

# AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASI

*Əlyazması hüququnda*

## **TIInS<sub>2</sub>, TIGaSe<sub>2</sub> KRİSTALLARININ DİELEKTRİK, ELEKTRİK XASSƏLƏRİNƏ VƏ İMPEDANSA İONLAŞDIRICI ŞÜALARININ TƏSİRİ**

İxtisas: 2225.01 – Radiasiya materialşünaslığı

Elm sahəsi: Fizika

fizika üzrə fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi  
almaq üçün təqdim edilmiş

### **DİSSERTASIYA**

İdiaçı: \_\_\_\_\_ Samir Faiq oğlu Səmədov

Elmi rəhbərlər: \_\_\_\_\_ AMEA-nın müxbir üzvü, f.-r.e.d.,  
prof. O.Ə.Səmədov  
\_\_\_\_\_ k.e.d., dos. A.İ. Nəcəfov

**BAKI– 2021**

## M Ü N D Ə R İ C A T

<b>GİRİŞ</b> .....	<b>4</b>
<b>I FƏSİL. ƏDƏBİYYAT İCMALI</b> .....	<b>17</b>
1.1. $A^3B^3C_2^6$ tip yarımkəçiricilərdə struktur və faza keçidlərinin xüsusiyyətləri. .	17
1.2. Yarımkəçiricilərdə ion faza keçidi.....	24
1.3. $A^3B^3C_2^6$ tip yarımkəçiricilərin implantasiya üsulu ilə aşqarlanması .....	29
1.4 $A^3B^3C_2^6$ tip yarımkəçiricilərdə $\gamma$ -kvantlarının və ion implantasiyasının təsiri nəticəsində radiasiya defektlərinin yaranması .....	37
<b>II FƏSİL. MONOKRİSTALIN YETİŞDİRİLMƏSİ VƏ ÖLÇMƏ METODİKALARI</b> .....	<b>44</b>
2.1. Monokristalın yetişdirilməsi .....	44
2.2. $\gamma$ -şüalarının təsirinin tədqiqat metodikası.....	47
2.3. İon implantasiya təsirinin tədqiqat metodikası.....	51
2.4. Dielektrik və elektrik xassələrinin tədqiqi metodikası .....	57
2.5. Işığın Kombinasional Səpilməsi metodikası .....	60
2.6. İmpedans spektrinin tədqiqi metodikası.....	67
<b>III FƏSİL. TlGaSe<sub>2</sub> VƏ TlInS<sub>2</sub> KRİSTALLARININ ELEKTRİK VƏ DİELEKTRİK XASSƏLƏRİNİN TƏDQIQI</b> .....	<b>75</b>
3.1 TlGaSe <sub>2</sub> kristalının dielektrik nüfuzluğu. ....	75
3.2. TlInS <sub>2</sub> kristalının dielektrik nüfuzluğu. ....	80
3.4. TlGaSe <sub>2</sub> və TlInS <sub>2</sub> kristallarının ion keçiriciliyi .....	87
3.6. TlGaSe <sub>2</sub> kristalının dielektrik itki bucağının tangensi ( $\text{tg}\delta(T)$ ) .....	96
3.7. TlGaSe <sub>2</sub> kristalının kompleks impedans spektri .....	102
3.8. TlInS <sub>2</sub> kristalının kompleks impedans spektri .....	110
3.9. TlInS <sub>2</sub> kristalının Işığın Kombinasional Səpilmə spektrləri .....	116

<b>IV FƏSİL. TlGaSe<sub>2</sub> VƏ TlInS<sub>2</sub> KRİSTALLARININ ELEKTRİK VƏ DİELEKTRİK XASSƏLƏRİNƏ İMPLANTASIYANIN TƏSİRİ .....</b>	<b>120</b>
4.1. TlGaSe <sub>2</sub> kristalının dielektrik nüfuzluğuna H <sup>+</sup> və He <sup>2+</sup> ionlarının təsiri .....	120
4.2. TlInS <sub>2</sub> kristalının dielektrik nüfuzluğuna H <sup>+</sup> ionlarının təsiri .....	122
4.3. TlGaSe <sub>2</sub> və TlInS <sub>2</sub> kristallarının ion keçiriciliyinə proton ionlarının təsiri ....	124
4.4. TlGaSe <sub>2</sub> kristalının dielektrik itki bucağının tangensi (tgδ(T)) .....	129
4.6. TlInS <sub>2</sub> kristalının kompleks impedans spektrinə H <sup>+</sup> ionlarının təsiri .....	138
4.7. TlGaSe <sub>2</sub> və TlInS <sub>2</sub> kristalları ionlaşdırıcı şüalanmanın modelləşdirilməsi .....	141
4.8. TlInS <sub>2</sub> kristalının Işıqın Kombinasiyalı Səpilmə spektrlərinə implantasiyanın təsiri.....	146
<b>ƏSAS NƏTİCƏLƏR .....</b>	<b>151</b>
<b>İSTİFADƏ OLUNAN ƏDƏBİYYAT SİYAHISI.....</b>	<b>153</b>
<b>ŞƏRTİ İŞARƏLƏR.....</b>	<b>174</b>

## GİRİŞ

**Mövzunun aktuallığı.** Yarımkəçirici materiallar son illərdə geniş elmi və texnoloji marağa səbəb olmuşdur. Bərk cisim elektronikasının inkişafı nanoelektronikada - superkondensatorlar, ionistorlar (ifrat yüksək tutumlu kondensatorlar), elektron çeviricilər kimi cihazların yaradılması üçün tələbləri artırır.

Sənayedə istifadə olunan bərk kristal materiallar ideal qüsurların (defektlərin) olması ilə fərqlənən real bir quruluşa malikdir. Bunlardan bəziləri kristalların sintezində yaranan qüsurlardır. Digərləri isə bərk cisimlərin temperaturunun və ya ionlaşdırıcı şüaların təsirindən sonra yaranan defektlərdir. Bütün bu defektlər bu və ya digər şəkildə kristal materialların xüsusiyyətlərinə təsir göstərir və bəzən onların təsiri həlledici olur.

Məlum olduğu kimi  $A^3B^3C_2^6$  tip birləşmələri  $A^3B^3$  yarımkəçiricilərinin izoelektronik analoqlarıdır. Hal hazırda  $A^3B^3C_2^6$  tip yarımkəçiricilər sinifinə daxil olan  $TlInS_2$  və  $TlGaSe_2$  birləşmələr geniş tədqiq olunur.  $TlInS_2$  və  $TlGaSe_2$  monokristalları laylı quruluşa malikdirlər. Bu kristalların özünəməxsus xüsusiyyətlərindən biri, strukturlarının spesifikliyindən qaynaqlanan fiziki xüsusiyyətlərin güclü anizotropiyasıdır.  $TlInS_2$  və  $TlGaSe_2$  monokristalları optik aktiv olduğundan, geniş spektral diapozonda yüksək fotohəssaslığa malikdirlər və optoelektronika tətbiq sahələrindən biridir. Digər tərəfdən bu kristalların laylı quruluşa malik olması, onlarda politiplərin əmələ gəlməsi və nəticədə fiziki xassələrinin dəyişməsi üçün əlverişlidir. Bu tip yarımkəçiricilər unikal xüsusiyyətlərə malikdirlər. Bu səbəblərdən həm laylı yarımkəçiricilərin kristal quruluşunun əsas xüsusiyyətlərini izah etmək baxımından, həm də texniki tətbiqlər baxımından  $TlB_3C_2^6$  tipli birləşmələri tədqiq etmək xüsusi maraq doğurur. Hal-hazırda bu materialların elektrik, optik və fotoelektrik xüsusiyyətlərinin sistemli şəkildə öyrənilməsinə ehtiyac vardır ki, bu da onlarda baş verən fiziki proseslərin bütün kompleksini müəyyənləşdirməyə imkan verir. Bu materialların optik xüsusiyyətlərinin öyrənilməsi həm praktik tətbiqi, həm də elektron-enerji quruluşunun əsaslı öyrənilməsi üçün lazımdır.

Yarımkəçirici materialların xassələrinin və istifadə sahələrinin inkişaf etdirilməsində bir çox metodlardan istifadə olunur. Bu metodlardan biri ionlarla bombalanma (implantasiya) metodudur ki, bunun əsas prinsipi yüksək sürətə malik ionların hədəf daxilinə yeridilməsinə dayanır. İon implantasiya metodu vasitəsi ilə materialların həm fiziki, həm də kimyəvi təbiətini dəyişdirmək mümkündür. Belə ki, bəzi materiallar elektronika və sənayedə saf olaraq müəyyən edilmiş yerlərdə istifadə edilə bilərkən, ionlarla implantasiya nəticəsində materialların həm istifadə sahəsi, həm də istifadə müddəti mühüm ölçülərdə dəyişdirilə bilər. Bu səbəblə istifadə olunan bu metod texnologiyada, əsasən də yarımkəçiricilər texnologiyasında nümunələrin xassələrinin yaxşılaşdırılması və inkişaf etdirilməsi xüsusi yollardan biridir.

Bərk cismlər elektronikasının inkişafı eyni zamanda həm ion, həm də elektron keçiriciliyinə malik yeni yarımkəçirici materialların alınmasına və inkişaf etdirilməsinə ehtiyac duyur. Lakin çox sayda yarımkəçirici birləşmələr əsasən aşağı temperaturlu ion keçiriciliyinə malik olmalarına baxmayaraq, bu kimi fiziki xassələr tədqiqatçılar tərəfindən az öyrənilib. Xüsusən də yuxarı temperaturlarda yarımkəçirici birləşmələrin fiziki xassələri və fiziki xassələrinə ionlaşdırıcı şüaların təsiri az öyrənilmiş olaraq qalır. Hal-hazırda materialşünaslığın inkişaf etməsi üçün vacib olan materialların həm ion, həm də elektron keçiriciliyinin eyni zamanda geniş temperatur intervalında və geniş tezlik oblastında öyrənilməsi və tədqiq edilməsi vacibdir.

Radiasiya Problemləri İnstitutunun Nizamsız bərk cismlərin radiasiyası fizikası laboratoriyasında  $\text{TlInS}_2$  və  $\text{TlGaSe}_2$  laylı kristalları, geniş temperatur intervalında tədqiq edilərək onların ion keçiricilərə aid olmaları göstərilmişdir. Son illərdə  $\text{A}^3\text{B}^3\text{C}_2$  tip üçqat birləşmələrin geniş tədqiq olunmasına baxmayaraq, bəzi fiziki xassələri haqqında məlumatların olmamasından praktiki tətbiqində çətinliklər qalmaqda davam edir. Xüsusi ilə Radiasiya Problemləri İnstitutunun Seqnetoelektriklərin radiasiya fizikası laboratoriyası bu sahədə mühüm nəticələr əldə etmişlər. Belə ki,  $\text{TlInS}_2$  və  $\text{TlGaSe}_2$  monokristallarını otaq temperaturundan aşağı temperaturlarda geniş tədqiq etmişlər.  $\text{TlGaSe}_2$  monokristallarında 107K temperaturdan aşağı temperaturlarda seqnetoelektrik fazanın, 107-119K temperatur

aralığında uyuşmayan fazanın olmasını müşahidə etmişlər.  $\text{TlInS}_2$  monokristallarında isə 196-201K temperatur intervalında seqnetoelektrik fazanın, 216K temperaturdan aşağı temperaturlarda uyuşmayan fazanın və 216K yuxarı temperaturlarda parafazanın olması aşkar etmişlər. Həmçinin bu kristalların 300K temperaturdan aşağı temperaturlarda  $\text{TlInS}_2$  kristalının spontan polyarizasiyası öyrənilmişdir. Və əldə olunmuş nəticələr yüksək retinqli jurnallarda dərc olunmuşdur. Lakin otaq temperaturundan yuxarı temperaturlarda  $\text{TlInS}_2$  və  $\text{TlGaSe}_2$  kristalların fiziki xassələri və fiziki xassələrinə ionlaşdırıcı şüaların təsiri öyrənilməmiş qalmaqdadır.

**Dissertasiya işinin məqsədi:**  $\text{TlInS}_2$ ,  $\text{TlGaSe}_2$  kristallarının geniş temperatur-tezlik intervalında impedans, dielektrik və elektrik xassələrinə ionlaşdırıcı şüalarının təsirinin öyrənilməsindən ibarətdir.

**Qoyulan məqsədə çatmaq üçün aşağıdakı məsələlər həll edilmişdir:**

-  $\text{TlInS}_2$  və  $\text{TlGaSe}_2$  birləşmələrini sintez etmək və monokristallarını yetişdirmək;

-  $\text{TlInS}_2$  və  $\text{TlGaSe}_2$  kristallarını  $\gamma$ -şüalarla şüalandırılması və yüngül ionlarla ( $\text{H}^+$ ,  $\text{He}^{2+}$ ) implantasiya edilməsi;

-  $\gamma$ -şüalarla şüalanmadan və yüngül ionlarla ( $\text{H}^+$ ,  $\text{He}^{2+}$ ) implantasiyadan əvvəl və sonra geniş temperatur (290-550K) intervalında və geniş tezlik ( $20\text{-}10^6$  Hz) oblastlarında  $\text{TlInS}_2$  və  $\text{TlGaSe}_2$  kristallarında elektrik keçiriciliyinin tədqiq etmək;

-  $\gamma$ -şüalarla şüalanmadan və yüngül ionlarla ( $\text{H}^+$ ,  $\text{He}^{2+}$ ) implantasiyadan əvvəl və sonra  $\text{TlInS}_2$  və  $\text{TlGaSe}_2$  kristallarının ion keçiriciliyinin xüsusiyyətlərinin tədqiq etmək;

-  $\gamma$ -şüalarla şüalanmadan və yüngül ionlarla ( $\text{H}^+$ ,  $\text{He}^{2+}$ ) implantasiyadan əvvəl və sonra  $\text{TlInS}_2$  və  $\text{TlGaSe}_2$  kristallarının kompleks impedans spektrinin xüsusiyyətlərini aşkar etmək;

-  $\gamma$ -şüalarla şüalanmadan və yüngül ionlarla ( $\text{H}^+$ ,  $\text{He}^{2+}$ ) implantasiyadan əvvəl və sonra  $\text{TlInS}_2$  və  $\text{TlGaSe}_2$  kristalların dielektrik relaksasiya hadisələrini tədqiq etmək;

- Yüngül ionlarla ( $\text{H}^+$ ,  $\text{He}^{2+}$ ) implantasiyadan əvvəl və sonra  $\text{TlInS}_2$  kristalının İşıqın Kombinasiyalı Səpilmə spektrlərini tədqiq etmək;

- TlInS<sub>2</sub> kristalları üçün ionlaşdırıcı şüalanmanın modelləşdirilməsi;

### **Tədqiqat metodları:**

TlGaSe<sub>2</sub> və TlInS<sub>2</sub> monokristalları Bricmen-Stokbarqer metodu ilə sintez edilmişdir. TlGaSe<sub>2</sub> və TlInS<sub>2</sub> monokristallarını almaq üçün, diametri (2,3-2,5)·10<sup>-2</sup>m olan silindrik formada kvarts ampulalardan (uzunluğu 0,23-0,25sm və diametri 0,01-0,2 m) istifadə edilmişdir. Kvarts ampulalar vakuum şəraitində və komponentlərlə birlikdə 10-15° bucaq altında 1/3 hissəsi havada qalması şərti ilə sobaya yerləşdirilir. Ampulanı belə yerləşdirməklə sintez prosesini sürətləndirmək və ərintinin səthini çoxaltmaq mümkündür. Soba 0,16-0,20K/san sürəti ilə qızdırılaraq proses davam etdirilir. Proses bitdikdən sonra sobanın temperaturu otaq temperaturuna qədər aşağı salınaraq kristal sobadan çıxarılır. Və beləliklə nümunələrin sintezi (yetişdirilməsi) prosesi yekunlaşmış olur.

TlGaSe<sub>2</sub> və TlInS<sub>2</sub> monokristalları şüalanma mənbələri Co<sup>60</sup> izotopundan ibarət γ-25 radiasiya tədqiqatları qurğusunda şüalandırılmışdır. Bu tədqiqat metodu ilə fiziki-kimyəvi və bioloji tədqiqatları aparmaq mümkündür. Qurğu işlək olmadığı halda, mənbələr suyun altında saxlanılır. Səbəb isə qamma şüalarından qorunmaq üçündür. Qamma mənbələrinin sistemi, içərisində aşağı və yuxarı tutacaqlarla əlaqələndirilmiş çubuqlar yerləşdirilməklə, borulardan və kasetlərdən ibarətdir. Aşağı və yuxarı tutacaqlarla əlaqələndirilmiş çubuqlar Co<sup>60</sup> izotopundan hazırlanmış və çevrə boyunca (simmetrik) düzülmüşlər. Şüalanmanın düzgün aparılması üçün şüalanan nümunənin ölçüləri kameranın ölçüsündən kiçik olmalıdır. Şüalanan nümunələrin yerləşdirilmə vəziyyətindən asılı olaraq, nümunələrin aldığı dozalar da fərqli olur.

Nümunələrin ion implantasiyası UNIMAS 79 sürətləndiricisində implantasiya edilmişdir. İmplantasiya zamanı nümunə mənbə qarşısında 10° dərəcə bucaq altında yerləşdirilmiş və implantasiya otaq temperaturunda aparılmışdır. İmplantasiya yüngül ionlardan (H<sup>+</sup> və He<sup>2+</sup>) istifadə edilərək aparılmışdır. Çıxarma (ekstraksiya) prosesi zamanı, maqnit sahəsinin köməyi ilə ionlar mənbədən ekstraksiya edilərək mişənə (tutacağa) yerləşdirilmiş nümunə üzərinə implant edilir. Sürətləndiricidə yerləşdirilmiş elektrostatik linzalar ion şüası yaradır. Bu zaman ion selinin miqdarını

ekrandan istifadə edərək təyin edilir. Nümunənin səthini bərabər şəkildə şüalandırmaq üçün, dəyişən elektrik sahəsindən istifadə edilir. Nümunələr sürətləndiricidə implant kamerasında tutacağa yerləşdirilir. Beləliklə, nümunələrin yerləşdirildiyi tutacaqdan axan elektrik yükünü ölçərək, nümunələrin implantasiya dozasını hesablamaq olar. Daha sonra SRIM programının köməyi ilə simulyasiya edilərək, ionlaşdırıcı şüaların modelləşdirilməsi aparılmışdır. Modelləşmə zamanı  $10^6$  sayda ion götürülərək, nümunələrdə ionların hansı dərinlikdə paylanmasını, geri təpmə atomlarının paylanmasını və implant ionlarının nümunədə yaratdığı vakansiyalar hesablanaraq spektrləri qurulmuşdur.

E7-25 impedans qurğusunun köməkliyi ilə nümunələrin dielektrik nüfuzluğu ( $\epsilon$ ) –nun həqiqi və xəyali hissələri, dielektrik itki bucağının tangensi ( $\text{tg}\sigma$ ) və impedans parametrləri ölçülmüşdür. Ölçmələr 1K temperatur dəyişməsi ilə, 300÷550K temperatur və 25Hz÷1MHz tezlik intervallarında aparılmışdır.

İonlaşdırıcı şüaların təsirindən öncə və sonra Işıqın Kombinasiyalı Səpilməsi (İKS) metodu ilə, nümunələrin optik xassələri tədqiq edilmişdir. Tədqiqatlar NTEGRA Spectra LS PNL spektrometrində aparılmışdır. Spektrometrdə lazer olaraq, Helium/Neon lazeri istifadə olunub. Helium/Neon lazerinin dalğa uzunluğu 632,8 nm-ə bərabərdir. Təcrübənin daha effektiv olması üçün bu dalğa uzunluqlu lazer seçilmişdir. İstifadə olunan lazer mikroskopu konfokal olduğundan, tədqiq olunan  $\text{TlInS}_2$  nümunəsi üzərində bir nöqtəyə düşür. Kristal səthin bircins olması əsas şərt olduğundan, işığın kombinasiyalı səpilmə spektrləri çəkilərkən bir neçə nöqtədə götürülmüşdür. Spektral həllər  $\pm 0,5 \text{ sm}^{-1}$  aralığında olmuşdur. Işıqın kombinasiyalı səpilmə spektrləri 300K temperaturunda tədqiq edilmişdir. Polyarizə olunmuş işığın kombinasiyalı səpilmə spektrləri perpendikulyar modda kristal səthi üzərində əks səpilmə istiqamətində ölçülmüşdür. Tədqiq olunan nümunələrdə istilik təsirini minimuma endirmək üçün nümunə üzrə radiasiya gücü 600  $\mu\text{W}$  - 2 mW səviyyəsinə qədər zəiflədilmişdir. Nümunə səthinə düşən şüanın ölçüsü təxminən 1 mikron tərtibindədir. Siqnalın yığılma müddəti isə bir qayda olaraq 0,5 ilə 1 dəqiqə olmuşdur. Işıqın kombinasiyalı səpilmə spektrinin ölçülərindəki hər bir hal ən kiçik kvadratlar həllindən istifadə edərək, Lorentzian təpələrinə ayrılmışdır.

Təcrübələr zamanı Bricmen-Stokbarqer metodu ilə sintez edilmiş TlGaSe<sub>2</sub> və TlInS<sub>2</sub> monokristallarının ölçüləri 0.4-0.5sm<sup>2</sup> ölçüsündə və 0.2-0.3sm qalınlığında götürülərək aparılmışdır. İonlaşdırıcı şüaların təsirindən əvvəl və sonra tədqiqat obyektləri olan TlGaSe<sub>2</sub> və TlInS<sub>2</sub> kristallarının səthinə xüsusi şəraitdə gümüş kontaktlar vurulub, keçiriciliyi və keyfiyyəti yoxlanılaraq elektrofiziki tədqiqatlarının aparılmışdır.

**Müdafiyyə çıxarılan əsas elmi müddəalar:**

- 1) TlGaSe<sub>2</sub> kristalında  $T_1=415K$ ,  $T_2=500K$  və  $T_3=532K$  temperaturlarında dielektrik nüfuzluğunun temperatur  $\epsilon(T)$  asılılıqlarında anomaliyalar müşahidə edilməsi;
- 2) TlInS<sub>2</sub> kristalında dielektrik nüfuzluğunun  $\epsilon(T)$  asılılığında 330K, 410K, 490K, 570K və 600K temperaturlarında anomaliyalar müşahidə olunması;
- 3) TlGaSe<sub>2</sub> və TlInS<sub>2</sub> kristallarının elektrik keçiriciliyinin 400K-dən yuxarı temperaturlarda ion keçiriciliyinə malik olması və qamma şüalarının təsiri ilə bu keçiriciliyin artdığı müəyyən edilməsi;
- 4) Sabit elektrik sahəsində TlInS<sub>2</sub> kristalının  $\sigma(T)$  asılılığında 400K-dən aşağı temperaturda keçiricilikdə elektron komponentləri üstünlük təşkil etdiyi halda, temperaturun artması ilə (400K-dən yuxarı) ion keçiriciliyin qiymətində sürətli artımın müşahidə edilməsi;
- 5) Göstərilmişdir ki, 150 keV enerjili He<sup>+</sup> ionları ilə implantasiya olunmuş TlGaSe<sub>2</sub> kristalının dielektrik nüfuzluğunun ədədi qiyməti və relaksasiya müddəti azalmışdır. Bu azalma implantasiya nəticəsində kristalın quruluşunda mobil ionların konsentrasiyasının artması ilə əlaqədardır;
- 6) H<sup>+</sup> ionları ilə implantasiya olunmuş TlInS<sub>2</sub> kristallarının İKS spektrlərinin tədqiqatları In və Tl ionlarının spektral xüsusiyyətlərinin əhəmiyyətli dərəcədə genişlənməsi və kristalın səth qatında Tl tərkibində azalma müşahidə edilməsi. Həmçinin implantasiyadan sonra kristalın strukturunda amorflaşma müşahidə edilməsi;

H<sup>+</sup> ionları ilə implantasiya olunmuş TlInS<sub>2</sub> kristallarında, implantasiya nəticəsində dielektrik nüfuzluğunun ədədi qiymətinin və relaksasiya müddətinin azalmasının əsas səbəbi mobil ionların konsentrasiyasının artması;

**İşin elmi yeniliyi:** TlInS<sub>2</sub> və TlGaSe<sub>2</sub> laylı monokristallarında ilk dəfə olaraq:

- 1) TlGaSe<sub>2</sub> və TlInS<sub>2</sub> kristallarında uyğun olaraq (TlGaSe<sub>2</sub> - T<sub>1</sub>=415K, T<sub>2</sub>=500K və T<sub>3</sub>=532K),( TlInS<sub>2</sub>- 330K, 410K, 490K, 570K və 600K) temperaturlarında faza keçidləri müşahidə edilmişdir.
- 2) 400K-dən yuxarı temperaturlarda TlGaSe<sub>2</sub> və TlInS<sub>2</sub> kristallarının ion keçiriciliyinə malik olması müəyyən edilmiş və  $\ln(\epsilon)$ ,  $\ln(\sigma T)$  asılılıqlarından aktivləşmə enerjiləri hesablanmışdır.
- 3) TlGaSe<sub>2</sub> və TlInS<sub>2</sub> monokristallarında  $25 \div 10^6$  Hz tezlik intervalında, elektrik sahəsinin tezliyinin artması ilə impedansın həqiqi və xəyali hissələrinin ( $Z'$  və  $Z''$ ) azalması ilə xarakterizə olunan və temperaturun artması ilə yuxarı tezlik oblastına tərəf sürüşən dispersiya müşahidə edilmişdir. TlGaSe<sub>2</sub> kristalının elektrik modulunun xəyali hissəsinin ( $M''$ ) tezlikdən asılılığında orta relaksasiya müddəti təyin edilmişdir ( $\tau = 1.54 \cdot 10^{-6}$  san).
- 4) Müəyyən edilmişdir ki, 20Mrad qamma şüalarının təsiri ilə TlGaSe<sub>2</sub> kristallarında dielektrik nüfuzluğunun həqiqi və xəyali hissələrinin tezlik və temperatur asılılıqlarında müşahidə olunan güclü dəyişmə, Tl ionlarının mütəhərrikliyi və onların temperatur intervalında aktivləşməsinin nəticəsidir.
- 5) TlInS<sub>2</sub> kristalının sabit elektrik sahəsində T=470K temperaturda elektrik keçiriciliyinin kinetikasından ion payı qiymətləndirilmişdir. Müəyyən edilmişdir ki, şüalanmadan əvvəl elektrik keçiriciliyində ion payı 78%, 20 Mrad şüalanmadan sonra isə 82% təşkil edir.
- 6) H<sup>+</sup> ionları ilə implantasiya olunmuş TlInS<sub>2</sub> kristallarının 300÷550K temperatur intervalında dielektrik nüfuzluğu və impedansın həqiqi və xəyali hissələrinin tədqiqi nəticəsində göstərilmişdir ki, dielektrik nüfuzluğunun ədədi qiymətinin və relaksasiya müddətinin azalmasının əsas səbəbi mobil Tl ionların konsentrasiyasının artması ilə əlaqədardır.
- 7) H<sup>+</sup> ionları ilə implantasiyadan sonra Işığın Kombinasiyalı Səpilmə (İKS) spektrlərin tədqiqi nəticəsində TlInS<sub>2</sub> kristallarının strukturunda amorflaşma müşahidə edilmişdir.

8)  $H^+$  ionları ilə implantasiya olunmuş  $TlInS_2$  kristalında SRIM proqramından istifadə edərək atomların dərinlikdə paylanması verilmiş və Tl boşluqlarda  $H^+$  ionlarının paylanması 1000 nm dərinlikdə müəyyən edilmişdir.

**İşin praktiki əhəmiyyəti.** Dissertasiyada əldə olunmuş nəticələr elektron çeviricilərin, ifrat yüksək tutumlu kondensatorların-ionistorların, nanoelektronikada əlverişli istifadəsi üçün superkondensatorların, qida mikrobatareyalarının, yaddaş özəklərinin, elektrik və optik informasiyanın toplanması üçün sistemlərin hazırlanmasında geniş istifadə edilə bilər. Həmçinin dissertasiyada göstərilmişdir ki, proton və alfa zərrəcikləri ilə implantasiya olunaraq  $TlGaSe_2$  və  $TlInS_2$  laylı monokristallarının bəzi fiziki xüsusiyyətləri idarə oluna bilər ki, bu da öz növbəsində bu birləşmələrin texnologiyada istifadə imkanlarını əhəmiyyətli dərəcədə artırır.

Tədqiqatlar,  $TlGaSe_2$  və  $TlInS_2$  laylı kristallarında xarici sahə kəsildikdən sonra uzun müddət ərzində aşağı müqavimətlik halını saxlaması ilə müşahidə olunan yaddaş effekti mövcuddur.  $TlGaSe_2$  və  $TlInS_2$  laylı kristalları üçün bu müddət  $\approx 50$  saatdan çoxdur.

**İşin aprobeşiyası.** Dissertasiyanın nəticələri aşağıdakı konfranslarda məruzə edilmişdir: “10-я международная конференция Ядерная и радиационная физика” (8-11 сентября 2015 г., г. Курчатов, Республика Казахстан), “52-ая Школа ПИЯФ по Физике Конденсированного Состояния” ( Санкт – Петербург, Россия 12-17 марта 2018), “XII-th International Conference Ion Implantation and Other Applications of Ions and Electrons” (Lublin, Poland 18-21 July 2018), II Международный научный форум «Ядерная наука и технологии» 12-я Международная конференция «Ядерная и радиационная физика» 1-я Международная конференция «Ядерные и радиационные технологии в медицине, промышленности и сельском хозяйстве» (24-27 июня 2019 г. Алматы, Казахстан), The ninth international conference “Modern problems of nuclear physics and nuclear technologies” (24-27 September 2019, Tashkent, Uzbekistan),

**Dissertasiya işinin yerinə yetirildiyi təşkilatın adı.** Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Radiasiya Problemləri İnstitutu.

**Dissertasiyanın strukturu və həcmi.** Təqdim olunan dissertasiya işi girişdə 27360 işarə, I fəsildə 47700 işarə, II fəsildə 32730 işarə, III fəsildə 52190 işarə, IV fəsildə 33610 işarə və nəticələrdə 3265 işarə olmaqla ümumilikdə 197800 işarədən ibarətdir. Dissertasiya işi 174 səhifədən, o cümlədən, 95 səhifə ancaq mətn (196850 işarə), 62 şəkil və 6 cədvəldən ibarətdir.

**Nəşrlər.** Dissertasiyanın işinin məzmunu 12 elmi əsərdə, o cümlədən Respublika və xarici jurnallarda 7 məqalə, 5 konfrans materialı nəşr edilmişdir. Məqalələrdən ikisi xaricdə, Beynəlxalq bazalara daxil olan jurnallarda, ikisi isə təkmüəllifli çap edilmişdir.

**Girişdə** dissertasiyanın aktuallığı və texnologiyada tətbiqi əsaslandırılmış, aparılan tədqiqatların məqsədi, elmi yeniliyi və praktiki əhəmiyyəti göstərilmiş, müdafiəyə çıxarılan əsas müddəalar, aprobeasiya dərəcəsi, nəşr edilmiş əsərlər barədə məlumat verilmiş və işin fəsilər üzrə əsas məzmunu qısaca olaraq şərh edilmişdir.

**Birinci fəsildə**  $A^3B^3C_2^6$  birləşmələr sinifinə daxil olan yarımkəçiricilərin struktur və faza keçidlərinin xüsusiyyətləri, ion faza keçidləri, yarımkəçiricilərin implantasiya olunması və ionlaşdırıcı şüaların təsiri ilə yaranan radiasiya defektlərinə aid ədəbiyyat məlumatlarından toplanaraq təhlil edilmişdir. Bu fəslin əsas məqsədi odur ki, ionlaşdırıcı şüaların təsirinə məruz qalmış  $A^3B^3C_2^6$  birləşmələrində alınmış tədqiqat nəticələrinin ümumiləşdirməkdir. Ədəbiyyatlardan əldə edilmiş məlumatlara əsasən dissertasiya işinin mövzusunun aktuallığı əsaslandırılmış və baxılan sahədə elmi axtarışların davam etdirilməsinin vacibliyi vurğulanmışdır. Həmçinin yarımkəçiricilər texnologiyasında implantasiya metodunun rolu haqqında ətraflı məlumat verilmişdir. Təhlil edilmiş ədəbiyyatlardan, istər qamma kvantlarla, istərsə də ionlarla implantasiya zamanı ionlaşdırıcı şüaların yarımkəçirici materiallara təsiri az öyrənilmiş bir sahə olduğunu söyləmək olar.

**İkinci fəsildə**  $TlGaSe_2$  və  $TlInS_2$  monokristallarının sintez və Bridgman-Stokbarqer üsulu ilə alınma metodu geniş şəkildə göstərilmiş və qurğunun təsviri verilmişdir. Eyni zamanda nümunələrin qamma şüalarla şüalandırma tədqiqatlarının aparıldığı  $\gamma$ -25 radiasiya tədqiqatları qurğusu təsvir edilmişdir.  $TlGaSe_2$  və  $TlInS_2$  laylı kristallarının dielektrik və elektrik xassələrini ölçmək üçün istifadə olunan qurğu

haqqında məlumat verilmişdir. Nümunələrin dielektrik və elektrik xassələrini azot temperaturundan təqribən 700K temperatura qədər ölçmək üçün istifadə olunan kriostatın sxemi təsvir verilmişdir. Kriostatın sxemi mis stəkandan, azbest ekrandan, latun trubkadan, elektrik sobasından, kvars stəkandan, bir kanallı keramidan və metal stəkandan ibarətdir. Eyni zamanda cərəyan şiddətini ölçmək üçün ampermetrdən və gərginliyi ölçmək üçün voltmetrdən istifadə edilmişdir.

Polşada Maria Kuri-Skladovska Universitetinin nəzdində yerləşən Fizika İnstitutunun tədqiqat laboratoriyasında nümunələrin ion implantasiyasının aparılması üçün istifadə olunan sürətləndiricinin qurğularının sxemləri, qurğuların xarakteristikaları və iş prinsipləri haqqında ətraflı məlumat verilmişdir. Bu fəsilə İşıqın Kombinasiyalı Səpilməsi (İKS) metodikası verilmişdir. İKS spektrometrində istifadə olunan lazerlər və tətbiq sahələri haqqında ətraflı məlumat verilmişdir.

Dissertasiyanın **üçüncü fəslində**  $\text{TlGaSe}_2$  və  $\text{TlInS}_2$  kristallarının elektrik və dielektrik xassələrində 20 Mrad  $\gamma$ -şüalanmanın təsirindən əvvəl və sonra baş verən dəyişikliklər E7-25 impedans spektrometrindən istifadə edərək tədqiq edilmişdir. Bununla yanaşı İşıqın kombinasiyalı səpilməsi spektrometrinin köməyi ilə  $\text{TlInS}_2$  kristalının optik xassələri tədqiq edilmişdir. İstifadə olunan metodlar qamma şüalarının təsiri nəticəsində bu kristallarda struktur dəyişiklikləri, kristalların elektrofiziki və optik xassələri haqqında geniş informasiya əldə etmək imkanı yaradır. Belə ki, 20 Mrad qamma şüalarının təsiri ilə,  $\text{TlGaSe}_2$  və  $\text{TlInS}_2$  kristallarında temperaturdan asılı olaraq dielektrik nüfuzluğunun həqiqi və xəyali hissələrinin artması müşahidə olunmuşdur. Bu isə kristallarda  $\text{Tl}^+$  ionlarının mütəhərriqliyi və onların temperatur intervalında aktivləşməsinin nəticəsidir. Kristalların dielektrik və elektrik xassələri 275-550K temperaturda tədqiq edilmiş və bu temperaturun keçiricilik və tezlik intervallarında sıçrayışlı keçiriciliyin mövcudluğu ( $\sigma(T)$ ) tədqiqatlarının nəticələrinə əsasən müəyyən edilmişdir. Alınmış tədqiqatların nəticələrinin asılılıqları Origin programından istifadə edilməklə qurulmuşdur.

Tədqiq olunan birləşmələrdə, 20Mrad dozada şüalandıqdan sonra dielektrik xassələrində baş verən dəyişikliklər radiasiya defektlərinin yaranması ilə ionların mütəhərriqliyinin dəyişməsinə təmin edir.  $\text{TlGaSe}_2$  və  $\text{TlInS}_2$  kristallarında

$\ln(\epsilon)(1000/T)$ -nin xətti dəyişməsinin xarakteri,  $TlGaSe_2$  və  $TlInS_2$  kristallarının ion xarakterli olduğunu göstərir və kristalların alt qəfəslərində  $Tl^+$  ionlarının vakansiyalar üzrə diffuziyasına əsaslanır.  $TlGaSe_2$  və  $TlInS_2$  kristallarında faza keçidləri nəticəsində  $Tl^+$  ionlarının alt qəfəsinin əriməsi baş verir. Bu isə ion keçirici birləşmələr üçün xarakterik bir haldır. Şüalanmadan öncə və sonra paraelektrik fazada dielektrik nüfuzluğunun ədədi qiyməti böyük olması, bu materiallardan ionlaşdırıcı mühitdə istifadə olunmasına imkan yaradır.

$TlGaSe_2$  və  $TlInS_2$  kristallarının dielektrik itki bucağının tangensinin müxtəlif tezliklərdə temperatur asılılıqları qamma kvantlarla şüalanmadan öncə və sonra tədqiq olunmuşdur. Nəticələr göstərir ki, tezliyin artması ilə  $tg\delta(T)$  pikləri yuxarı temperatur oblastına sürüşür və  $tg\delta$ -nın ədədi qiyməti isə kiçilir. Hər iki nümunədə dielektrik itki bucağının tangensi temperaturun artması ilə artır və müəyyən bir temperaturda maksimumu alır. Sonra isə temperaturun artması ilə azalır. Bu cür dəyişikliyə relaksasiya xarakterli azalma deyilir və bu Debay tipli relaksasiya proseslərinə uyğundur. Qamma şüalanmanın təsiri ilə dielektrik itki bucağının qiymətində təqribən 2 dəfədən artıq azalma və temperatur asılılıqlarında xaotiklik müşahidə edilmişdir.

Həmçinin bu fəsildə şüalanmamış  $TlInS_2$  kristalının otaq temperaturunda Işıqın Kombinasiyalı Səpilməsi spektrləri tədqiq edilmişdir. Və məlum olmuşdur ki, otaq temperaturunda  $TlInS_2$  kristalında maksimum intensivlik  $291\text{sm}^{-1}$  qiymətinə uyğun gəlir. Ümumilikdə isə 6 İKS xətti müşahidə olunmuşdur. Müşahidə olunan maksimumlar ədəbiyyatla üst-üstə düşməsi cədvəl şəklində təsvir edilmişdir.

$\gamma$ -şüalarla şüalanmış  $TlInS_2$  kristalının elektrik keçiriciliyinin 0-60Mrad doza intervalında elektrik keçiriciliyinin zamandan asılılıq kinetikasi tədqiq edilmişdir. Elektrik keçiriciliyinin zamandan asılılıq kinetikasında elektrik keçiriciliyi əvvəlcə eksponensial olaraq azalır və müəyyən zamandan sonra dəyişməz qalır. Elektrik keçiriciliyinin qeyri-xətti azalması nisbətən yüksək temperaturlarda daha sürətlə baş verir. Zamandan asılı olaraq cərəyanın düşməsi (sabit elektrik sahəsində) tədricəndə elektrodların yaxınlığında həcmi yüklərin qarşılıqlı kompensasiyası hesabına olur. Və alınan nəticələrdən görsənir ki, şüalanma dozası artdıqca ümumi keçiricilikdə

elektron payı azalır və nəticədə ion payı artır. 470K temperaturda 20Mrad  $\gamma$ -kvantların təsirindən əvvəl və sonra ion payı hesablanmışdır. Şüalanmamış TlInS<sub>2</sub> kristalında ion payı 78%, 20Mrad  $\gamma$ -şüaların təsirindən sonra isə 82% təşkil edir.

Dissertasiyanın **dördüncü fəslində** 150KeV enerjiddə və  $10^{16}$  proton/sm<sup>2</sup> və  $10^{16}$  **alfa/sm<sup>2</sup>** dozada yüngül ionlarla (H<sup>+</sup>, He<sup>2+</sup> ionları) implantasiya olunmuş TlGaSe<sub>2</sub> və TlInS<sub>2</sub> birləşmələrinin tədqiqat nəticələri verilmişdir. TlGaSe<sub>2</sub> və TlInS<sub>2</sub> kristallarını implantasiya edərək elektrik, dielektrik və İKS spektrləri tədqiq olunmuşdur. H<sup>+</sup> ionları ilə implantasiyadan əvvəl və sonra TlInS<sub>2</sub> kristalının elektrik keçiriciliyinin temperatur asılılığının tədqiqi nəticələri verilmişdir. TlInS<sub>2</sub> kristalının  $\sigma(T)$  asılılığında 450K temperaturdan başlayaraq elektrik keçiriciliyinin qiyməti sıçrayışla artır. Bu da ədəbiyyatdan məlum olduğu kimi, ion keçiriciliklə əlaqəlidir. Elektrik keçiriciliyinin ədədi qiymətində ionlaşdırıcı şüaların təsirindən sonra 2 tərtib artım müşahidə olunmuşdur.

Bu fəsildə 150keV enerjili H<sup>+</sup> və He<sup>2+</sup> ionları ilə implantasiya olunmuş TlGaSe<sub>2</sub> və TlInS<sub>2</sub> kristallarının  $Z^*(f)$  kompleks impedans spektrinin həqiqi ( $Z'$ ) və xəyalı ( $Z''$ ) hissələrinin 25Hz-1MHs tezlik intervalında temperatur asılılıqları və həmçinin müxtəlif temperaturlarda tezlik asılılıqları verilmişdir. İmplantasiyanın təsiri nəticəsində kompleks impedansının həqiqi hissəsinin tezlikdən asılılıqları pilləkanvari şəkildə dəyişir, impedansın xəyalı hissəsinin tezlik asılılıqlarında isə temperaturun artması ilə kompleks impedansın xəyalı hissəsi yuxarı tezlik oblastına tərəf sürüşür. Kompleks impedansın həqiqi hissəsinin tezlik asılılığında elektrik sahəsinin tezliyinin və temperaturun artması ilə impedansın həqiqi hissəsinin ( $Z'$ ) ədədi qiymətinin azalması müşahidə edilir.

Həmçinin bu fəsildə TlInS<sub>2</sub> kristalının H<sup>+</sup> və He<sup>2+</sup> ionları ilə implantasiyadan əvvəl və sonra İşığın Kombinasiyalı Səpilmə spektrləri tədqiq olunaraq müqayisəli şəkildə verilmişdir. İKS spektrləri NTEGRA Spectra LS PNL spektrometrində, otaq temperaturunda, 50-4000 sm<sup>-1</sup> Raman intervalında və dalga uzunluğu  $\lambda=633\text{nm}$  olan He-Ne qırmızı lazerindən istifadə edilərək çəkilmişdir. İlk halla müqayisədə implantasiyadan sonra TlInS<sub>2</sub> kristalın İşığın Kombinasiyalı Səpilmə spektrində ftohəssaslığın maksimumunda və Raman xətlərinin intensivliklərində azalma, bəzi

xətlərin isə yox olması müşahidə edilmişdir. Bu isə ədəbiyyatdan da məlum olduğu kimi, bu dəyişikliklər kristalın implantasiya olduğu ionların kütlələrindən asılıdır. Yüngül ionların təsiri ilə radiasiya defektləri yaranır və kristalın strukturunda amorflaşma baş verir. SRIM modelləşdirmə programından istifadə edərək TlInS<sub>2</sub> laylı monokristalının sürətləndiricidə implant ionlarının seli qarşısında perpendikulyar yerləşdirilmiş səthə implant ionların qaçış yolları və paylanmaları hesablanaraq modelləşdirilmişdir. 150 keV enerjili H<sup>+</sup> və He<sup>2+</sup> ionlarının TlInS<sub>2</sub> kristalında yaratdıqları vakansiyaların sayı spektrdə qurulmuşdur. TlInS<sub>2</sub> kristalında hər bir ion üçün (Tl, In, S) hədəf atomlarda vakant yerlərin müxtəlif dərinliklərdə paylanması spektri SRIM-2013 proqramı vasitəsilə hesablanaraq verilmişdir.

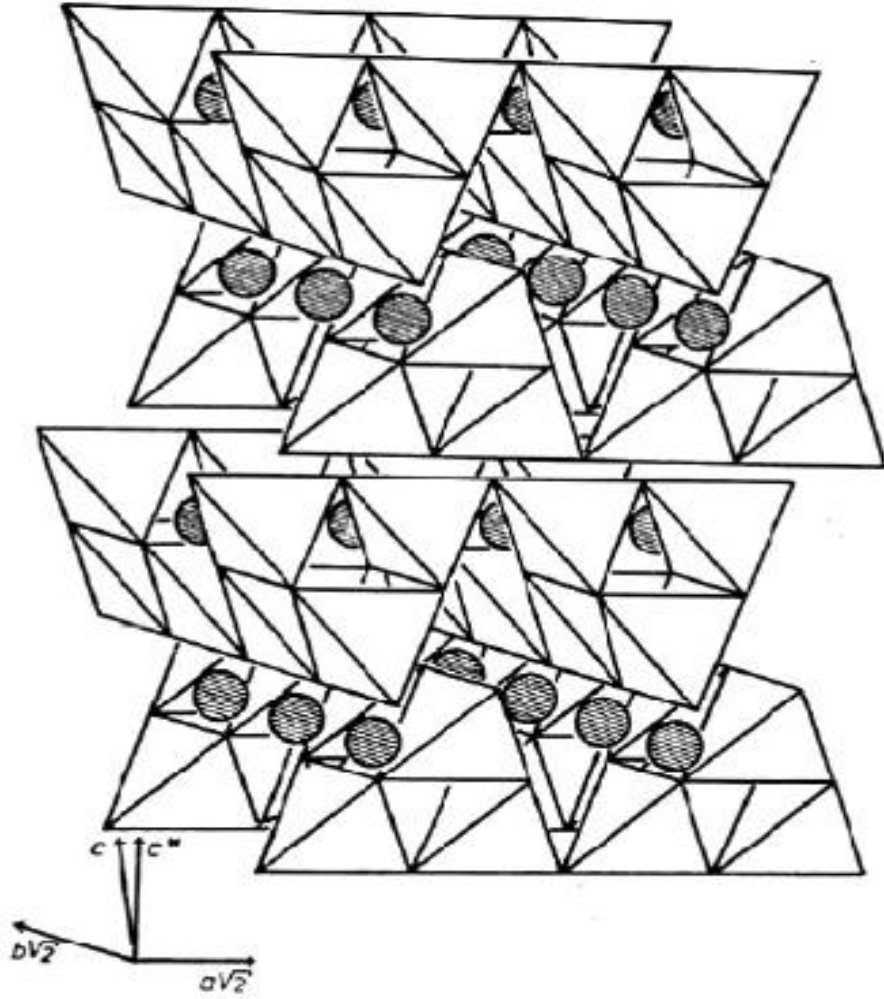
## I FƏSİL. ƏDƏBİYYAT İCMALI

### 1.1. $A^3B^3C_2^6$ tip yarımkəçiricilərdə struktur və faza keçidlərinin xüsusiyyətləri.

Müasir texnologiyalarda, davamlı artan elmi maraqlar və texniki ehtiyaclar yeni materialların yaradılmasını tələb edir. Yəni, qabaqcadan müəyyən edilmiş xassələrə malik yarımkəçirici materialların axtarışı bu günkü bərk cisimlər fizikasının əsas problemlərindən biridir. Belə materialların yaradılması yeni perspektivlərə yol açır və müxtəlif texniki problemləri həll etməyə imkan verir.

Son illərdə  $A^3B^3C_2^6$  tip yarımkəçiricilər geniş tədqiq olunur. Bu tip kristallar laylı və zəncirvari yarımkəçiricilər ailəsinə aiddir [103, c.391, s.285; 112, c.86, s.49; 161, c.62, s.3135]. Bu qrupa laylı quruluşa malik olan  $A^3B^3C_2^6$  (burada A-Tl; B-In, Ga; C-S, Se, Te) və onlar əsasında alınan bərk məhlullar aiddir [97, c.620, s.1073; 136, c.110, s.264; 193, c.1, s.362; 138, c.1, s.367]. Eyni zamanda nizamsız sistemlərin analoqları olan bu kristalların qəfəslərinin güclü bir anizotropik kristal quruluşu ilə birlikdə, bu günə qədər tam öyrənilməmişdir.

TlGaSe<sub>2</sub> və TlInS<sub>2</sub> yarımkəçirici birləşmələri  $A^3B^3C_2^6$  tip yarımkəçirici birləşmələri sinfinə məxsusdur və kristal qəfəsin periodları TlGaSe<sub>2</sub> üçün a=10,772 Å; b=10,771 Å, c=15,636 Å, β=100.6° və TlInS<sub>2</sub> üçün a=10,90 Å; b=10,94 Å, c=15,18 Å, β=100.21° olmaqla monoklin sinqoniyada kristallaşırlar [157, c.438, s.258; 108, c.398, s.207]. TlGaSe<sub>2</sub> və TlInS<sub>2</sub> kristalları C2/c-C<sub>2h</sub><sup>6</sup> fəza qrupuna daxildirlər. (Şəkil 1.1.1) -də  $A^3B^3C_2^6$  qrup birləşmələrinə daxil olan monoklin quruluşlu TlGaSe<sub>2</sub> laylı kristalının strukturu göstərilmişdir [165, c.20, s.293202]. Quruluşun əsasını Ga<sub>4</sub>Se<sub>10</sub> tetraedləri təşkil edir. Şəkildə Tl<sup>+</sup> ionları qara sferalarla göstərilmişdir [122, c.26, s.3211]. [ 182, c.7, s.1052; 152, s.3699; 86, c.22, s.1053] işlərində otaq temperaturunda TlGaSe<sub>2</sub> və TlInS<sub>2</sub> laylı birləşmələrinin rentgen quruluşu tədqiqatlarının nəticələri verilmişdir.



Şəkil 1.1.1 TlGaSe<sub>2</sub> laylı kristalının struktur quruluşu [122, c.26, s.3211].

TlGaSe<sub>2</sub> və TlInS<sub>2</sub> birləşmələri üçün qadağan olunmuş zona.

Birləşmələr	Termik qadağan olunmuş zona (eV)	Optik qadağan olunmuş zona (eV)	Ədəbiyyat
TlGaSe <sub>2</sub>	2.1-2.2	1.83-2.23	[134, c.10, s.2216; 91, c.15, s.1291]
TlInS <sub>2</sub>	2.45-2.56	2.28-2.55	[120, c.160, s.154; 91, c.15, s.1291]

TlGaSe<sub>2</sub> və TlInS<sub>2</sub> birləşmələri üçün qadağan olunmuş zonanın enerjiləri Cədvəl 1.1.1-də göstərilmişdir [119, c.27, s.25; 137, c.32, s.639; 120, c.160, s.154].

A<sup>3</sup>B<sup>3</sup>C<sup>6</sup> tip yarımkəçiricilər sinifinə daxil olan TlGaSe<sub>2</sub>, TlGaS<sub>2</sub> və TlInS<sub>2</sub> kristalların elektrofiziki xassələri geniş öyrənilmişdir [109, s.301; 90, c.102, s.109; 160, c.40, s.48].

Son illərdə seqnetoelektrlərdə xüsusi laylı kristallar olan TlGaSe<sub>2</sub>, TlInS<sub>2</sub>-də struktur faza keçidləri arasında temperatura görə, aralıq faza böyük marağa səbəb olmuşdur. Seqnetoelektrlərdə bu aralıq faza infraqırmızı faza adlanır [145, c.106, s.054308; 165, c.20, s.293202]. Bu fazada modulyasiyanın periodu qəfəsin periodunun tam misillərindən fərqlənir. Seqnetoelektrlərdə bu fazaya uyuşmayan ya da ölçülməyən faza deyilir [165, c.20, s.293202].

Seqnetoelektrlərin struktur xüsusiyyətlərinin öyrənilməsi bu sinif materiallardan piroqəbuledicilərdə, çeviricilərdə, seqnetoelektrik lazerlərdə geniş şəkildə istifadə etməyə imkan verir. Seqnetoelektrik faza keçidi özündə struktur faza keçidin əsas sinfini birləşdirir ki, nəticədə spontan polyarlaşma baş verir. Küri nöqtəsində keçid yüksək dielektrik nüfuzluğu ( $\epsilon$ ) ilə xarakterizə olunur [71, c.1, s.203; 72, c.1, s.96; 155, c.76, s.1057]. Kristalın müxtəlif oblastları, müxtəlif mümkün istiqamətlərdə depolyarizasiya sahəsinin minimuma endirilməsi hesabına polyarlaşır. Hər bir polyarlaşmış həcm domen adlanır. Domenlə nəticələnmiş struktur adətən tam kompensasiyalı polyarlaşmaya gətirir. Kristalda struktur keçid 2 tipə

bölünür. Əgər faza keçidi nəticəsində həyəcanlanmış faza atomların kəsilməz statistik hərəkəti ilə əvvəlki tarazlığa çıxma hesabına alınarsa, faza keçidi nəticəsində hərəkət edən qrup başlanğıc fazadakı simmetriya qrupunun alt qrupu olacaq. Belə faza keçidləri feqomenoloji çərçivədə Landaunun 2-ci növ faza keçidlərinə uyğundur. Seqnetoelektrik keçidində polyar faza keçidinə aralıq faza mövuddur. Temperaturun aşağı düşməsi ilə növbəti fazalar ardıcılığı müşahidə olunur [20, c.26, s.76]. Ölçüsüz fazada kristalın xarakterik xüsusiyyəti ondan ibarətdir ki, onda atomların ciddi nizamlı düzülüşü yoxdur.

Seqnetoelektrik birləşmələrin praktik perspektivi olduğundan bu birləşmələrin fiziki xassələri daim tədqiq edilir. Seqnetoelektriklər üçün simmetriya dəyişməsindən o vaxt danışmaq olar ki, keçid parametrləri spontan polyarlaşmış olsunlar. Bunun üçün Kūri prinsipindən istifadə olunur. Əgər kristal xarici qarşılıqlı təsirdədirsə, o ancaq simmetriya elementlərini saxlaya bilər. Yəni seqnetoelektrik faza simmetriya qrupu və simmetriyanın bütün elementlərini saxlamalıdır.

Tədqiqatların nəticələrinə əsasən [166, s. 135901; 190, c.25, s.827],  $TlGaSe_2$  və  $TlInS_2$  kristallarında ardıcıl faza keçidləri müşahidə olunur. Qızdırılma zamanı 320K və 340K temperaturlarda ardıcıl faza keçidləri müşahidə olunur. 320K temperaturda birinci növ keçid, 340K temperaturda isə ikinci növ keçid müşahidə olunmuşdur [173, c.131, s.163; 84, c.96, s.701].

Son zamanlar  $TlInS_2$  kristalı əsasında hazırlanmış bərk məhlulların temperaturdan asılı olaraq dielektrik nüfuzluğu, spontan polyarizasiyası və piroəmsalı tədqiq edilmişdir. Bizim laboratoriyada aparılmış elmi işlərə əsasən  $TlGaSe_2$  və  $TlInS_2$  kristallar ailəsinin xüsusi laylı quruluşa malik olması müəyyən edilmişdir. Bu kristallarının daxili quruluşunun təbəqələr arası defektliyi faza keçidlərinə bir qədər az təsir göstərir [55, c.43, s.1262].  $TlInS_2$  kristalının dielektrik nüfuzluğunun  $\epsilon(T)$  temperatur asılılığında anormallıq  $T_1=216K$  temperaturda  $\vec{q}_{ine} \approx 0(0,25)$  vektoru ilə xarakterizə olunan ölçüsüz faza keçidi ilə bağlıdır [73, c.34, s.1829].  $TlInS_2$  kristalı əsasında alınmış bərk məhlulların kristal qəfəslərin xarakterik xüsusiyyətləri ondan ibarətdir ki, onun daşıyıcı düyün nöqtələri müxtəlif növlü ionlarla doludur. [164, c.96, s.757; 184, c.35, s.177] bu isə öz növbəsində faza keçidlərinin zəifləməsinə

səbəb olan donmuş fluktasiya tərkibinin mövcudluğuna gətirib çıxarır. Bundan başqa bu fluktasiyalar (200K-dən aşağı) ölçüsüz modulyasiyaların mövcud olma oblastlarında temperatur histerezisin əmələ gəlmə səbəbidir. Odur ki, bu fluktasiyaları kənara çıxmalar kimi qəbul etmək olar. Belə ki, fluktasiya tərkibib kristallik termik tarazlığının çatmasına malik olur [164, c.96, s.757].

TlGaSe<sub>2</sub> və TlInS<sub>2</sub> üçqat yarımkeçirici kristallar seqnetoelektrik materiallara aiddir və buna görə də onların fiziki xüsusiyyətlərinin tədqiqi xüsusi maraq kəsb edir [16, s.38]. İlk işlərdə belə güman olunur du ki, TlInS<sub>2</sub> üçqat yarımkeçirici birləşməsi tetraqonal struktura malikdir, lakin [127, s.63; 128, c.68, s.711]-də işlərdə müəlliflər göstəriblər ki, TlInS<sub>2</sub> kristalı psevdotetroqonal struktura malikdir.

[11, s.101] –ci işdə TlInS<sub>2</sub> kristalının optik xüsusiyyətlərini tədqiq edərkən müəyyən etmişlər ki, İK və KRS spektrlərində fonon xətlərinin sayı üst-üstə düşür. Bununla belə, pyezoelektrik effekti müşahidə olunmur. Bu da β-TlInS<sub>2</sub> kristalda simmetriya mərkəzlərinin mövcudluğunu göstərir. [26, c.1, s.363]-ci işdə difraktometrik, elektronografik və rentgenoqrafik metodlarla TlInS<sub>2</sub> kristalının kristallik qəfəsinin parametrləri təyin olunmuşdur. Bu işə əsasən qəfəsin parametrlərinin orta qiymətləri verilmişdir: a=7,63 Å, b=7,66 Å, c=30,01 Å. [113, c.48, s.853] –ci işin nəticələrinə görə TlInS<sub>2</sub> birləşməsinin α və β modifikasiyaları, qadağan olan zonanın eni və xüsusi udma zolağının mexanizmi kəskin olaraq fərqlənir. [47, c.56, s.532] –ci işin müəllifləri ilk dəfə TlInS<sub>2</sub> kristalında xüsusi udulma zolağının kənar spektrogramını öyrəniblər. Müəlliflər 77K və 300K-də udulma zolağının kənarının 3,07 və 2,36 eV-a uyğun gəldiyini görsətmişlər. Bu spektrlərdə heç bir struktur müəyyən edilməmişdir. Lakin bu nəticələr ardıcıl işlərdə [34, c.39, s.245; 38, c.43, s.1247] öz təsdiqini tapmamışdır. TlInS<sub>2</sub> monokristallarda xüsusi udulma zolağının kənarı düz keçidlərlə əmələ gəir (eksiton-fonon birləşməsi), 77 və 300 K-də düz keçidin hədd enerjisi mütənasib olaraq bərabərdir (2,55 və 2,38 eV). Eksiton-fonon qarşılıqlı əlaqəsinin sabiti və bu qarşılıqda iştirak edən fononların enerjisi mütənasib olaraq 0,01 və 0,6 eV-a bərabərdir.

TlInS<sub>2</sub> monokristalın optik xüsusiyyətləri aşağı temperaturda (25 ± 5K)-də öyrənilmişdir. Ölçülər aparılarkən zolaqların eni müəyyən edilib E<sub>1</sub>=2,544 eV və

$E_2=2,573$  eV. Bu xətlər düz eksiton keçidlərinə  $n=1,2$  uyğun gəlirlər. Qadağan olunmuş zonanın eninin enerjisi və eksitonunun rabitə enerjisi uyğun olaraq  $E=2,575$  eV,  $E_{\text{eks}}=25$  meV bərabərdirlər.

TlInS<sub>2</sub> monokristalın optik xüsusiyyətlərini tədqiq edərkən  $\lambda$ -modulyasiya metodu vasitəsi ilə udulma zolağı yanında üç xüsusiyyət müəyyən etmişlər [72, c.1, s.56]. Bunlar aşağıdakılardır: 1) aşqar səviyyələri, 2) düzgün optik keçidlərin eksitonun əsas halına keçidi, 3)  $T=210\text{K}$  və  $2,81$  eV-da xüsusiyyətlərinin epik orbital qarşılıqlı təsiri nəticəsində valent zonanın parçalanması ilə əlaqələndirirlər.

TlGaSe<sub>2</sub> və TlInS<sub>2</sub> kristallarına xüsusi maraq faza keçidlərinin struktur dəyişikliklərinin öyrənilməsindədir. Bu məsələyə aid bir neçə işlərdə bu birləşmələrdə faza keçidlərin struktur tiplərinin gedişinin təsviri verilmişdir [72, c.1, s.56].

$123\text{K}$  və  $189\text{K}$  – də iki struktur faza keçidi müəyyən edilib. Tədqiq olunub ki,  $189\text{K}$  temperaturda TlInS<sub>2</sub> kristalın seqnetoelektrik faza keçidi baş verir və bu kristalda dielektrik xüsusiyyətlərin anomaliyası müşahidə olunur. Göründüyü kimi, bu kristalda  $216\text{K}$  temperaturunda struktur,  $204\text{K}$  temperaturda isə seqnetoelektrik faza keçidləri var. Cədvəl 1.1.2 - TlInS<sub>2</sub> kristalları üçün faza keçid temperaturları verilmişdir [165, c.20, s.293202].

Laylı TlGaSe<sub>2</sub> monokristalının yarımkəçiricilik xüsusiyyətləri, ilk dəfə monokristalın yetişdirilməsi dövründən intensiv bir tədqiqat mərkəzi olmuşdur. Bəzi tədqiqatçılar [69, c.48, s.1270; 56, c.56, s.331], laylı TlGaSe<sub>2</sub> monokristalının bir çox xüsusiyyətlərinin, qadağan olunmuş zonadakı dərin akseptor səviyyələrinin mövcud olması ilə əlaqələndirmişlər. [77, c.1, s.350; 78, c.1, s.284] işlərdə göstərilmişlər ki, qadağan olunmuş zonada dərin akseptor səviyyələrinin olması və yarımkəçiricinin yüksək fotohəssaslığı, electret halında qalıq polyarizasiyaya səbəb olur.

TlGaSe<sub>2</sub> kristalında X-şüa difraksiya ölçmələri göstərmişdir ki,  $117$  və  $110\text{K}$  temperatur aralığında faza qeyri-ölçülüdür və qarşılıqlı qəfəs birliklərində  $\delta \approx 0,02$  olan bir modulyasiya dalğası ( $\delta$ ,  $\delta$ ,  $1/4$ ) ilə xarakterizə olunur [20, c.26, s.76].

**TlInS<sub>2</sub> kristallarında müəlliflər tərəfindən müəyyən edilmiş faza keçidlərinin temperaturları [165, c.20, s.293202]**

<b>Faza keçid temperaturları (K)</b>	<b>Tədqiqat üsulları</b>
189 və 213	Dielektrik sabit/itkilər [190, c.25, s.3583]
170, 195–202, 216–220	Neytron Difraksiyası, istilik genişləndirilməsi [189, c.39, s.245]
204, 216	Dielektrik sabitləri, spontan polyarizasiya [178, c.203, s.2845]
200	İstilik genişləndirilməsi [83, c.53, s.601]
189, 195 və 213	Brillouin səpilmə [147, c.63, s.1189]
192–198, 200–202, 203.6–206.5, 206–209	Dielektrik sabit, spontan polyarizasiya, elektrik keçiriciliyi [153, c.334, s.13; 173, c.131, s.163]
170, 194 və 214	X-şüa diffraksiyası [182, c.7, s.1052; 152, s.3699]
~80	Dielektrik keçiriciliyi [19, c.34, s.3615]
201 və 204	Dielektrik keçiriciliyi [195, c.215, s.176]
202, 221	Elektrik keçiriciliyi [107, c.55, s.10101]
189, 220	Elektrik keçiriciliyi [110, c.32, s.561]
194, 214	Rentgen Difraksiyası [114, c.184, s.21]
195, 201	Dielektrik sabitləri [156, c.122, s.161]
79, 204, 216	ESR [154, c.258, s.419]
156, 166, 173, 192, 202, 207, 216, 222,	Xüsusi istilik (monokristal) [146, c.34, s.1574]
193, 202, 208, 220, 226, 232, 253.5, 263.5	Xüsusi istilik (toz nümunəsi) [146, c.34, s.1574]

Tədqiqatlar [55, c.43, s.1262]  $TiGaSe_2$ -də qeyri-mütərəqqi strukturun, dalğalanmanın monoklinik c oxuna paralel olan yerdəyişmə növlərinə aid ola biləcəyini göstərir. Bir çox tədqiqatçıların dielektrik ölçmələri,  $T= 65$  K-dən aşağı temperaturda faza keçidini müşahidə etməyə imkan vermişdir [73, c.34, s.1829; 117, c.56, s.215].

## 1.2. Yarımkeçiricilərdə ion faza keçidi

Yüksək ion keçirici kristallar haqqında ilk qeydləri XIX-cu əsrin əvvəllərində verilmişdir. M.Faradey metallarla müqayisədə, gümüş sulfidın anomal yüksək elektrik keçiriciliyə malik olduğunu qeyd etmişdir. Analoji effektlər oksid materiallarda V. Nernstom tərəfindən aşkar olunmuşdur. Bu zaman zirkonium oksid əsasında keramikadan istifadə olunmuşdur. Yalnız 20-ci əsrin əvvəllərində sübut olunmuşdur ki, bu cür maddələrin yüksək keçiriciliyi maye elektrolitlərdə müşahidə edilən elektronların hərəkəti ilə deyil, yüklü ionlarla bağlıdır. Bu cür birləşmələr bərk elektrolitlər və ya ion keçiricilər adlandırılmışdır.

Normal şəraitdə, adi bərk cisimlərdə ionların köməyi ilə yük daşınması həm kristallıq, həm də amorf maddələrdə əhəmiyyətli deyil və otaq temperaturunda xüsusi keçiricilik  $10^{-10}$ - $10^{-12}$   $Om^{-1}\cdot cm^{-1}$  tərtibində olur. İon keçiricilərin elektrik keçiriciliyi təxminən  $10^{-1}$  – dir.

$Om^{-1}\cdot sm^{-1}$  tərtibində olur. Bu göstərici, ərintilərin keçiriciliyinə və maye elektrolitlərinin keçiriciliyinə yaxındır. Hal hazırda, bərk elektrolitlər yüksək ion keçiriciliyi olan yüzlərlə yeni birləşmənin kəşf və sintez edilməsi səbəbi ilə ekzotik tədqiqat obyektləri olmaqdan çıxmışlar. Onlar tamamilə bərk yanacaq elementlərinin, qaz və maye sensorlarının, miniatür batareyalarının hazırlanması üçün əvəz olunmazdır. Bu cür maddələrin səmərəli şəkildə axtarışı üçün kondensə edilmiş mühitlərdə anomaliya ilə sürətli ionların ötürülməsi və xüsusi müasir eksperimental texnikanın inkişaf etdirilməsini öyrənmək üçün yeni nəzəri yanaşmalara ehtiyac vardı. İon keçiriciləri ilə əlaqədar yeni elmi istiqamətlərin yaradılması bərk cisim fizikası və kimyası, elektronika və elektrokimiya, kristalloqrafiya və qeyri-üzvi kimya, materialşünaslıq və energetika kimi sahələr arasında öz yerini alır.

İon keçiricilər ərimə nöqtəsindən daha aşağıda kritik temperatura çatdıqda keçiriciliyi kəskin bir şəkildə artan ion əlaqəli dielektriklərdir. Bu effekt daxili ərimə ilə əlaqələndirilir. Yəni ion keçiriciləri kristal və mayelərin xassələrini birləşdirir.

Bu anlayışlara əsaslanaraq, temperaturun ion keçiricilərin elektrik keçiriciləri üzərindəki təsirini izah etmək asanlaşır. Daxili ərimə temperaturuna qədər temperaturun artması hər hansı bir dielektrik xarakteristikası olan eksponensial qanuna görə elektrik keçiriciliyinin də artmasına səbəb olur. Bunun səbəbi temperatur artdıqca, ionun potensial çuxurdan çıxması üçün lazım olan enerji ehtimalının artmasıdır. Nəticə olaraq istiliyin artması ilə sərbəst ionların konsentrasiyası artır. Daxili ərimə temperaturuna çatdıqda, daha sıx potensiala sahib ionlar, qəfəs düyünlərindən çıxaraq elektrik keçiriciliyində iştirak edir və elektrik keçiriciliyinin kəskin artmasına səbəb olur.

İon keçiricilərin mövcudluğu əsasən materialın struktur xüsusiyyətlərindən asılıdır:

- İonların hərəkət etməsi üçün elementar qəfəsdə potensial hərəkətli ionların yaxın enerjili kristalloqrafik mövqeydə yerləşməsi;

- İonların kristal qəfəsin mövqeylərindəki nizamsızlıq enerjisi və hərəkətə sərf olunan enerji kiçik olmalıdır ( $\sim kT$ ,  $k$ -Boltsman sabiti,  $T$  isə temperaturdur). Bitişik mövqələr arasındakı enerji maneələri kiçik olmalıdır ki ( $kT$  ilə müqayisədə), kristal qəfəsdə vakant yer olduqda, icazə verilən mövqələrdə hərəkətli ionların statistik yayılmasına gətirib çıxarsın;

- Kristallik quruluşda ionların hərəkəti üçün birbaşa “şəbəkə kanalları” olmalıdır, əks təqdirdə yüklü hissəciklərin sürətli hərəkəti ancaq, bir və ya bir neçə vahid elementar qəfəs arası mümkündür.

İon keçiricilərin əsas fərqləndirici xarakteristikası, onların termodinamik və struktur xüsusiyyətləri ilə bağlı olub anomal yüksək ion keçiriciliyinə malik olmasıdır. Bərk cisimlərdə ion keçiriciliyi nöqtəvi defektlərin (məsələn düyünlər arası ionlar) miqrasiyası hesabına yarandığından, keçiriciliyi təyin edən əsas faktorlardan biri bu defektlərin konsentrasiyasıdır. İon keçiricilərin termodinamik və kinetik xassələrini şərh etmək üçün müasir təsəvvürlərdə çoxlu sayda ideyalardan istifadə

olunur [125, c.73, s.257; 66, c.45, s.1085; 17, c.28, s.1566; 177, c.52, s.1229]. Bərk cisimlərdə ion keçiriciliyi nöqtəvi defektlərin (məsələn düyünlər arası ionlar) miqrasiyası hesabına yarandığından, keçiriciliyi təyin edən əsas faktorlardan biri bu defektlərin konsentrasiyasıdır.

[180, s.97]-ci işdə müəlliflər TlS, TlSe və TlInS<sub>2</sub> kristallarının keçiriciliyinin temperatur və elektrik sahələrindən asılılığını tədqiq etmişlər. Göstərmişlər ki, müəyyən temperaturda (bütün kristallar üçün tipik olan) bütün kristallar üçün çevirmə effekti müşahidə olunur. Çevirmə effekti superion vəziyyətdə faza keçidi ilə izah olunur. TlS və TlSe kristallarında ion keçiriciliyi Tl<sup>+</sup> ionlarının (Tl<sup>3+</sup>Se<sup>2-</sup>) zəncirləri arasında Tl subqəfəs vakansiyalarının diffuziyası ilə əlaqədardır. TlInS<sub>2</sub> kristalında da bu effekt Tl<sup>+</sup> ionlarının Tl subqəfəsinin vakansiyalarına diffuziyası ilə əlaqədardır. TlGaSe<sub>2</sub> və TlInS<sub>2</sub> kristallarda çevirmə effekti müşahidə edilmiş və güman edilir ki, çevirmə effekti kristalların ion halına keçməsi ilə əlaqələndirilmişdir. Bu kristallarda təxminən 380K temperaturda faza keçidlərini baş verməsini göstərilmişdir.

Hal-hazırda texnologiyada, əsasən də yarımkeçiricilər texnologiyasında müxtəlif qurğularda yüksək ion keçiriciliyinə malik olan materiallar funksional elektrodlar kimi istifadə olunur. Bu yarımkeçirici materiallardan müxtəlif növ sensorların tərkibində və Günəş elementlərində kiçik ölçülü enerji tutumlu cərəyan mənbələri kimi də istifadə olunur. Bu materialların tətbiq sahələrinin perspektivlərindən biri də istilik enerjisini elektrik enerjisinə çevirən qurğularda istifadə etməyin mümkünlüyüdür. Texnologiyanın inkişafı əsasən də müasir mikroelektronikanın inkişafı eyni zamanda həm elektron keçiriciliyinə, həm də ion keçiriciliyinə malik olan yeni növ yarımkeçirici materialların alınmasına ehtiyacı artırır. Çoxlu sayda mürəkkəb quruluşa malik halkogenid birləşmələr əsasən aşağı temperaturlu ion keçiriciliyinə malik olmalarına baxmayaraq, bu fiziki xassələr son illərdə tədqiqatçılar tərəfindən az tədqiq olunmuşdur. Hazırkı dövrdə materialşünaslıq üçün vacib olan materialların həm elektron keçiriciliyinin, həm də ion keçiriciliyinin eyni vaxtda geniş temperatur intervalında öyrənilməsi aktualdır. Bu baxımdan superion birləşmələr daha perspektivlidir. İon birləşmələr qeyri-nizamlı materiallar sinfinə

aiddirlər. Ədəbiyyatdan həmçinin məlumdur ki, şüalanma nəticəsində yaranan radiasiya defekləri materialların nizamsızlığını artırır [61, c.53, s.1488]. Ona görə də ionlaşdırıcı şüaların maddələrin superion xassələrinə təsirinin öyrənilməsi radiasiya materialşünaslığı üçün xüsusi əhəmiyyətə malikdir.

Kristalda ion halının yaranması üçün aşağıdakı kristallokimyəvi şərtlərlərin olması vacibdir: a) anion-kation arasındakı məsafə onların ion radiusları cəmindən böyük olmalıdır ki, onların qarşılıqlı yerdəyişməsi üçün imkanlar yaransın; b) quruluşda yüksək polyarizasiyalı kationlar ( $Pb^{2+}$ ,  $Bi^{3+}$ ,  $Tl^{+}$  və başqaları) və ya yüksək polyarizasiyalı struktur elementləri olmalıdır. Yuxarıda deyilən tələbləri strukturunda bir və ya bir neçə atom növləri üçün yaxına təsir olmayan və qalan atomlar üçün uzağa təsir saxlanılan xüsusi kristallar üçün ödənilir. Belə birləşmələrə özünə məxsus nizamsız strukturlu kristallar kimi baxılır. Bərk elektrolitlərin ion keçiriciliyini müxtəlif bir, iki, üçvalentli kationlar ( $Ag^{+}$ ,  $Cu^{+}$ ,  $Li^{+}$ ,  $Na^{+}$ ,  $K^{+}$ ,  $Rb^{+}$ ,  $Tl^{+}$ ,  $Cs^{+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $P^{2+}$ ,  $Al^{3+}$ ,  $Sc^{3+}$ ,  $Ce^{3+}$ ,  $E^{3+}$ ) və anionlar ( $F^{-}$ ,  $Cl^{-}$ ,  $Br^{-}$ ,  $O^{2-}$ ,  $S^{2-}$ ) təmin edir. Materiallar var ki, onlarda yükdaşıyıcılar iki və ya üç növ ionlar və ion-elektron qarışıqlı keçiriciliyi vardır [135, s.540]. Superionların əsas fərqli cəhətlərindən biri, onlarda anomal yüksək ion keçiriciliyinin olmasıdır. Superionlarda ion keçiriciliyinin qiyməti ərintilər və elektrolitlər üçün xarakterik olan tərtibdə olur. Ona görə superionları bəzən bərk elektrolitlər adlandırırlar. İon keçirici kristallar adlandırdığımız nizamsız strukturlu kristallar keyfiyyətcə fərqlənən iki müxtəlif fazada ola bilər. Kritik temperaturdan aşağı adi ion kristallara bənzər hala (dielektrik faza), kritik temperaturdan yuxarıda isə xüsusi hala-ion halına (elektrolit halına) keçir. Yuxarıda deyilən halda olan bu kristallar ion keçiricilər adlanır.

[64, c.44, s. 610; 68, s.64; 75, c.32, s.701; 178, c.203, s.2845; 179, c.50, s. P05FC091; 67, s.178] işlərdə müəlliflər superion keçirici materialların alınması və onların fiziki xassələrinin öyrənilməsi ilə məşğul olmuşlar. Bu müəlliflər tərəfindən aparılmış tədqiqatlar göstərir ki,  $TlGaSe_2$ ,  $TlInS_2$ ,  $TlGaTe_2$  və  $TlInTe_2$  bu kristallar superion keçirici materiallara aiddirlər.  $TlGaSe_2$  və  $TlGaTe_2$  kristallarının 90-300K temperaturda dielektrik və elektrik keçiriciliyi tədqiq olunmuşdur. Bu kristallar ilkin

və  $\gamma$ -kvantlarla 250Mrad dozaya qədər şüalandırdıqdan sonra  $\sigma_{\perp}(T)$  və  $\sigma_{\parallel}(T)$  ölçmələri aparılmışdır.

Yüksək keçiriciliyə malik ion keçirici birləşmələrin kristallik qəfəsində çoxlu sayda fərqli növ atomlar üçün uzaq nizamlılıq pozulmuş olur və bu səbəbdən də bu tip ion keçirici birləşmələrin kristal qəfəsi defektli sayılır. Bununla yanaşı, kristal qəfəsdə olan nisbətən daha energetik kimyəvi əlaqəyə malik digər atomlar üçün bu nizamlılıq gözlənilir, bu alt qəfəs isə sərt alt qəfəs adlanır. Birləşmələrdə yeçiriciliyin ion halına gətirib çıxaran defektlərin xassələrindən asılı olaraq üç tip ion keçirici birləşmələr mövcuddur: 1-ci tip birləşmələrin alt qəfəsinin birində nizamlılığın pozulmasının mövcud olması və kimyəvi tərkibinin isə dəyişməz qalan birləşmələr hesab edilir. Bu cür materiallara misal olaraq AgI birləşməsi göstərilə bilər. Belə ki bu birləşmələrin kristal qəfəsində nizamlılığın pozulması Ag atomunun alt qəfəsində baş verir. AgI birləşməsinin 147<sup>0</sup> C temperatura qədər qızdırılması zamanı ion keçiriciliyinin ilk dəfə olaraq kəskin şəkildə artdığı müşahidə edilir. 2-ci tip ion keçirici birləşmələr o birləşmələrdir ki, qəfəsə böyük qatılıqda aşqarların daxil edilməsi ilə hər hansı bir alt qəfəsin pozulması mümkün olur. Bu tip birləşmələrə tərkibində müxtəlif valentlik dərəcəsinə malik olan metalların oksidlərinin qarışıqları aid edilə bilər. Belə birləşmələrə nümunə kimi FeO+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dəmir oksidlərinin məhlullarını göstərmək olar. 3-cü tip yüksək keçiricili ion keçirici birləşmələr tərkibində kristal qəfəsə xüsusi olaraq daxil edilmiş və böyük yüyürüklüyə malik aşqar ionları olan materiallardır. Son illərdə ion halının yaranması mexanizm tam olaraq öyrənilməməyinə baxmayaraq yüksək keçiricili ion keçirici birləşmələr artıq texnologiyada xüsusi ilə də yarımkeçiricilər texnologiyasında öz tətbiqini tapmışdır. Bu tip birləşmələrdən yarımkeçiricilər texnologiyasında əsasən bərk elektrolitlər kimi istifadə edilir. Mövcud olan yüksək keçiricili ion keçiricilər arasında Li<sup>+</sup> və Na<sup>+</sup> müsbət yüklü ionları əsasında yaradılmış ion keçiriciləri daha əlverişlidir və eyni zamanda enerji cəhətdən daha əlverişli sayılırlar. Yüksək keçiriciliyə malik ion keçirici birləşmələrin texnologiyasının mühüm cəhətlərindən biri də bu birləşmələrin keramika, polikristal, monokristal və nazik təbəqələr formasında hazırlanmasının mümkün olmasıdır. Hal-hazırda bu sahədə ion keçirici materiallar əsasında böyük

tutuma malik kondensatorların yaradılması üzrə geniş ölçüdə işlər aparılır. Texnologiyada aparılan bu işlər tamamldığı zaman həm kiçik ölçülü, həm də böyük ölçülü tutuma malik elektrik kondensatorların yaradılması və inkişaf etdirilməsi mümkün olacaqdır.

### **1.3. $A^3B^3C_2^6$ tip yarımqeçiricilərin implantasiya üsulu ilə aşqarlanması**

İon, elektron və foton dəstələrinin istifadə edildiyi üç əsas şüalanma texnologiyası müxtəlif sahələrdə xüsusi ilə yarımqeçiricilər sənayesində səth və səth təbəqəsinin yaxşılaşdırılmasında vacib rol oynayır.

İonlar, atom molekullarından törəyən yüklü hissəciklərdir. Yüklü hissəciklərin əsas üstünlüyü elektrik və ya maqnit sahəsində təxmin edilə bilən bir yol izləmələridir. Elektrik və maqnit sahəsi ilə idarə edilən ionlar və ya elektronlar, ion və ya elektron şüası yaradırlar. Səth modifikasiyasında ionlar, atom və ya molekullardan bir və daha çox elektronun çıxarılması ilə yaranan müsbət yüklü hissəciklərdir.

Vakum altında ionların təsirinə məruz qalan səthlərdə ion örtük və ion implantasiyası kimi metodlarla böyük dəyişikliklər meydana gələ bilər. İon implandasiyası, 0,01 ilə 1 mm arasında dəyişən dərinliklərdə xarici atomların yeni bir səth təbəqəsi yaradan bir nizamsız prosesdir. İon implantasiyası ilk dəfə olaraq 1906-cı ildə Rezerford tərəfindən cüt yüklü pozitiv helium ionlarının alüminium folqaya bombardıman edilməsi ilə meydana gətirilmişdir. Ancaq yarımqeçiricilər sahəsində ilk ion implantasiyası 1970-ci ildə həyata keçirilmişdir. Bu tarixdən sonra yarımqeçiricilər sahəsində ion implantasiyasının tətbiqi, tranzistorların, metal oksid yarımqeçiricilərin, diodların emalından bu günün mikroprosessor cihazlarının istehsalına qədər yayılmış bir şəkildə tətbiq edilməkdədir.

Yarımqeçirici materialların strukturunun və tətbiqi sahələrinin inkişafında bir çox üsullardan istifadə olunur. Texnologiyada istifadə olunan bu üsullardan geniş istifadə olunaraq nanohissəcikli materiallar ortaya çıxarılmışdır. Bu üsullardan biri olan ionlarla bombalanma, hədəfə yüksək sürətli ionların gətirilməsinə əsaslanır.

Hədəfdə meydana gələn səth və səthə yaxın sahələrdə idarəli bir şəkildə dəyişdirilməsini təmin edən və müasir texnologiyada geniş yayılmış bir metoddur. Bu metod ilə maddənin fiziki və kimyəvi tərkibini otaq temperaturunda nəzarətli bir şəkildə dəyişdirmək olar [96, c.1, s.716; 130, c.1, s.254]. İonlarla implantasiya zamanı maddədə müəyyən defektlər yaranır. Bu bir çox yarımkeçirici materialların yaranmasına imkan verir. Bu sayədə yaranan yarımkeçirici materialların texnologiyada tətbiq sahələri genişlənə bilər. Bu səbəblə istifadə olunan bu metod müasir texnologiyada, əsasən də yarımkeçiricilər sahəsində materialın xüsusiyyətlərinin yaxşılaşdırılması və təkmilləşdirilməsi üçün əsas yollardan biridir. İonlarla bombalama metodu hər bir inteqrasiya edilmiş istehsal sistemində istifadə olunur. Beləliklə, demək olar ki müxtəlif növ yarımkeçirici materialların yaranması yarımkeçiricilərə metal ionlarla implantasiya olunması və onların struktur xüsusiyyətlərinin öyrənilməsi böyük önəm qazanmışdır [163, c.83, s.5488; 169, c.47, s.1523; 171, c.340, s.240].

İon implantasiyası, materialların element tərkibinin və səth layının dəyişməsi, ion şüası ilə emal olunmuş struktur faza halının xüsusiyyətlərinin artırılmasının ən effektiv metodudur. İon implantasiyasının ən perspektiv istiqamətlərindən biri olaraq, yüksək istiliyə malik anomal xüsusiyyətləri ilə səth təbəqələrində xarakterizə edilmiş intermetallid sistemlərinin formalaşmasıdır. Müəyyən olunmuş plastikləşmədən əlavə, adi materiallardan əhəmiyyətli dərəcədə antikorroziya və antifriksion xüsusiyyətlərinə malik olan metallar arasındakı birləşmələr davamlılığını və strukturunu yüksək temperaturlarda saxlayır [52, c.307, s.30; 42, c.1, s.358; 5, s.1].

İon implantasiyası metalların və yarımkeçiricilərin soyuq deformasiyasına bənzər şəkildə dislokasiya intensivliyinin artmasına və dislokasiya düyünlərinin yaranmasına səbəb olur. Bundan başqa, aşağı temperaturlarda implantasiya olunan materialda nöqtəvi defektlərin intensivliyi də artır. Hər iki təsirdə sürtünmə və aşınma performansları artmış yaxın səth bölgəsi meydana gələcəkdir.

Əsas maddə atomlarından daha böyük ölçüdə olan xarici atomların məcbur şəkildə əsas maddə atomlarının yerinə keçməsi qatı həllin (bərk məhlul) meydana gəlməsinə səbəb olur. Axma müqaviməti, implantasiya olunan atomların

konsentrasiyası və atom ölçüsü fərqləri ilə artır. İon implantasiya ilə yaxın səth bölgəsində müqavimət artımını yaradan digər bir mexanizm bərk həllərin yaranmasıdır. Əsas maddə atomlarından daha kiçik ölçülü atomlar ara boşluqlarda yerləşir. Ara boşluqlar hərəkətlidir və dislokasiyalara diffuziya olaraq dislokasiya hərəkəti üçün lazımı enerji səthini yüksəldir. C, N, O, B, H bilinən ara boşluq elementləridir.

İkinci fazanın yaranması, ion implantasiyası ilə yaxın-səth bölgəsində müqavimət yaradan digər bir mexanizmdir. Bu halda, hissəciklərin yaranması dislokasiya hərəkətləri üçün sərhəd təşkil edir və səth sərtləşir.

İon implantasiyası yüksək vakuum içərisindəki ( $10^{-3}$ - $10^{-4}$  Pa və ya  $10^{-5}$ - $10^{-6}$  Torr) energetik ionların şüa yolu ilə maddə içərisinə doğru yeridilməsi və beləcə maddənin səthinə yaxın fiziki və kimyəvi xassələrinin modifikasiya edilməsi prosesidir [151, c.1, s.296; 5, s.1].

İon implantasiya prosesi, radiasiya defektlərinin yaranması ilə müşayiət olunur. Bu da radiasiya məruz qalmış maddənin kristal qəfəsinin nizamsızlığına gətirib çıxarır. Bu ehtimalın kiçik olmasına baxmayaraq, implantasiya olunmuş ionlar bir başa boş yerə girə bilər və donör və ya akseptor ola bilər. Yarımkəçiricinin kristallik quruluşunun bərpası və düyünlərə implant olunmuş ionları keçirtmək üçün yanma prosesi tətbiq olunur. İonlarla aşqarlanmanın əsas üstünlükləri aşağıdakılardır:

- Defektlərin konsentrasiya paylanması həm dərinlikdə, həm də şüalanma sahəsində konsentrasiyasını dəqiq bir şəkildə təyin etmək;
- Aşağı temperaturlarda prosesin gedişatı;
- Aşqar ionlarının izotop təmizliyi;
- Prosesin ətraf mühitin təsiri olmadan vakuumba aparılmasının mümkünlüyü.

Termal diffuziya proseslərində, səthdən içəriyə doğru daxil edilən elementlərin konsentrasiyası və paylanma profili prosesin istiliyinə bağlıdır. İmplantasiya olan ionlar hədəf maddənin elektron və nüvələrini itələyərək, müəyyən dərinlikdə enerji itirirərək tormuzlanır. Müəyyən bir enerji ilə hədəfə göndərilən ionların hədəf daxilində enerji itkisi, hədəf atom və elektronları ilə örtülmüş Coulomb qarşılıqlı əlaqəsi ilə olur. Bu enerji itkisi iki yolla ifadə edilir.

1) Nüvə toqquşmaları: Bu yolla gələn ion hədəf atomuna tam enerji verir. Bu toqquşmaların sonunda ion yolunda vacib yerdəyişmələr olur, hədəf atomu yerini dəyişdirə bilir və nüvə toqquşmalar meydana gətirir. Düşən ionların enerjisi  $\sim 2$  MeV dən kiçik olarsa, ionun enerji itkisi bu yolla baş verir. Bu enerji aralığında, ion enerjisinin böyük bir hissəsi Rezerford səpilməsi ilə itirilir. Bu toqquşmadan sonra hədəfdə nöqtəvi qüsurlar və struktur dəyişiklikləri meydana gəlir. Düşən ionun  $E=10-100$  keV isə Rezerford təsir kəsiyi ən böyük olur və nüvə tormozlanması təsiri də üstünlük təşkil edir.

2) Elektron toqquşmalar: Elektron toqquşmalar, düşən ionların hədəf atomunun elektronlarına təsir etməsi və qoparması hadisəsidir [197, c.1. s. 4; 6, s.187]. İonların növünü, enerjisini və implantasiya olunan maddənin xüsusiyyətlərini bilməklə, daxil olma dərinliyini hesablamaq mümkündür. 10 keV ilə 500 keV arası tipik enerjili şüalar üçün qaçış məsafəsi 1 mkm-ə çatır. İonların hədəf maddənin kristal qəfəsinə daxil olması, struktur defektlərinin ortaya çıxmasına səbəb olur.

Toqquşmaların ilk tipində böyük enerji itkiləri meydana gəlir. Bu qəfəs atomlarının yer dəyişdirməsinin (qəfəs nizamsızlığının) əsas səbəbidir. 2-ci tip toqquşmada daha az enerji itkisi, nəzərə alınmayacaq dərəcədə orbit sürüşməsi meydana gelir. Her iki enerji itkisi hissəciklərin atom nömrəsindən ( $Z_1$ ) və enerjisindən ( $E$ ) asılı olaraq dəyişir [5, s.1]. Alt təbəqədə tormozlanma prosesi zamanı implantasiya olan ionlar bəzi qəfəs atomları ilə şiddətli toqquşmalar edərək onları yerindən çıxardır. Qəfəs nizamsızlığı implantasiya prosesində mühüm yer tutur. Ancaq ion dərinlik paylanması və qəfəs nizamsızlığı eyni enerji itkisi mexanizmindən qaynaqlanır [151, c.1, s. 296; 192, c.2, s.2832].

Ion implantasiyasında bir ionun maddə daxilində qət etdiyi məsafə önəmlidir. Yəni ionun səthdən maddə daxilində tormozlandığı nöqtəyə qədər getdiyi yol  $R$  məsafə adlandırılır (Şəkil 1.3.1). Lindxard, Saff və Şiot tərəfindən ortaya qoyulan LŞŞ nəzəriyyəsinə görə yekun və orta paylanma aralığı arasındakı əlaqə ilə yekun aralıq bu şəkildə ifadə edilir [5, s.1; 102, s.2851; 50, s.27].

$$R = \left(1 + \frac{M_2}{3M_1}\right) R_p \quad (1.3.1)$$

$$R = 0.6 \cdot 10^{-6} \left( Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3} \right) \frac{(M_1 + M_2) M_2 E}{Z_1 Z_2 M_1 \rho} \quad (1.3.2)$$

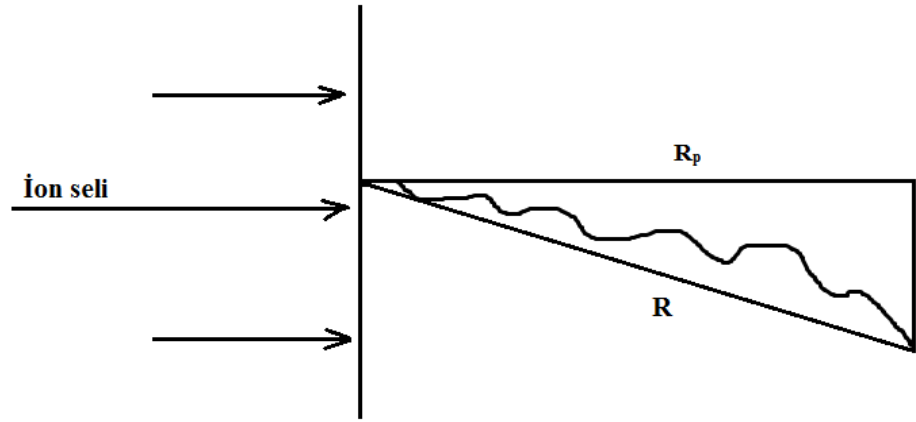
$M_1$ -ionun kütləsi,  $M_2$ -hədəf atomunun kütləsidir.  $Z_1$ - düşən ionların sayı,  $Z_2$  isə hədəf atomlarının sayıdır.  $E$ -elektronun enerjisi,  $\rho$ -hədəfin alt təbəqə sıxlığıdır.

İmplantasiya ionların yavaşılama və durma prosesi zamanı ionlarla qəfəs atomları arasında saysız toqquşmalar baş verir. Bu toqquşmalarda (əsasən nüvə toqquşmalarında) ionun enerjisi və kütləsi ilə hədəf atomlarının kütləsinə bağlı olaraq, iondan atoma onu yerindən çıxaracaq qədər enerji köçürülməsi mümkündür. Ağac şəklində böyüyən bu nizamsız bölgələr artan doza ilə üst-üstə düşməyə başlayır və müəyyən bir dərinliyə qədər amorf təbəqələr meydana gətirir (Şəkil 1.3.2.).

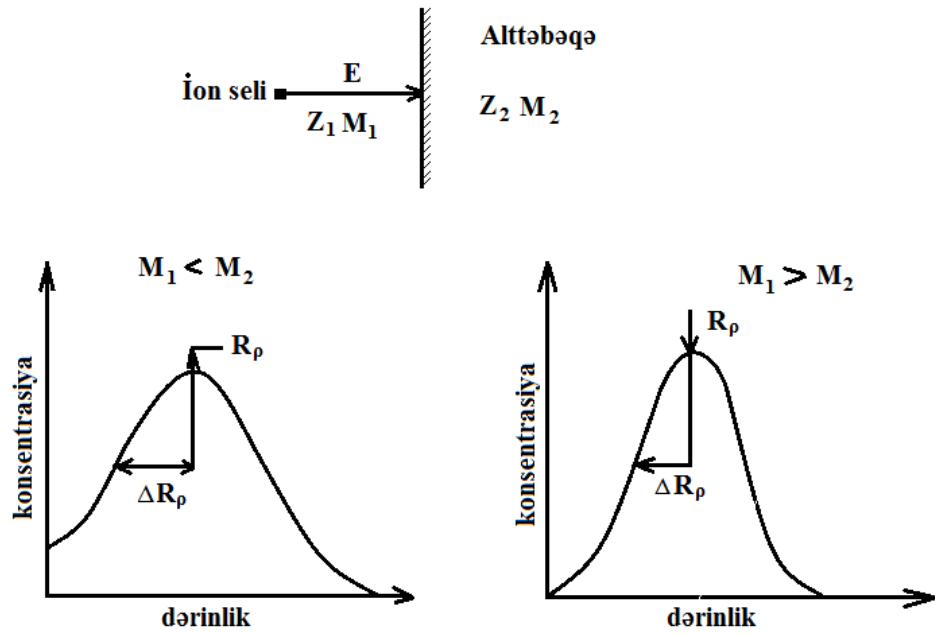
Amorf təbəqələr uzun məsafəli kristalloqrafik nizamın olmadığı bölgələrdir. Ümumi nizamsızlıq miqdarı və dərinlikdəki paylanma ionun növündən, səthinin vəziyyətindən, hədəfin istiliyindən, enerji və ümumi dozadan asılıdır [5, s.1; 51, s.30; 144, c.63, s.609]. Hər hansı bir ağır ion yüngül ionlardan fərqli olaraq ionun hərəkəti istiqamətində həcm içərisində yüzlərlə kristal qəfəs atomunun yerdəyişməsinə səbəb olaraq hədəfdə daha çox xəsərət yaradır (Şəkil 1.3.3)[172, c.2, s.350].

İon bombardmanı zamanı qəfəsin kristal quruluşunun (maddənin amorf halına keçməsinə qədər) ümumi pozğunluğuna radiasiya defektləri deyilir. Araşdırmalar göstərir ki, radiasiya zərərləri səth təbəqəsinin metalın mexaniki, elektrik və digər xüsusiyyətlərini müsbət dəyişə bilər. Bununla belə, proses nəticəsində komponentlərinin performansı azala bilər.

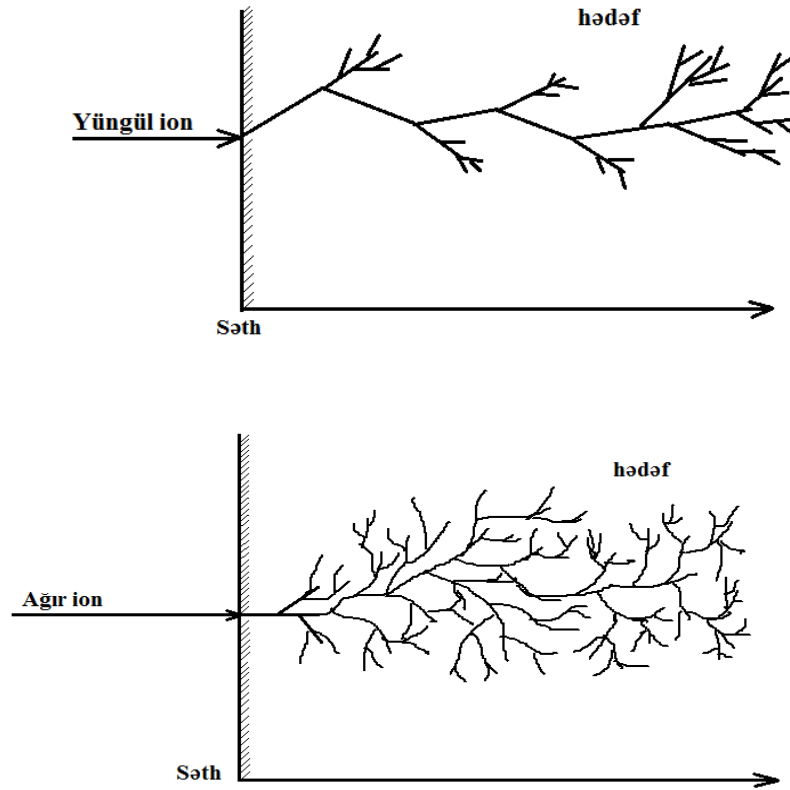
[2, s.14] -ci işdə GaS monokristalını  $1 \cdot 10^{15}$  proton/sm<sup>2</sup> və  $5 \cdot 10^{15}$  proton/sm<sup>2</sup> dozalarda 70 keV enerjili protonlarla implantasiya edərək implantasiya zamanı protonların qaçış yolunu, yaranan vakansiyaların sayını və kritik dozanın enerjiden asılılığını öyrənilmişdir. Məlum olmuşdur ki, GaS monokristalları üçün amorflaşma prosesi şüalanma dozasının  $3 \cdot 5 \cdot 10^{15}$  proton/sm<sup>2</sup> qiymətlərində baş verir və protonların GaS monokristalında qaçış yolu 537 nm-ə uyğun gəlir.



Şəkil 1.3.1 Hədəfə daxil olan ionun getdiyi yol [121, c.34, s.427].



Şəkil 1.3.2 Bərk cisim olan hədəfə implantasiya olan atomların ion kütləsinə görə dərinlik paylanması [151, c.1, s.296].



**Şəkil 1.3.3 Yüngül və ağır ionların bərk cisim daxilində hərəkətinin təsviri.**

[80, c.49, s.1585] -cü tədqiqatçılar 77 və 373 K temperaturlarında  $He^+$  ionları ilə implantasiya edərək, almanın qrafitləşməsini və radiasiya defektlərini optik spektroskopiyaya və həcmi “şişkinlik” metodları ilə tədqiq etmişlər. İmplantasiya zamanı temperatur artıqca, radiasiya defektlərinin azaldığını göstərmişlər. Göstərilmişdir ki, qrafitli bir təbəqənin formalaşmasının səbəbi, implantasiya dozası ilə deyil, radiasiya defektləri ilə əlaqəlidir. İmplantasiya zamanı temperatur nə qədər zəif olarsa, bir o qədər aşağı qurutma temperaturunda qrafitləşmiş təbəqə formalaşır. Radiasiya defektlərinin qurudulması və almazda qrafit qatının formalaşması prosesi 1600° C temperaturuna qədər davam edir.

Radiasiya qüsurlarının xarakteri həmçinin yüksək implantasiya temperaturlarındakı (373K) nöqtəvi defektlərin və kiçik nizamsız bölgələrin üstünlüklərindən bombardıman zamanı qrafitləşdirilmiş bir təbəqənin formalaşması, qrafitli faza embirionlarının aşağı implantasiya temperaturundakı(77K) görünüşünə

qədər dəyişir. Bu nəticə almazın ion-şüa dəyişdirilməsi texnologiyası üçün böyük maraq doğurur.

İmplantasiya edilən ionların dərinlik profilini Rezerford Əks Səpilmə (RƏS) və Scan Electron Mikroskopu (SEM) kimi metodlarla tədqiq etmək mümkündür. İonlarla implantasiya edilmiş maddənin səthini tədqiq etmək üçün Rezerford Əks Səpilmə (RBS), Nüvə Reaksiyaları Analizi (NRA), İkinci dərəcəli İon Kütlə Spektrometriyası (SIMS) və Proton İnduksiyalı X-şüa Emissiyası (PIXE) kimi metodlardan istifadə edilir [101, c.1, s.380].

Monte-Karlo metodu vasitəsi ilə ionların maddə daxilində qaçış yolunun paylanmasını almaq olar [198, s.375]. SRIM (The stopping and range of ions in solids) adlandırılan program vasitəsi ilə bərk cismin hər hansı bir elementi kompüterdə modelləşdirilir, implantasiya olunan ionun bərk cisim atomları ilə qarşılıqlı təsirini göstərən müəyyən əmrlər verilir və modelləşdirilmiş cismə istənilən enerjiyə kimi sürətləndirilmiş ion göndərilir. Programda bərk cisim daxilində ionun getdiyi yolu və tormozlandığı yeri də görmək mümkündür. Bununla yanaşı ionların dərinlik üzrə paylanmasını, atomların sayının dərinliyə görə paylanmasını və enerji itkilərinin dərinliyə görə paylanmasını istər 3D, istərsə də adi formada qrafikləri qurmaq olar [35, s.25; 95, s.21; 49, c.1, s.164].

İon implantasiyası mikroelektronika texnologiyasında geniş yayılmışdır. Ümumiyyətlə bu proses ən çox aralıq hal olaraq istifadə olunur, yəni yüksək temperaturun yayılması ilə nəticələnir.

Karbon nanostrukturalarının ion implant metodunun istifadəsinin ən önəmli istiqamətlərindən biri nanoelektronikadır. Kiçik ölçülər, sintez zamanı lazımı elektrik keçiriciliyin alınması, mexaniki möhkəmlik və kimyəvi sabitlik karbon nanostrukturaların funksional işlək elementlərinin istehsalı üçün arzu olunan parametrlərdir. Bu səbəblə hal-hazırda elm adamlarının cəhdləri keçirici və super keçirici materiallarla dolu fulleronlar və nanotrubkalar hazırlamaq üçün texnologiyanı inkişaf etdirməkdir.

Hal-hazırda mövcud olan ölçülərdən kiçik olan nanoelektrik cihazların istehsalına keçən cərəyan keçirici birləşmələrin yaradılması bu problemin həlli

olacaqdır. Bunun həll yolu, mikroelektronikada özünü sübut etmiş hissəciklərin implantasiya metodu ola bilər. Belə ki, ionlarla bombardıman edilmə metodu optoelektronik alətlərin hazırlanmasında, plastik qəliblərin hazırlanmasında, elektronikada, nano texnologiyasında, təyyarə və avtomobil sənayesində, tibbdə (protezlərin hazırlanmasında) və bir çox sahədə geniş tətbiq olunur. Bir çox təyyarə, raket, gəmi pərləri və dişlərinin ionlarla bombardıman edilməsində titan və molibdenin sürətli ionları istifadə edilir.

#### **1.4 $A^3B^3C_2^6$ tip yarımkəçiricilərdə $\gamma$ -kvantlarının və ion implantasiyasının təsiri nəticəsində radiasiya defektlərinin yaranması**

$A^3B^3C_2^6$  tip yarımkəçirici monokristalların yetişdirilməsi və onların müxtəlif kvantlarla şüalandırılması zamanı yüngül və ya ağır ionlarla imlantasiya proseslərində, müəyyən məxsusi və radiasiya defektləri yaranır, az və ya çox dayanıqlı struktur pozulmaları baş verir.

Qamma şüalarının nümunəyə təsiri 3 mexanizmdən ibarətdir: Kompton təsiri, fotoelektrik təsiri və cütlərin yaranması. Bunların hər birinin yaranması qamma kvantların enerjisindən və maddənin atom nömrəsindən asılıdır. Qamma şüalar radioaktiv izotop kimi qeyri-sabit mənbəyin dağılması zamanı yaranan elektromaqnit radiasiyadır ( $Co^{60}$ ,  $Ir^{192}$ ,  $Cs^{139}$ ,  $Tm^{70}$ ) [98, c.1, s.274]. Hər bir izotopun müəyyən tətbiqlərə uyğun olmasını təmin edən spesifik xüsusiyyətləri vardır. Qamma radiasiyasında enerji səviyyələri sabitdir və enerji intensivliyi zamandan asılı olaraq azalır [98, c.1, s.274]. Qamma şüaları rentgen şüalarına bənzəyir (X-şüalar) və nizamsız defektləri aşkar etmək üçün əlverişlidir.  $Co^{60}$  şüaları dielektrlərdə ionizə olmuş defektlərin öyrənilməsi üçün geniş istifadə olunur.

Radiasiya enerjisinə görə zəif və yüksək, növünə görə də hissəcik və elektromaqnit radiasiyası olaraq sinifləndirilir. Bundan başqa radiasiya maddə ilə qarşılıqlı təsirində maddəni ionizə edib-etməməsinə görə ionlaşdırıcı və ionlaşdırıcı olmayan radiasiya kimi də siniflərə bölünür. Atomdan elektron qopararaq ionlaşmaya səbəb olan yüksək enerjili radiasiya ionlaşdırıcı radiasiya, zəif enerjili radiasiya

qarşılıqlı təsirdə olduğu maddənin atomlarını ionizə etmədiyindən, qeyri -ionlaşdırıcı radiasiya adlanır [3, s.58; 1, s.14].

Yüksüz enerjili və kütləsiz hissəcik olan fotonların ( $X$  və  $\gamma$ -şüaları) maddə ilə qarşılıqlı təsirində elektrik yükləri olmadığı üçün Coulomb təsiri meydana gəlmir.  $\gamma$ -şüaları ionlaşdırıcı və elektromaqnit radiasiya içərisində yüksək keçiriciliyə malik şüalardır.

Maddənin radiasiya ilə qarşılıqlı təsiri nəticəsində, radiasiya ilə bağlı effektlər meydana gəlir. Baş verən radiasiya effektləri aşağıdakı şəkildə sinifləndirilir:

- Elektron-deşik cütlərinin yaranması səbəbi ilə ionlaşma təsiri;
- Yüksək enerjili hissəciklərlə toqquşma nəticəsində yerdəyişmə təsiri.

Bu təsirlər hədəf maddənin effektivini azaldır və qalıq defektlər meydana gətirir. Bununla yanaşı, radiasiyanın maddə ilə qarşılıqlı təsiri maddənin növünə, maddəni təşkil edən atomların kütləsinə və hissəciyin yükünə, kütləsinə, atom nömrəsinə görə dəyişir.

Radiasiya şüalarının təsiri nəticəsində, yarımkeçiricilərdə radiasiya defektlərinin yaranması hesabına, qadağan olunmuş zonada energetik səviyyələrin mürəkkəb spektri alınır. Yarımkeçiriciləri sürətli elektronlarla və  $\gamma$ -kvantlarla şüalandırırdıqda, vakansiyalar və ya düyünləarası atomlar kimi defektlər (Frenkel cütləri) meydana gəlir. İon kristallarda kationların və anionların ölçüləri müxtəlif olduğundan, əsasən katyonik və ya aniyonik Frenkel defektləri yaranır (Şəkil 1.4.1) [44, c.1, s.248; 23, c.1, s.65].

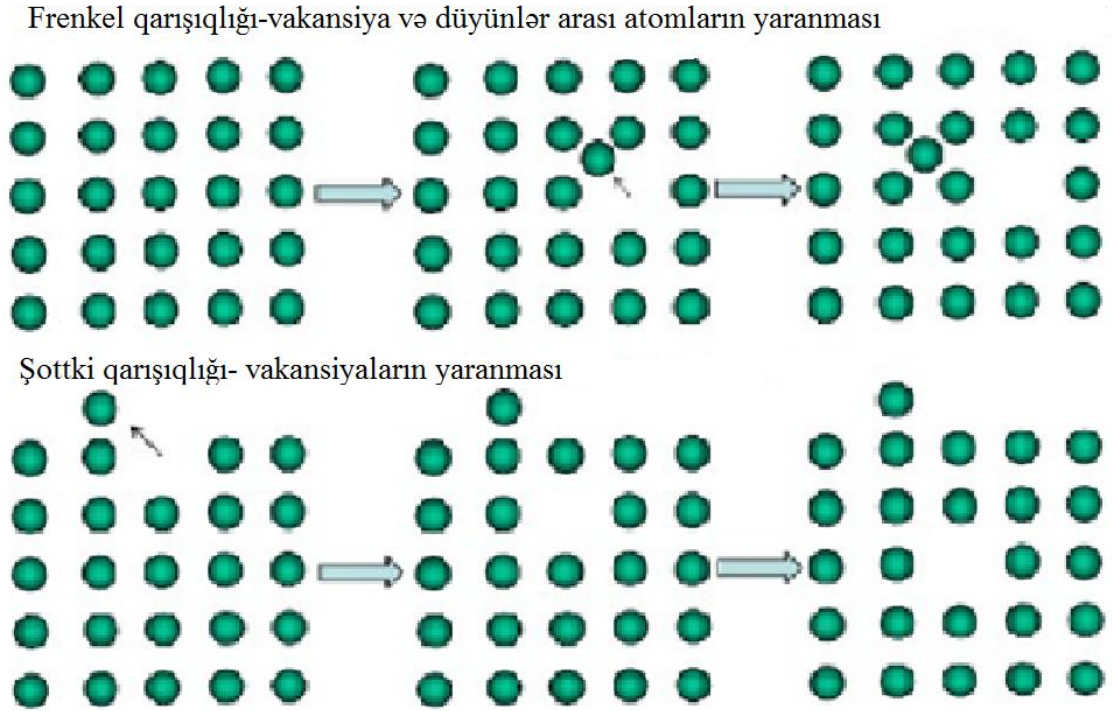
Nöqtəvi defektlərin yaranması zamanı eyni sayda kation və anionlar kristal səthinə keçir və səth düyünlərində yerləşməyə gətirib çıxardır. Bu zaman kristalın səth təbəqəsində vakansiyalar yaranır. Vakansiya daha dərinə yerləşən atomla qarşılıqlı təsir zamanı kristalın həcminə yayıla bilər. Düyünü tərk edən atom kristalda sərbəst qaldığından, qəfəsdə yalnız bir defekt saxlanılır-vakansiya. Bu növ defektlərə Şottki defektləri deyilir (Şəkil 1.4.1).

Qəfəs düyünlərindən çıxmış atomlar, vakansiyalar və düyünləarası atomlar şəkildə struktur defektlərinin yaranmasına səbəb olur. Kristal qəfəsin özünəməxsus xətti defekti dislokasiya adlanır bu isə kristalda qəfəs müstəvisinin yerini sürüşməsi

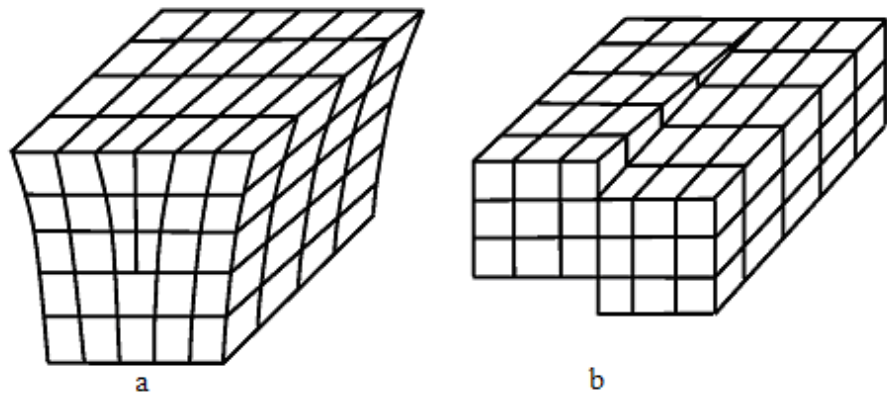
ilə əlaqəlidir. Bu cür defektlərin yığılması dislokasiyanın formalaşmasına və dislokasiya xətləri yaxınlığında aşqarların yığılmasına gətirib çıxardır. Bu da bir sıra effektləri müəyyən etməyə imkan verir [10, s.140]. [70, c.5, s.85] işdə tədqiqatçılar tərəfindən göstərilmişdir ki, dislokasiyalar aşkar atomları ilə şüalandırıldıqda yaranan radiasiya defektlərinin daxil edilmə sürətinə təsir edir.

Dislokasiya intensivliyinin artması dislokasiya qovşaqlarının (düyünlərin) meydana gəlməsinə və nəticədə prosesin sərtləşməsinə səbəb olur. İon implantasiyası sıx bir yerdəyişmə qovşaqları yaradır (Şəkil 1.4.2 a, Şəkil 1.4.2 b) [121, c.34, s.427]. Radiasiya zamanı müqaviməti gücləndirən əsas mexanizmlər; soyuq deformasiya, bərk halların formalaşması, ikinci fazanın formalaşması və faza dəyişmələrinin formalaşmasıdır. Beləliklə, dislokasiya hərəkətləri məhdudlaşdırılır və materialın axma müqaviməti artır. Dislokasiya defektinin 2 növü vardır: vintvari və xətti dislokasiya. Vintvari dislokasiya kristalda qəfəsin tam sürüşməsi, xətti dislokasiya isə qəfəsin qismən sürüşməsi nəticəsində yer alır. Yarımkeçirici cihazların parametrlərinin kənara çıxmasına səbəb parazit aşqarların və dislokasiyanın olmasıdır. Yarımkeçirici birləşmənin səthində yerləşən atomların səthdən kənar oblastda qonşu atomlarının olmaması səbəbindən kovalent rabitə pozulur. Bu isə öz növbəsində yarımkeçirici birləşmənin səthində enerji balansının pozulmasına səbəb olur. Birləşmənin səthində enerji balansı bir neçə yolla bərpa oluna bilər: kristal səthinə yaxın oblastda atomlar arasında məsafənin kiçilməsi və xarici mühitdən yad atomların udulması nəticəsində qırılmış rabitənin tam və ya qismən olaraq bərpa olunması, nümunə səthinin oksidləşməsi nəticəsində qırılmış rabitənin bərpa olunması. Bütün hallarda səthə yaxın sahənin xarakteri və xassələri nümunənin daxilindəkindən fərqlənir.

Laylı və zəncirvari monokristallarda radiasiya effektlərinin tədqiq edilməsi onların radiasiyaya davamlılığının artırılma üsullarının işlənilməsinə imkan verir. Müəyyən edilmişdir ki, kiçik dozalı qamma və elektron şüaları ilə emal zamanı laylı və zəncirvari kristalların radiasiyaya davamlılığı, o cümlədən fotoelektrik xassələri yaxşılaşır. Rengenografiya, Atom güc mikroskopu, Rezerfort səpilmə metodları kristalların optik və kimyəvi xassələrini tədqiq etməyə imkan verir.



Şəkil 1.4.1 Şotki və Frenkelə görə nöqtəvi defektlərin formalaşması mexanizmləri.



Dislokasiya qüsurunun xətti (Şəkil 1.4.2 a) və vintvari (Şəkil 1.4.2 b) növləri var.

[20, c.26, s.76]- ci işdə müəlliflər silisiumu yüksək enerjili bor, argon və oksigen ionları ilə implantasiya edərək yaranan defektləri Holl effekti və İR emmisiya üsulları ilə tədqiq etmişlər. İonların nüfuz etmə təbəqəsi altında nöqtəvi radiasiya defektləri müşahidə edilir, bu formalaşma şüalanma nəticəsində meydana gələn Frenkel cütlərinin komponentlərinin substrantının yayılmasına səbəb olur. İmplantasiya olan ionlarının atom kütlələrini artırmaqla, “qaçış” zonasında göstərilmiş mərkəzlərin formalaşması prosesi zamanı vakansiya və düyünləarası atomlara məxsus mürəkkəb struktur pozuntularının konsentrasiyasının artmasının effektivliyi aşağı salınır. Müəlliflər n- və p -tip keçirici silisium monokristalını, borla 13,6 MeV, Oksigenlə 19,7 MeV, argonla 49,6 MeV-də və  $1 \cdot 10^{14}$  -  $1 \cdot 10^{16}$  sm<sup>-2</sup> dozada implantasiya etmişlər. Bu səbəb, qadağan olunmuş zonada artan müqavimət sahələrin yüksək enerjili implantasiya sırasında meydana gəlməsi, şüalanma nəticəsində yaranan Frenkel cütlərinin komponentlərinin alt təbəqəyə diffuziya etməsi ilə yaranan nöqtəvi radiasiya defektləri ilə əlaqəlidir.

Yarımkəçiricilərin radiasiya fizikasının inkişafı nüvə texnologiyası və energetikanın inkişafı ilə bağlıdır. Eksperimental tədqiqatlar göstərir ki, yarımkəçiricinin kristal qəfəsində radiasiya defektlərinin yaranması onun elektrofiziki [28, c.16, s. 32; 30, s.38], optik, mexaniki və struktur xüsusiyyətləridə bir dəyişikliyə gətirib çıxardır [29, s.139; 21, c.13, s.1142]. [28, c.16, s.32] -ci işdə defektlərin formalaşmasının effektivliyi və radiasiya defektlərinin növünün kəskin şəkildə maddənin elektron parametrlərinə bağlı olduğu aşkar edilmişdir. Göstərilmişdir ki, radiasiya defektlərinin konsentrasiyası aşqar kimyəvi maddələrin konsentrasiyasından artıq olduqda, Fermi səviyyəsi hər yarımkəçiriciyə xarakterik olan  $F_{lim}$  sərhəd mövqeyində sabitləşir.

TlInS<sub>2</sub> və TlGaSe<sub>2</sub> monokristalları A<sub>3</sub>B<sub>3</sub>C<sub>2</sub><sup>6</sup> qrupuna daxil olan laylı birləşmələrə aiddirlər. Bu monokristallar geniş qadağan olunmuş zonaya, kiçik yürüklüyə və kristal qəfəs quruluşları isə güclü anizotropiyaya malikdirlər. Qadağan olunmuş zonalarında lokal səviyyələrin olması bu kristalların fiziki xassələrinə güclü təsir edir. Lokal səviyyələrin əmələ gəlməsi kristallarda struktur defektlərinin olması ilə

əlaqədardır. Bu kristallarda aşqarlanma, şüalanma və s. vasitəsi ilə struktur defektləri yaradılır [31, c.1, s. 102].

Ədəbiyyatdan məlum olduğu kimi  $\gamma$ -şüalarla şüalandırılmış  $\text{TlInS}_2$  monokristalının dielektrik xassələrinə aid bir-neçə tədqiqat işləri aparılmışdır [9, s.157; 65, c.47, s.1665]. [9, s.157] - ci işdə müəlliflər  $\text{TlInS}_2$  kristalının dielektrik xassələrinə  $\gamma$ -şüalarının təsirini tədqiq etmişlər və dielektrik nüfuzluğunun eksponensial qanunauyğunluğa malik olduğunu göstərmişlər. Uzun müddət  $\gamma$ -şüalarına məruz qalan monoklin struktura malik  $\text{TlInS}_2$  monokristalında heksaqonal fazanın yaranması baş verir. Bu zaman radiasiyanın təsirindən monoklin strukturda atomların yerinin dəyişməsi baş verir və adi temperaturalarda daha davamlı olan heksaqonal faza yaranır. Bu zaman  $\text{InS}_4$  tetraedlərinin mərkəzlərindən In atomlarının yerini dəyişməsi və  $\text{InS}_6$  oktaedrinin yaranması və beləliklə struktur dəyişirikliyi baş verir.

Bərk cismlərdə ionlaşdırıcı radiasiya yarımkeçiricilərin xüsusiyyətlərini əhəmiyyətli dərəcədə dəyişdirə bilən üst və alt səth defektləri yaradır. Alt səthdə meydana gələn defektlər az öyrənilmişdir. Bu halda baş verən proseslər yarımkeçirici materialın optik həyəcanlanma zamanı meydana gələn fotokimyəvi reaksiyalara bənzəyir. Uzunmüddətli radiasiyanın təsiri nəticəsində yarımkeçirici material yüksək temperaturalarda defektlərin yaranması ilə qismən nizamlanmış çoxlu sayda kristal qəfəs defektlərini formalaşdırır və heterogen mühitə çevrilir.

Yarımkeçirici cihazların radiasiya müqavimətini qiymətləndirərkən, metalların və yüksək müqavimətli yarımkeçiricilərin (və dielektriklərin) xüsusiyyətlərindəki (davranışlarındakı) fərqi görmək vacibdir. Əgər təmiz (saf) metallar radiasiyaya davamlı olsaydı, yüksək müqavimətli yarımkeçiricilər və dielektriklər bu xassələrə malik olmayacaqdı.

Bəzi kritik radiasiya defektləri konsentrasiyalarında kristallik hal qeyri-sabit hala gəlir və amorf hala keçid edir. Bütün yarımkeçiricilərdə amorflaşma meydana gəlməz, ancaq kovalent əlaqənin təbiəti nə qədər aydın olarsa bir maddənin belə bir keçidə meyli daha çoxdur. Si və Ge, ən yaxşı öyrənilmiş tipik kovalent yarımkeçiricilərə nümunədirlər.

Ədəbiyyat icmalına yekun olaraq söyləmək olar ki,  $A_3B_3C_2^6$  tip birləşmələr sinifinə daxil olan  $TlInS_2$  və  $TlGaSe_2$  kristallarının elektrik, dielektrik, fotoelektrik, xassələri araşdırılmışdır. Bu araşdırmalardan məlum olur ki,  $TlInS_2$  və  $TlGaSe_2$  monokristalları elmi və praktiki cəhətdən zəngin fiziki xassələrə malikdirlər.  $TlInS_2$  kristalları alınma texnologiyasından asılı olaraq beş struktur modifikasiyalarında (monoklin, triklin, heksaqonal, tetraqonal və ortorombik) kristallaşır.

$TlInS_2$  və  $TlGaSe_2$  monokristallarına dair ədəbiyyat icmalından görünür ki, bu kristalların elektrofiziki və optik xassələri defektlərin konsentrasiyasından asılıdır. İonlaşdırıcı şüaların təsiri ilə defektlərin konsentrasiyasının dəyişməsi,  $TlInS_2$  və  $TlGaSe_2$  monokristallarında yeni fiziki xassələrin yaranmasına səbəb olmuşdur.

Həmçinin bu fəsildə yarımkeçirici birləşmələrə implantasiyanın təsirinə baxılmışdır. İmplantasiya zamanı implant ionlarının atom çəkisindən və sıra nömrəsindən asılı olaraq, yarımkeçirici birləşmələrdə yaratdıqları defektlər implant ionlarının bu birləşmələrin elektrik, dielektrik xassələrinə təsiri ətraflı araşdırılmışdır.

## II FƏSİL. MONOKRİSTALIN YETİŞDİRİLMƏSİ VƏ ÖLÇMƏ METODİKASI

### 2.1. Monokristalın yetişdirilməsi

Ədəbiyyatdan məlumdur ki, yarımkəçiriciləri sintez etmək üçün 3 metoddan istifadə olunur. Bunlar birbaşa sintez, dolaylı yol ilə sintez və qaz daşıyıcı reagentlər vasitəsi ilə qaz fazasında sintez metodlarıdır.

Bir temperaturlu metodun geniş istifadə olunmasına səbəb aşağıda göstərilənlərdir:

- 1) Sintez prosesində stexometriyanı almaq çox asandır və bu halda komponentlərin itkisi olmur;
- 2) Alınan nümunənin yüksək təmizliyinə nail olmaq üçün kənar maddələr və komponentlərin artıqlığı lazım olmur.

Göstərmək lazımdır ki, birbaşa sintez metodu yalnız ərimə temperaturunda buxar təzyiqi kiçik olan birləşmələrdə geniş istifadə olunur.

Sistemin istənilən nümunəsinin alınması üçün T-x diaqramını bilmək lazımdır. Birbaşa sintez metodunun əsas üstünlüklərindən biri bu metodun köməkliyi ilə parçalanan birləşmələri və fazaları almaqdır. Və yüksək ərimə temperaturuna malik olan birləşmələri sintez etmək olar. Sintez prosesini aparmaq üçün prosesdə istifadə olunan ampulalar bixromat  $K_2CrO_7+H_2SO_4$  qarışığı ilə təmizlənir. Bu qarışıq ilə təmizlənmiş ampulalara analitik tərəzidə dəqiqliklə çəkilmiş komponentlər əlavə edilir. Sonra  $1,33 \cdot 10^{-2}$  Pa təzyiq alınana qədər ampula vakumlaşdırılır və evakuasiya edilir.

Kristalları almaq üçün eyni temperaturlu silindrik formada olan və diametri  $(2,3-2,5) \cdot 10^{-2}$  m olan ovalaltı kvars ampulalardan istifadə edilir. Bu ampulaların divarının qalınlığı isə  $(0,1-0,2) \cdot 10^{-2}$  m və uzunluğu isə 0,15-1,20m – dir.

Kvars ampula komponentlərlə bir yerdə B-2 markalı ərintidən hörülmüş torbaya salınır və  $10-15^\circ$  bucaq altında yerləşmiş bir temperaturlu sobaya qoyulur. Ampulanın

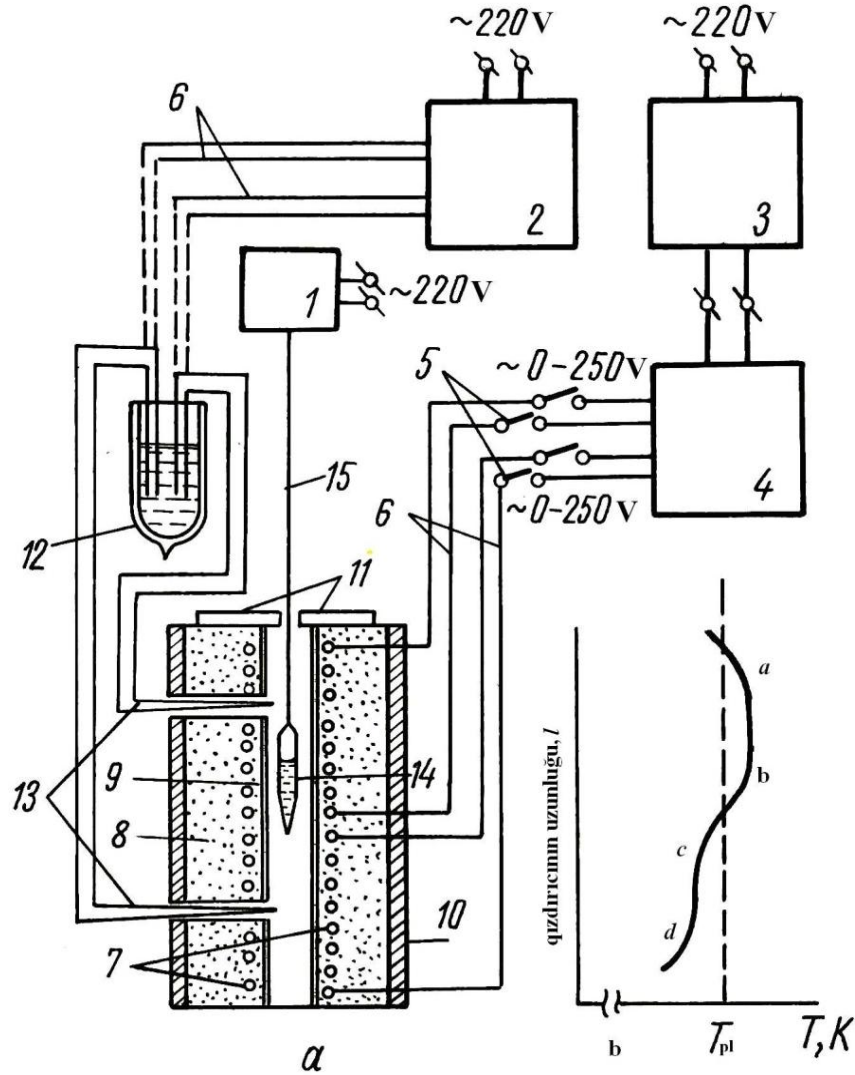
belə yerləşməsi ərintinin səthini çoxaltmağa və bununla sintez prosesini sürətləndirməyə imkan verir.

Sobada sintez olunan maddə əridildikdən sonra o qarışdırılaraq həmin temperaturda saxlanılır. 2-2,5 saatdan sonra sintez edilmiş maddə soba ilə birgə soyudulur.

TlGaSe<sub>2</sub> və TlInS<sub>2</sub> birləşmələrinin monokristalları Bricment-Stokbarqer üsulu ilə aparılmışdır. Şəkil 2.1.1-də Bricmen-Stokbarqer sxemi göstərilmişdir. Yetiştirilmə prosesi kvars ampulalarda aparılmışdır və bu zaman ampulaların uzunluğu 0,23-0,25m və diametri 0,01-0,2m olmuşdur. Bu ampulalar vakuum şəraitində 10-15° bucaq altında əyilmiş peçə 1/3 hissəsi havada qalması şərti ilə yerləşdirilir. Peç 0,16-0,2 K/san sürəti ilə qızdırılır. TlInS<sub>2</sub> nümunəsini belə yerləşdirəndə halkogen buxarlarının bir hissəsi Tl və In atomları ilə reaksiyaya girir, digər hissəsi isə ampulanın soyuq hissəsində kondensasiya olunur və yenidən reaksiya gedən hissəyə tökülür. Bəzi hallarda halkogen buxarının çoxluğu ampulada təzyiqli çoxaldaraq partlayışa şərait yarada bilər. Bu halı aradan götürmək üçün ampulanın yuxarı hissəsini öz diametrinin ölçüsü qədər irəli doğru əymək lazımdır. Bu vəziyyət halogen yığılması üçün müəyyən bir çökəklik əmələ gətirir və maye hala kondensasiya olunaraq ampulanın içərisinə tökülə bilər. Belə bir vəziyyətdə halogen buxarlanır və ampulada təzyiqlin aşağı düşməsindən asılı olaraq reaksiya zonasına daxil olur. Halogen reaksiya zonasındakı hissəciklərlə reaksiyaya girir.

Ərintinin soyudulması söndürülmüş peçdə və yavaş soyutma proqramı (0,016-0,05 K/san) ilə aparılmalıdır. 0,08-0,22 K/san sürətlə soyudulan ərintidə xırda kristallik nümunələr meydana gəlir.

Proses bitdikdən sonra sobanın temperaturu yavaş sürətlə otaq temperaturuna qədər aşağı salınır və tam şəkildə soyudulduqdan sonra kristal sobadan çıxarılır. Və bununla da, nümunələrin yetişdirilməsi prosesi bitmiş olur.



Şəkil 2.1.1 Bridcmen-Stokbarqera metodu ilə monokristalların yetişdirilməsi üçün qurğunun sxemi (a) və qızdırıcının temperaturunun paylanması qrafiki (b). 1 – reduktor elektrodları, 2 – özüyazan elektron temperatur, 3 – gərginlik stablizatoru, 4 – temperatur tənzimleyicisi, 5 – açar, 6 – birləşdirici naqillər, 7 – qızdırıcı, 8 – təcridedicici azbest, 9 – alunit boru, 10 – xarici izolyasiya, 11 – keramikadan qapaq, 12 – yağ düarı üçün hazırlanmış qab, 13 – termocütlük, 14 – maddə rezervuarı, 15 – rezervuarı bağlamaq üçün metallik məftil

## 2.2. $\gamma$ -şüalarının təsirinin tədqiqat metodikası

Qeyd etmək lazımdır ki, bircinsli yarımkeçiricilərə nisbətən,  $\text{TlInS}_2$  və  $\text{TlGaSe}_2$  tip birləşmələrdə nöqtəvi defektlərin əmələ gəlməsi mürəkkəbdir. Ədəbiyyatdan bizə məlumdur ki, ionlaşmış şüaların təsiri ilə həm donor və akseptor mərkəzləri əmələ gəlir. Şüalanma nəticəsində radiasiya defektlərinin sayı artır və yükdaşıyıcıların konsentrasiyasının müvazinəti dəyişir. Bu da Fermi səviyyəsinin son həddinə yaxınlaşmasını göstərir və son həddinin qiyməti sistemin enerjisi ilə müəyyən olunur. Radiasiya təsiri ilə defektlərinin sayı artır. Və bu artma yarımkeçirici birləşmələrin elektrik keçiriciliyinin fiziki, optik xüsusiyyətlərinin dəyişməsinə səbəb olur. Beləliklə, tədqiq olunan yarımkeçirici birləşmələrin xüsusiyyətlərini yoxlamaq olur.

Radiasiyanın təsiri ilə bərk cisimlərdə defektlər əmələ gəlir. Bu defektlərin əmələ gəlməsinin iki izahı vardır. Defektlərin ən ibtidai forması bu kristalların qəfəsində vakansiya və atomlararası düyünlərin əmələ gəlməsidir. Bu cür defektlər Frenkel defektləri adlandırılır. Digər izahı isə ondan ibarətdir ki, sərhəd enerjisinin mövcud olması ilə bu enerji kristalın atomlarına verilir və bu enerji vasitəsi ilə atom qəfəsin düyünləri arasına keçir və defektlər yaranır.

Göstərmək lazımdır ki, valent zonasında olan deşiklərin konsentrasiyası və keçirici zonada sərbəst keçiriciliyin konsentrasiyası Fermi səviyyəsinin enerjisi ilə üst-üstə düşdükdə bu hal aşağıdakı düsturla ifadə olunur.

$$n = \frac{g_0}{g_1} N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_t}{KT}\right) \quad (2.2.1)$$

$$P = \frac{g_0}{g_1} N_v \exp\left(-\frac{E_t - E_v}{KT}\right) \quad (2.2.2)$$

Burada  $g_0$ -deşiklərin,  $g_1$ -elektronların miqdarıdır.

Bu defektlərin sayı elektronların F inteqral selinə mütənasibdir hesab etsək, yəni  $N_B = A_B F$  n-nisbi dəyişikliyi belə bir düsturla ifadə olunur.

$$\frac{\Delta n}{F} = \frac{n' - n}{F} = A_B \left[ 1 + g_1 \exp\left(\frac{E_B - E_F}{KT}\right) \right]^{-3} \quad (2.2.3)$$

Bu ifadədə,  $n$  və  $n'$  yükdaşıyıcıların şüalanmadan əvvəlki və sonrakı müvazinət konsentrasiyası,  $N_B$ - radiasiya defektlərinin konsentrasiyasıdır.  $A_B$ - vahid həcmdəki selin effektiv defekti,  $g_1$  isə tutulmamış səviyyələrə nisbətən elektron konsentrasiyasıdır.

Uyğun olaraq  $P$  üçün də belə ifadə yazsaq,

$$\frac{\Delta P}{F} = \frac{P' - P}{F} = A_B \left[ 1 + g_1 \exp\left(-\frac{E_f - E_v}{KT}\right) \right]^{-1} \quad (2.2.4)$$

Birləşmələrin elektrik parametrləri şüalanma zamanı bu neytrallaşma düsturu ilə ifadə olunur [79, s.1488].

$$n + \sum_i N_{Ai}^- + \sum_j N_{Apj}^- = p + \sum N_{DK}^+ + \sum N_{Dpl}^+ \quad (2.2.5)$$

Bu ifadədə  $N_{DK}$  ( $N_{Di}$ ) kimyəvi aşqarların və donor defektlərin konsentrasiyasıdır.  $N_{Dpl}$  ( $N_{Api}$ ) donor radiasiya defektlərin konsentrasiyasıdır və bu konsentrasiyanın kimyəvi aşqarların konsentrasiyasından çox olması, zərrəciklər selinin çox olması ilə əlaqədardır və (2.2.5)-i bu düsturla ifadə etmək olar:

$$n + \sum_j N_{Api}^- = p + \sum_l N_{Dpl}^- \quad (2.2.6)$$

Belə vəziyyətdə Fermi səviyyənin vəziyyəti və nümunənin elektrofiziki xassələri radiasiya defektləri ilə yoxlanılır. Bu xassələrin öyrənilməsi ilə, radiasiya zamanı yarımkeçirici birləşmələrin başlanğıc parametrlərini qismən də olsa təyin etmək imkanı yaranır.

(2.2.7) düsturla şüalanmadan sonra elektrofiziki parametrlərin dəyişməsinə ifadə etmək olar [40, c.19, s.374].

$$P = N_A / g \exp \left[ \frac{(E - F)}{kT} + 1 \right] + (N_{AO} - N_{DO}) \quad (2.2.7)$$

$N_A$ -dərin səviyyələrin,  $(N_{AO} - N_{DO})$  isə xirda akseptor və donorların konsentrasiyasıdır. Şüalanmanın dozasından asılı olaraq, şüalanma zamanı keçiriciliyin funksiyasının dəyişməsinə bu düsturla ifadə:

$$\delta = \delta_0 e^{-kF} \quad (2.2.8)$$

Burada  $\delta_0$  -şüalanmadan əvvəlki keçiricilikdir.  $K$ -isə cərəyan keçiriciliyini xarakterizə edən sürətin əmsalıdır.

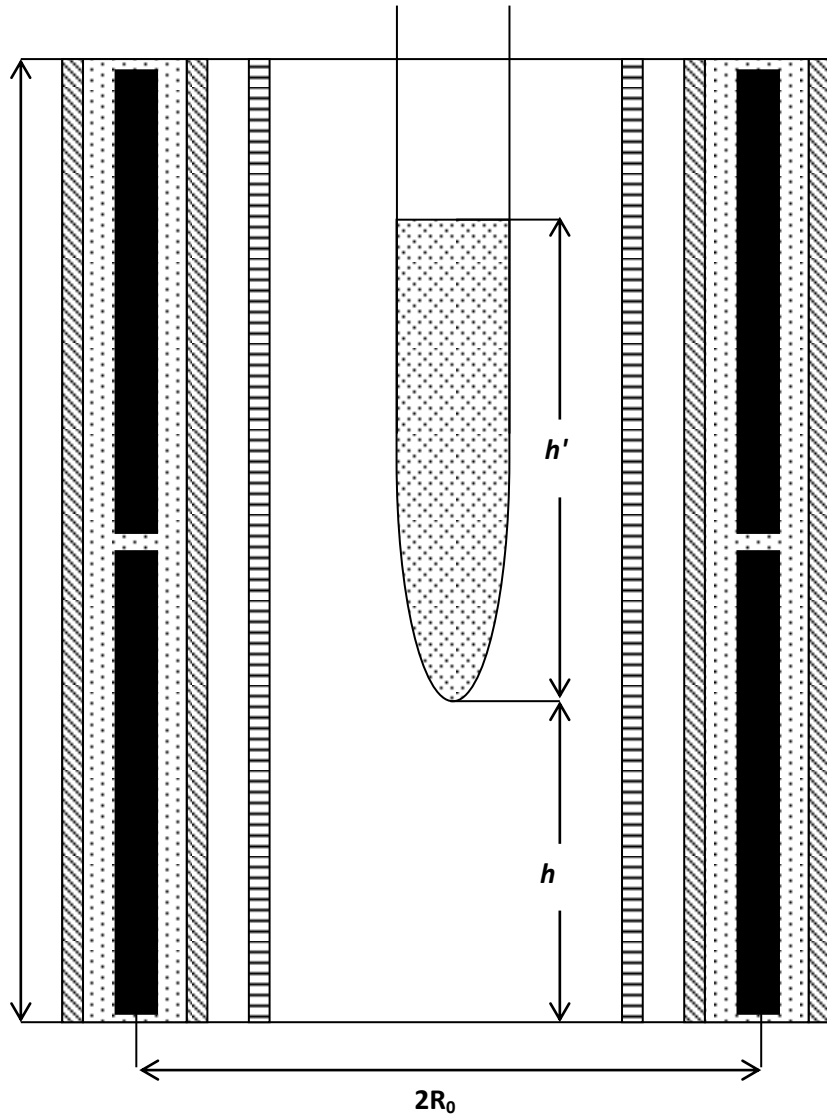
(2.2.1) və (2.2.2) düsturları elektrofiziki parametrlərin istifadə olunur. Belə ki, dərin səviyyəni və dərin donor və akseptor səviyyəsində olan defektləri şüalanmada nəzərə alır. Aşağıdakı düsturla defektlərin konsentrasiyasının miqdarını və keçiricilik zonasında elektronların konsentrasiyasının dəyişməsinə təyin etmək mümkündür.

$$f(t) = \frac{\delta_0 - \delta(t)}{\delta_0 - \delta_{AB}} \quad (2.2.9)$$

Bu düsturda,  $\delta_0$  -ilkin elektrik keçiriciliyi,  $\delta_{AB}$  -şüalanma zamanı elektrik keçiriciliyi,  $\delta(t)$ -1 saat müddətində bərpadan sonrakı elektrik keçiriciliyidir.

Bərpa prosesinin gedişi haqqında məlumat almaq üçün  $f(t)$ -dən istifadə edilir.

Şəkil.2.2.1-də  $\gamma$ -25 radiasiya tədqiqatları qurğusunun kamerasının və nümunənin daxil edildiyi ampulanın sxematik təsviri göstərilmişdir.  $\gamma$ -25 radiasiya tədqiqatları qurğusu  $Co^{60}$  izotopundan ibarət olan şüalanma mənbələri fiziki-kimyəvi və bioloji tədqiqatlar aparmaq üçündür.



**Şəkil 2.2.1  $\gamma$ -25 qurğusunun işçi kamerasında mənbənin və nümunənin sxematik təsviri.  $h_1$ -nümunənin hündürlüyü,  $h$ -kameranın dibindən nümunəyə qədər olan hündürlük,  $R_0$  kameranın radiusudur.**

Qamma şüalarından qorunmaq üçün işlək olmadığı halda qurğunun mənbələri quyuda suyun altında saxlanılır. İşlək vəziyyətdə olduğu halda isə, qurğunun mənbələri suyun altından işlək stolun səthinə kimi qaldırılır. Bu qamma mənbələrinin sistemi kasetlərdən və borulardan ibarətdir. Bunların içərisində isə aşağı və yuxarı tutacaqlarla məhdudlaşdırılmış çubuqlar yerləşdirilir, bu çubuqlar kobalt izotopundan hazırlanmışlar və çevrə boyunca simmetrik düzülüşlər. Şüalanan nümunənin ölçüləri kameranın ölçülərinə nisbətən kiçikdirsə bərabər şüalanma gedir və əksinə əgər şüalanan nümunə kameranın ölçülərindən böyükdürsə o zaman şüalanma qeyri bərabər olur. Bu zaman orta udulma zonasının gücünün təyin edilməsi məsələsi ortaya çıxır. Şüalanma ampulalarda aparılır. Nümunələrin müxtəlif vəziyyətdə yerləşməsindən asılı olaraq şüalanan maddələrin aldığı dozalar öz aralarında fərqlənir.

Bu səbəbdən kameranın daxilində müxtəlif nöqtələrdə ekspozisiya dozalarının gücünü bilmək vacibdir. Nöqtəvi mənbəyin A aktivliyi ilə eyni məsafədə yerləşən mənbəyin ekspozisiya doza gücünün hesablanması bu düsturla aparılır:

$$\rho = AK_{\gamma} / (P)^2 \quad (2.2.10)$$

Burada,  $K_{\gamma}$ - ionlaşmış  $\gamma$ -sabitini olduğundan,  $Co^{60}$  izotopu üçün  $K_{\gamma}=1,29$  Rent.sm<sup>2</sup>/saat\*mkKüri.

### 2.3. İon implantasiya təsirinin tədqiqat metodikası

İon implantasiya, yüklü zərrəciklərin maddənin səth təbəqəsinə və ya həcmində, bir neçə kiloelektron voltlardan bir neçə meqaelektron voltlara qədər enerji ilə bombalanması yolu ilə daxil edilməsi metodudur. Metodun imkanları xüsusi ilə cəlb edicidir, çünki bərk cismlərin fiziki xüsusiyyətləri (mexaniki, elektrik, optik, maqnetik) aşqarlara qarşı çox həssasdır. İon implantasiyası müxtəlif elementlərin ionlarının nümunə-hədəfə yeridilməsinə və bəzi səbəblərə görə adi aşqarlama metodu ilə alınması mümkün olmayan (məsələn, verilmiş materialın kristallik quruluşuna

görə aşqar qatışıqların həll olunma həddi olması nəticəsində) qarışıqların almasına imkan verir. İon implantasiya proseslərinin ən vacib xüsusiyyətləri bərk cisimlərdə ion yolunun uzunluğu, ion bombardımanı nəticəsində hədəfdəki maddənin kristal qəfəsinin pozulma dərəcəsi və həcmindəki ionların konsentrasiyalarının paylanmasıdır. Metodun ən vacib xüsusiyyəti ionların növünə və onların tətbiqi enerjilərinə bağlı olaraq, materialın strukturunda defektlərin səth qatında və ya nümunənin həcmində yaranması faktıdır.

İmplantasiya üçün əsasən 3 növ materiallar istifadə olunur; amorf, polikristallar və monokristallar. Proses nəticəsində bu materiallarda, müəyyən bir konsentrasiya profiline malik strukturlar yaradılır.

İon implantasiya sürətləndiriciləri ümumiyyətlə, istənilən bir elementə implant edildikdə, ion mənbəyindən ionların yüksək enerjiyə qədər elektrostatik şəkildə sürətləndiyini və yerləşiriləcəyi hədəf nümunəsi üzərində, ionların hədəf dairəsinin irəliləyən sürətləndiricisinin olduğu bir ion mənbəyindən ibarətdir. Bu səbəblə ion yerləşdirilməsi hissəsi radiasiyasının xüsusi halıdır. Hər bir ion tipik olaraq tək bir atom və ya molekuldur. Quraşdırıcılar tərəfindən təmin edilən cərəyanlar tipik olaraq kiçikdir (mikroamper) və buna görə müəyyən bir vahid vaxtda yerləşdirilə bilən dozanın miqdarı az olur. Bu səbəbdən kimyəvi dəyişmənin miqdarı az olduğu yerdə ion implant tətbiq olunur.

Tipik ion enerjiləri 10-500 keV intervalındadır. 1-10keV aralığındakı enerjilər də istifadə edilə bilər. Lakin bu zaman implant ionları bir neçə nanometrə kimi və ya daha az dərinlikdə hədəfə daxil olma ilə nəticələnir. Aşağı enerjilər hədəfə çox az zərər verir və ion çöküntüsünün dağılması təsnifatına düşür. Yüksək enerjili sürətləndiricilər isə, hədəfdə daha çox struktur dəyişikliklərinə səbəb olur və hədəf daxilində dərinlik paylanması geniş olduğu üçün (Bragg təpə nöqtəsi) hədəfin hər hansı bir nöqtəsində dəqiq bir kompozisiya dəyişikliyi kiçik olur.

İonların enerjisi ion və hədəf atomlarının növü bu implant olunan ionların nə qədər hədəf daxilinə nüfuz etməsini təyin edir. Bir monoenergetik ion şüası ümumiyyətlə geniş bir dərinlik paylaşmasına malikdir. Normal şərtlər altında ionun

maddə daxilində getdiyi məsafə 1-10 nanometr (10-500 keV enerjili sürətləndiricilərdə) arasındadır.

İon yerləşdirmə metodunda istifadə edilən sürətləndiricilər aşağıdakı kimi təsnif edilir:

- Orta dərəcə cərəyan – ion şüa şiddəti 10  $\mu\text{A}$  və  $\sim 2$  mA arasındadır.
- Yüksək dərəcə cərəyan – ion şüa şiddəti  $\sim 30$  ma-ə qədərdir.
- Yüksək enerji-ion enerjiləri 200 keV və 10 MeV arasındadır.
- Çox yüksək dozada təsir implantasiya dozası  $10^{16}$  ion/cm<sup>2</sup> -dən çoxdur.

Sürətləndiricilər - hər hansı bir elementin zəif sıxlıqlı ion şüalarını yaradan bir ion qaynağı, qaynaqdan ionları çıxaran və sürətləndirmə sütunu boyunca sürətləndirən yüksək potensial elektrodlar, müxtəlif ionları ayıran ion analiz maqnitləri və nümunəyə doğru ion şüalarını nişanlayan elektrostatik plitələrdən ibarətdir [94, c.1, s.1168; 123, c.5, s. 605; 181, c.69, s.1451].

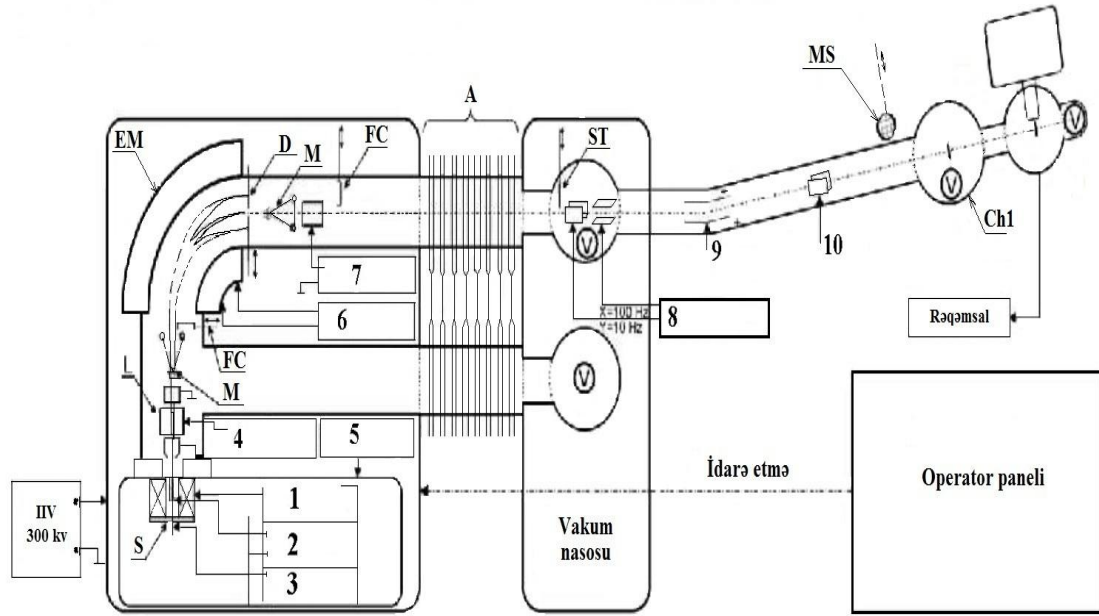
Müəyyən şəraitdə ionların kristallara implantasiyası zamanı kanallama effekti müşahidə olunur. Bu effekt ondan ibarətdir ki, sürətlənmiş ionlar kristalın baş oxuna müəyyən bucaq altında onun səthinə düşdükdə, dəstədəki ionların böyük bir hissəsi atomlar olmayan boş kanal üzrə adi haldakına nisbətən kristalın çox böyük dərinliklərinə daxil ola bilirlər. Bu effekt implantasiya metoduna əlavə üstünlüklər verir. İonların enerjilərini dəyişməklə kristalın müxtəlif dərinliklərində düzgün profilli p-n keçidləri yaratmaq mümkündür. Bu zaman implantasiya olunmuş aşqar ionlarının konsentrasiyasını ciddi sürətdə tənzim etmək olur.

İonların implantasiya metodu tranzistorların və digər yarımkeçirici cihazların keyfiyyətinin xeyli yaxşılaşmasına səbəb olmuşdur. İon implantasiya texnikasının ilk mərhələsində yaxşı fokuslanmış ion dəstəsinin köməyi ilə nümunənin səthində lazımı yerləri şüalandırmaqla yarımkeçirici inteqral sxemlər yaratmaq təşəbbüsləri olmuşdur. Lakin, ion dəstəsindəki kiçik enerjili ionların bir birindən itələnməsi nəticəsində, onların kəskin fokuslandırılması çətinlikləri ayrı-ayrı elementlər arasındakı məsafə mikronun hissələri qədər olan kompakt inteqral sxem almaq üçün sürətlənmiş ion dəstəsinin cərəyanını xeyli dərəcədə azaltmaq lazımdır.

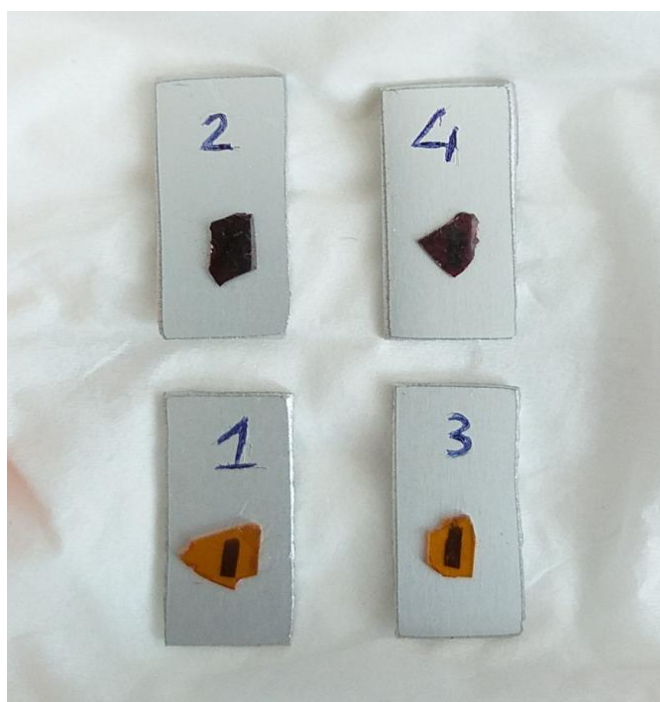
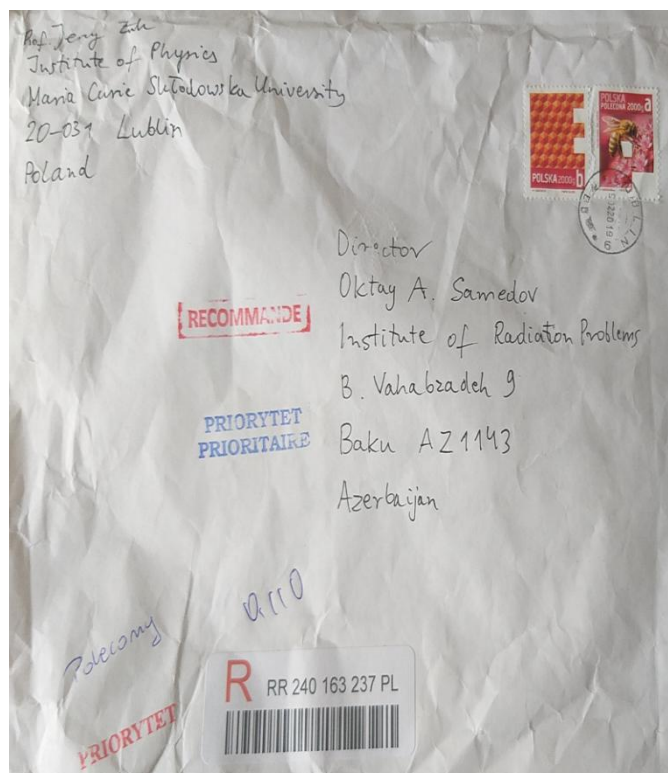
Hal hazırda intensiv ion dəstələrindən istifadə etmək və implantasiya olunan aşqarların profilini dəqiq idarə etməklə implantasiya olunan nümunənin daxilində kompleks elektrofiziki xassələrə malik olduqca mürəkkəb quruluşlar yaratmaq mümkündür. Hər hansı bir kimyəvi elementin sürətlənmiş ionları yarımkeçirici materialın səthinin dəqiq olaraq müəyyən nöqtələrinə yönləndirilir. İon dəstəsini bu və ya digər tərəfə meyl etdirməklə daxil edilən aşqarların tələb olunan iki ölçülü konfigurasiyasını yaratmaq, ionların enerjisini idarə etməklə isə aşqarların nümunə daxilində yerləşmə dərinliyini dəyişmək mümkündür. Bu mürəkkəb və eyni zamanda olduqca kompakt elektron sxemlər almağa imkan verir.

Sürətlənmiş zərrəciklər dəstəsini çox nazik şüa şəklinə salıb tədqiq olunan materialın səthi üzrə gəzdirməklə və xarakteristik rentgen şüalarının spektr və intensivliyini analiz etməklə bu səthin müxtəlif hissələrinin kimyəvi tərkibi haqqında məlumat almaq olar. Xarakteristik şüalanma adətən silisium dedektoru ilə qeydə alınır və çox kanallı analizator vasitəsi ilə qeydə alınır. Tədqiq olunan maddələrin səthini öyrənmək üçün əsasən yaxşı monoenergetikliyə və intensivliyə malik zərrəciklər verən elektrostatik sürətləndiricilərdən istifadə olunur.

Nümunələrin ion implantasiyası Polşanın Lublin şəhərində yerləşən Maria Curie-Sklodovska Universitetinin Fizika institutunun İon Fizikası və İmplantasiyası kafedrasında aparılmışdır. İmplantasiya UNIMAS 79 sürətləndiricisində otaq temperaturunda və  $10^\circ$  dərəcə bucaq altında aparılmışdır. Şəkil 2.3.1-də və Şəkil 2.3.2-də UNIMAS sürətləndiricisinin sxemi və yüngül ionlarla ( $H^+$  və  $He^+$ ) implantasiya olan nümunələr göstərilmişdir. Bu sürətləndiricidə 300 keV enerjiyə kimi ionlarla implantasiya etmək mümkündür. Ekstraksiya prosesində ionlar maqnit sahəsinin köməyi ilə mənbədən çıxarılaraq maddə üzərinə implant edilir. Elektrostatik linzalar sahəsi ion şüasını yaradır. Ekrandan istifadə edilərək ion selinin miqdarı müəyyən edilir. Burada, hissəciklərin hərəkət halında olan ionlar ilə maqnetik olaraq ayrılması, bir ayrılma prosesi ilə nəticələnir. Xüsusi kütləsi olan bir ion seçilir. İon şüasını maqnitdən buraxdıqdan sonra yenidən M-ekran-dan ionu sıxlığı ölçülür. Daha sonra elektrostatik sahədə sürətləndirici boru içində yığılan ion şüası sürətləndirilir.



**Şəkil 2.3.1 UNIMAS 79 sürətləndiricisinin sxemi: S – İon mənbəyi, L – Elektrostatik linzalar, M – Ekran, EM – Maqnit Ayrıcısı, D – Diafraqma, A – Sürətləndirici boru, ST – İon şüalarının görüntüləmə sistemi, MS – İon mənbə ekranı, Ch1 – İon implantasiya kamerası, V – Vakuum nasosları**



**Şəkil 2.3.2 Yüngül ionlarla ( $H^+$  və  $He^+$ ) 150 keV enerjində implantasiya olunmuş  $TiInS_2$  və  $TiGaSe_2$  kristalları (müvafiq olaraq 1 və 3  $H^+$ , 2 və 4  $He^+$ ).**

Növbəti addımda neytral hissəciklərin aradan qaldırılması üçün ion şüasını əsas istiqamətindən döndərilir. Neytral hissəciklər şüa ionlarının vakuumdakı qalıq qazların atomları ilə qarşılıqlı təsirləri nəticəsində yaranır. Dəyişkən elektrik sahəsindən istifadə etməklə nümunələrin səthini  $60 \text{ mm}^2$  ölçüdə bərabər şəkildə şüalandırmaq mümkündür. İmplantasiya olunacaq nümunələr Ch1 implant otaqında xüsusi bir tutacağa yerləşdirilir. Nümunə tutacağı isə Faradey tənəkəsinə (qalay) yerləşdirilir. Tutacaqdan axan elektrik yükünü ölçməklə, nümunənin məruz qaldığı şüalanma dozasını təyin etmək mümkündür. UNIMAS 79 sürətləndiricisindən istifadə edərək atom nömrəsi 103-ə qədər olan ionları əldə etmək olur. İon implantasiyası SRIM proqramının köməkliliyi ilə simulyasiya edilir.

UNIMAS 79 sürətləndiricisinin əsas hissələri: Elektromaqnit sarğılı güc mənbəyi, Katod – ion mənbəyi, Anod – ion mənbəyi, İon şüa fokuslama sistemi, İon çıxarıcı güc mənbəyinin sistemi, İon çıxarıcı güc mənbəyinin sistemi, Enerji mənbəyi – elektromaqnit, Enerji mənbəyi – ion şüaları monitoru, İon şüalarının görüntüləmə sistemi üçün güc mənbəyi, Neytral hissəciklərin bloklayıcısı, İon monitorunun enerji mənbəyi.

#### **2.4. Dielektrik və elektrik xassələrinin tədqiqi metodikası**

Son illərdə  $A^3B^3C_2^6$  tip birləşmələrin dielektrik və elektrik kimi fiziki xassələri geniş tədqiq olunur. Və ədəbiyyatdan məlumdur ki, sinusoidal elektrik sahəsində  $E(t)=E_m \cos \omega t$  dielektrik materialların polyarizasiyasının zamandan asılı dəyişməsi sinusoidal qanunla dəyişir. Ancaq polyarizasiyanın qərarlaşmasının inersiyası nəticəsində elektrik sahəsinin qiymətinin  $[E(t)]$  fazaca zaman asılılığından geri qalır. Bu geri qalma induksiya vektorunun  $D(t) = D_m \cos(\omega t - \delta)$  fazaca ixtiyari  $\delta$  bucağı qədər sürüşməsinə gətirib çıxardır.

Məlum olduğu kimi elektrik sxemlər nəzəriyyəsində fiziki kəmiyyətlərin zamandan sinusoidal asılılıqları tədqiq etmək üçün simvolik metodlardan istifadə olunur. Bu zaman  $D(t)$  və  $E(T)$  arasındakı əlaqə aşağıdakı (2.4.1) düsturu ilə ifadə edilir:

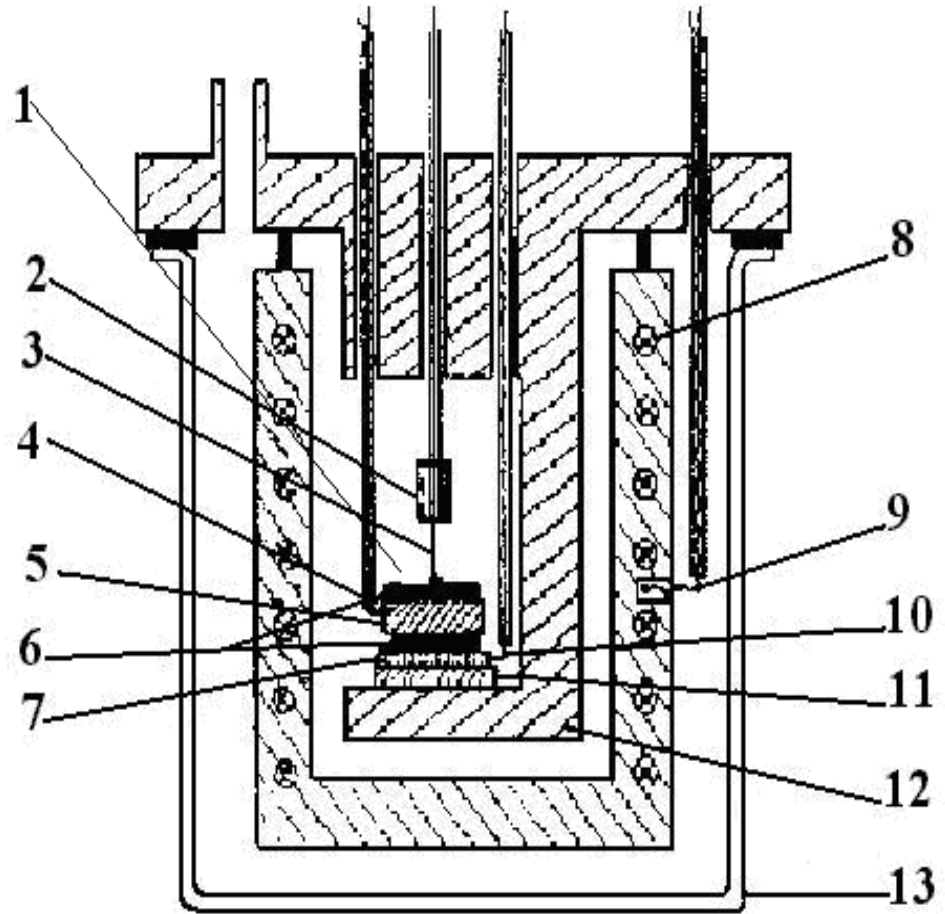
$$D(t) = D_m \exp[ I(\omega t - \delta) ] = \epsilon_0 \epsilon(\omega) E_m \exp(i \omega t) \quad (2.4.1)$$

Bu düsturda  $\epsilon(\omega) = \epsilon'(\omega) - i \epsilon''(\omega)$  – kompleks dielektrik nüfuzluğu;  $\epsilon'(\omega)$  – dielektrik nüfuzluğu;  $\epsilon''(\omega)$  – dielektrik nüfuzluğunun itki faktorudur. (2.12) ifadəsindən görünür ki,

$$\epsilon''/\epsilon' = \text{tg} \delta \quad (2.4.2)$$

(2.4.2) ifadəsində  $\delta$  – dielektrik itki bucağıdır.

Nümunələrə “c” oxuna paralel və ya perpendikulyar istiqamətdə gümüş pastası ilə kontakt qoyularaq kreostatın daxilində ki, mis stəkana qoyularaq və metal stəkanın daxilinə yerləşdirilir. Ölçmələrin aparıldığı kriostatın sxemi şəkil 2.4.1-də göstərilmişdir. Nümunələrin dielektrik nüfuzluğu  $\epsilon$  və dielektrik itki bucağının tangensi  $\text{tg} \delta$  impedans E7-25 qurğusunun köməkliyi ilə 275-550K temperatur intervalında və 25Hz-1MHz tezlik oblastında ölçülmüşdür. Ölçmələr 1K temperatur dəyişdirilməsi ilə aparılmışdır.



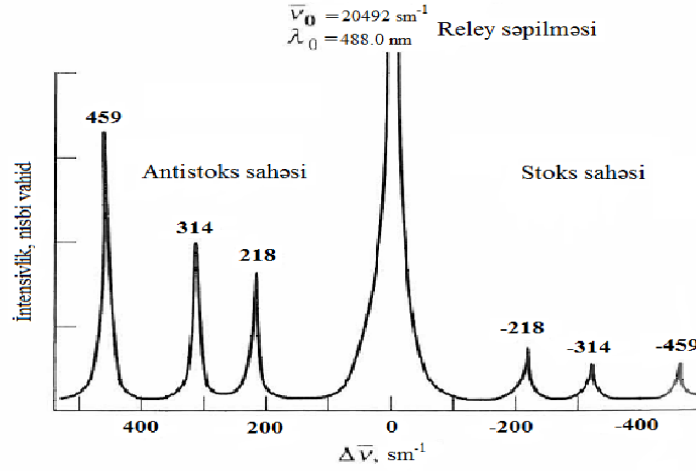
Şəkil 2.4.1 Tədqiq olunan kristalların elektrik və dielektrik xassələrini ölçmək üçün kriostat. 1 –nümunə; 2 –gümüş kontakt; 3 –səth kontaktı; 4 – mis stəkan; 5 – azbest ekran; 6 – temocüt; 7 – latun trubka; 8 – gümüş ekran; 9 – elektrik sobası; 10 – kvars stəkan; 11 – gümüş naqillər ; 12 – bir kanallı keramika; 13 – metal stəkan.

## 2.5. Işığın Kombinasiyalı Səpilməsi metodikası

Işığın kombinasiyalı səpilmə (İKS) metodu nümunənin monoxramatik şüadan ibarət güclü bir lazer mənbəyi ilə şüalanması nəticəsində səpilən şüanın müəyyən bir bucaqdan (əsasən 90 dərəcə) ölçülməsinə əsaslanır. Səpilmələr elastik və qeyri elastik olmaqlar 2 yerə ayrılır. Elastik səpilmədə səpilən işıq enerjisinin böyük bir qismi düşən işıq enerjisinə bərabərdir. Bu hadisəsi Reley səpilməsi adlandırılır. Elastik olmayan səpilməyə görə işıq səpilməsi  $10^4$ - $10^5$  dəfə daha qüvvətlidir [181, c.69, s.1451]. Qeyri-elastiki səpilmə isə kombinasiyalı səpilmə adlandırılır və səpilən işıq enerjisi, maddəyə düşən işıq enerjisindən fərqli olur. Yəni, düşən fotonun enerjisi ya azalır, ya da artır [82]. Səpilən fotonun dalğa uzunluğu ilə düşən fotonun dalğa uzunluğu arasındakı fərq KS sürüşməsi adlanır.

Maddə ilə qarşılıqlı təsirdə işıq udulmazsa, üç müxtəlif növdə səpilmə baş verir (Şəkil 2.5.1):

- 1) Reley səpilməsi (səpilən fotonun enerjisi=düşən fotonun enerjisi) - Əgər toqquşma elastikdirsə, toqquşmadan sonra fotonun enerjisi dəyişməz. Elastik olaraq həyata keçən bu qarşılıqlı təsirlər Reley səpilməsi adlandırılır. Bu səpilmələrdə gələn foton ilə səpilən foton arasındakı enerji fərqi tam olaraq molekulyar 2 titrəyiş səviyyəsi arasındakı enerjiyə bərabərdir. Molekul ilə foton arasındakı elastik olmayan toqquşmalar isə Raman səpilmələri olaraq adlandırılır.
- 2) Stoks səpilməsi (səpilən fotonun enerjisi = Reley -  $\Delta E$ ) - Əgər titrəyiş enerjisi toqquşmadan sonra artırsa, səpilən fotonun enerjisi də eyni miqdarda azalır, buna görə səpilən işıq düşən işıqdan böyük dalğa uzunluqlarında müşahidə edilə bilər. Bu səpilmə Stoks səpilməsi adlandırılır. Səpilmə zamanı enerji qorunub saxlanılır.
- 3) Anti-Stoks səpilməsi (səpilən fotonun enerjisi = Reley +  $\Delta E$ ) - Əgər titrəyiş enerjisi toqquşmadan sonra azalır, səpilən fotonun enerjisi də eyni miqdarda artacaq. Buna görə səpilən şüa düşən şüadan qısa dalğa uzunluqlarında müşahidə edilir. Bu hadisə Anti-Stoks səpilmə olaraq adlandırılır.



**Şəkil 2.5.1** Otaq temperaturunda,  $\text{CCl}_4$  nümunəsinin İKS spektri ( $\text{Ar}^+$  lazeri) verilmişdir.

İKS spektroskopiyasında istifadə olunan əsas terminlər Cədvəl 2.5.1-də göstərilmişdir.

**Cədvəl 2.5.1**

**İKS spektroskopiyasında istifadə olunan əsas terminlər.**

<b>Stoks səpilməsi</b>	<b>Anti-Stoks səpilməsi</b>
$\hbar\omega_s = \hbar\omega_i - \hbar\omega_0$	$\hbar\omega_{As} = \hbar\omega_i + \hbar\omega_0$
$\hbar k_s = \hbar k_i - \hbar k_0$	$\hbar k_{as} = \hbar k_i + \hbar k_0$
$\omega_s$ – tezlik, $k_s$ – səpilən fotonun dalğa vektoru	$\omega_{As}$ – tezlik, $k_{as}$ – səpilən fotonun dalğa vektoru
$w_i$ – tezlik, $k_i$ – düşən fotonun dalğa vektoru	
$w_0$ – tezlik, $k_0$ – vektorial fonon dalğası	
<b>Yayılan işıq intensivliyi</b>	
$I_s \propto  e_i \cdot R \cdot e_s ^2$ ; $e_i$ – düşən işıqın polyarizasiyası	
$e_s$ – səpilən işıqın polyarizasiyası, $R$ – raman tenzoru	

İKS spektroskopiya metodu ilə nümunələrin optik xassələrinin təhlilində işığın 2 simmetrik yayılma istiqaməti əsas götürülür. Buna Raman səpilmələrinin geometriyası deyilir [105, c.409, s.47]. İKS müşahidələri əsasən 4 geometrik vektorla ifadə edilir:  $P_s|P_i, P_s|P_0$ ,  $P=X, Y, Z$ . Burada,  $P_s$  və  $P_0$  düşən və səpilən işığın yayılma istiqamətidir,  $P_i$  və  $P_s$  isə düşən və səpilən işığın elektrik sahəsinin polyarizasiya istiqamətləridir.

[105, c.409, s.48] Ədəbiyyatdan məlumdur ki, bütün İKS hadisələri 2 elektron-foton qarşılıqlı təsirinin kombinasiyasıdır. Bu səpilmə hadisələri əsasən nümunə daxilindəki defektlərin strukturundan asılıdır. Rezonans İKS prosesləri üçün Raman intensivliyi hesablanır. Fonon enerjisi  $c$  və düşən lazer enerjisinin bir funksiyası olaraq birinci dərəcədə İKS intensivliyi,  $E_L$  ifadəsindən hesablanır.

$$I(\omega, E_L) = C \left( \frac{E_a}{E_j} \right) [n(q, \mu) + 1] \sum_j \left[ \frac{M^d(k-q, jb) M^{ep}(q, ba) M^d(k, aj)}{E_{aj}(\Delta E_{aj} - \hbar\omega)} \right]^2 \quad (2.5.1)$$

Burada  $C$ ,  $(n, m)$ -dən asılı olmayan sabitdir,  $n$   $(q, m)$  xətlərin sayı,  $\Delta E_{aj} = E_L - (E_a - E_j) - i\gamma$  və  $j$ ,  $a$  və  $b$  müvafiq olaraq başlanğıc vəziyyəti, həyəcanlanmış vəziyyətləri və elektronun dağılmış vəziyyətini,  $\gamma$  isə rezonans hadisəsinin genişlənmə faktorunu göstərir. Dalğa vektoru  $k$ -dakı bir elektron,  $j$ -dən  $a$ -ya keçid etmək üçün hadisə fotonu ilə elektrik dipolu  $M^d(k, aj)$  ilə həyəcanlandırılır və bir elektron fononu ilə fonon dalğa vektoru  $q$  ilə fonon yayaraq səpələnir.  $E_{aj}$  üçün  $j$  və  $a$  modları arasındakı enerji ayrılması, rezonans şərtləri ya düşən fotonda,  $E_L = E_{aj}$  və ya səpilmə fotonda  $E_L = E_{aj} + \hbar\omega$  meydana gəlir. İkinci dərəcədə  $E_L$ -in funksiyası olaraq iki fononun İKS intensivliyi və  $\omega = \omega_1 + \omega_2$  iki fononun enerjilərinin cəmi oxşar bir formula ilə aşağıdakı kimi verilmişdir:

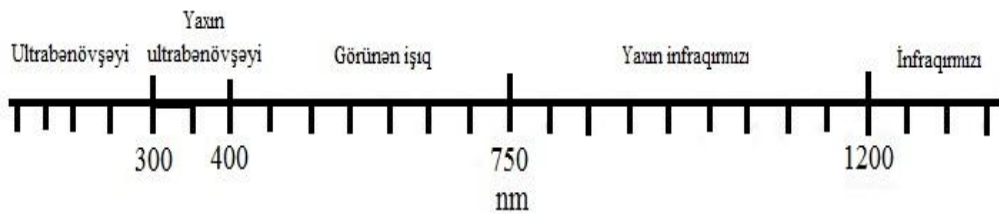
$$I(\omega, E_L) = \sum_j \left| \sum_{a,b,\omega_1,\omega_2} J_{a,b}(\omega_1, \omega_2) \right|^2 \quad (2.5.2)$$

$$J_{a,b}(\omega_1, \omega_2) = \frac{M^d(k, jc) M^{ep}(-q, cb) M^{ep}(q, ba) M^d(k, aj)}{\Delta E_{aj}(\Delta E_{bj} - \hbar\omega_1)(\Delta E_{aj} - \hbar\omega_1 - \hbar\omega_2)} \quad (2.5.3)$$

Burada  $q$  və  $q$  dalğa vektorları ilə birlikdə fonon səpilmə prosesləridir. Eyni zamanda 2 rezonans hal əldə etmək üçün orta səviyyəli elektronik vəziyyət  $E_{bj}$  həmişə  $E_L = E_{bj} + \hbar\omega_1$  rezonansındadır [105, c.409, s.47].

Bolsman paylanma qanununa görə otaq temperaturunda düşən işığın udulması buraxılmaya nəzərən daha çox ehtimal olunduğu üçün KS spektri Stoks sahəsində daha geniş müşahidə olunur [170, c.1, s.3].

Məlumdur ki, işığın kombinasiyalı səpilməsində yüksək intensivliyə malik şüa mənbəyi lazımdır. Bu səbəbdən KS-də lazerlərdən istifadə olunur. Nümunə görünən oblast yaxın İR spetri aralığından gələn bir lazerlə şüalandırılır [167, c.50, s.1841]. Şəkil 2.5.2-də İKS-də istifadə olunan dalğa uzunluqlarının işıq spektrində yer aldığı sahələr göstərilmişdir [148, c.3, s.1].



**Şəkil 2.5.2** Yaxın ultrabənövşəyi, görünən işıq və yaxın IR dalğa uzunluqlarının işıq spektrində yer aldığı oblastlar [148, c.3, s.1].

Təcrübənin effektiv ola bilməsi üçün dalğa uzunluğunun secimi çox vacibdir. İKS-də istifadə edilə bilən lazer dalğa uzunluqları aşağıda verilmişdir (nanometrlərlə).

Ultrabənövşəyi: 244; 257; 325; 364;

Görünən: 457; 473; 488; 514; 532; 633; 660;

Yaxın infraqırmızı: 785; 830; 980; 1064.

Görünən bölgədə yer alan mavi ya da yaşıl lazerlər və digər inorqanik materiallar, rezonans İKS və səthdə gücləndirilmiş Raman spektroskopiyaya (SGRS) tədqiqatları üçün idealdır. Cədvəl 2.5.2-də İKS-də geniş istifadə olunan bəzi lazer mənbələri və onların dalğa uzunluqları göstərilmişdir [183, c.1, s.710].

İşığın Kombinasiyalı Səpilmə metodundan bir çox nümunələri analiz etmək üçün istifadə edilə bilər. Aşağıdakı nümunələrin təhlilində geniş istifadə olunur:

- 1) Bərk cismlər, tozlar, mayələr, gəllər və qazlar,
- 2) Qeyri-üzvi, üzvi və bioloji materiallar,
- 3) Saf kimyəvi maddələr, qarışıqlar və məhlullar,
- 4) Metal oksidləri və korroziyalar.

Son zamanlar İKS metodikasından aşağıdakı elmlərdə geniş şəkildə istifadə edilir:

Arxeologiya – pigmentlərin, keramika və qiymətli daşların xarakteristikası,

Karbon materiallar – nanotrupkaların quruluşu və təmizliyi,

Kimya – quruluş, saflıq və kimyəvi reaksiya izləmə,

Geologiya – mineralların müəyyənləşdirilməsi və paylanması, faza keçidləri,

Yer elmləri – tək hüceyrələr və toxuma, dərman qarşılıqlı təsiri, xəstəlik diaqnozu,

Əczaçılıq – tərkib bərabərliyi və komponent paylanması,

## Cədvəl 2.5.2

### İKS-də geniş istifadə olunan lazer mənbələr. Nd/YAG- bərk cisimli lazer.

Lazerin tipi	Dalğa uzunluğu (nm)
Arqon ionu	488.0 və ya 514.5
Kripton ionu	530.9 və ya 647.1
Helium-Neon	632.8
Diod lazeri	785 və ya 830
Nd/YAG	1064

KS-də kəskin monoxromatik şüa əldə edildiyindən lazer mənbəyindən sonra filtr istifadə edilməsi kifayət etdiyi halda belə, bəzi hallarda dalğa uzunluğu seçicilərinə ehtiyac olunur. Seçicidən keçən işığın elektrik signalına çevrilməsi istifadə edilən dalğa uzunluğuna həssas dedektor ilə həyata keçirilir. KS-də dedektor olaraq; foto

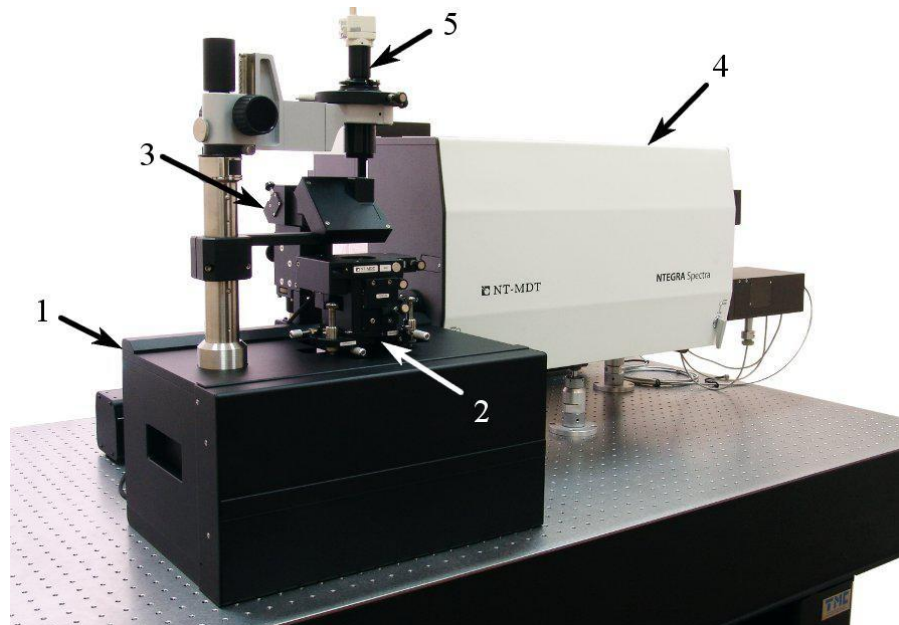
çoxaldıcı boru (FÇB) və ya fotodiod matrisləri (FDM) istifadə edilir [4, c.1, s.1038; 191, c.1, 38-39]. Son olaraq dedektordan çıxan elektrik signalı İKS spetri şəklində kompyutərə verilir [188, c.40, s.5649].

Nümunələrin İKS spektrləri NTEGRA Spectra LS PNL spektrometrində qeydə alınmışdır (Şəkil 2.5.3).

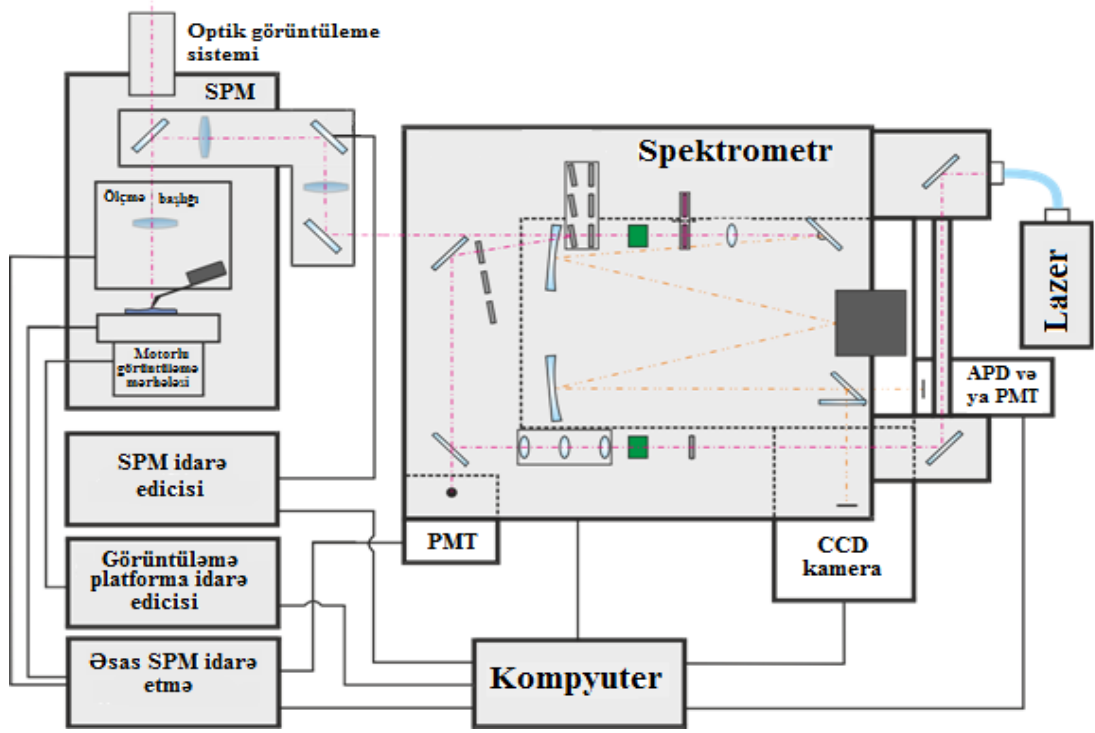
**Cədvəl 2.5.3**

**Helium-Neon lazerinin xüsusiyyətləri**

Parametrlər	Qiymətlər
Dalğa uzunluğu	633 nm
Polyarizasiya	Xətti
Polyarizasiya dərəcəsi	> 500:1
Çıxış şiddəti	35 mW qədər
Şüa səpilməsi ( $1/e^2$ )	0.66 mrad
İsinmə dövrü	< 15 dəqiqə
İşləmə temperaturu	-20 - 40° C



**Şəkil 2.5.3 NTEGRA Spectra LS PNL spektrometrinin ümumi görünüşü.**



**Şəkil 2.5.4 NTEGRA Spectra LS PNL spektrometrinin blok diaqramı**

Şəkil 2.5.4 - də istifadə olunan NTEGRA Spectra LS PNL spektrometrinin blok diaqramı göstərilmişdir. Spektrometrdə Helium/Neon lazerindən istifadə edilmişdir. Helium-Neon lazerinin xüsusiyyətləri Cədvəl 2.5.3-də göstərilmişdir.

İstifadə etdiyimiz NTEGRA Spectra LS PNL spektrometri aşağıdakı əsas hissələrdən ibarətdir:

1. Baza blokundakı mühərrik tarama platforması nümunə səthinin 2D/3D taramasını göstərir, nümunəni proba yaxınlaşdırır və nümunəni 3 fəza oxu boyunca yerləşdirilir;
2. Optik ölçü başlığı. Nümunə səthinin optik/Atom Güc mikroskopu (AGM) görünüşü üçün xidmət edir;
3. Lazer radiasiya I/O modulu. Spektral bloku ölçü başlığı ilə birləşdirmək üçün istifadə olunur.
4. Spektral birləşmə. Spektrometriya ölçmələri üçün istifadə olunur, spektral vahidə aşağıdakı modullar daxildir: Spektrometr; Lazerlər; Optik fiber daşınma sistemi;
5. Dedektorlar. Tədqiq olunan obyektədən gələn siqnalları aşkar etmək üçün istifadə

edilir. Spektrometr aşağıdakı detektorlarla təchiz oluna bilər: CCD kamera; APD (Uçqun fotodiod) modulu; PMT (Fotoçoxaldıcı) modulu.

6. Optik görüntüləmə sistemi. Lazer şüalarını konsulda hədəfləmək, hədəf səthindəki tarama sahəsini seçmək, yaxınlaşma və tarama əməliyyatlarını izləmək üçün istifadə olunur.
7. İdarəetmə sistemi: Əsas SPM idarəetmə; SPM idarəetmə; Kompyuter; İnterfeys lövhələri.

## **2.6. İmpedans spektrinin tədqiqi metodikası**

İmpedansın ölçülməsi üçün bir sıra metodlar mövcuddur: körpü, rezonans, volt-ampere və s. bunları birləşdirərək, impedans spektroskopiyası üçün standart tezlik aralığında ölçmələr aparmaq mümkündür: bir Hz fraksiyasından bir neçə MHz-ə qədər. Əvvəllər alternativ cərəyanların ölçülməsi üçün kifayət qədər sadə körpü dövrləri istifadə olunurdu, bunun çatışmazlıqlarından biri müəyyən bir cihazda tətbiq olunan məhdud tezlik diapazonudur. Müasir nisbətən sadə cihazların işləmə prinsipi, RLC sayğacları, bir qayda olaraq, tezlik aralığının aşağı sərhədini təxminən 10 Hz-ə qədər azaltmağa imkan verən bir kompensasiya dövrəsinə sahib olan bir körpüdən istifadə edilərək tətbiq olunur. Tezlik diapazonunun uzadılması bir neçə metodu birləşdirərək həyata keçirilir. Tezlik spektr analizatorları kimi rəqəmsal korrelyasiya ölçmə sistemlərinin inkişafı etməsi nəticəsində, 1Hz fraksiyasından 10MHz-ə qədər çox geniş bir tezlik diapazonunda impedans tədqiqatlarının daha da dəqiqliklə aparılması mümkün olmuşdur.

İmpedans spektroskopoya metodu əsasən elektrokimyəvi sistemlərin tədqiqatı üçün hazırlanmışdır [41, c.1, s.86]. Lakin daha sonra bərk cisimlərin öyrənilməsində istifadə olunmağa başladı. İmpedans spektroskopiyası 1970 illərdən başlayaraq bərk cisimlər fizikasında geniş tətbiq olunmağa başladı. Bu gün bu metod kondensə olunan materiallar fizikası və materialşünaslığın müxtəlif sahələrində istifadə olunur. İmpedans spektroskopiyasının köməkliyi ilə mikrostruktur diqqətə alınaraq nümunədəki yükdaşıyıcıların nəqli ilə əlaqədar məlumat almaq olur [37, s.9].

Eksperimental nəticələri təhlil edərkən ekvivalent dövrələrin yaxınlaşdırılmasını, yəni elektrik cərəyanının bilinən impedans komponentləri ilə əldə edilən tezliklə asılılıqları  $Z'$  və  $Z''$  təxminən istifadə etmək əlverişlidir. Bu yanaşma çərçivəsində nümunədə olan fiziki proseslər ekvivalent dövrənin müvafiq elementləri ilə keyfiyyətə və kəmiyyətlə təsvir edilə bilər.

Diffuziya prosesi bir qayda olaraq, Varburger impedansı tərəfindən qodoqrafda: sonsuz diffuziya uzunluğunun elementi və ya sonlu diffuziya uzunluğunun elementi şəklində əks olunur. Müvafiq dövrü ayrıləri və impedansın analitik ifadələri şəklində göstərilmişdir. [150, c.35, s.1483; 104, c.40, s.262; 162, c.56, s.1262].

Şəkil 2.6.1-də müvafiq qodoqram ayrısı və eləcə də impedansın analitik ifadələri göstərilmişdir. Bir neçə müxtəlif elektrik sxeminin eyni impedans spektrinə malik olmağını qeyd etmək olar. Bu səbəbdən bu qodoqraf üçün nümunə ekvivalentinin seçilməsi tam olaraq birmənalı deyil. İmpedansın ölçülməsi üçün bir sıra üsullar mövcuddur: körpü, rezonans, volt-amper və s. İmpedans spektroskopiyasında ölçmələri standart tezlik diapazonunda (1Hz-dən bir neçə MHz-ə qədər) aparmaq mümkündür [37, s.14].

Elektrodlarla toxunan nümunənin kombinasiyasının ekvivalent sxemini vermək (Şəkil 2.6.2) əsas şərtidir. Bu səbəbə görə ölçmələri geniş tezlik intervalında aparmaq və bu tezlik oblastını elə götürmək lazımdır ki, ölçülən qiymət nümunənin həcmi müqavimətinə uyğun olsun. Adətən bu sahədə aparılan ölçmələrdə təcridedici elektrodlardan istifadə olunur yəni platin, gümüş və başqa elektrodlardan. Bu zaman elektrod elektrolit sərhəddində yüklərin boşalması halı müşaidə olunmur.

Kompleks impedans ölçmələri zamana görə sinusoidal qanunla baş verdiyi üçün impedans spektroskopiya metodunda istifadə olan əsas anlayışları nəzərdən keçirdək.

Xüsusi ilə, periodik bir qanuna görə dəyişən bir potensialın həqiqi (real) komponenti  $E = \Delta E (\cos \omega t + j \sin \omega t) = \Delta E e^{j \omega t}$  kompleks gərginliyi ilə təyin edilə bilər.

$$I = E/R \quad (2.6.1)$$

(2.15) ifadəsini differensiallasaq:

$$\mathbf{I} = dq/dt = C(dE/dt) \quad (2.6.2)$$

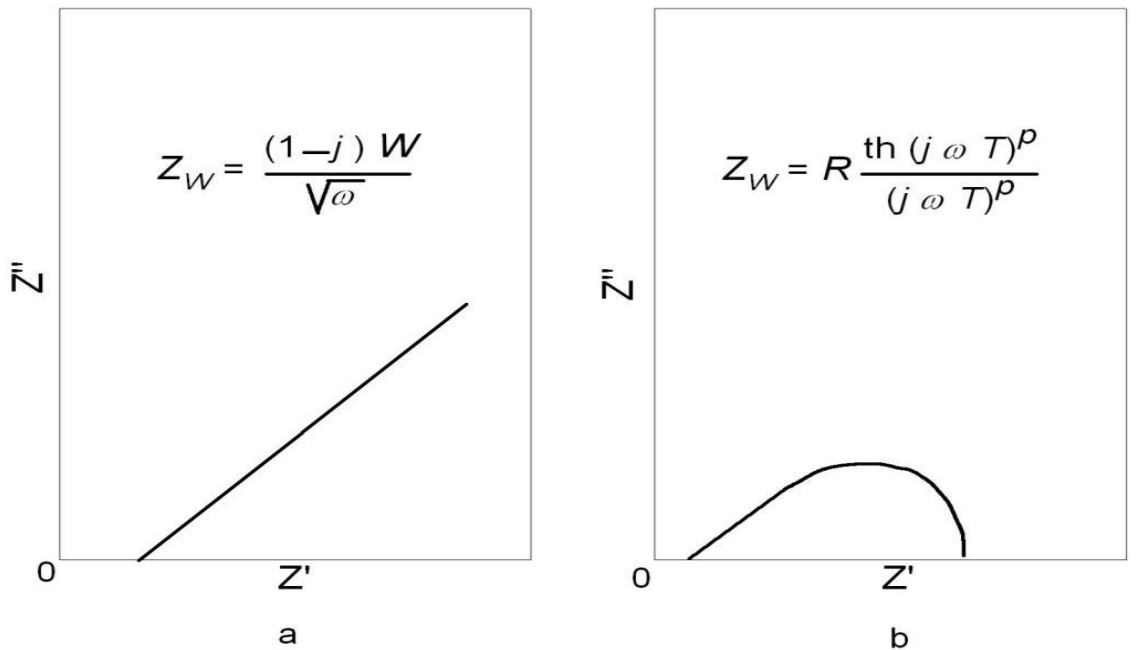
$E = \Delta E (\cos \omega t + j \sin \omega t) = \Delta E e^{j\omega t}$  istifadə edərək aşağıdakı düsturu alırıq.

Aktiv müqavimət üçün Om qanunu aşağıdakı kimi ifadə olunur

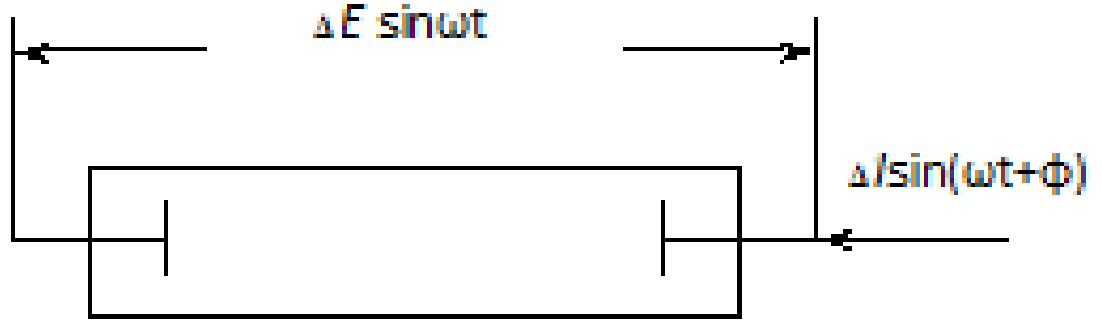
$$\mathbf{I} = \omega C \Delta E \cdot \cos \omega t \quad (2.6.3)$$

$1/\omega C$  ifadəsi tutum müqaviməti adlanır və  $X_C$  simvolu ilə ifadə edilir. Əvəzlənmədən sonra ifadə aşağıdakı kimi olur:

$$\mathbf{I} = \Delta E / X_C \cdot \sin(\omega t + \pi/2) \quad (2.6.4)$$



**Şəkil 2.6.1 Sonsuz(a) və sonlu(b) diffuziya uzunluğunun elementləri üçün Warburg impedansı: Qodoqraf və analitik impedans əyriləri [37, s.9].**



**Şəkil 2.6.2 İkikontaklı nümunənin ölçü sxemi.**

Elektrik yükü  $C$  tutumlu kondensatorun löhvələrindəki yük aşağıdakı düsturla ifadə olur;

$$q = CE \quad (2.6.5)$$

(2.6.4) ifadəsi Om qanununa bənzəyir. Lakin, sonuncu halda  $1/\omega C$  -ni  $X_C$  ilə əvəz edilir və bu halda faza bucağı sıfır deyil və müsbət  $\pi/2$ -ə bərabər olub. Elektrik cərəyanı fazaca gərginliyi qabaqlayır. Şəkil 2.6.3 və 2.6.4 hər iki faza üçün ekvivalent təsvirləri və  $I-t$  və ya  $E-t$  koordinatlarında əlavə asılılığı göstərir [37, s.48].

Omik müqavimətlərə və kondensatorlara görə hər bir elementdə gərginliyin düşməsi:

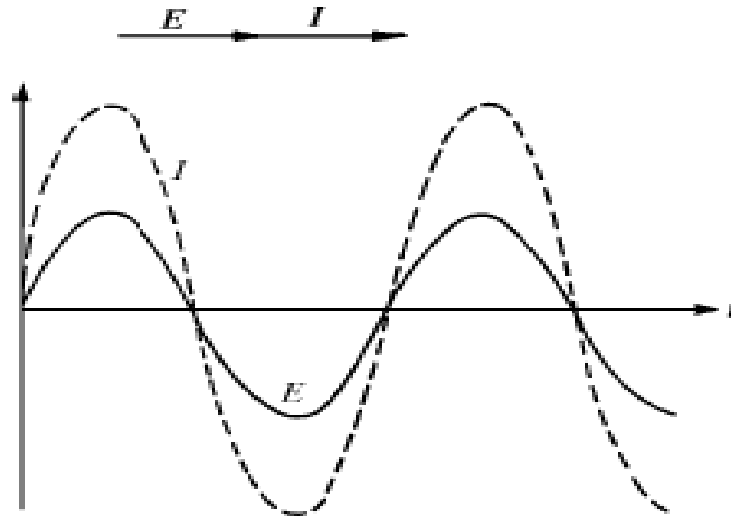
$$E = ER + EC = I(R - jX_C), \text{ və ya } E = IZ \quad (2.6.6)$$

Bu ifadədə Om qanunu  $-jX_C$  (kompleks ədəd şəklində) yazılır.  $Z = (R - jX_C)$  impedans adlanır.

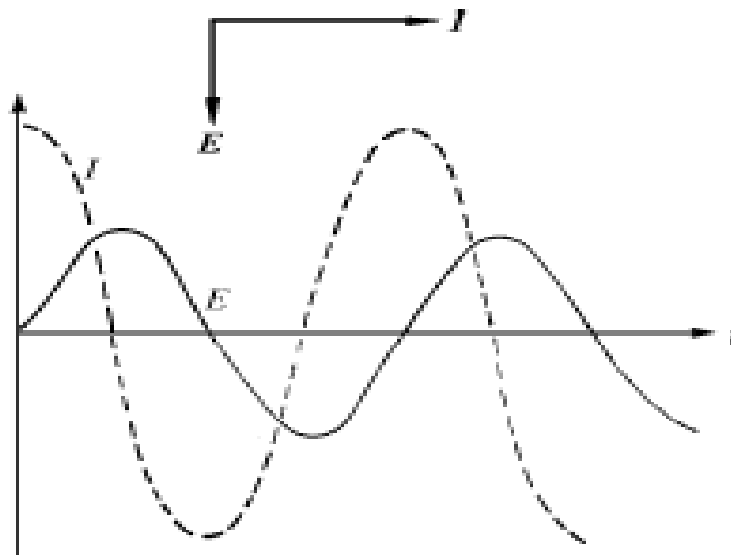
Faza bucaq  $\varphi$  olaraq göstərildikdə:

$$\text{tg } \varphi = X_C / R = 1 / \omega RC \quad (2.6.7)$$

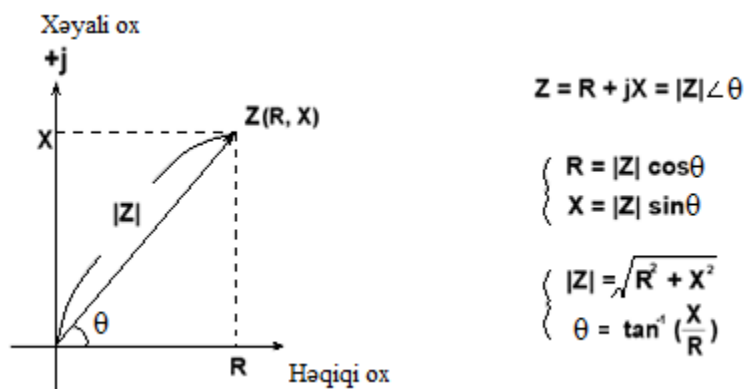
Şəkil 2.6.5-də göstərilədiyi kimi impedans vektoru real hissədən (müqavimət,  $R$ ) və xəyali hissədən (reaktivlik,  $X$ ) ibarətdir. İmpedans  $R+jX$  şəklində düzbucaqlı koordinatlarda və ya  $|Z|$  -nin faza bucağından asılılığı kimi polyar koordinatlarda riyazi olaraq ifadə edilə bilər.



Şəkil 2.6.3 Təmiz omik zəncirləri üçün fazor, cərəyan və gərginlik arasındakı nisbətənin zaman asılılığı formasında ekvivalent görüntüsü.



Şəkil 2.6.4  $90^\circ$ -ə bərabər olan,  $\varphi$  bucağının faza keçidini qeyd edən, tutum müqaviməti olan zəncirlər üçün fazor, cərəyan və gərginlik arasındakı nisbətənin zaman asılılığı formasında ekvivalent görüntüsü.



**Şəkil 2.6.5 İmpedans (Z)nin real (R) və xəyali(X) hissələri göstərilmişdir.**

Yuxarıda qeyd etdiyimiz vektor işarəmələrdə polyar formanı sadələşdirərək bu formada yazmaq olar:

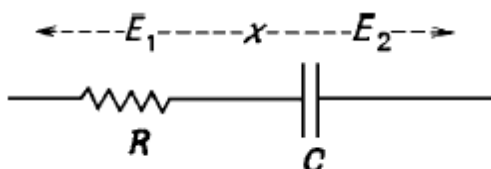
$$E = E \exp j\varphi \quad (2.6.8)$$

$$I = I \exp j\varphi \quad (2.6.9)$$

$$Z = Z \exp j\varphi \quad (2.6.10)$$

$$Y = \frac{1}{Z} \exp -j\varphi \quad (2.6.11)$$

Ardıcıl müqavimət və tutum birləşməsinə baxaq (Şəkil 2.6.6). Burada  $E_1$  və  $E_2$  müvafiq olaraq gərginlik düşgülərinin qiymətləridir.



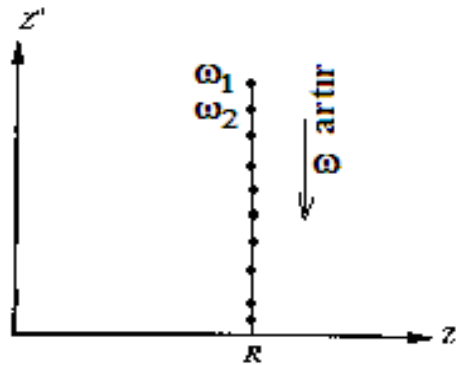
**Şəkil 2.6.6 Müqavimət və tutumun ardıcıl birləşdirilməsi.**

Cərəyan və sinusoidal gərginlik arasındakı faza fərqi  $90^\circ$  dərəcə olmasından və tutum müqaviməti xəyali ədəd olduğundan  $J$ -ni özündə saxlayır. Və nəticə olaraq dövrənin tam müqaviməti  $Z$  (impedans) bu düsturlarla ifadə olunur.

$$Z=R+\frac{1}{JC\omega}=R-\frac{J}{C\omega} \quad (2.6.12)$$

$$Z=Z' - JZ'' \quad (2.6.13)$$

Müqavimət və tutumun ardıcıl birləşməsinə uyğun olaraq naykvist qadoqramını aşağıdakı kimi göstətmək olar (Şəkil 2.6.7).



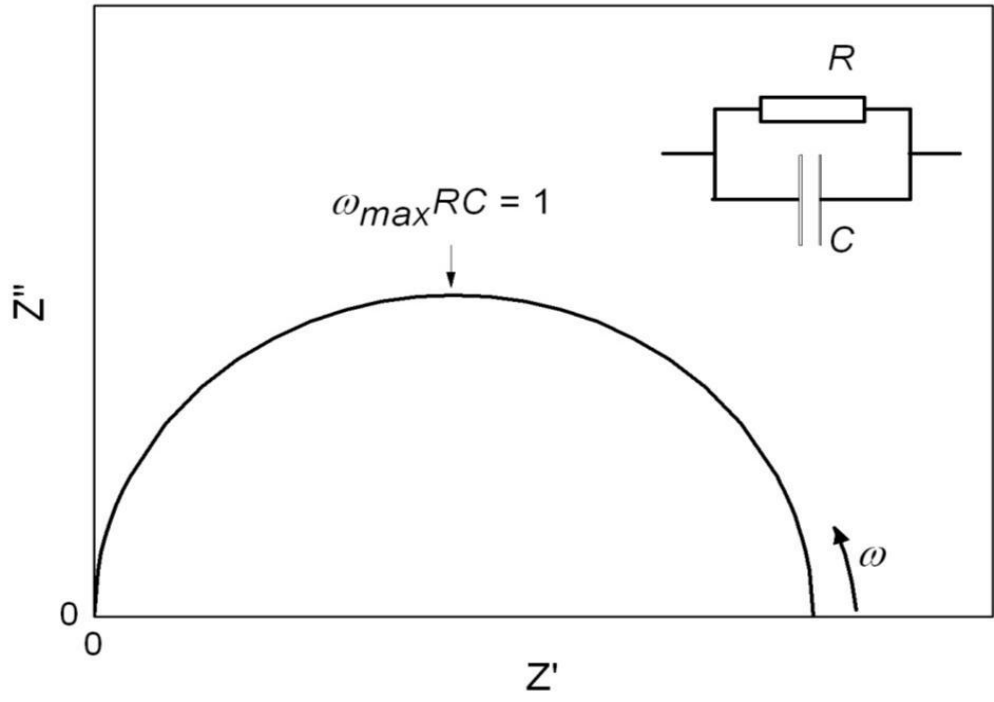
**Şəkil 2.6.7 Müqavimət və tutumun ardıcıl birləşdirilməsi üçün impedans**

Müqavimət və tutumun paralel birləşməsinə baxaq. Burada impedansı aşağıdakı düsturla ifadə olunur.

$$Z = \frac{R}{(1+j\omega RC)} = \frac{R}{1+(RC\omega)^2} - R \frac{jRC\omega}{1+(RC\omega)^2} \quad (2.6.14)$$

Burada,  $Z' = \frac{R}{1+(RC\omega)^2}$  və  $Z'' = R \frac{RC\omega}{1+(RC\omega)^2}$  bərabərdir.

Müqavimət və tutumun paralel birləşməsi üçün naykvist qadoqramları Şəkil 2.6.8 – də verilmişdir [37, s.8].



Şəkil 2.6.8 Müqavimət və tutumun paralel birləşdirilməsi üçün impedans

## FƏSİL III. TlGaSe<sub>2</sub> VƏ TlInS<sub>2</sub> KRİSTALLARININ ELEKTRİK VƏ DİELEKTRİK XASSƏLƏRİNİN TƏDQIQI

Bu fəsildə TlGaSe<sub>2</sub> və TlInS<sub>2</sub> kristallarının 300-550 K temperatur aralığındakı tədqiqatlarının nəticələri verilmişdir. TlGaSe<sub>2</sub> və TlInS<sub>2</sub> birləşmələrinin dielektrik, elektrik xassələrinə qamma kvantlarının təsiri tədqiq edilmişdir. Dielektrik nüfuzluğunun, dielektrik itki bucağının temperatur asılılıqları və sabit elektrik sahələrində faza keçidləri 20 Mrad qamma kvantları ilə şüalanmadan əvvəl və sonra müqayisəli şəkildə öyrənilmişdir. TlInS<sub>2</sub> kristalının həm ilkin halda Işıqın Kombinasiyalı Səpilmə (İKS) spektrləri tədqiq edilmişdir.

### 3.1 TlGaSe<sub>2</sub> kristalının dielektrik nüfuzluğu.

İlk dəfə olaraq TlGaSe<sub>2</sub> kristalının rentgen diffraksiya tədqiqatları [118, c.54, s.42] işində aparılmış və göstərilmişdir ki, PQS/14/mcm tetroqanal simmetriyada kristallaşır. [158, s.117] işinə görə, TlGaSe<sub>2</sub> birləşməsi PQS\C<sub>s</sub><sup>4</sup> və ya C<sub>2h</sub><sup>6</sup> mərkəzisimmetrik monoklin elementar qəfəsə malikdir. Bu iş, TlGaSe<sub>2</sub> - nin ПГC P2<sub>1</sub>/m ilə monoklin sistemdə kristallaştığını göstərilən [131, c.6, s.413; 133, c.9, s.121] tədqiqatların nəticələrinə uyğundur.

[132, c.14, s.262] görə TlGaSe<sub>2</sub> monokristalları tünd qırmızı rənglidir. TlGaSe<sub>2</sub> üçün qəfəs parametrləri  $a = b = 7.60 \text{ \AA}$ ,  $c = 62.72 \text{ \AA}$ ,  $\beta = 90^\circ 20'$ -ə bərabərdir. [133, c.9, s.122] -işində TlGaSe<sub>2</sub> kristalının struktur tədqiqatlarının nəticələri və qəfəs parametrlərinin qiymətləri verilmişdir. Göstərilmişdir ki, bu kristalların sinqoniyası monoklinik PQS P2/M.

[157, c.438, s.258] - işdə TlGaSe<sub>2</sub> birləşməsinin daha detaylı rentgen diffraksiya tədqiqatları aparılmışdır və elementar qəfəsdə atomların koordinatları təyin edilmişdir. Kristalın quruluşunu təyin etmək üçün istifadə olunan TlGaSe<sub>2</sub> kristalları vakuum sublimasiya yolu ilə sintez edilib. TlGaSe<sub>2</sub> kristalı monoklin kimi təyin edilərək PQS C<sub>c</sub> (C<sub>s</sub><sup>3</sup>) və kristal qəfəsin parametrləri  $a=10,772 \text{ \AA}$ ,  $b=10,771 \text{ \AA}$ ,  $c=15,636 \text{ \AA}$ ,  $\beta=100,6^\circ$ ,  $z=16$  bərabər olduğu göstərilmişdir.

[12, c.2, s.5] işində, TlGaSe<sub>2</sub> kristalının kristal qəfəsin parametrləri diffraktometrik və elektron diffraksiya metodları ilə, eyni zamanda rentgen diffraksiya metodu ilə müəyyən edilmişdir. İşin nəticələrinə görə, qəfəs parametrlərinin orta qiymətləri TlGaSe<sub>2</sub> monokristalı üçün  $a = 10.715 \text{ \AA}$ ,  $b = 10.694 \text{ \AA}$ ,  $c = 12.690 \text{ \AA}$  olduğu göstərilmişdir.

TlGaSe<sub>2</sub> kristalının strukturunun [7, c.36, s.36] kristalokimyəvi analizi göstərdi ki, birləşmənin əsas struktur vahidi olan ikiölçülü periodik laylardan ibarətdir və Ga<sub>4</sub>Se<sub>10</sub> tetraedrik qruplarından təşkil olunmuşdur. Onlar Se<sub>6</sub> oktaedrinin mərkəzi boşluqların ətraflarında almaz qanunula yerləşmiş dörd elementar tetraedrik Ga<sub>4</sub>Se<sub>10</sub> birləşməsindən təmsil olunublar. Kristaldakı bu cür (oxşar) laylar kristaloqrafik müstəviyə paralel (001) və ya “c” oxuna perpendikulyar istiqamətdədir.

Hər bir sonrakı tetraedrik təbəqə əvvəlki təbəqəyə nisbətən 90° dərəcə bucaq qədər dönmüş vəziyyətindədir. Yalnız bu layların növbələşməsi trigonal-prizmatik boşluqların meydana gəlməsini mümkün edir və Tl<sup>+</sup> ionlarının bu boşluqları doldurmasını əlverişli edir.

[93, c.8, s.131] - işində, TlGaSe<sub>2</sub> birləşməsinin bir neçə nümunəsində neytron-difraksiya dəyişikliklərinə baxılarkən iki növ difraksiya şəkli müşahidə edilmişdir. Bu, belə bir nəticəyə gəlməyə imkan verdi ki, α-TlGaSe<sub>2</sub> və β-TlGaSe<sub>2</sub> olmaqla iki politip modifikasiyaya malikdir.

[89, c.83, s.163] işidə dielektrik nüfuzluğunun həqiqi və xəyalı hissələrinin ( $\epsilon'(T)$  və  $\epsilon''(T)$ ) temperatur asılılıqlarında temperatur histerezisləri ( $\Delta T=0,5K$ ) müşahidə edildiyi üçün faza keçidinin 1-ci növ faza keçidi adlandırıldı. Göstərilmişdir ki,  $T_1 = 119K$ -da faza keçidi ikinci növ keçid,  $T_2 = 107K$ -da ( $107K$  – də parafazadan ferroelektrik fazaya keçid) isə birinci növ keçiddir.  $120K$ -dən başlayaraq yumşaq modanın iki komponentə ayrılması müşahidə olunur ki, onlardan biri relaksasiyalıdır. Tədqiq olunan temperatur intervalında TlGaSe<sub>2</sub> birləşməsində dielektrik histerizis ilgəyi müşahidə edilməmişdir.

[25, c.29, s.3328] işinin müəllifləri mikrodalğalı dielektrik spektroskopiya metodu ilə TlGaSe<sub>2</sub> kristalının yumşaq seqnetoelektrik modaya əsaslanan tam dielektrik spektrini almışlar.  $T \rightarrow T_1$  –də paraelektrik fazada yumşaq fonon modunun

tezliyi  $\lambda_M=33(T-T_C)^{1/2}$  GHzs qanununa görə temperaturdan asılıdır və  $T_i$  temperatur bu tezliy 110GHz-ə qədər azalır onun sönməsi 75 GHzs qədər artır. Göstərilmişdir ki,  $TlGaSe_2$  kristalı məxsusi seqnetoelektrlərə aiddir. Əldə edilən nəticələr  $107<T<119K$  aralığında disparate fazanın mövcudluğunu təsdiqləyir.

[124, c.73, s.260] - da aşağı temperatur fazasında  $TlGaSe_2$  -nın seqnetoelektrik halının mümkünlüyünü aydınlaşdırmaq məqsədi ilə, dielektrik nüfuzluğu  $\epsilon$ , dielektrik itgi bucağının tangensi ( $tg\delta$ ) və istilik tutumu  $C$ -nin temperatur asılılıqları, Işığın kombinasiyalı səpilmə və rentgen difraksiyası  $10\leq T\leq 300K$  temperatur aralığında tədqiq edilmişdir.  $\epsilon'$  və  $C$  anomaliyaları  $T_1=110K$  və  $T_2=120K$  yaxınlığında qeyd olunub.  $T_i$  -dən aşağı temperaturda histerezis ilgəyinin olması seqnetoelektrik fazanın olmasını subut edir.  $T_1$  temperaturu yaxınlığında müşahidə olunan simmetriyanın  $C2/c$ -dən  $C$ -ə dəyişməsi səthdə  $ab$   $Tl$  atomlarının zəif yerdəyişməsi ilə əlaqədardır.  $T_1$ -dən aşağı temperaturda seqnetoelektrik xassələrin yaranması  $Tl^+$  iyonunun stexiometrik olaraq aktiv konfigurasiyası ilə əlaqəlidir.  $T_1$  və  $T_2$  arasında modulyasiya edilmiş strukturun mövcudluğu güman edilir [8, c.9, s.41].

[152, s.3699] - cü işdə,  $TlGaSe_2$  birləşməsinin paraelektrik disparate və aşağı temperaturu seqnetoelektrik faza quruluşunun rentgen difraksiya tədqiqatlarının nəticələri verilmişdir. Göstərilmişdir ki, 117K-dən yuxarı temperaturlarda paraelektrik fazada, hhl tipli difraksiya refleksi tək  $h$   $C$  oxu istiqamətində uzanır və bu da hər dördüncü atom qatında  $C$  oxuna perpendikulyar defekllərin olması ilə əlaqələndirilir. 110-117K temperatur aralığında kristal disparate struktura malikdir və dalğa vektorun modulyasiyası ( $\delta; \delta; 1/4$ ) və  $\delta = 0,02$  təyin olunur. 100K temperaturda kristal commensurate fazaya keçir və  $\delta$  - nın ədədi qiyməti kəskin sıfıra qədər azalır. Aşağı temperaturu seqnetoelektrik fazada dörtlü  $C$  parametr müşahidə olunur.

[60, s.77] - də polyarizasiya tədqiqatları göstərdi ki,  $T_C$ -dən aşağı temperatur oblastında bu kristalın aşağı temperaturu fazanın seqnetoelektrik xüsusiyyətlərini göstərən dielektrik histerezis ilgəyi müşahidə olunur. Bu polyarizasiya xətti olaraq böyüyür və  $1,3\cdot 10^{-7}$  Kl/sm<sup>2</sup> çatır. Bu temperaturlarda koerotiv sahənin qiyməti

təxminən 40kV/m-ə bərabərdir. 103-107K ikinci faza keçidli qeyri məxsusi seqnetoelektriklərə xas olan spontan polyarizasiyanın qiyməti çox kiçik olur.

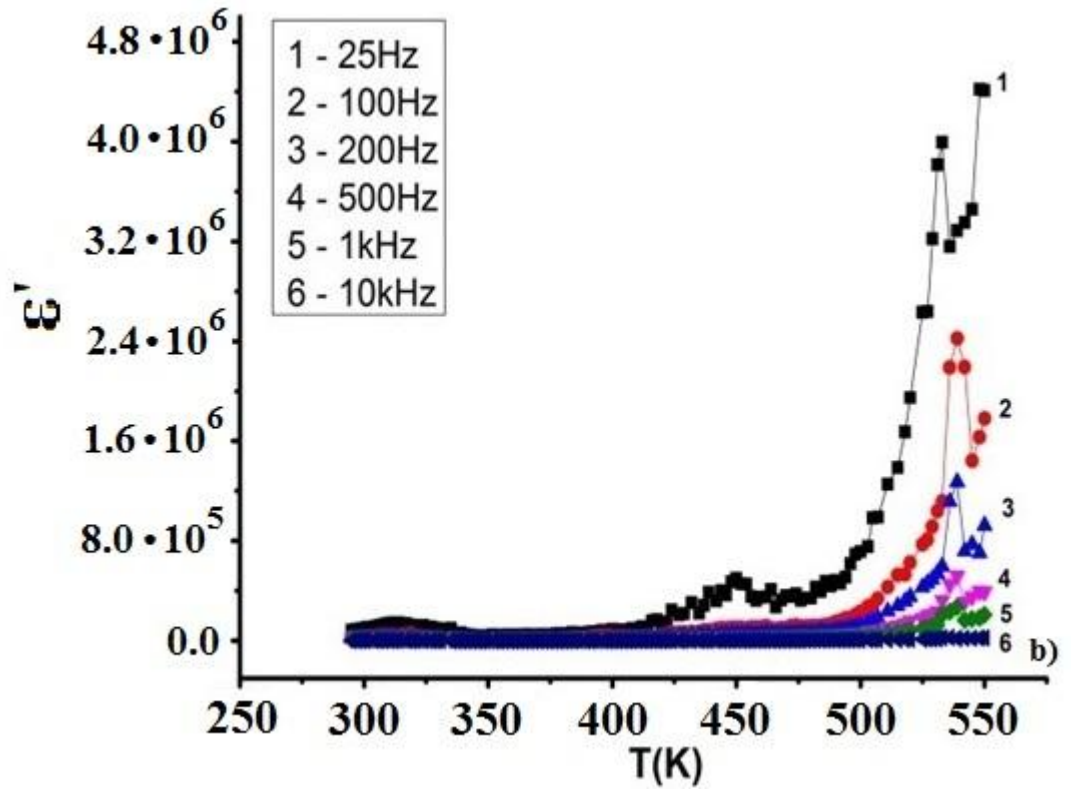
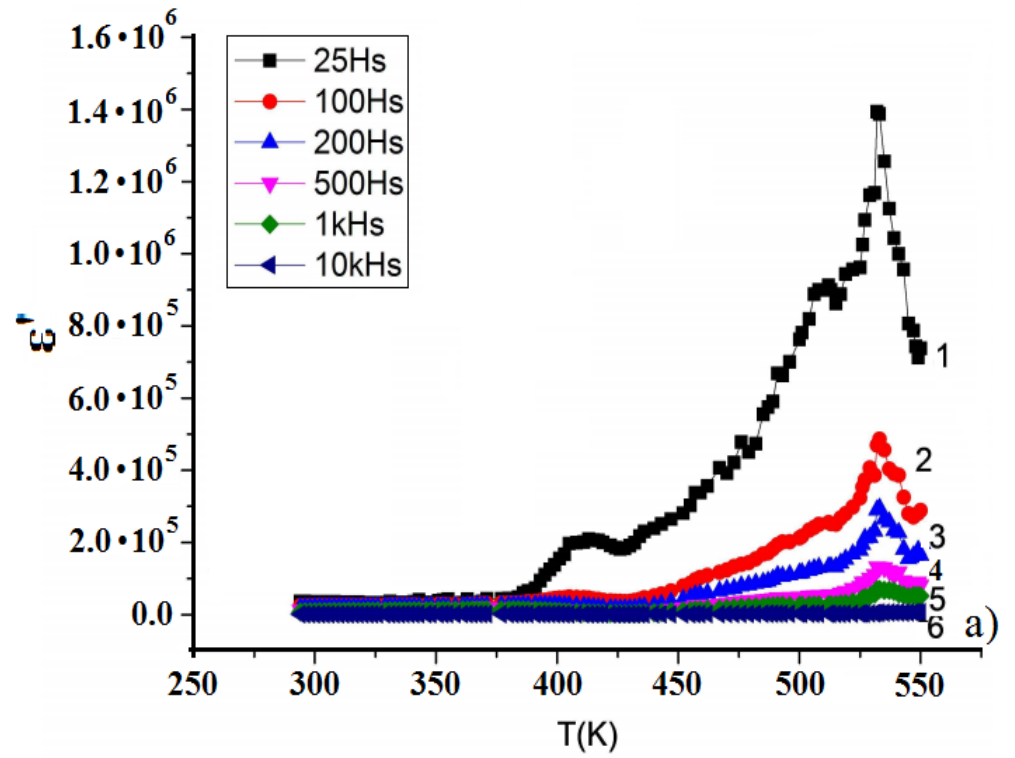
Yuxarıda qeyd olunanlara baxmayaraq, paraelektrik fazada ( $T > T_c$ ) TlGaSe<sub>2</sub> monokristalının elektrik və dielektrik xassələri öyrənilməmişdir. Bu tədqiqatın əsas məqsədi TlGaSe<sub>2</sub> kristallarında yüksək temperaturlarda dielektrik anomaliyanın təbiətini təyin etməkdir.

[57, c.45, s.1991; 58, c.46, s.998] işlərdən məlum olduğu kimi ion keçiriciliyə malik kristallarda temperaturun artması ilə elektrik keçiriciliyi də artır. Bununla yanaşı dielektrik nüfuzluğu eksponensial olaraq artır və yuxarı temperatur oblastında qiyməti aşağı temperatur oblastına nisbətən bir neçə dəfə böyük olur.

TlGaSe<sub>2</sub> kristalının qamma kvantlarla şüalanmadan öncə və sonrakı dielektrik nüfuzluğunun temperatur asılılığı tədqiq olunaraq, (şəkil 3.1.1) –də verilmişdir. Tədqiqat 275-550K intervalında və 25Hz-1MHs tezlik oblastında aparılmışdır. Burada kristalın tetraqonal (“c”) oxuna paralel istiqamətdə ( $\epsilon_{||}(T)$ ) ölçmələr aparılmışdır. Şəkil 3.1.1(a)-dan görüldüyü kimi TlGaSe<sub>2</sub> kristalında temperaturun müəyyən bir kritik qiymətində ( $T_{kp} = 415$  K,  $T_{kp} = 500$  K və  $T_{kp} = 532$  K) temperaturlarında paralel istiqamətdə dielektrik nüfuzluğunun sıçrayışla artımı müşahidə edilir. Şəkil 3.1.1(a)-dan görüldüyü kimi aşağı tezlikli dielektrik dispersiya  $T > T_c$ -də müşahidə olunur və xarakteristik asılılıq  $\epsilon'(T)$  ion keçiriciliyin  $\epsilon'$  ölçülmüş dəyərində üstünlük təşkil edir. Qamma kvatrlarının təsirindən sonra TlGaSe<sub>2</sub> kristalının dielektrik nüfuzluğunun temperaturdan asılılığında dielektrik nüfuzluğunun təxminən 3 dəfə artması müşahidə edilmişdir (Şəkil 3.1.1 (b)).

[57, c.45, s.1991; 58, c.46, s.998; 32, c.21, s.2449] ədəbiyyatlarında görüldüyü kimi dielektrik nüfuzluğunun sıçrayışla artımı müşahidə edildiyi temperaturlardan yuxarı temperaturlarda  $\ln(\epsilon)$ -nun  $1/T$  asılılığındakı təcrübi nöqtələr bir düz xətt üzərində yığılarsa bu ion keçiriciliyinin olmasını xarakterizə edir və aşağıdakı düsturla ifadə edilə bilər:

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \exp(-\Delta E_a / k T) \quad (3.1.1)$$



Şəkil 3.1.1 (a,b) TiGaSe<sub>2</sub> kristalının  $\gamma$ -kvantlarla şüalanmadan öncə (a) və sonrakı (b) dielektrik nüfuzluğunun temperatur asılılığı

İfadədə  $\Delta E$  aktivləşmə enerjisidir. (3.1.1) ifadəsində  $\text{TlGaSe}_2$  kristalı üçün aktivləşmə enerjisi hesablanmışdır. Şüalanmamış halda  $\Delta E_a^1=0.54\text{eV}$ ,  $\Delta E_a^2=0.4\text{eV}$ ,  $20\text{Mrad}$  qamma kvantların təsirindən sonra isə  $\Delta E_a^1=0.5\text{eV}$ ,  $\Delta E_a^2=0.38\text{eV}$  bərabərdir. Məlumdur ki, dielektrik keçiriciliyinin belə bir asılılığı kritik temperaturlardan yuxarı temperaturlarda ion keçiriciliyinin üstün bir xarakteristikasını göstərir. Bizim əvvəlki tədqiqatlarımızda da bu tip kristallarda ion keçiriciliyinin  $\text{Tl}^+$  ionlarının hərəkətliliyi ilə bağlı olduğunu göstərmişik. Çünki  $\text{TlGaSe}_2$  kristalında Ga-Se rabitəsi Tl-Se rabitəsindən daha dayanıqlıdır.

Beləliklə,  $\epsilon'(T)$  asılılığında dielektrik nüfuzluğunun yuxarı temperaturlarda  $\ln(\epsilon)(1000/T)$ -nin xətti dəyişməsinin xarakteri,  $\text{TlGaSe}_2$  kristalının ion xarakterli olduğunu göstərir. Bununla yanaşı  $\text{TlGaSe}_2$  kristalının alt qəfəslərində  $\text{Tl}^+$  ionlarının vakansiyalar üzrə diffuziyasına əsaslanır. Bu cür dəyişmə zamanı  $\text{TlGaSe}_2$  kristalında faza keçidi nəticəsində Tl alt qəfəsinin əriməsi müşahidə olunur. Bu hal ion keçiricilər üçün xarakterik bir haldır.  $\text{TlGaSe}_2$  kristalında dielektrik nüfuzluğunun temperatur asılılığının bu cür ifadə olunması böyük ehtimal ionların defektlər üzrə “c” oxuna paralel və perpendikulyar istiqamətdə hərəkəti ilə bağlıdır.  $\text{TlGaSe}_2$  aşağı tezliklərdə yuxarı qiymətlər alması ion polyarizasiyası mexanizminə əsaslanır. Bu isə  $\text{Tl}^+$  alt qəfəsinin nizamsızlaşması (zəif əlaqəli Tl ionları) hesabına yaranır.

### **3.2. $\text{TlInS}_2$ kristalının dielektrik nüfuzluğu.**

$\text{TlInS}_2$  üçlü yarımkəçirici birləşməsi seqnetoelektrik materiallar sinfinə aiddir və fiziki xüsusiyyətlərini öyrənmək baxımından xüsusi maraq doğurur. Laylı bir quruluşa malikdirlər və səth boyunca asan bölünərək c oxuna perpendikulyar olan səthlərə yönləndirilmiş parlaq səthləri olan laylar əmələ gətirirlər.

İlk dəfə olaraq  $\text{TlInS}_2$  birləşmələri stexiometrik nisbətlərdə götürülmüş fərqi komponentlərdən sintez edilmişdir [115, c.22, s.K117].

[115, c.22, s.K118; 116, c.34, s.34] - ci işlərdə göstərilmişdir ki,  $\text{TlInS}_2$  kristalı üçlü sulfiddir və iki modifikasiyaya malikdir: 773K-də alınan aşağı temperatur fazası və 1050K-də alınan yuxarı temperatur fazası. [132, c.14, s.264]-ci işə görə  $\text{TlInS}_2$

monokristal iki rəngdə əldə edilə bilər:  $\alpha$  -  $\text{TlInS}_2$  (aşağı temperaturlu faza) – qara rəng və  $\beta$  -  $\text{TlInS}_2$  (yuxarı temperatur faza) - sarı-narıncı rəng.  $\text{TlInS}_2$  birləşməsində xarici elektronların  $4d^{10}$  konfigurasiyası və oksidləşmə dərəcəsi (+3) ilə normal bir valentliyə sahibdir. Sulfidlərdəki valent elektronları  $S^2p^4$  konfigurasiyası və (-2) oksidləşmə dərəcəsi ilə xarakterizə edilir, tallium  $6S^2$  buluduna malikdir. SP hibridləşməsinin səkkiz elektronu indiumun  $5S^25P^1$  örtüyünün 3 elektronuna, iki kükürd atomunun hər birinin  $S^2P^4$  örtüyünün 6 elektronuna və talliumun 1 elektronuna uyğun gəlir. Bu hibridləşmə indium və kükürd atomları arasında polyarize kovalent əlaqəni və sonuncunun indiuma nisbətən tetrahedral orientasiyasını təmin edir.  $\text{Tl}^+$  və  $[\text{TlS}_2]^{1+}$  arasındakı ion əlaqəsi kükürd vasitəsi ilə həyata keçirilir.

[15, c.26, s.1276; 14, s.18] işdə, statik dielektrik nüfuzluğunun, spontan polyarizasiya və  $\beta$ - $\text{TlInS}_2$  monokristalında iki qat sınımanın temperatur asılılıqları ölçülmüşdür. Dielektrik və optik xüsusiyyətlərdəki anomaliyalar  $\text{TlInS}_2$ -də 216K temperaturda struktur faza keçidlərinin olduğunu göstərir və  $T=204\text{K}$  temperaturda isə seqnetoelektrik faza keçidi müşahidə edilib ( $P_S \sim 0,2 \text{ mk} \cdot \text{Kl}/\text{sm}^2$ ).

[34, c.39, s.245; 33, s.8] işdə aparılan tədqiqatlara görə neytron difraksiya və dilatometr metodlarından istifadə olunaraq,  $\text{TlInS}_2$  birləşməsi üçün 3 faza keçidi aşkar edilmişdir:  $T=220\text{K}$ ,  $T=202-195\text{K}$  aralığında və  $T=170\text{K}$  temperaturunda. Aşkar edilmişdir ki, 220K-də uyuşmayan fazaya və 170K-də disparate fazaya keçid baş verir. Göstərilmişdir ki, dielektrik nüfuzluğunun anomaliyası strukturun modulyasiyasının yenidən qurulması ilə əlaqədardır. İlk dəfə olaraq commensurate fazaya keçiddə elementar qəfəsin həcmimi dörd dəfə artması müşahidə olunmuşdur. [89, c.83, s.163] müəllifləri,  $130\text{K} < T < 300\text{K}$  temperatur aralığında seqnetoelektrik ( $T_2=207\text{K}$ ) və incommensurate ( $T_1=213\text{K}$ ) faza keçidləri üçün polarizasiya cərəyanının temperatur asılılığını öyrənmişlər. Xarici sahə gərginliyi  $E=30-40 \text{ kV}/\text{m}$  qiymətində, seqnetoelektrik fazaya keçid temperaturu  $T_2=204\text{K}$  – ə qədər azalması müşahidə edilmişdir. Bu halda spontan polyarizasiyanın qiyməti  $P_S=1,2 \cdot 10^{-8} \text{ K}/\text{sm}^2$  bərabər olur. Məlum olduğu kimi,  $\text{TlInS}_2$  birləşməsi eyni zamanda seqnetoelektrik və

yarımkeçiricidir. Buna görə son zamanlarda bu kristallarda meydana gələn müxtəlif fiziki xassələrin öyrənilməsinə marağın kəskin artması müşahidə olunur.

Elektron cihazlarda irəliləyiş sayəsində, dielektrik relaksasiya spektroskopiyası (DRS) demək olar ki, hər cür materialın relaksasiya dinamikasını öyrənmək üçün güclü və geniş istifadə olunan bir metod halına gəlmişdir. Müasir ölçmə sistemləri relaksasiya spektrlərinin yüksək tezlikdə və temperaturun geniş bir aralığında əldə edilməsini təmin edir [194, c.215, s.40].

Disparate fazanın mövcud olduğu temperatur aralığında prosesin dinamikası çox mürəkkəbdir və struktur qüsurlarına həssasdır. TlInS<sub>2</sub> laylı monokristalındakı faza keçidlərinin ardıcılığının təbiəti bir çox tədqiqatların mövzusu olub. Lakin TlInS<sub>2</sub> kristalındakı faza keçidlərinin mexanizmi ilə bağlı düşüncələr tam həllini tapmamışdır [190, c.25, s.3583; 189, c.39, s.245]. Müxtəlif texnoloji partiyalardan götürülmüş nümunələrin  $\epsilon(T)$  dielektrik nüfuzluğunun temperaturdan asılılığının fərqli olması məsələni mürəkkəbləşdirmişdir [85, c.50, s.05FC0701; 87, c.40, s.1423]. [176, c.45, s.1085] – da göstərilmişdir ki, bu xüsusiyyətin TlInS<sub>2</sub> kristalının bertollidlər sinifinə aid olması ilə əlaqədardır, yəni homogenlik oblastda dəyişkən tərkibi var. TlInS<sub>2</sub> kristalında temperaturun azalması ilə faza keçidinin aşağıdakı ardıcılığı mövcuddur; 216K –də parafazadan disparate fazaya (parafazanın simmetriyası  $C_{2h}^6$  kimi təyin edilir) keçid; 201K-də seqnetoelektrik fazaya keçid və 196K yenə seqnetoelektrik fazaya keçid baş verir [13, c.26, s.1275].

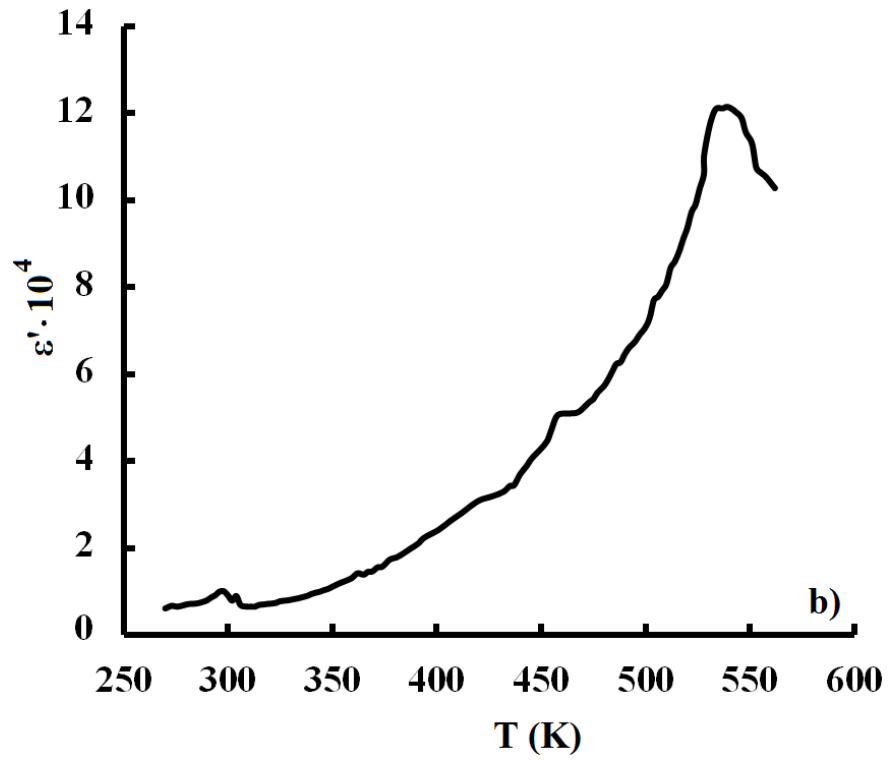
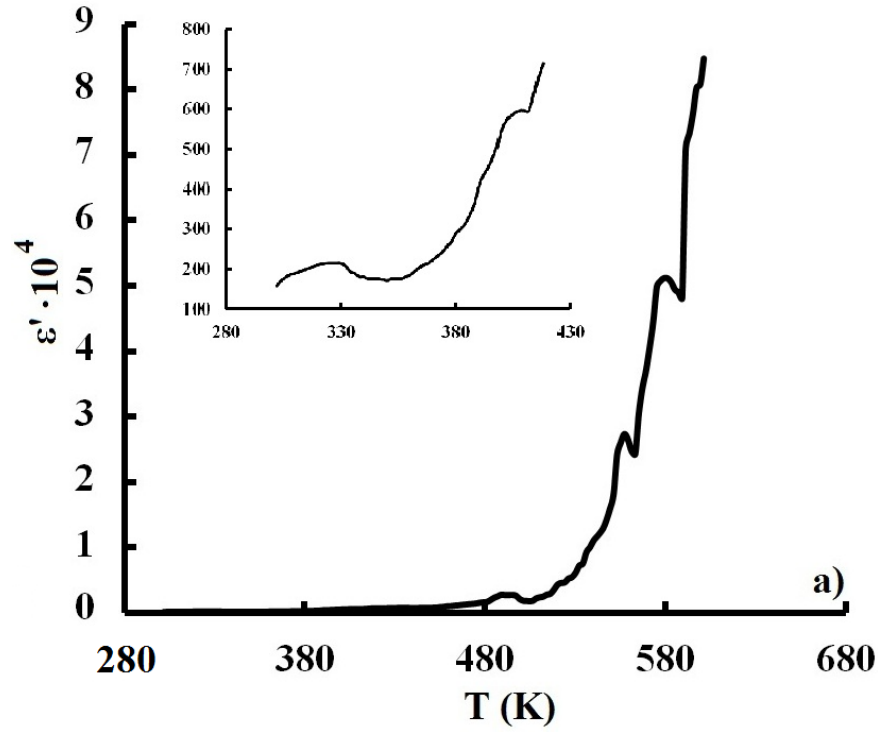
Yuxarıda göstərilənlərə baxmayaraq, paraelektrik fazada ( $T > T_c$ ) TlInS<sub>2</sub> monokristallarının elektrik və dielektrik xüsusiyyətləri öyrənilməmişdir. Radiasiyanın bu xüsusiyyətlərə təsiri də tədqiq edilməmişdir.

Səkil 3.2.1 (a,b) -də TlInS<sub>2</sub> monokristallarının dielektrik nüfuzluğunun temperatur asılılığı göstərilmişdir.

Ölçmələr  $10^{-10}$  Hz tezlik oblastında və 275-550K temperatur intervalında aparılmışdır. TlInS<sub>2</sub> kristalında həm ilkin halda (şüalanmadan öncə), həm də 20 Mrad  $\gamma$ -kvantlarla şüalandırıldıqdan sonra dielektrik nüfuzluğunun həqiqi hissəsinin temperatur  $\epsilon'(T)$  asılılığına baxılmışdır. Temperaturun artması ilə dielektrik nüfuzluğu artmışdır. Şəkildən də göründüyü kimi şüalanmanın təsiri ilə dielektrik

nüfuzluğu artmışdır. Bu sərbəst yükdaşıyıcıların konsentrasiyasındakı artım və temperaturun artması nəticəsində sahə sərhədlərinin hərəkətliliyindəki artımla əlaqədardır.

Dielektrik nüfuzluğunun artması, ion yükdaşıyıcıların konsentrasiyasının artımı ilə əlaqəlidir və elektrodlara xarici potensial fərqi verdiyə onlara yaxın sahədə həcmi elektrik yükü yaranmağa başlayır. Şəkil 3.2.1(a)-da 330K, 410K, 490K, 570K və 600K temperaturlarda faza keçidləri müşahidə olunur. Dielektrik nüfuzluğunun 500K-dən başlayaraq sıçrayışlı artımı müşahidə olunur.  $\ln(\epsilon)$ -nün  $1/T$  asılılığı qurularaq aktivləşmə enerjiləri hesablanmışdır. Şüalanmamış TlInS<sub>2</sub> kristalı üçün aktivləşmə enerjisi  $\Delta E_a^1 = 0.3eV$ ,  $\Delta E_a^2 = 0.22eV$  bərabərdir. Şəkil 3.2.1 (a)-da 290-430K temperatur aralığı böyüdülməklə şəkil üstü olaraq verilmişdir. Məqsəd bu temperatur aralığındakı maksimumları müşahidə etməkdir (330K və 410K).  $\ln(\epsilon)$ -nün  $1/T$  asılılığında təcrübi nöqtələr bir düz xətt üzərində yığılmışdır və bu isə TlInS<sub>2</sub> kristalının ion xarakterli olmasını göstərir. Qamma şüalarının təsirindən sonra (Şəkil 3.2.1 (b)) dielektrik nüfuzluğunun temperatur asılılığının 290K, 410K, 470K və 550K temperaturlarında faza keçidləri müşahidə edilmişdir və  $\ln(\epsilon)$ -nün  $1/T$  asılılığı qurularaq aktivləşmə enerjiləri ( $\Delta E_a^1 = 0.29eV$ ,  $\Delta E_a^2 = 0.2eV$ ) hesablanmışdır. Qamma şüaların təsirindən sonra aktivləşmə enerjiləri azalıb və dielektrik nüfuzluğu yuxarı temperatur oblastına sürüşür. TlGaSe<sub>2</sub> kristalında olduğu kimi TlInS<sub>2</sub> kristalında həm şüalanmamış, həm də qamma kvantlarla şüalandırıldıqdan sonra  $\ln(\epsilon)(1000/T)$  asılılığı xətti dəyişir. Bu da TlInS<sub>2</sub> kristalının ion xarakterli olmasını və nümunənin alt qəfəslərində Tl<sup>+</sup> ionlarının vakansiyalar üzrə diffuziyasına əsaslanır. TlInS<sub>2</sub> kristalında faza keçidi nəticəsində Tl ionlarının alt qəfəsinin əriməsi müşahidə olunur. Bu ion keçirici birləşmələr üçün xarakterik bir haldır.



Şəkil 3.2.1(a,b) TIInS<sub>2</sub> kristalının  $\gamma$ -kvantlarla şüalanmadan öncə (a) və sonrakı (b) dielektrik nüfuzluğunun temperatur asılılığı.

### 3.3. $\text{TlInS}_2$ kristalının tam keçiriciliyində elektron və ion payının qiymətləndirilməsi

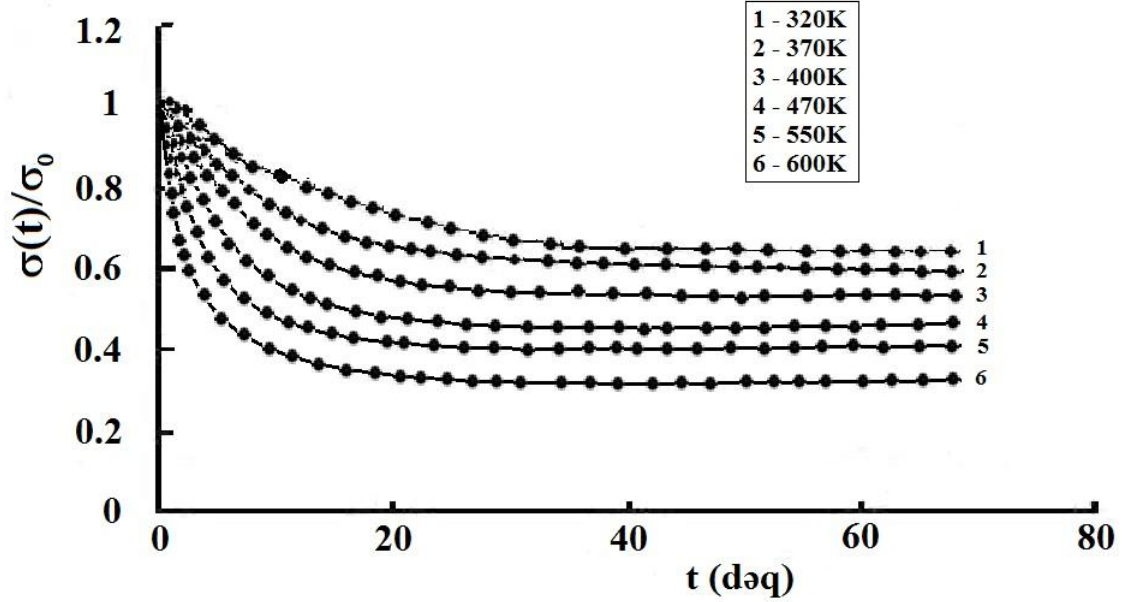
$\text{TlInS}_2$  kristalında keçiriciliyin elektron toplananını Vaqnerin polyarizasiya metodundan istifadə edərək müəyyən edilmişdir. Vaqner metodu ion və ya elektron-ion xarakterli yük daşıyıcılı bərk elektrolitlərdə, sabit elektrik sahəsində elektrik keçiriciliyin zamandan asılı olaraq dəyişməsi müşahidə olunur və yerləşdirilmiş kristalda polyarizasiya prosesinin əmələ gəlməsinə əsaslanır. Bu isə öz növbəsində nümunə/elektrod sərhəddində ikiqat elektrik layı əmələ gətirir və təcridedici elektrod nümunə/elektrod sərhəddində yük daşıyan ionlar tutulduğu üçün, elektrik sahəsinin təsiri nəticəsində mobil ionlar mənfi yüklənmiş elektroda yığılır. Tədqiq olunan kristalın həcmində konsentrasiyanın qradiyenti yaranır [141, c.54, s.1466; 142, c.49, s.40].

Müsbət yüklü ionların konsentrasiyasının qradiyentinin mövcudluğu ionların dreyf selinin əksi istiqamətində diffuziya ion selinin yaranmasına imkan verir. Sabit vəziyyətdə sürüşmə (dreyf) və diffuziya selləri bir-birilərini kompensasiya etdikləri üçün, nümunədən yalnız elektron keçir. Xüsusi müqavimətin zamandan asılılığından elektron və ion komponentlərinin toplananlarının nisbəti müəyyən edilə bilər. Yuxarıda qeyd etdiyimiz kimi kristala sabit potensiallar fərqi verməklə elektodlarda müqavimətin və ya keçiriciliyin zamandan asılılığından ion və elektron keçiriciliklərini bir-birindən ayırmaq olar.

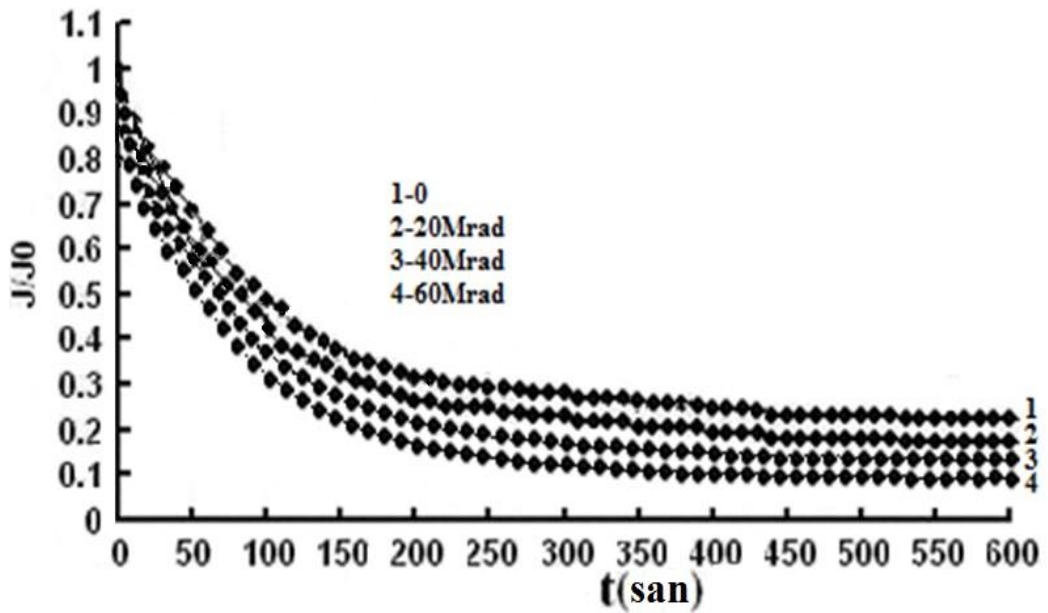
Şəkil 3.3.1  $\text{TlInS}_2$  kristalının elektrik keçiriciliyinin zamandan asılılığı verilmişdir. Şəkil 3.3.1-dən görüldüyü kimi elektrik keçiriciliyi əvvəlcə eksponensial olaraq azalır və müəyyən zamandan sonra dəyişməz qalır. Elektrik keçiriciliyinin qeyri-xətti azalması nisbətən yüksək temperaturlarda daha sürətlə baş verir. Zamandan asılı olaraq cərəyanın düşməsi (sabit elektrik sahəsində) təcridedici elektrodların yaxınlığında həcmi yüklərin qarşılıqlı kompensasiyası hesabına olur.

Cərəyan sıxlığının zamandan asılılığı ikinci tərtib xətti differensial tənliklə təyin olunur və [1, s.78] onu kəsilməzlik şərtinə əsasən almaq olar. Əgər həcmi yüklərin

qeyri-bircins sahəsini nəzərə almasaq və kvazidayanlıqlı vəziyyətlərin sayı yükdaşıyıcıların sayından çox olduğunu qəbul etsək bu tənliyin həllini sadələşəcək.



Şəkil 3.3.1 TIInS<sub>2</sub> kristalı üçün elektrik keçiriciliyinin zamandan asılılıq kinetikasi:1-320K;2-370K;3-400K;4-470K;5-550K;6-600K.



Şəkil 3.3.2 T = 470K-də,  $\gamma$ -şüalarla şüalanmış TIInS<sub>2</sub> kristalının elektrik keçiriciliyinin zamandan asılılıq kinetikasi: 1-0; 2-20 Mrad;3-40Mrad;4-60Mrad

$$j=j_0 \exp(-\pi^2 D t / d^2) \quad (3.3.1)$$

$T=0$  zaman anında  $d$  qalınlıqlı kristalda  $q$  yüklərinin bərabər səviyyədə paylanması və elektrodların yük daşıyıcılar üçün tam keçilməzliyini qəbul etmək lazımdır. Diffuziya zonasının dərinliyi kristalın qalınlığından çox olduqda  $2\sqrt{Dt} \geq d$  (burada  $D$ -diffuziya əmsalı) böyük zaman intervalında bir istiqamətli hərəkətdə cərəyan sıxlığı üçün eksponensial asılılıq almaq olar [36, c.54, s.475; 22, c.44, s.1591;1, s.78].

(3.3.1) dusturuna uyğun olaraq alınan nəticələri azalan eksponent kimi yazsaq

$$\sigma = \sigma_{bgr} + \sigma_0 \exp(-t/\tau_{sc}) \quad (3.3.2)$$

$\sigma_{bgr}$  – yük daşınma proseslərində zamandan asılı olmayan başqa kladları təsvir edir.  $\tau_{sc}$  zaman parametridir və elektrodyanı oblastda yük daşıyıcıların yığılmasını xarakterizə edir. (3.3.1) düsturuna uyğun olaraq diffuziya əmsalı və nümunənin qalınlığı ilə təyin olunur ( $\tau_{sc} = d^2 / (\pi^2 D)$ ).

Alınan nəticələrdə həcmi yüklərin polyarizasiyası temperaturdan asılı olaraq infraşağı tezlik oblastında baş verməsi göstərilmişdir  $1/(2\pi\tau_{sc}) \sim 10^{-3} - 10^{-4}$  Hz.

Şəkil 3.3.2 - də  $T = 470$  K temperaturda,  $\gamma$ -şüalarla şüalanmış  $TlInS_2$  kristalının elektrik keçiriciliyinin 0-60 Mrad doza intervalında kinetikasi verilmidir. Şəkil 3.3.2-dən görüldüyü kimi şüalanma dozası artdıqca ümumi keçiricilikdə elektron payı azalır və nəticədə ion payı artır.

Beləliklə təcrübi nəticələr göstərir ki,  $TlInS_2$  ( $T=470$  K) kristalının 20 Mrad şüalanma dozası ion keçiriciliyinin 82% -ə qədər artır (Şəkil.3 (2)). Şüalanmamış halda ion keçiriciliyinin nisbəti 76% -dir (Şəkil 3.3.2).

### 3.4. $TlGaSe_2$ və $TlInS_2$ kristallarının ion keçiriciliyi

Son illərdə yüzlərlə yüksək ion keçiriciliyinə malik olan bərk elektrolitlər tədqiq edilmiş və sənayedə bərk cisim istilik elementlərinin, miniatur akkumulyatorların,

maye və qaz sensorların hazırlanmasında əvəz olunmaz rol oynayır. Bu cür maddələrin geniş şəkildə axtarılması müasir metodların inkişafında, xüsusi ilə kondensə olunmuş mühitlərdə ion köçürülmələrinin tədqiq edilməsinə yeni nəzəri göstəricilər tələb edir. Bu isə öz növbəsində elektronika, kristalloqrafiya, bərk cismlər fizikası və kimyası, materialşünaslıq və energetika sahələrində yeni bərk cisimlərin yaranmasına gətirib çıxarır.

Kristalların ion keçiriciliyə malik olması ilə əlaqədar olaraq onlarda keyfiyyətə bir-birindən fərqlənən iki müxtəlif faza halı ola bilər. Bərk cisimlərdə kritik temperaturlardan aşağı temperaturlarda adi ionik kristallara məxsus dielektrik fazaya keçid, kritik temperaturlardan yuxarı temperaturlarda isə ion halına keçid baş verir. Yəni kritik temperaturlardan yuxarı temperaturlarda elektrolit hala keçid baş verir. Bu halları özündə əks etdirən kristallar ion keçiricilər adlanır.

Yarımkəçirici və ferroelektrik xüsusiyyətlərə malik olan  $\text{TlGaSe}_2$  kristalları laylı kristal quruluşuna sahib geniş  $A^3B^3C_6$  birləşmələr qrupuna aiddir.  $\text{TlGaSe}_2$  kristallarının rentgen tədqiqatları, bu kristalların tetraqonal simmetriyada kristallaşdığını göstərmişdir [118, c.54, s.42]. Tədqiq olunan  $\text{TlGaSe}_2$  kristalların kristal quruluşu  $C2/2^2$  geometrik qrupuna sahib monoklinik sistemlərə aiddir.

Ədəbiyyatdan məlum olduğu kimi  $\text{TlGaSe}_2$  və  $\text{TlInS}_2$  kristallarında  $10 \leq T \leq 300\text{K}$  temperatur intervalında infraqırmızı əks səpilmə və X-şüa difraksiyası metodları ilə tədqiqatlar aparılmışdır [149, c.48, s.1395; 125, c.73, s.257].  $T_c = 110\text{K}$  yaxın temperaturda müşahidə olunan simmetriyanın  $C2/c$  -dən  $C$ - dəyişməsi ab sahəsində Tl atomlarının zəif yer dəyişməsi ilə əlaqədardır.  $T_c$ -dən aşağı temperaturunda ferroelektrik xüsusiyyətlərin görünməsi  $\text{Tl}^+$  ionunun stoikiometrik aktivləşdirmə konfigurasiyası ilə əlaqələndirilir. Məlum olduğu kimi,  $110\text{K}$ - $117\text{K}$  temperatur intervalında,  $\text{TlGaSe}_2$ -nin kristal quruluşu qeyri-məhdud bir struktura malikdir və  $110\text{K}$ -dən aşağıda bir ferroelektrik fazaya malikdir [152, s.3699]. İon keçiriciliyinin nanozəncirlər  $\text{In}^{3+}\text{Tl}_2^{2-}$  və  $(\text{Ga}^{3+}\text{Tl}_2^{2-})^-$  arasındakı tallium alt müstəvidəki boşluqlara yayılan  $\text{Tl}^+$  ionlarının mövcud olmasında meydana çıxdığı müşahidə edilib. [57, c.45, s.1191; 58, c.46, s.998; 59, c.1, s.124; 76, c.1, s.156; 81, c.16, s.651] – ci işlərdən məlum olduğu kimi  $\text{TlGaSe}_2$  və  $\text{TlInS}_2$  kristallarında yüksək

temperaturalarda (300K-dən yuxarı) kristalların ion hala keçməsi,  $Tl^+$  ionlarının tallium qəfəsindəki vakansiyalar üzrə  $(Ga^{3+})In^{3+}(Te^{2-})Se_2^{2-}$  nanozəncirləri arasında diffuziya prosesinin olması ilə əlaqələndirilir və bu keçiricilik superion keçiricilər üçün xarakterik sayılır.

Bu fəsilə  $TlGaSe_2$  və  $TlInS_2$  kristallarının şüalanmamış və 20Mrad qamma kvantlarla şüalandıraraq elektrofiziki və optik xassələri tədqiq edilmişdir. Bildiyimiz kimi qamma-şüaları yüksək enerjili fotonlardan ibarət olub yük və kütləyə malik deyillər. Qamma ilə hədəfdəki maddə arasında əsasən 3 cür əlaqə ola bilər; fotoeffekt, kompton səpilməsi və cütlərin yaranması (elektron-pozitron cütləri). Bu üç hadisənin olma ehtimalı qamma enerjilərinə və maddənin atom nömrəsinə bağlıdır. Kompton elektronlarının yaranması üçün 1-5MeV enerji lazımdır. Tədqiqatlar zamanı qamma kvantlarının enerjisi 1,17-1,33 MeV olan  $^{60}Co$ -dan istifadə olunur. Bildiyimiz kimi radiasiyanın təsiri ilə kristallarda müxtəlif defektlər meydana gəlir. Bu defektlər əsasən düyünlərarası vakansiyalar və atomlardan ibarətdir. Belə ki, radiasiyanın təsiri ilə yaranan defektlər bu birləşmələrin elektrik və dielektrik xassələrinin geniş şəkildə tədqiq etməyə imkan yaradır.

Gamma kvantının ( $\sigma_\gamma$ ) təsiri altında elektronik ilkin defektin meydana gəlməsi üçün kəsik, Compton və fotoelektronların meydana gəlməsi üçün ( $\sigma_{\gamma K}$ ) və ( $\sigma_{\text{əf}}$ ) qamma kvantının təsiri və sürətli bir elektronun ( $\sigma_e$ )-nün təsiri altında bir defektin meydana gəlməsi üçün kəsikdən asılıdır [1, s.88].

$$\sigma_\gamma = (\sigma_{\gamma K} + \sigma_{\text{əf}}) \sigma_e \frac{E_1}{-dE/dx} N_{AT} \quad (3.4.1)$$

$$\sigma_\gamma = (\sigma_{\gamma K} + \sigma_{\text{əf}}) \sigma_e \frac{E_1}{-dE/dx} N_{AT} \quad (3.4.2)$$

Bu ifadədə  $\sigma_\gamma$  elektronun enerjisi ilə ( $E_e$ ) düz və  $dE/dx$  tərs mütənasibdir. Burada  $dE/dx$  elektronun vahid yolun uzunluğuna düşən enerji itkisidir. İonlaşdırıcı şüaların təsirinə məruz qalmış  $N_{AT}$  kristalının atomlarının sayı çox olduqda

radiasiyanın yaratdığı defekt yaranma kəsiyi bir o qədər böyük olur. Deşiklərin və sərbəst yük daşıyıcıların valent zonasında konsentrasiyasını aşağıdakı düsturla ifadə etmək olar:

$$n = \frac{g_0}{g_1} N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_t}{kT}\right) \quad (3.4.3)$$

$$p = \frac{g_0}{g_1} N_v \exp\left(-\frac{E_t - E_v}{kT}\right) \quad (3.4.4)$$

Bildiyimiz kimi defektlərin sayının elektronların seli  $\Phi$  ilə düz mütənasib olduğundan  $n$ -in nisbi dəyişməsi aşağıdakı ifadə ilə göstərmək olar :

$$\frac{\Delta n}{\Phi} = \frac{n' - n}{\Phi} = A_B \left[ 1 + g_1 \exp\left(\frac{E_B - E_F}{kT}\right) \right]^{-1} \quad (3.4.5)$$

$n$  və  $n'$  - şüalanmadan əvvəl və sonra tarazlıqdakı yükdaşıyıcıların sayı,  $N_B$  –radiasiya defektlərinin konsentrasiyası,  $A_B$  isə vahid həcmdə vahid sel üçün defektlərin təsirini təsvir edir.

(3.4.5) ifadəsinə analogi olaraq  $p$  nisbi dəyişməsi üçün bu ifadəni yazmaq olar:

$$\frac{\Delta p}{\Phi} = \frac{p' - p}{\Phi} = A_B \left[ 1 + g_1 \exp\left(\frac{E_F - E_V}{kT}\right) \right]^{-1} \quad (3.4.6)$$

Elektrik keçiriciliyinin şüalanma dozəsindən asılılıq funksiyasını bu düsturla ifadə etmək olar:

$$\sigma = \sigma_0 e^{-k\Phi} \quad (3.4.7)$$

$\sigma_0$ -şüalanmaya qədərki elektrik keçiriciliyi,  $k$  isə cərəyanın uzaqlaşma sürətini xarakterizə edən əmsaldır [1, s.89].

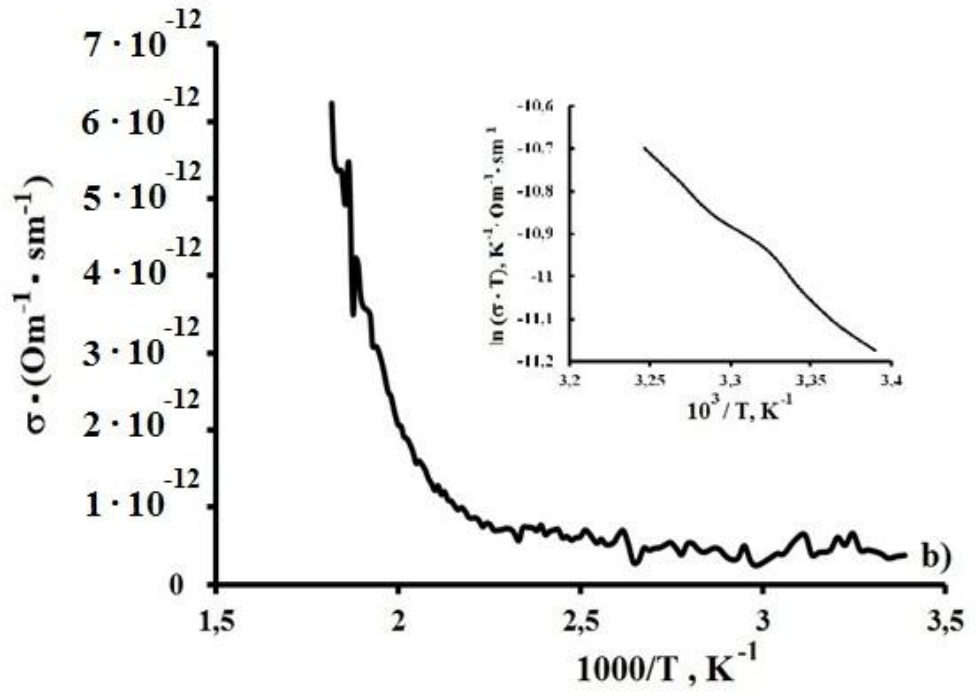
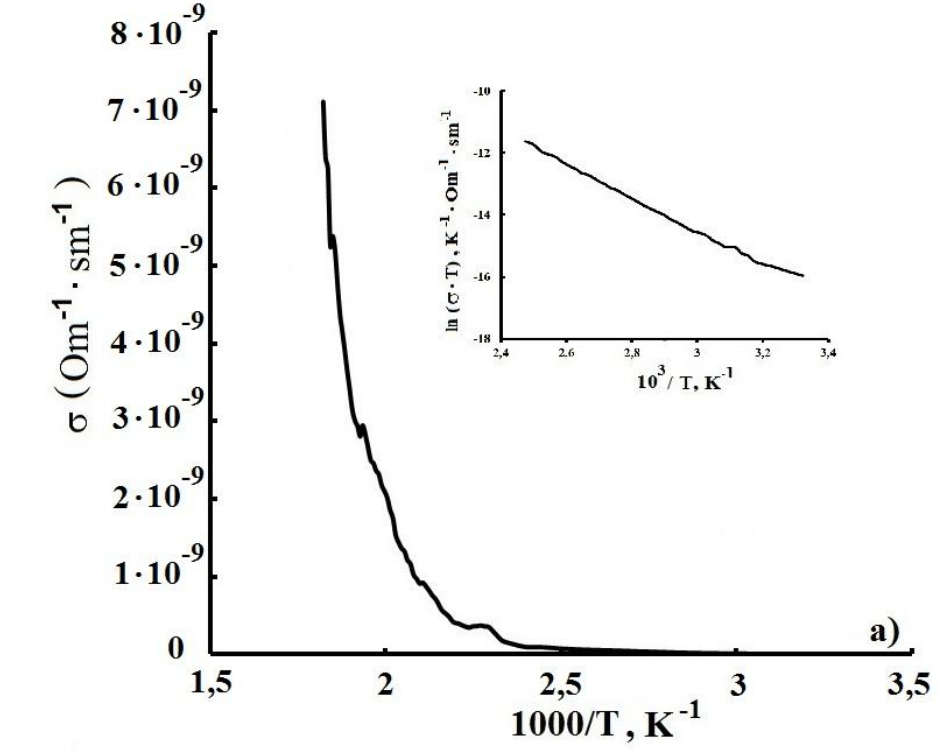
Bu fəsildə TlGaSe<sub>2</sub> və TlInS<sub>2</sub> kristalların ion keçiriciliyinin temperaturdan asılılığına dair tədqiqat nəticələrini müzakirə etmişik.  $\gamma$  -radiasiyanın təsiri ilə ion nizamsızlıq dərəcəsini dəyişmək olar.

Şəkil 3.4.1 -da TlGaSe<sub>2</sub> kristallarının şüalanmamış və şüalanmış halda  $\ln(\sigma \cdot T)/(1/T)$  asılılığı verilmişdir (a-şüalanmamış, b-şüalanmış). Ölçmələr 300K-550K temperatur intervalında, 25Hz-1MHz tezlik diapazonunda kristalın tetraqonal oxuna perpendikulyar istiqamətdə aparılmışdır.  $\ln(\sigma \cdot T)/(1/T)$  asılılığında ion keçiriciliyi aşağıdakı düsturla təyin olunur [65, c.47, s.1667; 66, c.45, s.1085].

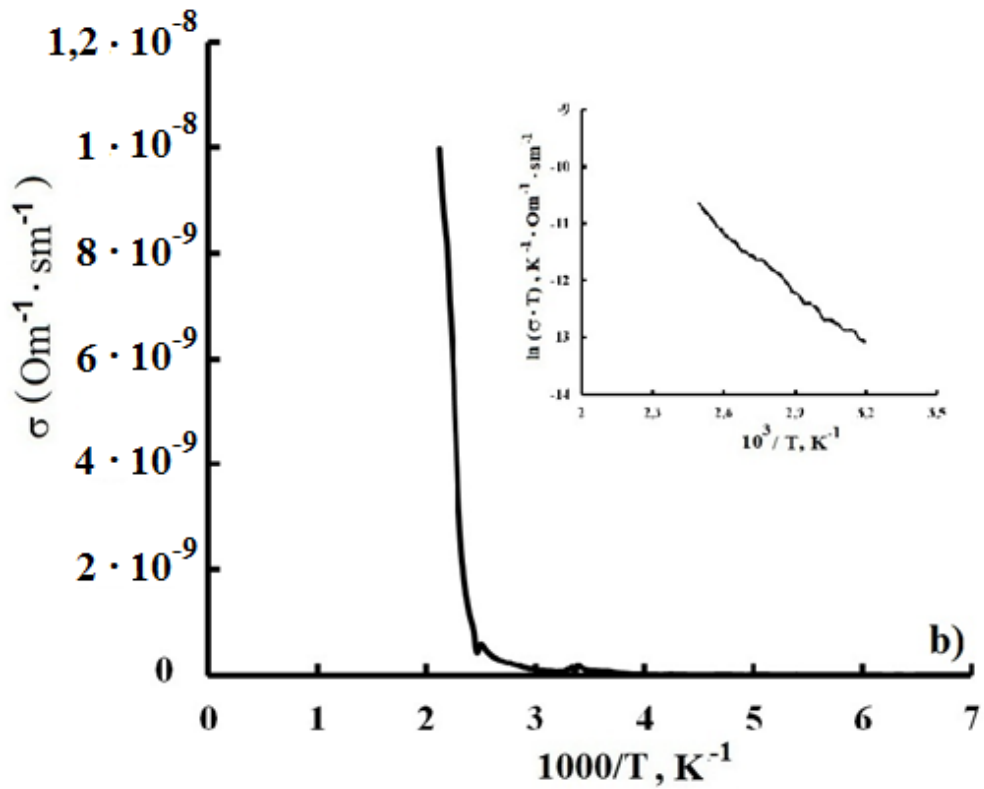
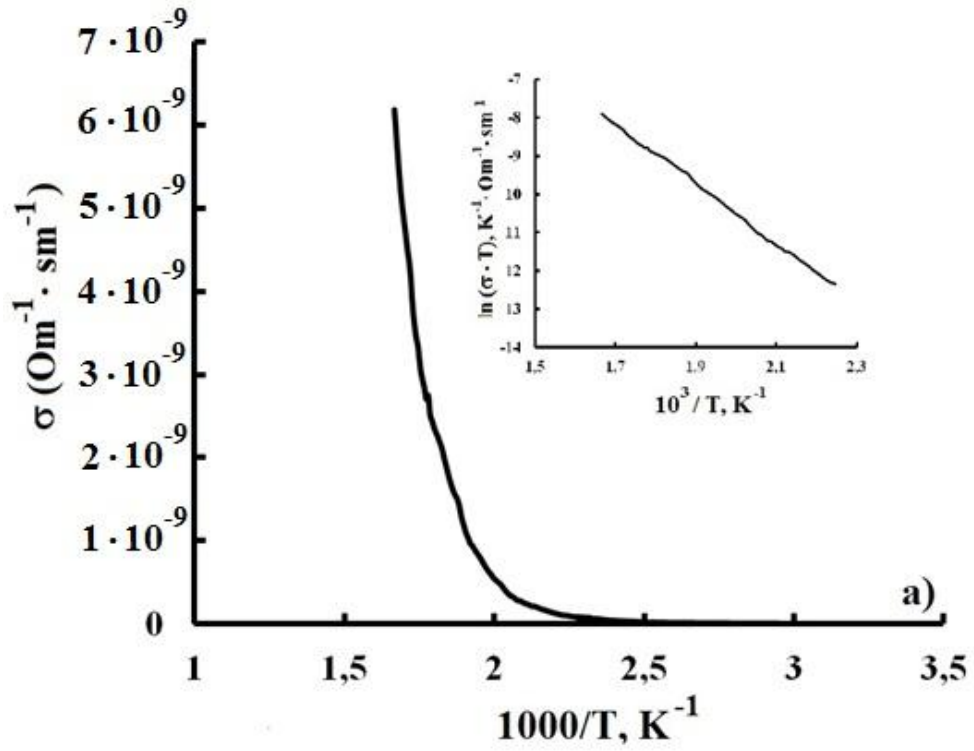
$$\sigma \cdot T = \sigma_0 \cdot \exp(-\Delta E^a / k T) \quad (3.4.8)$$

bu düsturda  $\Delta E_a$ – keçiriciliyin aktivləşmə enerjisidir. TlGaSe<sub>2</sub> kristalı üçün şüalanmadan əvvəl və sonra aktivləşmə enerjisi hesablanmışdır. Şüalanmadan əvvəl aktivləşmə enerjisi  $\Delta E_a = 0.48$  eV, şüalanmadan sonra isə  $\Delta E_a = 0.24$  eV bərabərdir.  $\sigma(T) T_{kp} = 500$  K temperaturunda TlGaSe<sub>2</sub> kristalında elektrik keçiriciliyinin sıçrayışla artması müşahidə olunur. Bu cür sıçrayışlı artımı yüksək mobilliyə malik ionların sayının artması ilə izah etmək olar, yəni ion halına faza keçidi baş verir. Və 20 Mrad qamma şüalarının təsiri ilə elektrik keçiriciliyinin ədədi qiymətində artma müşahidə olunur.

Şəkil 3.4.2.-də TlInS<sub>2</sub> kristalının  $\ln(\sigma \cdot T)/(1/T)$  asılılığı göstərilmişdir (a-şüalanmamış, b-20Mrad qamma kvantlarla şüalandırıldıqdan sonra). Təcrübə dəyişən gərginlikdə, 300-550K temperatur intervalında, 25Hz-1MHz tezlik diapazonunda aparılmışdır. TlInS<sub>2</sub> kristalı üçün də (3.1.5) – düsturundan istifadə edərək şüalanmadan əvvəl və sonra aktivasiya enerjiləri hesablanmışdır. TlInS<sub>2</sub> kristalı üçün aktivləşmə enerjisi şüalanmadan əvvəl  $\Delta E = 0.59$  eV, şüalanmadan sonra isə  $\Delta E = 0.374$  eV bərabərdir. 550K temperaturdan başlayaraq elektrik keçiriciliyinin sıçrayışla artması müşahidə edilir. Bu artım yüksək mobilliyə malik ionların sayının artması ilə izah olunur. Belə ki, TlGaSe<sub>2</sub> və TlInS<sub>2</sub> kristallarında aktivləşmə enerjisinin kiçik olması səbəbindən yuxarı temperaturlarda ion keçiricilik alınır.



Şəkil 3.4.1 TI GaSe<sub>2</sub> kristalı üçün elektrik keçiriciliyinin  $\sigma(T)$  temperatur asılılığı (a- 0; b-20Mrad). Şəkil üstü əlavədə  $\ln(\sigma \cdot T)/(1/T)$  asılılığı verilmişdir.



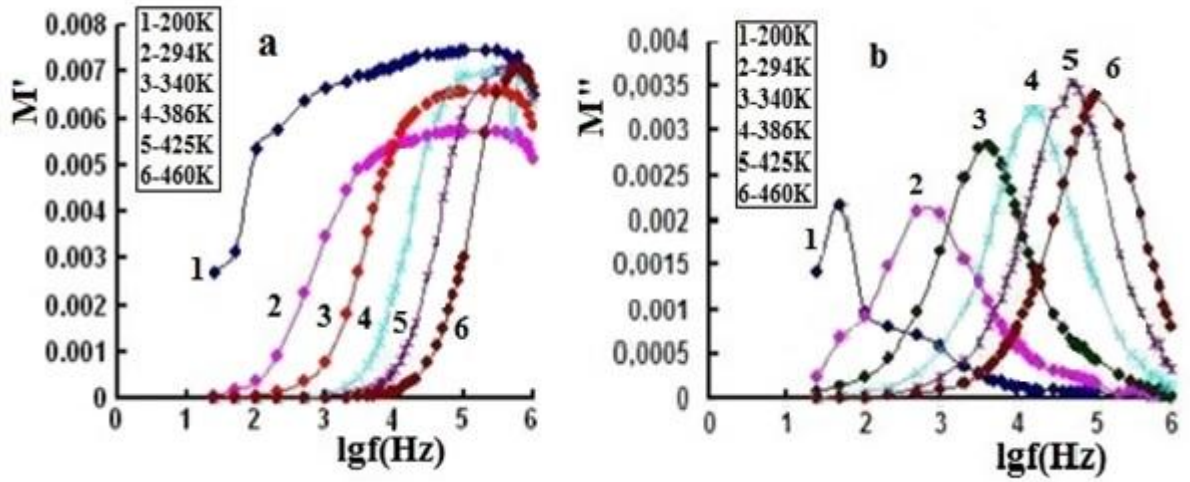
Şəkil 3.4.2 TIInS<sub>2</sub> kristalının elektrik keçiriciliyinin  $\sigma(T)$  temperatur asılılığı (a- 0; b-20Mrad). Şəkil üstü əlavədə  $\ln(\sigma \cdot T)/(1/T)$  asılılığı verilmişdir.

Beləliklə, alınan nəticələr göstərir ki,  $\text{TlGaSe}_2$  və  $\text{TlInS}_2$  kristallarında, 300K-dən aşağı temperaturlarda elektron keçiriciliyi üstünlük təşkil edir [78, c.1, s.260]. 500K-dən yuxarı temperaturlarda keçiriciliyin sıçrayışlı artımı müşahidə olunur. Bu isə, ion toplanmasının artması ilə əlaqədardır. Yuxarı temperaturlarda ion keçiriciliyi elektron keçiriciliyindən üstünlük təşkil edir.  $\text{TlGaSe}_2$  və  $\text{TlInS}_2$  kristallarında yuxarı temperaturlarda ion keçiriciliyinin olması, nanozəncirlər arasındakı  $\text{Tl}^+$  ionlarının vakansiyalar üzrə diffuziyası ilə əlaqədardır.

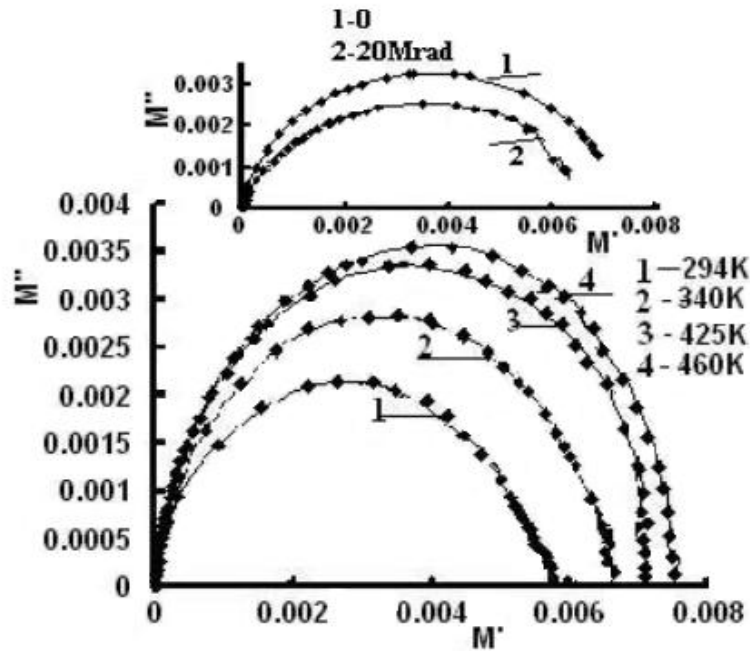
### 3.5 $\text{TlInS}_2$ birləşməsinin elektrik modulu

İon keçirici materiallarda baş verən relaksasiya proseslərini öyrənmək üçün tez-tez modul formulalarından istifadə olunur. Kompleks elektrik modulu  $M^* = 1/\varepsilon^* = M' + jM''$  şəklində göstərilə bilər. Burada  $M^*$  modul funksiyası,  $M'$  elektrik modulunun həqiqi hissəsi,  $M''$  isə elektrik modulunun xəyali hissəsidir. Verilənlərin bu metodla təqdim edilməsi, artan temperaturla daha yüksək tezliklərə doğru sürüşən elektrik modulunun xəyali hissəsi  $M''(\omega)$  üçün relaksasiya müddətinin  $\tau$  termal olaraq aktivləşdirən təbiətini ortaya çıxarır. Dielektrik ölçmə nəticələrində elektrod polarizasiyası deyilən bir qütbləşmə mexanizmi var ki, bu da qrafik təsvirdə digər ölçmə nəticələrini müəyyənləşdirməyi çətinləşdirir. Elektrik modulu nəticələri bu mexanizmin təsirlərinin aradan qaldırılması üçün istifadə olunur. İon keçiricilərin elektrik xassələrinin təhlilində, elektrik modulu kimi impedans məlumatların tədqiq edilməsi tədqiqatçılar tərəfindən geniş istifadə olunur. Çünki elektrik keçiriciliyində baş verən proseslərin köməyi ilə relaksasiya müddətini təyin etmək mümkündür, eyni zamanda elektrodların bloklanması effekti minimuma enir.  $M''$  elektrik modulunun xəyali hissəsinin tezlik asılılığından 200-460K temperatur intervalında yaxşı izah olunmuş pik müşahidə olunur (Şəkil 3.5.1). Belə ki, temperaturun artması ilə elektrik modulu daha yüksək tezlikli sahəyə keçir [175, c.2, s.11].

$M'(f)$  əyriyələri ümumiyyətlə S şəkilli görünüşlərə malikdir. Bununla birlikdə aşağı tezlikli sahəyə nisbətən yuxarı tezlikli sahədə daha doymuş vəziyyətə gəlirlər.



Şəkil 3.5.1 TIInS<sub>2</sub> nümunəsi üçün  $M'$  elektrik modulunun həqiqi (a) və xəyali (b) hissələrinin tezlik asılılıqları (sabit temperaturlarda): 200K; 294K; 340K; 386K; 423K; 460K [175, c.2, s.14].



Şəkil 3.5.2 TIInS<sub>2</sub> birləşməsi üçün müxtəlif temperaturlarda mürəkkəb elektrik modulu üçün  $M'' - M'$  diaqramı: 1- 294K; 2-340K; 3-425K; 4-460K. Şəkilə əlavə olunan spektr 386K temperaturda  $M'' - M'$  diaqramını göstərir: 1- 0; 2-20 Mrad [175, c.2, s.15].

$M''$  elektrik elektrik modulunun xəyali hissəsinin maksimum ( $f_{\max}$ ) pik nöqtəsinin müşahidə olunduğu tezliyin qiymətindən,  $2\pi f_{\max}\tau M=1$  düsturuna uyğun olaraq  $\tau M$  keçiriciliyinin relaksasiya müddəti hər bir temperatura uyğun hesablanabilir.  $M^*$  kompleks elektrik modulu üçün mürəkkəb müstəvidə  $M'$ -dən  $M''$  diaqramı tərtib edilmişdir (Cole-Cole diaqram).

Şəkil 3.5.2.-də  $\text{TlInS}_2$  birləşməsi üçün  $M^*$ -nin kompleks elektrik modulunun  $M''$  -  $M'$  diaqramı əks olunmuşdur. Şəkil 3.5.2.-dən görüldüyü kimi  $M''(f)$  və  $M'(f)$  tezlik asılılığı  $M''$  -  $M'$  diaqramında aydın şəkildə müəyyən edilmişdir.

Şəkil 3.5.2 - də,  $M''(M')$  elektrik modullarının 386K temperaturda  $\text{TlInS}_2$  kristallarının 20Mrad  $\gamma$ -kvantlarla şüalanmadan öncə və sonrakı asılılığı göstərilmişdir. Şəkil 3.5.2 -in əlavəsindən görüldüyü kimi 20Mrad  $\gamma$ -kvantlarla şüalanmış  $\text{TlInS}_2$  kristalının  $M''$  elektrik modulunun xəyali hissəsində azalma müşahidə edilir. Eksperimental nəticələr göstərir ki,  $\text{TlInS}_2$  kristalının 20 Mrad-la şüalandırıldıqdan sonra ion keçiricilik 82%-ə qədər artacaq. Şüalanmamış halda isə ion keçiriciliyi 76% təşkil edir [175, c.2, s.11].

### **3.6. $\text{TlGaSe}_2$ kristalının dielektrik itki bucağının tangensi ( $\text{tg}\delta(T)$ )**

Dielektrik itki faktoru nümunədə elektrik keçiricilik, dielektrik relaksasiya, dielektrik rezonans kimi xətti olmayan fiziki mexanizmlər səbəbindən elektrik enerjisində meydana gələn itkiləri ifadə edir. Bu itkilər yüksək gərginlikdə və ya yüksək tezlikdə vacib sayılabiləcək bir istilik mənbəyi rolunu oynayır. Bu vəziyyət dielektrik nümunənin bu şərtlərdə daha çox istilik təsirinə səbəb olmasına və xüsusiyyətlərinin dəyişməsinə təsir göstərir. Buna görə dielektrik materiallar seçilərkən itki faktorunun mümkün qədər az olmalıdır. Dielektrik itkisi faktorunun təcrübə şəraitində necə dəyişdiyini bilmək də vacibdir.

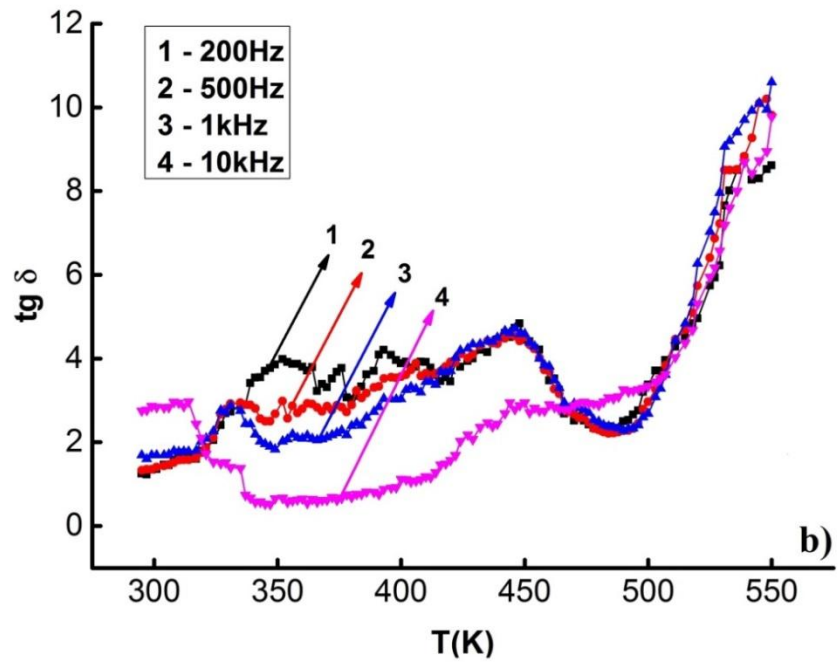
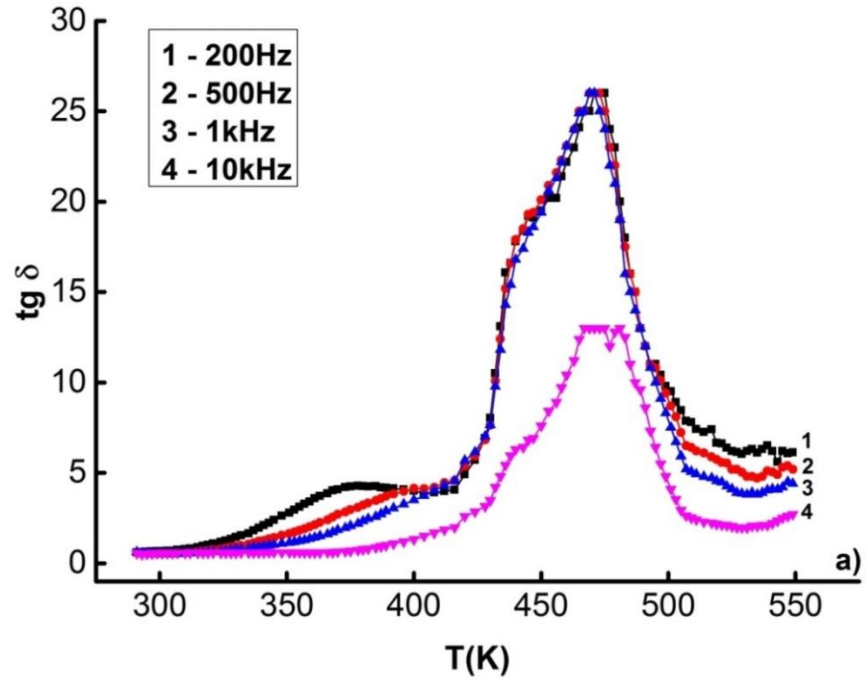
Bu paraqrafda,  $\text{TlGaSe}_2$  və  $\text{TlInS}_2$  kristallarının qamma şüalanmadan əvvəl və sonra dielektrik itki bucağının tangensi ( $\text{tg}\delta(T)$ ) 100Hz-1MHz tezlik oblastında və otaq temperaturundan 550K temperatur intervalında tədqiq edilmişdir.

TlGaSe<sub>2</sub> kristalının Şəkil 3.6.1(a,b)-da şüalanmadan öncə və 20 Mrad dozada  $\gamma$ -kvantlarla şüalandırıldıqdan sonrakı dielektrik itki bucağının tangensinin ( $\text{tg}\delta(T)$ ) temperatur asılılığı göstərilmişdir. Şəkil(a,b) göründüyü kimi dielektrik itki bucağının tangensi temperaturun artması ilə artır və müəyyən bir temperaturda maksimumu alır. Sonra yenidən temperaturun artması ilə azalır. Buna relaksasiya xarakterli azalma deyilir. Dielektrik nüfuzluğunun temperatur asılılığında olduğu kimi  $\text{tg}\delta(T)$  asılılığında da tezliyin artması ilə maksimuma uyğun olaraq pikin qiyməti azalır. Azalma yuxarı temperatur oblastına sürüşür. Dəyişiklik Debay tipli relaksasiya proseslərinə uyğundur. Dielektrik itkilərinin temperatur asılılığında qamma şüalanmadan sonra kəskin fərq müşahidə olunmuşdur. Temperaturun təqribən 337K və 445K qiymətlərində kənara çıxma halları müşahidə edilmişdir. Dielektrik itkiləri qamma şüalanmadan sonra təqribən 2.5 dəfəyə qədər azalmışdır. Digər tərəfdən qamma şüalanmadan sonra dielektrik itkilərinin temperatur asılılıqlarında xaotiklik müşahidə edilmişdir.

TlGaSe<sub>2</sub> kristalını 25Hz-1MHz tezlik intervalında və otaq temperaturundan 550K temperatúra qədər tədqiq edildiyindən bu kristallarda əyrilərə uyğun maksimumları öyrənmək çətin deyildir.

Ədəbiyyatdan məlum olduğu kimi [45, c.1, s.463] yüksək sönməyə malik olan ossilyator modelindən istifadə etməklə dielektrik itki bucağının tangensinin relaksasiya piklərini təsvir etmək daha əlverişlidir. Ossilyator modelinə görə minimumlar arasındakı məsafə  $a$ , baryerin hündürlüyü  $W$ , potensial çuxurda  $e$  yüklü,  $n$  zərrəciyin yerdəyişməsinə,  $v$  isə zərrəciyin rəqslərinin məxsusi tezliyidir ( $2ve^{-W/kT}$ ).

Ədəbiyyatdan məlumdur ki, dielektrik nüfuzluğunun temperatur asılılığının relaksasiya maksimumlarındakı temperatur qiymətləri dielektrik itki bucağının tangensinin temperatur asılılığının maksimumlarındakı qiymətlərindən fərqli olaraq, geri qalır [24, s.24].



**Şəkil 3.6.1(a,b)**  $\text{TiGaSe}_2$  kristalının  $\gamma$ -kvantlarla şüalanmadan əvvəl (a) və sonra (b) dielektrik itkilərinin temperatur asılılıqları

Beləliklə, TlGaSe<sub>2</sub> kristalların  $\gamma$ - şüalarının təsiri nəticəsi olaraq  $\varepsilon$  və tangens  $\delta$ -nin dəyərləri azalır və faza keçidlərində  $T_c$ -nin miqdarını qeyri-induksional səviyyəyə düşürür. Parafazadan  $T_c$ -nin qeyri-induksional mərhələsinə qədər olan faza keçid nöqtəsi  $\sigma$ ,  $\varepsilon$  və tangens  $\delta$ -nin temperatur asılılığında özünü göstərmir.

Beləliklə, [62, s.3] ədəbiyyata əsasən söyləmək olar ki,  $\text{tg}\delta$ -nin anomaliyalarını göstərmək üçün aşağıdakı düsturdan istifadə etmək olar:

$$\text{tg}\delta(T) = \frac{\omega n e^2 a^2 / \varepsilon_\infty}{kT \left( \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_\infty} + \frac{\omega^2}{4\nu^2} e^{2W/kT} \right)} \cdot \frac{e^{W/kT}}{2\nu} \quad (3.6.1)$$

Bu düsturda  $\varepsilon_\infty$  - sonsuz böyük tezlikdə dielektrik nüfuzluğu,  $\varepsilon_s$  – statik dielektrik nüfuzluğudur. (3.6.1)-i düsturunda  $\frac{\omega}{2\nu} \ll 1$  və  $\frac{2W}{kT} \gg 1$  olduğu halda  $\text{tg}\delta$ -nin anomaliyalardakı ekstremumları aşağıdakı düsturla ifadə edə bilərik:

$$\omega_{\max} = 2\nu e^{-W/kT} \quad (3.6.2)$$

$$\omega_{\max} = 2\pi f_{\max} \quad (3.6.3)$$

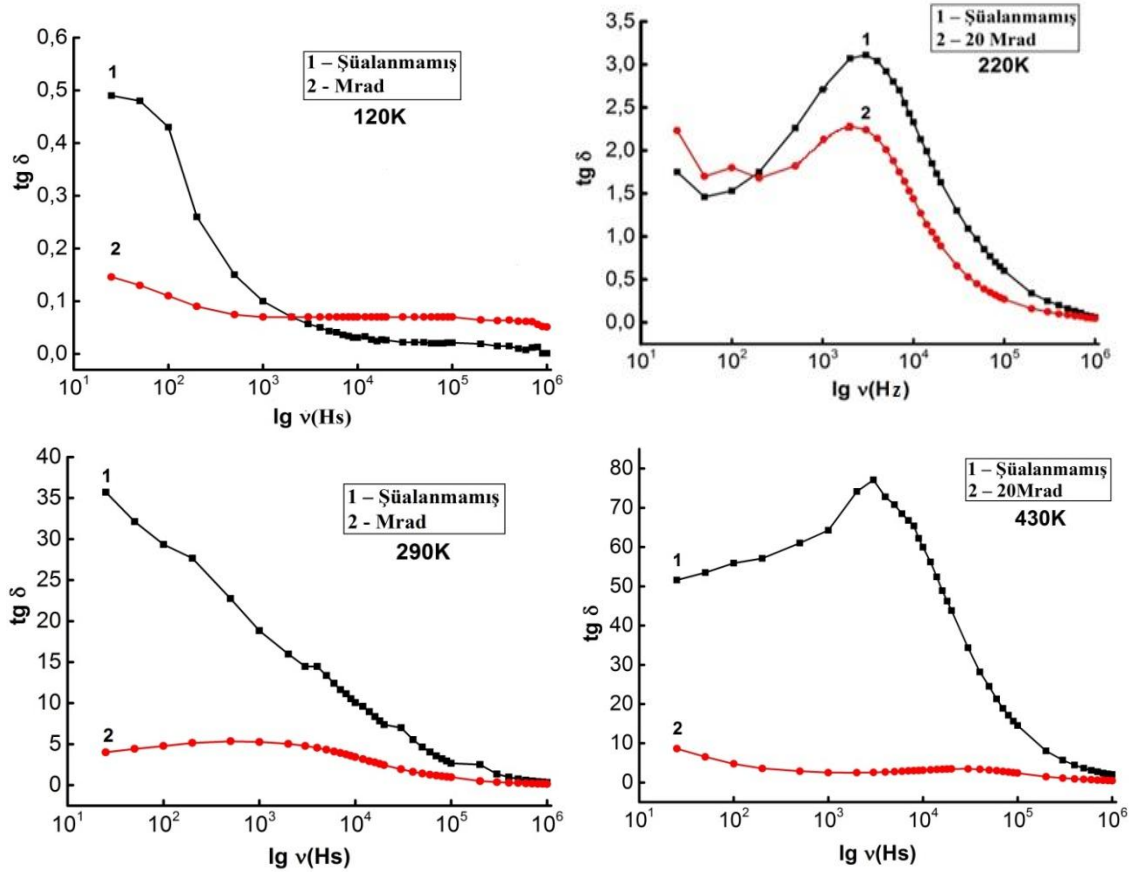
Şəkil 3.6.1(a)-dan potensial çuxurda sıçrayışlar üçün, sıçrayışın aktivləşmə enerjisini və onun tezliyini tapmağa imkan verir. Bu tezliyi TlGaSe<sub>2</sub> kristalının üçün  $\lg f_{\max}$ -nın  $1/T$ -dən asılılığını qurmaqla asanlıqla tapmaq olar.

$1/T \rightarrow 0$  yaxınlaşmasında düzxəttin ekstrapolyasiyasından zərrəciyin baryerdən sıçrama tezliyi təyin olunur. Bu tezlik  $\nu = 2 \cdot 10^{12}$  Hs olub infraqırmızı spektrin uzaq hissəsinə uyğun gəlir və TlGaSe<sub>2</sub> kristalının rəqs spektinin fonon modası oblastına düşür.

Həmçinin düz xəttin meyl bucağı baryerdən keçən yük daşımının bir aktına düşən enerjini göstərir və bu enerji  $W^a = 0.34\text{eV}$ . Alınan tezliyin qiyməti elektron proseslər üçün çox azdır.

Məlumdur ki,  $\text{TlGaSe}_2$  birləşməsinin quruluşunu iki altsistemdən ibarətdir:  $(\text{GaSe}_2)$  zəncirlər şəklində möhkəm altsistem,  $(001)$  müstəvisində yerləşən və çox mobil tallium ionları sistemi. Kristallokimyavi mülahizələrə görə və yuxarıda deyilənlərə görə  $\text{TlGaSe}_2$  birləşməsində ən mobil  $\text{Tl}^+$  kationlarıdır.

Şəkil 3.6.2 – də  $\text{TlGaSe}_2$  kristalının qamma şüalanmadan öncə və sonra dielektrik itki bucağının tangensinin tezlik asılılıqları müxtəlif sabit temperaturlarda verilmişdir (120K, 220K, 290K, 430K). Şəkildən görüldüyü kimi qamma şüalanmanın təsir ilə dielektrik itkiləri azalır. Temperaturun artması ilə dielektrik itki bucağının artması müşahidə olunur. Müxtəlif sabit temperaturlarda və tezliylərdə qiymətində maksimumlar müşahidə olunnur. Relaksasiya müddətləri  $10^{-4}$  san qiyməti ətrafında dəyişir.



**Şəkil 3.6.2**  $\text{TlGaSe}_2$  kristalının qamma kvantlarla şüalanmadan öncə və sonra dielektrik itkilərinin tezlik asılılıqları

### 3.7. TIGaSe<sub>2</sub> kristalının kompleks impedans spektri

Geniş zolaqlı impedans spektroskopiyası bərk cisimlərin quruluşunu, dinamikasını və relaksasiya halını öyrənmək üçün çox faydalı bir vasitədir. Bu məlumatlar yeni növ materialların inkişafı və həmin materialların sonradan parçalanmasının başa düşülməsi üçün vacibdir. Kompleks impedans funksiyası,  $Z^*(w)=Z'(w) - iZ''(w)$  tezlik və temperaturla bağlı olaraq bir material xüsusiyyətidir, burada  $Z'(w)$ - materialda saxlanılan və  $Z''(w)$  hər dövrdə itirilmiş enerji ilə əlaqəlidir. Bu miqdarlar materialın texniki xarakteristikası üçün çox vacibdir [106, c.33, s.14].

Kompleks impedans spektroskopiyasının ekvivalent sxem modelindən istifadə edərək, elektrik xüsusiyyətləri əlaqələndirilə bilər. Kristalın kompleks impedansı aşağıdakı kimi göstərilir:

$$Z^*(w)=Z'(w)-iZ''(w)=\frac{1}{i\omega C_0 \varepsilon^*(w)} \quad (3.7.1)$$

Burada  $w = \pi f$  bucaq tezliyi,  $C_0$  isə geometrik tutumdur.

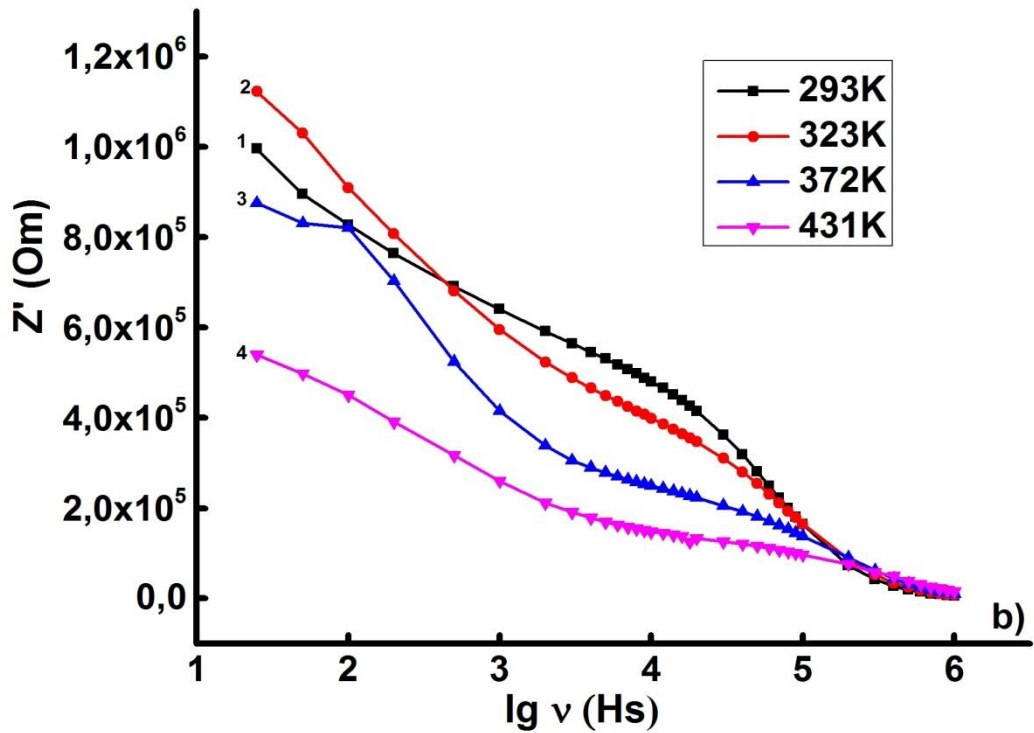
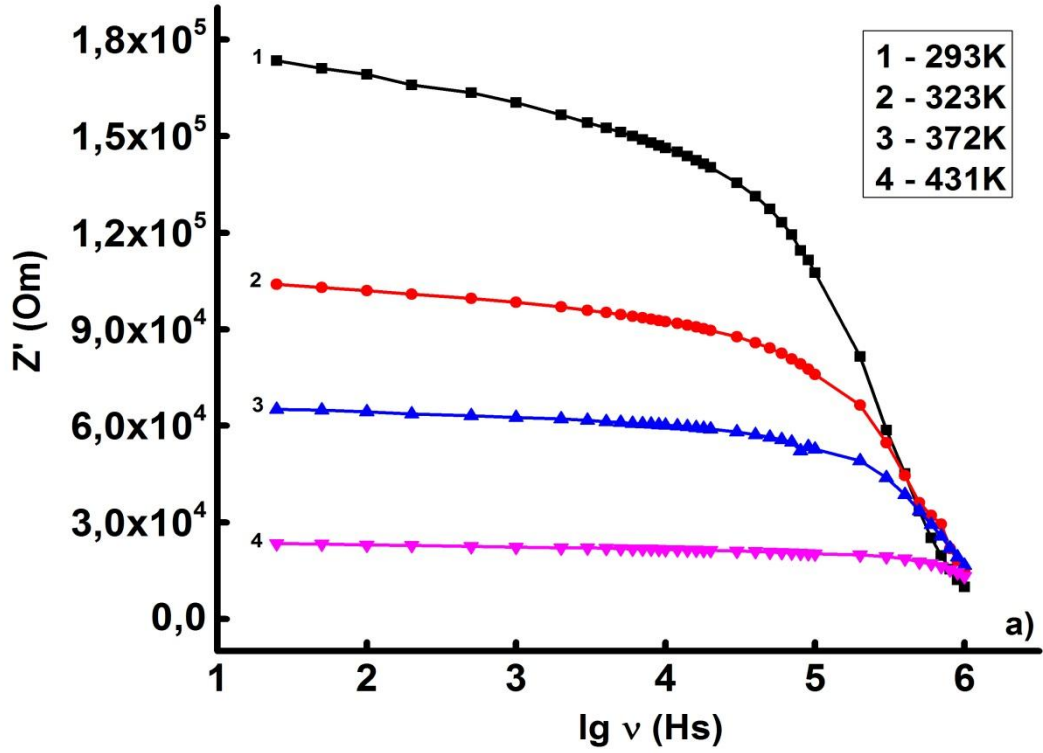
Bərk cisimlərin elektrik xassələrinin öyrənilməsində, elektrodla (nümunə interfeysində) baş verən proseslər, nümunənin elektrik keçiriciliyinin təhrif edilməsinə gətirib çıxararaq, eksperimental nəticələrə əhəmiyyətli dərəcədə təsir göstərir. Elektrod proseslərinin keçiriciliyə ümumi keçiricilikdən təsirini ayırmaq üçün alternativ cərəyan ölçülmələri istifadə olunur. İmpedans spektroskopiyaya üsulu problemi tam olaraq həll etməyə imkan verir. Bu üsulun əsasını impedans qodoqrammalarının qurulması və təhlili təşkil edir.

İmpedansın tezlik asılılığının analiz nəticələrindən istifadə edərək alternativ cərəyanın tezlik aralığını müəyyən etmək olar, burada elektrod impedansın qatqısının təcrübi olaraq müəyyən edilmiş parametri kiçik olacaqdır. Bu aralıqdan bir tezlik seçərək, elektrik keçiriciliyinin və dielektrik sabitinin və s. temperaturdan asılılığını ölçmək mümkündür. Əldə edilmiş bu nəticələr maddənin xassələrini xarakterizə

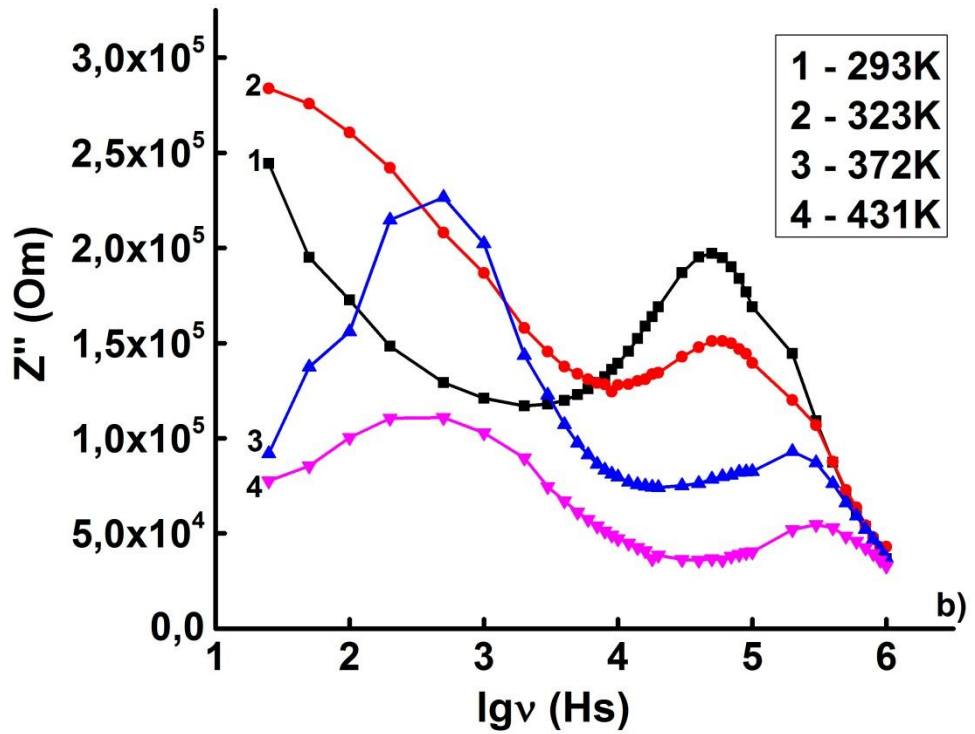
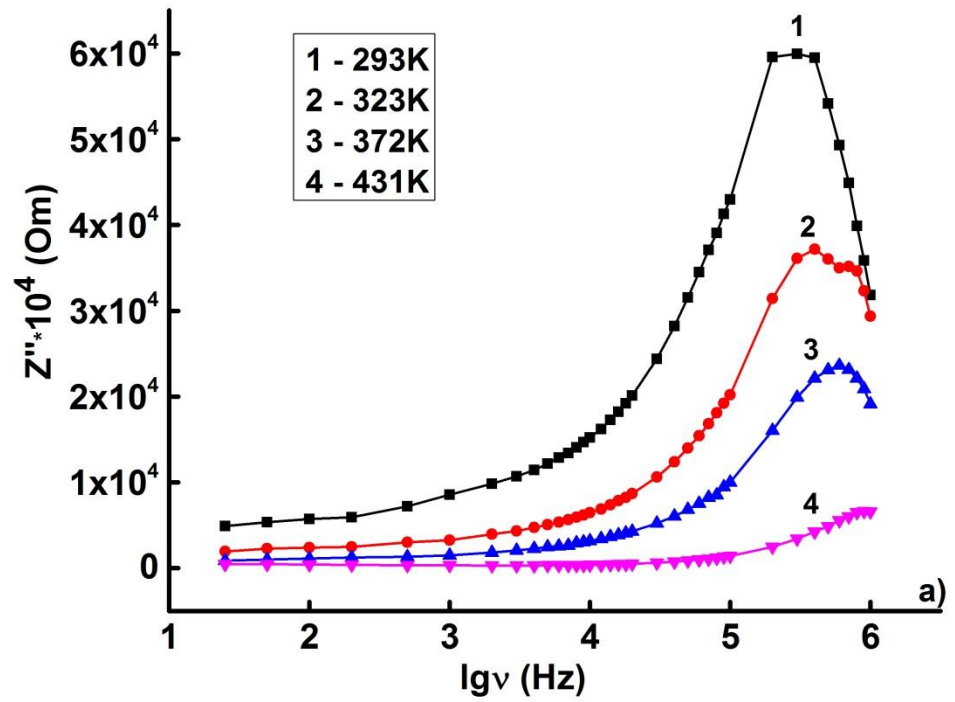
edəcəkdir. Göstərilən bu aralığın sərhədləri xarici amillərin təsiri ilə dəyişə bilər. Yəni temperaturun artması ilə sərhəd tezliklərin yüksək tezliklər sahəsinə sürüşməsinə səbəb olur.

Şəkil 3.7.1(a,b)-də  $\text{TlGaSe}_2$  kristalının şüalanmadan öncə (a) və 20 Mrad qamma kvantlarla şüalandırdıqdan sonra (b)  $Z^*(f)$  kompleks impedansının həqiqi hissəsinin sabit temperaturlarda (293K, 323K, 372K, 431K) və sabit gərginlikdə (1V) tezlikdən asılılığı verilmişdir. Şəkil 3.7.1(a)-dan görüldüyü kimi temperaturun artması ilə kompleks impedansın həqiqi hissəsi azalır. İmpedansın həqiqi hissəsi yüksək tezliklərdə azalması ümumi bir haldır. Tətbiq olunan AC sahəsinin tezliyi artdıqca, dipolların yüksək tezliklərdə sahə dəyişikliklərinə riayət etməməsi və həmçinin elektrod polyarizasiya effektləri səbəbi ilə impedans azalmaya başlayır. Yüksək tezliklərdə, AC elektrik sahəsinin periodik olaraq dövriyyədən çıxarılması o qədər sürətlə baş verir ki, sahənin istiqamətində artıq dipol momenti yox olur. Yüklənməyə görə polyarizasiya azalır və impedansın qiymətinin azalmasına səbəb olur. Şəkil 3.7.1(b)-dən görüldüyü kimi ionlaşdırıcı şüaların təsiri ilə kompleks impedansın həqiqi hissəsinin qiyməti artır və müəyyən xaotiklik müşahidə edilir. Qamma şüalarının təsiri ilə də tezliyin artması ilə kompleks impedansın həqiqi hissəsində azalma müşahidə olunur.

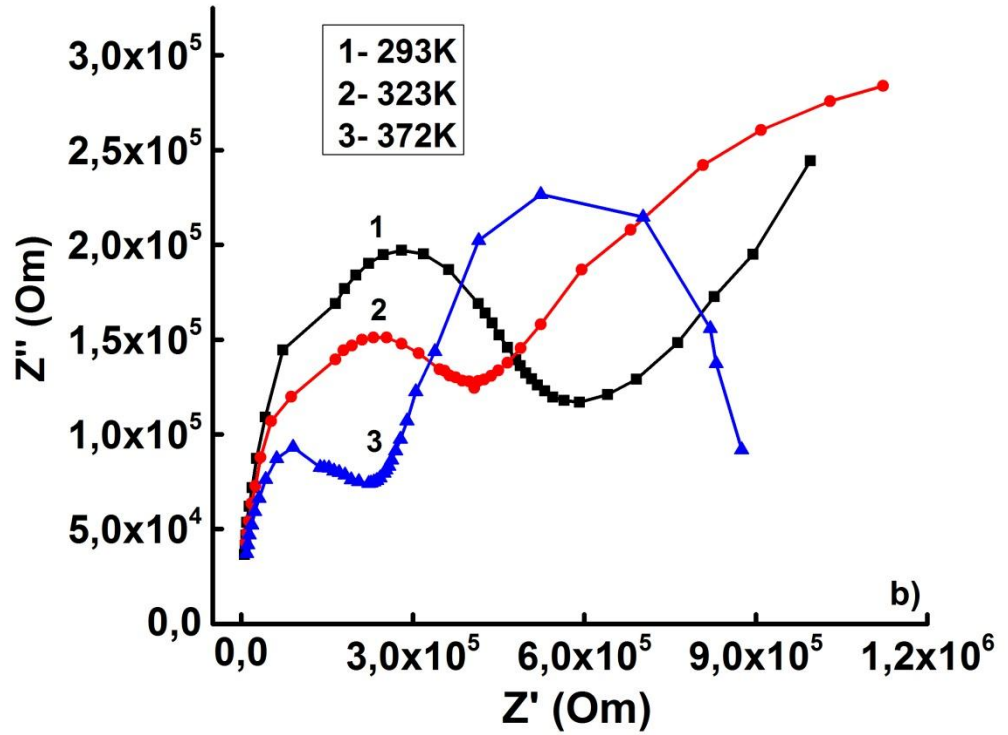
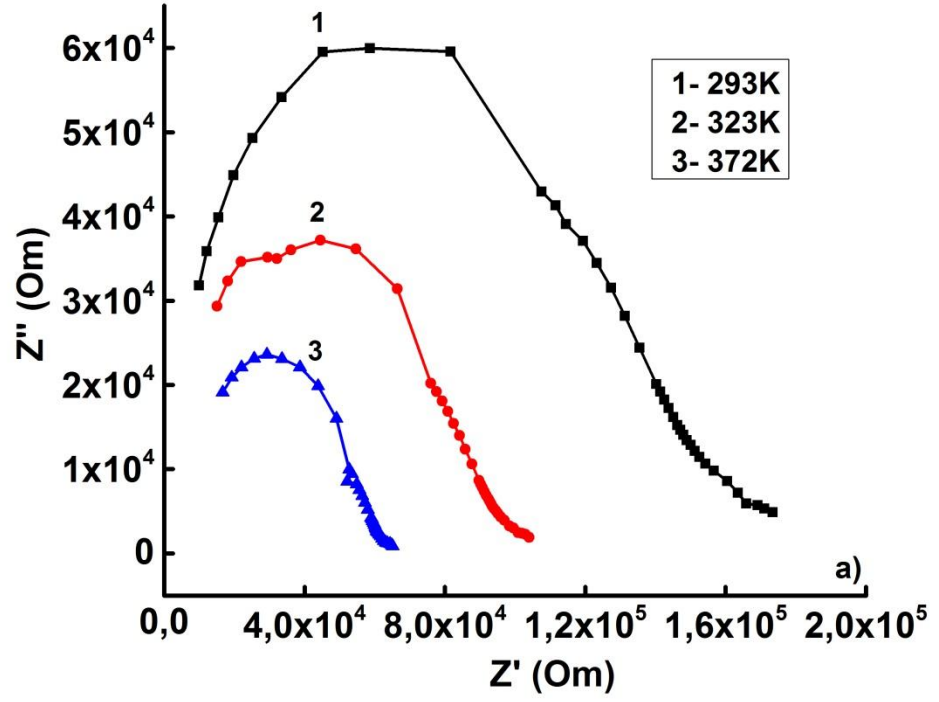
Şəkil 3.7.2(a,b)  $\text{TlGaSe}_2$  kristalının şüalanmadan əvvəl (a) və 20 Mrad qamma kvantlarla şüalandırdıqdan sonra (b)  $Z^*(f)$  kompleks impedansın xəyali hissəsinin tezlikdən asılılığı göstərilmişdir. İmpedansın xəyali hissəsinin tezlik asılılığının ölçmələri sabit temperaturlarda (293K, 323K, 372K, 431K) və dəyişən gərginlikdə (1V) aparılmışdır. İmpedansın xəyali hissəsinin tezlik asılılıqlarının qrafiklərindən görüldüyü kimi (Şəkil 3.7.2(a,b))  $\text{TlGaSe}_2$  kristalının şüalanmadan əvvəl bir maksimum, qamma kvantlarla şüalandırdıqdan sonra isə iki maksimum müşahidə olunur (temperaturun artması istiqamətində).



Şəkil 3.7.1(a,b) TlGaSe<sub>2</sub> kristalının şüalanmadan əvvəl (a) və sonra (b)  $Z^*(f)$  kompleks impedansın həqiqi hissəsinin tezlikdən asılılığı.



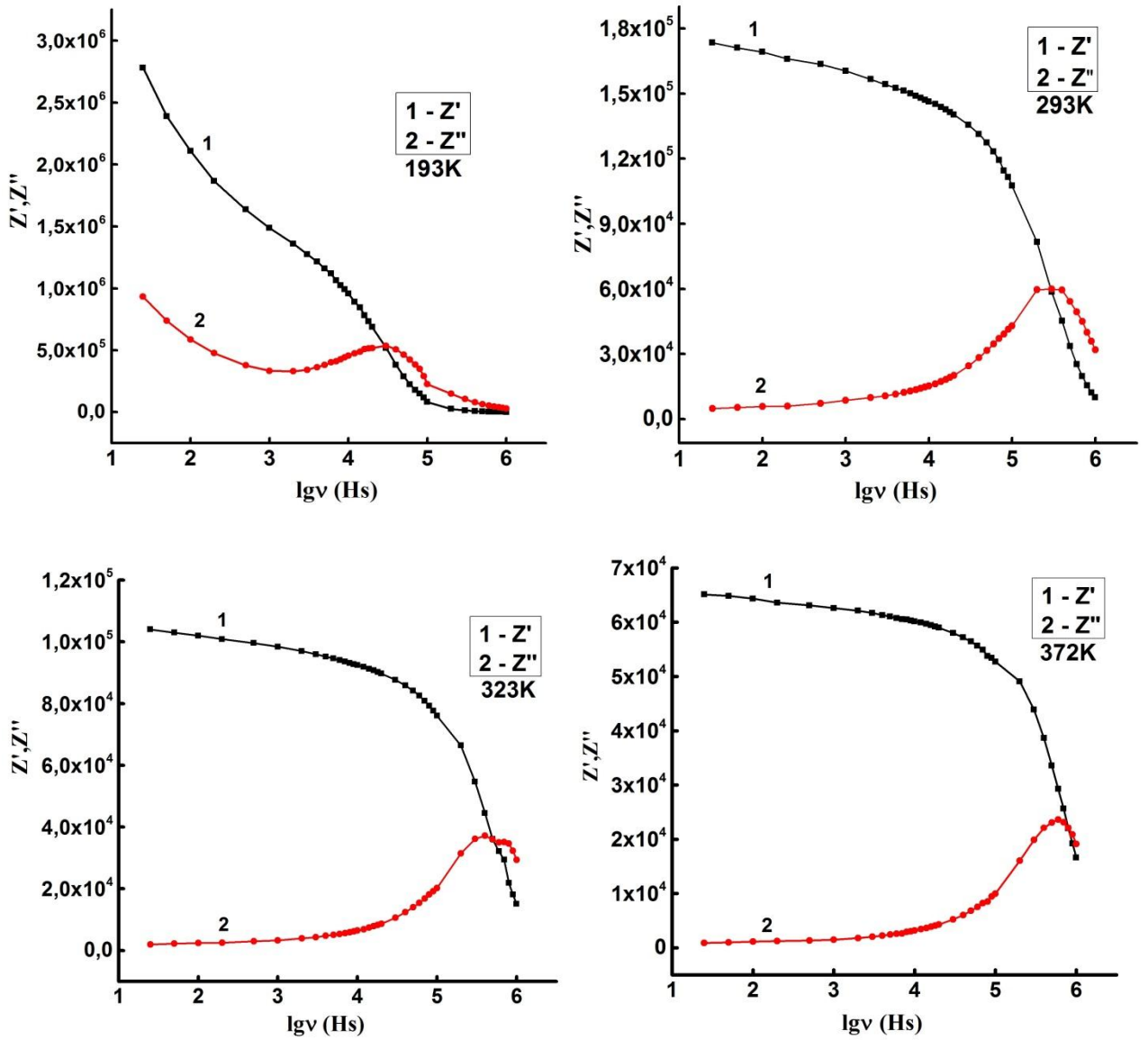
Şəkil 3.7.2(a,b) TlGaSe<sub>2</sub> kristalının şüalanmadan öncə (a) və sonra (b)  $Z^*(f)$  kompleks impedansın xəyali hissəsinin tezlikdən asılılığı.



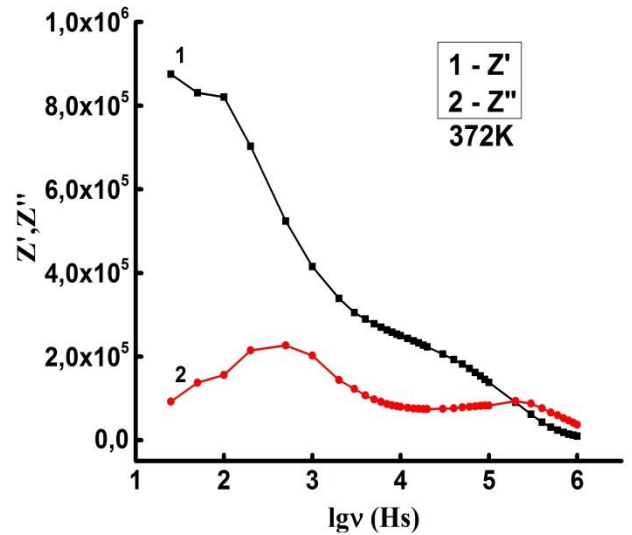
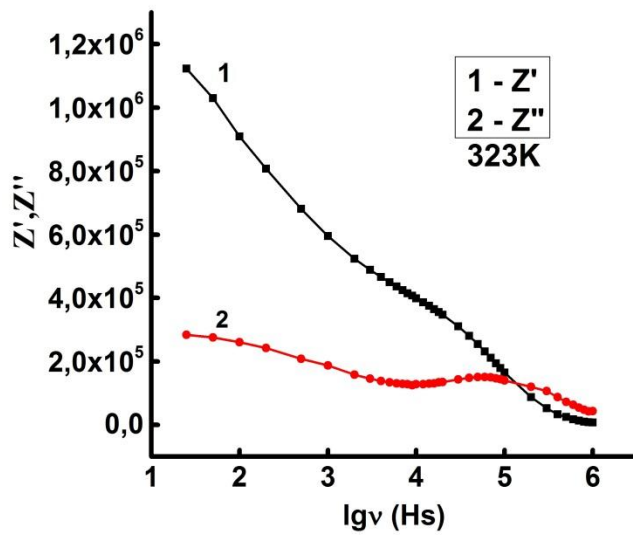
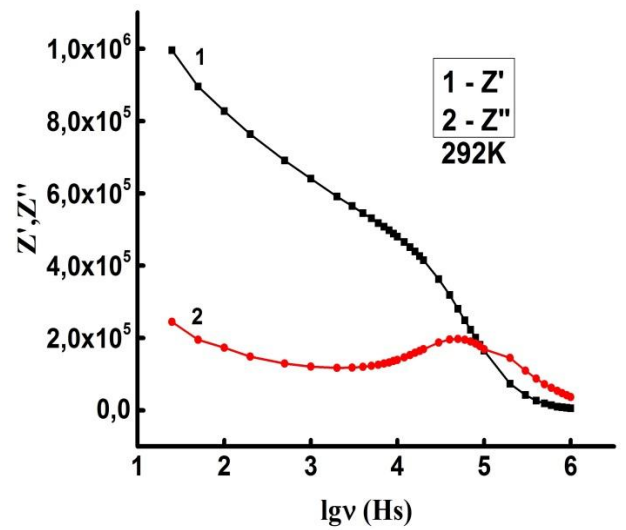
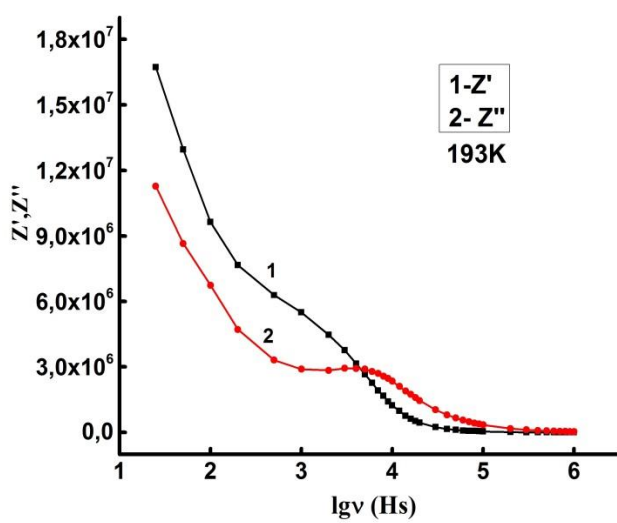
Şəkil 3.7.3 (a,b) TI GaSe<sub>2</sub> kristalının impedans spektri. a- (Şüalanmamış) b- (Şüalanmış - 20Mrad qamma kvantlarla).

İmpedans spektri ümumilikdə qodoqrafdan istifadə etməklə qrafik-analitik metodla təyin olunan elektrik relaksasiya müddəti ilə, yəni impedansın  $Z''$ -nin xəyali komponentinin həqiqi komponent  $Z'$ -ə asılılığının qurulması ilə xarakterizə edilir. Şəkil 3.7.3(a,b) kompleks şəkildə ( $Z''=f(Z')$ ) qurulmuş TlGaSe<sub>2</sub> kristallarının impedans spektrlərini göstərir. Şəkil 3.7.3(a,b)-dən görüldüyü kimi şüalanmadan öncə  $Z''=f(Z')$  asılılığında bir qodaqrama müşahidə olunduğu halda, qamma kvantlarla şüalandırıldıqdan sonra iki qodaqrama müşahidə olunur. Bu da müəyyən temperaturdan sonra radiasiya defekləri hesabına əlavə relaksatorun əmələ gəlməsinə dəlalət edir.

Şəkil 3.7.4 və Şəkil 3.7.5-də TlGaSe<sub>2</sub> nümunəsi üçün şüalanmadan öncə və sonra (20Mrad qamma kvantlarla) impedansın real ( $Z'$ ) və xəyali ( $Z''$ ) hissələrinin tezlikdən asılı olan izotermləri göstərilmişdir. Şəkil 3.7.4-də real  $Z'(f)$ -nin addım dəyişilməsi şəklində və impedansın xəyali  $Z''(f)$  hissələrinin maksimumunda anormallıqlar mövcuddur. İmpedansın tezlik asılılıqlarının analiz nəticələrindən istifadə edərək, elektrod impedansı tədqiq edilərək müəyyən edilmiş parametrlərinə təsirinin kiçik olacağı bir sıra AC tezlikləri müəyyən edilə bilər [139, c.77, s.90; 142, c.49, s.40; 140, c.46, s.966]. Bu sahədə tezlik çıxarılaraq elektrik keçiriciliyinin, dielektrik keçiriciliyinin və s. temperatur asılılıqlarının ölçülmüş və əldə edilən nəticələri nümunənin əsl xüsusiyyətlərini xarakterizə edəcəkdir. Qeyd edək ki, temperaturun artması sərhəd tezliyində yüksək dəyişikliklərə gətirib çıxarır.



**Şəkil 3.7.4 Şüalanmamış TlGaSe<sub>2</sub> kristalının kompleks impedans spektrinin həqiqi və xəyali hissəsinin tezlik asılılığı (193K, 293K, 323K, 372K).**

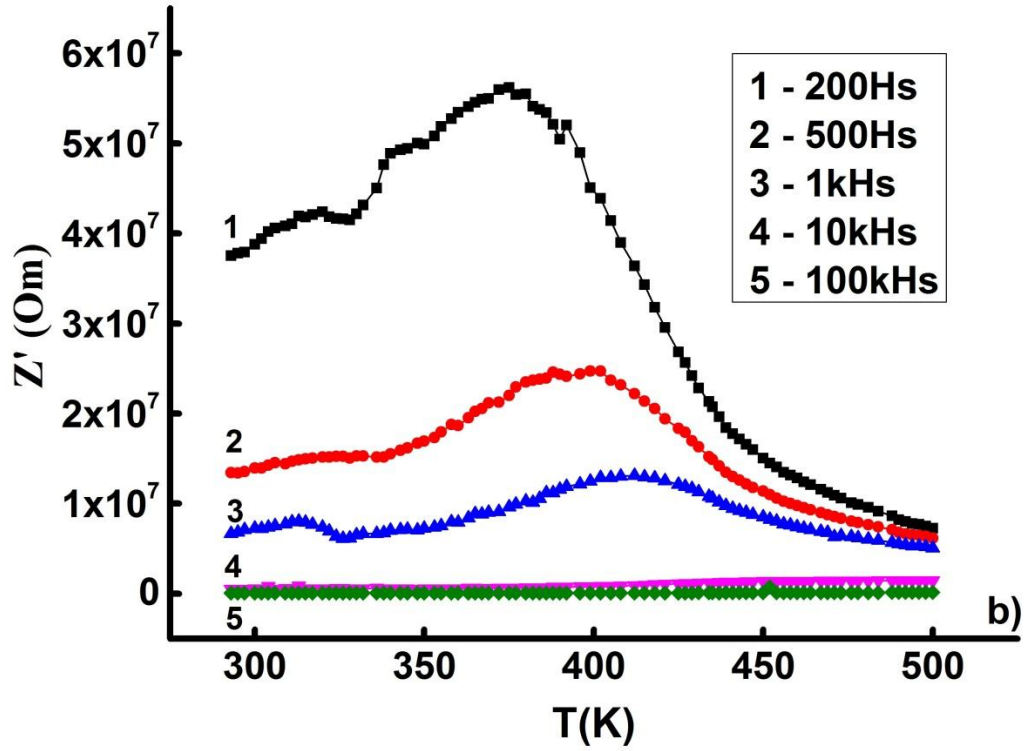
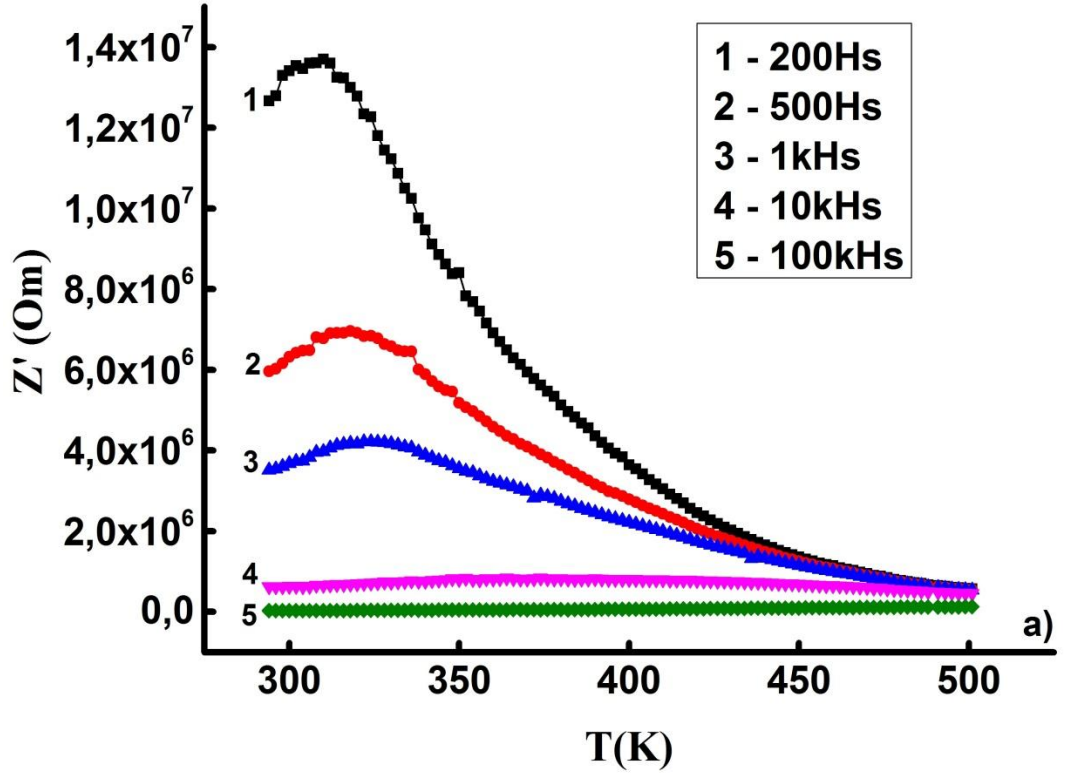


**Şəkil 3.7.5** 20 Mrad qamma şüalarla şüalanmış TlGaSe<sub>2</sub> kristalının kompleks impedans spektrinin həqiqi və xəyali hissəsinin tezlikdən asılılığı (193K, 293K, 323K, 372K).

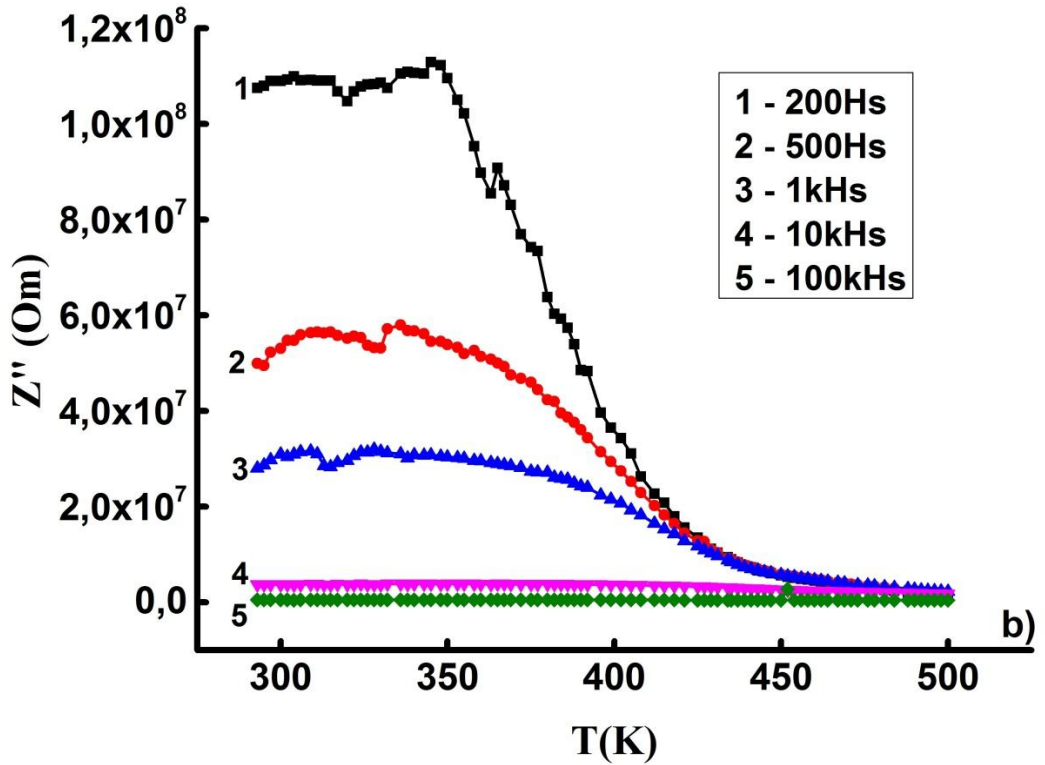
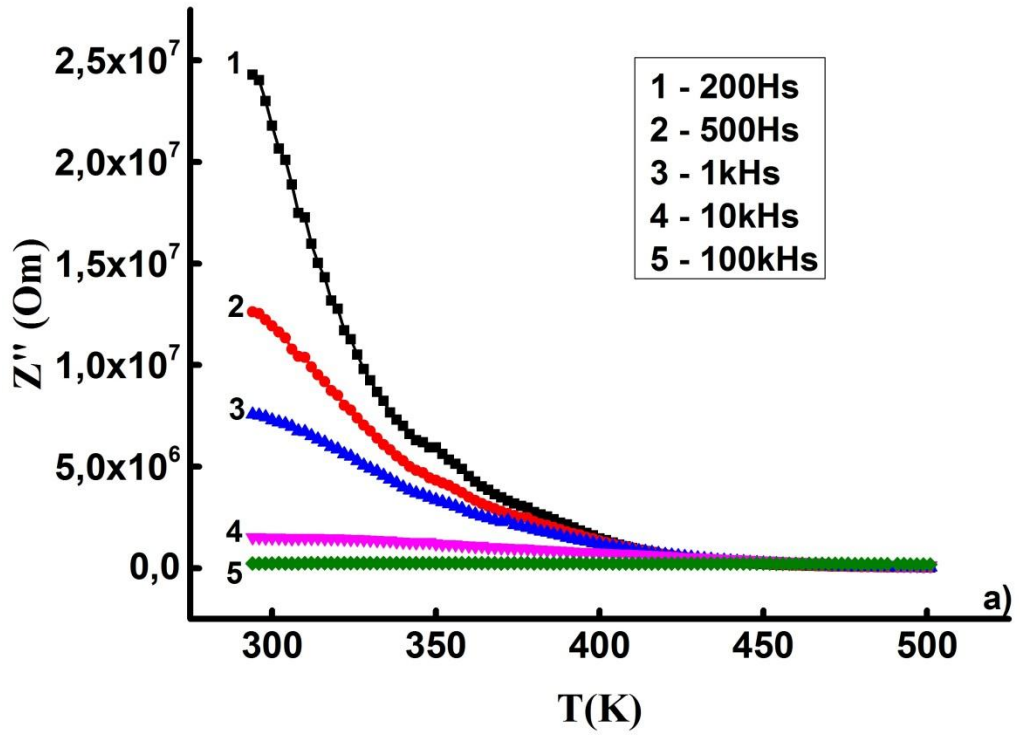
### 3.8. $\text{TIInS}_2$ kristalının kompleks impedans spektri

Yüksək keçirici ion materialların axtarışı, sintez şərtləri ilə qarşılıqlı əlaqədə aparılmış ionların hərəkət dinamikasının hərtərəfli öyrənilməsini tələb edir. (3.4)-paragrafında qeyd etdiyimiz kimi, bu məqsədlər üçün optimal üsul impedans spektroskopiyasıdır. Sistemin kiçik amplitudunun bir sinusoidal pozulma siqnalına verdiyi reaksiyanın tədqiq edilməsi, ionların köçürülməsi və polyarizasiya təsirləri səbəbindən maddədə yüklərin köçürülməsi prosesini ətraflı izah etməyə imkan verir. Məlumatlar impedans spektroskopiyasına əsaslanan nizamsız sistemlərdə meydana gələn modellər proseslərin müasir metodları, ionların diffuziya mexanizmi anlayışını əhəmiyyətli dərəcədə genişləndirməyə imkan verir [143, s.374]. İmpedans spektroskopiyaya məlumatlarına əsaslanan nizamsız sistemlərdə baş verən modelləşmə proseslərinin müasir metodları, ion diffuziya mexanizmi anlayışımızı əhəmiyyətli dərəcədə genişləndirməyə imkan verir.

Şəkil 3.8.1 (a,b)-də  $\text{TIInS}_2$  impedansın həqiqi hissəsinin temperatur asılılığı verilmişdir (a-ilkin halda (şüalanmamış), b-20 Mrad qamma kvantlarla şüalandırıldıqdan sonra). Ölçmələr sabit gərginlikdə, 295-500K temperatur intervalında və  $25 \cdot 10^6$  Hz tezlik oblastında aparılmışdır. Şəkildən də göründüyü kimi hər iki halda (şüalanmış və şüalanmamış), impedansın həqiqi hissəsinin qiyməti temperaturun artması ilə azalır. Lakin şüalanmanın təsiri ilə impedansın həqiqi hissəsinin qiymətində artma müşahidə edilmişdir. Şəkil 3.8.2 (a,b)-də uyğun olaraq impedansın xəyali hissəsinin temperatur asılılığı göstərilmişdir. İonlaşdırıcı şüaların təsiri ilə impedansın xəyali hissəsinin qiyməti artmışdır. Şəkillərdən göründüyü kimi şüalanmanın təsiri ilə  $Z'(\omega)$  kompleks impedansının həqiqi hissəsi və  $Z''(\omega)$  xəyali hissəsinin temperatur asılılıqları pələkanvari olaraq dəyişir və maksimumlarla müşahidə olunur.  $Z'(\omega)$  və  $Z''(\omega)$  maksimumları 450K temperatur oblastına sürüşür.



Şəkil 3.8.1 (a,b) TIInS<sub>2</sub> kristalında impedansının həqiqi hissəsinin temperatur asılılığı (a-ilkin hal, b-20Mrad qamma kvantlarla şüalandırılmış halda)



Şəkil 3.8.2 (a,b) TIInS<sub>2</sub> kristalında impedansın xəyali hissəsinin temperatur asılılığı (a-şüalanmamış, b-20Mrad qamma kvantlarla şüalandırılmış)

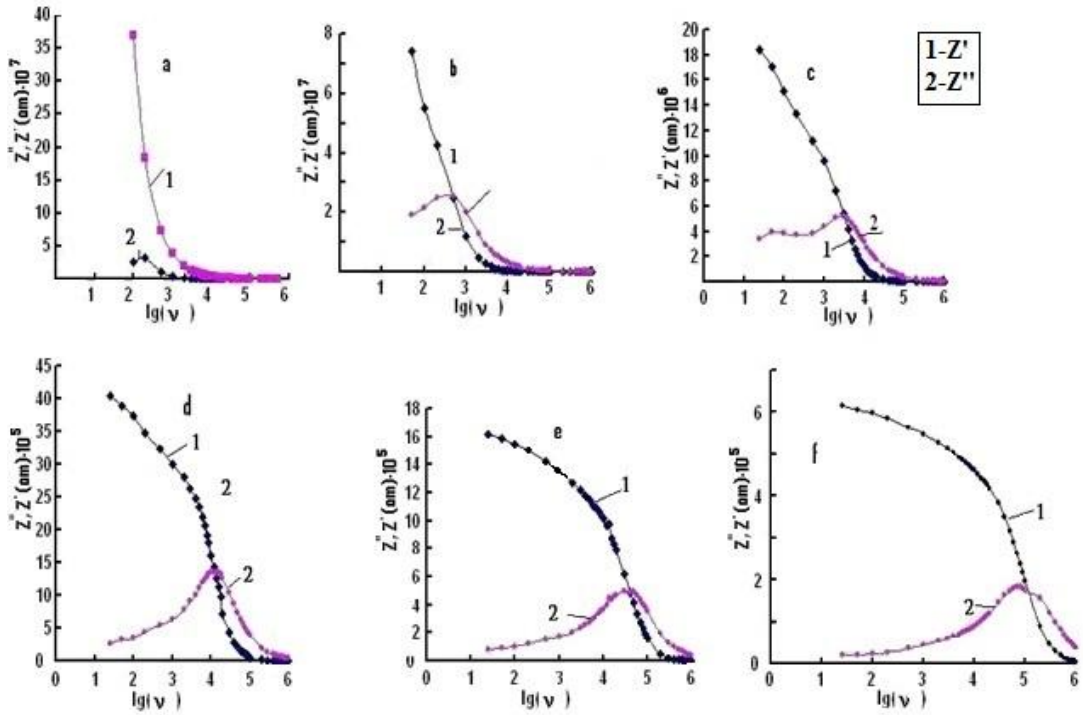
Şəkil 3.8.3-də ilkin halda  $\text{TiInS}_2$  kristalı üçün  $Z'$ -həqiqi və  $Z''$ -xəyali impedans komponentinin tezlikdən asılılıq izotermləri göstərilmişdir. Şəkil 3.8.3 - də impedansın həqiqi (real)  $Z'(f)$  və xəyali  $Z''(f)$  hissəsinin birbaşa dəyişmə şəklində anomaliyaları göstərilmişdir. İmpedansın tezlikdən asılılığının təhlil nəticələrindən istifadə edərək, tədqiqi olaraq müəyyən edilmiş parametrlərə elektrod impedansının təsirinin kiçik olacağı alternativ AC tezlik aralığı təyin edilə bilər [143, s.374; 139, c.77, s.90; 175, c.2, s.11]. Bu sahədə tezlik aralığı seçilərək, elektrokeçiricilik və dielektrik keçiriciliyi və s. temperaturdan asılılığının ölçülməsi mümkündür və əldə edilən nəticələr bu materialların əsas xüsusiyyətlərini xarakterizə edəcəkdir. Qeyd edək ki, göstərilən aralığın sərhədləri xarici amillərin təsirindən fərqlənə bilər.

Şəkil 3.8.3-dən göründüyü kimi hər bir əyri üç sahəyə bölünür. İlk aşağı tezlikli sahə  $Z^*(f)$  kompleks impedansın real hissəsinin yavaş-yavaş azaldığını və artan tezlik ilə keçiriciliyin artmasını göstərir. Bu da yüksək keçiricili ion keçiricilər üçün xarakterik bir haldır və bloklanmış elektrodalarda həcmi boşluqların meydana gəlməsi ilə əlaqədar ola bilər. Keçiriciliyin tezlik ilə artdığı ikinci orta tezlik sahəsi yalnız aşağı temperaturlarda meydana gəlir. Üçüncü sahə - yüksək tezlik aralığında yerləşir. Qeyd edək ki, platforma sahəsi aşağı temperaturlarda aşağı tezlik sahəsindən, yüksək temperaturlarda yüksək tezlik sahəsinə sürüşdürülmüşdür.

Yük daşıyıcılar, keçiriciliyinin mexanizmi, elektrod yaxınlığında laylarda elektrik tutumu effektləri haqqında məlumat almaq üçün dəyişən elektrik sahəsində elektrik xassələrinin ölçülməsindən geniş istifadə olunur [39, s.6]. Dəyişən cərəyan sxemləri köməyilə real sistemlər üçün dielektrik və kompleks impedans spektrləri yazılır. ( $Z' - Z''$ ) kompleksinin müstəvisində ardıcıl RC birləşməsinə diaqramma şaquli şüa, paralel RC birləşməsinə isə qodoqraf yarım dairə şəklində olur [39, s.8]. Müqavimət və tutumun paralel birləşməsində impedansın həqiqi və xəyali hissələri aşağıdakı kimi təyin olunur:

$$Z' = \frac{R}{1+(RC\omega)^2} \quad (3.8.1)$$

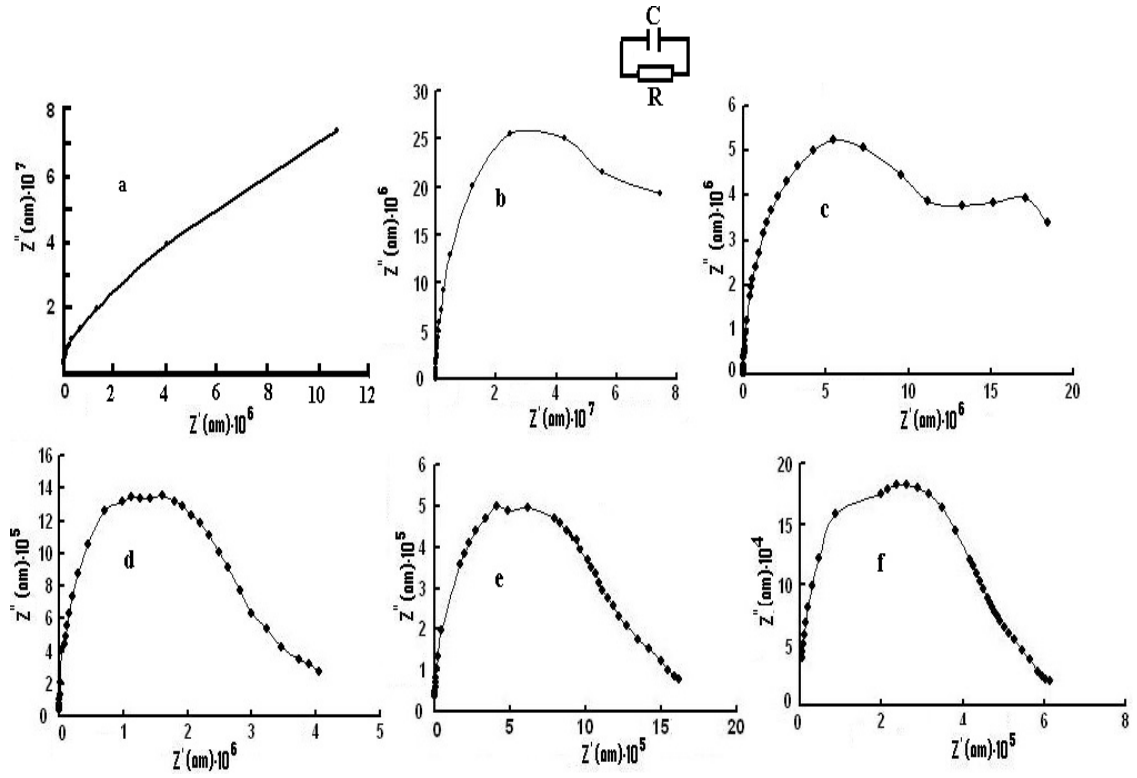
$$Z'' = R \frac{RC\omega}{1+(RC\omega)^2} \quad (3.8.2)$$



**Şəkil 3.8.3 TIInS<sub>2</sub> kristalının Z'-həqiqi və Z''-xəyali impedansının tezlikdən asılılığı göstərilmişdir. a-200K; b-294K; c-340K; d-386K; e-429K; f-460K;**

Sadə rezistor və tutum əsasında ekvivalent sxem bütün tədqiq olunan tezlik oblastında eksperimental nəticələri təsvir etmir. Şəkil 3.8.4-dən görüldüyü kimi qodoqrafın aşağı tezlikli oblastında aşağıdakı uyğunsuzluqlar var və eksperimental nöqtələr ideal yarımçevrədən kənara çıxır. [43, c.1, s.702, 54, c.1, s.222]-ədəbiyyatlarından da məlum olduğu kimi, bu kənara çıxmalar diffuziya impedansı ilə əlaqədardır. Yəni aşağı tezliklərdə yük daşıyıcıların qradiyenti əmələ gəlir. Dreyfin əks istiqamətində diffuziyanın artması impedansın həqiqi hissəsinin Z' qiymətini artırır. Bu yanaşma, eyni zamanda eksperimental nəticələrdə ideal yarım dairənin alınmamasını, yəni təhrif olunmasına gətirib çıxarır [43, c.1, s.705, 54, c.1, s.222]. Yəni ideal yarım dairənin alınmamasını təsvir etmək üçün imkan verir. TIInS<sub>2</sub> kristalının (Z''-Z') kompleks müstəvisində qodoqrammasından yüksək tezlikli oblastın sərhəddi təyin olunmuşdur.

Şəkil 3.8.4-də ( $Z'' = f(Z')$ )-i kompleksində meydana gələn TIInS<sub>2</sub> kristalları üçün impedans spektrləri göstərilmişdir. İki sahə fərqlənir. Birincisi, kristalın fəza yük polarizasiyasının dielektrik reaksiyasına olan təsirinə uyğun gəlir. Göstərilən yarımdairənin daha sağ tərəfində yerləşən 2-ci sahənin mövcudluğu nümunəyə digər elektrik maneələrin təsiri ilə əlaqəli ola bilər. Yüksək tezlik aralığında  $Z'$  və  $Z''$  yox olur. Bu halda, ekvivalent dövrə paralel bağlanmış bir tutumu  $C$  və müqaviməti  $R$  olan bir dövrə ilə göstərilə bilər (Şəkil 3.8.4). Eksperimental məlumatların şərhində bərabər dövrənin parametrləri, yalnız 20 Hz  $\langle \omega_{max} \rangle$  1 MHz tezliyini ölçmək üçün mövcud olan sahədə  $\omega_{max}RC = 1$ -də müşahidə olunan asılılıq  $Z''(\omega)$  əmsalının maksimumunu nəzərə alındıqda hesablanıla bilər [175, c.2, s.11].



Şəkil 3.8.4 TIInS<sub>2</sub> kristalı üçün impedans spektrləri; a-200K; b-294K; c-340K; d-386K; e-429K; f-460K.

### 3.9. $\text{TlInS}_2$ kristalının Işığın Kombinasiyalı Səpilmə spektrləri

$\text{A}^3\text{B}^6$ ,  $\text{A}^3\text{B}^3\text{C}_2^6$  qrup birləşmələr və bunlara əsaslanan kristallar olduqca anizotropik kristal strukturların meydana gəlməsinə səbəb olan yarımkeçirici materialların geniş sinifidir. Bunların araşdırılması bərk cisimlər fizikasının bir sıra fundamental problemlərinin həlli ilə bağlıdır. Bundan əlavə eksperimental tədqiqatlar, bu birləşmələr siniflərini lazer texnologiyasında qeyri-xətti olmayan optikdə, görünən və infraqırmızı diapazonlu qəbuledicilərin modulyatorları və tezlik çeviricilərində, gərginlik göstəricilərdə və digər məqsədlərlə istifadə etməyə vəd etmişdir.

Kristal qəfəsin dinamikası ilə bağlı bütün məlumatlar qeyri elastiki neytron səpilməsi, işığın kombinasiyalı səpilməsi və infraqırmızı spektroskopiyaya üzrə eksperimentlər aparılaraq əldə edilir. Bütün bu üsullar qarşılıqlı olaraq bir-birini tamamlayır və son illərdə geniş tətbiq olunur.

Molekullar arası fononun mövcud izolə edilmiş enerjili zonalarının fonon sıxlığının funksiyası təmiz kristalların iki fonon spektrindən və qarışıq kristalların bir fonon spektrindən tapıla bilər. Qəfəs fononları üçün bu problemin həlli daha çətinidir. Bununla yanaşı, bu vəziyyətdə halların fonon sıxlığının funksiyası haqqında tam məlumatlar, optik spektroskopiyaya metodları vasitəsi ilə alınır. Işığın kombinasiyalı səpilməsi, struktur mərhələsi keçidlərinin öyrənilməsində əsas metodlardan biridir [119, c.27, s.25]. Amorf fazaya uyğun olan fasiləsiz spektri və kristal fazada səpilməyə uyğun kəskin maksimumu müşahidə etmək üçün işığın kombinasiyalı səpilmə metodundan istifadə edilir. Təhlil nəticəsində İKS spektrində modların mövqeyini və intensivliyini nəzərə alaraq, kimyəvi tərkibləri (maddənin xarakterini müəyyənləşdirmək) və ya molekullararası qarşılıqlı əlaqələri öyrənmək mümkündür. Işığın kombinasiyalı səpilmə spektrometrinin əsas üstünlüklərindən biri nümunənin asan hazırlanması və əldə edilən informasiyanın yetərliliyidir. Digər tərəfdən tədqiq olunan nümunənin qalınlığı və ətraf mühit İKS spektrometrində problem yaratmır.

Bu işdə təqdim olunan  $\text{TlInS}_2$  kristallarının optik tədqiqatları xüsusiyyətlərinin mürəkkəbliyi və müxtəlifliyi göstərilmişdir. Hal hazırda bu materialların istehsalı üçün texnologiyanın mükəmməl olmaması və bundan başqa, sintez olunan bu kristalların müxtəlif elektrofiziki və optik xüsusiyyətlərə sahib olan bir neçə polipropandan ibarət olması vəziyyəti daha da ağırlaşdırır [46, c.18, s.112].  $\text{TlInS}_2$  kristallarının tədqiqatı bu kristalların optik və elektrofiziki xassələrinin yeganəliyi və praktiki istifadəsi üçün əhəmiyyətli perspektivlilik səbəbindən olduqca intensiv şəkildə aparılır. Kristalların deffekt-qarışıq alt sisteminin fiziki xassələrə təsiri və aşağı temperatur faza keçidlərinin xüsusiyyətləri fəal şəkildə öyrənilir.

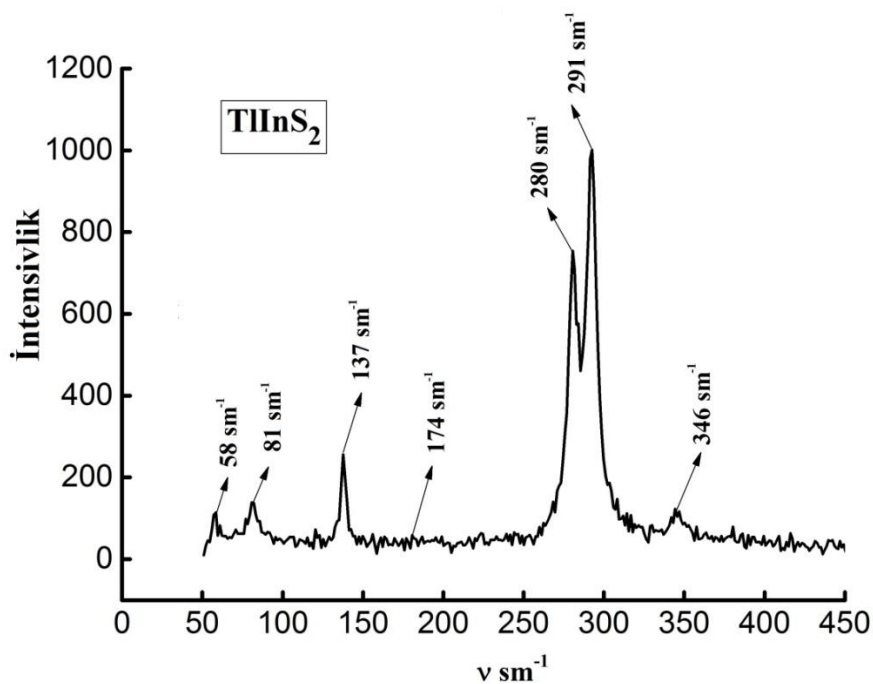
Həmçinin optik sistemlərin birmənalılığı bu cür sistemlərdə geometrik ölçmələrdən asılıdır, yəni həyəcanlanmış və qeyd olunmuş optik şüaların, optik oxların və kristalın kristalloqrafik oxlarının arasında olan verilmə bucağından (şüalanmanın polyarizasiya səthlərini daxil etməklə) asılıdır. Təəssüf ki, bütün bu tələbləri tam yerinə yetirmək həmişə mümkün deyildir.

Bu işdə şüalanmamış  $\text{TlInS}_2$  laylı monokristalının quruluşunda nizamsızlığın pozulması proseslərinin, işığın kombinasiyalı səpilməsi metodu ilə tədqiqinin nəticələri verilmişdir.

Şəkil 3.9.1-də ilkin halda  $\text{TlInS}_2$  kristalının İKS spektri göstərilmişdir. İlkin halda  $\text{TlInS}_2$  kristalının İKS spektrləri müasir NTEGRA Spectra LS PNL spektrometrində  $50\text{-}2000\text{sm}^{-1}$  diapazonunda tədqiq edilmişdir. İşıq mənbəyi olaraq dalğa boyu  $\lambda = 633\text{ nm}$  olan He-Ne lazerindən (qırmızı lazer) istifadə edilmişdir. İstifadə olunan lazer mikroskopu konfokal olduğundan, nümunə üzərində bir nöqtəyə düşür. Səthin bircins olması əsas şərt olduğundan, İKS spektrləri çəkilərkən bir neçə nöqtədə götürülmüşdür. Spektral həllər  $\pm 0,5\text{ sm}^{-1}$ -dən daha pis olmamışdır. İKS spektrləri 300K otaq temperaturunda tədqiq edilmişdir. Polyarizə olunmuş İKS spektri perpendikulyar modda kristal səthi üzərində əks səpilmə istiqamətində ölçülmüşdür. Araşdırılan nümunələrdə istilik təsirini minimuma endirmək üçün nümunə üzrə radiasiya gücü  $600\text{ }\mu\text{W} - 2\text{ mW}$  səviyyəsinə qədər zəiflədilmişdir. Nümunə üzərinə düşən şüanın ölçüsü təxminən 1 mikrondur. Siqnalın yığılma müddəti bir qayda olaraq 0,5 ilə 1 dəqiqə olmuşdur.

Otaq temperaturda ilkin halda  $\text{TlInS}_2$  kristalının İKS spektrlərinin qiymətləri və simmetriyaları göstərilmişdir.

Təcrübədən alınan rəqslərin tezliyi ( $\nu$ , $\text{sm}^{-1}$ )	Ədəbiyyat məlumatları ( $\nu$ , $\text{sm}^{-1}$ ) [111, s.305; 92, s.317]
300K	300K
58 ( $A_g$ )	57 ( $A_g$ )
81 ( $A_g$ )	81 ( $A_g$ )
115 ( $A_g$ )	115 ( $A_g$ )
137 ( $A_g$ )	137 ( $A_g$ )
174 ( $A_g$ )	-
280 ( $A_g$ )	279 ( $B_g$ )
291 ( $A_g$ )	291 ( $A_g$ )
346 ( $A_g$ )	344 ( $A_g$ )



Şəkil 3.9.1 Otaq temperaturunda ilkin halda  $\text{TlInS}_2$  kristalının İKS spektri.

İKS spektrinin ölçülərindəki hər bir hal ən kiçik kvadratlar prosedurundan (həllindən) istifadə edərək, Lorentzian təpələrinə ayrılmışdır. Otaq temperaturda əldə edilən spektrdə 6 İKS xətti müəyyən edilmişdir.

Laylı birləşmələrdə temperaturun səbəb olduğu faza keçidləri halında, faza keçidlərinin yaranmasına səbəb olan xarici təbəqə modlarının (rejimin) yüksək temperatur asılılığına sahib olması gözlənilir [99, c.23, s.2471]. Beləliklə demək olar ki, TlMeX<sub>2</sub> laylı birləşmələri üçün faza keçidlərinin yaranmasına səbəb olan Tl atomlarının yer dəyişdirmələrini əhatə edən xarici təbəqə (Tl-X) modlarının, ən yüksək temperatur asılılığına sahib olması gözlənilir [168, s.1600214].

Cədvəl 3.9.1-də TlInS<sub>2</sub> kristalının fonon tezliyi və simmetriyası göstərilmişdir və İKS spektrləri əsasən ədəbiyyatda verilmiş TlInS<sub>2</sub> kristallarının İKS spektrlərinə uyğun gəlir. Spektr xətlərinin intensivliyinin nisbəti və onların dəqiq mövqeyi, göstərildiyi kimi, təcrübənin geometriyası ilə bağlıdır [119, c.27, s.25]. Beləliklə, C<sub>2h</sub><sup>6</sup> simmetriya geometrik qrupu üçün qrup-nəzəriyyə analizi ilə təxmin edilən 10A<sub>g</sub> fononları müşahidə edilmişdir. Qeyd etmək lazımdır ki, müşahidə edilən ümumi fonon sayı və polyarizasiya davranışı C<sub>s</sub><sup>4</sup> simmetriya qrupunu istisna edir.

Nəticə olaraq söyləmək olar ki, temperatur və tezliklər üçün ölçülən tutum və keçiricilik dəyərləri, temperatur və tezliyə qarşı olduqca həssasdır. Artan temperaturla tutum və keçiriciliyin qiymətləri artarkən, sabit temperaturlarda tezliyin artması ilə azalmaqdadır. Tezlikdəki azalma ilə tutum artır və yarımkəçirici-izolyator interfeysində heterogen təbəqənin tutum ilə tezlik dağılımının səbəb olduğu izolyator tutumu ilə təsirlənir. Yarımkəçirici birləşmələri üçün fərqli tezlik qiymətlərində, (ε'), (ε''), (σ) artan temperaturla artır. Dielektrik itki bucağının tangensi (tanδ)-i artan temperaturla artır sonra isə, azalmağa doğru gedir. Temperatur artdıqca, nümunə daxilində defektlər/nizamsızlıqlar meydana gəlir və çoxluqla yük daşıyıcıların (ionlar və elektronlar) hərəkətliliyi (mobilliyi) artır. Ümumiyyətlə, temperaturun artması elektron polarizasiyasında artışa və dielektrik materialların ε' və ε'' qiymətlərində bir artmaya səbəb olur. Yəni dielektrik materialların ε' və ε'' qiymətlərindəki artım molekulların temperatur ilə genişlənməsindən qaynaqlanır.

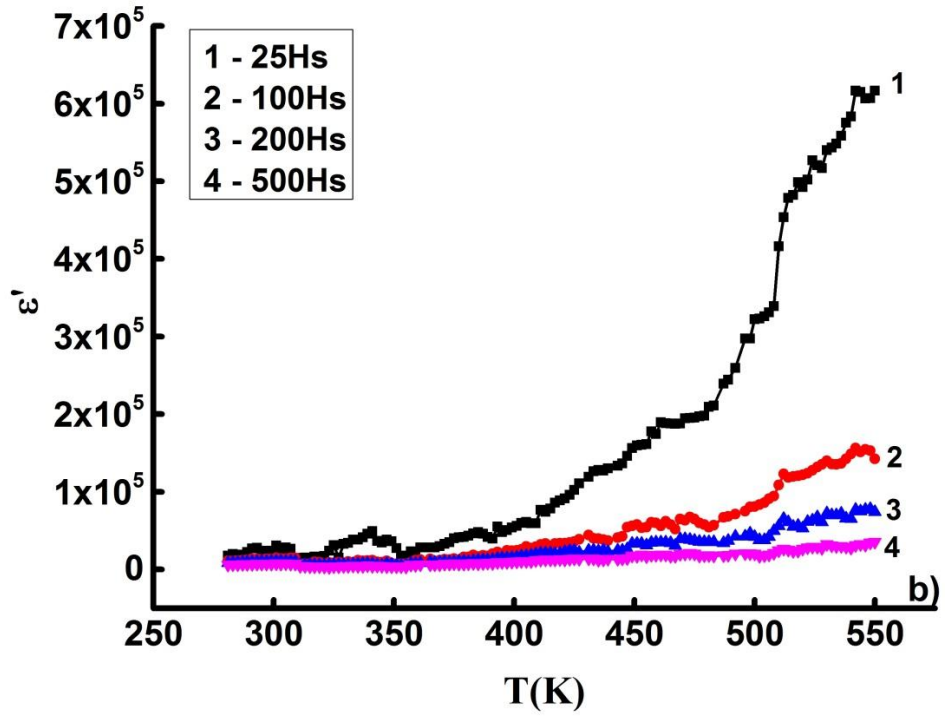
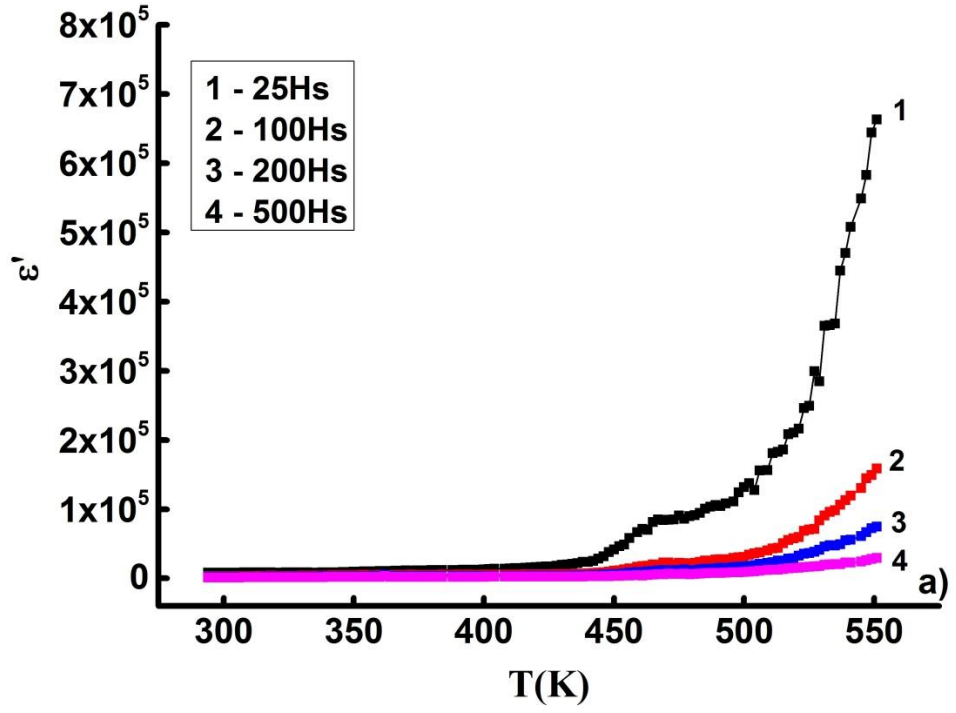
## **FƏSİL IV. TlGaSe<sub>2</sub> VƏ TlInS<sub>2</sub> KRİSTALLARININ ELEKTRİK VƏ DİELEKTRİK XASSƏLƏRİNƏ İMPLANTASIYANIN TƏSİRİ**

Bu fəsildə protonla implantasiya olunmuş TlGaSe<sub>2</sub> və TlInS<sub>2</sub> kristallarının 300-550K temperatur intervalındakı dielektrik və elektrik tədqiqatlarının nəticələri verilmişdir. Belə ki, TlGaSe<sub>2</sub> və TlInS<sub>2</sub> kristallarını 150keV enerjiyə malik proton və alfa ionları ilə implantasiya edərək, kristalların dielektrik, elektrik və optik xassələrinə implantasiyanın təsiri müqayisəli şəkildə öyrənilmişdir. TlInS<sub>2</sub> kristalını implantasiyadan əvvəl və sonra Işıqın Kombinasiyalı Səpilmə (İKS) spektrləri tədqiq edilmişdir. İmplantasiya zamanı, implant ionlarının dərinlikdə paylanması, dərinlikdə yaratdığı vakansiyalar SRIM hesablama proqramı vasitəsi ilə hesablanmış və spektrlər şəklində təqdim edilmişdir.

### **4.1. TlGaSe<sub>2</sub> kristalının dielektrik nüfuzluğuna H<sup>+</sup> və He<sup>2+</sup> ionlarının təsiri**

3-ci fəsildə göstərilmişdir ki, [74, c.29, s.1403] ion keçiriciliyə malik TlGaSe<sub>2</sub> və TlInS<sub>2</sub> kristallarında temperaturun artması ilə keçiricilik eksponensial olaraq artır. Bu artımla yanaşı dielektrik nüfuzluğunun ədədi qiyməti də eksponensial olaraq artması müşahidə olunur. Dielektrik nüfuzluğunun qiyməti yüksək temperaturlarda kifayət qədər böyük qiymətlər ala bilər. Buna səbəb ab səthdə Tl atomlarının yerdəyişməsi ilə əlaqədardır. Bu paraqrafda TlGaSe<sub>2</sub> kristalının dielektrik nüfuzluğuna H<sup>+</sup> və He<sup>2+</sup> ionlarının təsiri nəticəsində yaranan dəyişikliklər öyrənilmişdir.

Şəkil 4.1.1 - da H<sup>+</sup> və He<sup>2+</sup> ionları ilə implantasiya olunmuş TlGaSe<sub>2</sub> kristalının dielektrik nüfuzluğunun temperaturdan asılılığına, c-oxuna perpendikulyar istiqamətdə 4 tezlik oblastında (25Hz,100Hz, 200Hz, 500Hz) baxılmışdır. Dielektrik nüfuzluğunun həqiqi hissəsi otaq temperaturundan 550K temperatura qədər tədqiq edilmiş və 500K qiymətindən başlayaraq dielektrik nüfuzluğunun həqiqi hissəsinin qiyməti kəskin olaraq artması müşahidə olunmuşdur.

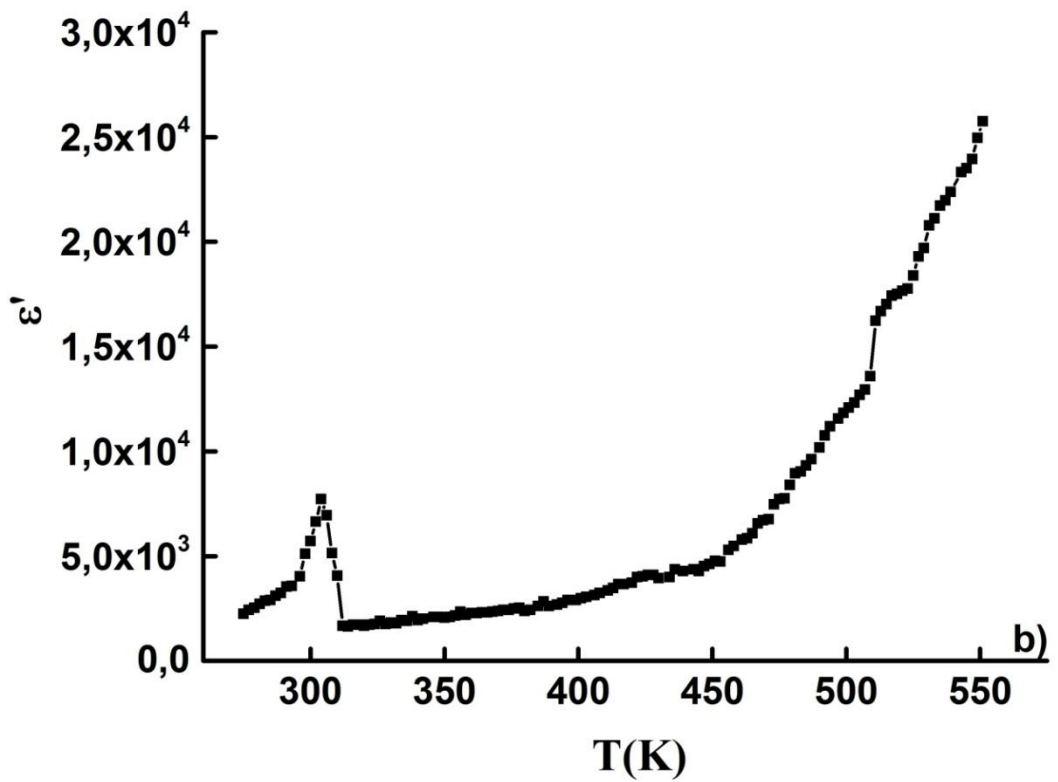
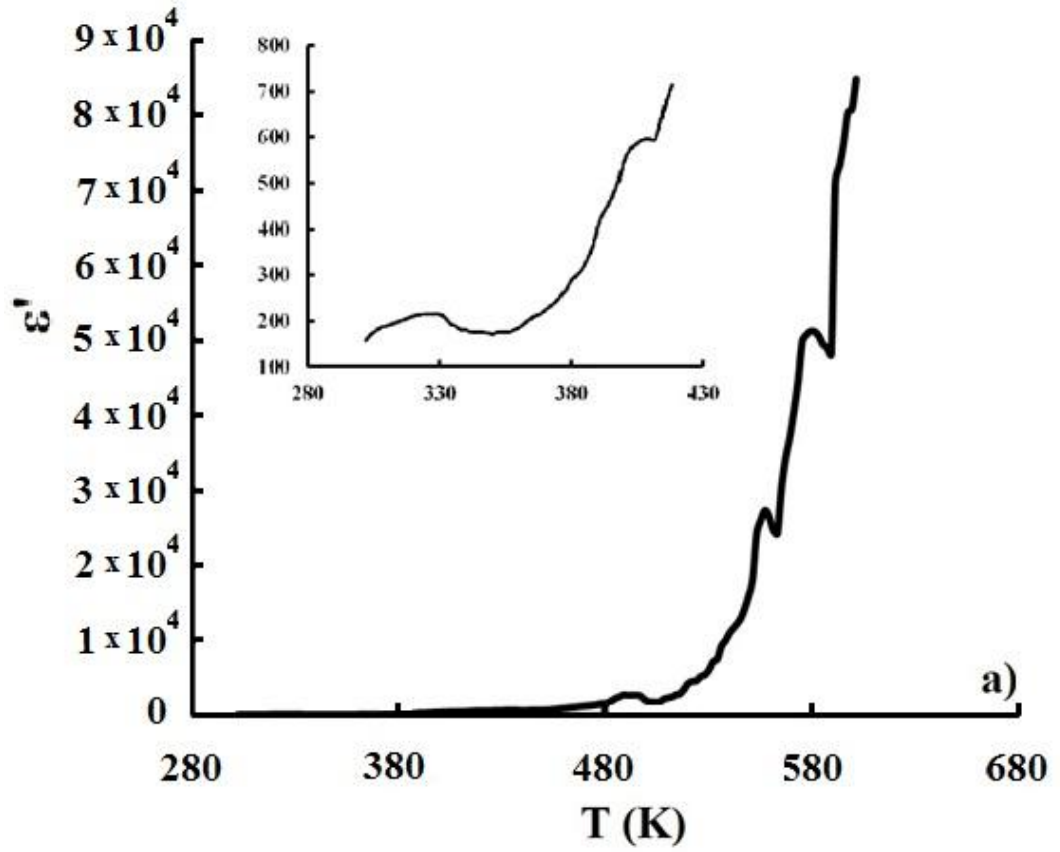


Şekil 4.1.1 Yüngül ionlarla (a- $H^+$ , b- $He^+$ ) implantasiya olunmuş  $TiGaSe_2$  kristalının dielektrik nüfuzluğunun temperaturdan asılılığı (1-25Hz, 2-100Hz, 3-200Hz, 4-500Hz)

Paraqraf 3.1 dən göründüyü kimi dielektrik nüfuzluğunun qiyməti implantasiya olunmamış nümunəyə nisbətdə təqribən 10 dəfə azalmışdır.  $H^+$  ionları ilə implantasiya olunmuş  $TlGaSe_2$  kristalında 470K və 540 K temperaturlarda ion xarakterli faza keçidləri müşahidə olunur. Analoji olaraq  $He^{2+}$  ionları ilə implantasiya nəticəsində də 300K, 330K, 470K, 510K və 540K temperaturlarda fion xarakterli faza keçidləri müşahidə olunur.  $He^{2+}$  ionlarının təsirindən sonra dielektrik nüfuzluğunun maksimumları yuxarı temperatur oblastına sürüşür. Şüalanmamış halda  $TlGaSe_2$  kristalında olduğu kimi implantasiyanın təsirindən sonra da  $\ln(\epsilon)-1000/T$  asıllığı xətti dəyişir. Və  $\ln(\epsilon)-1000/T$  asıllığı qurularaq aktivləşmə enerjiləri (3.1.1) düsturundan hesablanmışdır.  $H^+$  ionları ilə implantasiyadan sonra ( $\Delta E_a^1 = 0.45eV$ ,  $\Delta E_a^2 = 0.36eV$ ),  $He^{2+}$  ionları ilə implantasiyada sonra isə aktivləşmə enerjiləri ( $\Delta E_a^1 = 0.4eV$ ,  $\Delta E_a^2 = 0.32eV$ ) qiymətində hesablanmışdır. Dielektrik nüfuzluğunun azalmasında əsas rolu, implantasiya nəticəsində yaranan ion tipli defektlər oynayır. Artımla yanaşı  $H^+$  ionlarının təsiri ilə 470K temperaturunda müəyyən anomaliya müşahidə olunmuşdur.

#### 4.2. $TlInS_2$ kristalının dielektrik nüfuzluğuna $H^+$ ionlarının təsiri

$TlInS_2$  kristallarının dielektrik nüfuzluğu tezliyin 25Hz-1MHzs və temperaturun 300-550K intervalında şüalanmadan əvvəl və sonra müqayisəli şəkildə nəzərdən keçirilmişdir (Şəkil 4.2.1). Dielektrik nüfuzluğunun temperatur asılılıqlarından məlum olmuşdur ki, temperaturun 450-500K qiymətindən başlayaraq dielektrik nüfuzluğunun ədədi qiymətində artma müşahidə olunur. Eyni zamanda  $H^+$  ionları ilə implantasiyadan sonra dielektrik nüfuzluğunun ədədi qiyməti ilkin halla müqayisədə azalmışdır və nisbətən yuxarı temperaturlarda bu daha aydın müşahidə olunur. Tezliyin 25Hzs qiymətində həm şüalanmadan əvvəl həm də sonra  $T > 450K$  temperaturlarda dielektrik nüfuzluğunda artım daha kəskindir (implantasiyadan sonra dielektrik nüfuzluğu təxminən 3 dəfəyə qədər azalır). Dielektrik nüfuzluğunda azalma implantasiya nəticəsində ion keçiriciliyinin artması ilə əlaqədardır [174, c.33, s.1950320].



Şəkil 4.2.1 TIInS<sub>2</sub> kristalının dielektrik nüfuzluğunun temperatur asılılığı - implantasiyadan əvvəl (a) və sonra (b)

Şüalanma nəticəsində dielektrik nüfuzluğunun ədədi qiymətinin azalmasına əsas səbəb kimi mobil ionların konsentrasiyasının artmasını göstərmək mümkündür. Eyni zamanda relaksasiya müddətinin şüalanmadan sonra ilkin hala nisbətən azalması ümumi yanaşmada mobil ionların konsentrasiyasının artması ilə əlaqələndirilə bilər. Mobil ionların konsentrasiyasının artmasına səbəb kimi implantasiya olunmuş materialda implantların qeyri – bərabər paylanmasını göstərmək olar.

Qeyri bircins materialların dielektrik nüfuzluğunun yüksək qiymətə malik olması məlumdur. Beləliklə, protonlarla implantasiya olunmuş kristallarda dielektrik nüfuzluğunun yüksək temperaturlarda temperatur və tezlik asılılığı  $\text{TlInS}_2$  kristallarında qeyri bircinsliliyin yaranması ilə əlaqələndirilə bilər.

### **4.3. $\text{TlGaSe}_2$ və $\text{TlInS}_2$ kristallarının ion keçiriciliyinə proton ionlarının təsiri**

İon keçiricilər son illərdə müxtəlif tədqiqatçıların diqqətini cəlb edən maddələrin xüsusi bir sinfidir. Bu maddələrin qeyri-adi bir xüsusiyyətləri istər bərk cisimlər fizikası, istərsə də fiziki kimyanın fundamental problemləri baxımından, həm də ümumən tətbiq olunan suallar baxımından maraqlıdır. Bu cür yüksək keçirici ion keçiriciləri fərqləndirən əsas xüsusiyyətlərindən ən vacibi onların anomaliyalı yüksək ion keçiriciliyə malik olmasıdır. Böyüklük sırasına görə (sıxlığa görə) superionik keçiricilərin ion keçiriciləri, ərintilərin və güclü elektrolitlərin konsentrasiya həllərinin xarakteristik xüsusiyyətlərinə yaxındır, bu səbəbdən superion keçiricilərə maye elektrolitlər deyilir. Beləliklə, özünəməxsus hibrid xüsusiyyətlərə sahib materiallardan – həllin ötürülməsi və ya maye əriməsi, bərk cismin mexaniki gücü və elastikliyi haqqında danışırıq.

İon keçiriciliyin mövcudluğu əsasən materialın aşağıdakı 2 əsas struktur xüsusiyyətləri ilə bağlıdır:

- İonların hərəkət etməsi üçün, elementar qəfəsdə potensial hərəkətli ionların yaxın enerjili kristalloqrafik mövqedə yerləşməsi və hərəkət edən ionların sayı mobil ionların sayından az olmalıdır.

- İonların kristal qəfəsin mövqelərindəki hərəkətə sərf olunan enerji və nizamsızlıq enerjisi kiçik olmalıdır ( $k$ -Bolsman sabiti,  $T$  isə temperaturdur,  $\sim kT$ ). Bitişik mövqelər arasındakı enerji maneələri kiçik olmalıdır ki ( $kT$  ilə müqayisədə), kristal qəfəsdə vakant yer olduqda, icazə verilən mövqelərdə hərəkətli ionların statistik yayılmasına gətirib çıxarsın;

- Kristallik quruluşda ionların hərəkəti üçün şəbəkə kanalları birbaşa keçən olmalıdır, əks təqdirdə yüklü hissəciklərin sürətli hərəkəti yalnız bir və ya bir neçə vahid elementar qəfəs zamanı mümkündür.

Son illərdə ion implantasiyası fundamental fizika sahəsində geniş tətbiq olunur. Sürətlənmiş ionlar bərk bir hədəfə bombardıman edildikdə, enerjili ionların böyük bir qismi hədəfə nüfuz edir və hər bir ion hədəfdə müəyyən bir nöqtədə tormozlanır. Bu ion implantasiyası hadisəsidir və hədəf implant ionlarının hədəf maddədəki atomları ilə toqquşması mərhələsi kimi qəbul olunur. Bombardıman (sürətlənmiş) atomları ilə hədəf atomları arasındakı enerji ötürülməsi prosesləri implant ionlarının intensivliklərinin və kütlələrinin, hədəf atomlarının kütlələrinə və səpələn atomların istiqamətinə və implant ionlarının hansı bucaq altında bombardıman edilməsinə bağlıdır. Digər tərəfdən, ion implantasiyası hədəfə xarici atomların və ya qatlardakı qəfəs nizamsızlıqlarının tətbiqidir. Xarici atomların ion implantasiyası yolu ilə tətbiq edilməsinin əhəmiyyətli bir xüsusiyyəti bu üsulun bütün növ materiallara tətbiq edilməsidir.

Yarımkeçirici birləşmələri yüngül ionlarla implantasiya edərək, xassələrini öyrənmək və ionların təsiri ilə xassələrin məqsədyönlü bir şəkildə dəyişdirilərək, tədqiq olunması son zamanlar istifadə edilən metodlardandır. Ümumiyyətlə, ion implantasiyası metodu ilə alınması mümkün olmayan birləşmələri alaraq, onların strukturunu yaratmaq mümkündür [49, c.1, s.209; 48, c.1, s.268]. Belə ki, bombardıman ionlar bərk cisimlərin atomları ilə qarşılıqlı əlaqəyə girə bilər. Yəni bərk cisim atomları ilə kimyəvi rabitəyə girərək, bərk cisim daxilində müxtəlif defektlər yaradır. Yaranan bu defektlər kristalların elektrik və optik xassələrinin dəyişməsinə səbəb olur. İonlaşdırıcı şüaların təsiri ilə defektlərin yaranması yarımkeçirici birləşmələrdə dielektrik, elektrik xassələrini geniş intervalda

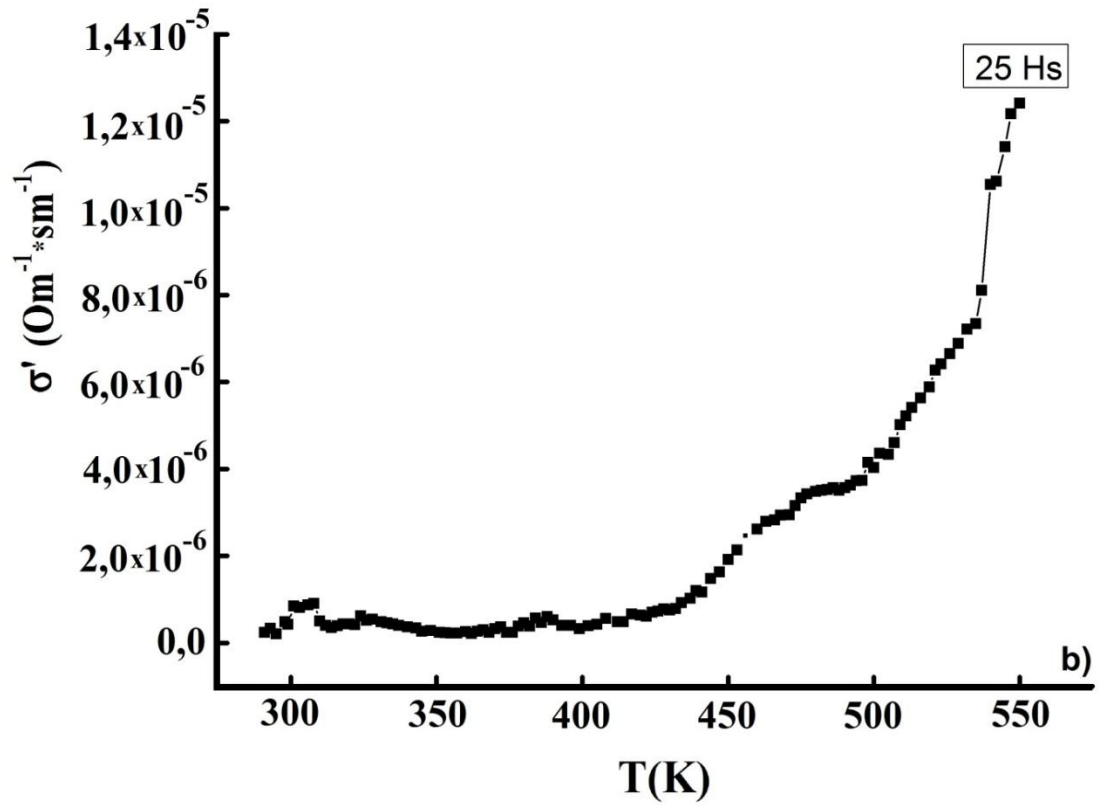
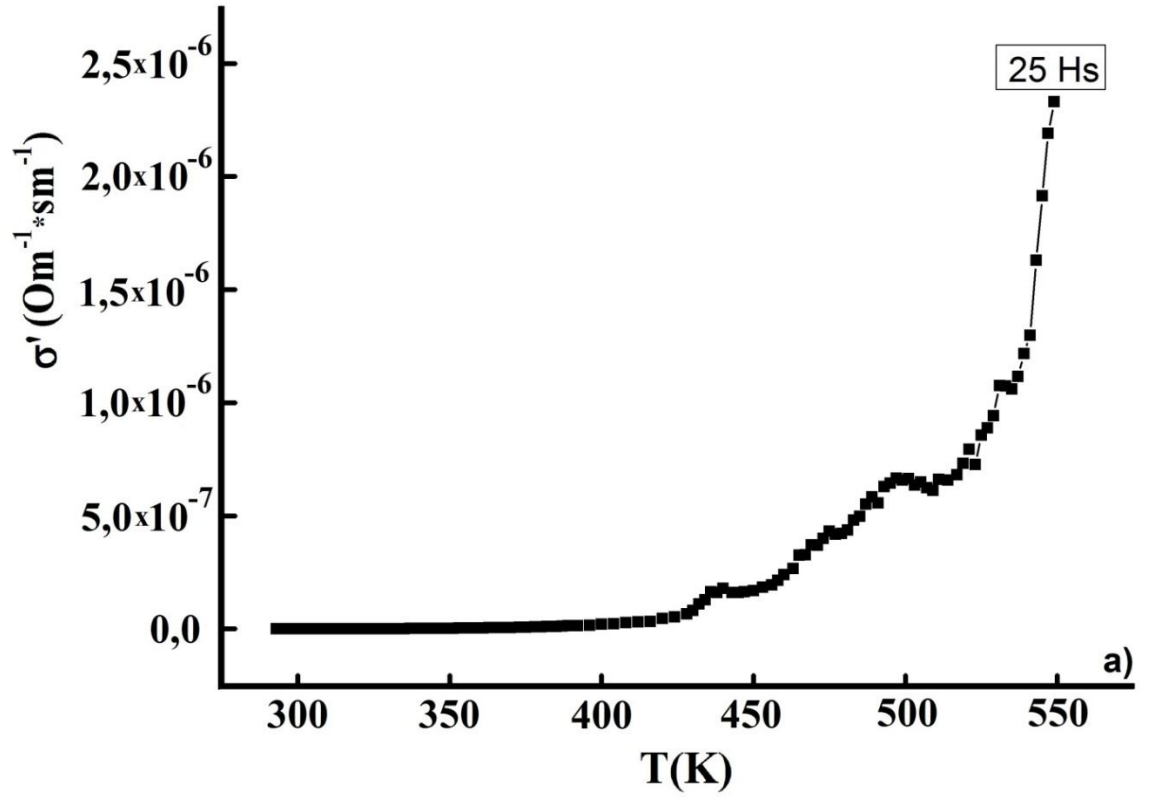
dəyişdirməyə imkan verir. Yarımkəçirici birləşmələrdə radiasiyanın təsiri ilə yaranan defektləri kristal qəfəsin düyünlərarası vakansiyalar və atomlar fərz edilir. Bildiyimiz kimi bu defektlər Frenkel defektlər adlandırılır. Digər tərəfdən defektlərin yaranması üçün kristalların atomlarına elə enerji vermək lazımdır ki, o düyünlərarasına keçsin və defekt yaransın.

Beləliklə, ion implantasiyası  $\text{TlGaSe}_2$  və  $\text{TlInS}_2$  monokristallarında müxtəlif defektlərin yaranmasına imkan verir. Və defektlərin yaranması ilə bizə bu tip yarımkəçiricilərin dielektrik, elektrik və optik xassələrini tədqiq etməyə imkan verir.

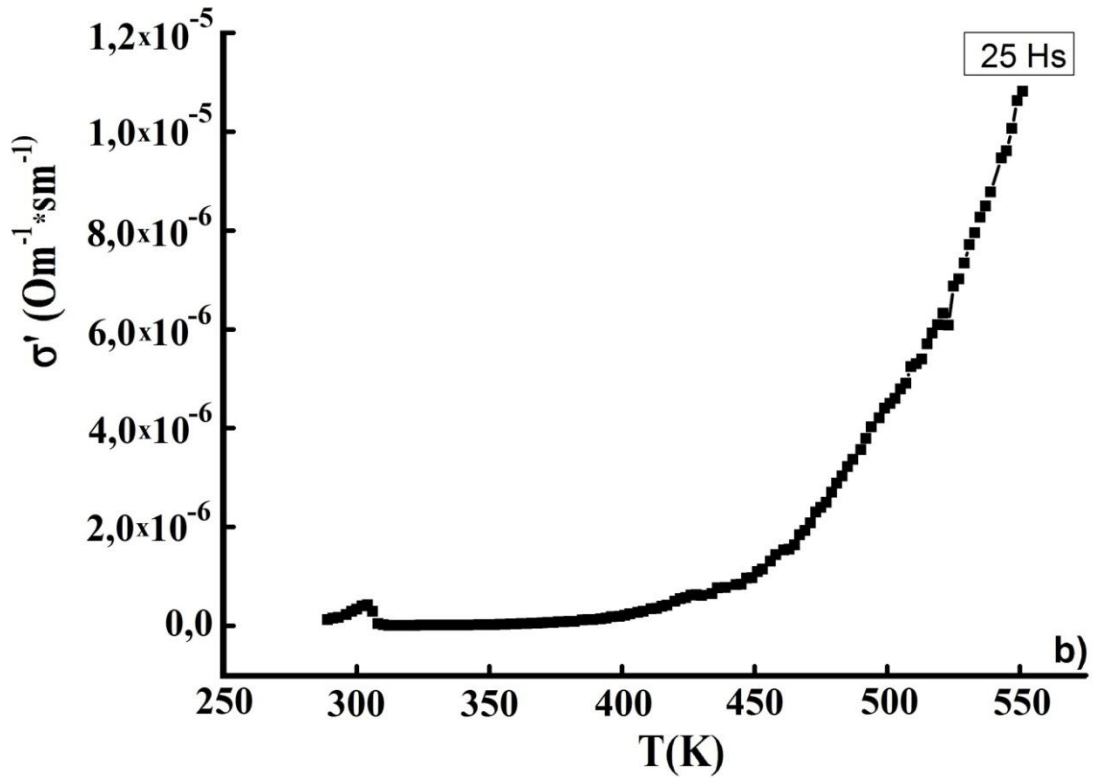
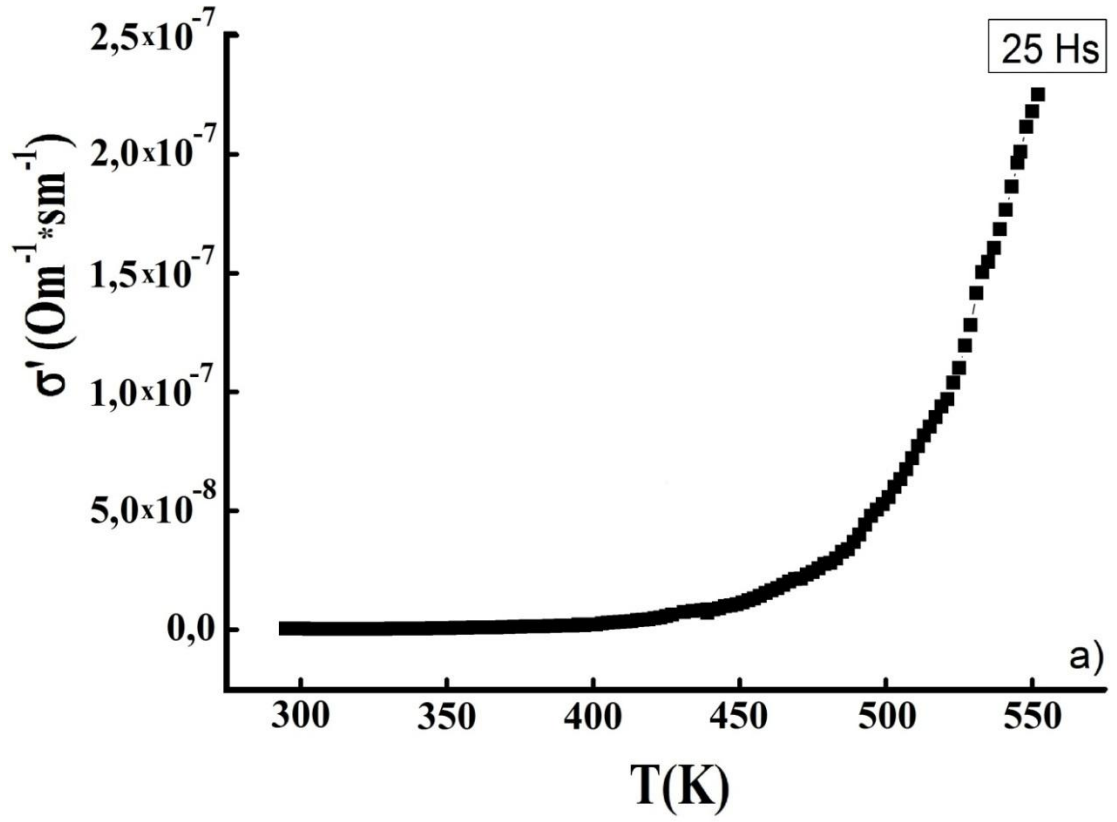
Bridgman-Stokbarger üsulu ilə yetişdirilmiş  $\text{TlGaSe}_2$  və  $\text{TlInS}_2$  kristalları otaq temperaturunda UNIMAS 79 sürətləndiricisində 150 keV protonlarla şüalandırılaraq elektrik keçiriciliyi tədqiq edilmişdir. Proton ionları nümunənin bütün səthi boyunca  $1 \cdot 10^{16}$  proton/sm<sup>2</sup> dozada şüalandırılmışdır. Tədqiq olunan nümunələrin elektrik və dielektrik xassələrini öyrənmək üçün cərəyan kontaktları C oxuna perpendikulyar istiqamətdə qoyulmuşdur. Təcrübi ölçmələrdə  $\text{TlGaSe}_2$  və  $\text{TlInS}_2$  monokristallarının dielektrik və elektrik xassələrini E7-25 impedans spektrometrindən istifadə edilmişdir. Ölçmələr 300-550K temperatur intervalında  $25\text{-}10^6$  Hz aralığında aparılmışdır.

Şəkil 4.3.1-də protonlarla (150keV enerjiddə) implantasiya edilmiş  $\text{TlGaSe}_2$  monokristalının elektrik keçiriciliyinin temperatur asılılığı göstərilmişdir. Ölçmələr 275-550K temperaturun oblastında və 25Hz-1MHz tezlik intervalında aparılmışdır. Şəkil 4.3.1-dən görüldüyü kimi implantasiyanın təsiri nəticəsində elektrik keçiriciliyi şüalanmamış halla müayisədə 20 dəfə artmışdır.

Şəkil 4.3.2-də protonlarla (150keV enerjiddə) implantasiya edilmiş  $\text{TlInS}_2$  monokristalının elektrik keçiriciliyinin temperaturdan asılılığı göstərilmişdir.  $\text{TlInS}_2$  monokristalında da elektrik keçiriciliyinin qiymətində artma müşahidə olunmuşdur ( $2 \cdot 10^2$  dəfə).



Şəkil 4.3.1 H<sup>+</sup> ionları ilə implantasiyadan əvvəl və sonra TlGaSe<sub>2</sub> kristalının elektrik keçiriciliyinin  $\sigma(T)$  temperatur asılılığı (a-əvvəl, b-sonra)



Şəkil 4.3.2 H<sup>+</sup> ionları ilə implantasiyadan əvvəl və sonra TlInS<sub>2</sub> kristalının elektrik keçiriciliyinin  $\sigma(T)$  temperatur asılılığı (a-əvvəl, b-sonra)

#### 4.4. TlGaSe<sub>2</sub> və TlInS<sub>2</sub> kristallarının dielektrik itki bucağının tangensi (tgδ(T))

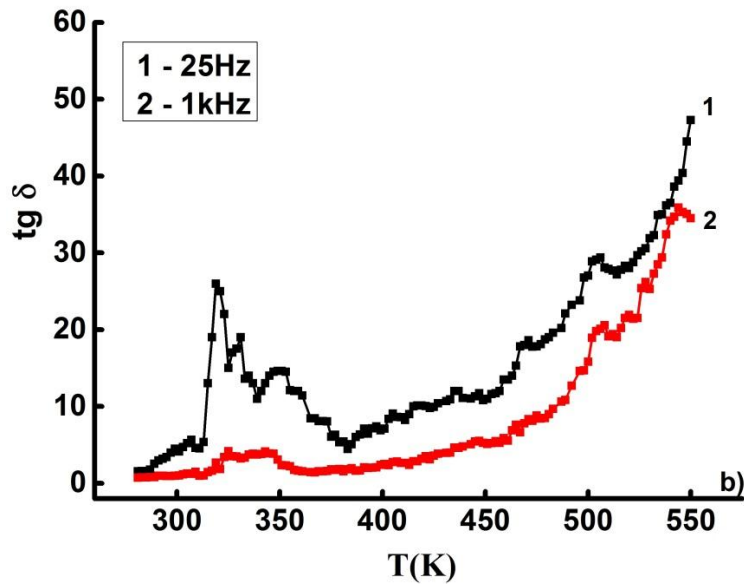
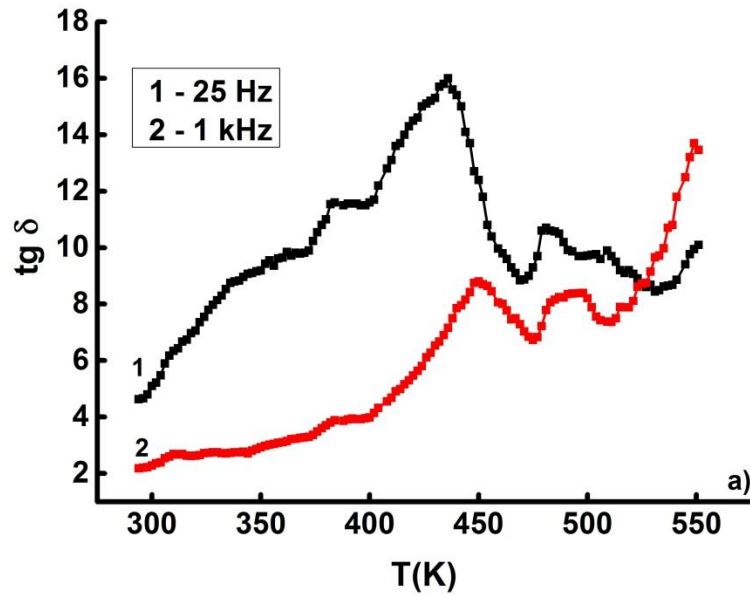
Yarımkəçirici dielektrik materialların geniş tezlik aralığında və geniş temperatur intervalında ölçülən dielektrik və elektrik xassələri son illərdə ciddi marağa səbəb olmuşdur.

Dielektrik nümunə AC gərginliyinə məruz qaldıqda, elektrik enerjisi nümunə tərəfindən udulur və istilik şəklində yayılır. Bu yayılma dielektrik itkisi adlanır. Dielektrik itkilər ümumi elektrik sahəsindəki azalmaya səbəb olur. Tətbiq olunan tezlik, relaksasiya müddəti ilə eyni aralıqda olduqda, rezonans yaranır. Beləliklə cərəyan, gərginliyi (90-δ) ilə idarə edir, burada itki bucağı və tangens rezonansa görə elektrik itkisidir və tangens itkisi bucağı adlanır. Dielektrik itkilərinin mənbəyi, elektrik sahəsi ilə elektrik yerdəyişmə vektorları arasındakı gecikmə ilə əlaqədar olaraq da hesab edilə bilər. Ümumi dielektrik itkisi, daxili və xarici itkilərin cəmidir. Daxili dielektrik itkiləri, kristal quruluşundan asılı olan və fonon sisteminin dəyişən elektrik sahəsi ilə qarşılıqlı təsiri ilə təsvir edilə bilən ideal kristallardakı itkilərdir. AC elektrik sahəsi fonon sisteminin tarazlığını dəyişdirir və sonrakı relaksasiya, enerji itirilməsi ilə əlaqələndirilir. Daxili dielektrik itkiləri kristal simmetriyasına, AC dəyişən elektrik sahə tezliyinə və temperaturuna bağlıdır. Tangensin itki bucağı (tg(δ)) – ölçüsüz bir kəmiyyətdir.

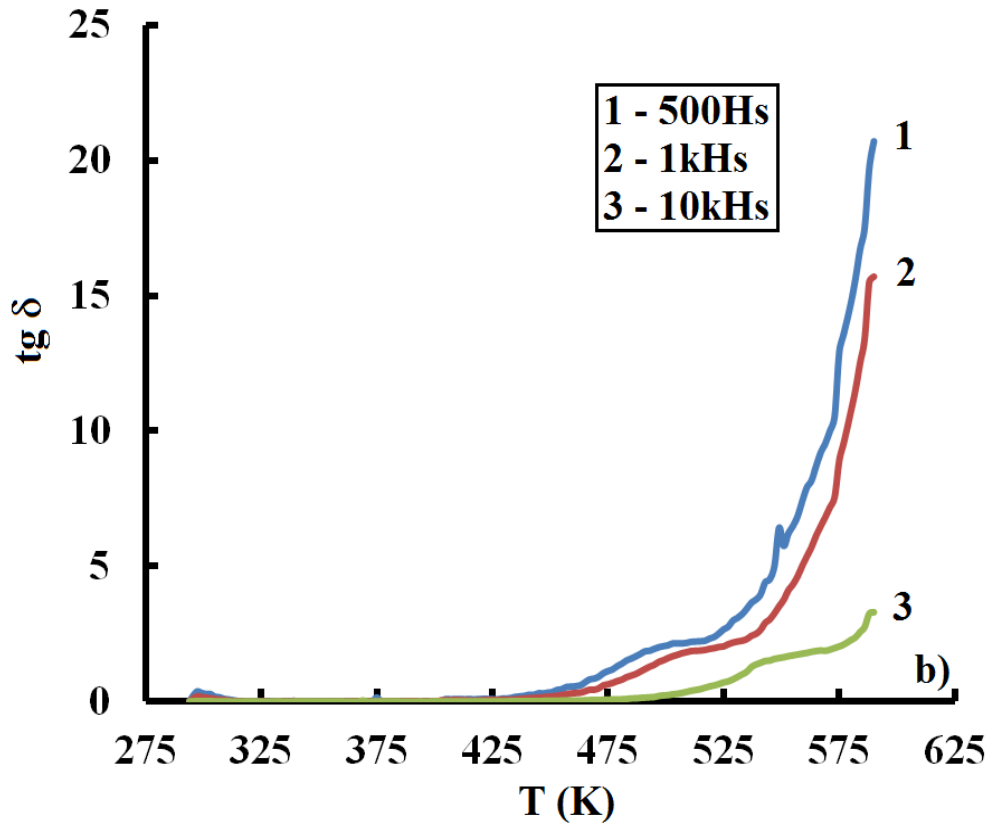
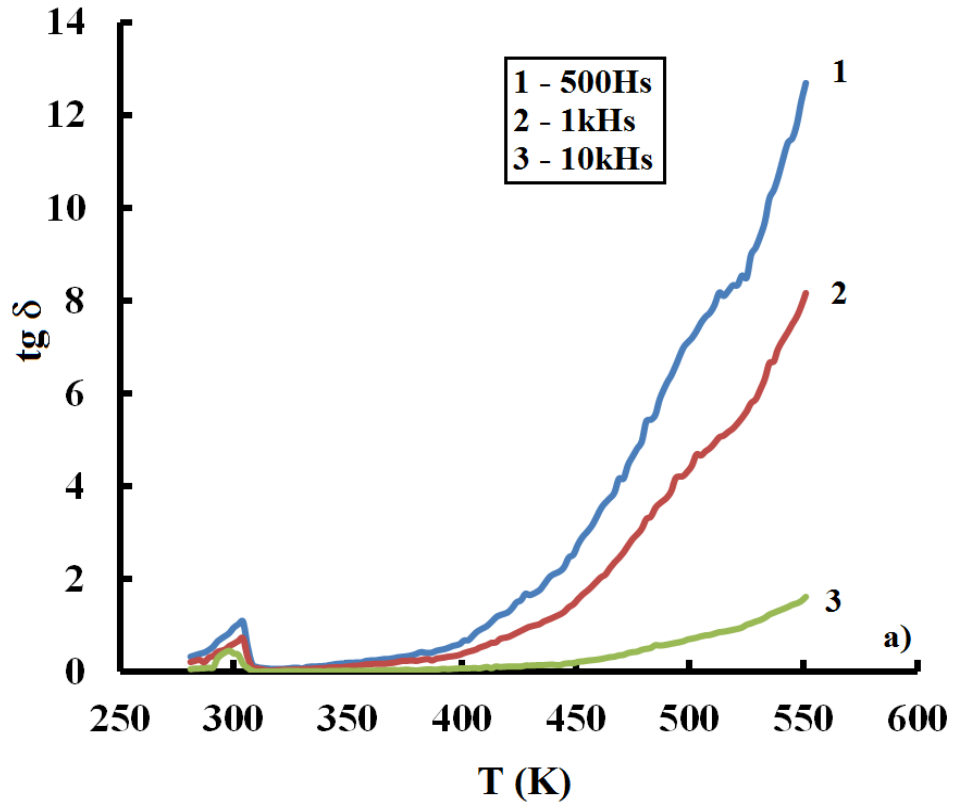
Bu paraqrafda TlGaSe<sub>2</sub> və TlInS<sub>2</sub> kristallarının dielektrik itki bucaqlarının tangensinə ionlaşdırıcı şüaların təsiri öyrənilmişdir.

Şəkil 4.4.1-də TlGaSe<sub>2</sub> kristalını H<sup>+</sup> və He<sup>2+</sup> yüngül ionları ilə implantasiya sonra tgδ(T) asılılığı verilmişdir. tgδ(T) asılılığı geniş temperatur intervalında (275-550K) 25Hz-1kHz tezliklərdə aparılmışdır. Şəkillərdən görüldüyü kimi tgδ-nın maksimum pik nöqtəsi temperaturun artması ilə sürüşür. İmplantasiya ionlarının atom çəkilərindən asılı olaraq tgδ maksimum pik nöqtələri müxtəlif temperaturlarda müşahidə edilmişdir. Belə ki, H<sup>+</sup> ionları ilə implantasiyadan sonra 400-450K aralığında müşahidə edilən pik He<sup>2+</sup> ionlarından sonra 300-350K temperatur aralığında müşahidə edilmişdir. Eyni zamanda He<sup>2+</sup> ionlarının təsiri nəticəsində H<sup>+</sup> ionları ilə müqayisədə tgδ-nın ədədi qiyməti təqribən 3 dəfə artmışdır.

Şəkil 4.4.2-də  $\text{TlInS}_2$  kristalının  $\text{H}^+$  və  $\text{He}^{2+}$  yüngül ionları ilə implantasiya sonra  $\text{tg}\delta(T)$  asılılığı verilmişdir. Ölçmələr 275-550K temperatur intervalında və 500Hz, 1Hz və 1MHz tezliklərində aparılmışdır.  $\text{H}^+$  ionlarının təsirindən sonra yaranan maksimumlar,  $\text{He}^{2+}$  ionlarının təsiri ilə yuxarı temperatur oblastına tərəf sürüşür və dielektrik itki bucağının ədədi qiymətində təqribən 2 dəfəyə qədər artma müşahidə olunmuşdur.



Şəkil 4.4.1 Yüngül ionlarla (a- $\text{H}^+$  , b- $\text{He}^{2+}$  ) implantasiya olunmuş  $\text{TlGaSe}_2$  kristalının dielektrik itki bucağının tangensinin temperaturdan asılılığı (1-25Hz, 2-1kHz)



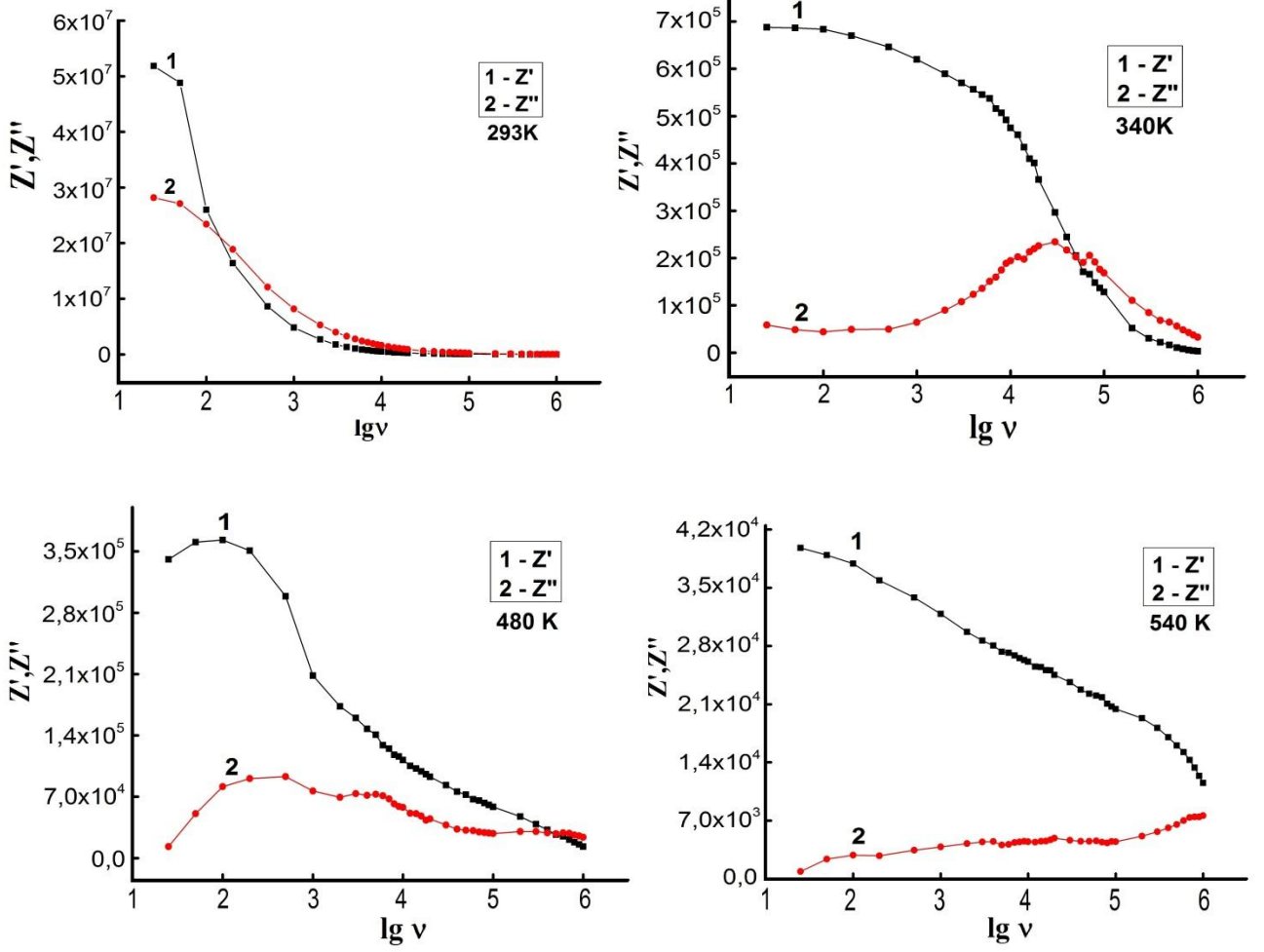
Şəkil 4.4.2 Yüngül ionlarla (a- $\text{H}^+$ , b- $\text{He}^{2+}$ ) implantasiya olunmuş  $\text{TlInS}_2$  kristalının dielektrik itki bucağının tangensinin temperaturdan asılılığı (1-500Hz, 2-1kHz, 3-10kHz)

#### 4.5. $H^+$ və $He^{2+}$ ionları ilə implantasiya olunmuş $TlGaSe_2$ kristalının kompleks impedans spektrləri

İlk dəfə olaraq impedans spektroskopiya metodu elektrokimyəvi sistemlər üçün hazırlanmış və onlara tətbiq olunmuşdur. Sonralar məlum olmuşdur ki, bu metodu bərk cismlərə də tətbiq etmək olar. Hal hazırda bu metod kondensə edilmiş hallar fizikası və materialşünaslıqda geniş tətbiq olunur. İmpedans spektroskopiya metodunun köməyi ilə nümunədə onun mikrostrukturunu nəzərə almaqla yük daşıyıcıların nəqli haqqında məlumat almaq olar. İmpedans spektroskopiya metodunun mahiyyəti, araşdırılan sistemə kiçik amplituda həyəcanlaşdırıcı sinusoidal siqnalın verilməsi və çıxışda onun yaratdığı siqnalın cavabının öyrənilməsindən ibarətdir. Əgər girişdə  $V(t) = V_0 \sin(\omega t)$  gərginliyini istifadə etdikdə, çıxışdakı siqnal  $I(t) = I_0 \sin(\omega t + \theta)$  qanunu ilə dəyişən cərəyan kimi təyin edilir, burada  $V_0$  və  $I_0$  müvafiq olaraq gərginlik və cərəyanın amplitud qiymətləri,  $\omega = 2\pi f$  – dairəvi tezlik,  $\theta$  faza sürüşməsi, onda impedansı  $Z^* = \frac{V(t)}{I(t)}$  kimi təyin edilir. Dəyişən elektrik sahəsinin təsiri altında gedən prosesləri başa düşmək üçün kompleks impedansın nəticələrini ( $Z^* = Z' + jZ''$ ) impedans, ( $Y^* = Y' + jY''$ ) admittans, ( $\epsilon^* = \epsilon' + j\epsilon''$ ) dielektrik nüfuzluğu və ( $M^* = 1/\epsilon = M' + jM''$ ) elektrik modulu səviyyəsində analiz olunmalıdır.

Bu paraqrafda  $H^+$  və  $He^{2+}$  ionları ilə implantasiya olunmuş  $TlGaSe_2$  kristalının kompleks impedans spektrlərinin tədqiqat nəticələri verilmişdir.

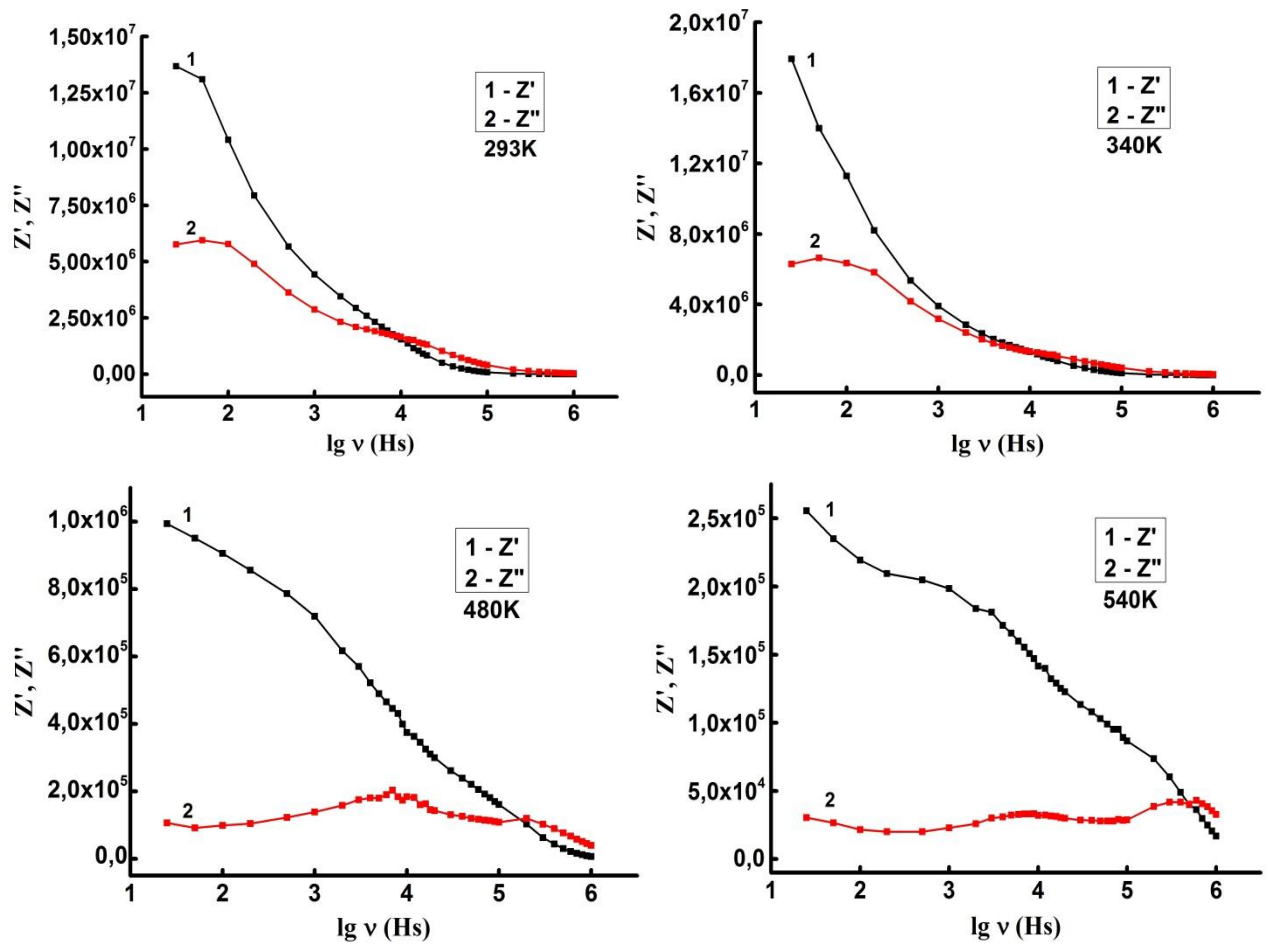
Şəkil 4.5.1 və Şəkil 4.5.2-də 150keV enerjili  $H^+$  və  $He^{2+}$  ionları ilə implantasiya olunmuş  $TlGaSe_2$  kristalının kompleks impedans spektrinin həqiqi və xəyalı hissələrinin sabit temperaturlarda (293K, 340K, 480K, 540K) tezlik asılılıqları verilmişdir. Şəkillərdən də görüldüyü kimi impedansın həqiqi  $Z'(\omega)$  hissəsinin sabit temperaturlarda tezlik asılılıqları “pələkənvəri” dəyişir, impedansın xəyalı  $Z''(\omega)$  hissəsinin maksimumları temperaturdan asılı olaraq, temperaturun artması ilə yuxarı tezlik oblastına tərəf sürüşür. Elektrik sahəsinin tezliyinin artması ilə, impedansın ədədi qiymətinin azalması müşahidə olunur.



**Şəkil 4.5.1**  $H^+$  ionları ilə implantasiya olunmuş  $TlGaSe_2$  kristalının kompleks impedans spektrinin həqiqi və xəyali hissəsinin tezlikdən asılılığı (293K, 340K, 480K, 540K).

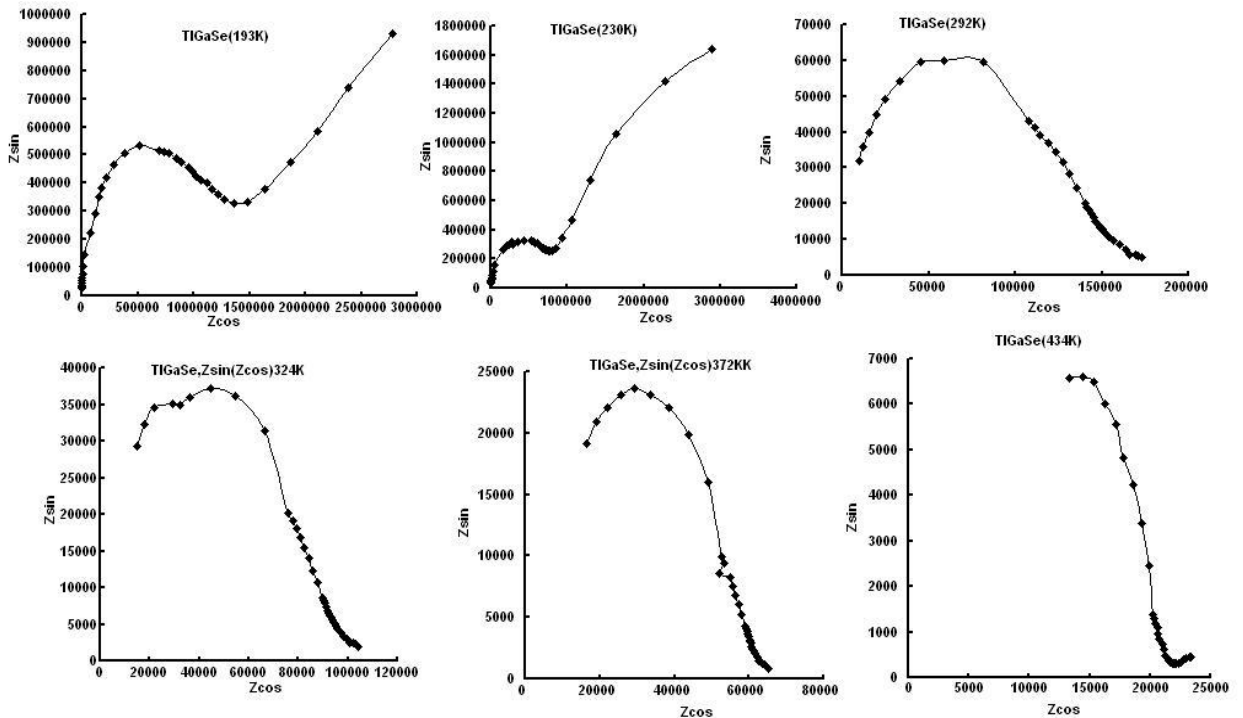
Şəkil 4.5.1 – də görüldüyü kimi 340K temperaturdan başlayaraq relaksasiya halı müşahidə olunur. 540K temperaturda impedansın həqiqi  $Z'(\omega)$  və xəyali  $Z''(\omega)$  hissələrinin kəsişmə nöqtələri  $10^6$  – dan yuxarı tezlik oblastına sürüşür.

$\text{He}^{2+}$  ionları ilə implantasiyadan sonra isə (Şəkil 4.5.2) relaksasiya halı 480K temperaturdan başlayaraq müşahidə edilir. Məlum olduğu kimi relaksasiya halı implantasiya olunan ionların atom kütləsindən və aktivliyindən asılıdır. Bu sürüşməni  $\text{He}^{2+}$  ionlarının  $\text{H}^+$  ionlarına nisbətən ağır olması ilə əlaqələndirmək olar.

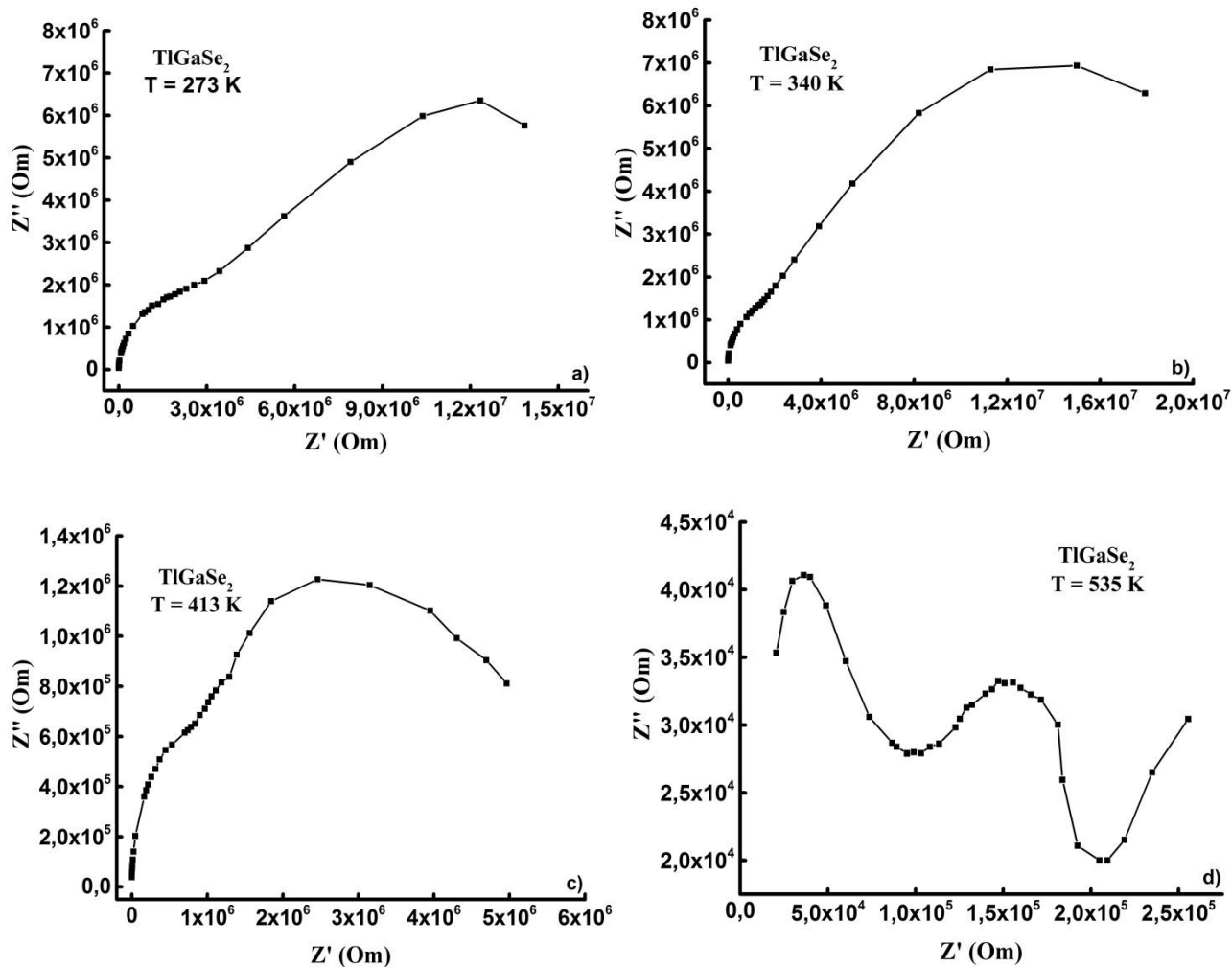


Şəkil 4.5.2  $\text{He}^{2+}$  ionları ilə implantasiya olunmuş  $\text{TlGaSe}_2$  kristalının kompleks impedans spektrinin həqiqi və xəyali hissələrinin tezlikdən asılılığı (293K, 340K, 480K, 540K).

Şəkil 4.5.3 və Şəkil 4.5.4-də  $He^{2+}$  ionları ilə implantasiyadan əvvəl və sonra  $TlGaSe_2$  kristalı üçün impedans qodoqrafları  $Z'' = f(Z')$  verilmişdir. Tədqiqatlar sabit temperaturlarda (195K; 230K; 293K; 320K; 372K; 434K) aparılmışdır. Şəkil 4.5.3-dən görüldüyü kimi 324K qədər, spektri iki xarakterik oblasta bölünür. Yarımdairə şəklində spektrin yüksək tezlikli hissəsi və qövs şəklində elektrodların təsirini bloklanmasını xarakterizə edən aşağı tezlikli oblast. Temperatur artdıqca yarımdairənin diametri kiçilir və yüksək tezlikli oblasta sürüşür. Şəkil 4.5.4-də  $He^{2+}$  ionları ilə implantasiya olunmuş  $TlGaSe_2$  kristalı üçün qodoqraflar verilmişdir. Şəkil 4.5.4-dən görüldüyü kimi temperatur artdıqca spektrdə həm yüksək, həm də aşağı tezliklərdə iki yarımdairə müşahidə olunur. Buradan belə nəticəyə gəlmək olar ki, temperatur artıqca  $He^{2+}$  ionları ilə implantasiya olunmuş  $TlGaSe_2$  kristalında relaksorların sayı artır.

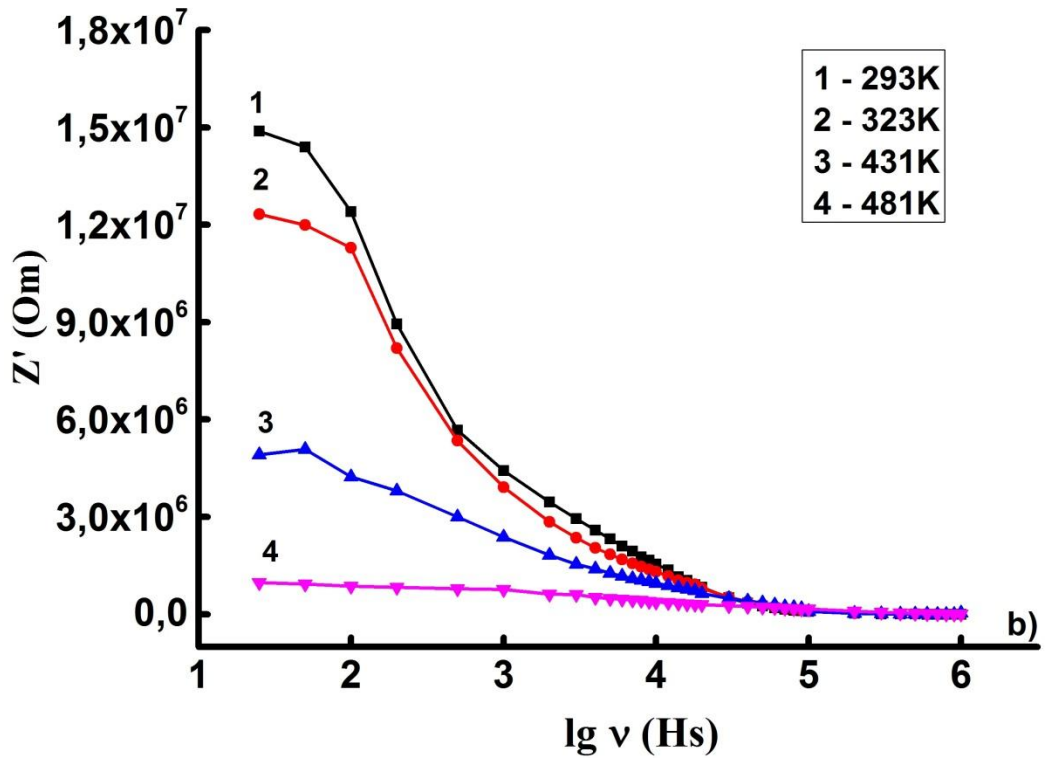
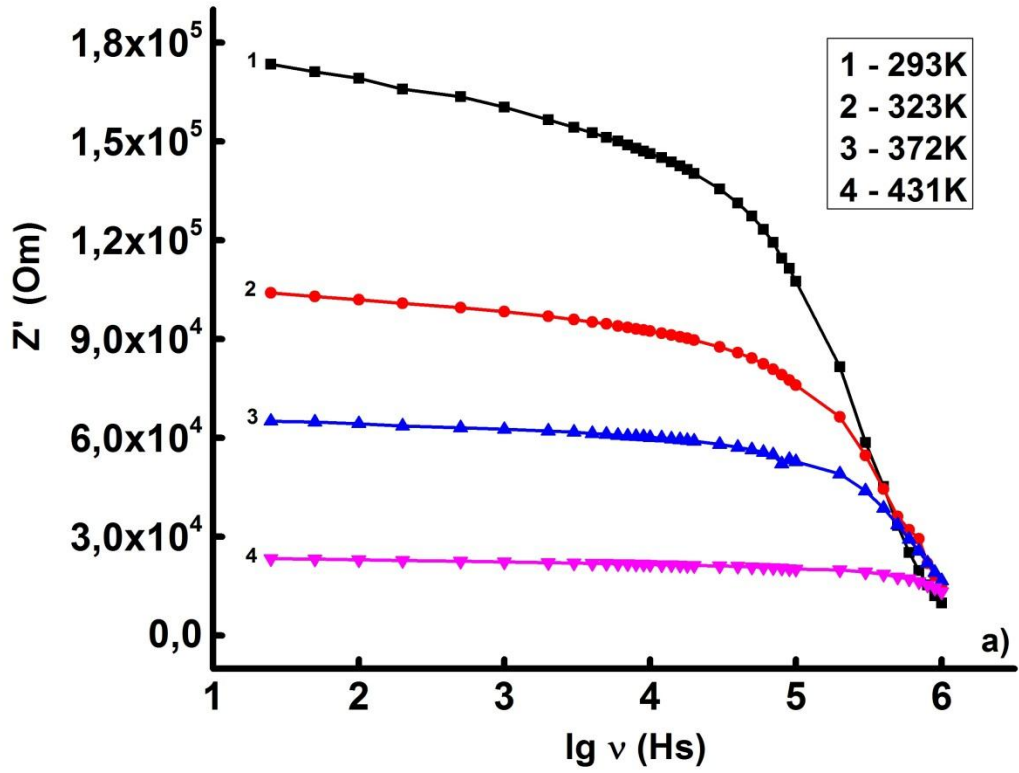


Şəkil 4.5.3 Şüalanmamış  $TlGaSe_2$  kristalı üçün impedans spektrləri. a-195K; b-230K; c-293K; d-320K; e-372K; f-434K;



**Şəkil 4.5.4**  $\text{He}^{2+}$  ionları ilə implantasiya olunmuş  $\text{TlGaSe}_2$  kristalı üçün impedans spektrləri. a-195K; b-230K; c-293K; d-320K;e-372K; f-434K;

Şəkil 4.5.5-də  $\text{TlGaSe}_2$  kristalının impedans spektrinin həqiqi hissəsinin tezlikdən asılılığı verilmişdir (a- implantasiyadan əvvəl, b- implantasiyadan sonra). Tədqiqatlar sabit temperaturalarda (293K, 323K, 372K, 431K) və müxtəlif tezliklərdə aparılmışdır. Temperaturun və tezliyin artması ilə, kompleks impedansın həqiqi hissəsi azalır. Tezliyin artması ilə kompleks impedansın azalması ümumi bir haldır. Yəni, tezliyin artması ilə elektrod polarizasiya effekti yaranır və dipollar yuxarı tezlikli sahə dəyişikliklərinə riayət etməməsi səbəbindən kompleks impedans azalır.  $\text{He}^{2+}$  ionların təsirindən sonra impedansının həqiqi hissəsinin qiyməti  $10^2$  artma müşahidə edilir. Implant ionlarının təsirindən sonra kəşimə aşağı tezlik oblastına tərəf sürşür.



Şəkil 4.5.5 TlGaSe<sub>2</sub> kristalının kompleks impedansının  $Z^*(f)$  həqiqi hissəsinin tezlikdən asılılığı. (implantasiyadan əvvəl (a) və He<sup>2+</sup> ionla implantasiyadan sonra (b))

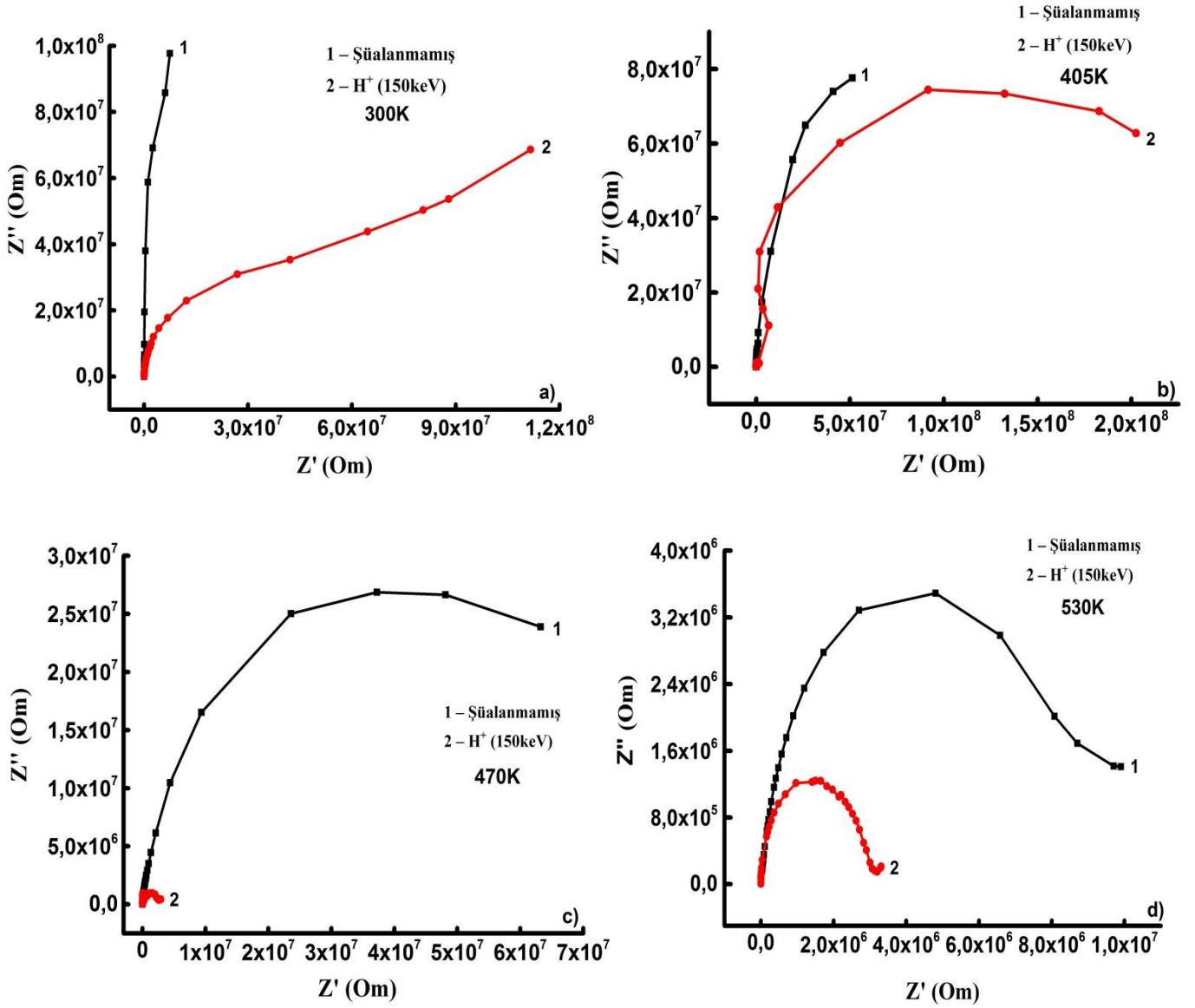
#### 4.6. TlInS<sub>2</sub> kristalının kompleks impedans spektrinə H<sup>+</sup> ionlarının təsiri

İmpedans spektroskopiyası başqa sözlə elektrokimyavi impedans spektroskopiyası nümunünün dielektrik xüsusiyyətlərini tezliyin bir funksiyası olaraq müəyyənləşdirməyə kömək edən bir ölçmə metodudur. Dielektrik spektroskopiya metodu ilə nümunənin dielektrik xüsusiyyətlərini geniş tezlik oblastında tədqiq etmək mümkündür. Bu metodun əsas prinsipi nümunələrin elektrik dipol momentinin elektrik sahəsi ilə qarşılıqlı əlaqəsi nəticəsində nümunəyə aid keçiricilik, tutum, impedans və induktivlik kimi fiziki xüsusiyyətlərin hesablanmasıdır. Eyni zamanda nümunədəki polyarizasiya, elektrikkeçiricilik, dielektrik relaksasiya və faza keçidləri kimi bir çox mexanizm haqqında da məlumat əldə etməyə kömək edir.

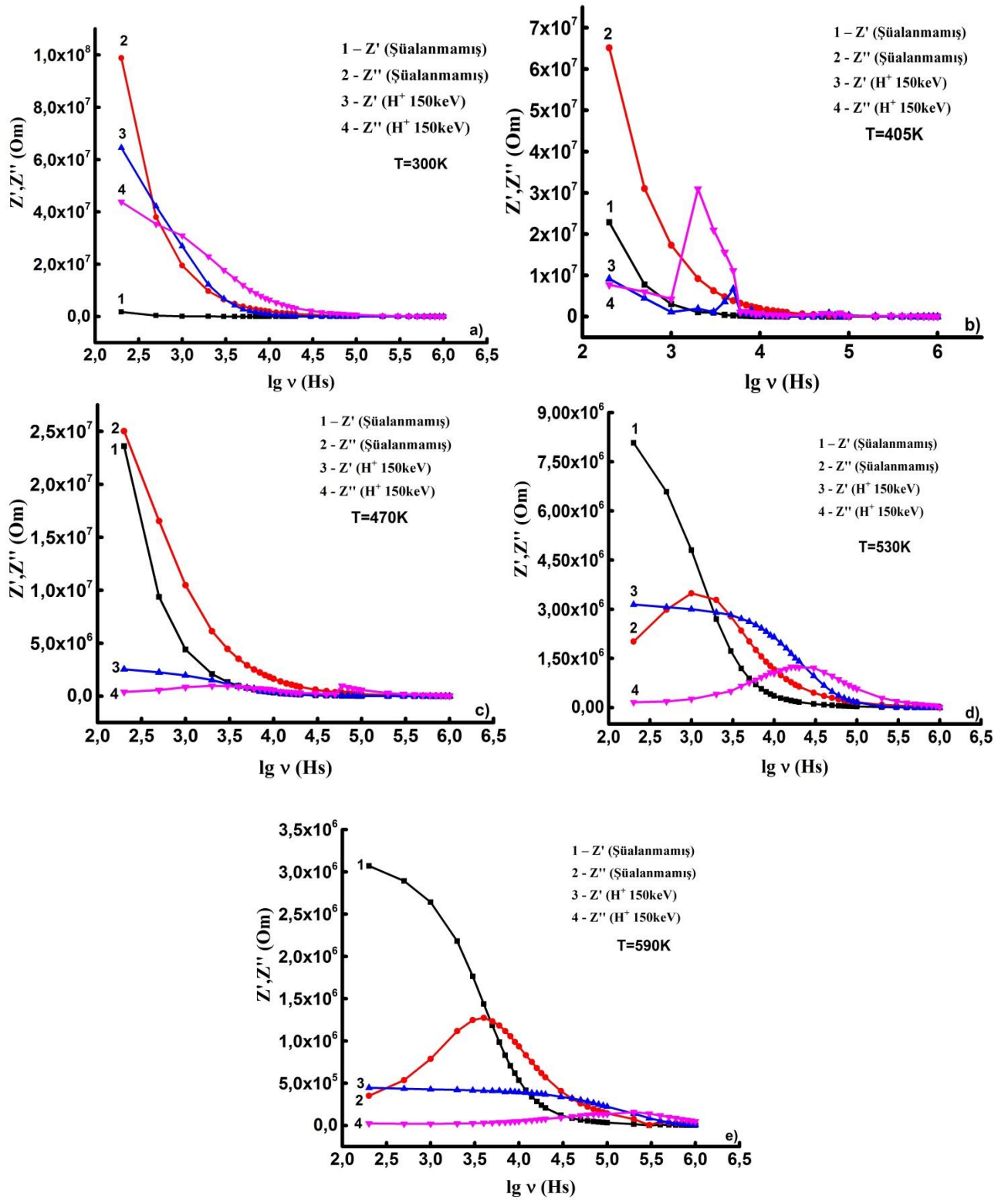
Paraqraf 4.6-da H<sup>+</sup> və He<sup>2+</sup> ionları ilə implantasiya olunmuş TlGaSe<sub>2</sub> kristalının kompleks impedans spektrlərindən alınan nəticələr ətraflı təhlil olunmuşdur. Bu paraqrafda H<sup>+</sup> ionları ilə 150keV enerjide implantasiya olunmuş TlInS<sub>2</sub> kristalının kompleks impedans spektr nəticələri verilmişdir.

Şəkil 4.6.1-də TlInS<sub>2</sub> kristalları üçün impedansının həqiqi və xəyali hissələrinin qarşılıqlı asılılıqları 150keV enerjili H<sup>+</sup> ionları ilə implantasiyadan əvvəl və sonra müqayisəli şəkildə spektrləri verilmişdir. Ölçmələr 4 sabit temperaturda, 25-10<sup>6</sup> MHz tezlik intervalında aparılmışdır. Spektrlər temperaturun 300K qiymətində qarşılıqlı impedans asılılıqlarında ( $Z'' = f(Z')$ ) tədqiq olunan tezlik intervalında hər hansı relaksasiya halı müşahidə edilmədiyi halda, temperaturun 400K-dən yuxarı qiymətlərində şüalanmadan əvvəl və sonra relaksasiya hallar müşahidə edilmişdir [174, c.33, s.1950320]. Belə ki, temperaturun artması ilə relaksasiya müddəti azalır.

Şəkil 4.6.2-də sabit temperaturlarda (300K; 405K; 470; 530K; 590K) impedansın həqiqi və xəyali hissələrinin tezlik asılılıqları H<sup>+</sup> ionları ilə implantasiyadan əvvəl və sonra verilmişdir. TlInS<sub>2</sub> kristalları üçün impedansın tezlik asılılıqları spektrlərindən məlum olmuşdur ki, sabit temperaturlarda tezliyin artması ilə impedansın ədədi qiyməti azalır.



Şekil 4.6.1 TIInS<sub>2</sub> kristali için  $Z'' = f(Z')$  asılılıqları: a- 300K; b-405K; c- 470K; d-530K.



Şəkil 4.6.2  $\text{TIInS}_2$  kristalının  $Z'$  və  $Z''$  tezlik asılılıqları: a- 300K; b-405K; c- 470K; d-530K; e-590K.

400K temperaturdan yuxarı temperaturalarda müşahidə olunan piklərə nəzərən  $\text{TlInS}_2$  kristalları üçün relaksasiya müddəti hesablanı bilər. Beləliklə,  $\text{TlInS}_2$  kristallarında relaksasiya müddəti nisbətən yüksək temperaturalarda şüalanmadan əvvəl  $10^{-3}$  san tərtibindədirsə, şüalanma nəticəsində  $5 \times 10^{-5}$  san qədər azalır [174, c.33, s.1950320].

#### **4.7. $\text{TlGaSe}_2$ və $\text{TlInS}_2$ kristalları ionlaşdırıcı şüalanmanın modelləşdirilməsi**

SRIM proqramı (The Stopping and Range of Ions in Solids-Bərk cismlərdə ionların tormozlanması-durması və aralığı), ion-atom toqquşmalarının kvant mexaniki bir prosesini (hərəkətli atomları bir ion olaraq qəbul edir) və bütün hədəf atomları olduğu kimi maddədə tormozlanma və ion aralığını hesablayan bir proqram qrupudur. Toqquşmalar zamanı ion və atom, üst-üstə elektronlar arasındakı dəyişmə və korrelyasiya qarşılıqlı təsirlərini təşkil edən bir ekranlaşdırılmış Coulomb toqquşmasına sahibdirlər. İonlar hədəf daxilində elektron həyəcan və plazmon yaradan uzunmüddətli qarşılıqlı təsirlərə sahibdir. Bunlar hesablama edilərkən hədəfin orta elektron strukturunun təsvirini daxil edərək tərif edilir (nominal dəyərlər cədvəlləri verilir). Hədəf içərisində ionun yük vəziyyəti sürətə bağlı olan yük vəziyyəti ilə təsvir edilir.

Yarımkeçirici materialların modifikasiyası, yəni xassələrinin işıq ionları, xüsusi ilə də proton şüaları ilə onların xüsusiyyətlərinin yönlü (istiqamətli) dəyişməsi son illərdə sürətlə inkişaf edən ən perspektivli fiziki inkişaf metodlarından biridir. Proton və alfa hissəciklərinə olan maraq modifikasiya edilmiş materialın (0.1 mikrondan 1 mm-ə qədər) geniş və idarəli bir dərinlik aralığı əldə etmə imkanı və yüksək dəmləmə temperaturuna sahib radiasiya komplekslərinin bu cür şüalanmadan sonra olmaması ehtimalı ilə bağlıdır. Protonlarla şüalanmanın bir nəticəsi olaraq yarımkeçiricilərin xüsusiyyətlərinin dəyişməsinə təsir edə biləcək əsas üç faktor aşağıdakılardır: 1) radiasiya defektlərinin formalaşması; 2) nüvə reaksiyaların nəticəsi olaraq yeni aşqarların meydana gəlməsi; 3) hidrogen atomlarının yığılması.

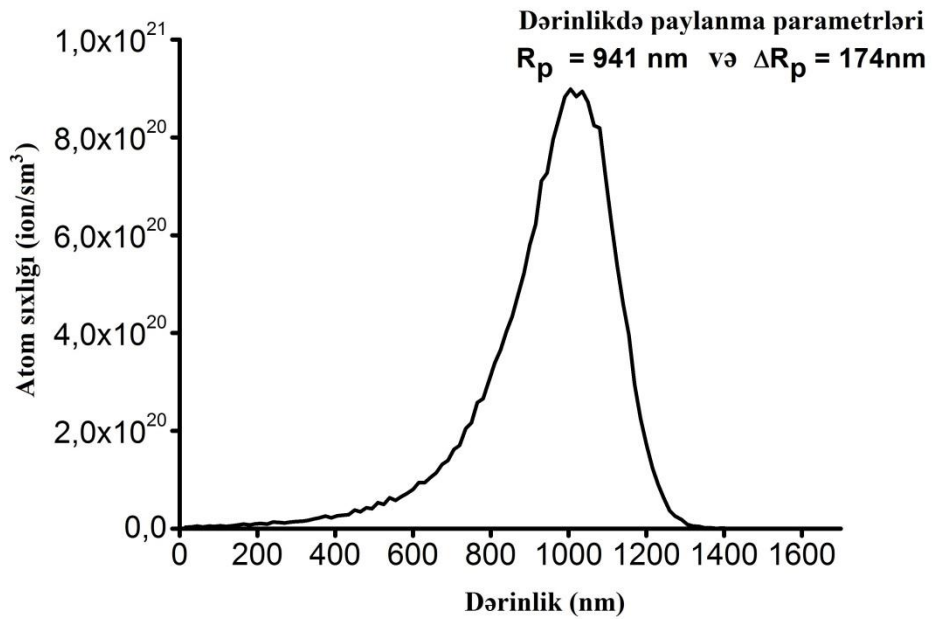
Radiasiya implantı radiasiya modifikasiyasının əsas istiqamətlərindəndir. Yarımkəçirici maddənin həm kompozisiya defektlərinə, həm də struktur defektlərinə (vakansiya, düyünlərarası boşluqlar) idarəli şəkildə ionları daxil etməklə həyata keçirilir. Həm kompleks defektlər, həm də struktur defektlər yarımkəçiricilərin xüsusiyyətləri üzərində eyni təsirə malikdir. Ümumiyyətlə, defektin formalaşması bir yarımkəçiricinin qadağan olunmuş zonada enerji səviyyələrinin görünməsi ilə müşayiət olunur. Defektlər elektron yükdaşıyıcıların (donor və ya akseptor), qeyri-bərabər yükdaşıyıcıların və ya radiaktiv olmayan rekombinasiya mərkəzləridir. İdarəli şəkildə radiasiya defektlərin daxil edilməsi və sonra termik emalı yarımkəçiricilərin elektrokeçiriciliyini, keçiriciliyinin növünü, konsentrasiyasını, yürüklüyünü və yük daşıyıcıların yaşama müddəti kimi olan elektrtofiziki parametrlərin geniş intervalda dəyişməyə imkan verir.

Protonlarla şüallanma texnologiyası yarımkəçirici cihazların strukturunda yükdaşıyıcıların yaşama müddətinin azalmasına və protonlarla implantasiya olunmuş gizli layların yaradılmasına imkan verir.

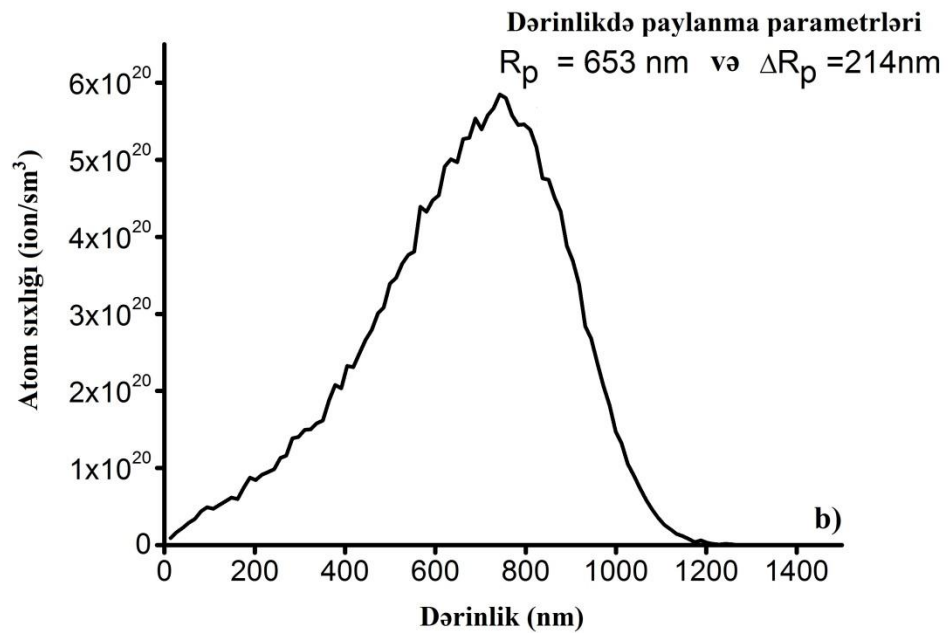
İon simulyasiya edilmiş proseslər yüksək temperaturlarda radiasiya ilə əlaqələndirilir. İki faktorun eyni zamanda təsirini (radiasiyanın və temperaturun), effektiv həyata keçirilməsi üçün lazım olan şəraitin formalaşmasına gətirib çıxarır xüsusi ilə radiasiyanı stimullaşdıran diffuziya və ion-şüa qarışıqları proseslərinin meydana gəlməsinə yol açır.

SRIM proqramının digər bir hissəsi geniş bir sıra eksperimental məlumatların ortalama parametrlərinə əsaslanaraq, istənilən materialda hər hansı bir iondakı elektron dayanma (tormuzlanma) gücünü hesablamağa imkan verir [198, c.1, s.117].

SRIM proqramından istifadə edərək, 150 keV enerjili  $H^+$  və  $He^{2+}$  ionlarla implantasiya olunmuş  $TlInS_2$  kristalında, ionların dərinlikdə paylanması, implantasiya ionlarının yaratdığı vakansiyalar və geri qayıtma (təpmə) atomlarının paylanması hesablanmışdır. Şəkil 4.7.1-də implantasiya ionlarının ( $H^+$ )  $TlInS_2$  kristalında dərinlikdə atom sıxlığı göstərilmişdir. Şəkildən də görüldüyü kimi, 150keV enerjili  $H^+$  ionlarının nümunədə təqribən 1300 nm dərinliyə kimi paylanır. Dərinlikdə maksimum paylanma isə 941 nm dərinliyindədir.



**Şəkil 4.7.1 İmplant ( $H^+$ ) ionlarının TIInS<sub>2</sub> kristalında müxtəlif dərinliklərdə paylanması**



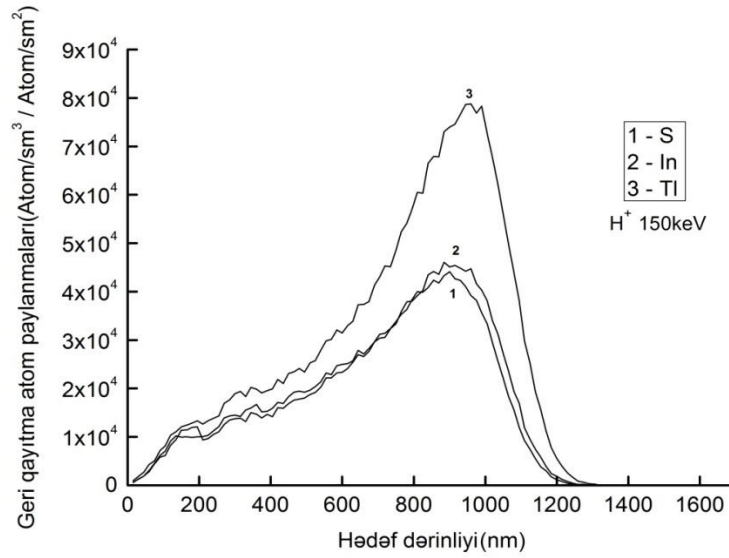
**Şəkil 4.7.2 İmplant ( $He^{2+}$ ) ionlarının TIInS<sub>2</sub> kristalında müxtəlif dərinliklərdə paylanması**

Bu o deməkdir ki, ion implantasiyanın təsirindən sonra yaranan radiasiya defektləri 1300nm dərinlikdən sonra tədricən azalır.

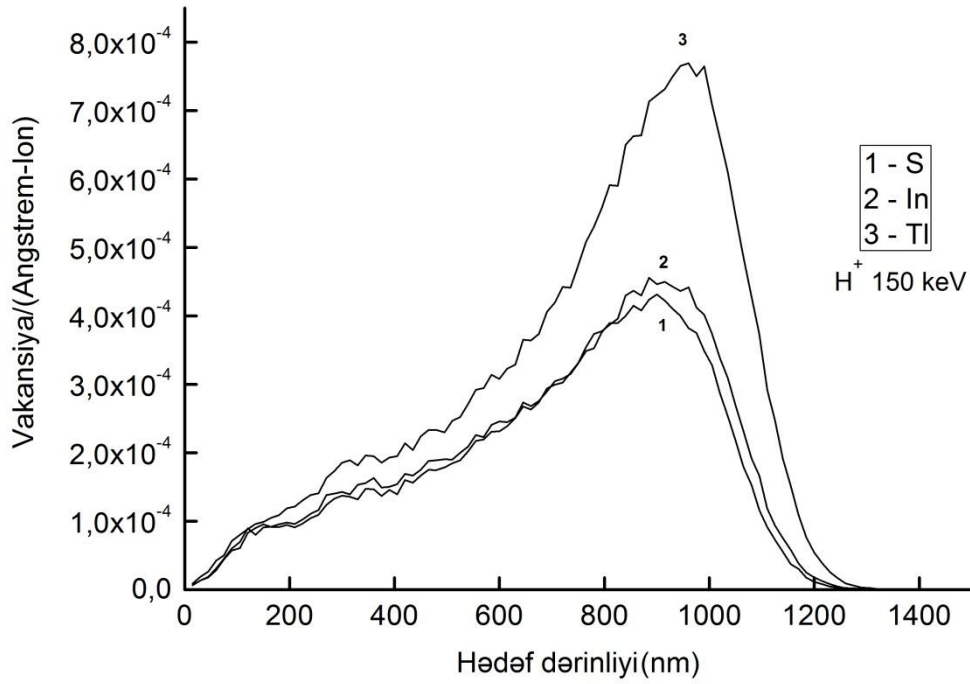
Şəkil 4.7.2-də isə  $\text{He}^{2+}$  ionları ilə implantasiya olunmuş  $\text{TlInS}_2$  kristalında  $\text{He}^{2+}$  ionlarının dərinlikdə paylanması spektri verilmişdir. Şəkildən də görüldüyü kimi,  $\text{He}^{2+}$  ionlarının 742nm dərinliyində maksimum paylanmışdır.  $\text{TlInS}_2$  kristalında  $\text{He}^{2+}$  ionlarının maksimum dərinlikdə paylanma isə 1200nm dərinliyindədir. Bu isə  $\text{He}^{2+}$  ionunun  $\text{H}^+$  ionuna nisbətən ağır olması ilə əlaqədardır [174, c.33, s.1950320].

SRIM proqramından istifadə edərək geri təpmiş Tl, In və S atomlarının paylanması göstərilmişdir (Şəkil 4.7.3). Şaquli xətlər alt laylarda mövcud səthlərarası sərhədlərini göstərir. Burada səth atomları hədəfdən geri döənən və səth atomlarını hədəfdən uzaqlaşmaları üçün lazımı qədər enerji verən geri təpmə kaskadları meydana gətirərək hədəfdən uzaqlaşdırılır. Göründüyü kimi geri təpən Tl atomlarının daha güclü olduğu nəzərə çarpılır. Bu da onunla əlaqədardır ki, Tl atomlarının yükü daha böyük olduğundan, geri təpmə Tl atomları daha güclüdür [174, c.33, s.1950320].

Proqramda hesablanma sırasında  $10^6$  sayda ion götürülərək hesablanmışdır. SRIM simulyasiyasından istifadə edərək 150 keV enerjili  $\text{H}^+$  ionları ilə implantasiya edilmiş  $\text{TlInS}_2$  kristalında müxtəlif dərinliklərdə vakansiyaların paylanması Şəkil 4.7.4-də göstərilmişdir. Burada maddədə hərəkət edən atomlar rəqəmlənərək göstərilmişdir. Hədəf atomlarında Şəkil 4.7.4-də göstərilədiyi kimi ionlar təqribən 950 nm dərinliyinə qədər vakansiyalar yarada bilər. Bu 150keV enerjili  $\text{H}^+$  ionları ilə  $\text{TlInS}_2$  kristallarında müşahidə olunan maksimum aralıqdır. SRIM simulyasiyalarına görə maksimum Tl boşluqlarının paylanması 1000 nm dərinlikdədir [174, c.33, s.1950320].



**Şəkil 4.7.3 Geri tərmiş Tl, In və S atomlarının dərinlikdən asılı olaraq paylanması**



**Şəkil 4.7.4 Hədəf atomlarda vakant yerlərin müxtəlif dərinliklərdə paylanması**

SRIM hesablama programının köməyi ilə 150 keV enerjili  $H^+$  və  $He^{2+}$  ionları ilə implantasiya olunmuş  $TlInS_2$  kristalında  $H^+$  və  $He^{2+}$  ionlarının kristalın əsasən səth qatında, yəni 1200-1300 nm dərinliyinə qədər təsir edildiyi öyrənilmişdir. Qamma şüaların nümunələrin həcmi boyunca təsiri üçüncü fəsildə geniş şəkildə araşdırılmış və tədqiqatların nəticələri verilmişdir. 150keV enerjili  $H^+$  və  $He^{2+}$  ionları ilə implantasiya etməkdə məqsədlərimizdən biri də ionlaşdırıcı şüaların nümunələrin bütün həcmi boyunca deyil, müəyyən dərinliyə təsirini öyrənməkdir. SRIM proqramının köməyi ilə hansı dərinliyə qədər paylanması hesablanmışdır. Yaranan radiasiya defektləri əsasən kristalın səth qatında qararlaşmışdır. Bu öz növbəsində  $TlInS_2$  kristalının fiziki xassələrinin tədqiqi üçün önəmlidir.

#### **4.8. $TlInS_2$ kristalının Işıqın Kombinasialı Səpilmə spektrlərinə implantasiyanın təsiri**

Işıqın nümunədən keçən zaman səpilməsi ətraf mühitin heterogenliyində baş verir. İKS səpilməsinin mahiyyəti işıqın tezliklərinin və molekulun təbii tezliklərinin (titrəməli və fırlanma) kombinasiyaları olan, yeni xətlərin səpilən işıqın spektrindəki görünüşüdür. Işıqın Kombinasialı səpilməsinin mahiyyəti, işıqın tezliklərinin və molekulun təbii tezliklərinin (titrəməli və fırlanma) kombinasiyaları olan, yeni xətlərin səpilən işıqın spektrindəki görünüşüdür. İKS səpilməsi bir molekuldakı elektronların hərəkətinin nüvə titrəyişləri ilə əlaqəli olması səbəbindən meydana gəlir. Nüvələrin nisbi mövqeyi elektron buludunun yerləşdiyi sahəni müəyyənləşdirir.

Işıqın kombinasiyalı səpilmə spektrometri bir çox sahələrdə istifadə oluna bilər - mikroskopik, kimyavi analiz və s. Məqsəd istər keyfiyyət, istərsədə kəmiyyət məlumatları olsun, İKS analizi asanlıqla və tez bir zamanda əsas məlumatları təmin edə bilər. Qatı, maye, qaz, jel, palçıq və ya tozdan asılı olmayaraq bir nümunənin kimyəvi tərkibini və quruluşunu sürətlə xarakterizə etmək üçün istifadə edilə bilər. Aşağıdakı İKS (Raman) spektrometrinin istifadəsinin daha çox tətbiq edildiyi və dəyərinin böyük ölçüdə qiymətləndirildiyi bəzi əsas sahələr göstərilmişdir: Əczaçılıq və kosmetika, geologiya və mineralogiya, karbon materialları, yarımkəçiricilər,

bioloji elmləri. Yarımkəçiricilər texnologiyasında əsasən – daxili gərilmə/gərginliyin xarakteristikası, saflıq, çirklənmə indentifikasiyası, səthi qəfəs quruluşu, defekt analizi, hetero strukturları, aşqar təsirləri, fotolüminensiya mikro analizi kimi xassələrin öyrənilməsində daha geniş şəkildə istifadə edilir.

Materialın kristallıq quruluşunun təhlilində İKS spektrometrindən geniş istifadə edilir. Əksər hallarda İKS səpilməsi nümunədəki kristallıq dərəcəsinə həssasdır. Tipik olaraq kristal quruluşlu material çox kəskin, sıx Raman piklərinə malik spektr görsətdiyi halda, amorf quruluşlu material daha geniş, daha az sıxlıqlı Raman piklərinə malikdir. Bu iki vəziyyət (məsələn, tam amorf və ya tamamilə kristal) spektral hədd kimi qəbul edilə bilər. Spektroskopiya İKS spektrlərinin analizində pik enləri və intensivliyi dəqiq hesablamaq mümkündür. Kalibrləmə və ya digər metodlarla müqayisə etməklə kristallıq quruluşun kəmiyyət ölçüsü kimi istifadə edilə bilər. İKS spektrlərinin bu analizi kristallıq dərəcəsinə əks etdirir.

$A_3B_3C_2^6$  tip kristalların simmetriyasının aşağı olması səbəbindən bəzi İKS-spektrlərinin müəyyən xəttləri yalnız işıq şüasına nəzərən nümunənin yerləşdirilməsini, işıq dalğalarının həyəcanlanma polyarizasiyasını və İKS polyarizasiyası daxil olmaqla özündə cəmləşdirilmiş xüsusi geometriya ilə təsvir olunub. Lakin mikroskopik obyektivdən alınmış həyəcanlanma kanalın 100% polyarizasiya malik olmadığı üçün və qeydetmə kanalında polyarizator nəzərdə tutulmadığı üçün, təcrübənin geometriyasının dəyişməsi fərdi xətlərin nisbətini qismən dəyişdirir. Müxtəlif müəlliflər tərəfindən İKS spektrləri fərqli geometriyalarda tədqiq edilmişdir [187, c.19, s.704; 186, s.1].

X-şüa analiz məlumatlarına görə  $TlInS_2$  birləşmələri  $C_{2h}^6-C2/c$  fəza qrupu tərəfindən təsvir edilir. Elementar qəfəs  $TlInS_2$ -nin 16 formulundan ibarətdir və elementar qəfəs  $Z=8$  – dir. [88, c.45, s.1248; 159, c.29, s.117; 196, c.160, s.197].  $TlInS_2$  kristallarında, Wyckoff mövqelərində metal atomları 4 (a), 0, 0, 1/4 [Tl] və 4(b), 0, 1/2, 1/4, [In], koordinatları tetraqonal prizmalar  $[TlS_8]$  və tetrahedronlar  $[InS_4]$  verilmişdir. Tetrahedral polihedronlar  $[In_4S_{10}]$ , oktahedral təpə nöqtələri boyunca S atomları ilə bağlanmış 4 tetrahedrondan  $[InS_4]$  ibarətdir. Bu tetrahedral polihedronların ümumi bucaqları vardır; c-oxunun əksi istiqamətdə olan strukturudur və bir birinə  $90^\circ$

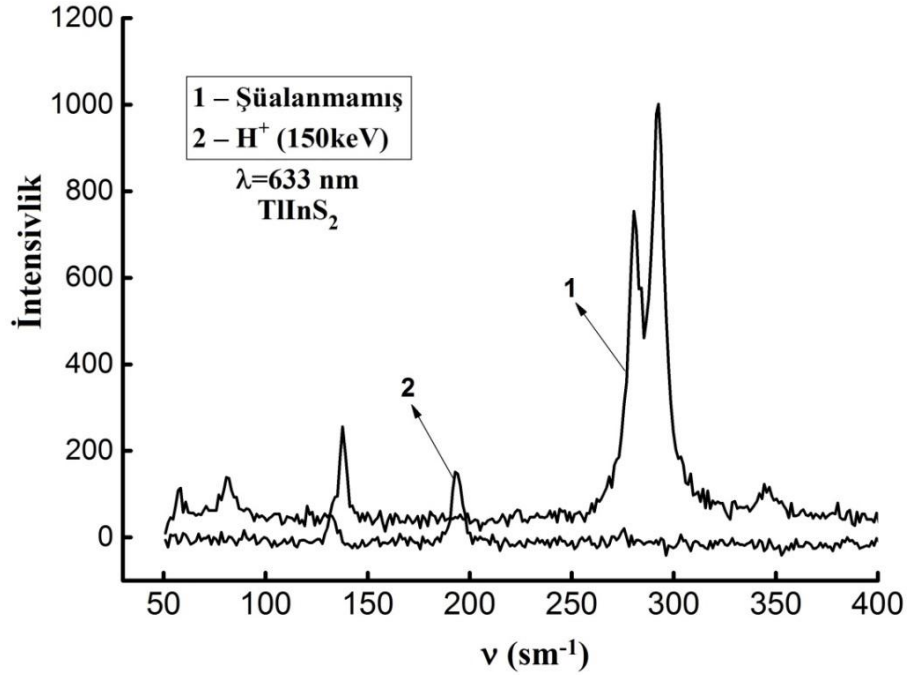
bucaq altında açılır [196, c.160, s.197]. Anionik polihedron təbəqələr arasında Tl atomları yerləşir; onlar S atomlarının tetrahedral prizmaları tərəfindən əlaqələndirilir [TlS<sub>6</sub>]. S atomlarının anionik təbəqələri kristalın ümumi tetraqonal simmetriyasından uzaqlaşan (1/8) (a+b)-də bir-birilərinə sürüşür. Brillouin zonasının mərkəzində bu tip struktur üçün aşağıdakı titrəşim rejimlər (modlar) aydın olmalıdır [187, c.19, s.704; 186, s.1]:

$$Q = (A_u + 2B_u)_{ac} + 23A_g + 25B_g + 22A_u + 23B_u \quad (4.8.1)$$

Simmetriya  $A_g$  və  $B_g$  olan fononlar işığın kombinasiyalı səpilmə prosesində görünməlidir.  $A_u$  və  $B_u$  titrəyiş rejimləri (modları) sırasıyla  $E_{1a}$  və  $E_{1b}$  polarizasiyaları üçün infraqırmızı əks olunması göstərilməlidir.

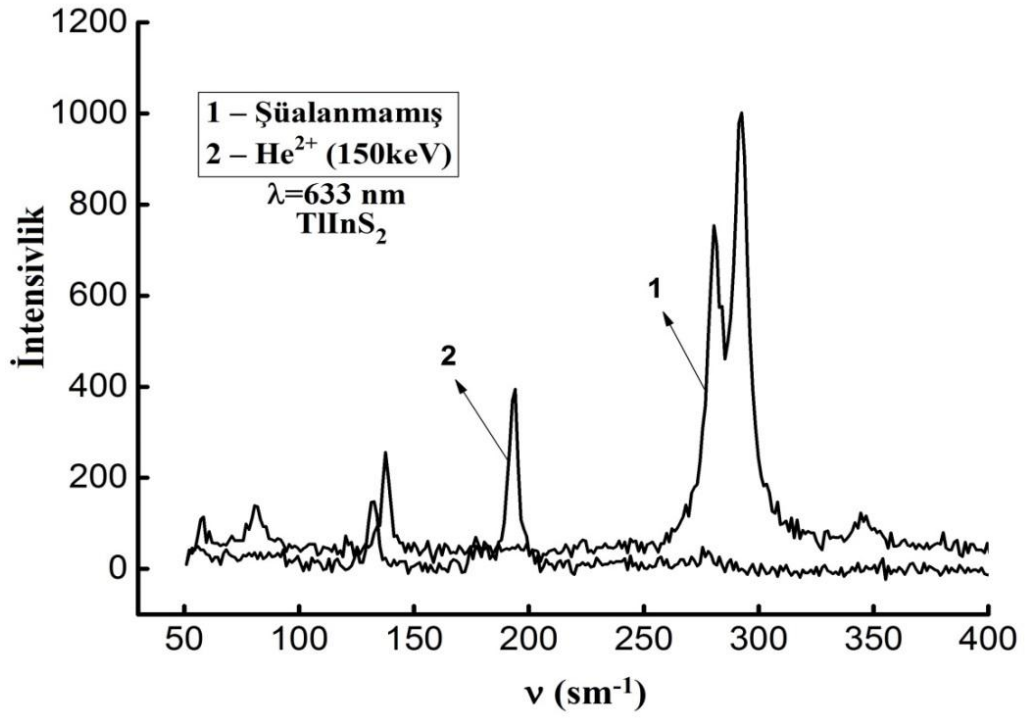
İşığın kombinasiyalı səpilmə metodu ilə 150keV enerjiddə  $H^+$  ionları ilə implantasiya olunmuş TlInS<sub>2</sub> laylı monokristalının quruluş nizamsızlığının pozulması proseslərinin tədqiqat nəticələri verilmişdir. TlInS<sub>2</sub> kristalı yüksək anizotrop xassələrə malik olduğundan güclü anizotrop rabitə qüvvələri ilə fərqlənir. TlInS<sub>2</sub> kristalında laylar arasındakı qarşılıqlı təsir qüvvəsi layların daxilindəki rabitə qüvvəsindən çox zəif olduğundan yüksək anizotropluq xassəsi yaranır. Laylar arasındakı zəif qarşılıqlı təsire görə, TlInS<sub>2</sub> kristalını laylar istiqamətində parçalamaq asan olur. Bu kimi kristalların fonon spektrlərinin əsas xassələrindən biri, aşağı tezlikli-laylararası və yuxarı tezlikli-laydaxili olmaqla iki qrupa bölünür. Yarımkeçirici birləşmələrdə ionlaşdırıcı şüaların təsiri ilə yaranan radiasiya effektlərinin tədqiqatları materialın dayanıqlığının proqnozlaşdırılması üçün praktiki olaraq perspektivdir [2, c.3, s.15, 53, c.5, s.64].

Şəkil 4.8.1-də TlInS<sub>2</sub> kristalının implantasiyadan əvvəl və  $H^+$  ionları ilə implantasiya edildikdən sonra İKS spektrləri müqayisəli şəkildə verilmişdir. İKS spektrləri otaq temperaturunda, 50-4000  $cm^{-1}$  intervalında və dalga uzunluğu  $\lambda=633nm$  olan He/Ne qırmızı lazerindən istifadə edilərək tədqiq edilmişdir. İstifadə olunan lazeri çəkən İKS mikroskopu konfokal olduğundan, lazer şüası nümunənin səthində bir nöqtəyə düşür.



**Şəkil 4.8.1 TIInS<sub>2</sub> kristalının İKS spektrləri (1-şüalanmamış, 2- H<sup>+</sup> ionları ilə implantasiya edilmiş)**

İmplantasiya olunan TIInS<sub>2</sub> kristalının səthinin bircins olması təcrübənin dəqiq aparılması üçün əsas şərtədir. Bu səbəbdən təcrübənin dəqiq olması məqsədi ilə bir necə nöqtədə İKS spektrləri çəkilmişdir. Şüalanmamış TIInS<sub>2</sub> kristalının İKS spektrindəki maksimuma uyğun qiymətlər ədəbiyyatdakı işlər ilə üst-üstə düşürlər. Cədvəl 3.9.1-də bu barədə ətraflı məlumat verilmişdir. İmplantasiya olunmamış TIInS<sub>2</sub> kristalının işığın kombinasiyalı səpilmə spektrlərində 6 pik (58.1, 81.2, 137.5, 180.1, 291.4, 346.2 sm<sup>-1</sup>) müəyyən edilmişdir və bu lalyardaxili rəqslərlə xarakterizə edilir. H<sup>+</sup> ionları ilə implantasiya edildikdən sonra 4 pik nöqtəsi müəyyən edilmişdir. İKS spektrinə H<sup>+</sup> implantasiya etdikdən sonra maksimumuna uyğun fətohəssaslıq  $\lambda = 194 \text{ sm}^{-1}$  tezliyində müşahidə olunmuşdu və ilkin halla müqayisədə implantasiya olunmuş kristalın spektrində fətohəssaslığın maksimumu təqribən 4 dəfə azalmışdır. İmplantasiyadan öncə və sonra spektrləri müqayisə edərkən, müəyyən fərqlər müşahidə edilmişdir. Bu xətlərin intensivliyində və onların bəzilərinin yox olması ilə əks olunmuşdur. Bu təsirlər hədəfdəki nümunənin şüalandığı ion kütlələrindən asılıdır [185, s.5787821, 53, c.5, s.64].



**Şəkil 4.8.2 TIInS<sub>2</sub> kristalının İKS spektrləri (1-şüalanmamış, 2- He<sup>2+</sup> ionları ilə implantasiya edilmiş)**

Şəkil 4.8.2-də isə TIInS<sub>2</sub> kristalının ilkin halda və He ionları ilə implantasiya etdikdən sonrakı İKS spektrləri müqayisəli şəkildə verilmişdir. Şəkil 4.8.1-də olduğu kimi burada da implantasiyanın təsiri ilə bəzi piklərin yox olması və mövcud olan piklərin intensivliklərində fərqlər müşahidə edilmişdir. Hər iki şəkildə implantasiyanın təsiri ilə 194 sm<sup>-1</sup> tezliyində yeni bir pik meydana gəlmişdir. Hər iki şəkildən də görüldüyü kimi implantasiyanın təsiri ilə amorflaşma baş verir. Yüngül ionların təsiri nəticəsində donor tipli radiasiya defektləri yaranır [53, c.5, s.63-64].

## ƏSAS NƏTİCƏLƏR

- 1) İlk dəfə olaraq TlGaSe<sub>2</sub> kristalında  $T_1=415\text{K}$ ,  $T_2=500\text{K}$  və  $T_3=532\text{K}$  temperaturlarında dielektrik nüfuzluğunun sıçrayışla artımı müşahidə edilir. Göstərilmişdir ki, bu fazalarda elektrik keçiriciliyi, ion xarakterlidir.  $\ln(\epsilon)$  və  $\ln(\sigma)$  asılılıqlarından aktivləşmə enerjiləri  $\Delta E_a^1 = 0.54\text{eV}$ ,  $\Delta E_a^2 = 0.4\text{eV}$  hesablanmışdır. Bu isə  $\text{Tl}^+$  alt qəfəsinin nizamsızlaşması (zəif əlaqəli Tl ionları) hesabına yaranır.
- 2) İlk dəfə olaraq TlInS<sub>2</sub> kristalında dielektrik nüfuzluğunun  $\epsilon(T)$  asılılığında  $T_1=370\text{K}$ ,  $T_2=415\text{K}$ ,  $T_3=500\text{K}$  və  $T_4=532\text{K}$  temperaturlarda anomaliyalar müşahidə olunmuşdur. Aktivləşmə enerjiləri  $\Delta E_a^1 = 0.3\text{eV}$ ,  $\Delta E_a^2 = 0.22\text{eV}$  kimi hesablanmışdır.  $\ln(\epsilon)$  - nun  $1/T$  asılılığında təcrübi nöqtələr bir düz xətt üzərində yığılmışdır və bu isə keçiriciliyin ion xarakterli olmasını göstərir. Qamma şüalarının təsirindən sonra dielektrik nüfuzluğunun temperatur asılılığının  $290\text{K}$ ,  $410\text{K}$ ,  $470\text{K}$  və  $550\text{K}$  temperaturlarında faza keçidləri müşahidə edilmişdir və aktivləşmə enerjiləri  $\Delta E_a^1 = 0.29\text{eV}$ ,  $\Delta E_a^2 = 0.2\text{eV}$  olmuşdur. Qamma şüaların təsirindən sonra aktivləşmə enerjiləri azalıb və dielektrik nüfuzluğunun maksimumları yuxarı temperatur oblastına sürüşür.
- 3) TlGaSe<sub>2</sub> monokristalının  $25 \div 10^6$  Hs tezlik intervalında elektrik sahəsinin tezliyinin artması ilə impedansın həqiqi və xəyalı komponentlərinin ( $Z'$  və  $Z''$ ) azalması ilə xarakterizə olunan maksimumlarının dispersiyaya məruz qalması müəyyən edilmişdir. Nümunənin elektrik modulunun xəyalı hissəsinin ( $M''$ ) tezlikdən asılılığında orta relaksasiya müddəti hesablanmışdır ( $\tau = 1.54 \cdot 10^{-6}$  san).
- 4) Sabit elektrik sahəsində TlInS<sub>2</sub> kristalının  $\sigma(T)$  asılılığında aşağı temperaturlarda keçiricilikdə elektron keçiriciliyi üstünlük təşkil etdiyi halda temperaturun artması ilə ion keçiriciliyin qiymətində artma müşahidə olunur.  $\gamma$ -şüalarla şüalanmış TlInS<sub>2</sub> kristalının elektrik keçiriciliyinin  $0-60\text{Mrad}$  doza intervalında kinetikasi verilmişdir. Göstərilmişdir ki, şüalanma dozası artdıqca ümumi

keçiricilikdə elektron payı azalır və nəticədə ion payı artır. Müəyyən edilmişdir ki, şüalanmadan əvvəl elektrik keçiriciliyində ion payı 78%, 20 Mrad qamma şüalarla şüalanmadan sonra isə 82% təşkil edir.

- 5)  $H^{2+}$  ionları ilə implantasiya olunmuş  $TlInS_2$  kristalında SRIM proqramından istifadə edərək atomların dərinlikdə paylanması verilmiş və Tl boşluqlarda  $H^+$  ionlarının paylanması 1000 nm dərinlikdə müəyyən edilmişdir.  $H^+$  ionları ilə implantasiya olunmuş  $TlInS_2$  kristallarının 300-550K intervalında dielektrik nüfuzluğu və impedansının həqiqi və xəyali hissələrinin tədqiqi nəticəsində göstərilmişdir ki, dielektrik nüfuzluğunun ədədi qiymətinin və relaksasiya müddətinin azalmasının əsas səbəbi mobil ionların konsentrasiyasının artması ilə bağlıdır.
- 6) 150 keV enerjili  $He^+$  ionları ilə implantasiya olunmuş  $TlGaSe_2$  kristalının dielektrik nüfuzluğunun ədədi qiyməti və relaksasiya müddəti azalmışdır. Bu azalma implantasiya nəticəsində kristalın quruluşunda mobil Tl ionların konsentrasiyasının artması ilə əlaqədardır.
- 7)  $H^+$  ionları ilə implantasiya olunmuş  $TlInS_2$  kristallarının İKS spektrlərinin tədqiqatları In və Tl ionlarının spektral xüsusiyyətlərinin əhəmiyyətli dərəcədə genişlənməsi və kristalın səth qatında Tl tərkibində azalma müşahidə edilmişdir. Bu implantasiyadan sonra kristalın strukturunda amorflaşma ilə əlaqələndirilir.

## İSTİFADƏ OLUNAN ƏDƏBİYYAT SİYAHISI

1. Ağayeva, R.Ş.  $\text{TlInTe}_2$  zəncirvari kristalin dielektrik və elektrik xassələrinə  $\gamma$ -kvantlarının təsiri: / Fizika üzrə fəlsəfə doktoru dis. / – Bakı, 2014. – 142 s.
2. Cahangirov, M. Proton dəstələri ilə yarımkeçiricilərin modifikasiya olunması: Radiasiya defektləri ilə aşqarlama // Gən tədqiqatçı elmi-praktiki jurnal. III cild, – 2017. №2, – s.14–19.
3. Çevikbaş, G. Alüminyum Titanat/Spinel'in Radyasyon Karşısındaki Davranışının İncelenmesi ve Değerlendirilmesi: / Yüksek Lisans Tezi. / – İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul, 2014. – 58 s.
4. Enstrümantal analiz ilkeleri. / D.A.Skoog, D.A.Holler, F.J.Nieman [et al.] – Ankara: Bilim Yayıncılık, – 2000. – 1038 s.
5. Saklakoğlu, N., Saklakoğlu, İ.E. İyon implantasyonu proses in in metalurjik yapısı // Metalurji, – 2004. – s.1-2.
6. Tek, Z. İki farklı iyon demeti karışımıyla hedefleri bombalayacak şekilde iyon kaynağını geliştirerek bu iyonların hedeflerin çekirdeksiz ve atomlarıyla etkileşmelerinin incelenmesi: / Doktora Tezi. / Ege Üniversitesi, – 2002. –187 s.
7. Абдуллаева С.Г., Адинбеков, С.С., Гусейнов, Г.Д. О кристаллической структуре соединений  $\text{Tl}^{\text{I}}\text{M}^{\text{III}}\text{X}^{\text{VI}}_2$  (M – In, Ga; X – S, Se) // Доклады АН Азерб.ССР, – 1980, том. 36, № 8, – с. 34-38.
8. Алекперов, О.З., Абдуррахманов, В.Р. Слоистый характер диэлектрической функции, определенный методом экситонной спектроскопии при фазовых переходах в кристаллах  $\text{TlGaSe}_2$  // Fizika, – 2003, с. 9, № 2, – s. 39-42.
9. Алекперов, О.З., Наджафов, А.И., Аль-Факих, А.Р. Радиационно-стимулированное структурное превращение моноклинного  $\text{TlInS}_2$  в гексагональную фазу // АМЕА-нин xəbərləri, – 2009. №2, – s.157-162.
10. Александров, П.А., Баранова, Е.К., Баранова, И.В., Бударрагин, В.В., Литвинов, В.Л. Влияние температуры отжига на выход имплантированного водорода из блистеров в кремнии / Труды XII Международного совещания « Радиационная физика твердого тела», –

Севастопол: – 1-6 июля, – 2002, – с.149-160

11. Алиев, В.А. Влияние примесей и электронного облучения на фазовые переходы в  $TlInS_2$  и их взаимосвязь с полупроводниковыми свойствами: / Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Баку, 1990. – 125 с.
12. Алиев, В.А. Несоизмеримая фаза в  $\beta$ - $TlInS_2$  // Физика, – 1996, том. 2, в. 1, – с. 3-7.
13. Алиев, Р.А. / Р.А.Алиев, К.Р.Аллахвердиев, А.И.Баранов [и др.] // Физика Твёрдого Тела, – 1989, том. 26, в. 5, – с. 1271-1276
14. Алиев, Р.А. Сегнетоэлектрическая мягкая КР активная мода в монокристаллах  $TlInS_2$  / Р.А.Алиев, К.Р.Аллахвердиев, С.С.Бабаев [и др.] // Препринт № 256, ИФАН Азерб.ССР, Баку, – 1987, – 20 с.
15. Алиев, Р.А. Сегнетоэлектричество и структурные фазовые переходы в кристаллах семейства  $TlInS_2$  / Р.А.Алиев, К.Р.Аллахвердиев, А.И.Баранов [и др.] // Физика Твёрдого Тела, – 1984, том. 26, в. 5, – с. 1272-1276.
16. Алиев, С.Н. Фотоэлектрические и диэлектрические свойства кристаллов  $TlInS_2$  – III и  $\beta$ - $TlInS_2$  / С.Н.Алиев, О.З.Алекперов, А.И.Наджафов [и др.] // Препринт НПО Космические исследования, – 1990. № 90, – с .38.
17. Алиев, С.Н., Алекперов, О.З., Наджафов, А.И. Влияние вакансий серы на фотопроводимость кристаллов  $\beta$ -  $TlInS_2$  // Изв. АН СССР Неорг. материалы, – 1992. том 28, №7, – с.1566–1567.
18. Алиев, Э.З. Пироэлектрические свойства  $TlInS_2$  / Э.З.Алиев, А.Э.Бахышов, Б.А.Натиг [и др.] // Кристаллография, – 1988, том. 33, № 4, – с. 1038-1039.
19. Аллахвердиев, К.Р. Низкотемпературный фазовый переход в слоистых сегнетоэлектриках-полупроводниках  $TlInSe_2$  и  $TlGaSe_2$  / К.Р.Аллахвердиев, Ф.М.Салаев, Ф.А.Микаилов [и др.] // Физика твёрдого тела, – 1992. 34, – с. 3615–3617.
20. Аллахвердиев, К.Р. Особенности поведения слоистых кристаллов  $TlInS_2$  и  $TlGaSe_2$  вблизи фазовых переходов в постоянном электрическом поле /

- К.Р.Аллахвердиев, Н.Д.Ахмедзаде, Т.Г.Мамедов [и др.] // Физика Низких Температур, – 2000. том 26, №1, – с.76–83.
21. Арефьев, А.К. Оптическое поглощение и аннигиляция позитронов в GaAs, облученном электронами / А.К.Арефьев, В.Н.Брудный, Д.Л.Будницкий [и др.] // Физика и Техника Полупроводников, – 1979. том 13, выпуск 6, – с.1142 – 1146.
  22. Артамкин, А.И. Особенности примесных состояний ванадия в теллуриде свинца / А.И. Артамкин, А.А.Добровольский, А.А.Винокуров [и др.] // Физика и техника полупроводников, – 2010, том. 44, в. 12, – с. 1591-1596.
  23. Асабина, Е.А. Дефекты в твердых телах и их влияние на свойства функциональных материалов / Е.А. Асабина. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, – 2012. – 65 с.
  24. Бадалов, А.З. Ионная проводимость, диэлектрическая релаксация и эффект переключения в кристаллах  $TlInTe_2$  / А.З.Бадалов, Р.М.Сардарлы, О.А. Самедов [и др.] // Elmi Məcmuələr, Aviasiya elektronikasi, – 2013, № 1, – s. 24-32.
  25. Банис, Ю. Микроволновая диэлектрическая дисперсия в  $TlGaSe_2$  / Ю. Банис, А.Брилингас, Й.Григас [и др.] // Физика Твёрдого Тела, – 1987, том. 29, в. 11, – с. 3324-3329.
  26. Блинц, Р. Сегнетоэлектрики и антисегнетоэлектрики. Динамика решетки: / Под ред. д-ра физико-математических наук Л. А. Шувалова / Москва, 1975. – 398 с.
  27. Бринкевич, Д.И., Просолович, В.С., Янковский, Ю.Н. Дефектообразование в кремнии при высокоэнергетичной ионной имплантации // 4-я международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом», – Минск: 3-5 октября, – 2001, – с. 11–13
  28. Брудный, В.Н. Электрические свойства и отжиг дефектов в арсениде галлия, облученном большими интегральными потоками электронов /

- В.Н.Брудный, М.А.Кривов, А.И.Потапов [и др.] // Физика и Техника Полупроводников, – 1982. том 16, выпуск 1, – с.32 – 39.
29. Брудный, В.Н., Будницкий, Д.Л., Кривов, М.А. Спектры оптического поглощения облученного электронами р-арсенида галлия // Изв. вузов. Физика, – 1977. № 5, – с.139 – 142.
  30. Брудный, В.Н., Кривов, М.А., Потапов, А.И. Электрические свойства слоев GaAs, облученных ионами  $H^+$  // Изв. вузов. Физика, – 1982. № 1, – с.38 – 43.
  31. Вавилов, В.С. Действие излучений на полупроводники. / В.С. Вавилов, Н.П.Кекелидзе, Л.С.Смирнов – Москва: Наука, – 1988. – 191с.
  32. Валюкенас, В.И. Влияние внешнего электрического поля на электропроводность кристаллов  $\alpha$ - AgSbS<sub>2</sub> / В.И.Валюкенас, А.С.Орлюкас, А.П.Сакаяс [и др.] // Физика Твердого Тела, – 1979. том 21, выпуск 8, – с. 2449-2450.
  33. Вахрушев, С.Б. Нейтронографические исследования кристалла TlGaSe<sub>2</sub>. / С.Б.Вахрушев, Б.Е.Квятковский, Н.М.Окунева [и др.] // Препринт №886 ФТИ им. А.Ф.Иоффе, Ленинград, – 1984, – 12 с.
  34. Вахрушев, С.Б. Несоизмеримый фазовый переход в кристалле TlInS<sub>2</sub> / С.Б.Вахрушев, В.В.Жданова, Б.Е.Квятковский [и др.] // Письма в ЖЭТФ, – 1984. том 39, выпуск 6, – с.245–247.
  35. Волкова, Е.В. Метод Монте-Карло в задачах моделирования структуры кластеров радиационных дефектов / Е.В.Волкова, С.В.Оболенский – Нижний Новгород: Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, – 2014. – 81 с.
  36. Волнянский, М.Д. Ионная проводимость и процессы объемно-зарядовой поляризации в кристаллах Li<sub>2</sub>Ge<sub>7</sub>O<sub>15</sub> / М.Д.Волнянский, С.Н.Пляка, М.П Трубицын [и др.] // Физика Твердого Тела, – 2012, том. 54, в. 3, – с. 471-476.

37. Галеева, А.В. Исследование проводимости полупроводниковых структур методом импедансной спектроскопии: / Кандидата физико-математических наук дис. / – Москва, 2010. – 111 с.
38. Глинчук, М.Д. Описание сегнетоэлектрических фазовых переходов в твердых растворах релаксоров в рамках теории случайных полей / М.Д.Глинчук, Е.А.Елисеев, В.А.Стефанович [и др.] // Физика Твёрдого Тела, – 2001. том 43, выпуск 7, – с.1247–1254.
39. Гнеденков, С.В., Синебрюхов, С.Л. Импедансная спектроскопия в исследовании процессов переноса заряда // Вестник ДВО РАН., - 2006. № 5., 11с.
40. Годжаев, Е.М., Зарбалиев, М.М., Алиев, С.А. Электрофизические свойства  $\text{TlInTe}_2$  // Неорганические материалы, – 1983. том 19, № 3, – с. 374-375.
41. Графов, Б.М. Электрохимические цепи переменного тока / Б.М. Графов, Е.А. Укше – Москва: Наука, – 1973. – 128 с.
42. Гринберг, Б.А. Интерметаллиды  $\text{Ni}_3\text{Al}$  и  $\text{TiAl}$ : микроструктура, деформационное поведение. / Б.А.Гринберг, М.А.Иванов. – Екатеринбург: УРО РАН, – 2002. – 358 с.
43. Гуревич, Ю.Я., Особенности термодинамики суперионных проводников. / Ю.Я. Гуревич, Ю.И. Харкац - Успехи физических наук, -1982. 37с.
44. Емцев, В.В., Машовец Т.В. Примеси и точечные дефекты в полупроводниках. Изд. / В.В. Емцев, Т.В. Машовец, – Москва; Радио м связь, – 1981. – 248 с.
45. Желудов, И.С. Физика кристаллических диэлектриков / И.С. Желудов. – Москва: Наука, – 1968. – 463 с.
46. Кааби, С.А.Д., Дроздов, Н.А., Королик, О.В. Оптическое поглощение и комбинационное рассеяние света в легированных кристаллах  $\text{TlGaSe}_2$  и  $\text{TlInS}_2$  // Оптика и Спектроскопия. Лазерная Физика. Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. – 2018. том 18, выпуск 2, – с. 112-122

47. Камзина, Л.С., Крайник, Н.Н. Корженевский, А.Л. Фазовый переход перколяционного типа в кристаллах цинкониобата свинца в электрическом поле // Письма в ЖЭТФ, – 1992. том 56, выпуск 10, – с.532–535.
48. Козловский, В.В. Модифицирование полупроводников пучками протонов / В.В.Козловский. – СПб: Наука, – 2003. –268 с.
49. Комаров, Ф.Ф. Ионная и фотонная обработка материалов / Ф.Ф.Комаров. – Минск : “Минск Бел. гос. Университет”, – 1998, – 209 с.
50. Комаров, Ф.Ф. Формирование протяженных дефектов в кремнии при высокодозной имплантации ионов водорода / Ф.Ф.Комаров, О.В.Мильчанин, В.В.Пилько [и др.] // Поверхность, – 2008. №4, – с. 27-30.
51. Комаров, Ф.Ф., Мильчанин О.В., Миронов А.М. Применение протонных пучков в современной микро и оптоэлектронике // Электронике, – 2006, № 10, – с. 30-35.
52. Курзина, И.А. Высокоинтенсивная имплантация ионов алюминия в никель и титан / И.А.Курзина, И.А.Божко, М.П.Калашников [и др.] // Известия Томского политехнического университета, – 2004. том 307, №3, – с. 30–35.
53. Кулик М., Самедов С.Ф., Самедов О.А. Исследование оптических и электрических свойств кристалла  $TlInS_2$  после имплантации ионами водорода и гелия // Journal of Radiation Researches, - 2018. vol.5, №2, - с.62-66.
54. Лидьярд, А. Ионная проводимость кристаллов. - Москва: Изд-во ИЛ, - 1962, - 222с.
55. Мамин, Р.Ф. К теории фазовых переходов в релаксорах // Физика твердого тела, – 2001. том 43, – с.1262–1267.
56. Одринский, А.П. Фотоэлектрическая релаксационная спектроскопия сегнетоэлектрика–полупроводника  $TlGaSe_2$  // Физика твердого тела, – 2014. том 56, выпуск 2, – с. 331–336.
57. Парфеньева, Л.С. Перенос тепла по немагнитным литиевым цепочкам в новом одномерном суперионике  $LiCuVO_4$  / Л.С.Парфеньева, А.И.Шелых,

- А.И.Смирнов [и др.] // Физика Твёрдого Тела, – 2003. том 45, выпуск 11, – с. 1991-1996.
58. Парфеньева, Л.С. Электропроводность и диэлектрическая проницаемость одномерного суперионного проводника  $\text{LiCuVO}_4$  / Л.С.Парфеньева, А.И.Шелых, А.И.Смирнов [и др.] // Физика Твёрдого Тела, – 2004. том 46, выпуск 6, – с. 998-1000.
59. Поплавной, А.С. Механизмы суперионного переноса в кристаллах / А.С.Поплавной. – Кемерово: ООО ИНТ, – 2009. – 182 с.
60. Самедов, О.А. Релаксорные сегнетоэлектрики на основе  $\text{TlInS}_2$  и  $\text{TlGaSe}_2$ : / доктора физико-математических наук. / – Баку, 2004. – 298 с.
61. Сардарлы, Р.М. Гигантская диэлектрическая релаксация в кристаллах  $\text{TlGaTe}_2$  / Р.М.Сардарлы, О.А.Самедов, А.П.Абдуллаев [и др.] // Физика Твёрдого Тела, – 2011. том 53, выпуск 8, – с.1488–1492.
62. Сардарлы, Р.М. Диэлектрическая релаксация в кристалле  $\text{TlGaTe}_2$  подвергнутого радиационному воздействию / Р.М.Сардарлы, А.З.Бадалов, О.А.Самедов [и др.] // Milli Aviasiya Akademiyasının elmi əsərləri, – 2012. № 2, – s. 3-14.
63. Сардарлы, Р.М. Особенности проводимости  $\gamma$  – облученных кристаллов  $\text{TlGaTe}_2$  с наночечной структурой / Р.М.Сардарлы, О.А.Самедов, А.П.Абдуллаев [и др.] // Физика Твёрдого Тела, – 2010. том 44, – с. 610.
64. Сардарлы, Р.М. Особенности проводимости  $\gamma$ -облученных кристаллов  $\text{TlGaTe}_2$  с наночечной структурой / Р.М.Сардарлы, О.А.Самедов, А.П.Абдуллаев [и др.] // Физика и Техника Полупроводников, – 2010, том 44, выпуск 5, – с.610–614.
65. Сардарлы, Р.М. Релаксорные свойства и механизм проводимости  $\gamma$ -облученных кристаллов  $\text{TlInS}_2$  / Р.М.Сардарлы, О.А.Самедов, А.И.Наджафов [и др.] // Физика Твёрдого Тела, – 2005. том 47, выпуск 9, – с.1665-1669.

66. Сардарлы, Р.М., Влияние катионных примесей на фазовые переходы в соединении  $TlInS_2$  / Р.М.Сардарлы, О.А.Самедов, А.И.Наджафов [и др.] // Физика Твёрдого Тела, – 2003. том 45, выпуск 6, – с.1085–1087.
67. Сардарлы, Р.М., Самедов, О.А., Салманов, Ф.Т., Алиева, Н.А., Юсифов, М.Ю., Оруджева. А.А. Суперионная проводимость в кристаллах  $TlGaSe_2$  индуцированная  $\gamma$ -облучением // Международной конференции «Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах», – Махачкала:– 6-9 сентября, – 2017 г, – с. 178-181.
68. Сардарлы, Р.М., Самедов, О.А., Абдуллаев А.П. и др. Влияние изовалентного замещения и  $\gamma$ -облучения на фазовые переходы кристаллов  $TlIn_{1-x}Cr_xS_2$  // Alternativ və bərra olunan enerji mənbələrindən istifadənin perspektivləri. Respublika konfransı. Bakı, Azərbaycan, – 2011, – s. 64–66.
69. Сеидов, М.Ю., Сулейманов, Р.А. Хамоев, Р. Электретные состояния и фазовый переход в приповерхностном слое в сегнетоэлектрике-полупроводнике  $TlGaSe_2$ // Физика твердого тела, – 2006. том 48, выпуск 7, – с. 1270–1273.
70. Смирнов, Л.С., Стась, В.Ф., Хайновская, В.В. Влияние дислокаций на кинетику накопления радиационных дефектов в германии // Физика Твёрдого Тела, – 1971, том 5, выпуск 1, – с. 85-90.
71. Сонин, А.С. Введение в сегнетоэлектричество / А.С.Сонин, Б.А.Струков – Москва; Высшая школа, – 1970. – 221 с.
72. Струков, Б.А. Сегнетоэлектричество / Б.А. Струков – Москва; Высшая школа, – 1979. – 96 с.
73. Сулейманов, Р.А. О диэлектрической аномалии при переходе в несоизмеримую фазу в слоистом кристалле  $TlInS_2$  / Р.А.Сулейманов, М.Ю.Сеидов, Ф.М.Салаев [и др.] // Физика Твёрдого Тела, – 1992. том 34, выпуск 6, – с.1829–1832.
74. Тагиев, Б.Г., Тагиев, О.Б., Мусаева, Н.Н. Инжекция и полевая ионизация ловушек в монокристаллах  $MnGa_2Se_4$ . ФТП, – 1995. т. 29, в. 8, – с. 1403-1410.

75. Тагиев, О.Б., Гашимова, Т.Ш., Аскеров, И.М. Исследование влияния сильного электрического поля на электропроводность монокристалла  $MnGaInS_4:Eu$  // Физика и Техника Полупроводников, – 1998, том 32, № 6, – с. 701–702.
76. Урусов, В.С. Теоретические кристаллохимия / В.С. Урусов. – Москва: Московского Университета, – 1987. – 272 с.
77. Фридкин, В.М. Сегнетоэлектрики-полупроводники / В.М.Фридкин. – Москва: Наука, – 1976. – 408 с.
78. Фридкин, В.М. Фотосегнетоэлектрики / В.М.Фридкин. – Москва: Наука, – 1979. – 284 с.
79. Хансен, М. Структуры двойных сплавов / М.Хансен, К.Андерко, / Москва: Металлургиздат, – 1962, том 2, – с.1488.
80. Хомич, А.В. Радиационное повреждение в алмазах при имплантации гелия / А.В. Хомич, Р.А. Хмельницкий, В.А. Дравин [и др.] // Физика твердого тела, – 2007. том 49, выпуск 9, – с. 1585–1589.
81. Чеботин, В.Н., Цидильковский, В.И. О фазовых переходах во флюорите и родственных соединения // Электрохимия, – 1980, том 16, выпуск 5, – с. 651-654.
82. Шушкин, В.Е. Спектроскопия комбинационного рассеяния света как инструмент изучения строения и фазовых переходов вещества в конденсированном состоянии: [ Электронный ресурс] / Физика и химия новых материалов. – 2009.
83. Abdullaev, N.A. Phase transition and anisotropy of thermal expansion in  $TlInS_2$  / N.A.Abdullaev, K.R.Allakhverdiev, G.L.Belenkii [et al.] // Solid State Communications, – 1985. volume 53, issue 7, – p.601–602.
84. Alakhverdiev, K.R. Succession of the low temperature phase transitions in  $TlInS_2$  crystals / K.R.Alakhverdiev, N. Türetken, F.M.o [et al.] // Solid State Communications, – 1995. volume 96, – p.827–831.

85. Alekperov, O., Najafov A. Dielectric Anomaly and Conductivity at Ferroelectric Phase Transition in  $\text{TlInS}_2$  Doped with Different Impurities // Japanese Journal of Applied Physics, – 2011. volume 50, – p. 05FC0701- 05FC0702.
86. Alekperov, O.Z., Aljanov, M.A., Kerimova, E.M. Low-Temperature Phase Transition in  $\text{TlInSe}_2$  Crystals// Turkish Journal of Physics, – 1998. Volume 22, – p.1053-1058
87. Alekperov, O.Z., Nadjafov, A.I. Anomalies of the dielectric penetrability in the polytypes of monoclinic modification of  $\text{TlInS}_2$ . // Proceedings RAS Inorganic Materials, – 2004. volume 40, №12, – p.1423-1426.
88. Alekperov, O.Z., Nadjafov, A.I. Dielectric anomalies in monoclinic  $\text{TlInS}_2$  polytypes // Inorganic Materials, – 2009. volume 45, – p. 1248-1251.
89. Aliev, E.Z. Electrical and pyroelectric properties of  $\text{TlInS}_2$  / E.Z.Aliev, A.E.Bakhyshov, T.G.Mamedov [et al.] // Ferroelectrics, – 1988, volume 83, – p.161–164.
90. Aliev, V.A. Electric Conductivity of  $\text{TlInS}_2$ , and  $\text{TlGaSe}_2$ , Crystals in the Region of Phase Transitions/ V.A.Aliev, E.F.Bagirzade, N.Z.Gasanov [et al.] // Physica Status Solidi (a), – 1987. volume 102, – p.K109–K112.
91. Allakhverdiev, K.R. Deformation effects in electronic spectra of the layered semiconductors  $\text{TlGaS}_2$ ,  $\text{TlGaSe}_2$  and  $\text{TlInS}_2$  / K.R.Allakhverdiev, T.G.Mammadov, R.A.Suleymanov [et al.] // Journal of Physics: Condensed Matter, – 2003. Volume 15, – p. 1291–1298.
92. Allakhverdiev, K.R. Low-Temperature IR and Raman Scattering Spectra of  $\text{TlInS}_2$ , Layered Crystal. / K.R.Allakhverdiev, S.S.Babaev, M.M.Tagiev [et al.] // Physica status solidi (b), – 1989. volume 152, – p.317
93. Allakhverdiev, K.R. Phase transitions and polytypes in  $\beta\text{-TlInS}_2$  ferroelectric semiconductor / K.R.Allakhverdiev, A.I.Baranov, T.G.Mamedov [et al.] // Ferroelectrics Letters Section, – 1988, vol. 8, № 5-6, – p. 125-133.
94. Bhushan, B. Handbook of Tribology, Materials Coatings and Surface Treatments / B.Bhushan, B.K.Gupta – United States: Krieger Publishing Company, – 1997. – 1168 p.

95. Biersak, J.P. Computer simulation of sputtering // Nuclear instruments and methods in physic research, – 1987. № 1, – p. 21–36.
96. Bird, J.R. Ion Beams For Materials Analysis. / J.R.Bird, J.S.Williams – Marrickville, Australlia: Acedemic Press, – 1989. – 716 p.
97. Bradtmöller, S., Kremer, R.K., Böttcher, P. Darstellung und Kristallstruktur von  $\text{SnTl}_4\text{Se}_3$  mit einer Anmerkung zu  $\text{TlSe}$  // Zeitschrift fur anorganische und allgemeine Chemie, – 1994. volume 620, – p.1073–1080.
98. Bray, D.E. Nondestructive evaluation: a tool in design, manufacturing and service. / D.E.Bray, R.K. Stanley – United States of America: CRC Press, – 1996. – 274 p.
99. Chattopadhyay, T. Temperature and pressure dependence of the Raman spectrum of crystalline  $\text{P}_4\text{S}_3$  / T.Chattopadhyay, C.Carlone, A.Jayaraman [et al.] // Physical Review B, – 1981. Volume 23, – p. 2471–2483.
100. Choi, B.J. Phase change memory cell using  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  and softly broken-down  $\text{TiO}_2$  films for multilevel operation / B.J.Choi, S.Choi, T.Eom [et al.] // Applied Physics Letters, – 2010. volume 97, – p. 132107– 132116.
101. Chu, W.K. Backscattering Spectrometry / W.K.Chu, J.W.Mayer, M.A.Nicolet – New York: Academic Press, – 1978. –
102. Chu, W.K. Masters B.J. Distribution of irradiation damage in silicon bombarded with hydrogen / W.K.Chu, R.H.Kasti, R.F.Lever [et al.] // Physical Review B, – 1977. №9, – p. 2851-3759.
103. Delgado, G.E. Crystal structure of the ternary semiconductor compound thallium galium sulfide,  $\text{TlGaSe}_2$ / G.E.Delgado, A.J.Mora, F.V.Perez [et al.] // Physics of Condensed Matter, – 2007. volume 391, issue 2, – p. 285–288
104. Doi, A. Comment on Warburg impedance and related phenomena // Solid State Ionics, – 1990. volume 40-41, – p. 262-26.
105. Dresselhaus, M.S. Raman spectroscopy of carbon nanotubes / M.S. Dresselhaus, G. Dresselhausb, R. Saitoc [et al.] // Physics Reports, – 2005. volume 409, – p. 47–99.

106. Dutta, S. Choudhary, R.N.P., Sinha, P.K. Impedance spectroscopy studies on  $\text{Fe}^{3+}$  ion modified PLZT ceramics // *Ceramics International*, – 2007. volume 33, – p. 13–20.
107. El-Nahass, M.M. Electrical conductivity and dielectric properties of  $\text{TlInS}_2$  single crystals / M.M.El-Nahass, S.B.Youssef, H.A.M.Alia [et al.] // *The European Physical Journal – Applied Physics*, – 2011. volume 55, – p.10101-10105.
108. Eulenberger, G., Hahn, H., Anorg, Z. Über ternäre Thalliumchalkogenide mit Thalliumselenidstruktur // *Journal of Inorganic and General Chemistry*, – 1973. volume 398, issue 2, – p.207–220.
109. Fedetov, A.K., Electrical properties of the layered single crystals  $\text{TlGaSe}_2$  and  $\text{TlInS}_2$  / A.K.Fedetov, M.I.Tarasik, T.G.Mammadov [et al.] // *Przegland Elektrotechniczny (Electrical Review)*, – 2012. – p.301–304.
110. Gamal, G.A. New technique for crystal growth and Phase Transition in  $\text{TlInS}_2$  Crystals // *Crystal Research and Technology*, – 1997. volume 32, – p.561–567.
111. Gasanly, N.M. Spectroscopy of Optical Vibrational States of  $A^3B^6$ -Type Anisotropic Semiconductive Crystals: / Доктор физико-математических наук дис. / – Baku, 1986. – 305 p.
112. Gasanly, N.M. Raman study of layer  $\text{TlGaS}_2$ ,  $\beta\text{-TlInS}_2$  and  $\text{TlGaSe}_2$  crystals / N.M. Gasanly, B.N.Marvin, K.E.Sterin [et al.] // *Physica Status Solidi b*, – 1978. volume 86, issue 1, – p. K49-K53.
113. Gerald, B., Dacol, F.K. Glassy polarization behavior in ferroelectric compounds  $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$  // *Solid State Communications*, – 1983, volume 48, – p.853–856.
114. Guranich, P.P. Ferroelasticity of  $\text{TlInS}_2$  crystal / P.P.Guranich, R.R.Rosul, O.O.Gomonnai [et al.] // *Solid State Communications*, – 2014. volume 184, – p.21–24.
115. Guseinov, G.D. About group of three-component components being analogous to binary semiconductors of the  $A^3B^6$  type / G.D.Guseinov, A.M.Ramazanzade, E.M.Kerimova [et al.] // *Physica Status Solidi*, – 1967, vol. 22, № 1, – p. K117-

K122.

116. Guseinov, G.D. On some properties of  $\text{TlInS}_2(\text{Se}_2, \text{Te}_2)$  single crystals / G.D.Guseinov, E.Mooser, E.M.Kerimova [et al.] // *Physica Status Solidi*, – 1969, vol. 34, № 1, – p. 33-44.
117. Hacıyev M.S., Abiyev. / M.S. Hacıyev, J.H. Ismailzade, // *Ferroelectrics*, – 1984. volume 56, – p.215–217.
118. Hahn, H., Wellman, B. Uber ternare halkogenide des Thalliums mit Gallium und Indium // *Naturwissenschaften*, – 1967. volume 54, – p. 42.
119. Haniyas, M. Electrical and Optical properties of as-grown  $\text{TlInS}_2$ ,  $\text{TlGaSe}_2$  and  $\text{TlGaS}_2$  single crystals / M.Haniyas, A.N.Anagnostopoulos, K.Kambas [et al.] // *Journal Materials Research Bulletin*, – 1992. volume 27, – p.25–38.
120. Haniyas, M. On the non-linear properties of  $\text{TlInX}_2$  ( $X = \text{S}, \text{Se}, \text{Te}$ ) ternary compounds / M.Haniyas, A.N.Anagnostopoulos, K.Kambas [et al.] // *Physica B: Condensed Matter*, – 1989. volume 160, issue 2, – p.154–160.
121. Hartley, N.E.W. Ion implantation and surface modification in tribology // *Wear*, – 1975. 34, – p. 427 – 438.
122. Henkel, W. High-pressure Raman study of the ternary chalcogenides  $\text{TlGaS}_2$ ,  $\text{TlGaSe}_2$ ,  $\text{TlInS}_2$ , and  $\text{TlInSe}_2$ / W.Henkel, H.D.Hochheimer, C.Carlone [et al.] // *Physical Review B*, – 1982. volume 26, – p. 3211–3221.
123. Hirvonen, J.K., Sartwell, B.D., Ion implantation // *ASM Handbook, Surface Engineering*, –1992. volume 5, – p. 605-609.
124. Hockheimer, H.D., Gmelon, E. Study of the ferroelectric phase transition of  $\text{TlGaSe}_2$  by dielectric, calorimetric, infrared and X-ray diffraction measurements // *Zeitschrift für Physik B Condensed Matter*, – 1988, vol. 73, № 2, – p. 257-263.
125. Hockheimer, H.L., Gmelon, E. Study of the ferroelectric phase transition of  $\text{TlGaSe}_2$  by dielectric, calorimetric, infrared and X-ray diffraction measurements // *Zeitschrift für Physik B Condensed Matter*, – 1988. Volume 73, № 2, p.257–263.

126. Ibragimov, T.D. // Works of satellite conference of the XXX annual meeting of the European high pressure group. Multicomponent semiconductors. Baku, Azerbaijan, – 1992, – p.9.
127. Ibragimov, T.D. Investigation of TlInS<sub>2</sub> crystals near phase transitions by method of second optical harmonic // Proceeding of 2<sup>nd</sup> International conference on laser and their applications. Tehran, Iran, – 1993, – p.63–67.
128. Ibragimov, T.D., Sardarly, R.M., Aslanov, I.I. Second Harmonic Generation in TlInS<sub>2</sub> crystals // Journal of Applied Spectroscopy, – 2001. volume 68, №4, – p.711–714.
129. Ichimura, S., Tatsuyama, C., Ueno, O. Electrical and optical properties of intercolated GaSe compound // Physica 105B, – 1981. – p.238-242.
130. Ion-Solid Interactions: Fundamentals and Applications / M.Nastasi, J.W.Mayer, W.James [at al.] . – New York: Cambridge University Press, – 1996. – 346 p.
131. Isaaks, T.J. Crystal data for thallium gallium diselenide TlGaSe<sub>2</sub> // Journal of Applied Crystallography, – 1973, vol. 6, № 8, - p. 413-414.
132. Isaaks, T.J., Feichtner, J.D. Growth and optical properties of TlGaSe<sub>2</sub> and β-TlInSe<sub>2</sub> // Journal of Solid State Chemistry, – 1975, vol. 14, № 3, – p. 260-263.
133. Isaaks, T.J., Hopkins, R.H. Crystal growth simmetry and physical properties of thallium gallium disulfide TlGaSe<sub>2</sub> // Journal of Crystal Growth, – 1975, vol. 9, № 1, – p. 121-122.
134. Karpovich, I.A, Chervova, A.A., Demidova, L.I. Band Gap of TlGa(S,Se)<sub>2</sub> and TlIn(S,Se)<sub>2</sub> // Izv. Akad. Nauk SSSR, Inorganic Materials, – 1974, volume 10, – p. 2216.
135. Kashida, S., Kobayashi, Y. Neutron Scattering Study of the Structural Phase Transitions in TlGaSe<sub>2</sub> // Journal of the Korean Physical Society, – 1998. volume 32, – p.S40–S43.
136. Kashida, S., Nakamura, K. An X-Ray Study of the Polymorphism in Thallium Monosulfide: The Structure of Two Tetragonal Forms // Journal of Solid State Chemistry, – 1994. volume 110, issue 2, – p.264–269.

137. Katayama, S., Kashida, S., Hori, T. Structural Instability and Photoconduction of  $\text{Tl}^{1+}(\text{Tl}^{3+}\text{S}_2^{2-})$  // Japanese Journal of Applied Physics, – 1993. volume 32, – p. 639–641.
138. Ketelaar, J.A.A., Gorter, E.W. Die kristallstruktur von Thallosulfid ( $\text{Tl}_2\text{S}$ ) // Zeitsch fur kristallographie, – 1939. – p.367–375.
139. Kheyfets O.L. Electrical properties of solid electrolytes of the general formula  $\text{ABCD}_3$  ( $\text{A} = \text{Ag}, \text{Cu}$ ;  $\text{B} = \text{Pb}, \text{Sn}$ ;  $\text{C} = \text{As}, \text{Sb}$ ;  $\text{D} = \text{S}, \text{Se}$ ) / O.L.Kheyfets, N.V.Melnikova, A.L.Filippov [et al.] // Technical Physics, – 2007, volume 77, – p.90-96.
140. Kheyfets, O.L. / O.L.Kheyfets, N.V.Melnikova, A.L.Filippov [et al.] // Phys. Tech. Semicond. , – 2012. volume 46, – p. 966.
141. Kheyfets, O.L. Effect of composition on the electrical properties of low-temperature ionic conductors in the  $\text{Cu}_{1-x}\text{Ag}_x\text{GeAsSe}_3$  / O.L.Kheyfets, N.V.Melnikova, A.L.Filippov [et al.] // Solid state physics, – 2012, volume 54, Issue 8, – p. 1466-1469.
142. Kheyfets, O.L. Materials based on complex chalcogenides for low-temperature current sources / O.L.Kheyfets, N.V.Melnikova, O.A.Shabashova / International scientific Journal for Alternative Energy and Ecology ISJAEE, – 2007. volume 49, №5 – p. 40-44.
143. Kheyfets, O.L. The electrical properties of chalcogenides  $\text{AgGeAsS}_{3x}\text{Se}_{3(1-x)}$  ( $0,1 \leq x \leq 0,9$ ) / O.L.Kheyfets, A.N.Babushkin, O.A.Shabashova // Low Temperature Physics, – 2007. № 2/3, – p.374-377.
144. Komarov, F.F., Komarov, A., Zukowski, P. Gettering of metal impurities to cavities formed by hydrogen and helium implantation in silicon // Vacuum, – 2001. 63, № 4, – p. 609-612.
145. Krebs, D., Raoux, S., Rettner, C.T. Characterization of phase change memory materials using phase change bridge devices // Journal of Applied Physics, – 2009. volume 106, – p.054308–0543014.

146. Krupnikov, E.S., Aliev, F.Y., Orudzhev, R.G. Sequence of phase transitions in a layered  $\beta$ -TlInS<sub>2</sub> crystal // Soviet physics, Solid state, – 1992. volume 34, – p.1574–1575.
147. Laiho, R. Brillouin scattering study of phase transitions in TlInS<sub>2</sub> / R.Laiho, T.Levola, R.M.Sardarly [et al.] // Solid State Communications, – 1987. volume 63, issue 12, – p.1189–1192.
148. Lambert, P.J. Raman spectroscopy: the gateway into tomorrow's virology / P.J.Lambert, A.G.Whitman, O.F.Dyson [et al.] // Virology Journal, –2006. Volume 3, – p. 1–8.
149. Lines, M.E., Waszczak, J.V. A bond – orbital interpretation of the linear dielectric and magnetic properties of the ternary chalcopyrites // Journal of Applied Physics, – 1977. volume 48, – p. 1395.
150. Macdonald, J.R. Impedance spectroscopy: old problems and new developments // Electrochimica Acta, – 1990. volume 35, – p. 1483 – 1492.
151. Mayer, J.W. Ion Implantation in Semiconductors. / J.W.Mayer, L.Eriksson, J.A.Davies. –Pasadena, California: Academic Press, – 1970. – 296 p.
152. McMorro, D.F. The structure of the paraelectric and incommensurate phases of TlGaSe<sub>2</sub> / D.F.McMorro, R.A.Cowley, P.D.Hatton [et al.] // Journal of Physics: Condensed Matter, – 1990. – p.3699–3712.
153. Mikailov, F.A. Dielectric susceptibility behaviour in the incommensurate phase of TlInS<sub>2</sub> / F.A.Mikailov, E.Basaran, T.G.Mammadov [et al.] // Physica B: Condensed Matter Volume, - 2003. volume 334, issues 1–2, – p.13–20.
154. Mikailov, F.A. EPR study of the structural phase transitions in chromium doped thallium indium disulphide / F.A.Mikailov, B.Z.Rameev, A.M.Kulibekov [et al.] // Journal of Magnetism and Magnetic Materials, – 2003. volume 258, – p.419–422.
155. Mikailov, F.A. Phase transitions and metastable states in TlGaSe<sub>2</sub> / F.A.Mikailov, E.Başaran, E.Şentürk [et al.] // Phase Transitions, – 2003. volume 76, №12, – p.1057–1064.

156. Mikailov, F.A., Basaran, E., Senturk, E. Time relaxation of metastable chaotic state in  $\text{TlInS}_2$  // *Solid State Communications*, – 2002. volume 122, – p.161–164.
157. Muller, D., Hahn, H., Anorg, Z. Untersuchungen über ternare Chalkogenide.XXIV.Zur Struktur des  $\text{TlGaSe}_2$  // *Journal of Inorganic and General Chemistry*, – 1978. volume 438, – p.258–272.
158. Muller, D., Poltman, E., Hahn, H. On structure of ternary thallium chalcogenides with aluminum, gallium and indium // *Z.Naturforesch*, – 1974, 29B, № 1, – p. 117-118.
159. Muller, D., Poltmann, F.E., Hahn, H. Zur Structur ternarer Chalcogenide des Talliums mit Aliminium, Gallium und Indium // *Z. Naturforsch., B: Chem. Sci.*, – 1974. vol. 29, – p. 117–118.
160. Mustafaeva, S.N., Aliev, V.A., Asadov, M.M. Anisotropy of the hopping conductivity in  $\text{TlGaSe}_2$  single crystals // *Physica of the Solid Status*, – 1998. volume 40, – p.48–51.
161. Nakamura, K., Kasida, S. X-ray Stady of the Room Temperature structure in monoclinic  $\text{TlS}$  // *Journal of the Physical Society of Japan*, - 1993. volume 62, №9, – p.3135–3141.
162. Nikonenko, V.V., Kozmai. A.E. Electrical equivalent circuit of an ion-exchange membrane system // *Electrochimica Acta*, – 2011. volume 56, – p. 1262 – 1269.
163. Norton, D.P. Ferromagnetism in Cobalt Implanted  $\text{ZnO}$  / D.P.Norton, M.E.Overberg, S.J.Pearton [et al.] // *Applied Physics Letters*, – 2003. 83, – p. 5488-5490.
164. Özdemir, S., Suleymanov, R.A., Civan, E. Electrical conductivity in layered semiconductor  $\text{TlInS}_2$  with incommensurate phase // *Solid State Communications*, – 1995. volume 96, №10, – p.757–761.
165. Panich, A.M. Electronic properties and phase transitions in low-dimensional semiconductors // *Journal of Physics: Condensed Matter*, –2008. Volume 20, – p. 293202–293244

166. Panich, A.M., Mogilyansky, D., Sardarly, R.M. Phase transitions and incommensurability in the layered semiconductor  $\text{TlInS}_2$ —an NMR study // *Journal of Physics: Condensed Matter*, – 2012. – p.135901–135906.
167. Parker, S.F. A review of the theory of Fourier-transform Raman spectroscopy // *Spectrochimica Acta Part A: Molecular Spectroscopy*, – 1994. volume 50, – p. 1841- 1856.
168. Paucar, P. Temperature dependence of low-frequency polarized Raman scattering spectra in  $\text{TlInS}_2$  / P.Paucar, G.Y.Shim, K.Mimura [et al.] // *Physica Status Solidi C*, – 2017. – p. 1600214–1600217.
169. Polyakov, A.Y. Properties of Mn and Co Implanted ZnO Crystals / A.Y.Polyakov, A.V.Govorkov, N.B.Simirnov [et al.] // *Solid-State Electronics*, – 2003. 47, – p. 1523-1531.
170. Popp, J., Kiefer, W. Raman scattering, fundamentals // *Encyclopedia of Analytical Chemistry*, – 2006. – 39 p.
171. Rita, E. Lattice Site and Stability of Implanted Ag in ZnO / E.Rita, U.Wahl, A.M.L.Lopes [et al.] // *Physica B: Condensed Matter*, – 2003. Volume 340, – p. 240-244.
172. Ryssel, H. Ion Implantation; John Wiley and Sons / H.Ryssel, I.Ruge – New York, – 1986. 350 p.
173. Salaev, F.M., Alakhverdiev, K.R., Mikailov, F.A. Dielectric properties and metastable states in ferroelectric  $\text{TlInS}_2$  crystals // *Ferroelectrics*, – 1992. volume 131, – p.163–167.
174. Samadov, S.F. Dielectric and electrical properties of near-surface layers of  $\text{TlInS}_2$  crystals under the proton irradiation / S.F.Samadov, O.A.Samedov, O.Z.Alekperov [et al.] // *International Journal of Modern Physics B*, – 2019. Vol. 33, – p. 1950320 (7 pages).
175. Samedov, O.A. Dielectric and electrical relaxation in  $\text{TlInS}_2$  crystals irradiated by  $\gamma$ - quanta / O.A.Samedov, O.Z.Alekperov, A.I.Nadjafov [et al.] // *Journal of Radiation Research*, – 2015. volume 2, №1, – p. 11–17.

176. Sardarli, R.M. Influence of cationic impurities on the phase transitions in conjunction of  $\text{TlInS}_2$  / R.M.Sardarli, O.A.Samedov, A.I.Najafov [et al.] // *Physica status solidi*, – 2003. volume 45, – p.1085-1087.
177. Sardarli, R.M. Superionic conductivity of  $(\text{TlGaSe}_2)_{1-x}(\text{TlInS}_2)_x$  solid solutions / R.M.Sardarli, A. P.Abdullayev, N.A.Aliyeva [et al.]// *Semiconductors*, – 2018. volume 52, №10, – p.1229–1232.
178. Sardarly, R.M. Dielectric properties, conduction mechanism, and possibility of nanodomain state with quantum dot formation in impurity-doped gamma-irradiated incommensurate  $\text{TlInS}_2$  / R.M.Sardarly, N.T.Mamedov, K.Wakita [et al.] // *Physica Status Solidi (a)*, – 2006. volume 203, №11, – p.2845–2851.
179. Sardarly, R.M. Superionic Conductivity in One-Dimensional Nanofibrous  $\text{TlGaTe}_2$  Crystals / R.M.Sardarly, O.A.Samedov, A.P.Abdullaev [et al.] // *Coutas Japanese Journal of Applied Physics*, –2011. volume 50, – p.05FC09 1-2
180. Sardarly, R.M. Superionic state in  $\text{TlS}$ ,  $\text{TlSe}$ ,  $\text{TlInS}_2$  and  $\text{TlGaSe}_2$  crystals / R.M.Sardarly, N.M.Ismayilov, A.P.Abdullayev [et al.] // *Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının Xəbərləri*, – 2018. № 3, – s. 97–102.
181. Schrader, B., Moore, D. Nomenclature, symbols, units, and their usage in spectrochemical analysis XVIII. Laser-based molecular spectrometry for chemical analysis-Raman scattering processes (IUPAC Recommendations 1997). *Pure and Applied Chemistry*, – 1997. 69, – p. 1451-1468.
182. Shelega, A.U. Low Temperature X-Ray Studies of  $\text{TlInS}_2$ ,  $\text{TlGaS}_2$ , and  $\text{TlGaSe}_2$  Single Crystals / A.U.Shelega, V.V.Shautsovaa, V.G.Hurtavya [et al.] // *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, – 2013. volume 7, №6, – p.1052–1055.
183. Skoog, D.A. Principles of Instrumental Analysis. / D.A.Skoog, J.F.Holler, T.A.Nieman – America: Saunders Collage Publishing, – 1992. – 710 p.
184. Suleymanov, R.A. Model of a sequence of structural phase transitions in a layer  $\text{TlInSi}_2$  crystal / R.A.Suleymanov, M.Y.Seidov, F.M.Salaev [et al.] // *Physics of the Solid State*, – 1993. volume 35, №2 – p.177–180.

185. Syrbu, N.N. Resonance Raman Scattering in TlGaSe<sub>2</sub> Crystals / N.N.Syrbu, A.V.Tiron, V.V.Zalamai [et al.] // Advances in Condensed Matter Physics., – 2017. Article ID 5787821, 5 pages.
186. Syrbu, N.N. Resonance Raman scattering and excitonic spectra in TlInS<sub>2</sub> crystals / N.N.Syrbu, V.E.Lvin, I.B.Zadnir // Journal of Luminescence, – 2015. – p. 1–26.
187. Syrbu, N.N. Vibrational Properties of CdGa<sub>2</sub>S<sub>4</sub> / N.N.Syrbu, H.Neumann, H.Sobotta [et al.] // Crystal res. and Technology, – 1984. volume 19,– p. 704–714.
188. Tallant, D.R. Boron carbide structure by Raman spectroscopy / D.R. Tallant, T.L.Aselage, A.N.Campbell [et al.] // Physical Review B, – 1989. volum 40, – p. 5649–5656.
189. Vahrushev, S.B. Incommensurate phase transition in the TlInS<sub>2</sub> crystal / S.B.Vahrushev, V.V.Zhdanov, O.E.Kwiatkowski [et al.] // JETP letters, – 1984. volume 39, – p.245–247.
190. Volkov, A.A. Structural phase transitions in TlInS<sub>2</sub> crystal / A.A.Volkov, J.G.Goncharov, G.V.Kozlov [et al.] // Journal of Solid State Physics, – 1983, volume 25, – p.3583–3585.
191. Weber, W.H. Raman Scattering in Materials Sciences. / W.H. Weber, R.Merlin – Berlin: Springer Series in Materials Science, – 2000. – 238 p.
192. Wei, B. Friction and wear mechanisms of carbon-coated thin-film magnetic rigid disks and application of ion beam technology in head: / Submitted of the degree of Doctor of Philosophy. / – The University of California at Berkeley, 1994. – 2832 p.
193. Woolley, J.C., Pamplinand, B.R., Holmes, P.J. The ordered crystal structure of In<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> //Journal of Less Common Metals, – 1959. volume 1, issue 5, – p.362–376.
194. Wübbenhorst, M., Turnhout, J. V. Analysis of complex dielectric spectra. I. One-dimensional derivative techniques and three-dimensional modeling // Journal of Non-Crystalline Solids, – 2002. volume 305, – p. 40-49.

195. Youssef, S.B. Phase transitions and electrical conductivity of  $\text{TlInS}_2$  // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, – 1995. volume 215, – p.176–180.
196. Zalamai, V.V. Resonance Raman scattering and excitonic spectra in  $\text{TlInS}_2$  crystals [et al.] / V.V.Zalamai, I.G.Stamov, N.N.Syrbu // *Journal of Luminescence*, – 2015. volume 160, – p. 195–201.
197. Ziegler, J.F. Stopping Powers and Ranges in all Elements. / J.F. Ziegler, J.P. Biersack, U. Littmark – New York: Pergamon Press, – 1985. – 321 p.
198. Ziegler, J.F. The stopping and range of ions in solids / J.F.Ziegler, J.P.Biersack – New York: Pergaman press, – 1985, – 375 p.

## ŞƏRTİ İŞARƏLƏR

RFA – Rentgenfaza analizi

$\mu_f$  – Effektiv yürüklük

VAX – Volt-Amper xarakteristikası

$\sigma_{dc}$  – sabit sahədə keçiricilik

$\sigma_{ac}$  – dəyişən sahədə keçiricilik

$\Delta E$  – energetik səviyyələr arasında fərq

R – lokal səviyyələr üzrə sıçrayışın uzunluğu,

$\epsilon$  - dielektrik nüfuzluğu

$\text{tg}\delta$  - dielektrik itki bucağının tangensi

d – nümunənin qalınlığı

FK – Faza keçidi

f – ölçmə sahəsinin tezliyi, Hs.

$N_F$  – lokallaşmış hallar sıxlığı  $eV^{-1} \cdot \text{sm}^{-3}$ .

$N_t$  – lokal səviyyələrin konsentrasiyası,  $\text{sm}^{-3}$ .

$R_{cp}$  – sıçrayışın orta uzunluğu, Å.

$\sigma_{\parallel}$  – «c» oxu istiqamətində xüsusi keçiricilik,  $\text{Om}^{-1} \cdot \text{sm}^{-1}$ .

$\sigma_{\perp}$  – «c» oxuna perpendikulyar istiqamətində xüsusi keçiricilik,  $\text{Om}^{-1} \cdot \text{sm}^{-1}$ .

$\epsilon'$  – kompleks dielektrik nüfuzluğunun həqiqi hissəsi.

$\epsilon''$  – kompleks dielektrik nüfuzluğunun xəyalı hissəsi.

v – ölçmə sahəsinin tezliyi, Hs.

$\omega$  – ölçmə sahəsinin dairəvi tezliyi, Hs.

$\tau$  – sıçrayışın orta yaşama müddəti, mks.

$Z'$  - kompleks müqavimətinin həqiqi hissəsi.

$Z''$  - kompleks müqavimətinin xəyalı hissəsi.

$\varphi$  - faza sürüşməsi

İKS - işığın kombinasiyali səpilməsi