doroshenko M. et al. Optical properties of lead thiogallate // Optical Materials. 2008. V.31. P. 184-188.
20. Kamenshchikov V.N., Suslikov L.M. Calculation optical properties of PbGa₂S₄ crystal // Optics and Spectroscopy. 2014. V.116. № 4. P. 564-566.
21. Asatryan G.R., Badikov V.V., Kramushchenko D.D. et al. Electron paramagnetic resonance of Dy³⁺ ions in lead thiogallate single crystal // Solid State. 2012, V. 54. № 6. P. 1245-1248.
22. Аносов В.Я., Озорова М.И., Фиалков Ю.Я. Основы физико-химического анализа. Москва: Наука 1976. С. 114-116.

Redaksiyaya daxil olub 04.12.2024