

AB₂X₄ TIPLİ BİRLƏŞMƏLƏRİN ELEKTROFİZİKİ VƏ OPTİK XASSƏLƏRİ

N.N.NİFTİYEV

*Azərbaycan Dövlət Pedaqoji Universiteti
AZ 1000, Bakı, Ü.Hacıbəyov, 34*

Məqalədə AB₂X₄ tipli birləşmələrin alınması və kristal quruluşu haqqındakı işlərin icmalı verilmiş, bu birləşmələrdən olan FeGa₂S₄, FeIn₂S₄, FeGaInS₄, FeGa₂Se₄, FeIn₂Se₄, MnGa₂S₄, MnIn₂S₄, MnGaInS₄, MnIn₂Se₄, MnGa₂Se₄-ün elektrofiziki və optik xassələrinin tədqiqinin ümumiləşdirilmiş nəticələri verilmişdir. Sabit elektrik sahəsində VAX-ın tədqiqi nəticəsində müəyyən edilmişdir ki, VAX-ın qeyri-xətti oblastında cərəyanın keçmə mexanizmi FeGa₂Se₄, MnGa₂S₄ və MnIn₂S₄ birləşmələrində yükdaşıyıcıların indium kontaktından injeksiya ilə, FeGa₂S₄, FeIn₂Se₄ və MnIn₂Se₄ birləşmələrində isə Frenkelin termoelektron ionlaşması ilə əlaqədardır. Bu birləşmələrdə tədqiq olunan temperatur oblastında elektrikkeçiriciliyi aktivləşmə mexanizmi ilə əlaqədardır. Yükdaşıyıcıların aktivləşmə enerjisi, tələlərin konsentrasiyası və potensial çuxurun forması təyin edilmişdir. FeIn₂S₄ kristalında çevirmə effekti aşkara çıxarılmışdır. MnIn₂Se₄-də isə cərəyanın zamana görə relaksasiyası müşahidə edilmişdir. Bu birləşmələrin dəyişən elektrik sahəsində dielektrik nüfuzluğu (ϵ) və elektrikkeçiriciliyi (σ), itki bucağının tangensi ($\text{tg}\delta$) tezlik və temperaturdan asılı olaraq tədqiq edilmiş və onların qiymətləri hesablanmışdır. Temperatur yüksəldikcə ϵ -nin qiymətinin artması yükdaşıyıcıların konsentrasiyasının artması ilə əlaqədardır. Tədqiq olunan tezlik intervalında $\text{tg}\delta \sim 1/\omega$ tərs mütənəsb asılılığı müşahidə edilir. MnGa₂S₄, MnIn₂S₄, MnGaInS₄, FeGa₂Se₄ və FeIn₂Se₄ kristallarında TSD tədqiqi nəticəsində sürətli yapışma səviyyələrinin mövcudluğu aşkara çıxarılmışdır. MnGa₂S₄, MnIn₂S₄, MnGaInS₄ və MnGa₂Se₄ monokristallarında optik udulma təcrübələri aparılmış və müəyyən edilmişdir ki, qadağan olunmuş zonanın eninin temperaturdan asılı olaraq dəyişməsinə cavabdeh olan mexanizm elektron-fonon qarşılıqlı təsirdir. MnGa₂S₄, MnIn₂S₄ və MnGa₂Se₄ monokristallarında optik udulmanın uzundalğalı kənarı Urbax qaydasına tabe olur. MnGa₂S₄, MnIn₂S₄ və MnGaInS₄ monokristallarının müxtəlif temperaturlarda polyarizə edilmiş işıq altında optik udulmanın düşən fotonun enerjisindən asılılığının tədqiqi nəticəsində anizotrop luq müşahidə edilmişdir. MnIn₂S₄ və MnGaInS₄ monokristallarında müxtəlif temperaturlarda fotokeçiriciliyin spektral paylanması məxsusi və aşkar oblastlar aşkara çıxarılmışdır.

GİRİŞ

Son illər d və f təbəqələri tamamilə dolmayan elementlər daxil olan üçlü xalkogenid birləşmələr qeyri-adi fiziki xassələri və praktik tətbiqləri sayəsində intensiv tədqiqatların obyektinə çevrilmişdir. Bu birləşmələr içərisində fiziki prosesləri az öyrənilmiş AB₂X₄ (burada A-Mn, Fe, Co, Ni; B-Ga, In; X-S, Se, Te) tipli böyük sinif materiallar xüsusi maraq kəsb edir. Bu birləşmələr lazerlər, işıq modulyatorları, fotodedektorlar, termorezistorlar, düzləndiricilər və s. funksional qurğular yaratmaq üçün perspektivlidir. Müxtəlif aşqarlar daxil etməklə bu birləşmələrin fiziki xassələrini dəyişmək olar. AB₂X₄ tipli birləşmələrin xüsusi elektrik keçiriciliyi $10^{-3} \div 10^{-16} \text{om}^{-1} \text{sm}^{-1}$, qadağan olunmuş zonasının eni isə 1,0÷3,0eV intervalında dəyişir. Bu birləşmələrin və onların monokristallarının elektrofiziki və optik xassələrinin kompleks şəkilində öyrənilməsi ilə onlarda elektron və optik proseslərin araşdırılması elmi və praktik cəhətdən çox mühüm əhəmiyyət daşıyır.

Hal-hazırkı icmalda FeGa₂S₄, FeIn₂S₄, FeGaInS₄, FeGa₂Se₄, FeIn₂Se₄, MnGa₂S₄, MnIn₂S₄, MnGaInS₄, MnGa₂Se₄ və MnIn₂Se₄ birləşmələrinin elektrofiziki və optik xassələrinin tədqiqinin ümumiləşdirilmiş nəticələri verilmişdir.

AB₂X₄ TIPLİ BİRLƏŞMƏLƏRİN ALINMASI VƏ KRİSTAL QURULUŞU

AB₂X₄ tipli birləşmələr AX-B₂X₃ sistemi əsasında alınır və müxtəlif qəfəs tiplərində kristallaşır (monoklin, ortorombik, tetraqonal, kubik, triqonal və s.).

[1-3] işlərində AIn₂S₄ (burada, A-Mn, Fe, Co, Ni) tipli birləşmələr və MnIn₂S₄ stexiometrik miqdarda yüksək təmizlikli elementlər qarışığından alınmış və rentgenoqrafik tədqiqatlar nəticəsində müəyyən edilmişdir ki, öyrənilən sistemlər bir fazalıdır və fəza qrupu Fd3m olan kubik quruluşda kristallaşır.

MnGa₂S₄ birləşməsinin alınması və kristal quruluşu [4-7] işlərində tədqiq edilmişdir. MnS-Ga₂S₄ sisteminin rentgenoqrafik tədqiqi nəticəsində aşağıdakı fazalar aşkara çıxarılmışdır [7]:

I. İki modifikasiyası olan MnGa₂S₄: 1.Aşağı temperaturlu MnGa₂S₄ izostrukturlu α – monoklin (a=12,14, b=22,75, c=6,54Å, β=108⁰, f.qr. c₂/c.). 2.Yüksək temperaturlu ZnAl₂S₄ izostrukturlu β - rombik (a=12,90, b=7,45, c=6,13Å, f. qr. Pna2).

II. Mn₂Ga₂S₅ (triqonol, a=3,75,c=15,24Å, z=1)

III. Mn_{1-x}Ga_{2+(2x/3)}S₄ qeyri stexiometrik faza (tetraqonal quruluşlu a=5,43, c=10,16Å).

Müəyyən edilmişdir ki, Mn atomu iki tip koordinasiyaya malik olur: Ga böyük miqdarda olduğu fazalarda Mn atomu həmişə tetraedrik əhatədə yerləşir. β- MnGa₂S₄ modifikasiyasında Mn atomu tetraedrdə, α- MnGa₂S₄-də isə Mn atomu oktaedrdə yerləşir.

Cədvəl 1

Kristal	Sinqoniya	Fəza qrupu	Qəfəs parametrləri, Å			Oxşar struktura	T _{qr.} , °C
			a	b	c		
α- FeGa ₂ S ₄	Triqonal		3,67		12,07		<1054
β- FeGa ₂ S ₄	Rombik	Pna2 ₁	12,98	7,49	6,09	ZnAl ₂ S ₄	>1054
FeIn ₂ S ₄	Kubik	Fd3m	10,67				1125
FeGaInS ₄	Triqonal	P3m ₁	3,74		13,16	ZnIn ₂ S ₄	1100
FeGa ₂ Se ₄	Kubik	Fd3m	5,54				1125
FeIn ₂ Se ₄	Heksoqonal		4,18		19,47		890
α- MnGa ₂ S ₄	Monoklin	C2/c	12,14	22,75	6,13	MgGa ₂ S ₄	860
β- MnGa ₂ S ₄	Rombik	Pna2 ₁	12,90	7,45	6,13	ZnAl ₂ S ₄	975
MnGa ₂ S ₄	Tetraqonal	I4	5,46		10,5	CdGa ₂ Se ₄	920
MnIn ₂ S ₄	Kubik	Fd3m	10,71				900
MnGaInS ₄	Triqonal	P3m ₁	3,746		12,16	ZnIn ₂ S ₄	1050
α -MnGa ₂ Se ₄	Tetraqonal	I4	5,65		10,76		<924
β -MnGa ₂ Se ₄	Rombik	Pna2 ₁	12,9	7,45	6,13		>924
MnIn ₂ Se ₄	Heksoqonal		4,19		10,76		925

[8-9] işləri FeS-Ga₂S₃ sistemlərinin kristallik quruluşunun və faza dioqramının tədqiqinə həsr olunmuşdur. Sistemin rentgenoqrafik tədqiqi nəticəsində 3 ayrıca birləşmə və dəyişən tərkibli beş faza aşkara çıxarılmışdır. FeGa₂S₄ 2 polimorf modifikasiyaya malik olur:

1. Qəfəs parametrləri a=3,67 və c=12,07Å olan tetraqonal quruluşlu α-FeGa₂S₄; 2. Qəfəs parametrləri a=12,98 , b=7,49, c=6,09Å, z=4, f. qr. Pna2 olan ZnAl₂S₄ izostrukturlu rombik quruluşlu β-FeGa₂S₄. α-nın β-ya keçmə temperaturu 1054⁰S-dir.

[10-11] işlərində spinel quruluşlu MnIn₂S₄ və tetraqonal quruluşlu MnGa₂S₄-ün 1:1 nisbətindən MnGaInS₄ tipli laylı birləşmə alınmışdır. Müəyyən edilmişdir ki, bu birləşmə fəza qrupu P3m₁, kristallik qəfəs parametrləri a=3,81, c=12,17Å olan ZnIn₂S₄ bir paketli yarım tip quruluşa kristallaşır. Bundan başqa ilk dəfə olaraq FeGaInS₄ laylı birləşməsi və onun monokristalı sintez edilmiş və müəyyən edilmişdir ki, bu birləşmə də ZnIn₂S₄ quruluşlu tipə kristallaşır [12].

Pardo və Flahaut Ga₂Se₃-MnSe sisteminin faza dioqramı və kristal quruluşunu tədqiq edərək müəyyən etmişlər ki, alınmış MnGa₂Se₄ birləşməsi aşağı temperaturda tetraqonal (qəfəs parametrləri a=5,65, c=10,76Å , z=2) və yuxarı temperaturda ortarombik (qəfəs parametrləri a =12,9, b=7,45, c=6,13Å, z=4) quruluşa malik olur [13].

[14] işində MnGa₂Se₄ birləşməsinin kimyəvi köçürmə reaksiyası metodu ilə monokristalı alınmışdır. Köçürücü kimi yod maddəsindən istifadə edilmişdir. FeGa₂Se₄ birləşməsi qəfəs sabiti a=5,54Å olan kub quruluşda kristallaşır [15].

[16] işində MnSe-In₂Se₄, [17-28] işlərində isə FeSe-In₂Se₃ sistemlərinin qarşılıqlı təsiri tədqiq edilmiş və MnIn₂Se₄ və FeIn₂Se₄ birləşmələri alınmışdır. Hər iki birləşmə qəfəs sabitləri a=4,18, c=19,47Å, c/a=4,65 olan heksaqonal quruluşda kristallaşır. AB₂X₄ tipli birləşmələrin kristal quruluşu haqqında məlumat Cədvəlində I verilmişdir.

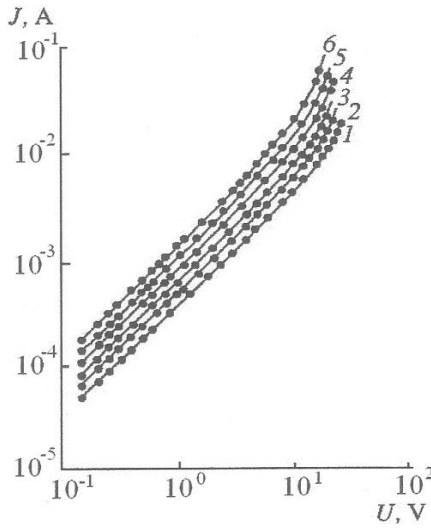
ELEKTROFİZİKİ XASSƏLƏRİ

Statik elektrik sahəsində VAX-ın müxtəlif temperaturlarda tədqiqi nəticəsində AB₂X₄ tipli birləşmələrdən bir qrupunda yəni FeGa₂S₄, FeIn₂Se₄ və MnIn₂Se₄ - də iki oblast aşkara çıxarılmışdır: 1) om qanununa tabe olan oblast (I-U) və 2) cərəyanın eksponensial artma oblastı (I~Uⁿ, n>1) [19-21]. Şəkil 1-də bu birləşmələrdən biri olan FeIn₂Se₄ monokristalı üçün VAX təsvir edilmişdir. Eksponensial artma oblastından müxtəlif temperaturlarda elektrik keçiriciliyinin elektrik sahəsindən (lgσ √F) asılılığının qurulması nəticəsində müəyyən edilmişdir ki, (şəkil 2a) bu asılılıq Frenkelin termoelektron ionlaşma nəzəriyyəsi ilə daha yaxşı uzlaşır:

$$\sigma = \sigma_0 \exp(\beta \sqrt{F}). \quad (1)$$

Burada σ₀- zəif sahənin elektrik keçiriciliyi, β – Frenkel sabitidir. FeGa₂S₄ [19], FeIn₂Se₄ [20], MnIn₂Se₄ [21] birləşmələri üçün lgσ~√F asılılıqlarından β-nın qiyməti hesablanmış və müəyyən edilmişdir ki, β~10³/T asılılığında temperatur azaldıqca β-nın artması müşahidə olunur. FeIn₂Se₄ üçün β~10³/T asılılığı şəkil 2b –də göstərilmişdir. Bu cür dəyişmə Frenkelin termoelektron ionlaşma nəzəriyyəsinə uyğundur və bu nəzəriyyəyə görə β~10³/T düz xətlərin ekstrapolyasiyası koordinat başlanğıcından keçir.

FeGa₂S₄, FeIn₂Se₄ və MnIn₂Se₄ kristalları üçün VAX-dan elektrik sahəsinin (F_{böh}) minimum böhran qiymətini bilməklə ionlaşmış mərkəzlərin konsentrasiyası (N_t) hesablanmışdır və onların olaraq belədir: 9·10¹⁴sm⁻³, 1,1·10¹⁵sm⁻³ və 9,2·10¹³sm⁻³ [19-21].

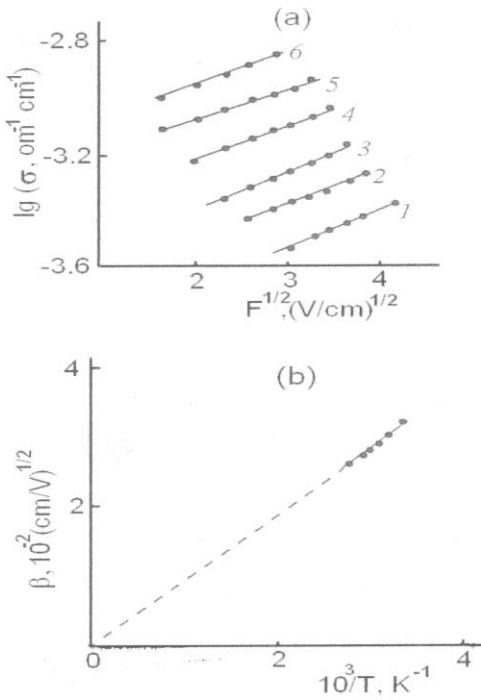


Şəkil 1.

In-FeIn₂Se₄-In strukturunda qaranlıqda müxtəlif temperaturlarda VAX - T, K: 1-300, 2-310, 3-323, 4-339, 5-348, 6-363.

Yuxarıda qeyd etdiyimiz birləşmələrdə və kimyəvi köçürmə metodu ilə alınmış MnGaInS₄ monokristalında [22] VAX-ın tədqiqi nəticəsində tələlərin potensial çuxurunun forması təyin edilmişdir. Bu monokristal üçün həmçinin təcrübi nəticələrə əsaslanaraq dielektrik nüfuzluğu (ε =5,8), tələlərin konsentrasiyası (N_t) və elektronun sərbəst yolunun uzunluğu (λ = 8·10⁻⁷ sm) təyin edilmişdir. Qeyd etmək lazımdır ki, MnGaInS₄ monokristalı üçün ε, N_t, λ Bricmen metodu ilə alınmış monokristalların analoji qiymətləri ilə demək olar ki, üst-üstə düşür [23].

MnIn₂Se₄ birləşməsində cərəyanın zamana görə relaksasiyası müşahidə edilmişdir [21]. Relaksasiyanın müşahidə edilməsinin səbəbi belə izah edilmişdir ki, cərəyanın müəyyən zaman müddətində dəyişməsi kristalın ~10⁻⁴ ÷10⁻⁵ sm nazik oblastında yükün yığılması ilə özünü göstərir və kristalda axan cərəyanın azalmasına gətirib çıxaran əks elektrik hərəkət qüvvəsi bu yük ilə bağlıdır. AB₂X₄ birləşmələrindən olan MnIn₂S₄ [24] monokristalında və FeGa₂Se₄ [25] birləşməsində müxtəlif temperaturlarda VAX-ın tədqiqi nəticəsində 3 oblast müşahidə edilmişdir. Hər ikisi üçün Om qanununa tabe olan oblast (J~U) və kvadratik oblast (J~U²). III oblast olaraq MnIn₂S₄ üçün kubik oblast (J~U³), FeGa₂Se₄ üçün isə cərəyanın kəskin artma oblastı (J~Uⁿ, n>2) olur. Müəyyən edilmişdir ki, kvadratik oblastda cərəyanın keçmə mexanizmi həcmi yüklərlə məhdudlaşmış cərəyanla-monopolyar injeksiya ilə əlaqədardır [24-25]. MnIn₂S₄



monokristalı üçün kubik oblast ikiqat injeksiya ilə bağlıdır. FeGa₂Se₄ üçün kvadratik oblastdan sonra müşahidə edilən kəskin artma oblastı tələlərin ekponensial paylanmasının mövcudluğu ilə fəza yükləri ilə məhdudlaşmış cərəyan halı üçün xarakterikdir [25-26]. Bricmen metodu ilə alınmış β-MnGa₂S₄ [27] monokristalında müxtəlif temperaturlarda VAX-ın tədqiqi nəticəsində iki oblast: 1) om qanununa tabe olan oblast (J~U), 2) J~U^{3/2} oblastı müşahidə edilmişdir. J~U^{3/2} qanunu nöqtəvi kontaktlardan və ya bəzi xüsusi konfigurasiyalı elektrodlardan yükdaşıyıcıların injeksiyası nəticəsində meydana çıxır [26].

Şəkil 2.

a) Müxtəlif temperaturlarda FeIn₂Se₄ monokristalının elektrik keçiriciliyinin F elektrik sahəsi gərginliyindən asılılığı. T,K: 1-300, 2-310, 3-323, 4-339, 5-348,6-363. b) β Frenkel əmsalının temperaturdan asılılığı.

Şəkil 3 - də In-FeIn₂S₄-In strukturunda müxtəlif temperaturlarda VAX ayrıləri təsvir edilmişdir. VAX - da Om qanununa tabe olan oblast (J~U), kəskin artma oblastından (I~Uⁿ, n>1) sonra mənfi diferensial müqavimət oblastı (S-tip) müşahidə edilmişdir [28]. Bu çevirmə effektini aydınlaşdırmaq üçün mənfi diferensial müqavimətin baş vermə gərginliyinin, yəni U_{hüd} -hüddud gərginliyinin temperatur (T) və nümunənin qalınlığından (L) asılılığı tədqiq edilmiş və $\sqrt{F_{hüd}} \sim T, F \sim \frac{1}{\sqrt{L}}$ qanuna uyğunluğu müşahidə edilmişdir. Bu qanuna uyğunluqların ödənilməsi onu göstərir ki, çevirmə hadisəsinin yaranması Coul istilik effekti ilə əlaqədardır.

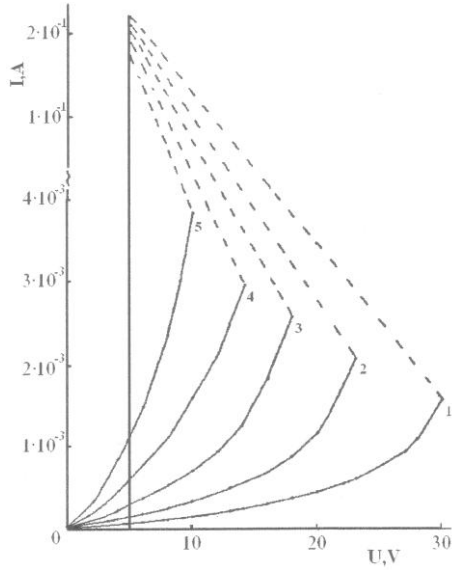
[29-32] işlərində MnGa₂S₄, MnIn₂S₄ və MnGaInS₄ monokristallarının VAX – ina və elektrik keçiriciliyinə işıqlanmanın təsiri tədqiq edilmişdir. MnGa₂S₄ monokristalında I_{iş}-ışıqlanma cərə-yanının qiyməti I_q-qaranlıq cərəyanının qiymətindən 10 dəfə, MnIn₂S₄ və MnGaInS₄ monokris-talları üçün isə I_{iş} cərəyanı I_q-cərəyanından 10⁴-10⁵ dəfə böyükdür. Bu monokristallarda elektrik sahəsinin və işıqlanmanın birgə təsiri elektronların keçirici zonada,deşiklərin isə valent zonasında yaranma ehtimalını artırır və bu da nümunələrdə keçiriciliyin artmasına gətirib çıxarır.

Həmçinin AB₂X₄ tipli birləşmələrdə sabit gərginlikdə elektrik keçiriciliyinin temperaturdan asılılığı tədqiq edilmiş və lokal səviyyələrin aktivləşmə enerjiləri hesablanmışdır. Enerji qiymətləri Cədvəl II də göstərilmişdir.

[33] işində kimyəvi köçürmə metodu ilə alınmış MnGa₂S₄ və MnIn₂S₄ və Bricmen metodu ilə sintez edilmiş MnGaInS₄ monokristallarının müxtəlif elektrik sahə gərginliklərində elektrik keçiriciliyinin temperaturdan asılılığı tədqiq edilmişdir. Müəyyən edilmişdir ki, sahə artdıqca aktivləşmə enerjilərinin qiyməti azalır. Xarici sahə gərginliyinin artması ilə aktivləşmə enerjisinin azalması belə ifadə olunur:

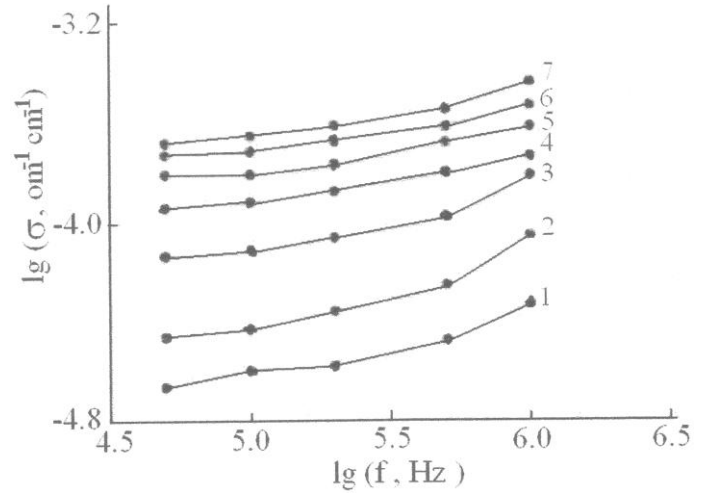
$$\Delta E(F) = \Delta E_0 - 2e \sqrt{\frac{eF}{\epsilon}}, \quad (2)$$

$\Delta E \sim \sqrt{F}$ asılılığından ΔE_0 zəif sahənin aktivasiya enerjisi hesablanmışdır. Qüvvətli elektrik sahəsinin elektrik keçiriciliyinə təsiri belə ifadə olunur ki, lokal səviyyə ilə bağlı elektron keçirici zonaya nəzərən potensial çuxurda yerləşir və qüvvətli elektrik sahəsinin təsiri ilə potensial çuxurun hündürlüyü (2) ifadəsindən təyin olunan kəmiyyət qədər azalır.



Şəkil 3.

In-FeIn₂S₄-In strukturunda qaranlıqda müxtəlif temperaturlarda VAX- T, K: 1-389,5, 2-311, 3-335, 4-370, 5-406.



Şəkil 4.

Müxtəlif temperaturlarda FeGaInS₄ monokristalının elektrik keçiriciliyinin elektrik sahə tezliyindən asılılığı. T,K: 1-296, 2-311, 3-326, 4-341, 5-356, 6-366, 7-376.

AB₂X₄ tipli birləşmələrdə dəyişən elektrik sahəsində elektrik keçiriciliyinin tezlik (f) və temperaturdan asılılığı tədqiq edilmişdir [34-37]. Demək olar ki, müxtəlif temperaturlarda tədqiq olunan birləşmələrin hamısında $\sigma(f)$ asılılığında müəyyən tezlik intervalında tezlik artdıqca elektrik keçiriciliyinin artması müşahidə olunur. $\sigma(f)$ asılılığı FeGaInS₄ monokristalı üçün şəkil 4 –də təsvir edilmişdir [36]. Tezlik artdıqca elektrik keçiriciliyinin artması onunla izah olunur ki, tətbiq olunan gərginlikdə tezlik yüksəldikcə yükdaşıyıcılar dördü bir period ərzində lokallaşma yerinə çata bilmir və elektrik sahəsi fasiləsiz olaraq dəyişdikcə daha çox elektrik keçiriciliyi yaradır [34]. MnGa₂S₄ monokristalında müxtəlif temperaturlarda $\sigma(f)$ asılılığında 435÷500kHz tezliklərdə rezonans hadisəsi baş verir və bu hadisə çəpər modelinin köməyi ilə izah edilir [37-38].

Cədvəl 2

Kristal	Sabit elektrik sahəsi			Dəyişən elektrik sahəsi			
	$\sigma, \text{om}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$	E_t, eV	N_t, cm^{-3}	E_t, eV 10^4Hz	ϵ	$\text{tg}\delta$	E_g, eV
β - FeGa ₂ S ₄	$10^{-5} \div 10^{-4}$	0,29	$10^{14} \div 10^{15}$	0,26	240÷2000	0,4÷12	1,2
FeIn ₂ S ₄	$10^{-4} \div 10^{-3}$	0,26	$10^{14} \div 10^{15}$	0,44	300-2800	0,5÷20	1,1
FeGaInS ₄	$10^{-4} \div 10^{-3}$	0,14;0,25	$10^{14} \div 10^{15}$	0,27	200÷1000	0,7÷30	
FeGa ₂ Se ₄	$10^{-7} \div 10^{-6}$	0,23;0,39	$10^{14} \div 10^{15}$	0,28;0,46	30÷90	0,05÷3	1,5
FeIn ₂ Se ₄	$10^{-4} \div 10^{-3}$	0,28;0,45	$10^{15} \div 10^{16}$	0,23;0,28	180÷1500	3÷30	1,15
β - MnGa ₂ S ₄	$10^{-9} \div 10^{-8}$	0,28	$10^{10} \div 10^{11}$	0,16	65÷130	0,01÷0,8	1,7
MnGa ₂ S ₄	$10^{-16} \div 10^{-15}$	0,44;1,04	$10^{15} \div 10^{16}$				2,97
MnIn ₂ S ₄	$10^{-13} \div 10^{-12}$	0,38;0,45	$10^{15} \div 10^{16}$				1,95
MnGaInS ₄	$10^{-13} \div 10^{-12}$	0,46;0,67	$10^{11} \div 10^{12}$				2,44
MnIn ₂ Se ₄	$10^{-4} \div 10^{-3}$	0,21;0,27	$10^{13} \div 10^{14}$	0,10;0,35	80÷800	0,2÷20	1,32

FeIn₂S₄ birləşməsi üçün də R (f) asılılığında $(2,5 \div 5) \cdot 10^5$ Hz tezlik intervalında rezonans piki müşahidə edilmişdir [39]. FeGa₂Se₄ birləşməsində $\sigma(f)$ asılılığı çox

mürəkkəb xarakter daşıyır və σ – nın qiyməti tezlik artdıqca bir neçə tərtib artır [40]. Ehtimal olunur ki, σ (f)-in belə olması kristalın quruluşunun xüsusiyyətləri ilə bağlıdır.

AB_2X_4 tipli birləşmələrin dəyişən sahədə tezliyin müxtəlif qiymətlərində elektrik keçiriciliyin temperaturdan asılılığı tədqiq edilmişdir [34-37]. Bu birləşmələrdə tədqiq olunan tezliklərdə $lg\sigma \sim 10^3/T$ asılılıqlarından (ΔE) aktivləşmə enerjiləri təyin olunmuş və müəyyən edilmişdir ki, aktivləşmə enerjisinin qiyməti tezlikdən asılı olaraq dəyişir. Bu asılılığı belə izah etmək olar ki, kristalda mövcud olan bağlayıcı layların relaksasiya müddəti (τ) tezlikdən müxtəlif şəkildə asılı ola bilər [38]. Əgər bu asılılıq qüvvətlidirsə onda keçiriciliyin aktivləşmə enerjisi tezlikdən asılı olur:

$$\tau = \frac{1}{2f} \exp(\Delta E / kT). \quad (3)$$

Arrenius [41] qanununa görə relaksasiya müddətini təyin etsək, görürük ki, tezlik artdıqca relaksasiya müddəti azalır, yəni ΔE və f relaksasiya müddətindən asılı olur. Bu zaman aktivləşmə enerjisinin qiyməti tezlikdən asılı olur.

Tədqiq olunan temperatur oblastlarında bu birləşmələrdə elektrik keçiriciliyi aktivləşmə mexanizmi ilə bağlıdır.

AB_2X_4 tipli birləşmələrin dielektrik nüfuzluğunun həqiqi hissəsinin (ε) dəyişən elektrik cərəyanının tezliyindən və temperaturundan asılılığı tədqiq edilmişdir. Bu birləşmələrdə tezlikdən ($25 \div 10^6$ Hz) və temperaturdan ($290 \div 400$ K) asılı olaraq ε -nin qiyməti $30 \div 2800$ oblastında dəyişir və tezlik artdıqca ε -nin artması, azalması və bəzi hallarda rezonans hadisəsi baş verir [34-36,40, 42-43].

AB_2X_4 tipli birləşmələrin müxtəlif tezlik və temperaturlarda dielektrik itkisi ($tg\delta$) tədqiq olunmuşdur [39-40,42-43]. Tədqiq olunan birləşmələrin hamısında müxtəlif temperaturlarda itki bucağının tangensi tezliklə tərs mütənəsb ($tg\delta \sim 1/\omega$) asılılığı ödənilir. Müxtəlif tezliklərdə isə temperatur yüksəldikcə $tg\delta$ əsasən eksponensial qanun üzrə artır. Bu onunla izah olunur ki, temperatur artdıqca elektrik yükdaşıyıcılarının konsentrasiyası artır və bu da elektrik keçiriciliyinin artmasına səbəb olur. Elektrik keçiriciliyinin yüksəlməsi ilə əlaqədar olaraq $tg\delta$ -nın da qiyməti artır.

Tədqiq olunan birləşmələrdə dəyişən elektrik sahəsində E_a , ε , $tg\delta$ – nın qiymətləri Cədvəl II də verilmişdir.

$MnGa_2S_4$, $MnIn_2S_4$, $MnGaInS_4$, $FeGa_2Se_4$ və $FeIn_2Se_4$ kristallarında müxtəlif polyarlaşma gərginliklərində və polyarlaşma temperaturlarında termostimullaşdırılmış depolyarizasiya (TSD) cərəyanları tədqiq edilmişdir [44-47]. TSD cərəyan maksimumlarının formalarının analizi göstərir ki, tədqiq olunan kristallar üçün müşahidə edilən bütün maksimumlarda

$$\delta \geq e^{-1} \left(1 + \frac{2kT_M}{E_t}\right) \quad (4)$$

şərti ödənilir. Burada $\delta = \frac{T_2 - T_M}{T_2 - T_1}$, T_M -TSD cərəyan maksimumlarına uyğun temperatur,

T_1 və T_2 -TSD cərəyanının maksimumlarının intensivliklərinin yarısına uyğun aşağı və yuxarı temperaturlardır. (4) şərtinin ödənilməsi bu kristallarda sürətli yapışma səviyyələrinin mövcudluğunu göstərir. Bu kristallarda yapışma səviyyələrinin enerji dərinlikləri (E_t), konsentrasiyaları (N_t) və tutulma kəsikləri (S_t) təyin edilmişdir [44-47].

OPTİK XASSƏLƏRİ

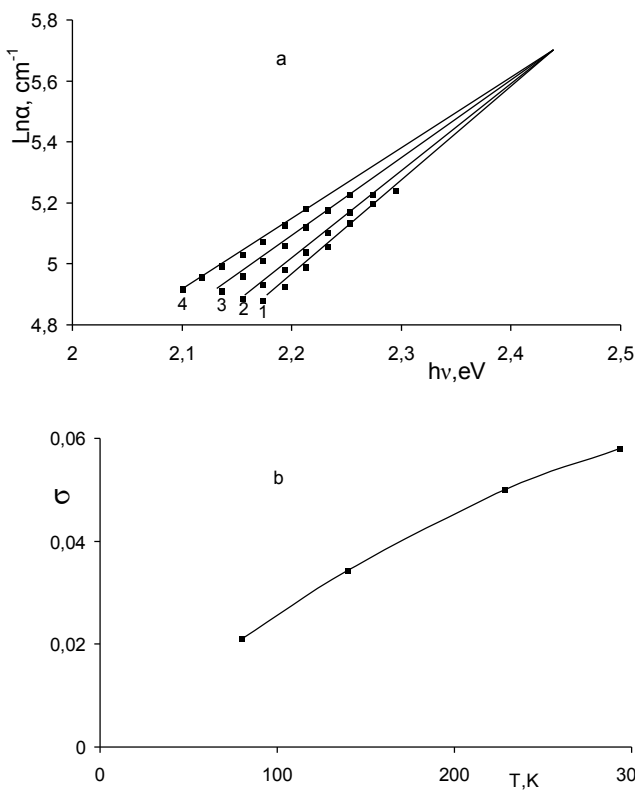
[48-52] işlərində $MnGa_2S_4$, $MnIn_2S_4$, $MnGaInS_4$ və $MnGa_2Se_4$ monokristalları üçün müxtəlif temperaturlarda ($77 \div 350$ K) udulma əmsalının nümunə üzərinə düşən fotonun enerjisindən asılılığı tədqiq edilmişdir. Bu monokristallar üçün tədqiq olunan məxsusi spektr oblastında udulma əmsalı (α) fotonun enerjisinin ($h\nu$) artması ilə

eksponensial qanun üzrə artır və temperaturun azalması ilə α (hv) əyriləri qısa dalğalı oblasta doğru sürüşür.

Müəyyən edilmişdir ki, tədqiq olunan bütün monokristalların qadağan olunmuş zonaları düz icazə verilmiş keçidlə təyin olunur:

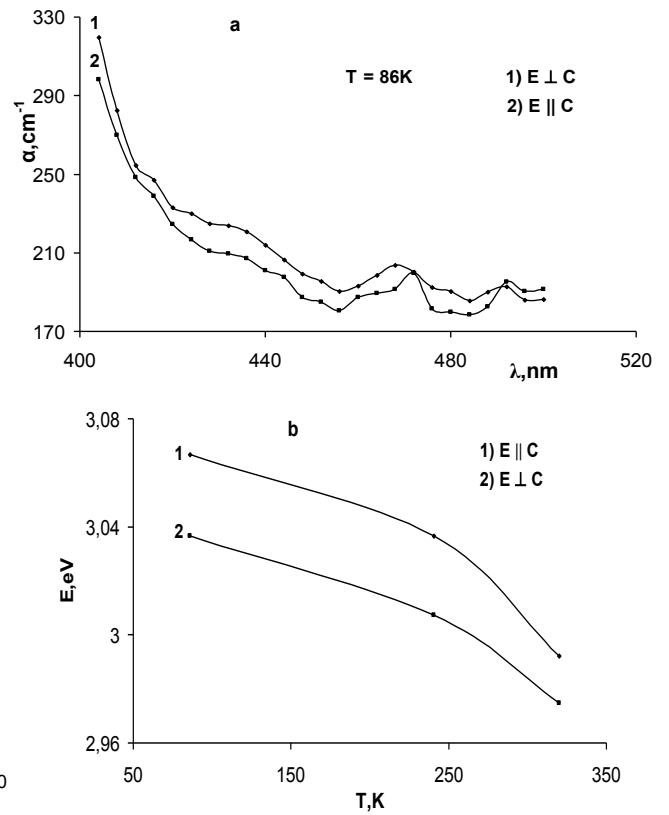
$$\alpha = A(h\nu - E_g)^{\frac{1}{2}}, \quad h\nu > E_g. \quad (5)$$

Bu monokristallarda udulma əmsalının düşən fotonun enerjisindən asılılığı $\alpha^2 \sim h\nu$ koordinatında özünü düz xətt kimi göstərir. Qadağan olunmuş zonanın eni $\alpha^2 = f(h\nu)$ düz xətlərin $\alpha = 0$ qiymətinə ekstrapolyasiyalarından təyin edilmişdir [49-52]. MnGa₂S₄, MnIn₂S₄, MnGaInS₄ və MnGa₂Se₄ monokristalları üçün E_g-nin temperaturdan asılı olaraq dəyişməsi uyğun olaraq dE/dT=-2,8·10⁻⁴eV/K, -4,43·10⁻⁴eV/K, -5,2·10⁻⁴eV/K və -6,88·10⁻⁴eV/K olur. Müəyyən edilmişdir ki, bu monokristallarda E_g-nin temperaturdan asılı olaraq xətti qanun üzrə dəyişməsinə və bu dəyişmənin “mənfi” qiymət aldığını nəzərə alıqda məxsusi udulma kənarının temperaturdan asılı olaraq dəyişməsinə cavabdeh mexanizm elektron-fonon qarşılıqlı təsiridir.



Şəkil 5.

a) MnGa₂Se₄ monokristalı üçün müxtəlif temperaturlarda udulma əmsalının düşən fotonun enerjisindən asılılığı. T, K: 1-80; 2-140; 3-228,5; 4-293. b) σ Urbax parametrinin temperaturdan asılılığı.



Şəkil 6.

a) MnGa₂S₄ monokristalı üçün 86K temperaturda udulma əmsalının polyarizə olunmuş düşən işığın dalğa uzunluğundan asılılığı. b) MnGa₂S₄ monokristalı üçün udulmanın $\alpha=280\text{sm}^{-1}$ qiymətində E || C və E ⊥ C üçün düşən işığın enerjisinin temperaturdan asılılığı.

MnGa₂S₄, MnIn₂S₄ [50] və MnGa₂Se₄ monokristallarında optik udulmanın uzundalğalı kənarı Urbax qaydasına tabe olur:

$$\alpha = \alpha_0 \exp \left(\frac{\sigma(T)}{kT} (h\nu - E_0) \right). \quad (6)$$

Burada α –optik udulma əmsalı, $h\nu$ - maddə üzərinə düşən fotonun enerjisi, σ -Urbax parametri, α_0 və E_0 -yarımkeçirici materialların sabitləridir.

Şəkil 5a – dan görünür ki, və MnGa_2Se_4 monokristalında $\ln(h\nu, T)$ düz xətlərinin uzanması bir nöqtəyə ($E_o, \ln\alpha_o$) gedib çıxır. σ Urbax parametri isə

$$\sigma(T) = \frac{kT \ln \frac{\alpha}{\alpha_o}}{(h\nu - E_o)} \quad (7)$$

düsturundan hesablanmışdır. Urbax parametrinin $\sigma(T)$ asılılığı MnGa_2Se_4 monokristalı üçün şəkil 5b - də göstərilmişdir. Şəkildən görünür ki, σ temperaturdan asılı olaraq yavaş-yavaş azalır və $T=0$ -a ekstrapolyasiya olunur.

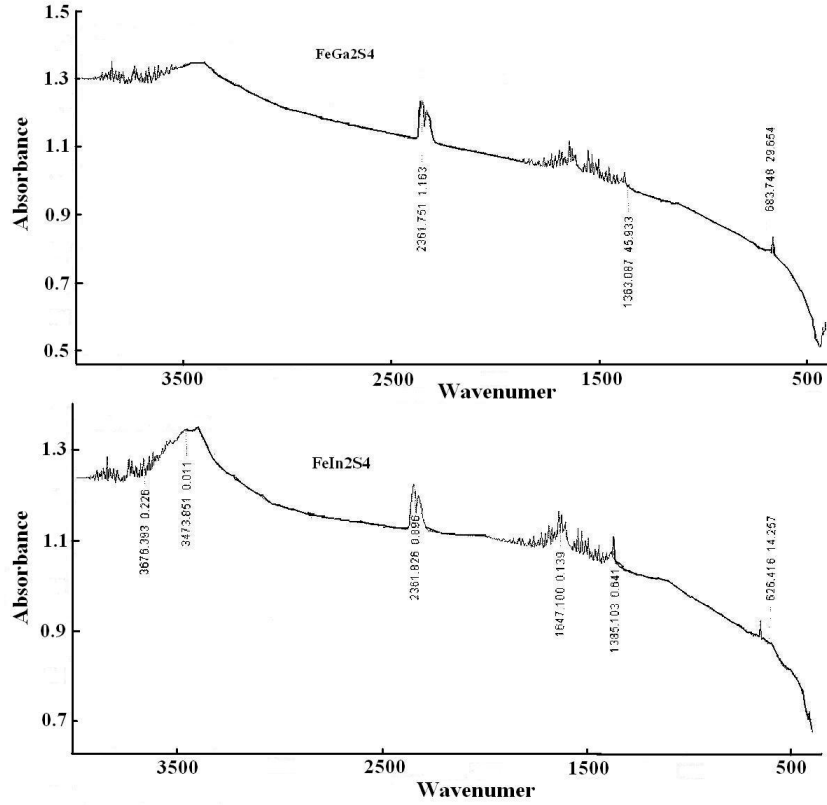
Tədqiq olunan MnGa_2S_4 , MnIn_2S_4 və MnGa_2Se_4 monokristallarının kristal quruluşlarının xüsusiyyətləri ondan ibarətdir ki, qəfəsin məxsusi defektləri yüksək konsentrasiyaya malik olur. Bu defektlərin quruluş vokansiyasından ($\sim 10^{18} \text{sm}^{-3}$) və antiquruluş defektindən (Manqan atomunun qallium(indium)atomunun vəziyyətində $\text{Mn}_{\text{Ga,In}}$ və qallium (indium) atomunun manqan atomunun vəziyyətində $\text{Ca(In)}_{\text{Mn}}$ olması) ibarət olması ehtimal olunur.

MnGa_2S_4 və MnGa_2Se_4 monokristallarında udulma əmsalının fonunda 2,49eV və 2,64eV (MnGa_2S_4) və 2,43eV (MnGa_2Se_4) pikləri müşahidə edilmişdir. Müəyyən edilmişdir ki, bu piklər iki valentli Mn^{2+} ionunun daxili mərkəzi keçiddəki udulması ilə əlaqədardır [48,51-52].

MnGaInS_4 laylı monokristallarında nazik müstəvi paralel lövhələrdən buraxılma spektrində interferensiya hadisəsi müşahidə edilmişdir [49]. Bu monokristallarda müxtəlif temperaturlarda sındırma əmsalının (n) işığın dalğa uzunluğundan asılılığı hesablanmışdır. Alınan nəticə elektrik ölçmələrindən alınan $\sqrt{\epsilon} = n$ ilə demək olar ki, üst-üstə düşür [23].

Həmçinin MnGa_2S_4 , MnIn_2S_4 və MnGaInS_4 monokristallarının müxtəlif temperaturlarda (77÷320K) polarizə edilmiş işıq altında optik udulmanın düşən fotonun enerjisindən (dalğa uzunluğunun) asılılığı tədqiq edilmişdir. Şəkil 6a-da 86K temperaturda MnGa_2S_4 monokristalı üçün udulma əmsalının polarizə olunmuş düşən işığın dalğa uzunluğundan asılılıq qrafiki təsvir olunmuşdur. Şəkildən görünür ki, $E \perp C$ polarlaşma halında udulma əmsalı $E \parallel C$ polarlaşmasından alınan udulmadan böyükdür. Bu anizotropluq belə izah edilə bilər: Məlumdur ki, AB_2X_4 tipli birləşmələr, həmçinin MnGa_2S_4 iki tip kationa (Mn və Ga) malikdir. Kation qəfəsaltısında iki tip atomun mövcud olması ona gətirib çıxarır ki, kristal qəfəsdə kation qəfəsaltısında psevdopotensiallar fərqi mövcud olur və bu da iki müxtəlif fəza qrupuna uyğun valent zonasının zirvəsinin parçalanmasına gətirib çıxarır. Bu fəza qruplarından biri $E \parallel C$, digəri isə $E \perp C$ polarlaşması zamanı optik keçidə icazəlidir [53]. Şəkil 6b-də udulmanın müəyyən sabit qiymətində ($\alpha=280 \text{sm}^{-1}$) $E \parallel C$ və $E \perp C$ üçün enerjinin temperaturdan asılılıq qrafiki verilmişdir. Əyrilərin xarakteri bir-birinə bənzərsə də $E_{\parallel} > E_{\perp}$ olur. Bu da MnGa_2S_4 monokristalında polarizə olunmuş işığın udulması zamanı anizotropluğun meydana çıxdığını göstərir.

AB_2X_4 tipli birləşmələrdə infraqırmızı oblastda udulma əmsalının düşən işığın dalğa uzunluğundan (2,4÷24 mkm) asılılığı tədqiq edilmişdir. Nümunələrə KB_2 qatılaraq presləmə yolu ilə tabletkalar formasında hazırlanmışdır. Şəkil 7-də FeGa_2S_4 və FeIn_2S_4 birləşmələri üçün infraqırmızı oblastda udulma spektrləri təsvir edilmişdir. Udulma spektrlərindəki piklərin enerji vəziyyətlərinin təyini nəticəsində 0,08eV; 0,20eV; 0,29eV; 0,42eV qiymətləri tapılmışdır. 0,20eV; 0,29eV; 0,42eV qiymətləri elektrik ölçmələrindən təyin edilmiş aşqar səviylərinin enerji qiymətləri ilə demək olar ki, üst-üstə düşür [19,28].

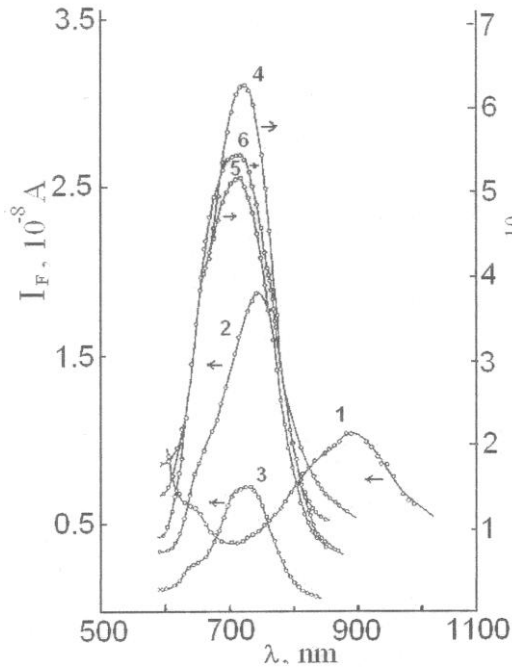


Şəkil 7.

FeGa₂S₄ və FeIn₂S₄ birləşmələri üçün infraqırmızı oblastda udulma spektrləri.

MnIn₂S₄ və MnGaInS₄ monokristallarında müxtəlif temperaturlarda fotokeçiriciliyin spektral paylanması uyğun olaraq [54] və [55] işlərində tədqiq edilmişdir. MnIn₂S₄ monokristalında fotokeçiricilik əyrilərinin spektri 0,36÷0,9 mkm dalğa uzunluğu oblastını əhatə edir və müxtəlif enerjilərə malik 3 ayrıca maksimumlardan ibarət olur. 2,69eV enerjili I maksimum temperatur artdıqca enerji vəziyyətini dəyişmir və bu pik manqan ionunun daxili mərkəzi keçidi Mn²⁺(⁶A₁ → ⁴A₁) ilə əlaqədardır. Temperatur artdıqca enerji vəziyyətini dəyişən və otaq temperaturunda fotokeçiricilik maksimumu 2,14eV-a uyğun olan II maksimum oblastı məxsusi fotokeçiriciliklə əlaqədardır. [55] işində müşahidə olunmuş III uzundalğalı maksimumu daha yaxşı araşdırmaq üçün həmin oblastdan daha geniş oblastda (0,5÷1,1mkm) müxtəlif temperaturlarda fotokeçiriciliyin spektral paylanması əyriləri tədqiq edilmişdir (şəkil 8). Şəkildə iki oblast müşahidə olunur. 80K temperaturda 0,88 mkm dalğa uzunluğuna uyğun maksimum (1 əyrisi), yuxarı temperaturlarda müşahidə edilmir. II uzundalğalı maksimumlar temperatur yüksəldikcə qısa dalğalı oblasta doğru sürüşür. Bu oblastlarda fotokeçiricilik aşqar xarakteri daşıyır. Məlumdur ki, AB₂X₄ tipli birləşmələrdə lokal səviyyələrin əmələ gəlməsi üçün vacib faktorlardan biri nümunələrin tərkibinin stexiometriyadan kənara çıxmasıdır. Bu, nümunənin tərkibində A komponentlərin artıqlığı və ya çatışmamazlığı ilə əlaqədar ola bilər. 0,68÷0,8 mkm dalğa uzunluğuna uyğun oblast, kristalda Mn-nin çatışmamazlığı ilə bağlıdır [56]. Həmçinin 0,88 mkm dalğa uzunluğuna uyğun oblast nümunə yaranarkən Mn-nin artıqlığı və ya çatışmamazlığı ilə əlaqədar olması ehtimal olunur [57]. Qadağan olunmuş zonanın eni ilə fotokeçiricilikdə müşahidə edilən aşqar keçiriciliklərin enerji səviyyələri fərqləri 0,4±0,02eV və 0,6±0,02eV-a bərabərdir. Qeyd etmək lazımdır ki, bu enerji səviyyələri σ(T) və TSD cərəyanları təcrübələrindən alınan nəticələrdə də aşkara çıxarılmışdır [24,45,47].

[55] işində $MnGaInS_4$ monokristalında müxtəlif temperaturlarda fotokeçiriciliyin spektral paylanmasında məxsusi və aşgar oblastlar müşahidə edilmişdir. [58] işində isə



otaq temperaturunda $MnGaInS_4$ monokristalı üçün polarizəlanmış işıq altında fotokeçiriciliyin spektral paylanması tədqiq edilmişdir. Müəyyən edilmişdir ki, məxsusi fotokeçiricilikdə $E \parallel C$ və $E \perp C$ halları zamanı maksimumlar arasındakı dalğa uzunluqları fərqi $\Delta \lambda = 0,013 \mu m$ -dir. Dalğa uzunluğundan enerjiyə keçdikcə $\Delta E = 0,05 eV$ -a bərabər olur. Bu E_g -nin 2,3% -ni təşkil edir. $MnGaInS_4$ monokristalının fotokeçiriciliyinin spektral əyrilərinin polarlaşma dalğalarının elektrik vektorları ilə kristalın oxu arasındakı bucaq asılılığından istifadə edərək və lazım olan dalğa uzunluğunda düşən işığın polarlaşma bucağı üçün həssas indikator almaq olar [58].

Şəkil 8.

Müxtəlif temperaturlarda $MnIn_2S_4$ monokristalının fotokeçiriciliyinin spektral paylanması. T, K: 1-80, 2-137,5, 3-175, 4-225,5, 5-257, 6-286.

$MnIn_2S_4$ və $MnGaInS_4$ monokristallarında işığın müxtəlif intensivliklərində fotocərəyanın temperaturdan asılılığının və termostimullaşmış keçiriciliyin tədqiqi nəticəsində yapışma və rekombinasiya səviyyələrinin enerji dərinliyi, tutulma kəsikləri və konsentrasiyaları təyin edilmiş və tələlərin paylanma mexanizmi aydınlaşdırılmışdır [45-46,54-55].

NƏTİCƏ

Məqalədə AB_2X_4 tipli birləşmələrin alınması və kristal quruluşu haqqındakı işlərin icmalı verilmiş, bu birləşmələrdən olan $FeGa_2S_4$, $FeIn_2S_4$, $FeGaInS_4$, $FeGa_2Se_4$, $FeIn_2Se_4$, $MnGa_2S_4$, $MnIn_2S_4$, $MnGaInS_4$, $MnIn_2Se_4$, $MnGa_2Se_4$ -ün elektrofiziki və optik xassələrinin tədqiqinin ümumiləşdirilmiş nəticələri verilmişdir.

Sabit elektrik sahəsində VAX-ın tədqiqi nəticəsində müəyyən edilmişdir ki, VAX-ın qeyri-xətti oblastında cərəyanın keçmə mexanizmi $FeGa_2Se_4$, $MnGa_2S_4$ və $MnIn_2S_4$ birləşmələrində yükdaşıyıcıların indium kontaktından injeksiya ilə, $FeGa_2S_4$, $FeIn_2Se_4$ və $MnIn_2Se_4$ birləşmələrində isə Frenkelin termoelektron ionizasiyası ilə əlaqədardır. $FeIn_2S_4$ kristalında çevirmə effekti aşkara çıxarılmış, $MnIn_2Se_4$ -də isə cərəyanın zamana görə relaksasiyası müşahidə edilmişdir.

Bu birləşmələrdə sabit gərginliklərdə $\sigma(T)$ tədqiq edilmiş və lokal səviyyələrinin aktivləşmə enerjisi hesablanmışdır. Müəyyən edilmişdir ki, $MnIn_2S_4$, $MnGa_2S_4$ və $MnGaInS_4$ monokristallarında xarici elektrik sahəsinin artması ilə aktivləşmə enerjisinin azalması, sahənin artması ilə elektronun yerləşdiyi potensial çuxurun hündürlüyünün azalması ilə əlaqədardır. Bu birləşmələrdə tədqiq olunan temperatur oblastında elektrik keçiriciliyi keçiriciliyin aktivləşmə mexanizmi ilə bağlıdır. Aktivləşmə enerjisinin qiyməti elektrik sahəsinin tezliyindən asılı olaraq dəyişir. $MnGa_2S_4$ və $FeIn_2S_4$ -də müxtəlif temperaturlarda $\sigma(f)$ asılılığında müəyyən tezliklərdə rezonans hadisəsi baş verir və bu hadisə çəpər modelinin köməyi ilə izah edilir.

Tədqiq olunan birləşmələrin dielektrik nüfuzluğunun həqiqi hissəsi (ϵ) tezlik ($25 \div 10^6 \text{ Hz}$) və temperaturdan ($290 \div 400 \text{ K}$) asılı olaraq $30 \div 2800$ oblastında dəyişir. Temperatur yüksəldikcə ϵ -nin qiymətinin artması yükdaşıyıcıların konsentrasiyasının artması ilə əlaqədardır. Bu birləşmələrdə müxtəlif tezliklərdə temperatur artdıqca

$\text{tg } \delta$ əsasən eksponensial qanun üzrə artır. Tədqiq olunan tezlik intervalında $\text{tg } \delta \sim 1/\omega$ tərs mütənasib asılılığı müşahidə edilir.

MnGa₂S₄, MnIn₂S₄, MnGaInS₄, FeGa₂Se₄ və FeIn₂Se₄ kristallarında TSD tədqiqi nəticəsində sürətli yarışma səviyyələrinin mövcudluğu aşkara çıxarılmışdır. Səviyyələrin enerji dərinliyi, tələlərin konsentrasiyası və tutulma kəsikləri təyin edilmişdir.

MnGa₂S₄, MnIn₂S₄, MnGaInS₄ və MnGa₂Se₄ monokristallarında optik udulma təcrübələri aparılmış və müəyyən edilmişdir ki, qadağan olunmuş zonanın eninin temperaturdan asılı olaraq dəyişməsinə cavabdeh olan mexanizm elektron-fonon qarşılıqlı təsiridir. MnGa₂S₄, MnIn₂S₄ və MnGa₂Se₄ monokristallarında optik udulmanın uzundalğalı kənarı Urbax qaydasına tabe olur. Bu monokristallarda yüksək konsentrasiyaya malik olan defektlərin quruluş vakansiyası və ya antiquruluş defektdən ibarət olması ehtimal olunur. MnGa₂S₄, MnIn₂S₄ və MnGaInS₄ monokristallarının müxtəlif temperaturlarda polyarizə edilmiş işıq altında optik udulmanın düşən fotonun enerjisindən asılılığının tədqiqi nəticəsində anizotrop luq müşahidə edilmişdir.

MnIn₂S₄ və MnGaInS₄ monokristallarında müxtəlif temperaturlarda fotokeçiriciliyin spektral paylanmasında məxsusi və aşkar oblastlar aşkara çıxarılmışdır.

1. W.Shfecn, A.Wold, *J.Solid State chemist.*, **4** (1972) 286.
2. T.Kanomata, H.İdo, T.Kaneko, *J.Phys. Sos. Japan*, **34** (1973) 554.
3. P.G. Rustamov, B.K.Babayeva, M.R.Allazo, *Jurnal neorqan. ximii*, **24** (1979) 2208.
4. M.Yokota, Y.Syonoand, S.Minomura, *J. Solid state Chemistry* **3** (1971) 520.
5. P.Viswanadham and J.Edwards, *Material res.Bul.*, **8** (1973) 1079.
6. M.Pardo, P.Fourcray and J.Flahaut, *Material res .Bull.*, **10** (1975) 665.
7. M.Pardo, M.Yulien- Pourol, *C.R. Acad. sci.*, **277** (1973) 1021.
8. L.Dogguuy-Smiri, M.Pardo, N.Dun, *C.R. Acad. sci.*, **287** (1978) 415.
9. П.Г.Рустамов, *Исследование системы Ga₂S₃-FS. Исследование в области неорганической и физической химии. Баку*, (1981) 61.
10. H.Naeuseler, *Naturwissenschaften*, **73** (1986) 264.
11. H.Naeusler, H.Stork, *J.Mater.Chemistry*, **2** 1 (1992) 45.
12. H.H.Нифтиев, *ФТП*, **38** (2004) 522.
13. M.Pardo, J.Flahaut, *Mater. Res. Bull.*, **13** (1978) 1231.
14. R.Remet, C.Schienker, *J. physiquc*, **43** (1982) 1759.
15. M.P.Аллазов, П.К. Бабаева, П.Г. Рустамов, *Неорган. Матер.*, **15** (1979) 1177.
16. П.К. Бабаева, М.Р.Аллазов, *В кн. Исследование в области неорганической и физической химии. Баку* (1977) 70.
17. П.К.Бабаева, П.Г.Рустамов, *В кн. Исследование в области неорганической и физической химии. Баку* (1977) 264.
18. М.Р.Аллазов, П.К.Бабаева, П.Г.Рустамов, *Всес. конф. по химии, физике и техническому примен. халкогенидов*, (1980) 17.
19. N.N.Niftiyev, M.A.Alidzhanov, O.B.Taqiev, M.B.Muradov, F.M.Mamedov, *Ukr.J.Phys.*, **49** (2004) 579.
20. H.H.Нифтиев, М.А.Алиджанов, О.Б.Тагиев, М.Б.Мурадов, *ФТП*, **37** (2003)173
21. H.H.Нифтиев, М.А.Алиджанов, О.Б.Тагиев, Ф.М.Мамедов, М.Б.Мурадов, *ФТП*, **38** (2004) 550.
22. H.H.Нифтиев, О.Б.Тагиев, *ФТП*, **41** (2007)17.
23. H.H.Нифтиев, А.Г.Рустамов, О.Б.Тагиев, *ФТП*, **27** (1993) 386.
24. H.H.Нифтиев, *ФТП*, **38** (2004) 166.
25. H.H.Нифтиев, *Украин. физ. журн.*, **48** (2003) 585.
26. М.Ламперт, П. Марк, *Инжекционные токи в твёрдых телах, М.Мир* (1973) 473.
27. N.N.Niftiyev, O.B.Taqiev, M.B.Muradov, F.M.Məmmədov, *Fizika*, **12** (2006) 14.
28. H.H.Нифтиев, М.А.Алиджанов, О.Б.Тагиев, М.Б.Мурадов, *Украин. физ. журн.*, **47** (2002) 1054.

29. Н.Н.Нифтиев, О.Б.Тагиев, *Письма в ЖТФ*, **29** (2003) 49.
30. Н.Н.Нифтиев, О.Б.Тагиев, *ФТП*, **38** (2004) 164.
31. Н.Н.Нифтиев, О.Б.Тагиев, *Письма в ЖТФ*, **31** (2005) 72.
32. Н.Н.Нифтиев, О.Б.Тагиев, *Azerbaijan National Transaction of Azerbaijan Academy of Sciences, Series of Physical-mathematical and Technical sciences, Physics and Astronomy*, **XXVI** №2 (2006) 150.
33. Н.Н.Нифтиев, О.Б.Тагиев, *ФТП*, **43** (2009) 1172.
34. Н.Н.Нифтиев, О.Б.Тагиев, М.Б.Мурадов, *ФТП*, **42** (2008) 268.
35. N.N.Niftiyev, O.B.Taqiev, M.B.Muradov, F.M.Məmmədov, T.Ş.Həşimova, *Fizika*, **14** (2008) 31.
36. Н.Н.Нифтиев, О.Б.Тагиев, М.Б.Мурадов, *ФТП*, **43** (2009) 1447.
37. Н.Н.Нифтиев, О.Б.Тагиев, М.Б.Мурадов, Ф.М. Мамедов, Ф.А.Казымова, *Письма в ЖТФ*, **35** (2009) 79.
38. П.Г.Орешкин, *Физика полупроводников и диэлектриков М., Высшая школа*, (1977) 447.
39. N.N.Niftiyev, O.B.Taqiev, M.B.Muradov, F.M.Məmmədov, Ü.F.Kazımov, *Fizika*, **14** (2008) 18.
40. N.N.Niftiyev, O.B.Tağıyev, M.B.Muradov, F.M.Məmmədov, T.Ş.Həşimova, *Azerbaijan National Transaction of Azerbaijan Academy of Sciences, Series of Physical-mathematical and Technical sciences, Physics and Astronomy*, **XXVIII** №5 (2008) 145.
41. Ю.М.Поплавко, *Физика диэлектриков, Высшая школа*, (1980) 400.
42. N.N.Niftiyev, O.B.Tağıyev, M.B.Muradov, F.M.Məmmədov, T.Ş.Həşimova *Azerbaijan National Transaction of Azerbaijan Academy of Sciences, Series of Physical-mathematical and Technical sciences, Physics and Astronomy*, **XXVII** №5 (2007) 84.
43. N.N.Niftiyev, O.B.Tağıyev, M.B.Muradov, F.M.Məmmədov, *Fizika*, **13** (2007) 3.
44. N.N.Niftiyev, O.B.Taqiev, *Solid State Communication*, **81** (1992) 693.
45. Н.Н.Нифтиев, *ФТП*, **36** (2002) 836.
46. N.N.Niftiyev, O.B.Taqiev, *Inorganic materials*, **39** (2003) 576.
47. N.N.Niftiyev, O.B.Taqiev, *Fizika*, **11** (2005) 10.
48. Н.Н.Нифтиев, А.Г.Рустамов, О.Б.Тагиев, *ФТП*, **24** (1990) 758.
49. Н.Н.Нифтиев, А.Г.Рустамов, О.Б.Тагиев, *Оптика и спектроскопия*, **75** (1993) 351.
50. N.N.Niftiyev, *Solid State commun.*, **94** (1994) 781.
51. N.N.Niftiyev, *Intermetallics*, **2** (2003) 975.
52. Г.М.Нифтиев, О.Б.Тагиев и др., *ФТП*, **25** (1991) 704.
53. J.J.Hopfield. *J.Phys.Chem.Sol.*, **15** (1960) 97.
54. Н.Н.Нифтиев, О.Б.Тагиев, *ФТП*, **28** (1994) 752.
55. Н.Н.Нифтиев, О.Б.Тагиев, Г.М.Нифтиев, *Неорган. Материал.*, **32** (1996) 291.
56. A.N.Georgobiani, A.N.Gruzintsev, J.I.Radançan, I.M.Tiqinyanu. *Phys. st. Solid (a)*, **80** (1983) K45.
57. А.Н.Георгобиани, С.И.Раданчан, И.М.Тигинуани, *ФТП*, **19** (1985) 193.
58. Н.Н.Нифтиев, О.Б.Тагиев, *Актуальные проблемы физики, IV рес.конф., Баку*, (2006) 33.

ELECTROPHYSICAL AND OPTICAL PROPERTIES OF AB₂X₄-TYPE COMPOUNDS

N.N.NIFTIYEV

The article surveys the works on generation of AB₂X₄-type compounds and their crystal structures. It provides generalization of results of the study of electrophysical and optical properties of the following compounds: FeGa₂S₄, FeIn₂S₄, FeGaIn₂S₄, FeIn₂Se₄, MnGa₂S₄, MnIn₂S₄, MnGaIn₂S₄, MnIn₂Se₄ and MnGa₂Se₄. It has been determined during the study of volt-ampere characteristic (VAC) in static electric field that the current in nonlinear region of VAC in FeGa₂S₄, MnGa₂S₄, and MnIn₂S₄ is conditioned by

injection of carriers from indium contacts and the current in FeGa₂S₄, FeIn₂S₄ and MnIn₂Se₄ is conditioned by thermoelectronic Frenkel ionization. Electroconductivity in these compounds in the investigated temperature area is conditioned by activation mechanism of conductivity. Energies of current carriers and trap density have been determined as well as the form of a potential well. The switching effect has been detected in FeIn₂S₄ crystals. Current relaxation has been observed in MnIn₂Se₄ with the lapse of time. Frequency and temperature dependences of permittivity (ϵ) and conductivity (σ), as well as the tangent of angle of AB₂X₄-type compounds dielectric losses ($\text{tg}\delta$) in ac field have been studied and their values have been determined. It has been determined that increase of ϵ is connected with increase of concentration of defects as temperature increased. A dependence $\text{tg}\delta \sim 1/\omega$ has been observed in the investigated frequency slot. Availability of rapid levels of attachment has been determined during the study of TSD in MnGa₂S₄, MnIn₂S₄, MnGaInS₄, FeGa₂S₄ and FeIn₂Se₄. Optical absorption in single crystals MnGa₂S₄, MnIn₂S₄, MnGaInS₄ and MnGa₂Se₄ has been analyzed and it has been determined that temperature change in energy gap width is conditioned by electrophonic interaction. Long-wave tail of electrophonic absorption in MnGa₂S₄, MnIn₂S₄ and MnGa₂Se₄ obeys to the Urbach rule. Anisotropy in single crystals of MnGa₂S₄, MnIn₂S₄ and MnGaInS₄ under different temperatures in the polarized light has been observed during the investigation of the absorption factor incident photons energy relationship. Intrinsic and impurity regions have been detected in single crystals of MnIn₂S₄ and MnGaInS₄ under different temperatures in spectral distribution of photoconductivity.

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЙ ТИПА АВ₂X₄

Н.Н.НИФТИЕВ

В статье даётся обзор работ по получению соединений типа АВ₂X₄ и их кристаллических структур. Дано обобщение результатов исследования электрофизических и оптических свойств соединений: FeGa₂S₄, FeIn₂S₄, FeGaInS₄, FeGa₂Se₄, FeIn₂Se₄, MnGa₂S₄, MnIn₂S₄, MnGaInS₄, MnIn₂Se₄, MnGa₂Se₄. При исследовании ВАХ в статическом электрическом поле установлено, что ток в нелинейной области ВАХ в соединениях FeGa₂Se₄, MnGa₂S₄ и MnIn₂S₄ обусловлен инжекцией носителей из индиевых контактов, а в соединениях FeGa₂S₄, FeIn₂Se₄ и MnIn₂Se₄ ток обусловлен термоэлектронной ионизацией Френкеля. В этих соединениях в исследуемой температурной области электропроводность обусловлена активационным механизмом проводимости. Определены энергии активации носителей тока и концентрации ловушек, а также форма потенциальной ямы. В кристаллах FeIn₂S₄ обнаружен эффект переключения. В MnIn₂Se₄ наблюдалась релаксация тока со временем. Исследованы частотные и температурные зависимости диэлектрической проницаемости (ϵ) и проводимости (σ), тангенс угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$) соединений типа АВ₂X₄ в переменном электрическом поле и определены их значения. Установлено, что возрастание ϵ связано с увеличением концентрации дефектов с ростом температуры. В исследуемом частотном интервале наблюдается зависимость $\text{tg}\delta \sim 1/\omega$. При исследовании ТСД в кристаллах MnGa₂S₄, MnIn₂S₄, MnGaInS₄, FeGa₂Se₄ и FeIn₂Se₄ выявлено наличие быстрых уровней прилипания. Исследовано оптическое поглощение в монокристаллах MnGa₂S₄, MnIn₂S₄, MnGaInS₄ и MnGa₂Se₄ и выявлено, что температурное изменение ширины запрещенной зоны обусловлено электрон-фононным взаимодействием. Длинноволновый хвост электрофононного поглощения в монокристаллах MnGa₂S₄, MnIn₂S₄ и MnGa₂Se₄ подчиняется правилу Урбаха. В монокристаллах MnGa₂S₄, MnIn₂S₄ и MnGaInS₄ при различных температурах в поляризованном свете при исследовании зависимости коэффициента поглощения от энергии падающих фотонов наблюдается анизотропия. В монокристаллах MnIn₂S₄ и MnGaInS₄ при различных температурах в спектральном распределении фотопроводимости выявлены собственные и примесные области.

Редактор: Э.Годжаев