

AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASI

Əlyazması hüququnda

GeAsSeS ŞÜŞƏVARI SİSTEMİNİN ELASTİK, İZOSTATİK VƏ SƏRT GƏRGİN OBLASTLARDA LOKAL QURULUŞU VƏ FİZİKİ XASSƏLƏRİ

İxtisas: 2220.01-Yarımkeçiricilər fizikası

Elm sahəsi: Fizika

İddiaçı: **Samir Mehman oğlu Məmmədov**

Fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi almaq üçün təqdim edilmiş
dissertasiyanın

AVTOREFERATI

Bakı – 2025

Dissertasiya işi, Azərbaycan Respublikası Elm və Təhsil Nazirliyi Fizika İnstitutunun “Qeyri-kristallik yarımqeçiricilərin fizikası və elektronikasi” laboratoriyasında yerinə yetirilmişdir.

Elmi rəhbərlər: AMEA-nın müxbir üzvü, fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor
Səlimə İbrahim qızı Mehdiyeva

fizika elmləri doktoru, dosent
Rəhim İbad oğlu Ələkbərov

Rəsmi opponentlər: fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor
Zakir Ağasoltan oğlu Cahangirli

fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor
Kərim Rəhim oğlu Allahverdiyev

fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor
Maarif Əli oğlu Cəfərov

Azərbaycan Respublikasının Prezidenti yanında Ali Attestasiya Komissiyasının Azərbaycan Respublikasının Elm və Təhsil Nazirliyi Fizika İnstitutunun nəzdində fəaliyyət göstərən ED 1.14 Dissertasiya Şurası.

Dissertasiya şurasının
sədri:



Akademik
Arif Məmməd oğlu Həşimov

Dissertasiya şurasının
elmi katibi:

fizika elmləri doktoru, professor
Rəfiqə Zabil qızı Mehdiyeva

Elmi seminarın
sədri:

fizika riyaziyyat elmləri doktoru, professor
Hüseyn Behbud oğlu İbrahimov

İŞİN ÜMUMİ XARAKTERİSTİKASI

Mövzunun aktuallığı və işlənmə dərəcəsi. Optik siqnalların itkisiz ötürülməsi məqsədilə yüksək texnoloji xüsusiyyətlərə və optimal parametrlərə malik fiber optik materialların alınması və eləcə də onların uğurlu tətbiqi müasir opto-elektron sənayesinin qarşısında duran əsas problemlərdən hesab olunur. Tərkibi kristallaşmaya davamlı olmaqla yanaşı, termik stabilliyi, kimyəvi davamlılığı, şüşə formalaşma qabiliyyəti yüksək qiymətlərə malik olan yeni funksional materialların alınması və onların fiziki xassələrinin araşdırılmasına ciddi zərurət vardır. Bunları nəzərə alaraq tədqiq olunan maddələrdə göstərilən parametrlərin yüksək olması səbəblərinin onların lokal quruluşu, istilik və optik xassələrinin təbiəti və eləcə də fiziki mexanizmləri ilə əlaqələndirilərək araşdırılması elmi və tətbiqi baxımdan aktualdır. Elmi araşdırmalar göstərir ki, bəsit və binar xalkogenid şüşələrdə quruluş və termik qeyri-stabilliyin mövcudluğu onların fiberlərdə tətbiqinə məhdudiyyətlər yaradır. Buna görə tələb olunan şüşələşmə temperaturuna (T_g) və termik genişlənmə əmsalına malik olan maddələrin alınması və onların istilik, optik xassələrinin araşdırılması fiber optika üçün xüsusilə zəruridir¹. Bu baxımdan geniş funksional imkanlara malik mürəkkəb komponentli xalkogenid şüşəvari materialların alınması və fiziki xassələrinin araşdırılması tətbiqi məqsədlər üçün əlverişli zəmin yaradır.

Təqdim olunan dissertasiyada aparılan elmi araşdırmalar göstərir ki, Ge-As-Se-S xalkogenid şüşəvari sistemində xalkogen (Se, S) və xalkogen olmayan (Ge, As) tərkib komponentlərinin atom faiz nisbətini məqsədyönlü şəkildə dəyişərək, şüşə formalaşma meyilliyinin göstəricisi (şüşə formalaşma qabiliyyəti və ya Hrubby ədədi (H_r)) və termik stabillik parametrləri (H^1 , S) yüksək və optik parametrləri geniş intervalda dəyişən materiallar almaq mümkündür. Beləliklə qeyd olunan maddələrin müxtəlif topoloji şüşə hallarında (elastik, izostatik və sərt gərgin) lokal quruluşu və fiziki xassələri arasında əlaqələrin

¹ Zahng Y. Raman gain and femtosecond laser induced damage of Ge-As-S chalcogenide glasses / Yan Zhang, Yinsheng Xu, Chenyang You [et al.] // Opt Express, -2017; ;25(8): -p.8886-8895

mexanizmlərinin dəqiq araşdırılması təbii və elmi nöqtəyi nəzərdən aktualdır.²

Tədqiqatın obyektı və predmeti: Tədqiqatın obyektı germanium və arsenin (Ge, As) xalkogenidləri əsasında $\text{Ge}_4\text{As}_{14}\text{Se}_{82}$, $\text{Ge}_4\text{As}_{14}\text{Se}_{80}\text{S}_2$, $\text{Ge}_7\text{As}_{16}\text{Se}_{72}\text{S}_5$, $\text{Ge}_{10}\text{As}_{20}\text{Se}_{60}\text{S}_{10}$, $\text{Ge}_{17.5}\text{As}_{15}\text{Se}_{52.5}\text{S}_{15}$, $\text{Ge}_{24}\text{As}_{19}\text{Se}_{37}\text{S}_{20}$, $\text{Ge}_{25}\text{As}_{10}\text{Se}_{40}\text{S}_{25}$, $\text{Ge}_{26}\text{As}_{18}\text{Se}_{26}\text{S}_{30}$ və $\text{Ge}_{33}\text{As}_{17}\text{Se}_{15}\text{S}_{35}$ sistemləri, predmeti isə bu maddələrin elastik, izostatik və sərt gərgin oblastlarda lokal quruluşu və fiziki xassələrinin araşdırılmasıdır.

Tədqiqatın məqsəd və vəzifələri: Ge-As-Se-S şüşəvari sistemlərində xalkogen (Se, S) və qeyri-xalkogen (Ge, As) modifikatorların müxtəlif topoloji şüşə hallarına (elastik, izostatik, sərt gərgin), onların lokal quruluşuna, şüşə formalaşma qabiliyyətinə, termik stabilliyinə, şüşə və kristallaşma oblastlarına, optik parametrlərinə təsir mexanizmlərinin müəyyənləşdirilməsidir.

İşin praktiki məqsədi passiv fiber ötürücülər üçün kristallaşmaya davamlılığı, termik stabilliyi və şüşə formalaşma qabiliyyəti (Hr) yüksək olan yeni funksional materialların alınmasıdır.

Bu məqsədlə aşağıdakı məsələlər həll edilmişdir

- Mürəkkəb komponentli və müxtəlif topoloji şüşə hallarına malik (izostatik, sərt gərgin, elastik) $\text{Ge}_4\text{As}_{14}\text{Se}_{82}$, $\text{Ge}_4\text{As}_{14}\text{Se}_{80}\text{S}_2$, $\text{Ge}_7\text{As}_{16}\text{Se}_{72}\text{S}_5$, $\text{Ge}_{10}\text{As}_{20}\text{Se}_{60}\text{S}_{10}$, $\text{Ge}_{17.5}\text{As}_{15}\text{Se}_{52.5}\text{S}_{15}$, $\text{Ge}_{24}\text{As}_{19}\text{Se}_{37}\text{S}_{20}$, $\text{Ge}_{25}\text{As}_{10}\text{Se}_{40}\text{S}_{25}$, $\text{Ge}_{26}\text{As}_{18}\text{Se}_{26}\text{S}_{30}$ və $\text{Ge}_{33}\text{As}_{17}\text{Se}_{15}\text{S}_{35}$ maddələri sintez edilmişdir;

- Sintez olunan maddələrin lokal quruluşu Rentgen difraksiya səpilməsi metodu ilə, tərkibi isə enerji dispersiv Rentgen analizi vasitəsi ilə müəyyən edilmişdir;

- Sintez olunan maddələrin lokal quruluşunu təşkil edən müxtəlif rabitələrin və quruluş elementlərinin (piramidal və tetraedrik) identifikasiyası Raman spektroskopiyası vasitəsilə araşdırılmışdır.

- Diferensial skanlayıcı kalorimetriya metodu ilə sintez olunan maddələrdə şüşə və kristallaşma prosesləri, şüşələşmə qabiliyyəti, kristallaşma sürəti parametrləri və eləcə də onların lokal quruluş

² Zahng Y. Raman gain and femtosecond laser induced damage of Ge-As-S chalcogenide glasses / Yan Zhang, Yinsheng Xu, Chenyang You [et al.] // Opt Express, -2017; ;25(8): -p.8886-8895

parametrləri ilə əlaqələri topoloji məhdudiyətlər, laylı quruluş ideyası və kimyəvi nizamlanmış şəbəkə modelləri əsasında araşdırılmışdır.

- Vakuumda termik buxarlandırma üsulu ilə alınan nazik təbəqələrin optik udulması maddənin fraktal xüsusiyyətləri nəzərə alınaraq tədqiq edilmişdir.

- Vakuumda termik buxarlandırma üsulu ilə alınan sendviç quruluşlu nazik təbəqələrin volt amper xarakteristikasına (VAX) karbohidrogen mühitinin təsiri və nümunələrin tətbiq xüsusiyyətləri öyrənilmişdir.

Tədqiqatın metodları: Ge-As-Se-S şüşəvari sistemlərində müxtəlif topoloji şüşə hallarına uyğun lokal quruluşun, şüşə və kristallaşma proseslərinin, şüşə formalaşma qabiliyyətinin, termik stabilliyin və optik parametrlərin tədqiqində Rentgen şüalarının difraksiyası, diferensial skanlayıcı kalorimetriya, Raman spektroskopiyası, optik spektroskopiya metodları tətbiq olunmuşdur

Müdafiyyə çıxarılan əsas elmi müddəalar:

1. Ge-As-Se-S xalkogenid şüşəvari sisteminin amorf matrisasını əmələ gətirən tetraedral ($\text{GeS}_{4/2}$, $\text{GeSe}_{4/2}$) və piramidal ($\text{AsSe}_{3/2}$) quruluş elementlərinin birgə nisbi konsentrasiyasının artması hesabına kristallaşmanın həcmi payının temperaturdan asılılığına məxsus qüvvət üstünün (n) və kristallaşmanın sürət əmsalının (ICR) azalması;

2. Kristallaşmanın sürət əmsalının (ICR) azalması ilə amorf matrisin rabitə əlaqəliliyinin və o cümlədən orta rabitə enerjisinin ($\langle E \rangle$) artması arasındakı korrelyativ əlaqələrin aşkarlanması;

3. Topoloji nizamlılıq şərtinə yaxın olan ($f \sim 0$; $N_{co} \sim 3$) maddələrdə kristallaşmanın sürət əmsalı (ICR) aşağı olmaqla yanaşı, şüşə və kristallaşma temperaturları fərqi ($\Delta T_{c-g} = 71 \div 87 \text{ K}$) nisbətən yüksək olması;

4. Germaniumun atom faiz miqdarı yüksək olan $\text{Ge}_{33}\text{As}_{17}\text{Se}_{15}\text{S}_{35}$ tərkibində kristallaşma prosesinin sürətlənməsi ilə yanaşı şüşə və kristallaşma temperaturları fərqi (ΔT_{c-g}) ədədi qiymətinin nəzərə çarpacaq səviyyədə azalması ($\Delta T_{c-g} = 60 \text{ K}$);

5. Nümunələrin optik udulma əmsalının üstlü asılılıq oblastındakı spektral asılılıqlarından alınan nəticələrin maddənin fraktal təbiəti ilə əlaqələndirilməsi.

Tədqiqatın elmi yeniliyi:

• Ge-As-Se-S xalkogenid şüşəvari sistemlərində optik udulmanın üstlü asılılıq oblastındakı qüvvət üstünün (n) $n=1,5$ və 2-dən fərqlənən müxtəlif qiymətlərə malik olması, hal sıxlığının enerjidən asılılığının sərbəst elektron halları sıxlığından kənarlaşması və maddənin fraktal təbiəti ilə bağlıdır;

• Göstərilmişdir ki, topoloji ($f \sim 0$), kimyəvi nizamlılıq ($R=1$) halına yaxın və kristallaşmaya ($\Delta T_{c-g} \sim 87$ K) davamlı olan nümunələr passiv fiber optikada perspektiv tətbiq imkanlarına malikdir;

• Göstərilmişdir ki, amorf matrisanı formalaşdıran əsas quruluş elementləri ($AsSe_{3/2}$, $GeS_{4/2}$, $GeSe_{4/2}$) maddələrin kristallaşmanın sürət əmsalına (ICR), şüşələşmə və kristallaşma temperaturları fərqinə (ΔT_{c-g}) ciddi təsir edir;

• Germaniumun miqdarı yüksək olan $Ge_{33}As_{17}S_{35}Se_{15}$ tərkibində kristallaşma prosesinin sürətlənməsi, şüşə və kristallaşma temperaturları fərqinin (ΔT_{c-g}) kəskin azalması, zəif lokal quruluş transformasiyası ilə bağlıdır.

• Orta koordinasiya ədədi $Z=2,5-2,7$ -ə uyğun olan $Ge_{17,5}As_{15}Se_{52,5}S_{15}$, $Ge_{24}As_{19}Se_{37}S_{20}$, $Ge_{25}As_{10}Se_{40}S_{25}$, $Ge_{26}As_{18}Se_{26}S_{30}$ tərkiblərində Porod asılılığının qüvvət üstünün (n_p) $1 < n_p < 3$ intervalında dəyişməsi nahamar səthli səpici mərkəzlərin fəza (həcmi) ölçülü fraktallara çevrilməsi ilə bağlıdır.

• Karbohidrogen mühitinin təsiri nəticəsində Al- $Ge_{33}As_{17}S_{35}Se_{15}$ -Te sendviç strukturlarının volt-ampere xarakteristikasında cərəyan ossilyasiyaları zəifləyərək aradan qalxır.

Tədqiqatın nəzəri və praktiki əhəmiyyəti:

Dissertasiyanın nəticələri germanium və arsenin (Ge, As) xalkogenidləri əsasında olan mürəkkəb komponentli şüşəvari maddələrin elastik, izostatik və sərt gərginlikli hallarda şüşə və kristallaşma proseslərinin, onların optik udulmaya təsir mexanizmlərinin araşdırılmasında istifadə oluna bilər; Mürəkkəb komponentli və kristallaşmaya davamlı $Ge_4As_{14}Se_{82}$, $Ge_4As_{14}Se_{80}S_2$, $Ge_7As_{16}Se_{72}S_5$, $Ge_{10}As_{20}Se_{60}S_{10}$, $Ge_{17,5}As_{15}Se_{52,5}S_{15}$, $Ge_{24}As_{19}Se_{37}S_{20}$, $Ge_{25}As_{10}Se_{40}S_{25}$, $Ge_{26}As_{18}Se_{26}S_{30}$ və $Ge_{33}As_{17}Se_{15}S_{35}$ nümunələri passiv fiber optikada və qaz sensorlarında uğurlu tətbiq oluna bilər.

Aprobasiyası və tətbiqi:

Dissertasiyanın nəticələri aşağıdakı elmi konfranslarda məruzə edilmişdir:

- Akademik L.M. İmanovun 100 illik yubileyinə həsr olunmuş Molekulyar spektroskopiya mövzusunda konfrans, Azərbaycan və rus dillərində məqalələr (Bakı-Şuşa, 2022);

- H. Əliyevin 100 illiyinə həsr olunmuş nəzəri və tətbiqi fizikanın inkişafı mövzusunda beynəlxalq konfrans (Bakı, 2023);

- Конференция; Аморфные и микрокристаллические полупроводники (Санкт-Петербург, Россия, 2023);

- International Conference on Advanced Laser Technologies (ALT) (LS-I-10, Samara, Russia, 2023);

- Müasir təbiət və iqtisad elmlərinin aktual problemləri Beynəlxalq Elmi Konfrans (Gəncə, 2023);

- Fizikanın aktual problemləri mövzusunda Beynəlxalq Elmi Konfrans (Naxçıvan, 2024);

- The 31th International Conference on Advanced Laser Technologies (ALT) (Vladivostok, Russia, 2024);

Dissertasiya işinin mövzusunə dair yerli və xarici elmi nəşrlərdə 15 elmi əsər çap olunmuşdur. Bunlardan 8-i elmi məqalə, 7-si konfrans materialıdır.

Dissertasiya işinin yerinə yetirildiyi təşkilatın adı: Dissertasiya işi, Azərbaycan Respublikası Elm və Təhsil Nazirliyi Fizika İnstitutunda yerinə yetirilmişdir.

Elmi istiqamətin seçilməsi, dissertasiya işinin əsas ideyası və onun həlli üçün qarşıya qoyulan məsələlərin müəyyənləşdirilməsində müəllifin iştirakı həlledici olmuşdur.

Dissertasiyanın quruluşu və həcmi: Dissertasiya işi giriş, dörd fəsil, nəticələr və 158 adda istinad edilmiş ədəbiyyatın bibliografik siyahısından ibarət olmaqla, 144 səhifədə şərh olunmuşdur. Dissertasiya işində 26 şəkil, 14 cədvəl vardır. Şəkillər, cədvəllər və istinad edilmiş ədəbiyyat siyahısı istisna olmaqla giriş 11481, I fəsil 60347, II fəsil 42669, III fəsil 34320, IV fəsil 20026, nəticələr 2584, ixtisarlar və şərti işarələr 523 işarədən ibarətdir.. Dissertasiya işinin ümumi həcmi 171950 işarədən ibarətdir.

İŞİN MƏZMUNU

Girişdə dissertasiya işinin mövzusunun aktuallığı əsaslandırılmış, işin məqsədi, elmi yeniliyi, praktiki əhəmiyyəti göstərilmiş, müdafiəyə çıxarılan əsas müddəalar, aprobasiya dərəcəsi, nəşrlər barədə məlumat verilmiş, həmçinin fəsilər üzrə əsas məzmunu qısa şərh olunmuşdur.

Birinci fəsilə amorf və şüşəvari maddələrin atom və lokal quruluşuna, fiziki parametrlərinin tədqiqinə aid müasir tədqiqat işləri təhlil edilmişdir. Qeyd olunan materiallar nizamsız atom quruluşuna malik kristal olmayan bərk maddələrdir. Xalkogenid şüşələr amorf maddələr qrupuna daxil olmaqla yanaşı, termodinamik tarazlıq halında deyil, kvazi-tarazlıq halında olur. Belə qeyri-kristal quruluş amorf şüşələrin fiziki xassələrinə – optik, elektron, istilik və mexaniki parametrlərinə mühüm təsir göstərir.

Xalkogenid şüşəvari yarımkeçiricilərdə uzaq nizamın deyil, yaxın və orta nizamın mövcud olması, xassələrin formalaşmasında əsas rol oynayır. Yaxın nizam dedikdə atomların bir neçə atom məsafəsində (ümumiyyətlə 2-5 Å) yerləşməsi başa düşülür. Bu, amorf materialların lokal struktur xüsusiyyətlərini anlamaq üçün çox vacibdir. Orta nizam yaxın nizamdan sonrakı diapizona uyğun olmaqla, ~5-20 Å məsafəni əhatə edir. Orta nizam materialların fiziki xassələrinə əhəmiyyətli dərəcədə təsir göstərir.

Digər yarımkeçirici maddələr kimi, amorf xalkogenidlər də quruluş xüsusiyyətləri və həmçinin qadağan zonanın eni ilə xarakterizə olunur. Xalkogenid şüşəvari yarımkeçiricilər əsasən VI qrup elementləri olan kükürd, selen, tellur və onların Ge, As, Sb kimi elementlərlə birləşmələrindən təşkil olunmuşdur.

Tərkibində üç və dörd koordinasiyalı (arsen, stibium, silisium, germanium) elementlər olan xalkogenid şüşələr, xüsusilə Ge–As–Se–S sistemləri bu baxımdan böyük maraq doğurur. Çünki onların optik şəffaflığı, qadağan zonanın eni, sərtliyi və istilik stabilliyi geniş diapazonda dəyişdirilə bilər. Xalkogenid şüşələrdə nizamsızlıq səbəbindən rabitə uzunluğu və rabitə bucağı dəyişən olmaqla kovalent rabitəlilik üstünlük təşkil edir. Xalkogen atomları cüt olmayan (lone-pair) elektron konfigurasiyasına malikdir. Qeyd

olunan konfigurasiya xalkogenidlərdə optik keçidlərə əsaslı şəkildə təsir edir. Belə amorf quruluşa malik olan maddələr əsasən heteropolyar (Ge-S, As-Se) və bəzən də homopolyar rabitələrdən (Se-Se) təşkil olunur³. Ge-Se xalkogenid şüşələrdə Se atomları şüşə şəbəkə daxilində struktur boyunca zəncirvari quruluş vahidləri formalaşdırırlar. Bu maddələrə germaniumun əlavə olunması selen zəncirləri ilə əlaqəli olan, germaniuma mərkəzləşmiş teraedral strukturlar və arsenə mərkəzləşmiş piramidal strukturlar əmələ gətirir. Belə quruluşlar şüşənin kövrəkliyinə və optik xassələrinə təsir edir. Bəsit, binar və daha mürəkkəb xalkogenid şüşələrin lokal quruluşu, şüşə və kristallaşma prosesləri və onların optik xassələri geniş analiz olunmuşdur. Aparılan təhlil nəticəsində müəyyən olunmuşdur ki, germanium və arsenin (Ge, As) xalkogenidləri əsasında olan mürəkkəb komponentli şüşəvari maddələrin elastik, izostatik və sərt gərgin hallarda şüşələşmə və kristallaşma proseslərinin, onların optik udulmaya təsir mexanizmlərinin müxtəlif nəzəri modellər və yaxınlaşmalarla analizinə ciddi zərurət vardır.

İkinci fəsildə amorf və şüşəvari maddələrin alınma üsulları və həmçinin tədqiqat obyektini kimi seçilmiş $\text{Ge}_4\text{As}_{14}\text{Se}_{82}$, $\text{Ge}_4\text{As}_{14}\text{Se}_{80}\text{S}_2$, $\text{Ge}_7\text{As}_{16}\text{Se}_{72}\text{S}_5$, $\text{Ge}_{10}\text{As}_{20}\text{Se}_{60}\text{S}_{10}$, $\text{Ge}_{17.5}\text{As}_{15}\text{Se}_{52.5}\text{S}_{15}$, $\text{Ge}_{24}\text{As}_{19}\text{Se}_{37}\text{S}_{20}$, $\text{Ge}_{25}\text{As}_{10}\text{Se}_{40}\text{S}_{25}$, $\text{Ge}_{26}\text{As}_{18}\text{Se}_{26}\text{S}_{30}$, $\text{Ge}_{33}\text{As}_{17}\text{Se}_{15}\text{S}_{35}$ tərkibli materialların sintez texnologiyası, lokal quruluşun tədqiqində və tərkib analizi aparılması üçün metodlar şərh olunmuşdur.

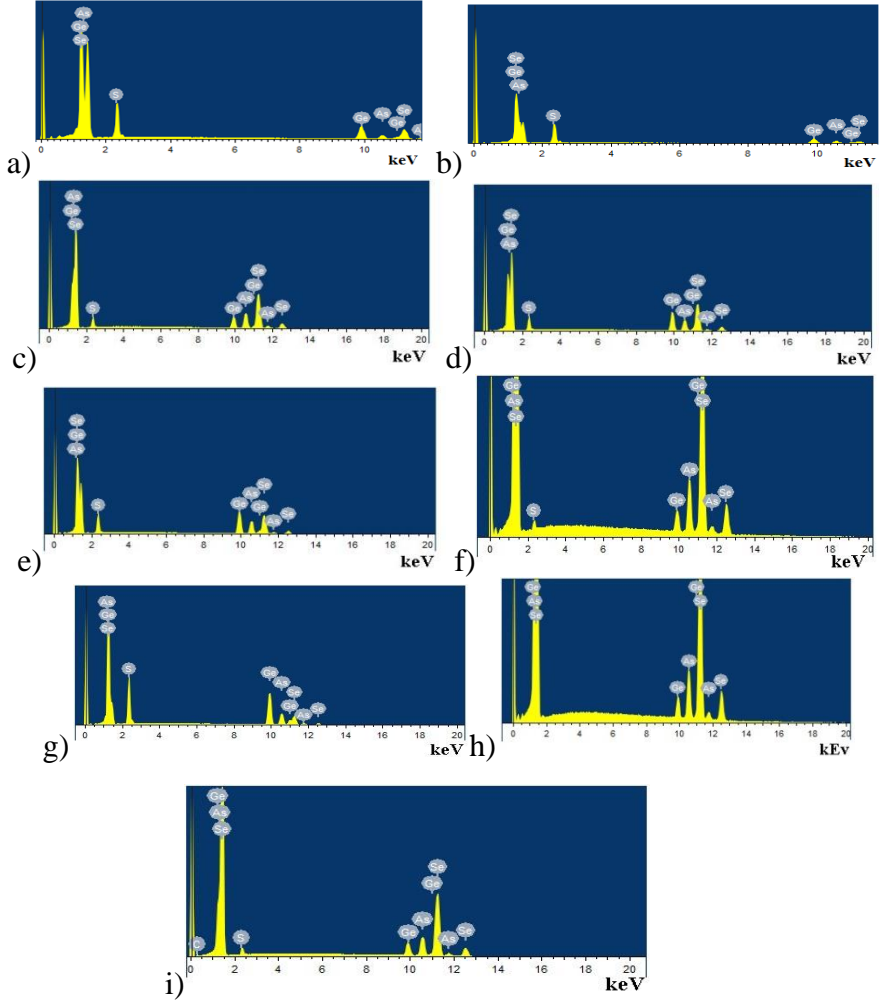
Tədqiq olunan xalkogenid şüşə tərkiblərdə elementlərin molyar (atom) faizi enerji-dispersiv spektrometriya ilə müəyyən olunmuşdur (şəkil 1).

Sintez edilmiş tərkiblər üçün enerji dispersiv rentgen analizinin nəticələri $\pm 0,04 \div 0,20$ xəta ilə əldə edilmişdir.

Dissertasiyada aparılan tədqiqatda əsas məqsədlərdən biri sintez olunan tərkiblərin lokal quruluşu ilə şüşələşmə temperaturları (T_g) arasında əlaqəni müəyyən etməkdir. Sintez olunmuş nümunələrin lokal quruluşu D2 Phaser toz difraktometri öyrənilmiş ,

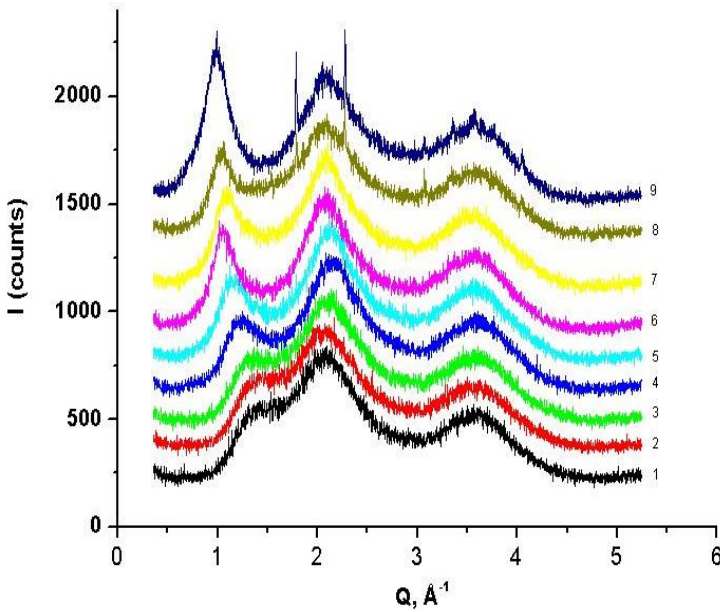
³ Shi, K. Sulfur chains glass formed by fast compression./ Shi, K., Dong, X., Zhao, Z. et al. // Nat Commun 16, - 2025, 357.

difraksiya əyriləri (şəkil 2) xüsusi program vasitəsilə analiz olunmuşdur.



Şəkil 1. $\text{Ge}_{25.10}\text{As}_{9.86}\text{Se}_{40.19}\text{S}_{24.85}$ (a), $\text{Ge}_{26.09}\text{As}_{18.05}\text{Se}_{25.96}\text{S}_{29.90}$ (b), $\text{Ge}_{10.41}\text{As}_{20.95}\text{Se}_{59.42}\text{S}_{9.22}$ (c), $\text{Ge}_{19.52}\text{As}_{16.16}\text{Se}_{51.56}\text{S}_{12.76}$ (d), $\text{Ge}_{24.76}\text{As}_{19.68}\text{Se}_{37.06}\text{S}_{18.51}$ (e), $\text{Ge}_{35.16}\text{As}_{14.84}\text{Se}_{15.66}\text{S}_{34.34}$ (f), $\text{Ge}_{4.17}\text{As}_{15.05}\text{Se}_{80.78}$ (g), $\text{Ge}_{3.68}\text{As}_{15.19}\text{Se}_{79.44}\text{S}_{1.69}$ (h), $\text{Ge}_{33}\text{As}_{17.00}\text{Se}_{71.64}\text{S}_{4.03}$ (i) tərkibləri üçün EDS analizi

Pikin amplitudu, vəziyyəti və maksimumun yarısına uyğun olan en (FWHM) təyin olunmuşdur. Xalkogenid şüşə maddələrinin amorfluğu Rentgen şüalarının difraksiya əyrilərində müşahidə edilən geniş maksimumlarla sübut edilir. Şəkil 2-dən görünür ki, tədqiq olunan bütün nümunələrin Rentgen difraksiya əyrilərində səpilmə vektorunun (Q) qiymətinin $0.99 \div 1.41 \text{ \AA}^{-1}$ aralığında birinci kəskin difraksiya piki (BKDP) müşahidə olunur.



Şəkil 2. 1- $\text{Ge}_4\text{As}_{14}\text{Se}_{82}$, 2- $\text{Ge}_4\text{As}_{14}\text{Se}_{80}\text{S}_2$, 3- $\text{Ge}_7\text{As}_{16}\text{Se}_{72}\text{S}_5$, 4- $\text{Ge}_{10}\text{As}_{20}\text{Se}_{60}\text{S}_{10}$, 5- $\text{Ge}_{17.5}\text{As}_{15}\text{Se}_{52.5}\text{S}_{15}$, 6- $\text{Ge}_{24}\text{As}_{19}\text{Se}_{37}\text{S}_{20}$, 7- $\text{Ge}_{25}\text{As}_{10}\text{Se}_{40}\text{S}_{25}$, 8- $\text{Ge}_{26}\text{As}_{18}\text{Se}_{26}\text{S}_{30}$, 9- $\text{Ge}_{33}\text{As}_{17}\text{Se}_{15}\text{S}_{35}$ şüşəvari nümunələrinin Rentgen difraksiya əyriləri

BKDP kovalent rabitəli amorf maddələrdə orta nizamın mövcudluğu ilə əlaqələndirilir. Mürəkkəb komponentli xalkogenid şüşələrin halını müəyyən edən orta koordinasiya ədədi (Z) və kovalent rabitəli xalkogen atomlarının sayının xalkogen olmayan atomlarının sayına nisbəti (R) hesablanaraq cədvəl 1-də verilmişdir.

Cədvəl 1

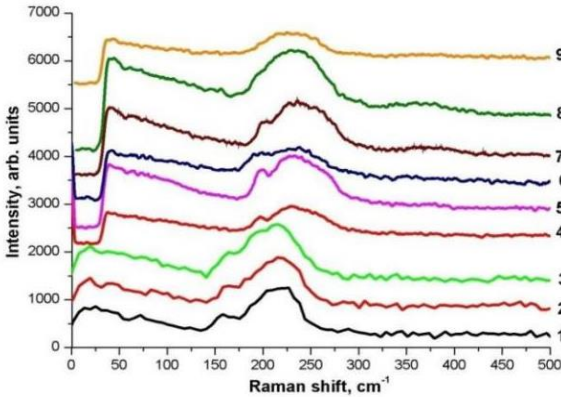
Tədqiq olunan nümunələr üçün Z, R, N, f, pikin maksimumuna uyğun səpilmə vektoru (Q1) və pikin yarım eni ($\Delta Q1$) qiymətləri

Composition	Z	R	Q1	$L=2\pi/\Delta Q1$	$N_{co}=Z/2+2Z-3$	$N^\alpha=Z/2$	$N^\beta=2Z-3$	$f=(12-5Z)/6$	$\Delta Q1$
Ge ₄ As ₁₄ Se ₈₂	2,22	2,83	1,41	22,28	2,55	1,11	1,44	0,15	0,28191
Ge ₄ As ₁₄ Se ₈₀ S ₂	2,22	2,83	1,40	23,4098	2,55	1,11	1,44	0,15	0,26848
Ge ₇ As ₁₆ Se ₇₂ S ₅	2,30	2,03	1,37	22,9649	2,75	1,15	1,60	0,08	0,27359
Ge ₁₀ As ₂₀ Se ₆₀ S ₁₀	2,40	1,40	1,25	24,2631	3,00	1,20	1,80	0,00	0,25896
Ge _{17,5} As ₁₅ Se _{52,5} S ₁₅	2,50	1,17	1,12	25,3764	3,25	1,25	2,00	0,08	0,24762
Ge ₂₄ As ₁₉ Se ₃₇ S ₂₀	2,67	0,75	1,02	31,3845	3,68	1,34	2,34	0,23	0,20020
Ge ₂₅ As ₁₀ Se ₄₀ S ₂₅	2,60	1,00	1,10	26,5966	3,50	1,30	2,20	0,17	0,23624
Ge ₂₆ As ₁₈ Se ₂₆ S ₃₀	2,70	0,71	1,06	27,8473	3,75	1,35	2,40	0,25	0,22563
Ge ₃₃ As ₁₇ Se ₁₅ S ₃₅	2,83	0,55	0,99	33,7461	4,08	1,42	2,66	0,36	0,18619

Göstərilən nəticələrə topoloji məhdudiyətlər nəzəriyyəsinin tətbiqindən (TMN)⁴ alınır ki, tədqiq olunan Ge₁₀As₂₀S₁₀Se₆₀ tərkibi üçün orta koordinasiya ədədi Z=2,4 şərtini ödədiyindən “sıfırıncı” tezlikli rəqs modlarının xalkogenid şüşəvari şəbəkədəki payı f=0-a bərabər olur. Bu isə nəzəriyyəyə görə “izostatik şüşə” halına uyğun gəlir. Z<2,4 olduqda germanium, arsen və kükürdün konsentrasiyasının azalması, selenininkinin isə artması nəticəsində f-in qiyməti artaraq f >0 şərtini ödəyir. Bunun nəticəsində şüşəvari şəbəkədə rabitə və bucaq məhdudiyətlərinin (N^α və N^β) miqdarı azalır ki, bu da məhdudiyətlərin ümumi miqdarının N_{co}<3 olması, yəni elastik şüşə halının yaranması ilə nəticələnir (burada sərbəstlik dərəcələrinin sayı 3-ə bərabərdir). N_{co}<3 şərtini ödəyən tərkiblər (Ge₄As₁₄Se₈₂, Ge₄As₁₄Se₈₀S₂, Ge₇As₁₆Se₇₂S₅) mövcud nəzəriyyəyə

⁴ J.C. Phillips. Constraint Theory, Vector Percolation and Glass Formation / J.C. Phillips, M. F. Thorpe// Solid State Communications, –1985, 53(8), –p.699-702.

görə asanlıqla kristallaşma qabiliyyətinə malik olmalı idi. Doğurdan da, Rentgen difraksiya səpilməsinin nəticələri göstərir ki, bu tərkiblərdə orta nizamın ölçüsü qismən azalır. Yəni, alınan təcrübə nəticə topoloji məhdudiyyətlər nəzəriyyəsinin (TMN) şərtlərini ödəyir. TMN-nin tələblərinə görə, orta koordinasiya ədədi $Z > 2,4$ və məhdudiyyətlərin miqdarı $N_{co} > 3$ şərtlərini ödəyirsə maddə sərt gərgin şüşə halına keçir. Belə olduqda şüşəvari şəbəkə qeyri-stabil olur. Bu halda zəif bucaq və rabitə məhdudiyyətləri nisbətən güclü daxili sıxılma və gərilmələrlə müşahidə olunan məhdudiyyətlərin yaranmasına səbəb olur. Nəzəriyyə göstərir ki, maddədə daxili gərginliklərin artması kristallaşmaya doğru meyilliliyi artırır. Müəyyən olunmuşdur ki, sərt gərgin şüşə halına uyğun tərkiblərdə ($Z=2,5$ ($\text{Ge}_{17,5}\text{As}_{15}\text{Se}_{52,5}\text{S}_{15}$), $Z=2,67$) $\text{Ge}_{24}\text{As}_{19}\text{Se}_{37}\text{S}_{20}$, $Z=2,6$ ($\text{Ge}_{25}\text{As}_{10}\text{Se}_{40}\text{S}_{25}$), $Z=2,70$ ($\text{Ge}_{26}\text{As}_{18}\text{Se}_{26}\text{S}_{30}$), $Z=2,83$ ($\text{Ge}_{33}\text{As}_{17}\text{Se}_{15}\text{S}_{35}$) orta nizamın ölçüsü (L) nisbətən artır (cədvəl 1).



Şəkil 3. Nazik təbəqələrin Raman səpilməsi: 1 - $\text{Ge}_4\text{As}_{14}\text{Se}_{82}$, 2 - $\text{Ge}_4\text{As}_{14}\text{Se}_{80}\text{S}_2$, 3 - $\text{Ge}_7\text{As}_{16}\text{Se}_{72}\text{S}_5$, 4 - $\text{Ge}_{10}\text{As}_{20}\text{Se}_{60}\text{S}_{10}$, 5 - $\text{Ge}_{17,5}\text{As}_{15}\text{Se}_{52,5}\text{S}_{15}$, 6 - $\text{Ge}_{24}\text{As}_{19}\text{Se}_{37}\text{S}_{20}$, 7 - $\text{Ge}_{25}\text{As}_{10}\text{Se}_{40}\text{S}_{25}$, 8 - $\text{Ge}_{26}\text{As}_{18}\text{Se}_{26}\text{S}_{30}$, 9 - $\text{Ge}_{33}\text{As}_{17}\text{Se}_{15}\text{S}_{35}$

Raman spektroskopiyaya tədqiqatları $d = 2$ mkm qalınlıqlı nazik təbəqələrdə spektrin $\nu = 25 \div 500$ sm^{-1} tezlik intervalında aparılmışdır (şəkil 3). Spektrlərdə müşahidə edilən ilk aşağı tezlikli səpilmə zolağı əsasən xalkogenid şüşələrində birinci kəskin

difraksiya pikinin (BKDP) olması ilə əlaqədardır.⁵

Ge-un konsentrasiyasının yüksək olduğu $\text{Ge}_{26}\text{As}_{18}\text{S}_{30}\text{Se}_{26}$ və $\text{Ge}_{33}\text{As}_{17}\text{S}_{35}\text{Se}_{15}$ tərkibləri üçün $180\div 203 \text{ sm}^{-1}$ tezlik oblastında ortaq küncü $\text{GeSe}_{4/2}$ tetraedrik rəqs modları, $210\div 215 \text{ sm}^{-1}$ tezlik diapazonunda müşahidə olunan geniş piklər əsasən ortaq kənarlı $\text{GeSe}_{4/2}$ tetraedral rəqs modlarına uyğun piklər, arsenin konsentraisyası yüksək olan tərkiblərdə isə $\text{AsSe}_{3/2}$ piramidal struktur vahidlərinə uyğun $215\div 226 \text{ sm}^{-1}$ tezlik intervalında piklər müşahidə olunur.

Bu fəsilə həmçinin optik spektroskopiya tədqiqatları şərh olunmuşdur. Bu tədqiqatlar SPEKOL 1500 UV-VİS spektrofotometrində otaq temperaturunda $\lambda=190\div 1100 \text{ nm}$ dalğa uzunluğu intervalında aparılmış və həmin metodlara uyğun proqram təminatı ilə nümunələrə xas olan parametrlər hesablanmışdır. Spektrofotometrin fotometrik dəqiqliyi $\sim 0.01\text{\AA}$ tərtibində olmuşdur.

Amorf yarımkeçiricilərin fərqli optik xassələrə malik olmasının səbəbi onlarda yürüklük aralığında sıfırdan fərqli hal sıxlığının mövcudluğudur. Bu onlarda kristallara məxsus kəskin zona sərhədlərinin olmaması və həmin sərhədlərin ətrafında lokal və ya əlavə halların mövcudluğu hesabınadır. Lokal hallar əsasən quruluşun nizamsızlığı hesabına əmələ gəlir. Hal sıxlığının enerjiyə görə paylanmasını mükəmməl təsvir edən nəzəriyyə hələlik mövcud deyil və yeni ciddi eksperimentlərin aparılmasını tələb edir. Müəyyən olunmuşdur ki, Taus asılılığının qüvvət üstü $1.8\div 2.2$ intervalında dəyişir. Şüşələşmə temperaturundan (T_g) yüksək temperaturlarda termik işlənmə temperaturunun artırılması nəticəsində Taus asılılığının qüvvət üstünün artması ilə bərabər optik qadağan zonanın eni (E_g) azalır. Bu nəticə şüşələşmə temperaturundan (T_g) yüksək temperaturlarda termik işlənmənin hesabına rabitələrin qırılması nəticəsində keçirici və valent zona sərhədləri ətrafında lokal halların konsentrasiyasının artması ilə

⁵ Rongping Wang, „ Structural and physical properties of $\text{Ge}_{11.5}\text{As}_{24}\text{S}_{64.5-x}\text{Se}_{64.5-(1-x)}$ glasses / Rongping Wang, Kunlun Yan, Zhiyong Yang, Barry Luther-Davies.// Journal of Non-Crystalline Solids 427, -2015, 16–19

izah edilir⁶.

Əlavə valent hallarından genişlənmiş keçiricilik hallarına, genişlənmiş valent hallarından əlavə keçiricilik hallarına və eləcə də əlavə valent hallarından əlavə keçiricilik hallarına keçidlər isə optik udulmanın qiymətlərinin $\alpha < (10^3 \div 10^4) \text{ sm}^{-1}$ şərtini ödəyən enerji intervallarında analiz olunmalıdır.

Ge-As-Se, Ge-As-Se-S xalkogenid şüşəvari yarımkeçirici maddələrin güclü udulma oblastında (yürüklük kənarından yuxarıda olan Taus udulma oblastı) udulma əmsalının (α) fotonun enerjisindən ($h\nu$) təcrübi asılılıqlarını (şəkil 4) qüvvət üstlü asılılıqlara malik funksiyalar vasitəsi ilə müqayisəli uzlaşdırılması nəticəsində Taus asılılığından kənarçıxmaları və hal sıxlığını enerjidən real asılılıq qanunauyğunluqlarını müəyyənləşdirmək qarşıya məqsəd qoyulmuşdur.

Xalkogenid şüşələrinin optik xassələrinin tədqiqi göstərir ki, güclü udulma oblastında ($\alpha > 10^4 \text{ sm}^{-1}$) Taus asılılığının $[(\alpha h\nu) = A(h\nu - E_g)^n]$ qüvvət üstünün (n) müxtəlif qiymətlər ($n=1/2; n=2; 3/2; 3$) alması mümkündür.

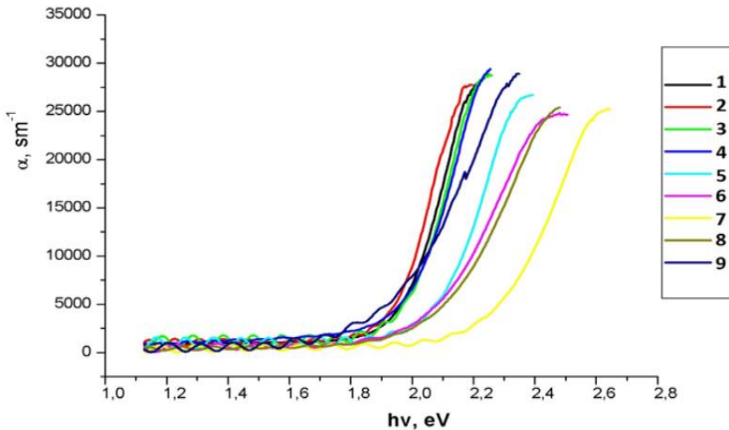
$$y = a \cdot (x - b)^c \quad (1)$$

Belehradek funksional (1) asılılığı və təcrübi asılılıq (şəkil 4) arasında müqayisəli riyazi uzlaşdırmanın nəticələri göstərir ki, $\text{Ge}_4\text{As}_{14}\text{Se}_{80}\text{S}_2$, $\text{Ge}_{33}\text{As}_{17}\text{Se}_{15}\text{S}_{35}$ xalkogenid şüşəvari tərkiblərində $\alpha \cdot h\nu \sim A \cdot (h\nu - E_g)^{p+s+1}$ –asılılığının qüvvət üstü $n=1.59$ və $n=1.37$ qiymətlərinə malik olur. Qeyd olunan qiymətlər müəyyən xəta tərtibində $n \sim 3/2$ -ə yaxın olub, düz qadağan optik keçidlərin mövcudluğu ilə izah olunur⁷.

⁶ M.I. Abd-Elrahman. Optical and electrical properties of thermally evaporated $\text{Se}_{90}\text{Sb}_{10}$ thin film // M.I. Abd-Elrahman, A.A. Abu-Sehly, Sherouk Sh. El-sonbaty, M.M. Hafiz, /Materials Science and Engineering B, Vol.232–235, - 2018, Pp. 8-14

⁷ S.K. Mohamed. Structural, optical, and electrical characteristics of $\text{Ge}_{18}\text{Bi}_4\text{Se}_{78}$ chalcogenide glass for optoelectronic applications //S.K. Mohamed, M.M. Abd El-Raheem, M.M. Wakkad et al./ Memories - Materials, Devices, Circuits and Systems 6, -2023, 100085

Bundan fərqli olaraq $\text{Ge}_{10}\text{As}_{20}\text{Se}_{60}\text{S}_{10}$, $\text{Ge}_{26}\text{As}_{18}\text{Se}_{26}\text{S}_{30}$ tərkiblərində isə riyazi uzlaşdırmanın nəticələri uyğun olaraq qüvvət üstünün $n=1,9$ və $n=2,1$ qiymətləri ilə xarakterizə olunduğunu təsdiq edir. Alınan nəticə $n \sim 2$ - qiymətinə daha uyğun olub, tədqiq olunan tərkiblərdə optik udulmanın əsasən çəp icazəli optik keçidlərin iştirakı ilə baş verdiyini sübut edir⁸.



Şəkil 4. Optik udulma əmsalının (α) fotonun enerjisindən ($h\nu$) asılılığı: 1 - $\text{Ge}_4\text{As}_{14}\text{Se}_{82}$, 2 - $\text{Ge}_4\text{As}_{14}\text{Se}_{80}\text{S}_2$, 3 - $\text{Ge}_7\text{As}_{16}\text{Se}_{72}\text{S}_5$, 4 - $\text{Ge}_{10}\text{As}_{20}\text{Se}_{60}\text{S}_{10}$, 5 - $\text{Ge}_{17,5}\text{As}_{15}\text{Se}_{52,5}\text{S}_{15}$, 6 - $\text{Ge}_{24}\text{As}_{19}\text{Se}_{37}\text{S}_{20}$, 7 - $\text{Ge}_{25}\text{As}_{10}\text{Se}_{40}\text{S}_{25}$, 8 - $\text{Ge}_{26}\text{As}_{18}\text{Se}_{26}\text{S}_{30}$, 9 - $\text{Ge}_{33}\text{As}_{17}\text{Se}_{15}\text{S}_{35}$

Amorf maddələrdə və o cümlədən amorf quruluşa malik xalkogenid şüşələrdə genişlənmiş keçiricilik və valent hallarının sıxlığının $g_c(E_c) = G_c(E-E_c)^s$ və $g_v(E_v) = G_v(E_v-E)^p$ – düsturları ilə ifadə olunduğunu nəzərə alsaq, şəkil 4 –də təsvir edilən asılılıq ümumi şəkildə aşağıdakı kimi yazıla bilər:

$$\alpha h\nu = C' (\hbar\omega - E)^{p+s+1} \quad (2),$$

⁸ Bin Ye. Influence of the Selenium content on thermo-mechanical and optical properties of Ge-Ga-Sb-S chalcogenide glasses // Bin Ye, Shixun Dai, Wang et al. / Infrared Physics Technology . Volume 77, - 2016, Pages 21-26

burada, C' - optik keçidlərin ehtimalılığını xarakterizə edən kəmiyyət olub p_{cv} -matris elementindən asılıdır. Tədqiqatlar⁹ göstərir ki, $s=p=1/2$ olduqda, yəni valent və keçirici zona kənarında hal sıxlığının energetik paylanması parabolikdirsə, $g_c(E_c) = G_c(E - E_c)^{1/2}$ və $g_v(E_v) = G_v(E_v - E)^{1/2}$ olur.

Qeyd edək ki, ölçüləri d -olan fəzada genişlənmiş halların sıxlığı üçün $N(E)dE \approx \rho^{d-1} d\rho$ - münasibətini nəzərə alsaq, (2) - düsturunda $p + s + 1 = d - 1$ mütənasib əvəzləmə etdikdə valent və keçirici zona kənarında hal sıxlığının energetik paylanmasının parabolik halı üçün ($s=p=1/2$) $d=3$ alınır ki, bu da 3D-ölçülü sistemlər halına uyğundur. Tədqiqatlar göstərir ki, istər bəsit, istərsə də mürəkkəb komponentli xalkogenid şüşələrdə Taus münasibətindən kənaraçıxmalar müşahidə edilir. Yəni, müxtəlif xalkogenid şüşələrdə Taus asılılığındakı $[(\alpha \cdot hv)^{1/n} \sim f(hv)]$ n -qüvvət üstünün tərs qiyməti $m=1/n=0.5$ -dən fərqli qiymətlər ala bilər.

Müəyyən olunmuşdur ki, yuxarıda qeyd olunan təcrübi faktlar hal sıxlığının enerjiden asılılığının, sərbəst elektron halları sıxlığından kənaraçıxması ilə bağlıdır. d -ölçülü fəza əvəzinə fraktal fəza ölçüləri (D) anlayışı daxil edilmişdir¹⁰. Genişlənmiş hal sıxlığının (3) düsturunu nəzərə alıb və $p + s + 1 = \frac{D_v + D_c - 2}{2}$ əvəzləməsini edərək (2)- düsturunu fraktal ölçülər vasitəsilə (4) - münasibəti şəklində yazmaq mümkündür:

$$N(E) dE \sim E^{(D-2)/2} dE \quad (3),$$

$$\alpha \cdot hv = C' (hv - E)^{\frac{D_v + D_c - 2}{2}} \quad (4)$$

$n=(D_v+D_c-2)/2$ ifadəsində nəzərə alaraq tədqiq olunan şüşəvari maddələrə məxsus fraktal ölçülər (D) hesablanmış və alınan nəticələr cədvəl 2-də təsvir edilmişdir.

⁹ Jai Singh. Advances in Amorphous Semiconductors /Jai Singh and Koichi Shimakawa // London, Taylor Francis , -2003, p.324

¹⁰ B.B. Mandelbrot. The Fractal Geometry of Nature.// B.B. Mandelbrot/ New York, Freeman, -1982

Buradan belə nəticəyə gəlinir ki, $\text{Ge}_{10}\text{As}_{20}\text{Se}_{60}\text{S}_{10}$, $\text{Ge}_{26}\text{As}_{18}\text{Se}_{26}\text{S}_{30}$ xalkogenid şüşələrində (2)-asililiğinin qüvvət üstü $p + s + 1 = d - 1 = n \sim 2$ olduğundan $p=s=1/2$ və $d=3$ şərti ödənilməlidir. Yəni, alınan sistemlərdə genişlənməmiş keçiricilik və valent zona halları sıxlığının enerjidən asılılığı parabolik olmaqla yanaşı sistemlər 3D-ölçülərinə malikdir.

Cədvəl 2
Optik eksperimentlərin nəticələrindən alınan təcrübi və riyazi
uzlaşdırmanın nəticələri

	Compositions	Z	R	A	E_{gfit}	$n=p+s+1$	D_V+D_C	$m=1/n$	$D=(D_V+D_C)/2$
1	$\text{Ge}_4\text{As}_{14}\text{Se}_{82}$	2,22	2,83	497482	1,85	1,86	5,72	0,537	2,86
2	$\text{Ge}_4\text{As}_{14}\text{Se}_{80}\text{S}_2$	2,22	2,83	339057	1,86	1,59	5,18	0,628	2,59
3	$\text{Ge}_7\text{As}_{16}\text{Se}_{72}\text{S}_5$	2,3	2,03	620888	1,847	1,852	5,704	0,539	2,852
4	$\text{Ge}_{10}\text{As}_{20}\text{Se}_{60}\text{S}_{10}$	2,4	1,4	511748	1,826	1,9	5,8	0,556	2,9
5	$\text{Ge}_{17,5}\text{As}_{15}\text{Se}_{52,5}\text{S}_{15}$	2,5	1,17	474963	1,834	2,54	7,08	0,393	3,54
6	$\text{Ge}_{24}\text{As}_{19}\text{Se}_{37}\text{S}_{20}$	2,67	0,75	199965	1,786	2,35	6,7	0,425	3,35
7	$\text{Ge}_{25}\text{As}_{10}\text{Se}_{40}\text{S}_{25}$	2,6	1	286200	1,879	2,587	7,175	0,315	3,587
8	$\text{Ge}_{26}\text{As}_{18}\text{Se}_{26}\text{S}_{30}$	2,7	0,71	229019	1,845	2,1	6,2	0,476	3,1
9	$\text{Ge}_{33}\text{As}_{17}\text{Se}_{15}\text{S}_{35}$	2,83	0,55	171075	1,828	1,37	4,74	0,729	2,37

Kimyəvi nizamlı şəbəkə modelinə (CON) əsasən hesab edilir ki, əvvəlcə Ge-S, sonra Ge-Se rabitələri, daha sonra heteropolyar (As-S, As-Se), homopolyar (Ge-Ge, As-As) rabitələri enerjinin azalma sırası ilə əmələ gəlir və matrisin qurulması tamamlanır (cədvəl 3).

Cədvəl 3

Tədqiq olunan nümunələrə kimyəvi nizamlı şəbəkə modelinin tətbiqi

1. $\text{Ge}_{0.04}\text{As}_{0.14}\text{Se}_{0.82} = [2(\text{Ge}_{0.02}\text{Se}_{0.04})] \cdot [7(\text{As}_{0.02}\text{Se}_{0.03})] \cdot [53\text{Se}]$
2. $\text{Ge}_{0.04}\text{As}_{0.14}\text{Se}_{0.80}\text{S}_{0.02} = [0.5(\text{Ge}_{0.02}\text{S}_{0.04})] \cdot [1.5(\text{Ge}_{0.02}\text{Se}_{0.04})] \cdot [7(\text{As}_{0.02}\text{Se}_{0.03})] \cdot [53\text{Se}]$
3. $\text{Ge}_{0.07}\text{As}_{0.16}\text{Se}_{0.72}\text{S}_{0.05} = [1.25(\text{Ge}_{0.02}\text{S}_{0.04})] [2.25(\text{Ge}_{0.02}\text{Se}_{0.04})] \cdot [8(\text{As}_{0.02}\text{Se}_{0.03})] \cdot [31\text{Se}]$
4. $\text{Ge}_{0.10}\text{As}_{0.20}\text{Se}_{0.60}\text{S}_{0.10} = [2.5(\text{Ge}_{0.02}\text{S}_{0.04})] \cdot [2.5(\text{Ge}_{0.02}\text{Se}_{0.04})] [10(\text{As}_{0.02}\text{Se}_{0.03})] \cdot [10\text{Se}]$
5. $\text{Ge}_{0.175}\text{As}_{0.15}\text{Se}_{0.525}\text{S}_{0.15} = [3.75(\text{Ge}_{0.02}\text{S}_{0.04})] \cdot [5(\text{Ge}_{0.02}\text{Se}_{0.04})] \cdot [7.5(\text{As}_{0.02}\text{Se}_{0.03})] \cdot [10\text{Se}]$
6. $\text{Ge}_{0.24}\text{As}_{0.19}\text{Se}_{0.37}\text{S}_{0.20} = [5(\text{Ge}_{0.02}\text{S}_{0.04})] \cdot [7(\text{Ge}_{0.02}\text{Se}_{0.04})] \cdot [3(\text{As}_{0.02}\text{Se}_{0.03})] \cdot [13\text{Se}]$
6. $\text{Ge}_{0.25}\text{As}_{0.10}\text{Se}_{0.40}\text{S}_{0.25} = [6.25(\text{Ge}_{0.02}\text{S}_{0.04})] \cdot [6.25(\text{Ge}_{0.02}\text{Se}_{0.04})] \cdot [5(\text{As}_{0.02}\text{Se}_{0.03})]$
8. $\text{Ge}_{0.26}\text{As}_{0.18}\text{Se}_{0.26}\text{S}_{0.30} = [7.5(\text{Ge}_{0.02}\text{S}_{0.04})] \cdot [5.5(\text{Ge}_{0.02}\text{Se}_{0.04})] \cdot [1.33(\text{As}_{0.02}\text{Se}_{0.03})] \cdot [15.33\text{As}]$
9. $\text{Ge}_{0.33}\text{As}_{0.17}\text{Se}_{0.15}\text{S}_{0.35} = [8.75(\text{Ge}_{0.02}\text{S}_{0.04})] \cdot [3.75(\text{Ge}_{0.02}\text{Se}_{0.04})] \cdot [8\text{Ge}] \cdot [17\text{As}]$

Cədvəl 2 və cədvəl 3-də təsvir edilən nəticələrin müqayisəli analizindən məlum olur ki, kimyəvi nizamlı şəbəkə modelinin (CON) tələblərini ödəyən və şüşəvari matrisin formalaşmasında mühüm rol oynayan tetraedrik quruluş elementlərinin ($\text{GeS}_{4/2}$, $\text{GeSe}_{4/2}$) ümumi nisbi payı piramidal quruluş elementlərinin ($\text{AsSe}_{3/2}$) nisbi payından yüksək olan tərkiblərdə ($\text{Ge}_{0.175}\text{As}_{0.15}\text{Se}_{0.525}\text{S}_{0.15}$, $\text{Ge}_{0.24}\text{As}_{0.19}\text{Se}_{0.37}\text{S}_{0.20}$, $\text{Ge}_{0.25}\text{As}_{0.10}\text{Se}_{0.40}\text{S}_{0.25}$, $\text{Ge}_{0.26}\text{As}_{0.18}\text{Se}_{0.26}\text{S}_{0.30}$) fraktal fəza ölçüləri ($D=3,54$; $3,35$; $3,587$; $3,1$) daha yüksək olur. Bu nəticə tədqiq olunan tərkiblərdə məhdudiyətlər miqdarının (N_{co}), orta rabitə enerjisinin ($\langle E \rangle$) qiymətlərinin yüksək olması, yəni yüksək topoloji şəbəkə və kimyəvi əlaqəliliyin varlığı ilə öz təsdiqini tapır.

$\text{Ge}_{0.33}\text{As}_{0.17}\text{Se}_{0.15}\text{S}_{0.35}$ xalkogenid şüşəvari tərkibində isə yuxarıda qeyd olunan nəticədən kənarçıxma müşahidə olunur

(cədvəl 3). Yuxarıda qeyd olunan fraktal fəza ölçülərini (D) Porod asılılığının qüvvət üstünün $n_p=6-D$ –düsturunda nəzərə alsaq n_p -nin $1 < n_p < 3$ intervalında dəyişdiyi aşkar olunur. Bu isə n_p -nin qiymətinin $1 < n_p < 3$ intervalında dəyişdiyi halda nahamar səthli səpici mərkəzlərin fəza (həcmi) ölçülü fraktallara çevrildiyini sübut edir. Lakin, bundan fərqli olaraq fraktal ölçüləri $D=2,37; 2,852; 2,86; 2,9$ olan (cədvəl 2) $Ge_{17.5}As_{15}Se_{52.5}S_{15}$, $Ge_{24}As_{19}Se_{37}S_{20}$, $Ge_{25}As_{10}Se_{40}S_{25}$, $Ge_{26}As_{18}Se_{26}S_{30}$ nümunələrdə isə n_p -nin qiyməti $3 < n_p < 4$ intervalında dəyişir ki, bu da uyğun tərkibli nümunələrdə səpici mərkəzlərin nahamar səthə malik D-ölçülü fraktallar olduğunu sübut edir. Beləliklə, tetraedrik quruluş elementlərindən ($GeS_{4/2}$, $GeSe_{4/2}$) və qalıq Ge, As atomlarından ibarət olan $Ge_{0.33}As_{0.17}Se_{0.15}S_{0.35}$ –tərkibində fraktal fəza ölçülərinin daha çox kiçilməsi ($D=2,37$) 3-ölçülü şüşəvari şəbəkənin tərkibində 1-ölçülü etana bənzər $[(CH_3)Ge-Ge(CH_3)]$ quruluş elementlərinin yaranması ilə əlaqədardır.

Riyazi uzlaşdırmanın nəticələrinin doğruluğunu yoxlamaq üçün güclü udulma ($\alpha > 10^4 \text{ cm}^{-1}$) oblastından Taus düsturuna əsasən $(\alpha \cdot hv)^{1/2} \sim f(hv)$ asılılığı və düz qadağan optik keçidlərlə bağlı olan $(\alpha \cdot hv)^{2/3} \sim f(hv)$ asılılığı qurulmaqla optik udulmanın $\alpha=0$ qiymətinə ekstropolyasiya edilərək yürüklük aralığının enləri (E_{g1e} , E_{g2e}) (və ya optik qadağan zonanın eni) təyin edilmiş və alınan nəticələr cədvəl 4-də təsvir edilmişdir.

Cədvəl 4-dən göründüyü kimi riyazi uzlaşdırmadan alınan yürüklük aralığı eninin (E_{gf})- qiymətləri ilə təcrübədən alınan qiymətlər (E_{g1e} , E_{g2e}) arasındakı fərq ənənəvi yanaşmadan fərqli olaraq optik udulma keçidlərinin növü və o cümlədən valent və keçirici zona kənarında hal sıxlığının energetik paylanması [$g_c(E_c) = G_c(E-E_c)^s$ və $g_v(E_v) = G_v(E_v-E)^p$] haqqında daha dəqiq məlumat əldə etməyə imkan verir. Digər tərəfdən şəkil 5-dən belə nəticəyə gəlmək olur ki, Belehradek funksional (1) asılılığı və təcrübi asılılıq (şəkil 4) arasındakı riyazi uzlaşdırmanın nəticəsində $(\alpha \cdot hv)^{1/n} \sim f(hv)$ -asılılığının qüvvət üstünün $n=2$ və 1.94 qiymətlərinə uyğun olaraq E_{gf} -nin təyin olunan qiymətləri ilə $(\alpha \cdot hv)^{1/2} \sim f(hv)$ təcrübiasılılığından alınan E_{g1e} -in qiymətləri arasındakı fərq olduqca kiçikdir.

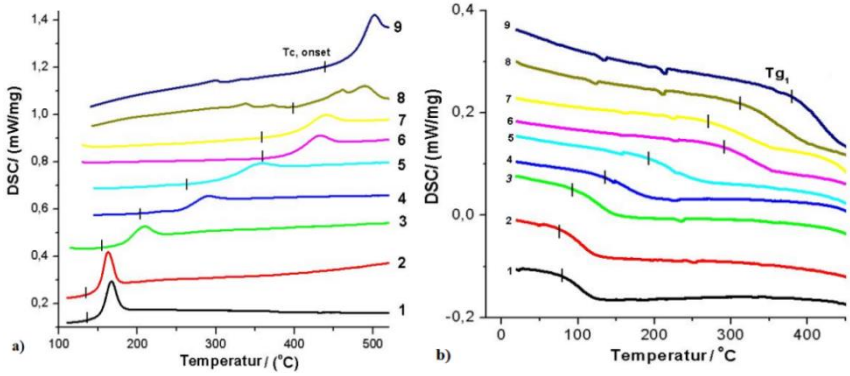
Cədvəl 4

Riyazi uzlaşdırmanın nəticələri ilə təcrübi nəticələr arasında uyğunluğu və zəif kənarçıxımları sübut edən nəticələr.

Tərkiblər	Z	R	A	Eg _{fit}	Eg ₁ Taus (1/2)	Eg ₂ Taus (2/3)	n=p+s+1	m=l/n
Ge ₄ As ₁₄ Se ₈₂	2,22	2,83	497482	1,85	1,856	1,9	1,46	0,6849
Ge ₄ As ₁₄ Se ₈₀ S ₂	2,22	2,83	339057	1,86	1,84	1,89	1,55	0,6451
Ge ₇ As ₁₆ Se ₇₂ S ₅	2,3	2,03	620888	1,847	1,86	1,92	2	0,5
Ge ₁₀ As ₂₀ Se ₆₀ S ₁₀	2,4	1,4	511748	1,826	1,85	1,92	1,94	0,5154
Ge _{17,5} As ₁₅ Se _{52,5} S ₁₅	2,5	1,17	474963	1,834	1,95	2,02	1,5	0,6667
Ge ₂₄ As ₁₉ Se ₃₇ S ₂₀	2,67	0,75	199965	1,786	1,88	1,98	1,44	0,6944
Ge ₂₅ As ₁₀ Se ₄₀ S ₂₅	2,6	1	286200	1,879	2,09	2,18	1,47	0,6802
Ge ₂₆ As ₁₈ Se ₂₆ S ₃₀	2,7	0,71	229019	1,845	1,91	2	1,63	0,6134
Ge ₃₃ As ₁₇ Se ₁₅ S ₃₅	2,83	0,55	171075	1,828	1,73	1,83	1,67	0,5988

Lakin bundan fərqli olaraq $(\alpha \cdot hv)^{1/n} \sim f(hv)$ -asililiğinin qüvvət üstünün $n=1.46; 1.55; 1.5; 1.44; 1.47; 1.63$ və 1.67 qiymətlərinə uyğun olaraq Eg_f -nin təyin olunan qiymətləri ilə $(\alpha \cdot hv)^{2/3} \sim f(hv)$ təcrübi asılılığından alınan Eg_{2e} -in qiymətləri arasındakı fərq olduqca kiçikdir.

Üçüncü fəsildə Ge-As-Se-S xalkogenid şüşələrinin lokal quruluşu ilə onların şüşələşmə temperaturu (Tg) arasındakı asılılıq tədqiq edilmişdir. Təcrübələr 25 K/dəq qızdırılma sürəti ilə diferensial skanlayıcı kalorimetriya (DSK) üsulu ilə aparılmış (şəkil 5), nəticələr kimyəvi nizamlı şəbəkə modeli (CON), topoloji məhdudiyətlər nəzəriyyəsi (TMN) və Tanakanın laylı struktur modeli çərçivəsində təhlil olunmuşdur.



Şəkil 5. Diferensial skanlayıcı kalorimetriya əyriləri:
 1- $\text{Ge}_4\text{As}_{14}\text{Se}_{82}$; 2- $\text{Ge}_4\text{As}_{14}\text{Se}_{80}\text{S}_2$; 3- $\text{Ge}_7\text{As}_{16}\text{Se}_{72}\text{S}_5$;
 4- $\text{Ge}_{10}\text{As}_{20}\text{Se}_{60}\text{S}_{10}$; 5- $\text{Ge}_{17.5}\text{As}_{15}\text{Se}_{52.5}\text{S}_{15}$; 6- $\text{Ge}_{24}\text{As}_{19}\text{Se}_{37}\text{S}_{20}$;
 7- $\text{Ge}_{25}\text{As}_{10}\text{Se}_{40}\text{S}_{25}$; 8- $\text{Ge}_{26}\text{As}_{18}\text{Se}_{26}\text{S}_{30}$; 9- $\text{Ge}_{33}\text{As}_{17}\text{Se}_{15}\text{S}_{35}$.

Şüşələşmə temperaturunun təyini üçün orta rabitə enerjisi $\langle E \rangle$ və orta koordinasiya ədədi Z nəzərə alınaraq yarımempirik ifadələrdən istifadə edilmişdir. Nəticələr göstərir ki, $R = 1$ kimyəvi astanaya uyğun tərkib üçün T_g maksimum qiymət alır. Məsələn, $\text{Ge}_{25}\text{As}_{10}\text{Se}_{40}\text{S}_{25}$ üçün $\langle E \rangle = 2.77$ eV, $Z = 2.6$ və $R = 1$ olub, nəzəri və eksperimental nəticələr üst-üstə düşmüşdür. Orta rabitə enerjisini nəzərə almaqla hesablanmış şüşələşmə temperaturu $R > 1$ və $R = 1$ hallarında müəyyən birləşmələrdə təcrübə ilə yaxşı uyğunlaşır. Lakin $R < 1$ olduqda şüşələşmə temperaturunun təcrübə və hesablanmış qiymətləri arasında fərq artır.

TMN təbii göstərir ki, qeyri-xalkogen atomların artması ilə rabitə ($N\alpha$) və bucaq məhdudiyyətlərinin ($N\beta$) sayı artır, ümumi məhdudiyyətlər N_{co} isə Z -in artması ilə artır. $Z=2.4$ olduqda $f=0$ şərti sabit şüşə vəziyyətinə uyğun gəlir. Lakin, sistemlərdə $f=0$ həmişə maksimal T_g vermir, çünki bu nəzəriyyə rabitələrin kimyəvi xüsusiyyətlərini nəzərə almır. Beləliklə, TMN xalkogenid şüşə tərkiblərdə kimyəvi rabitələrin xarakterini və lokal quruluşun orta nizamını nəzərə almır.

Tanakanın laylı struktur yanaşması təcrübə ilə daha yaxşı

uyğunluq təşkil edir. Burada həm kimyəvi, həm də topoloji nizam nəzərə alınır. $f \approx 0$ və $R \approx 1$ olan tərkiblərdə ($\text{Ge}_{24}\text{As}_{19}\text{Se}_{37}\text{S}_{20}$, $\text{Ge}_{25}\text{As}_{10}\text{Se}_{40}\text{S}_{25}$, $\text{Ge}_{26}\text{As}_{18}\text{Se}_{26}\text{S}_{30}$, $\text{Ge}_{33}\text{As}_{17}\text{Se}_{15}\text{S}_{35}$) Tg və $\langle E \rangle$ böyük qiymətlər alır, yaxın və orta nizam parametrləri də yüksəlir. $\text{Ge}_{25}\text{As}_{10}\text{Se}_{40}\text{S}_{25}$ ən sabit tərkib kimi seçilmiş, Tg ilə kristallaşma temperaturu arasındakı fərq $\Delta T_{c-g} = 87$ K olmuşdur. Bu tərkib CON modeli ilə təsvir edildikdə tetraedrik $\text{GeS}_{4/2}$ və $\text{GeSe}_{4/2}$, həmçinin piramidal $\text{AsSe}_{3/2}$ struktur elementləri üstünlük təşkil edir, homopolar rabitələr isə mövcud olmur.

Şüşə formalaşma qabiliyyəti (Hr) və termik sabillik parametrləri də $R=1$ və $f \approx 0$ şərtlərinə yaxın tərkiblərdə ən yüksək olur. $\text{Ge}_{25}\text{As}_{10}\text{Se}_{40}\text{S}_{25}$ üçün $H_r = 0.469$, $H' = 0.159$, kristallaşmanın sürət əmsalı (ICR) isə minimal qiymət almışdır. Əksinə, $\text{Ge}_{33}\text{As}_{17}\text{Se}_{15}\text{S}_{35}$ -də Se-nin azalması və Ge, S-nin artması səbəbindən tetraedrik struktur vahidlərinin konsentrasiyası aşağı düşmüş, orta rabitə enerjisi zəiflədiyindən Hr və sabillik azalmış, kristallaşmanın sürət əmsalı (ICR) isə yüksəlmişdir. Tetraedrik və piramidal vahidlərin yüksək konsentrasiyası şüşəvari şəbəkənin əlaqələliyini möhkəmləndirir, bu isə kristallaşma prosesini ləngidir. Belə hallarda Tg və Tc arasındakı fərq böyüyür və materialın kristallaşmaya qarşı müqaviməti artır. Qalıq homopolar rabitələr çoxaldıqda isə defektlərin təsiri ilə kristallaşma asanlaşır.

Beləliklə, Ge-As-Se-S şüşələrində optimal şüşələşmə və yüksək termik sabitlik $R \approx 1$, $f \approx 0$ və $Z \approx 2.6$ şərtlərində təmin olunur. Bu zaman əsas struktur elementlər $\text{GeS}_{4/2}$, $\text{GeSe}_{4/2}$ və $\text{AsSe}_{3/2}$ olur ki, bu da həm yüksək Tg, həm də kristallaşmaya davamlılığı izah edir. Bu tip tərkiblər fiber-optik texnologiyalarda perspektivli materiallar hesab olunur.

Fiber optik ötürücülərdə isə uğurlu tətbiq üçün kristallaşmanın sürət əmsalının minimal olması məqsədə uyğun hesab olunur. Kristallaşmanın sürət əmsalının (ICR) qiyməti kristallaşma piki hündürlüyünün (MH) onun tam yarımeninə (FWHM) nisbəti şəklində (4) ifadəsindən hesablanır¹¹:

¹¹ L. Saturday. Devitrification of Bi-and Ga-containing germanium-based chalcogenide glasses // L. Saturday, C. Johnson, A. Thai et al. /J. Alloys Compd., 674 (2016) 207–217

$$\text{ICR}=\ln(\text{MH}/\text{FWHM}) \quad (4)$$

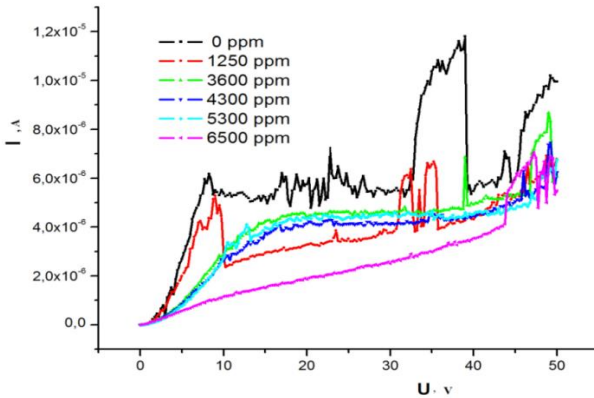
Kristallaşma prosesini xarakterizə edən parametrlərdən biri də, verilmiş temperaturda kristallaşmanın həcmi payı olub, ekzoterm əyrisində kristallaşmanın başlanğıcı ilə müəyyən T-temperaturu arasındakı hissənin sahəsinin verilmiş temperaturda uyğun kristallaşma pikinin sahəsinin ümumi pikin sahəsinə nisbəti ilə xarakterizə olunur.

Kristallaşmanın sürət əmsalı (loqarifmik miqyasda) modifikasiyasından asılı olaraq müəyyən qanunauyğunluq hüdudunda nəzərəçarpan dəyişikliklərə məruz qalır. Tetraedrik ($\text{GeS}_{4/2}$, $\text{GeSe}_{4/2}$) və piramidal ($\text{AsSe}_{3/2}$) quruluş elementlərinin birlikdə nisbi konsentrasiyası üstünlük təşkil edən bütün tərkiblərdə kristallaşmanın sürət əmsalı loqarifmik miqyasda nisbətən aşağı qiymətlərə malikdir. Bu nəticə amorf matrisanın rabitə əlaqələliyinin, o cümlədən orta rabitə enerjisinin ($\langle E \rangle$) artması ilə izah olunur. Alınan nəticələr göstərir ki, topoloji nizamlılıq şərtinə yaxın olan ($f \sim 0$; $N_{\text{co}} \sim 3$) nümunələrdə kristallaşmanın sürət əmsalı (ICR) nisbətən kiçik qiymət alır, şüşə və kristallaşma temperaturları fərqi ($\Delta T_{\text{c-g}} = 71 \div 87 \text{ K}$) böyük olur. Tetraedrik ($\text{GeS}_{4/2}$, $\text{GeSe}_{4/2}$) və piramidal ($\text{AsSe}_{3/2}$) quruluş elementlərinin birlikdə nisbi konsentrasiyası üstünlük təşkil edən bütün tərkiblərdə kristallaşmanın həcmi payının temperaturdan asılılığına məxsus qüvvət üstü (n) orta koordinasiya ədədinin (Z) və R-parametrinin $Z=2.3 \div 2.7$; $R=0.71 \div 2.03$ intervallarında nisbətən aşağı qiymətlərə malikdir. Anoloji olaraq topoloji və kimyəvi nizamlılığa nisbətən yaxın tərkibli nümunələrdə ($f \sim 0$; $N_{\text{co}} \sim 3$ və $R \sim 1$) kristallaşmanın həcmi payının temperaturdan asılılığına məxsus qüvvət üstü (n) özünün iki müxtəlif minimal qiymətlərini əldə edir ($n=18,79$ və $n=22,40$). Ge-un nisbi atom faiz miqdarı yüksək olan $\text{Ge}_{33}\text{As}_{17}\text{S}_{35}\text{Se}_{15}$ tərkibində kristallaşmanın sürət əmsalı və kristallaşmanın həcmi payının temperaturdan asılılığının qüvvət üstü (n) nisbətən yüksək qiymətlərə malikdir (ICR = -5,3 və $n=75,94$). Bu təcrübi nəticə tərkibin lokal quruluşunda müşahidə olunan ciddi quruluş transformasiyaları ilə izah olunur.

Dördüncü fəsildə mürəkkəb komponentli Al- $\text{Ge}_{33}\text{As}_{17}\text{Se}_{15}\text{S}_{35}$ -Te xalkogenid şüşəvari yarımkeçirici tərkiblərin vakuumda termik buxarlandırma üsulu ilə alınan sendviç strukturlarının propan-butan qaz

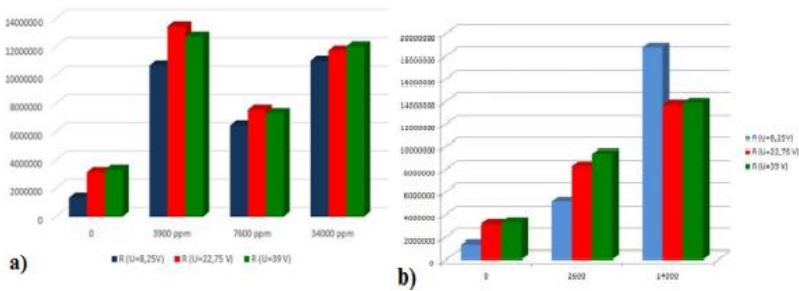
qarışıq mühitinə həssaslığının fiziki mexanizmlərini və onların tətbiq imkanlarını müəyyənləşdirməkdir. Bu məqsədə nail olmaq üçün tədqiq olunan nümunələrin volt-ampere xarakteristikalarının (VAX) ölçülməsi şüşə altlıqlar üzərində vakuumda termik buxarlandırma üsulu ilə alınan $d=2$ mkm qalınlığa malik $\text{Al-Ge}_{33}\text{As}_{17}\text{Se}_{15}\text{S}_{35}\text{-Te}$ sendviç strukturlu nazik amorf təbəqələrdə yerinə yetirilmişdir. Tədqiq olunan nümunənin VAX-da aşağı müqavimətli haldan yüksək müqavimətli hala (və yaxud əksinə) keçidlərin müşahidə olunması, yəni gərginliyin müəyyən qiymətlərində cərəyanın məhdudlanması və eyni zamanda asılılığın qismən ossilyasiyalar şəklində müşahidə olunması xalkogenid şüşəvari maddələrdə yükdaşınma hadisələrinin idarə edilməsinə həlledici təsir edən mənfi korrelyasiya enerjili U^- - mərkəzlərin generasiya-rekombinasiya proseslərinə ciddi təsirləri ilə izah olunur (şəkil 6). Təcrübi kamerada qazın miqdarının artması nümunənin müqavimətinin artmasına gətirir.

İş prinsipi qazın təsiri ilə müqaviməti dəyişən sensorlarda nisbi müqavimətin qazın miqdarından asılı olaraq dəyişməsi və tətbiqi baxımdan xüsusi əhəmiyyət daşıyır. Bu nəticə göstərir ki, xalkogenid şüşələr əsasında hazırlanan $\text{Al-Ge}_{33}\text{As}_{17}\text{Se}_{15}\text{S}_{35}\text{-Te}$ sendviç strukturlu nümunələr tətbiq olunan gərginliyin $U=0\div 10$ V intervalında propan-butan qaz mühitinin təsirinə daha həssasdır.



Şəkil 6. Atmosfer və propan-butan qaz qarışığına malik mühitdə $\text{Al-Ge}_{33}\text{As}_{17}\text{Se}_{15}\text{S}_{35}\text{-Te}$ sendviç strukturunun volt –ampere xarakteristikası

Həmçinin butan qazı və benzol buxarı mühitində Al-Ge₃₃As₁₇Se₁₅S₃₅-Te sendviç strukturunun VAX-na təsiri araşdırılaraq, aşkar olunmuşdur ki, açıq zəncir quruluşlu butan qazı ilə müqayisədə qapalı zəncir quruluşuna malik olan benzol buxarı mühiti tədqiq olunan maddənin müqavimətinin artmasına daha çox təsir göstərir. Bu nəticə benzol və butan molekulların diametral və uzunluq ölçülərinin, o cümlədən rabitə növü, əlaqəliliyi və uzunluğunun fərqlənməsi ilə əlaqələndirilir. Beləliklə müəyyən olunmuşdur ki, nümunə mühitin növü və miqdarının asılı olaraq selektiv həssaslığa malikdir (şəkil 7).



Şəkil 7. Xalkogenid şüşəvari Ge₃₃As₁₇Se₁₅S₃₅ maddəsinin müqavimətinə butan qazı (a) və benzol buxarı (b) mühitinin təsiri

Butan qazı və benzol buxarı mühitində Al-Ge₃₃As₁₇Se₁₅S₃₅-Te sendviç strukturlarının volt-ampər xarakteristikası sabit cərəyan metodu ilə tədqiq olunaraq göstərilmişdir ki, istər alifatik, istərsə də tsiklik zəncir quruluşlarına malik karbohidrogen mühitinin təsiri nəticəsində volt-ampər xarakteristikanın cərəyan ossilyasiyaları zəifləyərək aradan qalxır. Açıq zəncir quruluşlu butan qazı ilə müqayisədə qapalı zəncir quruluşuna malik benzol buxarı mühitinin tədqiq olunan maddənin müqavimətinin artmasına daha çox təsir göstərməsi onların molekullarının diametral və uzunluq ölçülərinin və o cümlədən rabitə növü, rabitə bucağı, əlaqəliliyi və uzunluğunun fərqlənməsi ilə əlaqələndirilir.

Ossilyasiyaların tədricən zəifləyərək yox olmasının səbəbi qaz atomlarının aşağı atomar sıxlıqlı oblastlara və ya məsələlərə toplanması U⁻ - mərkəzlərin ionlaşma proseslərinin zəifləməsinə, yükdaşıyıcıların həmin mərkəzlər tərəfindən periodik zəbt olunması

proseslərinin isə sürətlənməsinə səbəb olur.

Müəyyən olunmuşdur ki, təcrübi kamerada butan qazı mühitində saxlanılan nazik təbəqəli nümunələrdə neytral qaz atomlarının aşağı atomar sıxlıqlı oblastlara və ya məsələlərə toplanması spektrin yaxın infraqırmızı oblastında optik şəffaflığın zəif azalmasına, spektrin görünən oblastına uyğun dalğa uzunluğunun $\lambda \sim 597-600$ nm intervalında isə optik şəffaflığın zəif artmasına səbəb olmuşdur. Alınan təcrübi nəticələr, xalkogenid şüşələrin fiber optik qaz sensorlarında tətbiq imkanlarına malik olduğunu göstərir.

ƏSAS NƏTİCƏLƏR

1. Ge-As-Se-S xalkogenid şüşəvari maddələrinin lokal quruluşuna və şüşələşmə proseslərinin tədqiqinə Rentgen şüalarının difraksiyası, diferensial skanlayıcı kalorimetriya metodları, laylı quruluş, topoloji məhdudiyətlər və kimyəvi nizamlanmış şəbəkə modelləri tətbiq olunaraq göstərilmişdir ki, $\text{Ge}_{25}\text{As}_{10}\text{Se}_{40}\text{S}_{25}$ tərkibi topoloji ($f \sim 0$), kimyəvi nizamlılıq ($R=1$) halına yaxın və kristallaşmaya ($\Delta T_{c-g} \sim 87$ K) davamlı olub, passiv fiber optik materiallarda perspektiv tətbiq imkanlarına malikdir.

2. Müəyyən olunmuşdur ki, topoloji nizamlılıq şərtinə yaxın olan ($f \sim 0$; $N_{co} \sim 3$) maddələrdə kritallaşmanın sürət əmsalı (ICR) aşağı olmaqla yanaşı, şüşə və kristallaşma temperaturlarının fərqinin ($\Delta T_{c-g} = 71 \div 87$ K) nisbətən yüksək olması amorf matrisanı əmələ gətirən tetraedrik ($\text{GeS}_{4/2}$, $\text{GeSe}_{4/2}$) və piramidal ($\text{AsSe}_{3/2}$) quruluş elementlərinin nisbi konsentrasiyasının yüksək olması ilə bağlıdır;

3. Germaniumun atom faiz miqdarı yüksək olan $\text{Ge}_{33}\text{As}_{17}\text{Se}_{15}\text{S}_{35}$ tərkibində şüşə və kristallaşma temperaturları fərqinin (ΔT_{c-g}) nəzərə çarpacaq səviyyədə azalması ($\Delta T_{c-g} = 60$ K), kritallaşmanın sürət əmsalının (ICR) və həcmi payının temperaturdan asılılığını xarakterizə edən qüvvət üstünün (n) isə artması maddədə zəif lokal quruluş transformasiyası ilə əlaqədardır;

4. Müəyyən olunmuşdur ki, Ge-As-Se-S xalkogenid şüşəvari sistemlərinin optik udulma spektrində Taus asılılığının $[(\alpha \cdot hv)^{1/n} \sim f(hv)]$ qüvvət üstünün (n) tərs qiymətinin $m=1/n=0.5$ -dən fərqli qiymətlərə

malik olması sərbəst elektron halları sıxlığının enerjidən asılılığının parabolik haldan kənaraçıxması ilə bağlı olub, tədqiq olunan maddələrin fraktal təbiəti ilə əlaqədardır;

5. Kimyəvi nizamlı şəbəkə modelinə (CON) əsasən göstərilmişdir ki, şüşəvari matrisin formalaşmasında mühüm rol oynayan tetraedrik quruluş elementlərinin ($\text{GeS}_{4/2}$, $\text{GeSe}_{4/2}$) ümumi nisbi payı piramidaldan ($\text{AsSe}_{3/2}$) üstün olduğu tərkiblərdə ($\text{Ge}_{17.5}\text{As}_{15}\text{Se}_{52.5}\text{S}_{15}$, $\text{Ge}_{24}\text{As}_{19}\text{Se}_{37}\text{S}_{20}$, $\text{Ge}_{25}\text{As}_{10}\text{Se}_{40}\text{S}_{25}$, $\text{Ge}_{26}\text{As}_{18}\text{Se}_{26}\text{S}_{30}$) fraktal fəza ölçülərinin ($D=3,54; 3,35; 3,587; 3,1$) daha böyük olması məhdudiyətlər miqdarının (N_{co}) və orta rabitə enerjisinin ($\langle E \rangle$) qiymətlərinin yüksək olması ilə bağlıdır.

6. Müəyyən olunmuşdur ki, $\text{Ge}_{17.5}\text{As}_{15}\text{Se}_{52.5}\text{S}_{15}$, $\text{Ge}_{24}\text{As}_{19}\text{Se}_{37}\text{S}_{20}$, $\text{Ge}_{25}\text{As}_{10}\text{Se}_{40}\text{S}_{25}$, $\text{Ge}_{26}\text{As}_{18}\text{Se}_{26}\text{S}_{30}$ tərkiblərində Porod asılılığının qüvvət üstünün (n_p) $1 < n_p < 3$ intervalında dəyişən qiymətlərlə xarakterizə olunması nahamar səthli səpici mərkəzlərin həcmi fraktallara çevrildiyini sübut edir.

7. Alifatik və tsiklik zəncir quruluşlarına malik karbohidrogen mühitində $\text{Al-Ge}_{33}\text{As}_{17}\text{S}_{35}\text{Se}_{15}\text{-Te}$ sendviç strukturunun volt-ampere xarakteristikası sabit cərəyan metodu ilə tədqiq olunaraq göstərilmişdir ki, qaz atomlarının aşağı sıxlıqlı oblastlara və ya məsələlərə toplanması U-mərkəzlərinin ionlaşma və rekombinasiya proseslərinə ciddi təsir edərək cərəyan ossilyasiyalarının kəskin zəifləməsinə səbəb olur ki, bu da tədqiq olunan maddələrin tətbiqi baxımdan sensitiv xüsusiyyətlərə malik olması ilə izah olunur.

DƏRC OLUNMUŞ ELMİ İŞLƏRİN SİYAHISI

1. Mehdiyeva S.İ., Ələkbərov R.İ., Məmmədov S.M., / Ge-As-Se-S xalkogenid şüşəvari sistemində rentgen difraksiya səpilməsi. // Azerbaijan Journal of Physics, -2021; XXVII, 4, s.7-10
2. Mehdiyeva S.İ., Ələkbərov R.İ., Məmmədov S.M. / Ge-As-Se-S xalkogenid şüşəvari maddələrində lokal quruluşun tədqiqi. / Akademik L.M. İmanovun 100 illik yubileyinə həsr olunmuş Molekulyar spektroskopiya mövzusunda konfrans Azərbaycan və rus

- dillərində məqalələr. -Bakı-Şuşa, - 21-22 Sentyabr, -2022, -s.125-127
3. Mehdiyeva S.İ., Ələkbərov R.İ., Məmmədov S.M. / Molekulyar quruluş modeli əsasında Ge-As-Se-S xalkogenid şüşəvari sistemində Raman səpilməsinin tədqiqi, H. Əliyevin 100 illiyinə həsr olunmuş nəzəri və tətbiqi fizikanın inkişafı mövzusunda beynəlxalq konfrans. Azerbaijan Journal of Physics. Section: C Conference H.A. Aliyev.-Bak; -08-09 June, -2023. -s.55-59
 4. Alekberov R.I., Mekhtiyeva S.I., Mammadov S.M., / Peculiarities of topological phase transitions in Ge-As-Se and Ge-As-Se-S multicomponent chalcogenide glassy systems, Конференция; Аморфные и микрокристаллические полупроводники.- Санкт-Петербург, -3-5 июля 2023. -с.74-75.
 5. Alekberov R.I., Mekhtiyeva S.I., Mammadov S.M. / Study of correlations between glass-transition temperature and local structure of Ge-As-Se, Ge-As-Se-S chalcogenide glasses. / Philosophical Magazine. Part A: Materials Science, -2023, 103(19), -p.1828-1841
 6. Mekhtiyeva S.I., Alekberov R.I, Mammadov S.M. / Study of local structure and thermal properties in fiber optics Ge-As-Se-S chalcogenide glass materials, International Conference on Advanced Laser Technologies (ALT). LS-I-10, -Samara, - September 18-21, -2023, -p.154.
 7. Alekberov R.I., Mekhtiyeva S.I., Mammadov S.M. / Glass transition, thermal stability and glass-forming tendency of Ge-As-Se-S glassy systems. / Journal of the Korean Physical Society, -2024;84: -p.694–702
 8. Mehdiyeva S.I. Propan-butan qaz qarışığına malik mühitdə Al-Ge₃₃As₁₇S₃₅Se₁₅-Te sendviç strukturunun volt–amper xarakteristikasının tədqiqi./ Mehdiyeva S.I., Ələkbərov R.İ., Məmmədov S.M. [et al.] // Azerbaijan Journal of Physics, -2024; -2024, -s.23-27
 9. Mehdiyeva S.İ., Ələkbərov R.İ., Məmmədov S.M./ Ge-As-S-Se xalkogenid şüşəvari sistemində kristallaşma prosesinin tədqiqi. // Müasir təbiət və iqtisad elmlərinin aktual problemləri Beynəlxalq Elmi Konfrans, V hissə, -Gəncə, -3-4 may, -2024, -s.68-70

10. Mehdiyeva S.İ., Ələkbərov R.İ., Məmmədov S.M. / Ge-As-S-Se xalkogenid şüşəvari sistemində kristallaşma prosesləri, Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının xəbərləri, Fizika və Astronomiya, -2024; XLIV, 2, -s.17-23
11. Mehdiyeva S.İ. Alifatik və tsiklik zəncir quruluşlarına malik karbohidrogen mühitinin Al-Ge₃₃As₁₇S₃₅Se₁₅-Te sendviç strukturunun volt–amper xarakteristikasına təsiri, / Mehdiyeva S.İ., Ələkbərov R.İ., Məmmədov S.M. [et al.] // Azerbaijan Journal of Physics. Section: C. Fizikanın aktual problemləri mövzusunda Beynəlxalq Elmi Konfrans / - Naxçıvan, 5-8 iyun, -2024. –s.4-7
12. R Alekberov R.I., Mekhtiyeva S.I., Mammadov S.M. Glass-forming tendency in fiber optics Ge-As-Se-S chalcogenide glass materials, The 31th International Conference on Advanced Laser Technologies (ALT), -Vladivostok, -September 23-27, -2024, -p.134
13. Alekberov R.I. Influence of hydrocarbon environment on electrical characteristics of Ge-As-Se-S chalcogenide glass system. / Alekberov R.I., Mekhtiyeva S.I., Mammadov S.M. [et al.] // Journal of advances in physics, -2024; 22, -p.249-255
14. Alekberov R.I. The influence of a hydrocarbon environment with aliphatic and cyclic chain structures on the volt-ampere characteristic of the Al-Ge₃₃As₁₇S₃₅Se₁₅-Te sandwich structure, / Alekberov R.I., Mekhtiyeva S.I., Mammadov S.M. [et al.] // Chalcogenide Letters, vol. 21, N 11 (2024), pp 927-931
15. Məmmədov S.M. Ge-As-Se-S xalkogenid şüşəvari sistemində optik udulmanın spektral asılılığının riyazi uzlaşdırma üsulu ilə tədqiqi, Azerbaijan Journal of Physics, -2025; XXXII; 3, -s.9-20



Dissertasiyanın müdafiəsi 29 oktyabr 2025-ci il tarixində saat 09:30 -da Azərbaycan Respublikasının Elm və Təhsil Nazirliyi Fizika İnstitutunun nəzdində fəaliyyət göstərən ED 1.14 Dissertasiya Şurasında keçiriləcək.

Ünvan: AZ1073, Bakı şəhəri, Hüseyn Cavid prospekti, 131

Dissertasiya ilə Azərbaycan Respublikasının Elm və Təhsil Nazirliyi Fizika İnstitutunun kitabxanasında tanış olmaq mümkündür.

Dissertasiya və avtoreferatın elektron versiyaları Azərbaycan Respublikasının Elm və Təhsil Nazirliyi Fizika İnstitutunun rəsmi internet saytında yerləşdirilmişdir.

Avtoreferat 27 sentyabr 2025-ci il tarixdə zəruri ünvanlara göndərilmişdir.

Çapa imzalanıb:26.09.2025

Kağızın formatı: A5

Həcm:40973

Tiraj: 100