



Cu₈GeS₆-Ag₈GeSe₆ SİSTEMİNDƏ BƏRK MƏHLULLARIN ALINMASI VƏ RENTGENOQRAFİK TƏDQIQI

Albina Nəcəf qızı Poladova^{1*} , **Orxan Hüseyn oğlu Səmədli²** 

¹Kataliz və Qeyri-üzvi Kimya İnstitutu, Bakı, Azərbaycan

²Bakı Dövlət Universiteti, Bakı, Azərbaycan

*albinapoladova@gmail.com

Argirodit ailəsi birləşmələri və onlar əsasında fazalar termoelektrik, fotoelektrik, optik və s. kimi bir sıra funksional xassələr nümayiş etdirən ekoloji cəhətdən təmiz qiymətli funksional materiallardır. Digər tərəfdən, Cu⁺ və Ag⁺ ion keçiriciliyinə malikdirlər və ion-selektiv elektrodlar, müxtəlif növ elektrik batareyalar, displeylər, sensorlar və s. üçün elektrodlar və ya elektrolit materialları kimi istifadə edilə bilər.

İşdə DTA və RFA üsulları ilə Cu₈GeS₆ - Ag₈GeSe₆ sistemində faza tarazlıqları öyrənilmişdir. Müəyyən edilmişdir ki, otaq temperaturunda δ - fazanın homogenlik sahəsi 10-80 mol % Ag₈GeSe₆ tərkib intervalını əhatə edir. 34-66 mol % Ag₈GeSe₆ tərkib intervalında isə δ - faza yüksək entropiyalı faza kimi xarakterizə edilə bilər.

Açar sözlər: mis-germanium xalkogenidləri, gümüş-germanium xalkogenidləri, argirodit tipli fazalar, yüksək entropiyalı ərintilər.

GİRİŞ

Mis və gümüşün xalkogenidləri termoelektrik, fotoelektrik, optik və s. kimi xassələrinə görə qiymətli funksional materiallardandır [1-5]. Bu materiallar arasında ümumi formulu A₈B^{IV}X₆ (B- B-Si, Ge, Sn) olan argirodit ailəsi birləşmələri xüsusi yer tutur [6-10]. Bu birləşmələrin yüksək temperaturu modifikasiyaları qarışıq elektron-ion keçiriciliyinə malikdir [11-14] və ion-selektiv elektrodlar, müxtəlif növ elektrik batareyalar, sensorlar və s. üçün bərk elektrolitlər alınmasında perspektivli materiallar hesab olunur [15, 16].

Son illərin tədqiqatları göstərir ki, A₈B^{IV}X₆ formullu argirodit ailəsi birləşmələri əsasında kation (A və B^{IV}) və anion (X) əvəzləməli çoxkomponentli fazalar almaq mümkündür [17-22]. Argirodit ailəsi birləşmələrindən təşkil olunmuş sistemlərin tədqiqi yüksək entropiyalı ərintilərin alınması baxımından da böyük maraq kəsb edir. Yüksək entropiyalı ərintilər (YEƏ), tərkibinə ən azı beş element daxil olan və hər birinin konsentrasiyası 5-35 mol % arasında olan fazalardır [23-25]. YEƏ-nin əsas xüsusiyyəti, termodinamik cəhətdən sabit, birləşməli və yüksək möhkəmliyə malik əvəzlənmə bərk məhlullarının formalaşmasıdır [26, 27]. Bu materiallar, superkeçiricilik, yüksək aşınma və korroziya davamlılığı, həmçinin güclü maqnit xassələrinə görə tədqiqatçıların diqqətini cəlb edirlər [28, 29]. Xalkogenid sistemlərində isə yüksək entropiyalı ərintilər daha çox yüksək effektivliyə malik termoelektrik materiallarının alınması baxımından maraqlıdır [30-32].

Təqdim olunan işdə məqsəd Cu₈GeS₆-Ag₈GeSe₆ sistemində faza tarazlıqlarının tədqiqi və yeni fazaların, o cümlədən yüksək entropiyalı xəlitələrin aşkar edilməsidir.

Tədqiq olunan sistemin ilkin birləşmələri ətraflı öyrənilmişdir. Cu₈GeS₆ birləşməsi 1253 K-də peritektik reaksiya üzrə əmələ gəlir, polimorf keçid temperaturu isə 328 K-dir [33]. Onun aşağı temperaturu (RT) modifikasiyası ortorombik sinqoniyada kristallaşır: F. qr. *Pmn*2₁, *a* = 0.70445 nm; *b* = 0.69661 nm; *c* = 0.98699 nm [34]. Yüksək temperaturu (HT) modifikasiyası kubik quruluşa malikdir: F.qr. *F*-43*m*. *a* = 0.99567 nm [34].

Ag₈GeSe₆ 1175 K-də konqruent əriyir və polimorf keçid temperaturu isə 321 K-dir [35, 36]. Bu birləşmənin HT- modifikasiyası kubik strukturda kristallaşır: *F*-43*m*, *a* = 1.099 nm [37]), RT-



modifikasiyası isə ortorombik kristal quruluşa malikdir., $Pmn2_1$, $a = 0,7823$ nm, $b = 0,7712$ nm, $c = 1,0885$ nm [38]).

MATERIAL VƏ METODLAR

İlkin Ag_8GeSe_6 və Cu_8GeSe_6 birləşmələrinin sintezi yüksək təmizliyə malik elementar komponentlərdən vakuum şəraitində birgə əridilməsi ilə iki zonalı maili sobada aparılmışdır. Ampulanın 2/3 hissəsi sobaya daxil edilmiş və “isti” zonanın temperaturu birləşmənin ərimə temperaturundan 30–50 K yuxarı temperatura qədər yavaş-yavaş qızdırılmışdır, “soyuq” zonanın temperaturu isə xalkogenin qaynama nöqtəsindən 50–100 K aşağı olmuşdur. Xalkogenin əsas kütləsi reaksiyaya girdikdən sonra ampula tamamilə sobaya daxil edilmişdir, 2–3 saat saxlanılmışdır və söndürülmüş sobada soyudulmuşdur. Ag_8GeSe_6 otaq temperaturuna qədər yavaş-yavaş soyudulmuşdur, Cu_8GeSe_6 -nın inkonkruent olduğu nəzərə alınaraq, sintezdən sonra soba bu birləşmənin peritektik parçalanma nöqtəsindən aşağı olan 900 K-yə qədər soyudulmuşdur və 100 saat saxlanılmışdır. Birləşmələr sintez edildikdən sonra DTA və RFA üsulları ilə identifikasiya edilmişdir.

Sintez olunan birləşmələrin DTA nəticələri onların 328 K və 321 K-də polimorf çevrilməyə məruz qalması və müvafiq olaraq 1253 və 1175 K temperaturda əriməsini göstərir ki, bu da yuxarıda verilən ədəbiyyat məlumatlarına uyğun gəlmişdir.

Rentgenfaza analizi də sintez edilən nümunələrin bircinsli olmasını təsdiq etmişdir. Hər iki birləşmənin difraksiya mənzərəsi ədəbiyyat məlumatları ilə [34, 37, 38] üst-üstə düşür və müvafiq sinqoniyalarda tam indekslərdir.

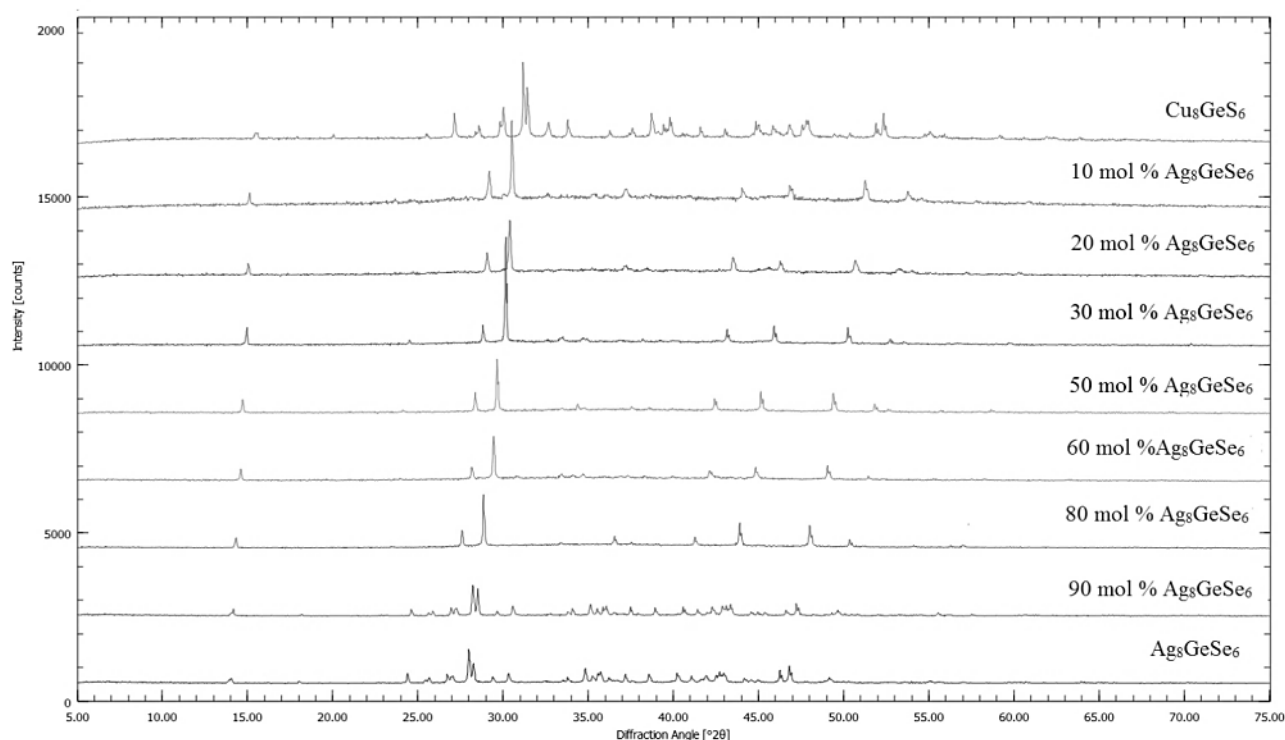
Alınmış ilkin birləşmələrin müxtəlif nisbətlərdə vakuumlaşdırılmış kvarts ampulalarda birgə əridilməsi ilə Cu_8GeSe_6 - Ag_8GeSe_6 sisteminin xəlitələri hazırlanmışdır. Nümunələri tarazlıq halına gətirmək üçün onlar 900 K-də uzun müddət (500 saat) termiki emal edilmişlər. Hər tərkib üçün iki nümunə hazırlanmışdır, onlardan biri termiki emaldan sonra cərəyan mənbəyindən ayrılmış sobada tədricən soyudulmuş, digəri isə ampulanı 900 K-dən soyuq suya atmaqla tavlanmışdır. Hazırlanmış nümunələr DTA və RFA üsulları ilə tədqiq edilmişdir.

Diferensial termiki analiz üçün NETZSCH 404 F1 Pegasus cihazında və "TC-08 Termocouple Data Logger" elektron məlumat qeyd edicisi əsasında hazırlanmış xromel-alümel termocütlü çoxkanallı DTA cihazından istifadə olunmuşdur. Ölçmə nəticələri NETZSCH Proteus Proqramı istifadə edərək işlənmişdir. Temperaturun ölçülməsi dəqiqliyi ± 2 K-dir.

Rentgenfaza analizi otaq temperaturunda $2\theta = 5\div 75$ bucaq diapazonunda $CuK_{\alpha 1}$ şüalanmasından istifadə etməklə Bruker D2 PHASER difraktometrində aparılmışdır. Alınan difraksiya mənzərələri Topas V3.0 Software Bruker proqramından istifadə etməklə analiz edilmiş və qəfəs parametrləri hesablanmışdır.

NƏTİCƏLƏR VƏ ONLARIN MÜZAKİRƏSİ

Cu_8GeSe_6 - Ag_8GeSe_6 sisteminin termiki emaldan keçirilmiş və yavaş soyudulmuş nümunələri RFA üsulu ilə tədqiq edilmişdir. DTA və RFA nəticələri Cu_8GeSe_6 - Ag_8GeSe_6 sisteminə ilkin birləşmələrin yüksək temperaturlu modifikasiyaları arasında fasiləsiz, aşağı temperaturlu modifikasiyaları əsasında isə geniş bərk məhlullar sahələrinin əmələgəlməsini göstərdi. Alınmış toz difraktoqram nəticələri şəkil 1-də verilir. Göründüyü kimi, sistemin 10–80 mol % Ag_8GeSe_6 tərkib intervalına aid bütün nümunələr keyfiyyətcə ilkin birləşmələrdən fərqli kubik sinqoniyaya xarakterik olan difraksiya mənzərəsinə malikdir. Tərkibində 90 mol % Ag_8GeSe_6 olan nümunənin difraksiya mənzərəsi təmiz, ortorombik quruluşlu Ag_8GeSe_6 ilə eyni difraksiya mənzərəsinə əks etdirir.

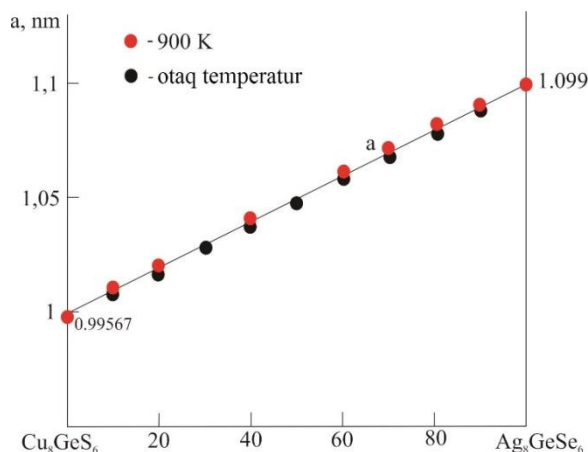


Şəkil 1. Cu_8GeS_6 - Ag_8GeSe_6 sisteminin bəzi xəlitələrinin otaq temperaturunda ovuntu difraktoqramları

Cədvəl

Cu_8GeS_6 - Ag_8GeSe_6 sisteminin kristalloqrafik parametrləri

Tərkib, mol % Ag_8GeSe_6	Kristal struktur, F.qr., qəfəs parametrləri, nm	
	Otaq temperatur	900 K
0 (Cu_8GeS_6)	Ortorombik: $Pna21$, $a=0.70445$; $b=0.69661$; $c=0.98699$;	Kubik: ($F-43m$), $a=0.99567(6)$
10	Kubik: ($F-43m$), $a=0.00782(5)$	-", $a=1.0105(6)$
20	-", $a=1.01572(5)$	-", $a=1.0204(6)$
30	-", $a=1.02793(5)$	
40	-", $a=1.03865(5)$	-", $a=1.0425(5)$
50	-", $a=1.04453(5)$	
60	-", $a=1.0589(5)$	-", $a=1.0514(6)$
70	-", $a=1.05464(6)$	-", $a=1.05641(7)$
80	-", $a=1.0732(5)$	-", $a=1.0825(6)$
90	Ortorombik, $Pna21$, $a=0.7809$ (3); $b=0.7698(2)$; $c=1.0862(3)$	-", $a=1.0908(6)$
100 (Ag_8GeSe_6)	Ortorombik, $Pna21$, $a=0.7823(1)$; $b=0.7712(2)$; $c=1.0885(3)$	-", $a=1.099(5)$



Şəkil 2. Cu₈GeS₆ - Ag₈GeSe₆ sistemində kubik fazanın kristal qəfəsinin periodunun tərkibindən asılılığı

Beləliklə, təqdim olunan ovuntu difraktoqramlarının nəticələri göstərir ki, otaq temperaturunda 10-80 mol % Ag₈GeSe₆ tərkib intervalında sistemdə kubik quruluşlu aralıq faza əmələ gəlir, RT-Ag₈GeSe₆ əsasında həllolma 10 mol %-dən bir qədər artıqdır, RT-Cu₈GeS₆ əsasında həllolma isə daha azdır.

Sistemin 900 K-də termiki emaldan sonra tavlandırılmış bir neçə nümunələrini RFA üsulu ilə tədqiq etdik. Müəyyən olundu ki, onların hamısı kubik sinqoniya üçün xarakterik difraksiya mənzərəsinə malikdirlər.

Hər iki seriyadan olan nümunələrin difraktoqramları TOPAS 3.0 kompüter proqramından istifadə etməklə indeksləşdirildi və onların qəfəs parametrləri hesablandı (cədvəl). Cədvəldəki rəqəmlərin müqayisəli analizi göstərir ki, 10–80 mol% Ag₈GeSe₆ tərkibli bərk məhlullar həm otaq temperaturunda, həm də 900 K-də kubik quruluşludur. Şəkil 2-dən görüldüyü kimi həm tavlandırılmış, həm də yavaş soyudulmuş nümunələrin qəfəs periodunun tərkibdən asılılığı Veqard qaydasına tabe olur. 900 K-ə aid qəfəs periodları otaq temperaturuna aid qiymətdən cüzi yuxarıdır ki, bu da qəfəsin qızma zamanı müəyyən termiki genişlənməyə məruz qalması ilə izah oluna bilər.

Yekunda qeyd edək ki, tədqiq etdiyimiz sistemdə 34-66 mol % intervalına aid faza, yüksək entropiyalı xəlitə hesab oluna bilər. Gözlənilirdi ki, bu sahədə stabil bircinsli δ - faza mövcuddur. Eyni zamanda Cu-Ag və S-Se əvəzləmələri sistemin qarışma entropiyasının artmasına, bu da sistemin termodinamik stabilliyinin yüksək olmasına səbəb olur.

YEKUN NƏTİCƏ

Beləliklə, işdə ilk dəfə olaraq Cu-Ag-Ge-S-Se beşkomponentli sisteminin Cu₈GeS₆ - Ag₈GeSe₆ kəsiyi üzrə faza tarazlıqları xarakteri öyrənilmişdir. Müəyyən edilmişdir ki, ilkin birləşmələrin yüksək temperaturlu modifikasiyaları arasında fasiləsiz δ -faza, aşağı temperaturlu modifikasiyaları əsasında isə məhdud bərk məhlul sıraları əmələ gətirir. Göstərilmişdir ki, geniş tərkib intervalında (34-66 mol % Ag₈GeSe₆) δ -faza yüksək entropiyalı xəlitə hesab oluna bilər.

ƏDƏBİYYAT

1. Woodrow, P. Chalcogenides: Advances in Research and Applications / P.Woodrow. - New York: Nova Science Publishers, - 2018. - 111 p.
2. Sanghoon, X.L. Chalcogenides: From 3D to 2D and Beyond / X.L.Sanghoon, L.J.Tengfei, L.Y.Zhang // Elsevier, - 2019. - 398 p.
3. Khan, M.E. Metal-Chalcogenide Nanocomposites. Fundamentals, Properties and Industrial Applications / M.E. Khan, J. Aslam - Woodhead Publishing, - 2023.



4. Puthran, S. Review of Chalcogenide-Based Materials for Low-, Mid-, and High-Temperature Thermoelectric Applications / S.Puthran, G.Sh.Hegde, A.N. Prabhu // Journal Electronic Materials, - 2024. - p. 5739–5768.
5. Kumar, A. 2D Semiconducting Materials for Electronic, Photonic, and Optoelectronic Devices / A.Kumar, R.K. Gupta, - CRC Press, - 2024.
6. Jiang, B. Cu_8GeSe_6 -based thermoelectric materials with an argyrodite structure / B. Jiang, P.Qiu, E. Eikeland [et al.] // Journal Materials Chemistry C, - 2017. - vol. 5, - p. 943–952.
7. Jiang, Q. Ecofriendly highly robust Ag_8SiSe_6 -based thermoelectric composites with excellent performance near room temperature / Jiang, Q., Li, S., Luo, Y. [et al.] // Journal ACS Applied Materials Interfaces, -2020. vol. 12, -p. 54653-54661.
8. Fan, Y. Enhanced thermoelectric properties of p-type argyrodites Cu_8GeS_6 through Cu / Y. Fan, G. Wang, R. Wang [et al.] // Journal of Alloys and Compounds, - 2020.
9. Semkiv, I.V. Photoluminescence and electronic structure of α' - Ag_8GeS_6 crystals / I. Semkiv, N. Kashuba, H. Ilchuk, [et al.] // Low Temperature Physics, - 2023. vol.49, - p. 1058–1065.
10. Pogodin, A.I. Preparation and ionic conductivity of Ag_8GeS_6 -based ceramic materials / A.I. Pogodin, M.J. Filep, S. Vorobiov, [et al.] // – Semiconductor Physics Quantum Electronics Optoelectronics, - 2023. vol. 26, - p. 270-277.
11. Heep, B.K., High electron mobility and disorder induced by silver ion migration lead to good thermoelectric performance in the argyrodite Ag_8SiSe_6 / B.K.Heep, K.SWeldert, Y. Krysiak, [et al.] // Chemical Materials, - 2017. vol. 29, - p. 4833-4839.
12. Li, W. Low Sound Velocity Contributing to the High Thermoelectric Performance of Ag_8SnSe_6 / W.Li, S.Lin, B.Ge [et al.] // Advanced Science, - 2016. vol. 3, - p. 1600196.
13. Lin, S. Enhanced Weighted Mobility Induced High Thermoelectric Performance in Argyrodite Ag_8SnSe_6 / S.Lin, Y.Hou, J.Yang, [et al.] // ACS Applied Materials & Interfaces, - 2024. vol. 16, - p. 58912–58919.
14. Sardarly, R.M. Ionic conductivity of the Ag_8GeSe_6 compound / R.M. Sardarly, G.M. Ashirov, L.F. Mashadiyeva [et al.] // Modern Physics Letters B, - 2023. vol. 36, - p. 2250171.
15. Li, L. High thermoelectric performance of superionic argyrodite compound Ag_8SnSe_6 / L.Li, Y.Liu, J.Dai [et al.] // Journal Materials Chemical C, - 2016. vol. 4, - p. 5806–5813.
16. Studenyak, I.P. Electrical properties of copper- and silver-containing superionic $(\text{Cu}_{1-x}\text{Ag}_x)_7\text{Si}_5\text{I}$ mixed crystals with argyrodite structure / I.P.Studenyak, A.I.Pogodin, V.I.Studenyak [et al.] // Solid State Ionics, - 2020. vol. 345, - p. 115183.
17. Babanly, M.B. Phase Diagrams in the Development of the Argyrodite Family Compounds and Solid Solutions Based on Them / M.B.Babanly, Y.A.Yusibov, S.Z.Imamaliyeva [et al.] // - Journal Phase Equilibria and Diffusion, - 2024. vol. 45, - p. 228–255.
18. Amiraslanova, A.J. Phase relations in the Ag_8SiSe_6 - Ag_8SiTe_6 system and characterization of solid solutions / A.J.Amiraslanova, K.N.Babanly, S.Z.Imamaliyeva [et al.] // Azerbaijan Chemical Journal, - 2023. - p. 169-177.
19. Amiraslanova, A.J. Phase equilibria in the Ag_8SiSe_6 - Ag_8SiTe_6 system and characterization of solid solutions $\text{Ag}_8\text{SiSe}_{6-x}\text{Te}_x$ / A.J.Amiraslanova, K.N.Babanly, S.Z.Imamaliyeva [et al.] // Applied Chemical Engineering, - 2023. vol. 6, - p. 1-9.
20. Aliyeva, Z.M. The phase equilibria in the Ag_2S - Ag_8GeS_6 - Ag_8SnS_6 system / Z.M.Aliyeva, S.M.Bagheri, Z.S. Aliev [et al.] // Journal Alloys and Compounds, - 2014. vol. 611, - p. 395-400.
21. Babanly, M.B. Thermodynamic properties of complex copper chalcogenides review / M.B.Babanly, L.F.Mashadiyeva, S.Z.Imamaliyeva [et al.] // Chemical Problems, - 2024. vol. 3, - p. 243-280.
22. Bayramova, U.R. Phase Equilibria in the Cu_2S - Cu_8SiSe_6 - Cu_8GeS_6 System and Thermodynamic Functions of Phase Transitions of the $\text{Cu}_8\text{Si}_{(1-x)}\text{Ge}_x\text{S}_6$ Argyrodite / U.R.Bayramova, K.N. Babanly, E.I.Ahmadov [et al.] // Journal Phase Equilibria and Diffusion, - 2023. vol. 44, - p. 509-519.
23. Ye, Y. High-entropy alloy: challenges and prospects / Y.Ye, Q.Wang, J.Lu [et al.] // Materials



Today, - 2016. vol. 16, - p. 349-362

24. Miracle, D. A critical review of high entropy alloys and related concepts / D.Miracle, O.Senkov // *Acta Materials*, - 2017. vol. 122, -p. 448-511

25. Zhang, W. Science and technology in high-entropy alloys / W.Zhang, P.K.Liaw, Y.Zhang // *Science China Materials*, - 2018. vol. 61, - p. 2–22.

26. Widom, M. Modeling the structure and thermodynamics of high-entropy alloys / M.Widom, - *Journal Materials Research*, - 2018. vol. 33, - p. 2881–2898.

27. Ye, Y.F. Design of high entropy alloys: A single-parameter thermodynamic rule / Y.F.Ye, Q.Wang, Y.Yang [et al.] // *Scripta Materialia*, - 2015. vol. 104, - p. 53-55.

28. Yu, B. Recent progress in high-entropy alloys: A focused review of preparation processes and properties / B.Yu, Y.Ren, Y.Zeng [et al.] // *Journal of Materials and Research Technology*, - 2024. vol. 29, - p. 2689-2719.

29. Krishna, A. A comprehensive review on advances in high entropy alloys: Fabrication and surface modification methods, properties, applications, and future prospects / A.Krishna, N.Noble, N.Radhika [et al.] // *Journal of Manufacturing Processes*, - 2024. vol. 109, - p. 583-606.

30. Buckingham, M. A. High entropy metal chalcogenides: synthesis, properties, applications and future directions / M.A.Buckingham, B.Ward-O'Brien, W.Xiao [et al.] // *Chemical Communications*, - 2022. vol. 58, - p. 8025-8037.

31. Seshita, A. Stabilization and high thermoelectric performance of high-entropy-type cubic Ag-Bi(S, Se, Te)₂ / A.Seshita, A.Yamashita, T.Fujita [et al.] // *Journal Alloys and Compounds*, - 2024. vol. 1004, - p. 175679.

32. Deng, Z. Semiconducting High-Entropy Chalcogenide Alloys with Ambi-ionic Entropy Stabilization and Ambipolar Doping / Z.Deng, A.Olvera, J.Casamento [et al.] // *Chemical Materials*, - 2020. vol. 32, - p. 6070–6077.

33. Khanafer, M. Etude du système Cu₂S-GeS₂, Surstructure du composé Cu₂GeS₃. Transition de phase de Cu₈GeS₆ / M. Khanafer, J. Rivet, J. Flahaut [et al.] // *Bulleten de la Societe Chimique de France*, - 1973. vol. 3, - p. 859-862, in French.

34. Onoda, M. Low-temperature forms of superionic conductors, Cu₈GeS₆ and Ag₇TaS₆, and ion conduction path / M.Onoda, H.Wada, A.Sato [et al.] // *Journal Alloys and Compounds*, - 2004. vol. 383, - p. 113-117.

35. Salayeva, Z.Yu. Ag₂Se-GeSe₂ and Ag₈GeSe₆-Ge systems / Z.Yu.Salayeva, M.R.Allazov, A.A.Movsumzade // *Russian Journal Inorganic Chemistry*, - 1985. vol. 30, - p. 1834-1837.

36. Yusibov, Y.A. Study and 3D modeling of the phase diagram of the Ag-Ge-Se system / Y.A. Yusibov, I.Dzh.Alverdiyev, F.S Ibrahimova [et al.] // *Russian Journal Inorganic Chemistry*, - 2017, - vol. 62, - p. 1223-1233.

37. Gorochoy, O. Les composés Ag₈MX₆ (M = Si, Ge, Sn et X = S, Se, Te) // - Paris: *Bulletin de la Société Chimique de France*, - 1968. 101(6), - p.2263-2275

38. Carré, D. Structure de Ag₈GeSe₆ β' / D.Carré, F.R.Ollitrault, J.Flahaut [et al.] // *Acta Crystallographia B*, - 1980. vol. 36, - p. 245-249.



PREPARATION AND X-RAY STUDY OF SOLID SOLUTIONS IN THE Cu_8GeS_6 - Ag_8GeSe_6 SYSTEM

A.N. Poladova, O.H. Samadli

The argyrodite family compounds and their phases based on them, are environmentally friendly valuable functional materials that exhibit a range of functional properties such as thermoelectric, photoelectric, optical, etc. Moreover, they possess Cu^+ and Ag^+ ion conductivity and can be used as electrodes or electrolyte materials for ion-selective electrodes, various types of electric batteries, displays, sensors, etc. In this work, the phase equilibria in the Cu_8GeS_6 - Ag_8GeSe_6 system were studied using DTA and XRD methods. It has been determined that at room temperature, the homogeneity range of the δ -phase covers the composition interval of 40-80 mol % Ag_8GeSe_6 . In the 34-66 mol % Ag_8GeSe_6 composition range, the δ -phase can be characterized as a high-entropy phase.

Key words: *copper – germanium sulfides, silver – germanium selenides, argyrodite-like phases, high-entropy alloys*

СИНТЕЗ И РЕНТГЕНОВСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ В СИСТЕМЕ Cu_8GeS_6 - Ag_8GeSe_6

А.Н. Поладова, О.Х. Самадли

Соединения семейства аргиродита и фазы на их основе, являются ценными экологически чистыми функциональными материалами, которые обладают рядом функциональных свойств, таких как термоэлектрические, фотоэлектрические, оптические и т.д. Кроме того, они обладают проводимостью по ионам Cu^+ и Ag^+ и могут быть использованы в качестве электродов или электролитов для ионно-селективных электродов, различных типов электрических батарей, дисплеев, датчиков и т.д. В представленной работе методами ДТА и РФА изучены фазовые равновесия в системе Cu_8GeS_6 - Ag_8GeSe_6 . Установлено, что при комнатной температуре область гомогенности δ -фазы охватывает интервал составов 40-80 мол % Ag_8GeSe_6 . В интервале составов 34-66 мол % Ag_8GeSe_6 δ -фаза может быть охарактеризована как высокоэнтропийная фаза.

Ключевые слова: *сульфиды меди – германия, селениды серебра – германия, аргиродитоподобные фазы, высокоэнтропийные сплавы.*