

AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASI

Əlyazması hüququnda

**A^I, B^{III} VƏ C^{VI} ƏSASINDA BİRLƏŞMƏLƏRİN NAZİK
TƏBƏQƏLƏRİNDƏ VƏ NANOQURULUŞLARINDA
TARAZLIQDA OLMAYAN ELEKTRON PROSESLƏRİNİN
XÜSUSİYYƏTLƏRİ**

İxtisas: 2220.01 –yarımkeçiricilər fizikası

Elm Sahəsi: Fizika

İddiaçı: **Rövşən Məmməd oğlu Məmmədov**

Elmlər doktoru dərəcəsi almaq üçün təqdim edilmiş
dissertasiyanın

AVTOREFERATI

Bakı – 2024

Dissertasiya işi Bakı Dövlət Universitetinin “Yarımkeçiricilər fizikası” kafedrasında yerinə yetirilmişdir.

Elmi məsləhətçilər: fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor
Vaqif Müseyib oğlu Salmanov

fizika elmləri doktoru, professor
Əli Həsən oğlu Hüseynov

Rəsmi opponentlər: AMEA-nın müxbir üzvü, fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor
Oqtay Əbil oğlu Səmədov

fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, dosent
Tələt Rzaqulu oğlu Mehdiyev

fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor
Kərim Rəhim oğlu Allahverdiyev

fizika elmləri doktoru, professor
Adil Polad oğlu Abdullayev

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



Elmi seminarın
sədri:

Akademik
Arif Məmməd oğlu Həşimov

fizika elmləri doktoru, dosent
Rəfiqə Zabil qızı Mehdiyeva

fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor
Hüseyn Behbud oğlu İbrahimov

İŞİN ÜMUMİ TƏSVİRİ

Mövzunun aktuallığı və işlənmə dərəcəsi. Lazer fizikasının və yarımkeçiricilərin texnologiyasının sürətlə inkişafı tədqiqatçılar qarşısında kvant elektronika, qeyri-xətti optika və ümumilikdə yarımkeçirici elektronikanın artan tələbatına cavab verən yeni yarımkeçirici materialların axtarışı ilə bağlı yeni vəzifələr qoyur.¹ Yarımkeçirici materiallar fiziki parametrlərinin geniş diapazonda dəyişməsi, müxtəlif qadağan olunmuş zolağın eninə malik olan çoxlu sayda yarımkeçiricilərin olması, elektrikkeçiriciliyinin tipinin dəyişməsi, sərbəst yükdaşıyıcıların konsentrasiyalarının asanlıqla idarə olunması ilə xarakterizə olunur. Bütün bunlar əsaslı şəkildə yeni fiziki hadisələrin aşkarlanması və tədqiqi üçün yarımkeçiricilərdən səmərəli istifadə etməyə imkan verir, həmçinin onların əsasında müasir cihazların və qurğuların yaradılması üçün yarımkeçirici materiallardan istifadənin perspektivindən xəbər verir.²

Lazer fizikası sahəsində fundamental tədqiqat sahələrinin əsas istiqamətlərindən biri kimi intensiv lazer şüalanmanın maddə ilə qarşılıqlı təsirini göstərmək olar. Lazer şüalanmasının bərk cisimlə qarşılıqlı təsirində xüsusi maraq doğuran məsələ böyük intensivlikli işıq seli ilə həyəcanlanan yarımkeçirici kristallarda baş verən hadisələrin öyrənilməsi məsələsidir. Çox yüksək polyarlaşma qabiliyyətinə malik yarımkeçiricilərdə qeyri-xətti optik effektlər xüsusilə nəzərə çarpır. Lazer şüalarından istifadə yarımkeçiricilərdə tarazlıqda olmayan yükdaşıyıcılarının xassələrinin bir sıra yeni aspektlərini öyrənməyə imkan verir. Müasir kvant generatorlarının böyük gücə malik olması tarazlıqda olmayan yükdaşıyıcılarının yüksək konsentrasiyalarını yaratmağa imkan verir. Belə yüksək konsentrasiyalara malik olan mükəmməl kristallarda tarazlıqda olmayan hadisələrinin tədqiqi yarımkeçiricilər fizikasının tamamilə yeni sahəsini təmsil edir. Bu tədqiqatlar xüsusilə ona görə maraqlıdır ki, yükdaşıyıcılar arasında qarşılıqlı təsir nəticəsində yaranan bir sıra

¹ Басов, Н.Г. Проблемы квантовой электроники // Природа, – 1990, – №10, – с.28-35.

² Алферов Ж.И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур // Физика и техника полупроводников, – 1998, – 32(1), – с. 3-18.

incə effektləri, xüsusən də yüksək sıxlıqlı eksitonlar sistemində kollektiv effektləri öyrənmək mümkün olur.

Nəzəri və eksperimental araşdırmalarımızın göstərdiyi kimi, A^I , B^{III} və C^{VI} yarımkeçirici birləşmələr bu tələblərə tam cavab verir. Böyük anizotropluğa, yüksək polyarlaşma qabiliyyətinə, optik bircinsliyə, təbii güzgü səthinə, geniş tezlik diapazonunda işığın udulması imkanına, böyük əlaqə enerjisində malik eksiton udulmasına, qadağan olunmuş zolağın eninin bərk cisim lazerlərinin tezliyinə uyğunluğuna, mükəmməl alınma texnologiyasının varlığına, müxtəlif mexanizmə malik qeyri-xətti optik hadisələrin mövcudluğuna görə laylı quruluşa malik olan yarımkeçirici nazik təbəqələri və nano quruluşlar optoelektronikada tələb olunan əsas elementlərə çevrilmişdir. Qeyri-xətti optik, qeyri-tarazlıq elektron proseslərin və kvant ölçülü hadisələrin az tədqiq olunmuş, eyni zamanda çox perspektivli A^I , B^{III} və C^{VI} yarımkeçirici birləşmələrində nəzəri və təcrübi tədqiq olunması onların əsasında geniş diapazonlu yeni cihazların layihələndirilməsi üçün böyük perspektivlər açır.

Dissertasiya işinin məqsədi A^I , B^{III} və C^{VI} elementləri əsasında yarımkeçirici birləşmələrin kristallarının, nazik təbəqələrin və nanostrukturalarının əldə edilməsi, struktur analizinin aparılması, qeyri-xətti optik və qeyri-tarazlıq elektron hadisələrin xüsusiyyətlərinin öyrənilməsi və bu sinif yarımkeçiricilərin optoelektronikanın materialları və elementləri kimi istifadə edilməsi imkanlarının müəyyən edilməsindən ibarətdir.

Bu məqsədə nail olmaq üçün qarşıya aşağıdakı vəzifələr qoyulmuşdur:

1. Bridgman, diskret buxarlanma və kimyəvi çökmə üsullarından istifadə etməklə A^I , B^{III} və C^{VI} elementləri əsasında yarımkeçirici birləşmələrin optik bircins monokristallarının, nazik təbəqələrinin və nanostrukturalarının əldə edilməsi.

2. X-şüalarının difraksiyası (XRD), atom qüvvəsi mikroskopu (AFM), enerji dispersiv rentgen spektroskopiyası (EDAX) və skan edən elektron mikroskopdan (SEM) istifadə edərək nazik təbəqələrin və nanohissəciklərin daxili quruluş və struktur tədqiqatlarının aparılması.

3. Lazer şüalarının yüksək intensivliyində elektrik, optik,

fotoelektrik və luminescent hadisələrin xüsusiyyətlərinin öyrənilməsi.

4. Lazer şüalanmasının təsiri altında A^I , B^{III} и C^{VI} elementləri əsasında yarımkeçirici birləşmələrin nazik təbəqələrində və nanohissəciklərində qeyri-xətti optik hadisələri aşkar etmək və öyrənmək.

5. Lazer şüalanması nəticəsində yaranan elektron-deşik cütlərinin yüksək sıxlıqlarında A^I , B^{III} и C^{VI} elementləri əsasında yarımkeçirici birləşmələrin nazik təbəqələrində və nanohissəciklərində qeyri-tarazlıq elektron hadisələrin xüsusiyyətlərini öyrənmək.

6. Alınmış kristallar, nazik təbəqələr və nanostrukturalarının kvant elektronikası və qeyri-xətti optikada praktiki tətbiqi imkanlarının müəyyən edilməsi.

Tədqiqatın metodları və obyektləri. İşdə qarşıya qoyulan problemlər eksperimental və nəzəri tədqiqatlar əsasında həll edilmişdir. Bu zaman lazer spektroskopiyasının müasir metodlarından, o cümlədən, ikişüalı (pump-probe) spektroskopiya, qeyri-xətti interferometriya, şüa distorsiyası, gecikmə (delay time) və uçuş (time of flight) vaxtının ölçülməsi, qeyri-stasionar fotokeçiriciliyin ölçülməsi metodları, yaddaşlı ossilloqraf və rəqəmsal qeyri-stasionar kompüter sistemindən (board Master 800 ABI 8) istifadə edilmişdir. Işıq mənbəyi olaraq kəsilməz rejimdə işləyən He-Ne qaz lazeri, impuls rejimdə işləyən N_2 qaz lazeri, piko və nanosaniyəli YAG: Nd^{+3} – bərk cisim lazerləri, nanosaniyəli yaqut lazeri, impuls rejimində işləyən, tezliyi geniş diapazonda dəyişə bilən maye lazerlərindən və kollimasiya olunmuş işıq mənbəyindən istifadə edilmişdir.

İşi yerinə yetirərkən, ikiqat dispersiyalı monoxromatordan (600nm dalğa uzunluğunda spektral ayırmaq qabiliyyəti $\sim 0,024$ nm), istifadə olunan materialların və strukturların elektrik, optik, fotoelektrik və luminescent xüsusiyyətlərinin analitik təhlili üçün müasir optik cihazlardan, yaddaşlı ossilloqraf, lazer şüalanması üçün xüsusi detektorlardan, elektron difraksiya, rentgen şüalarının difraksiya analizi və s. vasitələrdən istifadə etməklə kompleks tədqiqatlar aparılmışdır.

Tədqiqat obyektləri olaraq A^I , B^{III} və C^{VI} birləşmələrinin

(GaSe, GaS, InSe, AgIn₅S₈, Cu₃In₅Se₉, Cu₃Ga₅S₉) monokristalları, nazik təbəqələri və nanohissəcikləri, GaSe_{1-x}S_x bərk məhlulları, In₂O₃–InSe–Pt Schottky baryerləri və n-InSe/p-GaSe, InSe/GaSe_{1-x}S_x heteroqəçidləri götürülmüşdür. Obyektin bu seçimi, ilk növbədə, bu materialların kristall quruluşunun xüsusiyyətləri – laylı quruluş, güclü anizotropluğu, geniş tezlik diapazonunda şəffaflıq və mükəmməl kristalların alınması üçün işlənmiş texnologiyanın mövcudluğu ilə əlaqədardır. Digər tərəfdən, tədqiqat obyektinin seçiminə tədqiq olunan yarımkeçiricilər sinfinin qadağan olunmuş zolağının eni ilə güclü işıq mənbələrinin radiasiya kvantlarının enerjisi arasındakı əlaqə əhəmiyyətli dərəcədə təsir göstərmişdir.

Tədqiqatın elmi yeniliyi:

- Lazer şüalanmasının yüksək intensivliyində laylı A³B⁶ birləşmələrində qeyri-xətti optik udma hadisəsi təcrübi olaraq aşkar edilməsi;

- yüksək optik həyəcanlanma zamanı GaSe kristallarında eksiton rezonansı oblastında şəffaflanma hadisəsi aşkar edilmişdir;

- GaSe nazik təbəqələrində qeyri-xətti optik udma əmsalı və sındırma əmsalı müəyyən edilmişdir;

- yüksək optik həyəcanlanma zamanı GaSe nazik təbəqələrində zonaların doldurulma effekti aşkar edilmişdir;

- lazer həyəcanlanmasında InSe nazik təbəqələrində termal qeyri-xəttilik effekti aşkar edilmişdir;

- lazer həyəcanlanmasında Cu₃Ga₅S₉ kristallarında ikifotonlu fotokeçiricilik aşkar edilmişdir;

- GaS nazik təbəqələrində təcrübi olaraq iki və üçfotonlu optik udulma hadisəsi müşahidə olunmuşdur;

- yüksək optik həyəcanlanma zamanı CuIn₅S₈ kristallarında fotolüminessensiyanın xüsusiyyətləri və fotocərəyanın nanosaniyəli relaksasiyası aşkar edilmişdir;

- GaS-GaSe heterostrukturlarında lazer şüalanması ilə iki və üçfotonlu həyəcanlanmada fotolüminessensiya hadisəsi müşahidə edilmişdir;

- həyəcanlanmanın yüksək intensivliklərində GaSe kristallarında fotokeçiriciliyin ölçmə metodu ilə tarazlıqda olmayan

yükdaşıyıcıların yürüklüyünün anizotropiyası müəyyən edilmişdir;

- InSe 2D kristallarında dreyf tutumunun baş verməsi aşkar edilmişdir;

- lazer şüalanmasında InSe nazik təbəqəli strukturda ifratsürətli fotocərəyan aşkar edilmişdir;

- InSe və AgIn_5S_8 nazik təbəqələri əsasında n-p strukturunun alınması üçün yeni üsul işlənib hazırlanmışdır;

- In_2O_3 -InSe-Pt birləşmələri əsasında yüksək çevrilmə əmsalına malik olan Şottki baryerri yaradılmışdır;

- ZnO-CuInS_2 heterostrukturlar əsasında fotoelektrik çeviricilər yaradılmışdır;

- lazer şüalanmasının intensivliyini dəyişdirmək üçün yeni üsul təklif olunmuşdur.

Nəzəri və praktiki əhəmiyyəti

-InSe, GaSe və $\text{Cu}_3\text{Ga}_5\text{S}_9$ kristallarında aşkar edilmiş qeyri-xətti optik udma hadisəsi bu kristalların kvant elektronikasının materialları və elementləri kimi istifadə edilməsindən xəbər verir;

-GaS-GaSe heterostrukturlarında aşkar edilmiş 2- və 3-fotonlu fotoluminessensiya hadisəsi çoxqatlı yarımkeçirici epitaksial heterostrukturların öyrənilməsi üçün əsas metod kimi istifadə edilə bilər.

-yüksək optik həyəcanlandırma səviyyəsində GaSe-də müşahidə edilən qeyri-tarazlıq yükdaşıyıcıları ilə zonaların doldurulması effekti bu kristallar əsasında yarımkeçirici lazer yaratmağa imkan verir;

-Otaq temperaturunda aşkar edilmiş ultrasürətli foto cərəyanlar və yaxın İQ spektral regionda intensiv şüalanma yüksək sürətli elektronika və fotonik texnologiyası üçün nazik qatlı InSe strukturundan istifadə potensialını göstərir.

-GaSe və InSe kristalları əsasında yaradılmış lazer şüalanması üçün optik filtrlər müxtəlif lazerlərin şüalanma intensivliyini iki tərtibdən çox dəyişməyə imkan verir və yüksək güclü lazer şüalanması üçün kəsici filtr kimi səmərəli istifadə oluna bilər;

-(In_2O_3 -InSe-Pt) birləşmələri əsasında hazırlanmış Schottky baryerləri onların fotovoltaiq günəş enerjisi çeviricisi kimi istifadəsinə imkan verir;

- AgIn_5S_8 və InSe-nin nazik təbəqələrində keçiricilik növünün

aşkar edilmiş inversiyasından yarımkeçirici p-n strukturlarının yaradılması üçün istifadə oluna bilər.

Müdafiəyə çıxarılan əsas müddəalar:

- yüksək optik həyəcanlanmada laylı GaSe, InSe və $\text{Cu}_3\text{Ga}_5\text{S}_9$ kristallarında qeyri-xətti optik udma mexanizmləri;
- lazer şüasının təsiri nəticəsində GaS və GaSe-nin nazik təbəqələrində ikifotonlu və üçfotonlu udulmanın baş vermə mexanizmi;
- GaSe kristalları əsasında yarımkeçirici lazerin fiziki əsasları və iş prinsipi;
- həyəcanlanmanın yüksək intensivliyində anizotrop GaSe kristallarının fotokeçiriciliyinin xüsusiyyətlərinin səbəbi;
- yüksək optik həyəcanlanmada CuIn_5S_8 kristallarında fotoluminessensiya və fotocərəyanın nanosaniyəli relaksasiyasının mexanizmləri;
- InSe nanohissəciklərində kvant ölçülü effektin başvermə mexanizmi;
- lazer şüaların təsiri nəticəsində AgIn_5S_8 və InSe nazik təbəqələrində p-n keçidin əmələ gəlmə mexanizmi;
- spektrin görünən və yaxın infraqırmızı oblastında lazer şüalandırması üçün GaSe və InSe kristalları əsasında hazırlanan optik filtrlərin iş prinsipi;
- GaSe və InSe kristalları əsasında sürətli lazer detektorlarının işləmə prinsipi;
- optik kontakt və lazer şüalanması ilə hazırlanan (In_2O_3 -InSe-Pt) Şottki baryerlərin və ($\text{InSe}/\text{GaSe}_{1-x}\text{S}_x$) heterostrukturların əmələ gəlmə mexanizmləri.

Nəşrlər. Dissertasiyanın mövzusu 87 əsərdə öz əksini tapmışdır. Dissertasiya üzrə dərc olunmuş məqalələrin sayı 87-dir. Onlardan 29-i Elmi Sitat İndeksində daxil olan jurnallarda dərc edilmişdir: «Оптика и спектроскопия», «Известия ВУЗов, Томск», «Журнал физической химии», «Журнал технической физики», «Российские нанотехнологии». International Journal of Current Research (USA), Nanosystems: Physics, chemistry, mathematic; Chalcogenide Letters, Journal of Materials and Applications, Modern

physics letters B.

Aprobasiya və tətbiqi. Dissertasiyanın əsas materialları aşağıdakı konfrans, iclas, simpozium və seminarlarda məruzə edilmiş və müzakirə edilmişdir: “Fizikanın müasir problemləri” Respublika Elmi Konfransı (Bakı, 2007); Beynəlxalq konfrans “Conf. Davam et 6-cı İnter. Konf. Tech üzrə. və fizika. Prob. Pow. Eng. (ICTPE) ”(Tehran, İran, 2010), Beynəlxalq konfrans "Byarpaolunan enerji mənbələrində istifadə olunan prob. Heç bir perspektiv yoxdur". (Bakı, 2012), 21-ci əsrin kənd təsərrüfatı elmləri. Cari tədqiqat və perspektivlər (Sankt-Peterburq, Rusiya), “International Conference Modern Trends in Physics” Beynəlxalq elmi konfransı (Bakı 2017, 2019), Ümummilli lider Heydər Əliyevin anadan olmasının 94-cü ildönümünə həsr olunmuş “Müasir təbiət elmlərinin aktual beynəlxalq problemləri” Elmi Konfrans” (Gəncə 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022), ADİU, “Respublikamızda qida və tekstil sənayesinin inkişaf perspektivləri və qarşıda duran vəzifələr”, rantların və Gənc tədqiqatçıların “Fizika və astronomiya Konfransı problemləri” Elmi20), Tətbiqi fizika və energetikanın aktual məsələləri Beynəlxalq Elmi Konfransın(Sumqayıt 2018), Aktual problemlər qida və yüngül sənaye (Gəncə, GTU0, “Tətbiqi fizika və energetikanın aktual məsələləri II Beynəlxalq elmi konfrans” (SDU, 2020), "Beynəlxalq Elmi Konfransın "Tətbiqi Fizika və Enerjinin Aktual Problemləri" (SSU), Elektronikada Mikro və Nanotexnologiyaların Beynəlxalq Elmi və Texniki Konfransı (Nalçik, Rusiya 2019, 2021) və həmçinin Yarımkeçiricilər Fizikası kafedrasının seminarlarında müzakirə olunub.

Dissertasiyanın strukturu və həcmi;

Dissertasiya işi 368289 işarədən (ədəbiyyatla birgə 427331 işarə); girişdən 12699 işarə, altı fəsildən; I fəsil 68609 işarə, II fəsil 96581 işarə, III fəsil 32107 işarə, IV fəsil 26911 işarə, V fəsil 64776 işarə, VI fəsil 56942 işarə, nəticə 4618 işarə, ixtisarlardan və şərti işarələrin siyahısı 781 işarə və 422 istifadə edilmiş ədəbiyyat siyahısından, 194 şəkildən, 5 cədvəldən ibarətdir. Dissertasiya işinin məzmununa aid dərc olunan əsərlərin siyahısı avtoreferatın sonunda verilmişdir.

DISSERTASIYANIN ƏSAS MƏZMUNU

Girişdə seçilmiş mövzunun aktuallığı əsaslandırılır, məqsəd və müvafiq olaraq həll edilməli olan vəzifələr müəyyən edilir. Müdafiəyə təqdim olunan elmi yenilik, praktiki dəyər və əsas müddəalar verilir. Dissertasiya işinin qısa xülasəsi verilir.

Birinci fəsil adi (klassik) işıq mənbələrinin təsiri altında A^I , B^{III} və C^{VI} tipli üçlü xalkogenid birləşmələrin elektrik, optik, fotoelektrik və lüminessent xassələrinin eksperimental tədqiqinə həsr edilmişdir.

Yarımkeçirici cihazların texniki istifadəsi sahəsində irəliləyiş tədqiqatçılar qarşısında yeni yarımkeçirici materialların axtarışı ilə bağlı yeni vəzifələr qoyur. Hazırda yarımkeçirici xassələrə malik mürəkkəb kimyəvi birləşmələrin tədqiqi istiqamətində intensiv işlər aparılır. Belə birləşmələrə dövrü cədvəlin I, III və VI qruplarının elementlərinə əsaslanan kimyəvi birləşmələr də daxil edilə bilər. Üçlü xalkogenid birləşmələri son dərəcə mühüm xüsusiyyətlər toplusuna malik olduqlarına və yeni texnologiyanın müxtəlif sahələrində geniş istifadə olunduğuna görə böyük maraq doğurur. Fiziki xassələrinin hərtərəfli tədqiqi və monokristalların sintezi, böyüməsi və bu birləşmələrin hər birinin nazik təbəqələrinin alınması üçün standart texnologiyanın inkişafı onların praktik əhəmiyyətini və elektron cihazların istehsalında tətbiqi perspektivlərini tam aşkar etməyə imkan verir.

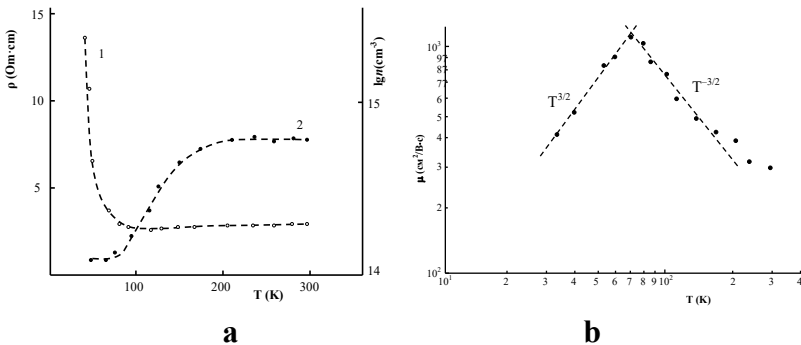
Tədqiq olunan A^I , B^{III} və C^{VI} yarımkeçirici birləşmələri Bridqman üsulu və sabit temperatur qradienti ilə ərimənin yavaş soyudulması ilə alınmışdır. Kristalların sintezi və böyüməsi prosesində uçucu komponentin vakansiyasının meydana gəlməsini istisna edən üsullardan istifadə edilmişdir.

InSe kristallarında cərəyan daşıyıcılarının elektrik keçiriciliyi, konsentrasiyası və yürüklüyünün temperaturdan asılılıqları eksperimental olaraq tədqiq edilmişdir. Tədqiq olunan InSe monokristalları Bridgman-Stokbarger üsulu ilə yetişdirilmişdir. Optik udma spektrləri tədqiq edilərkən kompüter nəzarəti ilə avtomatlaşdırılmış ikili dispersiyalı M833 monoxromatorundan (600 nm dalğa uzunluğunda spektral ayırdetmə $\sim 0,024$ nm) və 350-2000

nm dalğa uzunluğu diapazonunda şüalanmanı qeydə alan detektordan istifadə edilmişdir. Ölçmələr iki istiqamət üzrə, “c” optik oxuna paralel və perpendikulyar istiqamətlərdə, 4,2-300 K temperatur intervalında aparılmışdır.

$\alpha^2 \sim f(h\nu)$ asılılığından müəyyən edilən InSe nazik təbəqələrinin qadağan olunmuş zolağının eni $E_g=1,32$ eV-ə bərabər olmuşdur. Hall ölçmələrinə əsasən, nazik InSe təbəqələrində əsas elektrik parametrləri olan, Holl sabiti (R), xüsusi müqavimət (ρ), yükdaşıyıcıların konsentrasiyası (n), yürlüklüyü (μ), "c" optik oxa paralel və perpendikulyar istiqamətdə keçiriciliyin növü müəyyən edilmişdir. Qeyd etmək lazımdır ki, yürlüklük kifayət qədər böyük qiymətə malik olmuşdur, ~ 9000 sm²/V·san. Bu qiymət yüksək sürətli lazer şüalanma detektorlarının istehsalı üçün çox vacib parametrdir.

Xüsusi müqavimət və yükdaşıyıcıların konsentrasiyasının 4,2 K-dən 300 K-ə qədər geniş temperatur intervalında temperaturdan asılılıqları Şəkil 1,a-da təqdim olunur. Şəkildən göründüyü kimi, 100-300 K temperatur diapazonunda xüsusi müqavimət demək olar ki, sabit qalır, ancaq elektronların konsentrasiyası temperaturun artması ilə artır.



Şəkil 1. a- InSe nazik təbəqələrində xüsusi müqavimətin (1) və yükdaşıyıcıların konsentrasiyasının temperaturdan asılılığı, **b-** yükdaşıyıcıların yürlüklüyünün (2) temperaturdan asılılığı.

20–100 K temperatur diapazonunda $\rho(T)$ asılılığından aşqar

səviyyəsinin aktivləşmə enerjisinin 48 meV olduğu müəyyən edilmişdir. InSe nazik təbəqələrində yürüklüyün temperatur asılılığında, yürüklüyün dəyişməsində əsasən iki tendensiyanın olması müşahidə olunur (Şəkil 1,b). Əvvəlcə 77 K-ə qədər yürüklüyün artması müşahidə olunur, sonra isə bu dəyərdən başlayaraq azalır. Yükdaşıyıcıların Holl yürüklüyünün temperaturdan asılı olaraq dəyişməsi $\mu \sim T^{3/2}$ (< 77 K) və $\mu \sim T^{-3/2}$ qanunlarına uyğun olaraq baş verir, bu da uyğun olaraq yükdaşıyıcıların aşqar ionlarından və qəfəsin akustik rəqslərindən səpilməsi ilə əlaqədar ola bilər.

Bu fəsilə həmçinin $AgIn_5S_8$, $Cu_3In_5Se_9$ və $Cu_3Ga_5S_9$ birləşmələrinin monokristallarında katodoluminessensiya, fotoluminessensiya və fotokeçiriciliyin tədqiqatlarının nəticələri təqdim olunur. Alınmış məlumatlar əsasında $AgIn_5S_8$ ($\Delta E_g = 1,71$ eV, 300 K) monokristalının qadağan olunmuş zolağında aktivləşmə enerjisi 0,260 eV –a bərabər olan dərin donor səviyyəsi və aktivləşmə enerjisi 0,167 eV-a bərabər olan akseptor səviyyəsi aşkar edilmişdir. Fotokeçiriciliyin spektral asılılığında 2,06 eV-a bərabər olan elektron keçidləri elektronların valent zonasından keçirici zonanın minimumundan 0,32 eV yuxarıda yerləşən alt zonaya keçidi ilə əlaqələndirilir. Bu alt zonanın mövcudluğu yürüklüyün və termo-e.h.q-nin temperatur asılıqlarında da öz təsdiqini tapır.

$Cu_3In_5Se_9$ kristallarının fotoluminessensiya spektrləri 160 K və 210 K temperaturlarında tədqiq edilmişdir. Aşağı temperaturda luminessensiya spektrlərinin otaq temperaturunda luminessensiya spektrləri ilə müqayisəsindən aydın olur ki, temperaturun azalması ilə təxminən 1,5 eV-də mövcud olan luminessensiya zolağı yox olur. Bu enerjinin $Cu_3In_5Se_9$ kristallarının qadağan olunmuş zolağının enindən (300 K-də $E_g = 1,06$ eV) əhəmiyyətli dərəcədə böyük olduğunu nəzərə alsaq, aşağı temperaturda lazer şüalanması (2,34 eV) ilə həyəcanlanan elektronların Auger rekombinasiyası səbəbindən sərbəst eksitonların lokallaşdırılmış səviyyəyə keçdiyini güman etmək olar. Yüksək enerjili oblastda emissiya zolağının

spektrində müşahidə olunan bərabər məsafəli əyilmələri fonon təkrarına aid etmək olar.

$Cu_3Ga_5S_9$ kristallarının fotolüminessensiya spektrində 200 K temperaturunda aşqar səviyyələrində və kristal qəfəsin məxsusi defektlərin səbəb olduğu səviyyələrdə lokallaşdırılmış qeyri-tarazlıqlı yüklərin radiasiya rekombinasiyası ilə əlaqəli emissiya xətti görünür. $Cu_3Ga_5S_9$ kristalları n-tipli keçiriciliyə malik olduğundan və qadağan olunmuş zolağının eni 300 K-də $E_g = 2,15$ eV olduğundan, radiasiya rekombinasiyasında donor səviyyələrinin elektronlarının və valent zolağındakı dəşiklərin, eləcə də akseptor səviyyələrindəki dəşiklərinin iştirak etdiyini güman etmək olar. Bütövlükdə spektri maksimumları təxminən 1 və 1,45 eV olan iki əsas lüminessensiya zolağına bölmək olar. Aydınır ki, bu zolaqlar ya donor-akseptor cütlərinin rekombinasiyası, ya da aşqar səviyyəsi ilə valent zolağı arasındakı rekombinasiyası ilə bağlıdır.

$Cu_3Ga_5S_9$ birləşmənin monokristalları otaq temperaturunda işığa zəif həssasdırlar. Bununla belə, nümunələr qızdırıldıqda, onların fotokeçiriciliyi o qədər artır ki, bu materialdan 0,5-0,8 mikron dalğa uzunluğunda işləyən fotodetektor kimi istifadə etməyi tövsiyə etmək tamamilə mümkündür. Bu kristalları enerjisi 2,1 eV olan kvantlarla həyəcanlandırdıqda, 485 K temperaturundan yuxarı temperaturda, udma əmsalının temperaturdan asılı olaraq artması ilə əlaqədar olaraq fotocərəyanda kəskin artım müşahidə olunur.

Məlumdur ki, udma əmsalının böyük qiymətə malik olması yarımkeçiricilərdə radiasiya proseslərinin baş verməsinə kömək edir. Ona görə də, lüks-ampere xarakteristikasından (LAX) istifadə edərək rekombinasiya prosesləri analiz edilmişdir. LAX-da, 300÷400 K oblastında, yüksək intensivlikdə $lg i_f \sim lg I$ asılılığının meylliyi $\frac{1}{2}$ -dən az olur, aşağı işıqlandırmada isə meyl temperaturla dəyişmir. $(i_f(T) = const)$ asılılıqları LAX-nın rekombinasiya kvadratik olan hissəsindən götürülmüşdür. Beləliklə, biz güman edə bilərik ki, $Cu_3Ga_5S_9$ monokristallarda qeyri-tarazlıqlı yükdaşıyıcılarının rekombinasiyası zolaqlarası keçidlərlə xarakterizə olunur.

$Cu_3Ga_5S_9$ kristallarında lokal səviyyələrin parametrlərini müəyyən etmək üçün termostimullaşdırılmış keçiricilik metodundan istifadə edilmişdir. Spektrdə iki maksimum müşahidə olunmuşdur.. Eyni istilik sürətində, termostimullaşdırılmış cərəyanın (TSC) maksimumları nümunənin ilkin işıqlandırılması müddətindən asılı olaraq dəyişir. Bu onu göstərir ki, yapışma səviyyələri yavaşdır.

Dissertasiya işinin ikinci fəslli lazer şüalarının təsiri altında A^I , B^{III} və C^{VI} laylı kristallarında qeyri-xətti optik hadisələrin tədqiqinə həsr edilmişdir.

InSe kristallarında yüksək həyəcanlaşma intensivliyində qeyri-xətti optik udma hadisəsi nəzəri və eksperimental olaraq tədqiq edilmişdir. Təcrübələrdə impulsun müddəti 25 ps olan $YAG:ND^{+3}$ lazerindən istifadə edilmişdir. Gücləndirildikdən sonra işıq impulsu ikiye bölünür: birincisi, KDP kristalında ikiqat tezlikli işıq impulsuna çevrilir ($\hbar\omega_H = 2,34eV$). Bu impuls kristal həyəcanlandırmaq üçün istifadə edilir. İkinci impuls isə geniş spektral paylanmaya malik olub (0,75÷1,5mkm) monitoring rolunu oynayır.

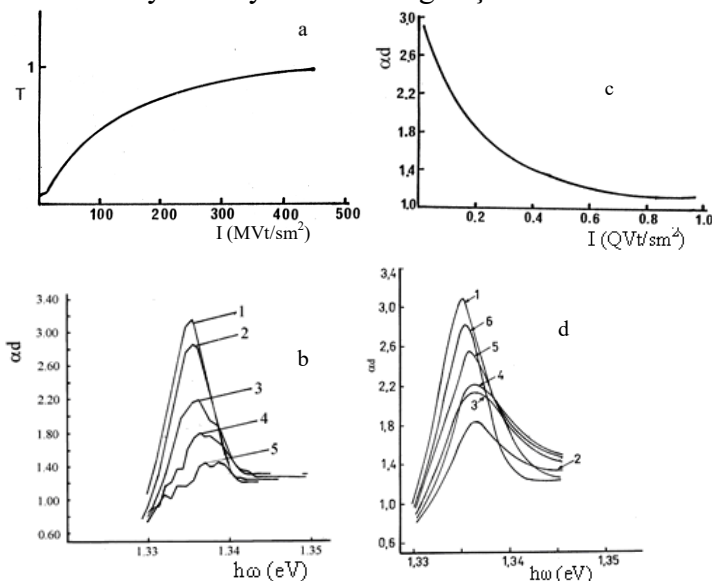
Şəkil 2,a-da InSe kristallarını enerjisi $h\nu=1,327$ eV olan lazer şüaları ilə həyəcanlaşdırdıqda $T=77$ K temperaturunda buraxma əmsalının həyəcanlaşma intensivliyindən asılılığı verilmişdir. Lazer şüalarının bu enerjisi InSe kristallarında eksitonları rezonans həyəcanlandırmağa imkan verir. Şəkildən göründüyü kimi, eksiton rezonans bölgəsində qeyri-xətti udma müşahidə olunur və yüksək həyəcanlaşma səviyyələrində göstərilən şüalanma tezliyində nümunənin şəffaflaşması baş verir.³

Eksiton rezonans bölgəsində nümunənin şəffaflaşması və qeyri-xətti işığın udulmasının dinamikasının daha ətraflı tədqiqi $T = 4,2$ K temperaturunda aparılmışdır.

Şəkil 2,b-də InSe monokristalının optik sıxlığının spektral asılılıqlarını göstərir. Şəkildən göründüyü kimi, lazer şüalarının intensivliyi artdıqca eksiton piki azalır və genişlənir. Tədqiq olunan

³ Кязым-заде, А.Г. Оптические нелинейности в кристаллах GaSe и InSe при лазерном возбуждении / В.М.Салманов, А.Г.Гусейнов, Р.М.Мамедов [и др.] // Оптика и спектроскопия, – Санкт.- Петербург, – 2014,– № 4(116), – с.130-133.

kristalların optik sıxlığı həyəcanlanma gücünün $0,8 \text{ GW/sm}^2$ -ə qədər artması ilə təxminən üç dəfə azalır (şəkil 2,c). Şəkil 2,d-də həyəcanlaşdırıcı şüa ilə monitoring rolunu oynayan şüa arasındakı zaman fərqlərinin dəyişməsinin InSe-nin udma spektrlərini təsiri göstərilmişdir. Şəkildən görüldüyü kimi zaman fərqlərinin artması spektral xəttin zəifləyib və eyni zamanda genişlənməsinə səbəb olur.



Şəkil 2. a- InSe kristallarını enerjisi $h\nu=1,327 \text{ eV}$ olan lazer şüaları ilə həyəcanlaşdırdıqda $T=77\text{K}$ temperaturunda buraxma əmsalının həyəcanlaşma intensivliyindən asılılığı, **b-**InSe kristallarının $T=4,2\text{K}$ temperaturda optik sıxlığının spektral asılılıqları, **c-**InSe kristallarının $T=4,2\text{K}$ temperaturda optik sıxlığının lazer şüalarının gücündən asılılığı, **d-**həyəcanlaşdırıcı şüa ilə monitoring rolunu oynayan şüa arasındakı zaman fərqlərinin dəyişməsinin InSe-nin udma spektrlərinə təsiri.

Bu zaman eksiton pikinin maksimumun həyəcanlanmamış vəziyyətə nisbətən böyük enerji oblastına tərəf sürüşməsi müşahidə olunur.

Bizim fikrimizcə, InSe kristallarında eksitonların rezonans oblastında müşahidə olunan qeyri-xətti optik hadisə və onun zamana

görə təkamülü eksitonların lazer şüalarının yaratdığı qeyri tarazlıq yükdaşıyıcılarının plazması ilə ekranlaşması ilə izah edilə bilər (Mott keçidi).

$$n_{Mott} = \frac{\pi}{3} \left(\frac{1,46}{4a_{eks}} \frac{m_0}{m_e + m_h} \right)^3 \quad (1)$$

Hesablamalar InSe-də Mott keçidi üçün tələb olunan kritik konsentrasiyanın $n_{Mott} = 2,5 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ olduğunu göstərir. Halbuki, lazer şüalarının intensivliyinin $I_0 = 1,5 \times 10^{25} \text{ foton/sm}^2 \cdot \text{san.}$ və impulsun müddətinin $\Delta t = 3 \times 10^{-9} \text{ san}$ müddətində yaratdığı qeyri-tarazlıq yükdaşıyıcılarının konsentrasiyası $\Delta n = \alpha I_0 \Delta t = 4,5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ (burada fundamental udma kənarında $\alpha \approx 10^3 \text{ sm}^3$). bərabərdir. Göründüyü kimi lazer şüalarının yaratdığı yükdaşıyıcıların konsentrasiyası Mott keçidi üçün tələb olunan konsentrsiyadan 3 tərtib çoxdur. Digər tərəfdən, eksitonların lazer şüalarının yaratdığı qeyri tarazlıq yükdaşıyıcılarının plazması ilə ekranlaşması mexanizmi ekranlaşma uzunluğunun müəyyən edilməsi ilə də dəstəklənir

$$L = \hbar / 2(\pi/3)^{1/6} N^{-1/6} \frac{\varepsilon^{1/2}}{em^{*1/2}} \quad (2)$$

burada ε kristalın dielektrik nüfuzluğu, m^* - effektiv kütlə, N - yaranan daşıyıcıların konsentrasiyasıdır.

(2) düsturu ilə hesablanmış ekranlaşma uzunluğu $L \sim 10 \text{ Å}^0$ bərabər olur, bu da InSe kristallarındakı eksitonların Bor radiusundan ($\sim 37 \text{ Å}^0$) xeyli kiçikdir.

Lazer şüalarının təsiri ilə GaSe kristallarının qeyri-xətti optik udma əmsalı və sındırma əmsalı təcrübi olaraq tədqiq edilmişdir. Məlumdur ki, yarımkəçiricilərin fiziki xassələri onlara xarici amillərin təsirindən güclü şəkildə asılıdır. Xarici amil dedikdə təzyiq, temperatur, elektrik sahəsi, aşqarılmaq və s. nəzərdə tutulur. Bu və digər amillər udma zolağının kənarına müxtəlif yollarla təsir göstərir.

Hidrostatik təzyiq nəticəsində atomları arasındakı məsafə

azalır. Lakin atomlararası məsafənin azalması qadağan olunmuş zolağın eninin artmasına səbəb olur. Temperatur artdıqca qəfəs genişlənir və atomların rəqsləri onların tarazlıq vəziyyətlərinə nisbətən artır. Bəzi yarımkeçiricilər (CuCl , PbS ,...) istisna olmaqla, temperaturun artması qadağan olunmuş zolağın eninin azalmasına səbəb olur.

Elektrik sahəsi bütün səviyyələrin effektiv genişlənməyə və udma kənarının aşağı enerjili yerdəyişməsinə (Franz-Keldysh effekti) gətirib çıxarır. Udma zolağının kənarının qırmızı sürüşməsi daha az enerjilərdə optik udulmanın artmasına səbəb olur. Cırılşmış (güclü aşqarlanmış) yarımkeçiricilərdə udma zolağının kənarı cırılşmamış yarımkeçiricilərə nəzərən daha yüksək enerji oblastında yerləşir (Burstein-Moss effekti).

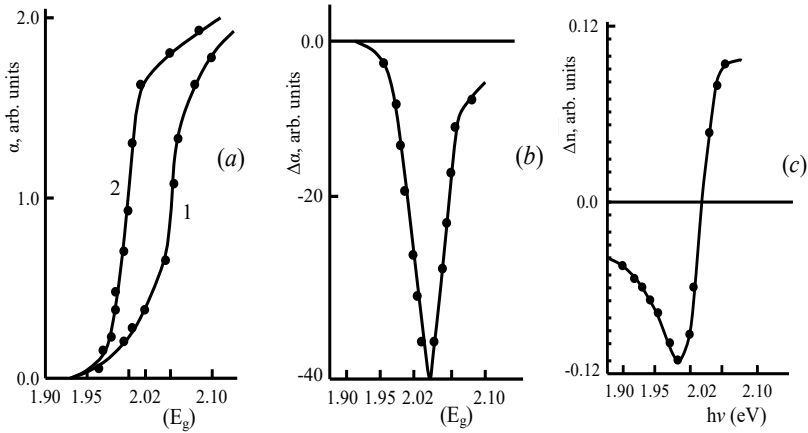
Bizim fikrimizcə, yuxarıda göstərilən xarici amillərlə yanaşı (təzyiq, temperatur, elektrik sahəsi, aşqar və s.) intensiv lazer şüalanması da udma zolağının kənarına əhəmiyyətli dərəcədə təsir göstərə bilər. Bu da öz növbəsində yarımkeçirici kristalların optik parametrləri olan udma əmsalı və sındırma əmsalının dəyişməsinə səbəb ola bilər.

Hal-hazırda yarımkeçiricilərin qeyri-xətti optik parametrlərini ölçmək üçün müxtəlif eksperimental üsullardan istifadə olunur: ikişüalı (pump-probe) spektroskopiyası, qeyri-xətti interferometriya (optical interferometry), dörd dalğalı qarışdırma (four-wave mixing), üç dalğalı qarışdırma (three-wave mixing), qeyri-xətti buraxma (nonlinear transmission measurement), z-scan və ya şüa distorsiyası (beam-distortion technique), və Moire deflektometriyası (Moire deflectometry).

Təcrübədə ikişüalı spektroskopiya metodundan istifadə edilmişdir. Həyəcanlanma mənbəyi kimi Nd:YAG lazerinin ikinci harmonikasından (10 Hz təkrarlama tezliyi, $\lambda=532$ nm dalğa uzunluğu, maksimum güc 12 MVt/sm^2 və impulsun müddəti ~ 10 ns) istifadə edilmişdir. Lazer şüalanması ilə həyəcanlanan nümunələrin udma əmsalını ölçmək üçün ikinci işıq mənbəyi kimi halogen lampası götürülmüşdür.

Aşağı ($\sim 0,1 \text{ MVt/sm}^2$, əyri 1) və yüksək ($\sim 5 \text{ MVt/sm}^2$, əyri 2) həyəcanlanma intensivliyində GaSe-nin udulma spektrləri Şəkil 3,a-

da göstərilmişdir. Şəkildən göründüyü kimi, yüksək həyəcanlaşma səviyyələrində optik udma kənarı aşağı enerjilərə doğru sürüşür (qırmızı sürüşmə).



Şəkil 3. **a-** GaSe kristallarında qeyri-xətti optik udulma: lazer şüalarının aşağı ($\sim 0,1 \text{ MVt/sm}^2$, əyri 1) və yüksək ($\sim 5 \text{ MVt/sm}^2$, əyri 2) intensivliklərində optik udma spektrləri, **b-**udma əmsalının dəyişməsi, **c-** sındırma əmsalının dəyişməsi.

Udma spektrinin dəyişməsi Şəkil 3,b-də göstərilmişdir. Udma spektrinin dəyişməsi sınma indeksinin dəyişməsinə səbəb olur. Kramers-Kroniq münasibətindən fotonun $\hbar\omega$ enerjisində sınma indeksinin dəyişməsini aşağıdakı kimi təyin edə bilərik:

$$\Delta n(\hbar\omega) = \frac{\hbar c}{\pi} \int_0^\infty \frac{\Delta \alpha(\hbar\omega')}{(\hbar\omega')^2 - (\hbar\omega)^2} d(\hbar\omega') \quad (3)$$

(3) tənliyindən istifadə edərək udma əmsalının dəyişməsini bilərək, sındırma əmsalının dəyişməsi müəyyən edilmişdir (Şəkil 3,c). Şəkildən göründüyü kimi, bu halda induksiya edilmiş sındırma əmsalının dəyişməsi udma kənarından aşağı enerjilərdə müsbət, yüksək enerji tərəfində isə mənfi qiymət alır.

Fikrimizcə, GaSe kristallarında müşahidəsi olunan qeyri-xətti optik udulma hadisəsi lazer şüalarının yaratdığı qeyri-tarazlıq

elektron-deşik cütlərinin qeyri-radiativ rekombinasiyası ilə əlaqədardır.

Həqiqətən də, yarımkeçirici kristallar güclü lazer şüalanması ilə həyəcanlandığında, konsentrasiyası $\sim 10^{18}$ - 10^{19} sm³-ə çata bilən elektron-deşik cütləri əmələ gəlir. Bu yükdaşıyıcıların rekombinasiyası əsasən radiasiyalı və ya qeyri-radiativ olmaqla iki kanal vasitəsilə baş verir. Qadağan olunmuş zolağın eni 1-2 eV-a bərabər olan yarımkeçiricilərdə radiasiya rekombinasiyasının intensivliyi olduqca zəifdir.

Radiativ rekombinasiya zamanı enerjisi zona-zona, eksiton və ya aşqar keçidlərə uyğun gələn fotonlar buraxılır. Qeyri-radiativ rekombinasiya vəziyyətində elektron-deşik cütləri enerjisini fonon şüalanması hesabına kristala ötürür, bu da kristal qəfəsin qızmasına səbəb olur. Təcrübələrdə, əksər hallarda qeyri-radiativ rekombinasiya müşahidə olunur. Bir qayda olaraq, nümunənin qızması qadağan olunmuş zolağın eninin azalmasına səbəb olur və bununla əlaqədar fundamental udma kənarında qırmızı sürüşmə baş verir. Beləliklə, güclü lazer şüalarının təsiri ilə yarımkeçirici kristalların həm udma əmsalı, həm də sındırma əmsalı dəyişir.

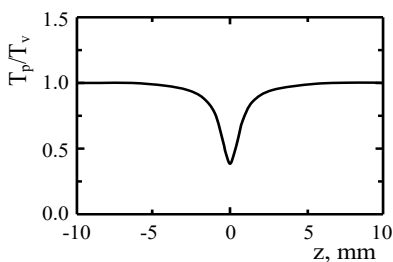
GaSe-nin qeyri-xətti parametrlərinin daha ətraflı tədqiqi z-scan metodundan istifadə etməklə aparılmışdır. Həyəcanlandırıcı mənbə kimi Rhodamine 6G maye (boya) lazerindən istifadə edilmişdir. Radiasiya dalğa uzunluğunun tənzimlənmə diapazonu (594-643) nm, təkrar tezliyi 20 Hz, maksimum gücü 10 MVt/sm² və impuls müddəti ~ 3 ns olmuşdur. Z-scan üsulu ilk dəfə Şeyx-Bah tərəfindən meydana gəlmiş və optik materialların qeyri-xətti xüsusiyyətlərini öyrənmək üçün istifadə olunur. Bu üsul qeyri-xətti sındırma əmsalının qiymətini, işarəsini və ikifotonlu udma əmsalını təyin etməyə imkan verir.

Bu üsul qeyri-xətti optik xassələri olan nümunədə yaxınlaşan Qauss şüasının özünə fokuslanma effektinə əsaslanır. Qeyri-xətti sabitləri təyin etmək üsulu nümunəni linzanın fokusuna yaxın optik ox boyunca hərəkət etdirməkdən ibarətdir ki, bu da yaxınlaşan Qauss şüasını yaratmaq və nümunədən keçən radiasiya gücünü ölçmək üçün istifadə olunur. Qeyri-xətti udma əmsalını ölçmək üçün açıq diafraqma z-scan metodundan istifadə olunur. Nümunəni fokus vasitəsilə z oxu boyunca hərəkət etdirərək, ümumi buraxma

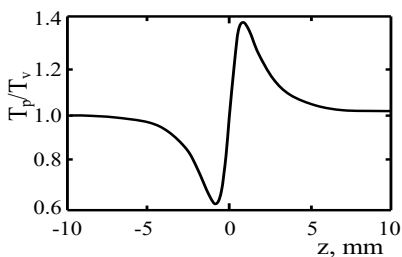
intensivliyinin asılılığını nümunənin mövqeyindən asılı olaraq ölçmək olar. Qeyri-xətti sındırma indeksini qiymətləndirmək üçün qapalı aperture z-scan metodundan istifadə olunur. Öz-özünə fokuslanma effekti detektor müstəvisində ləkə ölçüsünü dəyişdiyindən, detektorun qarşısına sonlu diafraqma diafraqmasının yerləşdirilməsi qeyri-xətti sındırma indeksinin dəyərinin ölçülməsini təmin edir. Lazer şüası dar fokuslandırıcı linzadan keçdikdən sonra nümunəyə doğru yönəldilir. Nümunədən keçən işığın miqdarı xüsusi detektor vasitəsilə ölçülür. Digər bir detektor vasitəsilə isə nümunənin səthinə düşən lazer şüalarının intensivliyi ölçülür. Nümunənin linzanın fokus müstəvisinə nisbətən mövqeyi müxtəlifdir və hər bir mövqedə lazer şüalarının intensivliyi ölçülür.

Şəkil 4,a-da buraxma əmsalının nümunənin mövqeyinin linzanın fokusuna nisbətən dəyişməsindən asılılığı (açıq diafraqma ilə z-skan) verilmişdir.

Şəkildən göründüyü kimi, bu asılılıq linzanın fokus nöqtəsinə ($z=0$ mm) nisbətən simmetrikdir, burada minimum buraxma müşahidə olunur. T_v – nümunənin səthinə düşən işığın kiçik intensivliyində buraxma əmsalı, (qeyri-xətti optik effekt olmadıqda), T_p – nümunənin səthinə düşən işığın yüksək intensivliyində buraxma əmsalı.⁴



a



b

Şəkil 4. Buraxma əmsalının nümunənin mövqeyinin linzanın fokusuna nisbətən dəyişməsindən asılılığı: **a**- açıq diafraqma ilə z-skan, **b**- qapalı diafraqma ilə z-skan.

⁴ Кязымзаде, А.Г. Нелинейные коэффициент поглощения и показатель преломления в GaSe при лазерном возбуждении / В.М.Салманов, А.Г.Гусейнов, Р.М.Мамедов [и др.] // BDU xəbərlər, – 2019, – №4, – с. 1-10.

Qapalı diyafragma olan halda z-skan üçün buraxma əmsalının xarakterik forması Şəkilə 4, b-də göstərilmişdir. Müsbət qeyri-xətti sındırma əmsalı olan nümunə linzanın fokusundan uzaqda yerləşdiyi halda, nümunədən keçən şüalanmanın intensivliyi kiçikdir və nümunənin qalınlığı kiçik olduğundan, buraxma əmsalı hərəkətlə çox az dəyişir. Nümunə fokusa yaxınlaşan kimi şüadakı intensivlik nümunədə özünə fokuslanmaq üçün kifayət edir. Z-scan təcrübəsində buraxma əmsalının zirvəsi və vadisinin yeri qeyri-xəttiliyin işarəsini təyin etməyə imkan verir. İndeksin dəyişməsinin miqdarı z-scan üsulunda buraxma əmsalını təhlil etməklə əldə edilə bilər. $\Delta n(\omega)$ indeksindəki qeyri-xətti dəyişikliyin böyüklüyü (fokusda oxda olan qiymət, $z = 0$) faza dəyişikliyinə səbəb olur:

$$\Delta\Phi_0 = (2\pi / \lambda)\Delta n(\omega)L_{eff}, \quad (4)$$

burada $L_{eff} = (1 - \exp(-\alpha l)) / \alpha$ - nümunənin effektiv uzunluğu, λ lazer dalğasının uzunluğudur.

Fazanın dəyişməsi və buna görə də sındırma əmsalının dəyişməsi pik və vadi keçiricilikləri arasındakı fərq kimi müəyyən edilən ΔT_{pv} ölçülən kəmiyyətindən əldə edilir, $\Delta T_{pv} = T_p - T_v$. $\Delta T_{pv} \approx 0.45(\Delta\Phi)$ olduğundan qeyri-xətti sındırma əmsalı $\Delta n(\omega)$ aşağıdakı formada göstərilə bilər:

$$\Delta n(\omega) = \frac{\Delta T_{pv} \cdot \lambda \cdot \alpha}{0.405 \cdot 2\pi(1 - \exp(-\alpha l))}, \quad (5)$$

burada $\lambda = 620$ nm lazer şüalanmasının dalğa uzunluğu, $\alpha \approx 10^3$ sm⁻¹ udma zolağının kənarında GaSe-nin udma əmsalı, $l = 100$ µm işə istifadə olunan nümunələrin qalınlığıdır.

Hesablamalar göstərir ki, GaSe kristallarını gücü $W \sim 10$ MVt/sm² olan lazer şüaları ilə həyəcanlaşdırdıqda sındırma əmsalının dəyişməsi $\Delta n(\omega) \approx 0,12$ -ə bərabər olur. Aşağı həyəcanlaşma intensivliyində $W \sim 0,5$ MVt/sm², sındırma əmsalının dəyişməsi yalnız $\Delta n(\omega) \approx 0,069$ təşkil edir.

Bu fəslin növbəti bölməsi yüksək optik həyəcanlandırma

səviyyəsində GaSe nazik təbəqələrində zonaların dolma effektivliyinin öyrənilməsinə həsr edilmişdir. Məlumdur ki, yarımkeçiricilərdə yüksək optik həyəcanlanma səviyyəsində çoxlu sayda elektron-deşik cütləri əmələ gəlir. Elektronlar və deşiklər, fermionlar olduqları üçün, dalğa vektoru ilə müəyyən edilən hər bir enerji səviyyəsində Pauli prinsipinə tabe olurlar. Hər bir enerji səviyyəsində əks istiqamətdə spinləri olan iki elektrondan çox elektron ola bilməz; Elektronlarla dolmuş səviyyə artıq optik proseslərdə iştirak edə bilmir. Enerjinin minimuma endirilməsi prinsipinə görə, kvazi tarazlıq vəziyyətində olan yükdaşıyıcılar zolağın aşağı hissəsində məskunlaşır. Beləliklə, enerji baxımından ən aşağı səviyyələr elektronlarla tutulur, bu, keçiricilik zolağının dibinə yaxın vəziyyətlərin elektronlarla, valentlik zolağının yuxarı hissəsində isə deşiklərlə doldurulmasına gətirib çıxarır. Bu şəkildə zolaqların doldurulması udma zolağının kənarının şəffaflaşmasına və onun spektrin yüksək enerjili bölgəsinə tərəf sürüşməsinə səbəb olur.

Ekspərimental nəticələr göstərdi ki, lazer şüalarının təsiri ilə yaranan yükdaşıyıcıların konsentrasiyası $\sim 4,5 \times 10^{19} \text{ sm}^{-3}$ tərtibində olduqda udma zolağının kənarının böyük enerji oblastına tərəf sürüşməsi nəzərə çarpacaq dərəcədə artır. Lazer şüalanması nəticəsində yaranan qeyri-tarazlıq yükdaşıyıcıların konsentrasiyasını bilməklə, doldurma zonalarının hündürlüyünü ΔE təyin etmək mümkündür.

$$\Delta n = \frac{8\pi}{3h^3} (2m_e \Delta E)^{3/2} \quad (6)$$

GaSe nazik təbəqələrində effektiv kütlənin qiymətini ($m_h = 0,5m_0$) və qeyri-tarazlıq yükdaşıyıcılarının konsentrasiyasını ($\Delta n = 4,5 \times 10^{19} \text{ sm}^{-3}$) bilməklə (6) tənliyindən ΔE –nin qiymətini müəyyən edə bilərik, $\Delta E \sim 40 \text{ meV}$.

Lazer şüalarının təsiri ilə InSe filmlərində termal qeyri-xəttilik fenomeni kəşf edilmişdir. Ekspərimental nəticələrin göstərdiyi kimi, lazer şüalarının intensivliyi artdıqca buraxma əmsalı azalır və spektr daha uzun dalğalara doğru sürüşür.

Temperatur artdıqca InSe nazik təbəqələrində qadağan olunmuş zolağın eninin azalması aşağıdakı empirik ifadə ilə təsvir edilə bilər.

$$E_g(T) = 1250 \text{ meV} - \frac{0.58T^2}{T + 226 \text{ K}} \frac{\text{meV}}{\text{K}} \quad (7)$$

Həqiqətən də, (7) düsturundan hesablamalar göstərir ki, InSe kristalının lazer şüalanması ilə 50-60 °C-ə qədər qızdırılması udma kənarının uzun dalğalı bölgəsinə tərəf ~ 10 meV sürüşməsinə səbəb ola bilər.

Beləliklə, təqdim olunan eksperimental nəticələr göstərir ki, lazer həyəcanlandırması altında InSe nazik təbəqələrinin optik parametrlərinin termal qeyri-xəttiliyini aşkar etmək və öyrənmək üçün sadə bir üsuldən istifadə edilə bilər ki, bu da termal induksiya edilmiş qeyri-xəttiliyi elektron mənşəli optik qeyri-xəttilərdən ayırmağa kömək edir.

Lazer şüalanmasının təsiri altında laylı $\text{Cu}_3\text{In}_5\text{S}_9$ kristalların lüminessensiya və fotokeçiricilik xüsusiyyətləri eksperimental olaraq tədqiq edilmişdir. Şəkil 5-də müxtəlif şüalanma intensivliyində $\text{Cu}_3\text{In}_5\text{S}_9$ kristalların fotolüminessensiya spektrləri göstərilmişdir. Kristallarlar Nd:YAG lazerinin 2-ci harmonikası ilə ($h\nu = 2.34 \text{ eV}$) həyəcanlandırılmışdır. Şəkildən göründüyü kimi, $T=300 \text{ K}$ -də fotolüminessensiya spektrləri 700-950 nm diapazonunda dalğa uzunluğu bölgəsini əhatə edir.⁵

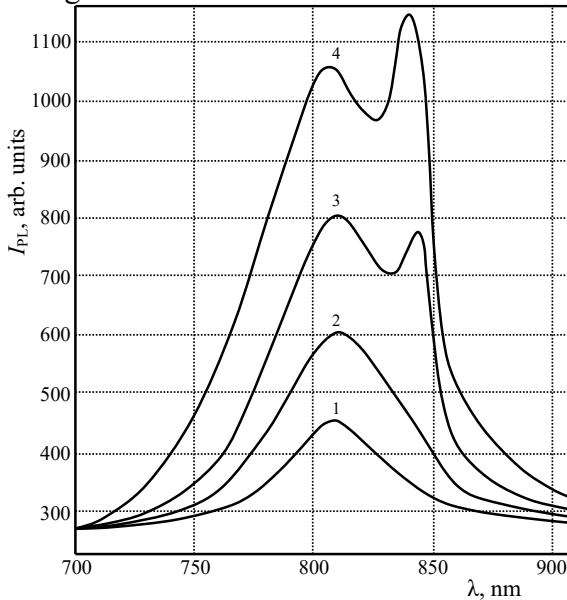
Bizim fikrimizcə, müşahidə olunan lüminessensiya zolaqları $\text{Cu}_3\text{In}_5\text{S}_9$ kristallarının qadağan olunmuş zolağında anion və kation vakansiyalarının yaratdığı məxsusi defekt səviyyəsi ilə bağlı ola bilər.

$\text{Cu}_3\text{In}_5\text{S}_9$ kristallarının elektrik keçiriciliyinin 110-350 K temperatur diapazonunda temperatur asılılığından iki donor

⁵ Гусейнов, А.Г. Особенности люминесценции и фотопроводимости слоистых кристаллов $\text{Cu}_3\text{In}_5\text{S}_9$ под действием лазерного излучения / А.Г.Кязым-заде, В.М.Салманов, Р.М.Мамедов [и др.] Оптика и Спектроскопия, – 2016, – 121(6), – с. 966-969.

səviyyəsinin aktivləşmə enerjiləri müəyyən edilmişdir: 0,28 və 0,76 eV. Aşağı temperaturda kiçik donor səviyyələri qismən boşdur. Buna görə də aşağı temperaturda işıqla həyəcanlanan elektronlar valent zolağından lokal donor səviyyələrinə keçərək kristalın fotokeçiriciliyini yaradır.

0,9-1,5eV enerji diapazonunda olan fotocərəyan kristal qəfəsin anion-kation vakansiyalarının yaratdığı donor və akseptor səviyyələri ilə bağlıdır.



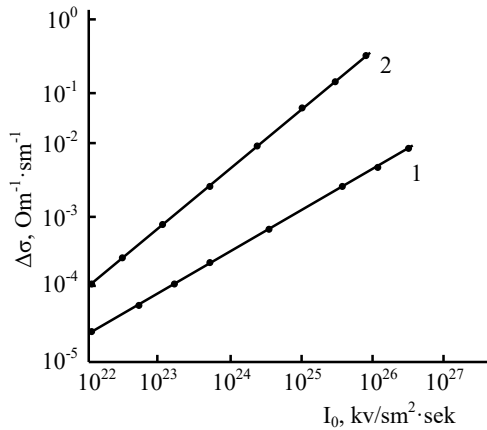
Şəkil 5. Lazer şüalarının müxtəlif intensivliklərində $\text{Cu}_3\text{In}_5\text{S}_9$ kristallarının fotolüminessensiya spektrləri, I ($\text{κVt/sm}^2 \cdot \text{san.}$):
1- $5 \cdot 10^{23}$, 2- $3 \cdot 10^{24}$, 3- $5 \cdot 10^{25}$, 4- $2 \cdot 10^{26}$.

Dissertasiyanın üçüncü fəslü A^{I} , B^{III} и C^{VI} laylı yarımkəçiricilərdə ikifotonlu və üçfotonlu udulma proseslərinin eksperimental tədqiqinə həsr edilmişdir. Lazer şüalarının təsiri altında $\text{Cu}_3\text{Ga}_5\text{Se}_9$ yarımkəçirici birləşmələrdə ikifotonlu fotokeçiricilik hadisəsi eksperimental olaraq tədqiq edilmiş və udulma əmsalı müəyyən edilmişdir.

Fotocərəyan və lazer şüalanma impulsları yaddaş

osiloskopunun (Tektronix TDS-1002B) ekranında tək nanosaniyəlik impulsları qeyd etməyə imkan verən texnikadan istifadə etməklə qeydə alınıb.

Eksperimental nəticələrin göstərdiyi kimi, $\text{Cu}_3\text{Ga}_5\text{Se}_9$ kristalları YAG:Nd^{+3} lazerinin ikinci harmonikası ilə həyəcanlandığında qeyri-tarazlıq fotokeçiriciliyinin ($\Delta\sigma$) amplituda qiymətinin lazer işığının intensivliyindən (I_0) asılılığı xətti xarakter daşıyır (Şəkil 6, əyri 1).



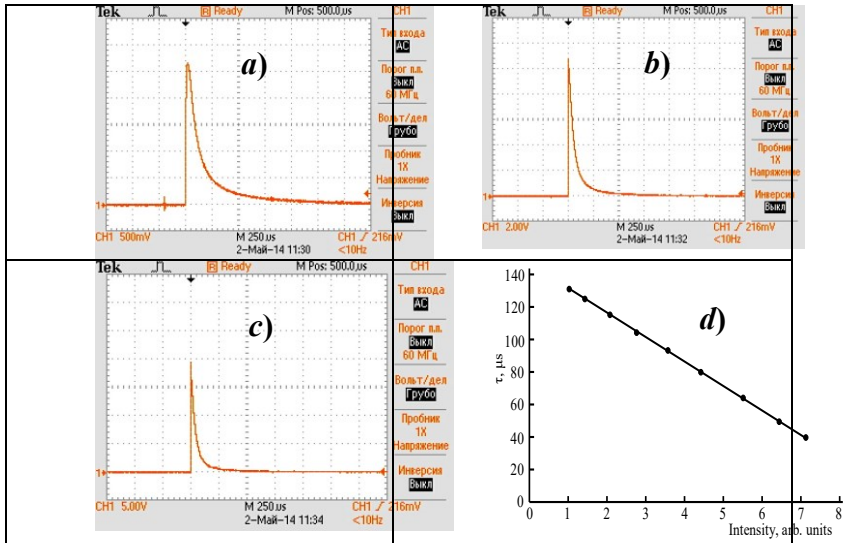
Şəkil 6. Fotocərəyanın lazer şüalarının intensivliyindən asılılığı:

- 1- enerjisi $\hbar\omega = 2,34\text{eV}$ olan 2-ci harmonika ilə həyəcanlanma,
- 2- enerjisi $\hbar\omega = 1,17\text{eV}$ olan lazer şüaları ilə həyəcanlanma.

Kvantın enerjisi ($\hbar\omega = 1,17\text{ eV}$) kristalın qadağan olunmuş zolağının enindən ($E_g \sim 1,74\text{ eV}$) kiçik olan halda ($\hbar\omega < E_g$) isə kristalların işıqla həyəcanlanması zamanı kvadratik asılılıq müşahidə olunur, $\Delta\sigma \sim I_0^2$ (əyri 2).

Tarazlıqda olmayan fotokeçiriciliyin relaksasiya əyriləri Şəkil 7, a, b, c-də göstərilmişdir. Şəkildən göründüyü kimi, nisbətən aşağı həyəcanlaşma intensivliyində relaksasiya müddəti $\tau \sim 10^{-4}$ san. olmuşdur. Həyəcanlaşma intensivliyi artdıqca relaksasiya müddəti azalır. Relaksasiya müddətinin (τ) lazer şüalarının intensivliyindən

(I_0) asılılığı Şəkil 7, d-də göstərilmişdir. İntensivliyin $2 \cdot 10^{25}$ kv/sm²·san-dan $2 \cdot 10^{26}$ kv/sm²·san-a qədər dəyişməsi relaksasiya müddəti τ -nin təqribən üç dəfə azalmasına səbəb olur. Yaşama müddətinin azalması lazer radiasiyasının yaratdığı qeyri-tarazlıq yükdaşıyıcıların konsentrasiyasının artması ilə bağlı ola bilər. Hesablamalar göstərir ki, həyəcanlanma intensivliyinin $I_0 = 2 \cdot 10^{26}$ kv/sm²·san. qiymətində qeyri-tarazlıq yükdaşıyıcılarının konsentrasiyası $\sim 10^{18}$ sm⁻³ tərtibində olur.



Şəkil 7. Lazer şüalarının müxtəlif intensivliklərində $\text{Cu}_3\text{Ga}_5\text{Se}_9$ kristallarında tarazlıqda olmayan fotokeçiriciliyin relaksasiya ayrılırları,

I_0 , kv/sm²·san: 1 - $2 \cdot 10^{23}$, 2 - $1 \cdot 10^{24}$, 3 - $6 \cdot 10^{25}$.

$\Delta\sigma \sim f(I_0)$ asılılığının xarakterindən asılı olaraq keçirici zonada qeyri-tarazlıq yükdaşıyıcılarının yaranma mexanizmi haqqında mülahizə söyləmək olar. Lazer impulsunun Δt müddəti yükdaşıyıcıların xarakterik yaşama müddəti τ -dan qısa olduğundan ($\Delta t < \tau$), xüsusi fotokeçiriciliyin qiyməti yalnız generasiya sürəti ilə müəyyən ediləcək və aşağıdakı ifadə ilə təmsil oluna bilər:

$$\Delta\sigma_{\text{yil.}} = e\mu k\beta I_0 \Delta t \quad (8)$$

burada e - elektronun yükü, μ - yükdaşıyıcının yürüklüyü, k - udma əmsalı, β -kvant çıxışı, I_0 -ışığın intensivliyi, Δt -həyəcanlandırıcı işıq impulsunun müddətidir.

Birfotonlu udulma halında udma əmsalı k işığın intensivliyindən asılı deyil, onda xüsusi fotokeçiricilik düşən işığın intensivliyinə mütənəsib olacaqdır $\Delta\sigma_{\text{xüs}} \sim I_0$. Çoxfotonlu udma halında udma əmsalı $k^n \sim I_0^{n-1}$ asılılığı ilə ifadə olunur. İkifotonlu udulmada udma əmsalı $\kappa^{(2)} \sim I_0$. Buna görə də, ikifotonlu həyəcanlanma zamanı fotokeçiriciliyin həyəcanlaşdırıcı işığın intensivliyindən asılılığı kvadratik xarakter daşıyır $\Delta\sigma_{\text{xüs}} \sim \kappa^{(2)}(I_0) I_0 \sim I_0^2$. Beləliklə, fotokeçiriciliyin lazer şüalarının intensivliyindən kvadratik asılılığının aşkar edilməsi yarımkeçirici kristallarda ikifotonlu fotokeçiriciliyin həyata keçirildiyini göstərir.

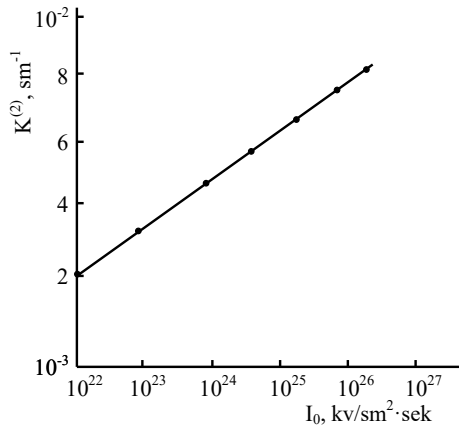
Həqiqətən də, eksperimental nəticələrimizin göstərdiyi kimi, neodim lazerin ikinci harmonikası ilə $\text{Cu}_3\text{Ga}_5\text{Se}_9$ kristallarının birfotonlu həyəcanlanması zamanı ($\hbar\omega > E_g$) valentl zolağından keçiricilik zolağına yükdaşıyıcıların keçidi baş verdikdə, fotokeçiriciliyin lüks-amper xarakteristikası (LAX) xətti olur (şək. 6, əyri 1).). İkifotonlu həyəcanlanma ilə kvadratik asılılıq müşahidə olunur (şəkil 6, əyri 2).

Şəkil 8-də ikifotonlu udma əmsalının həyəcanlaşma intensivliyindən asılılığı göstərilir. Şəkildən göründüyü kimi, $k^{(2)}$ -nin I_0 -dan yüksək işıq intensivliyinə qədər asılılığı xəttidir. Işıq intensivliyi $I_0 = 1 \cdot 10^{25} \text{ kv/sm}^2 \cdot \text{san}$ olduqda ikifotonlu udma əmsalı $7 \cdot 10^{-3} \text{ sm}^{-1}$ olur.

Fotokeçiriciliyin eksperimental tədqiqatı nəticəsində müəyyən edilmiş ikifotonlu udma əmsalının qiyməti nəzəri qiymətlərlə müqayisə edilmişdir. İkifotonlu udma əmsalının nəzəri qiyməti aşağıdakı düsturla müəyyən edilir:

$$k^{(2)} = \frac{64\pi e^4 M^{\frac{1}{2}} E_g (2\hbar\omega - E_g)^3 f_{cv}}{3\varepsilon^2 (2\hbar\omega)^4 m_0} \cdot I_0, \quad (9)$$

burada E_g -qadağan olunmuş zolağın eni, I_0 -nümunəyə süşən işığın intensivliyi, ε -maddənin dielektrik sabiti, $\hbar\omega$ -nümunəyə düşən kvantın enerjisi, M -gətirilmiş effektiv kütlə, f_{cv} -ossilyator qüvvəsidir.



Şəkil 8. İkifotonlu udma əmsalının lazer şüalarının intensivliyindən asılılığı.

$\text{Cu}_3\text{Ga}_5\text{Se}_9$ kristallarının müvafiq parametrləri nəzərə alınmaqla (9) düsturuna əsasən ikifotonlu udma əmsalının hesablanmış qiyməti, $I_0 = 1 \cdot 10^{25} \text{ kv/sm}^2 \cdot \text{san}$ işıq intensivliyində $k^{(2)} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ sm}^{-1}$ qiymətini verir. Göründüyü kimi, bu qiymət eksperimental olaraq tapılmış qiymətlə yaxşı uyğunlaşır.

Yekun olaraq, işığın təsiri altında müşahidə olunan keçidlərin iki mərhələli həyəcanın nəticəsi olmadığına dair təbii olaraq yaranan sual üzərində dayanacağıq. Bununla əlaqədar qeyd etmək lazımdır ki, əgər bizim vəziyyətimizdə iki pilləli keçid üstünlük təşkil edirdisə, o zaman fotokeçiricilik ölçmələrindən tapılan udma əmsalının işığın intensivliyindən asılılığı bütün tədqiq olunan işıq

intensivliyi diapazonunda xətti qala bilməz, yüksək həyəcan səviyyələrində aşqar mərkəzlərinin doldurulması baş verir və iki mərhələli udma əmsalı doyma yaşamalıdır. Təcrübədə, təqdim olunan məlumatlardan görüldüyü kimi, vəziyyət əksinədir.

Yuxarıda qeyd edildi ki, həyəcanlandırıcı lazer şüalanmasının parametrlərindən və tədqiq olunan maddənin fiziki parametrlərindən asılı olaraq, yarımkeçiricilərdə çoxfotonlu udulmasının öyrənilməsi üçün müxtəlif üsullardan istifadə edilə bilər: optik udulmanın birbaşa ölçülməsi, fotoluminessensiya və qeyri-tarazlıq fotokeçiriciliyi. Fikrimizcə, çoxfotonlu proseslərin eksperimental tədqiqi üçün radiativ rekombinasiya üsulu və laylı qalium sulfid (GaS) kristalları ən uyğun birləşmədir.

Qallium sulfidin $T = 300$ K-də qadağan olunmuş zolağının eni $E_g = 2,53$ eV-a bərabərdir, buna görə də Nd:YAG lazerinin 2-ci harmonikası ilə ($\hbar\omega = 2,34$ eV) ikifotonlu, 1-ci harmonikası ilə ($\hbar\omega = 1,17$ eV) üçfotonlu optik udma hadisəsi baş verə bilər.

Nd:YAG lazerinin ikinci harmonikası ($\hbar\omega = 2.34$ eV) ilə ikifotonlu həyəcanlandırma altında GaS kristallarının luminesans spektrlərində 415 nm və 490 nm dalğa uzunluğu ilə iki maksimum müşahidə edilir. Enerjisi $\hbar\omega = 3.00$ eV olan zəif yüksək enerjili emissiya xətti, görünür, düz optik keçidlərlə bağlıdır. Enerjisi $\hbar\omega = 2.53$ eV olan intensiv emissiya xətti isə fundamental udma kənarında çəp keçidlərlə əlaqələndirilir. Bunu GaS-nin udma spektrindən əldə etdiyimiz məlumatlar da təsdiq edir. Lüminessensiyanın intensivliyinin lazer şüalarının intensivliyindən asılılığı $I_{\text{lüm}} = I_{\text{laz}}^{2.5}$ qanunu ilə dəyişir.

Çəp optik keçidlə əlaqəli emissiya xətlərinin intensivliyi düz optik keçidlə əlaqəli emissiya xətlərinin intensivliyindən bir tərtib yüksəkdir. Bizum fikrimizcə, bu, çəp keçidə malik olan yarımkeçiricilərdə tez-tez rast gəlinən özünü udma prosesi ilə bağlıdır. Elektronları hər iki vadiyə həyəcanlandırmaqla düz və çəp şüalanma rekombinasiyası əldə etmək mümkündür. Elektronların tez bir zamanda ən aşağı enerjilərə qədər relaksasiyasına baxmayaraq, yəni, onlar çəp keçidə daxil olur və düz keçidlər zamanı yüksək enerjili fotonların güclü udulmasına baxmayaraq, bəzi yüksək

enerjili emissiyalar çox olan nazik nümunələrdə, xüsusən də lazer həyəcanı ilə aşkar edilə bilər. Bu cür əlverişsiz şəraitdə düz keçidləri müşahidə etmək yalnız birbaşa keçidlərin nisbətən yüksək ehtimalına görə mümkündür.

GaS kristallarının üçfotonlu həyəcanlanması zamanı maksimumu ~ 490 nm olan xarakterik emissiya müşahidə edilir. Bununla belə, radiasiya şüalanmasının intensivliyi ikifotonlu həyəcanlandırma ilə müqayisədə çox zəifdir. Üçfotonlu həyəcanlaşma üçün lüminessensiya intensivliyinin həyəcanlanma intensivliyindən asılılığı $I_{\text{lüm}} = I_{\text{laz}}^{3.4}$ şəklində olur. Beləliklə, GaS kristallarında xarakterik emissiya şüalanmasının olması və lüminessensiyanın intensivliyinin həyəcanlanma intensivliyindən asılılığı üçfotonlu udma prosesinin mövcudluğunu göstərir.

GaS kristallarında ikifotonlu udma əmsalının (K_2) üçfotonlu udma əmsalına (K_3) nisbəti müəyyən edilmişdir. Bunun üçün eyni şüalanmaya səbəb olan Nd:YAG lazerinin birinci (I_1) və ikinci (I_2) harmonikalarının işıq intensivliyi ölçülmüşdür. Bu halda yükdaşıyıcıların generasiya sürətlərinin $K_2 I_2 = K_3 I_1$ -ə bərabər olduğunu fərz etsək, $I_1 = 10$ MW/sm² intensivliyi üçün (K_2/K_3) nisbəti təxminən 10^4 tərtibində olur. Bu nisbəti nəzəri hesablamadan alınan qiymətlə müqayisə etmək olar. Nəzəri hesablamalar aşağıda verilən düstur vasitəsilə aparılmışdır

$$(K_2/K_3)_{\text{nəz.}} = 0.1 \frac{\mu \hbar^2 \omega_1^4 c}{\pi e^2 (3\hbar \omega_1 - \Delta) I_1 \omega_2} \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^5 \quad (10)$$

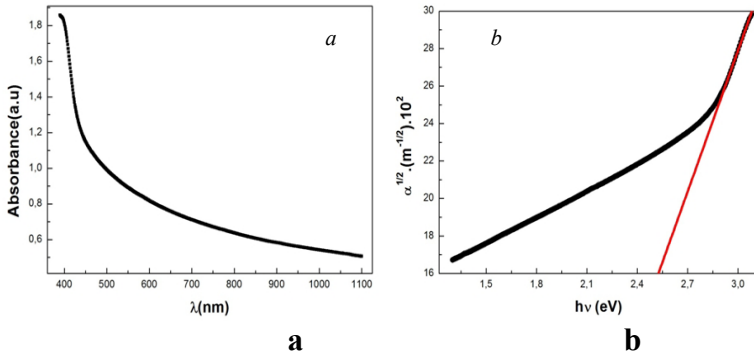
burada $\mu = \frac{m_e m_n}{m_e + m_n}$ - effektiv kütlələrin nisbəti, n -

sındırma əmsalı, Δ - qadağan olunmuş zolağın eni, ω_1 və ω_2 - Nd:YAG lazerinin 1-ci və 2-ci harmonikalarının tezlikləridir, I_1 ω_1 tezliyində işığın intensivliyidir.

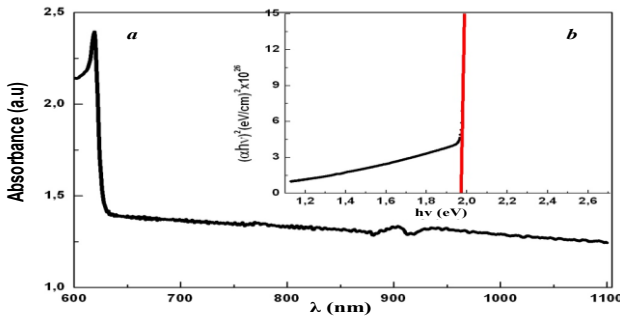
$I_1 = 10$ MVt/sm² intensivliyində bu nisbət $3 \cdot 10^4$ təşkil edir ki, bu da təcrübədən alınan qiymətlə yaxşı uyğunlaşır. Hesablamalar göstərir ki, üçfotonlu udma prosesi zamanı lazer şüalanması nəticəsində yaranan qeyri-tarazlıq yükdaşıyıcılarının konsentrasiyası

$\sim 5 \cdot 10^{12} \text{ sm}^{-3}$ qiymətinə çatır.

Dissertasiyanın növbəti bölməsi lazer şüalanması ilə iki və üç fotonlu həyəcanlandırma altında GaS-GaSe heterostrukturunun fotolüminessensiyasının tədqiqinə həsr edilmişdir. 300 K-də GaS kristallarının udma spektri 400-dən 1100 nm-ə qədər dalğa uzunluqlarını əhatə edir (Şəkil 9,a). 600 nm dalğa uzunluğundan başlayaraq daha qısa dalğa uzunluqlarına doğru udmada nəzərəcarpacaq artım müşahidə olunur. GaS-nin çəp keçidə malik yarımkəçirici olduğunu nəzərə alsaq, $\alpha^{1/2} \sim f(h\nu)$ asılılığından qadağan olunmuş zolağın eni təyin oluna bilər və onun $E_g=2,53 \text{ eV}$ -ə bərabər olduğu müəyyən edildi (Şəkil 9,b). Nazik GaSe filmləri ilə aparılan oxşar tədqiqatlar göstərdi ki, qadağan olunmuş zolağın eni $E_g=2,02 \text{ eV}$ -dur (şək. 10).



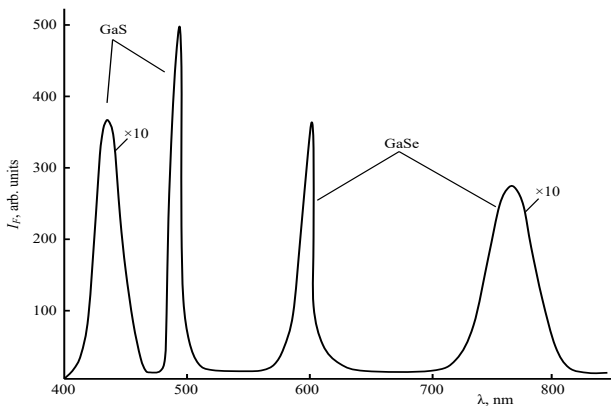
Şəkil 9. a- GaS kristallarının udma spektri, b- $\alpha^{1/2} \sim f(h\nu)$ asılılığı.



Şəkil 10. a- GaSe kristallarının udma spektri, b- $\alpha^2 \sim f(h\nu)$ asılılığı.

Şəkil 11-də Nd:YAG lazerinin ikinci harmonikası ($\hbar\omega=2.34$ eV) ilə həyəcanlandıqda GaS-GaSe heterostrukturunun emissiya spektrləri verilmişdir. Şəkildən göründüyü kimi, GaS-GaSe heterostrukturunun lüminessensiya spektrlərində dalğa uzunluqları 415 nm, 490 nm, 607 nm və 760 nm olan dörd maksimum müşahidə edilir. Lazer şüalanmasının enerjisinin GaS-in qadağan olunmuş zolağının enindən kiçik olduğundan ($\hbar\omega < E_g$), 415 nm və 490 nm-də maksimumları olan emissiya xətlərinin ikifotonlu həyəcanlanma ilə bağlı olduğunu iddia etmək olar. 607 nm və 760 nm-də müşahidə olunan maksimumlar birfotonlu həyəcanlanması ilə əlaqələndirilir, çünki lazer şüalanma enerjisi GaSe-nin qadağan olunmuş zolağının enindən böyükdür ($\hbar\omega > E_g$).

GaSe-nin udma spektrlərinin lüminesans spektrləri ilə müqayisəsi onu deməyə əsas verir ki, GaSe-də maksimumu $\lambda = 607$ nm olan, birfotonlu həyəcanlanma zamanı aşkar edilən rekombinasiya şüalanması zona-zona keçidləri, maksimumu $\lambda = 760$ nm olan şüalanma isə dərin aşqar səviyyələri ilə əlaqədardır. Qeyd etmək lazımdır ki, dalğa uzunluğu 490 nm ($\hbar\omega=2,53$ eV) olan intensiv emissiya xətti fundamental udma kənarında çəp keçidlərlə əlaqələndirilir. Bunu GaS-nin udma spektrindən əldə etdiyimiz məlumatlar da təsdiq edir. Enerjisi $\hbar\omega=3.00$ eV olan zəif yüksək enerjili emissiya xətti birbaşa düz optik keçidlərlə bağlıdır.



Şəkil 11. GaS-GaSe heterostrukturunun Nd:YAG lazerinin 2-ci harmonikası ilə həyəcanlandırılmış ($\hbar\omega=2.34$ eV) şüalanma spektri.

Şəkil 11-dən göründüyü kimi, çəp optik keçidlərlə əlaqəli GaS-də emissiya xətlərinin intensivliyi düz optik keçidlərlə əlaqəli emissiya xətlərinin intensivliyindən bir tərtib yüksəkdir. Fikrimizcə, bu, çəp keçidə malik olan yarımkeçiricilərdə tez-tez rast gəlinən özünüudma prosesi ilə bağlıdır.⁶

Foton enerjisi $\hbar\omega=1,17$ eV olan Nd:YAG lazerinin birinci harmonikası ilə GaS-nin üç fotonlu həyəcanlanması zamanı yalnız maksimum $\lambda=490$ nm olan xarakterik şüalanma müşahidə edilir. Təəccüblü deyil ki, iki və üçfotonlu həyəcanlanması ilə maksimum $\lambda=490$ nm olan eyni emissiya xətti müşahidə olunur. Bu onunla əlaqədardır ki, qeyri-tarazlıq yükdaşıyıcılarının yaranması prosesi yalnız lazer şüalanmasının tezliyindən və intensivliyindən asılıdırsa, yükdaşıyıcıların sonrakı hərəkət və rekombinasiya prosesləri əksər hallarda bu yükdaşıyıcıların hansı radiasiyadan yarandığından praktik olaraq asılı deyil.

Məlumdur ki, birfotonlu prosesin baş vermə ehtimalı lazer şüalanma intensivliyinin birinci tərtibi ilə mütənəsbidir.

$$W^{(1)} = \sigma^{(1)}(\omega)I \quad (11)$$

burada $\sigma^{(1)}(\omega)$ -effektiv kəsik, I-lazer şüalarının intensivliyidir.

Birfotonlu proseslərdən fərqli olaraq, çoxfotonlu proseslərin ehtimalı şüalanma intensivliyindən qeyri-xətti asılıdır

$$W^{(k)} = \sigma^{(k)}(\omega)I^{(k)} \quad (12)$$

burada k çoxfotonlu prosesində iştirak edən fotonların sayıdır. Buna görə də, üçfotonlu həyəcanlandırmada lüminessensiyanın intensivliyi ikifotonlu həyəcanlandırmanın intensivliyindən çox aşağı olmalıdır, bu da təcrübədə müşahidə olunur. Bundan əlavə, üç fotonlu udma prosesində emissiya xəttinin yarım eni ikifotonlu

⁶ Салманов, В.М. Фотолюминесценция гетероструктур GaS-GaSe при двух и трехфотонном возбуждении лазерным излучением / А.Г.Гусейнов, Р.М.Мамедов [и др.] // Известия ВУЗ-ов, Физика, Томск, – 2022, – 65(9), – с. 54-59.

udma halından 2 dəfə böyükdür və 60 nm-dir. Lüminesans intensivliyinin həyəcanlanma intensivliyindən asılılığı $I_{\text{lüm}} = I_{\text{laz}}^3$ düsturu ilə ifadə olunur.

Beləliklə, tədqiq olunan maddəni onun qadağan olunmuş zolağının enindən 3 dəfə kiçik enerjili ($\hbar\omega=1,17\text{eV}$) lazer şüaları ilə həyəcanlandıqda lüminessensiyanın meydana gəlməsi və lüminessensiyanın həyəcanlandırıcı intensivlikdən asılılığı GaS kristallarında üçfotonlu udma prosesinin mövcudluğundan xəbər verir. GaSe-də ikifotonlu həyəcanlanma zamanı maksimumu $\lambda=607$ nm olan emissiya xətti birfotonlu həyəcanlanma zamanı aşkar edilən emissiya xətti ilə eynidir. Bununla belə, emissiya xəttinin intensivliyi birfotonlu həyəcanlandırma ilə müqayisədə çox zəifdir. Lüminessensiya intensivliyinin həyəcanlanma intensivliyindən asılılığı GaS-nin ikifotonlu həyəcanlanması ilə eynidir və kvadratikdir. İkifotonlu həyəcanlaşma zamanı yaranan yükdaşıyıcıların konsentrasiyasını ölçməklə, lazer işığının $I_1=10$ MVt/sm² intensivliyində üçfotonlu udma prosesində $5\cdot 10^{12}$ sm⁻³ yükdaşıyıcıların yarandığını güman etmək olar.

Dissertasiyanın dördüncü fəslində lazer şüalarının təsiri ilə A^I, B^{III} и C^{VI} yarımkeçirici birləşmələrində baş verən qeyri-tarazlıq elektron prosesləri araşdırılır.

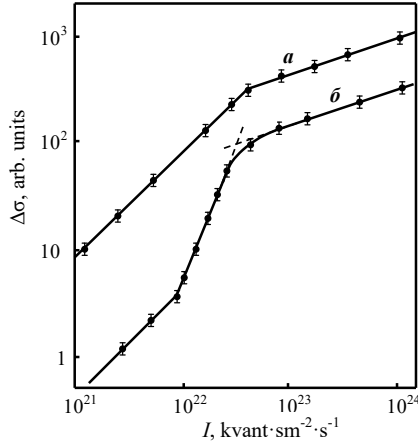
Spesifik laylı quruluşuna görə GaSe kristalları laylara perpendikulyar istiqamətdə energetik baryerlərin olması səbəbindən yürüklüyün güclü anizotropiyasına malikdir. Kristalların bu xüsusiyyəti adətən elektrik ölçmələrindən istifadə etməklə öyrənilir. Bu üsul yüksək müqavimətli nümunələrdə yararsızdır və maneələrin təbiətini müəyyən etməyə imkan vermir. Optik və lüminessensiya üsulları da qəbuledilməzdir, çünki layların olması laylar boyunca optik ölçmələrə imkan vermir və fotolüminessensiya spektrlərində müşahidə olunan ayrı-ayrı emissiya xətlərinin təbiəti həmişə birmənalı şərh edilə bilməz. Yüksək optik həyəcanlandırma səviyyəsində laylı kristalların fotokeçiriciliyinin öyrənilməsi üsulu bu cür çatışmazlıqları aradan qaldırmağa imkan verir. Bu halda, kontaktların konfigurasiyası nümunəyə tətbiq olunan xarici elektrik sahəsini təbəqələr boyunca və onun əks istiqamətində yönəltməyə imkan verir. Digər tərəfdən,

yüksək optik həyəcanlaşmada elektron-deşik cütlərinin böyük konsentrasiyası yarandığından yarımkeçiricilərin cırlaşmasına qədər energetik baryerlərin hündürlüyünü idarə etmək olar.

Biz yüksək optik həyəcanlandırma səviyyəsində GaSe-nin fotokeçiricilik xüsusiyyətlərini öyrənmişik. Tədqiq olunan GaSe monokristalları Bridqman üsulu ilə yetişdirilmiş və p-tipli keçiriciliyə malik olmuşdur. Cari kontaktların düzbucaqlı nümunənin səthində yerləşdirilməsi “c” optik oxla nisbətən uzununa ($\vec{E} // \vec{c}$) və eninə ($\vec{E} \perp \vec{c}$) istiqamətlərdə fotokeçiriciliyi ölçməyə imkan verir. Nümunələrin xüsusi müqaviməti 10^3 - 10^5 Ohm·sm aralığında dəyişmişdir. Holl ölçmələri ilə müəyyən edilən yükdaşıyıcının yürüklüyü və konsentrasiyası müvafiq olaraq $20 \text{ sm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ və $1 \cdot 10^{13} \div 4 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-3}$ olmuşdur.

GaSe kristalları azot lazeri ilə həyəcanlaşan maye lazerin (aktiv mühüt-rodamin 6G) impulsları ilə şüalandırılmışdır. Lazer radiasiyasının dalğa uzunluğunun tənzimləmə diapazonu ($594 \div 643$) nm GaSe kristallarının udma zolağının əsas kənarı ilə tamamilə üst-üstə düşür ($E=300 \text{ K}$ -də $E_g=2.02 \text{ eV}$). İmpulsun müddəti 3 ns, gücü 120 kVt, impulsun təkrarlanma tezliyi isə 20 Hz idi. Lazer radiasiyasının intensivliyi kalibrələnmiş neytral işıq filtrlərindən istifadə etməklə tənzim edilmişdir.

Fotokeçiriciliyin maksimumlarına uyğun gələn lazer şüalarının müxtəlif dalğa uzunluqlarında ölçülmüş lüks-amper xarakteristikaları (LAX) Şəkil 12-də göstərilmişdir, a və b asılılıqları tətbiq olunan elektrik sahəsinin “c” oxuna perpendikulyar və paralel istiqamətində yönəldildiyi göstərir. Şəkildən görüldüyü kimi (a əyrisi) $\vec{E} \perp \vec{c}$ halında fotocərəyanın həyəcanlanma intensivliyindən xətti asılılığı, $\vec{E} // \vec{c}$ halında müəyyən intensivlik diapazonunda isə (b əyrisi) daha güclü asılılıq $\Delta\sigma \sim I^{2.5}$ (burada $\Delta\sigma$ - fotokeçiricilik, I - düşən işığın intensivliyidir) müşahidə olunur.



Şəkil 12. GaSe kristallarının fotokeçiriciliyinin cərəyan kontaktlarının müxtəlif konfigurasiyasında ($\vec{E} \perp \vec{c}$, a əy.) və ($\vec{E} \parallel \vec{c}$, b əy.) lazer şüalarının intensivliyindən asılılığı

Fotokeçiriciliyin lüks-ampere xarakteristikasını enerji baryerinin qeyri-tarazlıq yükdaşıyıcılarının yüüklüünə təsiri ilə izah etmək olar. Həqiqətən, baryer olduqda, fotocərəyan baryerin hündürlüyündə ΔE_0 aktivləşən yükdaşıyıcılar tərəfindən müəyyən edilir. Həyəcanlaşma səviyyəsi artdıqca, qeyri-tarazlıq daşıyıcılarının Δn konsentrasiyası da artır və onun miqdarı müəyyən bir qiymətə çatdıqda ($\Delta n \approx N_c$, burada N_c –səviyyələrin effektiv hal sıxlığıdır) lazer şüalarının təsirlə yarımkəçiridə cırılma hadisəsi baş verir. Həyəcanlanma səviyyəsinin daha da artması ilə kvazi-Fermi səviyyəsinin zolaqlar içərisində sürüşməsi baş verir, bu da öz növbəsində baryerin hündürlüyünü azaldır. Bu vəziyyətdə fotokeçiricilik aşağıdakı kimi təsvir edilə bilər:

$$\Delta\sigma(I) = e\mu_0\Delta n(I)\exp\left(-\frac{\Delta E(I)}{kT}\right) = e\mu_0\Delta n(I)\exp\left(-\frac{\Delta E_0 - \xi_n(I)}{kT}\right), \quad (13)$$

burada μ_0 - baryer olmadıqda yürüklük, ξ_n -kvazi-Fermi səviyyəsidir.

Hesablamalar göstərir ki, göstərilən oblastda LAX (13) ifadəsi ilə təsvir edilə bilər. Bu bölgənin ölçüsü $0 \leq \xi_n \leq \Delta E_0$ şərti ilə müəyyən edildiyi üçün fotokeçiriciliyin LAX düsturlardan istifadə edərək baryerin tarazlıq halında ΔE_0 hündürlüyünü təyin etmək olar.

$$\Delta E_0 = kT \ln \left[\frac{\Delta \sigma_2 \left(\frac{I_1}{I_2} \right)^\alpha}{\Delta \sigma_1} \right], \quad (14)$$

burada $\Delta \sigma_1$ və $\Delta \sigma_2$ müvafiq olaraq I_1 və I_2 intensivliklərində fotokeçiricilik qiymətləridir, $\alpha - \Delta n \sim I^\alpha$ asılılıq göstəricisidir, $t_{im} < \tau$ (t_{im} – impuls müddəti, τ – yükdaşıyıcıların yaşama müddətidir) olduqda α vahidə bərabər olurr. Hesablamalar göstərdi ki, $\Delta E_0 \approx 50$ meV tərtibindədir. Bu baryerlər cırılma halına qədər ($\Delta n \sim 10^{18} \text{ sm}^{-3}$) qeyri-tarazlıq yükdaşıyıcılarının ekranlaşması ilə aradan qaldırılmadığından, onların aşqarların və ya defektlərin qeyri-bərabər paylanması ilə əlaqəli olmadığını güman edə bilərik. Bu baryerlərin laylı quruluşa malik yarımkeçiricilərdə layların biri-birinə nəzərən düzülüşündəki pozğunluqlar hesabına yaranıldığını mülahizə edə bilərik.

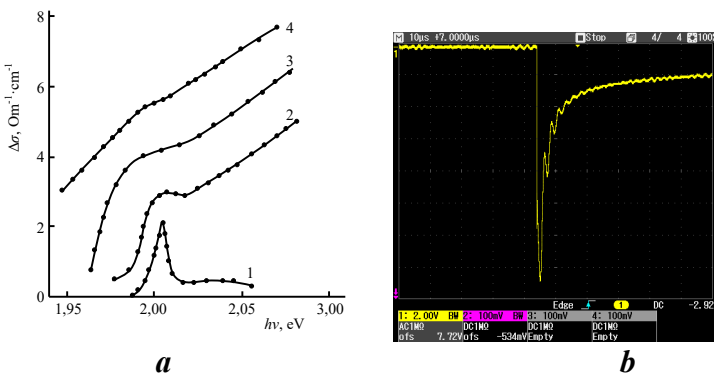
Artıq qeyd edildiyi kimi, GaSe və InSe kristallarının buraxma və lüminessensiya spektrlərində müşahidə olunan xüsusiyyətləri yüksək həyəcanlanma intensivliyində eksitonların qarşılıqlı təsiri və lazer işığının yaratdığı sərbəst yükdaşıyıcılarının Kulon qarşılıqlı təsirini ekranlaşdırılması ilə izah etmək olar. Qeyri-tarazlıq cərəyan yükdaşıyıcılarının fotokeçiriciliyini öyrənmək yolu ilə eksiton qarşılıqlı təsirinin kəşfi xüsusi maraq doğurur. Lazer həyəcanı ilə yüksək konsentrasiyalı qeyri-tarazlıq yükdaşıyıcılarının yaranması tədqiq olunan kristalların eksiton fotokeçiriciliyinə də təsir göstərməlidir.

Şəkil 13,a-da müxtəlif həyəcanlanma intensivliyində (I_0) GaSe kristallarının fotokeçiricilik ($\Delta \sigma$) spektrləri verilmişdir. Aşağı intensivliklərdə maksimumu $\hbar\omega \approx 2.00$ eV-a bərabər olan eksiton fotokeçiriciliyi müşahidə olunur. Lazer şüalarının gücü artdıqca, qeyri-tarazlıq yükdaşıyıcılarının konsentrasiyası artır, bu da eksiton oblastında fotokeçiriciliyin artmasına səbəb olur (əyri 2).

Həyəcanlaşma intensivliyinin daha da artması eksiton zolağının genişlənməsinə və tədricən aradan getməsinə səbəb olur (əyri 3 və 4), lakin eyni zamanda fundamental udma kənarında fotokeçiriciliyin kəskin artması müşahidə olunur.

Şəkil 13,b-də GaSe kristallarını Nd:YAG lazer şüalanmasının 2-ci harmonikası ilə həyəcanlandıqda fotocərəyan impulsunun ossiloqramması göstərilir. Şəkildən görüldüyü kimi iki rekombinasiya kanalı müşahidə olunur: sürətli $\tau_1 = 1,7$ mks və yavaş $\tau_2 = 20$ ms. Sürətli rekombinasiya kanalı yəqin ki, sərbəst eksitonların rekombinasiyası ilə və yavaş rekombinasiya kanalı isə aşqar mərkəzləri ilə əlaqələndirilir.

Bizim fikrimizcə, GaSe kristallarının buraxma və lüminessensiya spektrlərində müşahidə olunan xüsusiyyətləri yüksək həyəcanlaşma intensivliyində excitonların qarşılıqlı təsiri və lazer işığının yaratdığı sərbəst yükdaşıyıcılar tərəfindən Kulon qarşılıqlı təsirinin ekranlaşdırılması ilə izah edilə bilər. Həqiqətən də, GaSe kristalları lazer işığı ilə rezonanslı şəkildə həyəcanlandığında, elektronlar və dəliklər eksitonlara bağlanır. Sonradan, artan həyəcan intensivliyi ilə eksitonların sıxlığı artır və müəyyən bir kritik qiymətə çatdıqda (Mott keçidi) eksitonlar arasında qarşılıqlı təsir baş verir ki, bu da eksitonların parçalanmasına və sərbəst elektron-deşik cütlərinin yaranmasına səbəb olur.



Şəkil 13. *a*- lazer şüalarının müxtəlif intensivliklərində GaSe kristallarının fotokeçiricilik spektrləri, $W, \text{MVt/sm}^2$: 1-0.46, 2-2.28, 3-6.14, 4-12; *b*- Nd:YAG –lazerinin 2-ci harmonikası ilə həyəcanlaşan GaSe kristallarında fotokeçiriciliyin relaksasiya əyrisi.

Bu işdə həmçinin InSe kristallarında lazer şüalanmasının yaratdığı sərbəst yükdaşıyıcılarının spektrin infraqırmızı (İQ) oblastında udulması eksperimental olaraq tədqiq edilmişdir. Tarazlıqda olmayan yükdaşıyıcıları həyəcanlandırmaq üçün impulsu Nd:YAG lazerindən istifadə edilmişdir. Silikon filtdən keçən 400 Vt gücündə kvars halogen közərmə lampasından çıxan işıq sərbəst yükdaşıyıcılarda udulmanı öyrənmək üçün infraqırmızı şüalanma mənbəyi kimi istifadə edilmişdir. Dalğa uzunluqları $\lambda=(1,2-2,5)$ mikron olan işıq tədqiq olunan nümunə və kəsici filtrlərdən keçərək yüksək sürətli germanium fotodioduna fokuslanmışdır.

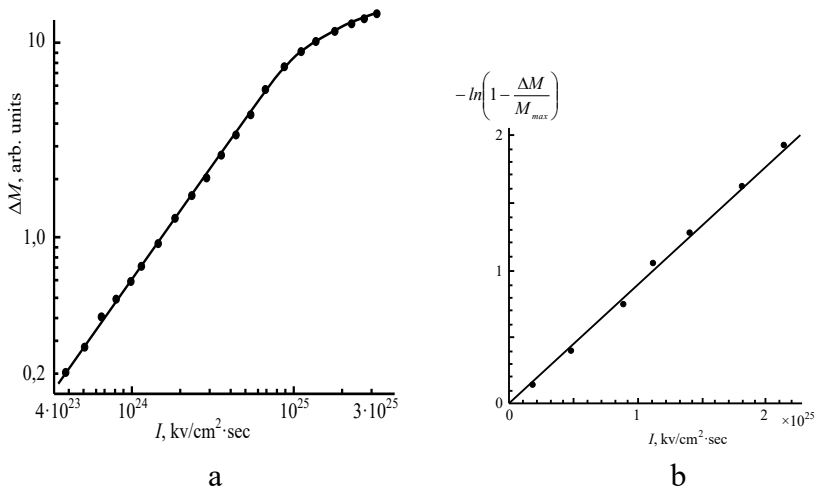
İşığın qeyri-tarazlıq elektronlar və deşiklər tərəfindən udulması ilə əlaqədar olaraq, zondlanan İQ işığının impuls modulyasiyası baş verir və bu impulsun azalması kristalda zamanla yükdaşıyıcıların sönməsini əks etdirir. Yaddaşlı osilloqrafın (TektronixTDS – 2012C) ekranında fotocərəyanın relaksasiya əyrləri müşahidə edilir.

Şəkil 14,a-da infraqırmızı (IR) işığın modulyasiya olunmuş signalının (ΔM) lazer işığının həyəcanlaşma intensivliyindən (I) asılılığı göstərilmişdir.

Şəkildən görüldüyü kimi modulyasiya olunmuş signalın xətti irəliləməsi və sonra onun doyması müşahidə olunur. Nümunədən keçən infraqırmızı (IR) işığın $\Delta M(t)$ modulyasiya aşağıdakı kimi yazıla bilər:

$$\Delta M(t) = M_{\max} \left[1 - \exp(-\sigma_{n+p} \int_0^d \Delta n(x,t) dx) \right] \quad (15)$$

burada σ_{n+p} işığın qeyri-tarazlıqlı elektron və deşiklər tərəfindən udulmasının ən kəsiyinin ümumi dəyəri, $M_{\max}$ yüksək həyəcan səviyyəsində modulyasiya signalının qiyməti, $\Delta n(x,t)$ - nümunənin səthindən x dərinliyində qeyri-tarazlıq cütlərinin konsentrasiyasıdır.



Şəkil 14. a- İnfraqırmızı (IR) işıqın modulyasiya olunmuş siqnalının (ΔM) lazer işığının həyəcanlaşma intensivliyindən (I) asılılığı, **b-**

$\ln\left(1 - \frac{\Delta M}{M_{\max}}\right)$ -in lazer şüalarının intensivliyindən asılılığı.

Qeyri-tarazlıq yükdaşıyıcıları tərəfindən işıqın udulmasının ən kəsiyini müəyyən etmək üçün impulsun $\Delta M(t)$ amplitudasını ölçülmüşdür. $\ln\left(1 - \frac{\Delta M}{M_{\max}}\right)$ -in lazer şüalarının I intensivliyindən

asılılığı şəkil 14,b-də verilmişdir. Bu asılılığın meybindən qeyri-tarazlıq yükdaşıyıcıları tərəfindən işıqın udulmasının ən kəsiyi təyin edilmişdir $\sigma_{n+p} = 2,4 \cdot 10^{-18} \text{ sm}^2$.

Hesablamalar göstərir ki, yüksək optik həyəcanlaşmada qeyri-tarazlıq yükdaşıyıcılarının konsentrasiyası $\sim 6 \cdot 10^{19} \text{ sm}^{-3}$ tərtibində olmuşdur. Bu rəqəm bir neçə tərtib tarazlıqda olan yükdaşıyıcıların və aşqarların konsentrasiyasından çoxdur. Odur ki, yüksək optik həyəcanlaşmada InSe kristallarında qeyri-tarazlıq yükdaşıyıcılarının rekombinasiyasının bipolyar xarakter daşdığını söyləmək olar.

Dissertasiya işinin bu fəslində həmçinin 2D InSe kristallarında dreyf tutumunun öyrənilməsi təqdim edilir. 1,3 mkm qalınlığında InSe nazik təbəqələri impulsun müddəti 12 ns və dalğa uzunluğu

$\lambda = 535$ nm olan lazer şüaları ilə həyəcanlaşdırılır. Nəticədə bərabər sayda qeyri-tarazlıq elektron və deşiklər yaranır. Yüksək yüüklüyə malik elektronlar nazik təbəqəni səthini tez tərk edirlər. İşıqlandırma dayandırıldıqdan sonra nazik təbəqənin ortasında qeyri-tarazlıq deşiklərinin bir hissəsi elektronlarla rekombinasiyaya olunur və neytral atomların yüksək müqavimətli oblastı əmələ gəlir.

Beləliklə, optik həyəcanlaşmanın dayandırılmasından sonra, qeyri-tarazlıq yükdaşıyıcılarının rekombinasiyası nəticəsində yaranan fotocərəyanın adi relaksiası ilə yanaşı, nazik təbəqənin anod bölgəsində və katod elektronlarında yüklənmiş müsbət ionlar bölgəsinin yaratdığı dreyf tutumu da olur. Buna görə də, relaksasiya prosesi relaksasiya növünün dissipativ axını kimi qəbul edilə bilər və ona Maksvell-Kattaneo tənlikləri tətbiq oluna bilər.

$$j + \tau \frac{dj}{dt} = -\sigma \nabla \varphi, \quad (16)$$

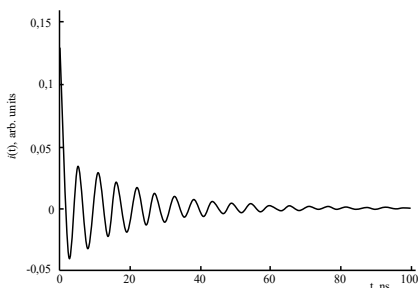
burada j - cərəyan sıxlığı, τ - fotocərəyanın relaksasiya müddəti, σ - nazik təbəqənin elektrikkeçiriciliyi, $\varphi = \frac{q}{C}$ - dreyf nəticəsində potensial ötürmə qabiliyyətidir.

Fotocərəyanın kinetikasi aşağıdakı kimi yazıla bilər:

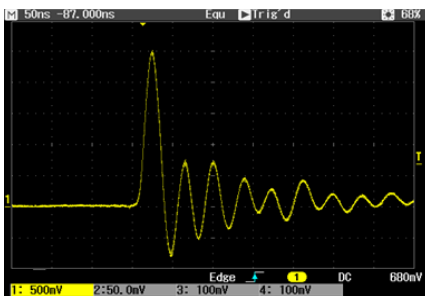
$$i = A e^{-\frac{t}{\tau}} - A' e^{-\delta t} \cos \omega t, \quad (17)$$

burada $A = \frac{vq_0}{\ell}$, $A' = \frac{q'_0 \sigma S}{C\ell}$, $A = \frac{vq_0}{\ell}$,
 $A' = \frac{q'_0 \sigma S}{C\ell}$. $A = 0,08$; $A' = 0,05$; $\tau = 0,5$ ns; $\delta = 0,05$ ns⁻¹ və
 $\omega = 20$ ns⁻¹,

(17) ifadəsinə əsasən $i(t)$ asılılığı Şəkil 15,a-da verilmişdir.



a



b

Şəkil 15. a-Maksvell-Kattaneo tənliyinə əsasən hesablanmış fotocərəyanın zamana görə dəyişməsi, **b-**Ultranazik InSe təbəqəsində lazer impulsunun təsiri ilə yaranan relaksasiya əyrisi.

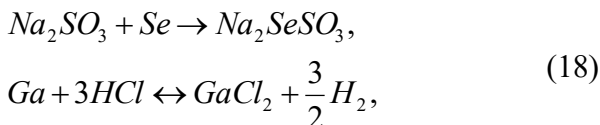
Ultranazik InSe təbəqəsinin fotocərəyanın kinetikasi Şəkil 15,b-də göstərilmişdir. Relaksasiya cərəyanının hesablanmış və eksperimental asılılıqlarını müqayisə edərək, onların yaxşı uyğunluğunu müşahidə edirik. Beləliklə, (17) tənliyi indium selenid tipli ultranazik ikiölçülü kristallarda cərəyan impulslarının relaksasiyasının riyazi modelləşdirilməsi üçün istifadə oluna bilər. Bu zaman biz indium selenidinin xassələrini nəzərə almaq zərurətini nəzərdə tuturuq. Yuxarıda qeyd edildiyi kimi, InSe nanolaylarında elektronların yürüklüyü dəşiklərin yürüklüyündən dəfələrlə yüksəkdir. Bu xüsusiyyət ikiölçülü kristallarda dreyf tutumunun meydana gəlməsi üçün lazımdır.

Beşinci fəsilə GaSe və InSe kristalları əsasında nanostrukturların alınmasının eksperimental nəticələri, strukturunun təhlili və onların elektrik, optik, fotoelektrik və lüminessent xüsusiyyətlərinin tədqiqi təqdim olunur. Az öyrənilmiş və eyni zamanda perspektivli A^3B^6 tipli laylı yarımkəçiricilərdə kvant ölçülü hadisələrin tədqiqi onların əsasında geniş funksional imkanlara malik yeni cihazların layihələndirilməsi üçün böyük perspektivlər açır.

GaSe nanohissəcikləri kimyəvi çökmə (M-CBD) üsulu ilə hazırlanmışdır. Bu vəziyyətdə substratların istehsalı, kompozisiyaların hazırlanması və istehsal prosesinin özü mühüm rol oynayır. Substrat kimi şüşə və GaSe kristallarını seçilmişdir. GaSe kristalları Bridgman üsulu ilə yetişdirilmişdir. Kristal substratların ölçüləri $10 \times 6 \times 0,5 \text{ mm}^3$

olmuşdur.

Şüşə substratda GaSe-nin nazik təbəqələri natrium selenosülfat (Na_2SeSO_3) və qalium xlorid ($GaCl_3$) olan məhluldan hidrokimyəvi çökmə yolu ilə yetişdirildi. İlk xammal kimi yüksək təmiz maddələrdən istifadə edilmişdir: Se , Ga , Na_2SO_3 və HCl . Əvvəlcə Na_2SeSO_3 və $GaCl_3$ birləşmələri aşağıdakı reaksiyalardan istifadə edərək sintez edildi:



Sonra isə natrium selenosülfat və qalium xloridin sulu məhlulları stexiometrik tərkibə uyğun tərkiblə GaSe əmələ gəlməsi üçün lazım olan nisbətdə hazırlanmışdır. Bu halda substratlar bir ilə on dəqiqə arasında saxlanılır. Sonra GaSe nanohissəciklərinin böyüməsi aşağıdakı ardıcılıqla aparıldı: maye ilə dörd konteyner istifadə edildi. Birincidə qalium xlorid məhlulu, ikincisində distillə edilmiş su, üçüncüdə natrium selenosulfat məhlulu, dördüncüsündə də distillə edilmiş su var idi. Substratlar bu qablarda ardıcıl olaraq 20 saniyə, 10 saniyə, 15 saniyə və 10 saniyə saxlanıldı. Bu proses ardıcıl 30 dəfə təkrarlandı.

X-şüalarının difraksiyasından (XRD), atom qüvvəsi mikroskopundan (AFM), enerji dispersiv rentgen spektroskopiyasından (EDAX) və skan edən elektron mikroskopdan (SEM) istifadə etməklə, alınmış nümunələrin daxili quruluşu və strukturu tədqiq edilmişdir. X-şüalarının difraksiya analizi nəticəsində məlum olub ki, nanohissəciklər altıbucaqlı quruluşa malik GaSe-nin ($a = 3,75 \text{ \AA}$, $c = 15,94 \text{ \AA}$) -modifikasiyasına aiddir. Fəza simmetriya qrupu D_{6h}^4 .

X-şüalarının difraksiya nümunələri əsasında yaranan nanohissəciklərin ölçüləri Debay-Şerer düsturundan istifadə etməklə hesablanmışdır:

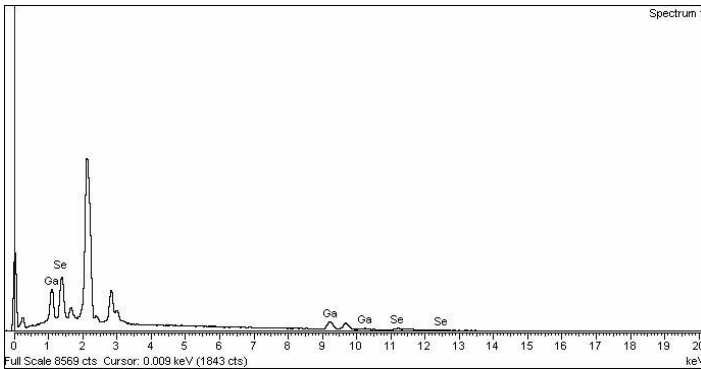
$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (19)$$

burada D -nanohissəciklərin ölçüləri, $k = 0,9$ – xətt forma faktoru (forma faktoru), $\beta = 0,1355$ – maksimum intensivliyin yarısında genişlənmə eni (FWHM- Tam genişlik yarı maksimum), λ – rentgen dalğa uzunluğu, $\lambda = 1,54\text{\AA}$, -Bragg bucağı, $\cos = 0,99$.

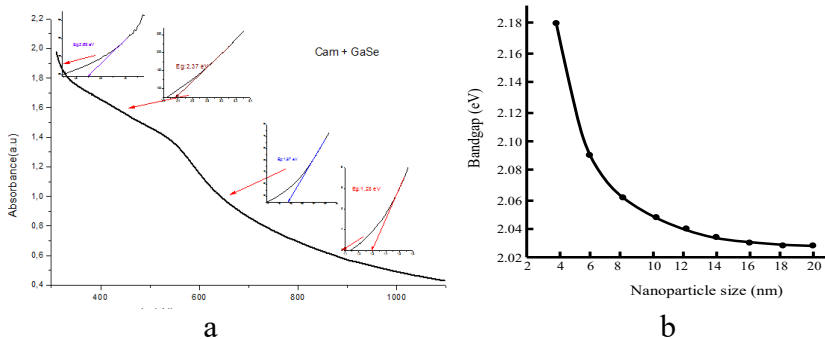
Hesablamalar göstərir ki, GaSe nanohissəciklərinin ölçüləri $4\div 20$ nm diapazonunda yerləşir.

SEM təsvirləri göstərir ki, yaranan maddələr (7-20) nm ölçülü sferik nanokristallardan ibarətdir və onlar polidispers formada yığılırlar. EDAX üsulu qalliumun seleniuma nisbətinin Ga:Se=1:1 olduğunu göstərir ki, bu da maddənin tərkibinin stexiometrik nisbətdə olduğunu göstərir (şək. 16).

Şəkil 17, a-da şüşə substratda GaSe nanohissəciklərinin udulma spektrini göstərir. Spektral asılılığa əsasən nanohissəciklərin qadağan olunmuş zolağının eni və qadağan olunmuş zolaqda yerləşən aşqar səviyyələrinin aktivləşmə enerjiləri müəyyən edilmişdir. Şəkildən göründüyü kimi, qısa dalğa uzunluğunda udma 3,69 eV enerjiyə uyğundur. Fikrimizcə, bu qiymət tədqiq olunan GaSe nanohissəciklərinin qadağan olunmuş zolağının eninə bərabərdir. Bu halda nanohissəciklərin qadağan olunmuş zolağının eni GaSe kristalları üçün E_g -dən daha böyük olur. GaSe kristalları üçün qadağan olunmuş zolağın eni $E_g=1.98$ eV -dur.



Şəkil 16. GaSe nanozərrəciklərinin EDAX təsviri.



Şəkil 17. a- şüşə lövhə üzərində GaSe nanozərrəciklərinin udma spektri, **b-**GaSe nanozərrəciklərinin qadağan olunmuş zolağının eninin zərrəciklərin ölçülərindən asılılığı.

Qeyd etmək lazımdır ki, massiv kristallarla müqayisədə nanohissəciklərin qadağan olunmuş zolağının eninin artması yarımkeçirici nanohissəciklərin xarakterik xüsusiyyətidir. Məlumdur ki, nanohissəciklərin qadağan olunmuş zolağının eni kristalın qadağan olunmuş zolağının enindən (E_g), tədqiq olunan kristalın gətirilmiş kütləsindən (m_r) və nanohissəciklərin ölçüsündən (a) asılıdır:

$$E_{g(\text{nano})} = E_{g(\text{kris})} + \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m_r a^2} \quad (20)$$

GaSe parametrlərini nəzərə alaraq, nanohissəciklərin qadağan olunmuş zolağının hesablanmış qiymətləri udma spektri əsasında tapılan dəyərlə qənaətbəxş uyğunluq təşkil etdiyini görürük. GaSe nanohissəciklərinin udma spektrində müşahidə olunan 2,37 eV, 1,87 eV və 1,28 eV-də zirvələr, müvafiq olaraq, qadağan olunmuş zolaqda yerləşən tutma mərkəzlərindən keçirici zolağa elektron keçidləri ilə bağlıdır.

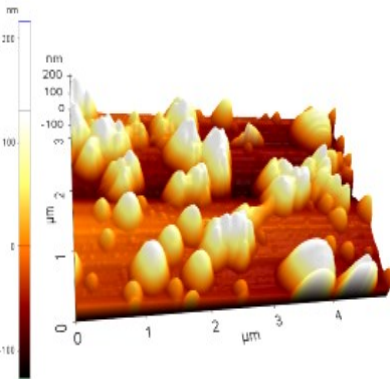
GaSe p-tipli keçiriciliyə malik olduğundan, bu lokallaşdırılmış mərkəzlər akseptor səviyyələr kimi çıxış edir və qaranlıq keçiricilik bu mərkəzlərdən dəşiklərin valent zolağına istilik aktivləşməsi nəticəsində keçidləri ilə bağlıdır. Bu səviyyələrin valent zolağından məsafələri müvafiq olaraq 2,41 eV, 1,82 eV, 1,32 eV və 0,32 eV-dir.

Şəkil 17,b-də GaSe nanohissəciklərinin qadağan olunmuş

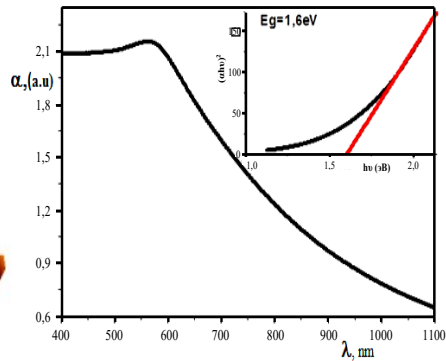
zolağının eninin nanohissəciklərin ölçülərindən asılılığı verilmişdir. Şəkildən görüldüyü kimi, nanohissəciklərin ölçüləri 10 nm-dən az olduqda kvant ölçüsü effekt qadağan lunmuş zolağın eninə əhəmiyyətli dərəcədə təsir etməyə başlayır.

Bu fəsilə də həmçinin InSe nanohissəciklərinin elektrik və optik xassələri müzakirə olunur. InSe nanohissəcikləri kimyəvi çökmə üsulu ilə də əldə edilmişdir (M-CBD-chemical bath deposition method). Şəkil 18,a –da şüşə substratda InSe nanohissəciklərinin AFM şəkili göstərilir. Şəkildən görüldüyü kimi, təqdim olunan təsvirdə hissəciklərin homojen paylanması müşahidə olunmur.

Şəkil 18,b-də şüşə substratda InSe nanohissəciklərinin udulma spektrini göstərir. Spektral asılılığa əsaslanaraq InSe nanohissəciklərinin qadağan olunmuş zolağının eni müəyyən edilmişdir. InSe-nin düz qadağan olunmuş zolağa malik olduğunu nəzərə alsaq, $\alpha^2 \sim f(h\nu)$ asılılığından müəyyən edilmişdir ki, $E_g = 1,6\text{eV}$ -a bərabərdir. Nanohissəciklərin qadağan olunmuş zolağının eninin bu qiyməti InSe kristallarının qadağan lunmuş zolağının enindən əhəmiyyətli dərəcə böyükdür. ($E_g = 1.23\text{ eV}$).



a



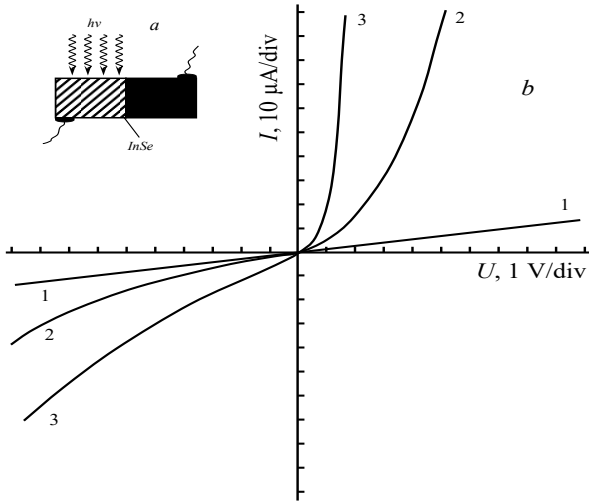
b

Şəkil 18. a- InSe nanozərrəciklərinin şüşə altlıq üzərində AFM təsviri, **b-** InSe nanozərrəciklərinin udma spektri.

Dissertasiyanın altıncı fəslə A^I , B^{III} və C^{VI} birləşmələrinin praktiki tətbiqinə həsr edilmişdir. Lazer şüalarının təsiri altında A^I , B^{III} və C^{VI} yarımkeçirici birləşmələrində aparılan qeyri-xətti optik və qeyri-tarazlıq elektron proseslərin nəzəri və təcrübi tədqiqatlarımız nəticəsində bu sinif maddələrdən qeyri-xətti optikada və kvant elektronikasında istifadə etmək üçün bir sıra imkanlar aşkar etdi. Alınan nəticələr lazer texnologiyasında, yarımkeçiricilərin keçiriciliyinin inversiyasında, lazer şüalanmasının nanohissəciklərin strukturuna təsiri, nanostrukturular əsasında günəş enerjisi çeviriciləri, lazer işığı üçün optik filtrlər, yüksək sürətli nanosaniyədə istifadə olunan lazer şüalanma detektorları, ultranazik təbəqələrin istehsalı üçün yeni üsul və s. istifadə oluna bilər. Bütün bu tədqiqatlar müxtəlif qaz, bərk cisim, maye lazerlər və ikifotonlu spektroskopiya, optik udma, fotokeçiricilik və lüminesansın öyrənilməsinin müasir metodlarından istifadə etməklə aparılmışdır.

Yarımkeçiricilərin xassələrinə nəzarət etmək üçün effektiv üsullardan biri lazer emalı üsuludur. Lazer kvantın enerjisi $\hbar\omega$, şüalanma intensivliyi I və qadağan olunmuş zolağının eni arasındakı əlaqədən asılı olaraq səthə yaxın ($\hbar\omega > E_g$) və həcmdə ($\hbar\omega < E_g$) baş verən fiziki hadisələrin xüsusiyyətlərini öyrənmək mümkündür. Yüksək intensivlikli lazer şüalarının yarımkeçirici maddələrlə qarşılıqlı əlaqəsi hazırda bir çox yeni fiziki hadisələrin meydana gəlməsinə səbəb oldu.

Eksperimental nəticələrin göstərdiyi kimi, nazik n-InSe təbəqələri $\lambda=1064$ nm dalğa uzunluğu və ~ 6 MVt/sm² gücə malik impulsu Nd:YAG lazeri ilə həyəcanlandıqda keçiricilik tipində dəyişiklik müşahidə olunur (Şəkil 19). Lazer işığı ilə şüalanmadan əvvəl n-tipli keçiriciliyə malik olan nümunənin şüalanmadan sonra p-tipli keçiriciliyə malik olur.

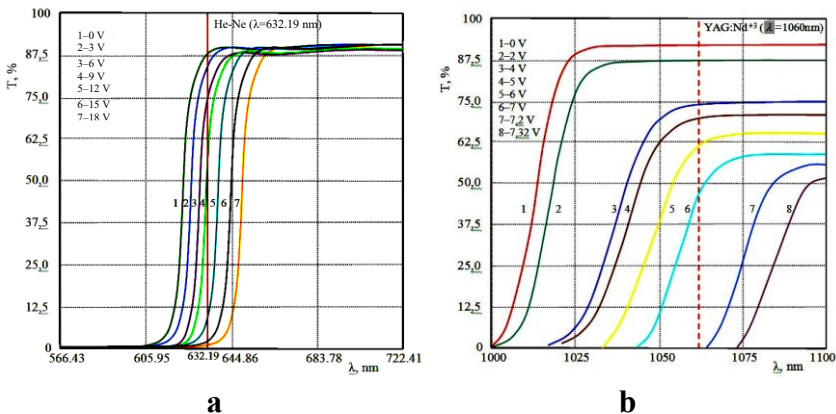


Şəkil 19. InSe nazik təbəqələrinin lazer şüalarının təsirinə qədər (1) və təsirindən sonra (2) volt-ampər xarakteristikaları. VAX işıqlanma halında (3).

Eyni zamanda, tədqiq olunan nümunələrin volt-ampər xarakteristikasında (VAX) da dəyişiklik müşahidə olunur. Əgər lazer şüalanmasına qədər VAX simmetrik xətti xarakteristikaya malik idisə, lazer şüalanmasından sonra VAX diod xarakteristikasına malik olur. Xarici gərginliyi $U=2$ V qiymətində düzləndirmə əmsalı $\sim 2 \cdot 10^2$ tərtibində olur. p-n keçidində cərəyankeçmə mexanizmi rekombinasiya xarakteri daşıyır. Nümunələrin közərmə lampası işıqlandırılması p-n keçiddə həcmi yüklərin oblastını xeyli zənginləşdirir.

Bizim fikrimizcə, lazer şüasının təsiri altında nazik InSe təbəqələrində keçiricilik növünün inversiyasına səbəb kristal qəfəs defektlərinin davranış dinamikasının qızdırma nəticəsində lokal dəyişməsi və ya işığın struktur defektlərində udulması göstərilə bilər.

Dissertasiya işində elektrik sahəsinin və lazer şüalanmasının GaSe və InSe-nin nazik təbəqələrinin udulma və lüminessensiya spektrlərinə təsiri də tədqiq edilmişdir. Şəkil 20,a-da nümunəyə tətbiq olunan elektrik sahəsinin müxtəlif qiymətlərində GaSe-nin buraxma spektrləri göstərilmişdir.



Şəkil 20. GaSe (a) ı InSe (b) nazik təbəqələrinin onlara tətbiq olunan xarici elektrik sahəsinin müxtəlif qiymətlərində buraxma spektrləri.

Nümunəyə optik “c” oxuna paralel istiqamətdə elektrik sahəsi tətbiq edildikdə, udma zolağının kənarının spektrin uzun dalğalı oblastına tərəf sürüşməsi müşahidə olunur. Elektrik sahənin gərginliyinin 20 V/sm-ə qədər artması ilə udma zolağının kənarının 50 nm sürüşməsi baş verir. Tətbiq olunan elektrik sahəsi 7,3 V/sm olan InSe nümunələrində oxşar yerdəyişmə 88 nm təşkil edir (20,b). GaSe və InSe üçün udma zolağının kənarının ($\Delta\lambda$) yerdəyişməsinin tətbiq olunan elektrik sahəsindən (E) asılılığı $\Delta\lambda \sim E^n$ qanunu ilə dəyişir, burada $n=2,1 \div 2,5$.

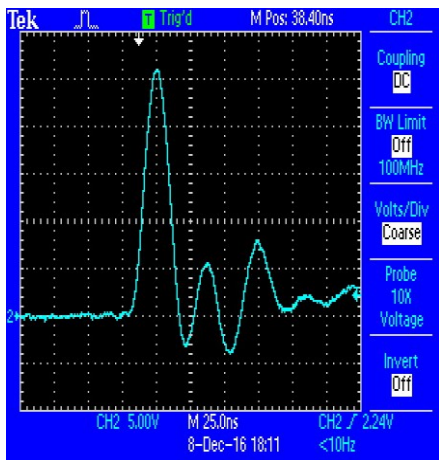
Şəkil 20-də həmçinin müvafiq olaraq He-Ne lazerinin (a) və Nd:YAG lazerinin (b) emissiya spektrlərinin xəttləri göstərilmişdir. Şəkillərdən görüldüyü kimi, GaSe və InSe-nin nazik təbəqələrində udma zolağının kənarı yerdəyişdikdə, buraxma spektrləri lazerlərin spektral xəttləri ilə kəsişir. Bu da həmin nazik təbəqələrdən xarici elektrik sahəsinin qiymətini dəyişməklə He-Ne və Nd:YAG lazerlərinin intensivliyini idarə etmək üçün isfidə olunmasının mümkün olduğunu göstərir.

Təcrübə nəticələrini izah etmək üçün ən çox ehtimal olunan mexanizm, fikrimizcə, elektrik sahəsinin yaratdığı Joule istiliyi və udma zolağının kənarının sürüşməsinə səbəb olan kristal şəbəkənin vibrasiyasının sonrakı artması ilə əlaqələndirilə bilər. Hesablamalar

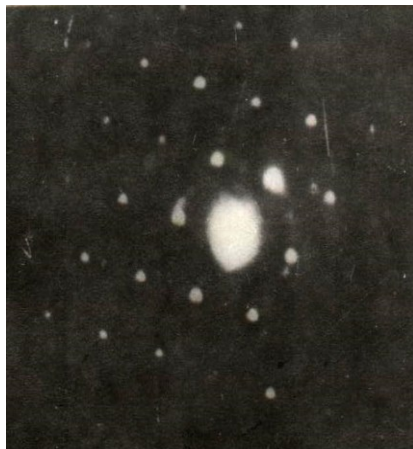
göstərir ki, müqaviməti $\sim 10^3$ Om·sm olan GaSe nümunəsində 85 V/sm-ə qədər elektrik sahəsinin təsiri altında $\approx 1,9$ Vt/sm² Joule istiliyi ayrılır. Bu dəyər nümunəni 45-50 °C qızdırmaq üçün kifayətdir. Müqaviməti $\sim 10^2$ Om·sm olan InSe nümunələrində 50 V/sm elektrik sahəsinin təsiri altında $\sim 11,6$ Vt/sm² Joule istiliyi ayrılır və bu da nümunəni 245 °C-ə qədər qızdırır. Udma zolağının kənarının $\Delta\lambda$ yerdəyişməsinin istilik mexanizmi həmçinin $\Delta T=40$ K-də sürüşmə qiymətinin müxtəlif külçələrdən kəsilmiş nümunələrin müqavimətindən(R) asılılığı ilə dəstəklənir. Nümunələrin müqaviməti azaldıqca udma zolağının kənarının sürüşməsi artır. Beləliklə, xarici elektrik sahəsi ilə stimullaşdırılan nümunələrin elektrikli qızdırılması udma zolağının kənarının spektrin uzun dalğalı bölgəsinə sürüşməsinə səbəb olur.

İlk dəfə olaraq InSe nazik təbəqələrində Nd:YAG lazerinin təsiri altında otaq temperaturunda ultrasürətli fotocərəyanlar kəşf edilmişdir (şək. 21,a). Şəkildən görüldüyü kimi, lazer impulsuna məruz qalma zamanı fotocərəyan generasiyası davam edir, fotosiqnalın qalxması və azalması 15 nanosaniyədən çox deyil; Qaranlıq cərəyan ~ 1 V tətbiq olunan xarici gərginliklə 6×10^{-6} A təşkil edir. Nümunənin həssaslığı $\lambda=1060$ nm olan şüalanma dalğası uzunluğunda 0,25 mKA/mkV idi. Lazer şüalarının intensivliyinin $(1,42 \div 12)$ MVt/sm² diapazonunda fotocərəyanın tətbiq olunan gərginlikdən asılılığı 25 V-a qədər xətti xarakter daşıyır.

Bizim fikrimizcə, ultrasürətli fotocərəyan generasiyasının baş verməsinin səbəbi InSe kristallarının qadağan olunmuş zolağında iki növ mərkəzlərin, həssas “r” mərkəzlərinin və sürətli “S” tipli mərkəzlərin olmasıdır. Valent zolağından $E_{vr} \approx 0,25$ eV məsafədə r-mərkəzlərinin olması $\hbar\omega = 1,17$ eV enerjili lazer şüalanmasının təsiri altında elektronları r-mərkəzlərdən keçiricilik zolağına keçməsinə imkan verir. Keçirici zolağa həyəcanlanan elektronlar S-mərkəzləri vasitəsilə rekombinasiya edirlər, bu da fotocərəyanın sürətli komponentinin yaranmasına səbəb olur. Sonda qeyd etmək lazımdır ki, otaq temperaturunda kəşf etdiyimiz ultrasürətli fotocərəyanlar və spektrin yaxın infraqırmızı bölgəsində aşkar edilən intensiv şüalanma yüksək sürətli elektronika və fotonik texnologiyası üçün nazik təbəqəli InSe strukturundan istifadənin potensial imkanlarını göstərir.



a

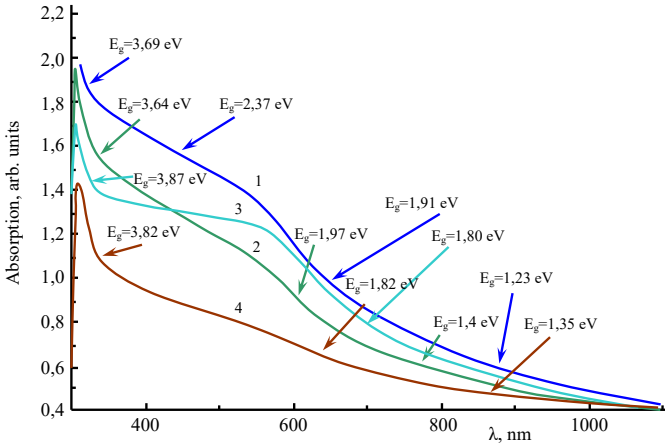


b

Şəkil 21, a- InSe nazik təbəqələrində lazer şüalarının intensivliyinin $\sim 6 \text{ MVt/sm}^2$ qiymətində fotocərəyanın ossilloqramması, **b-** NaCl altlıq üzərində lazer şüaları vasitəsilə alınmış InSe nazik təbəqəsinin elektronogramması.

Dissertasiya işində nazik InSe filmləri impuls lazer şüalanmasından əldə olunmuşdur. Modulyasiya rejimində işləyən yaqut lazer şüalanma mənbəyi kimi istifadə edilmişdir. Lazer radiasiyasının təsiri altında buxarlanan hissəciklər 300°C temperaturda NaCl substratlarına yerləşdirildi. Lazer şüalanmasının təsiri altında alınan nazik InSe təbəqələrinin elektron difraksiya görüntüləri alınmış nazik təbəqələrin parametrləri ilə başlangıç material arasında yaxşı uyğunluq olduğunu göstərir (şək. 21,b).

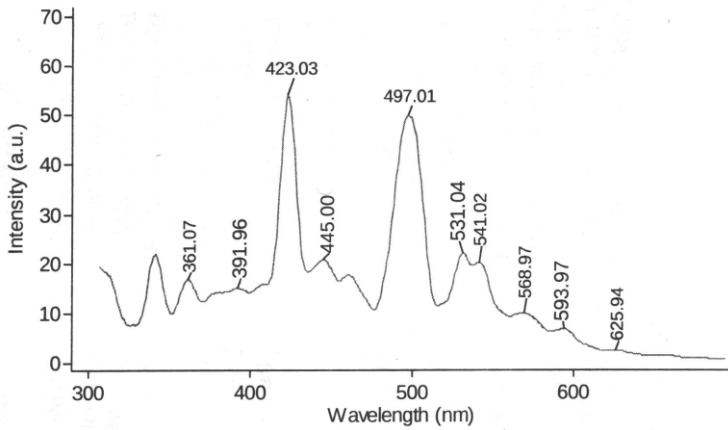
Nadir torpaq elementləri Nd, Er və Dy ilə aşqarlanmış GaSe nanohissəcikləri SILAR üsulu ilə əldə edilmişdir. Şəkil 22-də GaSe<Dy,Er,Nd> nanohissəciklərinin optik udma spektrləri göstərilir. Şəkildən göründüyü kimi, əsas udma kənarına ($\sim 600 \text{ nm}$) əlavə olaraq, GaSe nanohissəciklərinin udma spektri $\sim 330 \text{ nm}$ -ə qədər qısa dalğalı oblasta qədər uzanır.



Şəkil 22. Şüşə altlıq üzərində alınmış $GaSe\langle Dy, Er, Nd \rangle$ nanozərrəciklərin optik udma spektrləri: 1 – $GaSe$; 2 – $GaSe\langle Er \rangle$; 3 – $GaSe\langle Nd \rangle$; 4 – $GaSe\langle Dy \rangle$.

$GaSe$ nanohissəciklərinin udma spektrinin onun enerji diaqramı ilə müqayisəsi onu deməyə əsas verir ki, əsas udma kənarında Brillouin zonasının mərkəzində yerləşən $\Gamma_2^- \rightarrow \Gamma_3^-$ keçidi ilə yanaşı, qısa dalğa oblastında $M_2^- \rightarrow M_1^+$ keçidi də ($\sim 3,69$ eV) mövcuddur. Fikrimizə, $GaSe\langle Dy, Er, Nd \rangle$ nanohissəciklərinin udulma spektrində müşahidə olunan xüsusiyyətlər $GaSe$ kristal qəfəsində nadir torpaq elementləri Dy, Er, Nd tərəfindən yaradılmış elektron keçidləri ilə bağlıdır.

$GaSe$ nanohissəciklərinin lüminessensiya spektri onun kristallarında müşahidə olunan lüminessensiya spektrindən kəskin şəkildə fərqlənir (Şəkil 23). Əgər $GaSe$ kristallarının lüminessensiya spektri əsasən udma kənarında mövcud olan eksiton keçidləri və uzun dalğa bölgəsində olan aşqar keçidləri ilə əlaqələndirilsə, $GaSe$ nanohissəciklərində lüminessensiya spektri incə struktura malikdir: görünən oblastda iki əsas maksimum və bir sıra zəif maksimumlar mövcuddur. Eyni düzülüş $GaSe\langle Dy, Er, Nd \rangle$ nanohissəciklərinin lüminesans spektrlərində müşahidə olunur (Cədvəl 1).



Şəkil 23. Şüşə altlıq üzərində alınmış GaSe nanozərrəciyin lüminessensiya spektri.

Cədvəl 1

Nadir torpaq elementləri Dy, Er, Nd ilə aşqarlanmış GaSe nanohissəciklərində müşahidə olunan elektron keçidləri.

<i>GaSe</i> $\lambda(\text{nm})$	<i>GaSe (Er)</i> $\lambda(\text{nm})$	<i>GaSe (Nd)</i> $\lambda(\text{nm})$	<i>GaSe (Dy)</i> $\lambda(\text{nm})$
361.07	362.00	361.07	361.07
391.96	393.03	391.06	423.03
423.03	423.03	423.03	445.00
445.00	446.06	446.06	461.06
497.01	461.96	498.95	495.97
531.04	498.95	531.04	531.04
541.02	531.04	541.02	541.02
568.97	541.02	570.00	566.02
593.07	568.97	592.05	593.97
625.04	592.94		625.94
			658.98

Ultrnazik indium selenid filminin istehsalı üçün yeni bir üsul təklif edilmişdir. Ultrnazik InSe filmləri indium selenidinin vakuumba termik buxarlanması və buxarın mayenin səthinə çökməsi üsulu ilə əldə edilmişdir. Metod InSe birləşməsinin termal buxarlanması və buxarın vakuumba mayenin sərbəst səthinə çökməsi prosesinə əsaslanır. 10-20 mikron ölçülərinə qədər əzilmiş polikristal indium selenidinin buxarlanması şüşə-qrafit tigəldə aparılıb. Tigelin temperaturu InSe-nin ərimə nöqtəsinin temperaturundan 20 ± 3 K-dən artıq olan temperatura qədər qızdırılıb. Verilən kütlənin miqdarını idarə etməyə imkan verən xüsusi bir cihaz hazırlanmışdır. Tigəldən 15 sm yüksəklikdə yerləşən substrat çox qatlı bir quruluşa malikdir. Üst təbəqə şüşədən ibarətdir, ondan 0,5 mm aşağıda maye ilə doldurulmuş metal tor yerləşir.

Məhz islanma qabiliyyətinə görə, qalın maye təbəqəsi demək olar ki, bərabər şəkildə torun alt hissəsini əhatə edir. Mayenin temperaturu metal tora bağlanmış nazik termocütlər vasitəsilə idarə olunurdu. İstifadə olunan maye InSe buxarına kimyəvi cəhətdən neytral olan və vakuumba aşağı buxar təzyiqinə malik olan yağ idi. InSe buxarı mayenin səthinə çökdükdən sonra çox qatlı substrat ters çevrilir və indium selenid təbəqəsi ilə yaranmış şəbəkə mayədən ayrılır.

Qalan maye bir saat ərzində 415 K temperaturda vakuumba nazik bir InSe filmi olan torları saxlamaqla çıxarıldı. Torun materialı diametri 200 mikron olan mis-sink xətlili sap idi. Metal tor üzərində çökən maddənin kompozisiya təhlili və onun morfoloji quruluşu skan edən elektron mikroskopdan istifadə edilməklə tədqiq edilmişdir. Qeyd etmək lazımdır ki, elektron şüası grid pəncərəsindəki InSe filminə dəydikdə film məhv olur. Ona görə də biz hələ də sərbəst filmin struktur analizini apara bilməmişik. Bununla birlikdə, film ideal olaraq homojendir; indium selenidinin fərdi komponentləri filmin bütün sahəsinə bərabər paylanır. Filmin qalınlığının çoxsaylı təxminləri onun $\sim 1,8 \mu\text{m}$ olduğunu göstərdi. Nazik təbəqədə indiumun seleniumun kütlə nisbəti EDAX spektrindən müəyyən edilmişdir. İndium və selenin atom kütlələrinin nisbəti histoqramın sağ küncündə təqdim olunan nazik film komponentlərinin faiz kütlələrinin nisbəti ilə yaxşı üst-üstə düşür. Beləliklə, əldə edilən nazik təbəqənin tərkibinin

InSe-nin stoxiometrik düsturuna uyğun olması təmin edilə bilər.

Kimyəvi çökdürmə üsulu ilə əldə edilmiş nazik CdS təbəqələrinin və Cd1-xZnxS bərk məhlullarının lazer həyəcanlandırması altında pirolizlə əldə edilən fotokeçiricilik və lüminesans xüsusiyyətləri eksperimental olaraq tədqiq edilmişdir. Radiasiya mənbəyi kimi impulsu maye (473 – 547) nm və azot (337 nm) lazerlərdən istifadə edilmişdir. İncə Cd1-xZnxS təbəqələrinin fotokeçiriciliyi və fotolüminessensiya spektrləri müxtəlif həyəcanlanma intensivliklərində x tərkibindən və qeyri-tarazlıq fotokeçiriciliyin relaksasiya əyrilərindən asılı olaraq eksperimental olaraq tədqiq edilmişdir. Göstərilmişdir ki, Cd1-xZnxS nazik təbəqələrinin fotokeçiricilik və fotolüminessensiya spektrlərində müşahidə olunan xüsusiyyətlər birbaşa zolaqlı keçidlərdən yaranır. Yüksək optik həyəcanlanma intensivliyində, nazik CdS filmlərində işığın artması müşahidə olunur.

Vakuum çökmə metodundan istifadə edərək monokristal silikon substratların səthində çoxqatlı Si- ZnO – $CuInSe_2$ - ZnO heterostrukturlar hazırlanmışdır. Keçid bölgəsində $p-CuInSe_2-n-ZnO$ heteroqovşaqların cərəyan-gərginlik, gərginlik-tutum və spektral paylanmaları tədqiq edilmişdir. Heteroqovşaqların parametrləri müəyyən edilir və göstərilir ki, heteroqovşaqlardan günəş enerjisi çeviriciləri kimi istifadə oluna bilər.

NƏTİCƏLƏR

1. Bricmen, vakuumda ani termik buxarlandırma və elektrokimyəvi çökdürmə üsulları ilə A^I , B^{III} və C^{VI} elementləri əsasında binar və üçqat birləşmələrin uyğun olaraq monokristalları, nazik təbəqələri və nanoquruluşları alınmışdır. Rentgen şüaların difraksiyası analizi (XRD), atom qüvvət mikroskopu (AFM), rentgen şüaların dispers enerji spektroskopiyası (EDAX) və skanedic elektron mikroskopu (SEM) vasitəsi ilə alınmış nazik təbəqələrdə və nanozərrəciklərdə quruluş və tərkib analizləri aparılmışdır.
2. Eksiton rezonansı oblastında InSe kristallarında yüksək optik həyəcanlaşmada müşahidə olunan qeyri-xətli udma sərbəst yükdəşıyıcıların kulon qarşılıqlı təsirinin ekranlaşması və eksiton-eksiton qarşılıqlı təsirin nəticəsində baş verir. Lazer şüasının təsiri ilə InSe kristalında generasiya olunan ($\sim 3 \cdot 10^{19} \text{ sm}^{-3}$) elektron-deşik cütünün sıxlığı bu kristallarda mott keçidi üçün zəruri olan ($\sim 2,5 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$) sıxlığı aşır.
3. Yüksək intensivlikli optik həyəcanlaşmada GaSe nazik təbəqəsində udma göstəricisinin dəyişməsi və udma zolağının kənarının kiçik enerjili oblasta doğru sürüşməsinin müşahidə edilməsi lazer şüası ilə generasiya olunmuş qeyri-tarazlıqlı elektron-deşik cütünün şüalanmasız rekombinasiyası ilə əlaqədardır.
4. GaSe-nin yüksək optik həyəcanlaşma səviyyəsində energetik zonanın dolması ilə udma zolağının kənarının şəffaflaşmasına, eyni zamanda kənarın yüksək enerji oblastına doğru sürüşməsinə gətirir. Müşahidə olunan zonanın dolması effekti GaSe təbəqəsi əsasında yarımkeçirici lazer hazırlanmasına imkan yaradır.
5. InSe kristalının yüksək intensivlikli lazerlə həyəcanlaşması nəticəsində sındırma göstəricisi dəyişir və mühit özünü toplayıcı və ya səpici linza kimi aparır. Göstərilmişdir ki, istilik qeyri-xətliliyi kristalın soyudulması üçün zəruri olan müddətdən daha çox cavab müddətinə malikdir. Yavaş

- müddətli cavab imkan verir ki, termik induksiyalanmış qeyri-xətliyi elektron məşəli optik qeyri-xətlikdən fərqləndirilsin.
6. $\text{Cu}_3\text{In}_5\text{S}_9$ kristallarının lazerlə həyəcənlaşmada fotoluminessensiya spektrində aşkar edilmiş şüalanma zolağı kristalın qadağan olunmuş zonasında kation və anion vakansiyaların yaratdıqları aşqar səviyyələrlə şərtlənir.
 7. Yüksək intensivlikli optik həyəcənlaşmada GaS və $\text{Cu}_3\text{Ga}_5\text{Se}_9$ kristallarında iki və üç fotonlu udmalar müşahidə edilmişdir. GaS kristalında işığın $I_0=10^{25}$ kvant/ $\text{sm}^2\cdot\text{s}$ an qiymətində ikifotonlu udma əmsalı $7\cdot 10^{-3} \text{ sm}^{-1}$ bərabər olmuşdur. $\text{Cu}_3\text{Ga}_5\text{Se}_9$ kristalında ikifotonlu udma əmsalının üçfotonludakına nisbəti 10^4 tərtibində olmuşdur.
 8. GaS-GaSe varizon quruluşu misalında yarımkəçirici epitaksial təbəqənin tərkibini və energetik parametrlərinin təyininin yeni üsulu təklif edilmişdir. Lazer şüası ilə GaS-GaSe heteroquruluşunun iki və üçfotonlu həyəcənlaşmasında fotoluminessensiya spektrinin interpretasiyasından tərkib, qadağan olunmuş zonanın eni, təbəqənin qalınlığı, aşqarların konsentrasiyası, rekombinasiya proseslərin xarakteri müəyyən edilmiş və nəhayət, reallaşdırılan quruluşun effektivliyi müəyyən edilmişdir.
 9. Lazer işığı ilə InSe kristalında generasiya olunan tarazlıqda olmayan yüklərin işığı udmasının effektiv en kəsiyinin müəyyən olunması üsulu təklif olunmuşdur: $\sigma_{n+p}=2,8\cdot 10^{-18} \text{ sm}^2$. InSe kristalında impulsun relaksasiyası əyrisində, kəskin düşmənin olması, kristalın İQ oblastda işləyən qısa lazer impulslarını qeyd edən detektor kimi təklif olunur.
 10. Nazik laylı InSe quruluşunda lazer həyəcənlaşmasında ifrat sürətli fotocərəyan müşahidə edilməsi maddədə böyük en kəsikli tutmaya qadir olan sürətli rekombinasiya kanalının olması ilə izah olunur.
 11. Müxtəlif lazerlərin (He-Ne , Nd:YAG , maye lazerləri) intensivliyin iki tərtibə qədər azalda bilən lazer şüalanmasının zəiflədici hazırlanmışdır və onlar kəsici işıq filterləri kimi də istifadə oluna bilərlər. Lazer şüalanmasının zəiflədicisinin fiziki əsası elektrik sahəsinin təsiri ilə GaSe və InSe

kristallarında udma zolağının kənarının sürüşməsi effekti ilə əlaqələndirilir.

12. InSe nazik təbəqələri yaqut impuls lazerin şüalanmasından istifadə etməklə əldə edilmişdir. Lazer şüalanmasının təsiri altında alınan nazik InSe təbəqələrinin elektron difraksiya görüntüləri alınmış nazik təbəqələrin parametrləri ilə başlanğıc material arasında yaxşı uyğunluq olduğunu göstərir. Göstərilmişdir ki, lazer şüalanmasının təsiri altında InSe və AgIn_5S_8 nazik təbəqələrində keçiriciliyin tipinin inversiyası, ya qızma hesabına kristal qəfəsin defektlərinin dinamikasının lokal dəyişməsinin, ya da struktur qeyri-bircinsliklərində işığın udulması nəticəsində baş verir.
13. İlk dəfə olaraq termik buxarlandırma və maye faza üzərinə çökdürülmə üsulu ilə InSe ifrat nazik təbəqənin yetişdirilməsi texnologiyası işlənmişdir. EDAX və SEM üsulları ilə alınmış təbəqələrin tərkibi və qalınlığı müəyyən edilmişdir.
14. InSe 2D nazik təbəqəsində dreyf tutumunun yaranması müşahidə edilmişdir. Gösrəilmişdir ki, təbəqəni on nanosaniyəli işıq impulsu ilə optik həyacanlaşdırdıqdan sonra tarazlıqda olmayan yükdaşıyıcıların rekombinasiya nəticəsində yaranan fotocərəyanın adi relaksasiyası ilə yanaşı, dreyf tutumunun boşalması da baş verir. Ona görə də relaksasiya tipli dissipativ axına uyğun relaksasiya prosesinə Maksvell-Kantaneo tənliyini tətbiq edilmişdir.

DISSERTASIYANIN MÖVZUSU ÜZRƏ DƏRC OLUNMUŞ İŞLƏRİN SİYAHISI:

1. Гусейнов, А.Г. Мамедов, Р.М., Магомедов, А.З. Гомопереходы, изготовленные методом лазерного отжига // «Fizikanın müasir problemləri» II Respublika konfransın materialları, – 28 noyabr, – 2008, – s.197-198.
2. Гусейнов, А.Г. О роли собственных точечных дефектов в процессах рекомбинации неравновесных носителей заряда в $\text{Cu}_3\text{Ga}_5\text{Se}_9$ / Р.М.Мамедов // Bakı universitetinin xəbərləri, FRES, – 2009. №4, – s.145-147.
3. Гусейнов, А.Г. Фотолуминесценция тонких пленок $\text{CuGaSe}_{0,65}\text{Te}_{0,35}$ / Р.М.Мамедов // Bakı Dövlət Universitetinin 90 illik yubileyinə həsr olunmuş Beynəlxalq Elmi Konfransın materialları, – Bakı, – 2009, – s. 231-232.
4. Kyazym-zade, A.G., Luminescent properties of $\text{Al}_3\text{B}_5\text{C}_6$ type compounds / A.H.Huseynov, L.H.Hasanova, R.M.Mamedov // Conference Proceeding of 6th International Conf.on Technical and Physical Problems of Power Engineering (ICTPE), – 14-16 september. – Tabriz, Iran,– 2010, – pp.362-365.
5. Гусейнов, А.Г., Электропроводность и термо-э.д.с. монокристаллов $\text{Ag}_3\text{In}_5\text{Se}_9$ / Р.М.Мамедов // Bakı universitetinin xəbərləri, FRES, – 2010, –№4, – s.142-150.
6. Гусейнов, А.Г., Мамедов, Р.М. О механизме излучательной рекомбинации в тонких пленках CuInSe_2 // «Opto»nano-elektronika və kondensə olunmuş mühit fizikası. Elmi-praktiki konfransın materialları, BDU, – Bakı: – 2011, – s.150-153.
7. Гусейнов, А.Г. Фотоэлектрические преобразователи на основе соединений $\text{CuGaSe}_{0,65}\text{Te}_{0,35}$ - ZnO / Р.М.Мамедов // Bakı universitetinin xəbərləri, FRES, – 2012, – №4, – s. 142-150.
8. Гусейнов, А.Г., Мамедов, Р.М., Фараджева, Н.З. Фотоэлектрические преобразователи на основе гетероструктуры ZnO-CuInSe_2 // AZTU, «Bərpa olunan enerji mənbələrində

istifadə olunma problemləri və perspektivləri» Beynəlxalq elmi texniki konf.mat. – 2012, – səh. 22-25.

9. Гусейнов, А.Г., Мамедов, Р.М., Бадалова, С.А. Катоодолюминесценция монокристаллов AgIn_5S_8 // BDU «Fizikanın aktual problemləri» VII Respub.elmi konfr.material., – Bakı, – 2012, – s. 67-68.
10. Гусейнов, А.Г., Джафаров, М.Б., Мамедов, Р.М. О механизме излучательной рекомбинации в монокристаллах AgIn_5S_8 // В кн. Аграрные науки XXI века. Актуальные исследования и перспективы. – Санкт-Петербург. – 2013, – с.171-174.
11. Кязым-заде, А.Г. Влияние анизотропии и нелинейного поглощения на фотопроводимость кристаллов GaSe при лазерном возбуждении / В.М.Салманов, А.Г.Гусейнов, Р.М.Мамедов [и др.] // AMEA-nın xəbərləri fizika-texnika və riyaziyyat elmləri seriyası, fizika və astronomiya. – 2014, – №2, – s.10-15.
12. Кязым-заде, А.Г. Оптические нелинейности в кристаллах GaSe и InSe при лазерном возбуждении / В.М.Салманов, А.Г.Гусейнов, Р.М.Мамедов [и др.] // Оптика и спектроскопия, – Санкт.- Петербург, – 2014,– № 4(116), – с.130-133.
13. Кязым-заде, А.Г. Просветление в области экситонного резонанса в слоистых кристаллах GaSe / В.М.Салманов, А.Г.Гусейнов, Р.М.Мамедов [и др.] // Оптика и спектроскопия, – Санкт.- Петербург, – 2014,– № 3(117), – с. 91-95.
14. Huseynov, A.G. The Effect of Laser Annealing on the Dynamics of Defects in the CrystalLattice of the $\text{Cu}_3\text{Ga}_5\text{Se}_9$ Single Crystal / V.M.Salmanov, L.G.Hasanova, R.M.Mamedov // International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS, – 2014, –14(01), – p.11-17.
15. Гусейнов, А.Г. Салманов, В.М., Ахмед, А.А., Магомедов, А.З., Мамедов, Р.М., Джафарлы, Р.С. О механизме рекомбинации неравновесных носителей тока в

- монокристаллах CuIn_5S_8 // Fizikanın müasir problemləri VIII Respublika konfransı, – Bakı, – 2014, – s.122-125.
16. Jafarov, M.A. Fabrication and characterization CdS nanowire / E.F.Nasirov, R.M.Mamedov // International Journal of Current Research, – 2014, 6(10), – pp. 9006-9013.
 17. Jafarov, M.A. Fabrication and characterization ZnCdS nanowire / E.F.Nasirov, R.M.Mamedov, R.S.Jafarli // Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics, – 2014, – 5(6), – p. 1–6.
 18. Гусейнов, А.Г. Нелинейное поглощение в кристаллах $\text{Cu}_3\text{Ga}_5\text{Se}_9$ при лазерном возбуждении / В.М.Салманов, А.Г.Кязым-заде, Р.М.Мамедов // Bakı universitetinin xəbərləri, FRES, – 2015, – №3, – с. 119-126.
 19. Guseinov, A.G. Photo-conductivity $\text{Cu}_3\text{Ga}_5\text{Se}_9$ under the action of laser radiation / V.M.Salmanov, R.M.Mamedov // “Science, Education and Technology”, The XII International Academic Congress, United States, Cambridge, Massachusetts, – 2015, – v. 3, – p.58-66.
 20. Kyazymzade, A.G. The Study of Recombination Centers in GaSe Crystals by Laser Radiation / V.M.Salmanov, A.H.Huseynov, R.M.Mamedov [et al.] // Journal of Qafqaz University- Physics. – Baku, – 2015, – 3(1), – p. 34-40.
 21. Гусейнов, А.Г. Электрические и оптические свойства наночастиц InSe / А.Г.Кязым-заде, В.М.Салманов, Р.М.Мамедов [и др.] // АМЕА Хəbərləri, Fizika- texnika və riyaziyyat elmləri seriyası, – 2015, – №5, – s. 100-108.
 22. Кязым-заде, А.Г. Структура, оптические и люминесцентные свойства наночастиц GaSe / В.М.Салманов, А.Г.Гусейнов, Р.М.Мамедов [и др.] // Российские нанотехнологии. – 2015, – 10(9-10), – с. 92-97.
 23. Huseynov, A.H. Electrical and photoelectrical properties of defects semiconductors CuIn_5S_8 / V.M.Salmanov, R.M.Mamedov [et al.] // Cambridge Journal of Education and Science. – 2015, – 6(14), – p. 510-521.

24. Huseynov, A.H. Gallium monoselenide doped with boron / V.M.Salmanov, R.M.Mamedov [et al.] // American Journal of Science and Technologies. – 2015, – 6, – p.18-26.
25. Kyazumzade, A.H. Structure, optikal and luminescent properties of GaSe and InSe nanoparticles / V.M.Salmanov, A.H.Huseynov, R.M.Mamedov [et al.] // International Journal of Current Research. – USA, – 2015, – 7(7), – p.18321-18327.
26. Salmanov, V.M., Hüseyinov, A.H., Həsənova, L.H., Məhəmmədov, Ə.Z., Məmmədov, R.M. $Cu_3In_5S_9$ kristallarında fotokeçiriciliyin xüsusiyyəti // Fizikanın aktual problemləri VIII Respublika elmi konfransı, – Bakı, – 2015, – s.22-25.
27. Кязым-заде, А.Г., Салманов, В.М., Гусейнов, А.Г., Мамедов, Р.М. [и др.] Высокоэнергетическое излучение в области сплошного спектра тонких пленок GaSe под действием лазерного излучения // “Opto, nanoelektronika və kondensə edilmişə olunmuş mühit və yüksək enerjilər fizikası” Beynəlxalq konfransın materialları. – BDU, – Bakı, – 2015, – s.29-31.
28. Гусейнов, А.Г. Особенности люминесценции и фотопроводимости слоистых кристаллов $Cu_3In_5S_9$ под действием лазерного излучения / А.Г.Кязым-заде, В.М.Салманов, Р.М.Мамедов [и др.] Оптика и Спектроскопия, – 2016, – 121(6), – с. 966-969.
29. Salmanov, V.M. High –energy radiation in the region of the continuus spectrum of nanoparticles gallium and indium selenide by laser radiation / A.G.Guseinov, R.M.Mamedov [et al.] // Science and Education Studies, January-June, 2016,v. II. “Stanford University Press”, – 2016, – 1(17), – pp. 562-572.
30. Hüseyinov, Ə.H., $GaSe < Dy >$ nazik təbəqələrin və nanozərrəciklərinin alınması və optik xassələri / A.H.Kazımcıadə, V.M.Salmanov, R.M.Məmmədov [və b.] // AMEA-nın xəbərləri, fizika-texnika və riyaziyyat elmləri seriyası, fizika və astronomiya, – 2016, – № 5, – s.36-42.
31. Kyazm-zade, A.G., Peculiarities photoluminescence spectra and photoconductivity of GaSe crystals and nanoparticles / V.M.Salmanov, A.G.Guseinov, R.M.Mamedov [et al.] //

- Journal of Qafqaz University-Physics, – 2016, – 4(1), – pp. 59-67.
32. Kazım-zadə A.H., Salmanov, V.M., Hüseynov, Ə.H., Salmanova, A.A., Əliyev, İ.M., Məmmədov, R.M. Nanohissəcikli GaSe nazik təbəqələrin elektrooptik xassələri // Fizikanın aktual problemləri. XI Respublika Elmi Konfransı, – 22 dekabr, – 2016 , – s. 81-84.
 33. Гусейнов, А.Г., Салманов, В.М., Мамедов, Р.М., Ахмедова, Ф.Ш., Джабраилова, Р.Ф. Рекомбинационные центры неравновесных носителей заряда в $AgIn_5S_8$ // Fizikanın aktual problemləri. XI Respublika Elmi Konfransı, – 22 dekabr, – 2016, – s. 147-150.
 34. Kyazim-zade, A.G. Nonlinear optical and quanta-dimensional effects in monoselenide of gallium and indium / V.M.Salmanov, A.G.Huseynov, R.M.Mamedov [et al.] // Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics, –2017, –8(5), – p.654-660.
 35. Guseinov, A.G. Optical Properties of Boron-Doped Gallium Selenide – V.M.Salmanov, R.M.Mamedov [et al.] // Optics and Spectroscopy, – 2017, – 123(6), – pp. 875–880.
 36. Кязым-заде, А.Г. Особенности оптического поглощение и фотопроводимости моноселенида индия при лазерном возбуждении / В.М Салманов., А.Г.Гусейнов, Р.М.Мамедов [и др.] // Известия ВУЗов, – Томск, – 2017, – 60(10), – с. 30-33.
 37. Гусейнов, А.Г. Новый метод получения *n-p* структуры на основе дефектного полупроводника $AgIn_5S_8$ / В.М.Салманов, Р.М.Мамедов [и др.] // Известия ВУЗов, – Томск, – 2017, – 60(10), – с. 88-91.
 38. Салманов, В.М. Влияние примесей Бора на оптическое поглощение и фотопроводимость селенида галлия / А.Г.Гусейнов, Р.М.Мамедов [и др.] // Journal of Baku Engineering University-Physics, – 2017, – 1(1), – pp 77-82.
 39. Кязым-заде, А.Г. Особенности люминесценции и фотопроводимости GaSe и InSe при лазерном возбуждении /

- В.М.Салманов, А.Г.Гусейнов, Р.М.Мамедов [и др.] // Bakı universitetinin xəbərləri, f-r. e. s., – 2017, – №3, – s.1-9.
40. Салманов, В.М. Особенности фотопр-водимости GaSe при высоких уровнях оптического возбуждения / А.Г.Гусейнов, Р.М.Мамедов [и др.] // Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının xəbərləri, Fizika-texnika və riyaziyyat elmləri seriyası, fizika və astronomiya, – 2017, – №5, – s. 31-35.
 41. Kyazim-zade, A.G. Salmanov, V.M., Huseynov, A.G., Mamedov, R.M. [et al.] Nonlinear absorption in monoselenide of gallium and indium in laser excitation // International Conference Modern Trends in Physics, – 10-22 April, – Baku, – 2017, – pp. 239-242.
 42. Гусейнов, А.Г., Салманов, В.М., Мамедов, Р.М., Магомедов, А.З., Джабраилова, Р.Ф. Сверхбыстрые фототоки в моноселениде индия при лазерном возбуждении // Gəncə. Ümummilli lider Heydər Əliyevin anadan olmasının 94-cü ildönümünə həsr olunmuş “Müasir təbiət elmlərinin aktual problemləri Beynəlxalq Elmi Konfrans,” – 04-05 may, – 2017, – s. 163-165.
 43. КЯЗЫМ-ЗАДЕ, А.Г., Салманов, В.М., Гусейнов, А.Г., Мамедов, Р.М., Салманова, А.А., Алиев, И.М., Ахмедова, Ф.Ш. О механизме рассеяния носителей тока в сильно люминесценцирующем кристалле $AgIn_5S_8$ // Gəncə. Ümummilli lider Heydər Əliyevin anadan olmasının 94-cü ildönümünə həsr olunmuş “Müasir təbiət elmlərinin aktual problemləri Beynəlxalq Elmi Konfrans”, – 04-05 may, – 2017, – s.165-168.
 44. Salmanov, V.M. Effect of laser radiation on InSe and GaSe thin films grown via laser sublimation and chemical deposition / A.G.Huseynov, R.M.Mamedov [et al.] // Russian Journal of Physical Chemistry A, – 2018, – 92(9), – p.1790-1793.
 45. Гусейнов, А.Г. Особенности люминесценции и фотопроводимости $AgIn_5S_8$ под действием лазерного излучения / А.Г.Кязым-заде, В.М.Салманов, Р.М.Мамедов [и др.] // Известия Вузов. Томск, – 2018, – 61(11), – с. 99-103.

46. Salmanov, V.M. Laser radiation attenuator on the basis of A^3B^6 layered semiconductor connections / A.G.Kyazim-zade, A.G.Huseynov, R.M.Mamedov [et al.] // Journal of Baku Engineering University-Physics, – 2018, – 2(1), – p. 18-25.
47. Axmedova, F.Sh., Huseynov, A.G., Salmanov, V.M., Mamedov, R.M., Salmanova, A.A. Luminescence and photoconductivity of the p-GaS/n-InSe heterojunction under the action of laser radiation // Magist.və Gənc tədqiq. “Fiz. və astr. problemləri” Beyn. Elmi Konf. mat. – BDU, – 24-25 may, – 2018, – s. 70-73.
48. Кязымзаде, А.Г., Салманов, В.М., Гусейнов, А.Г., Мамедов, Р.М., Салманова, А.А., Алиев, И.М., Ахмедова, Ф.Ш. Материалы и элементы квантовой электроники на основе соединений A^3B^6 // Gəncə. Ümummilli lider Heydər Əliyevin anadan olmasının 95-cü ildönümünə həsr olunmuş “Müasir təbiət elmlərinin aktual problemləri Beynəlxalq Elmi Konfrans”, – 04-05 may, – 2018, – s. 60-63.
49. Гусейнов, А.Г., Салманов, В.М., Джафаров, М.Б., Мамедов, Р.М., Джабраилова, Р.Ф. Особенности возникновения колебаний тока в монокристалле $Ag_3In_5Se_9$ // Gəncə. Ümummilli lider Heydər Əliyevin anadan olmasının 95-cü ildönümünə həsr olunmuş “Müasir təbiət elmlərinin aktual problemləri Beynəlxalq Elmi Konfrans,” – 04-05 may, – 2018, – s. 51-54.
50. Əhmədova, F.Ş, Pənahov, T.M, Salmanov, V.M., Hüseynov, Ə.H., Məmmədov, R.M. Nd, Er və Dy nadir torpaq elementləri ilə aşqarlanmış GaSe nanozərrəciklərinin optik və lüminesensiya xassələri // AMİU. Azərbaycan Xalq Cümhuriyyətinin yaranmasının 100 illiyinə həsr olunmuş professor-müəllim heyətinin, doktorantların və gənc tədqiqatçıların Beynəlxalq elmi konfrans. – Bakı, Azərbaycan: – Aprel 26-27, – 2018, – s.170-173.
51. Салманова, А.А., Гусейнов, А.Г., Салманов, В.М., Мамедов, Р.М. Преобразователи солнечной энергии на основе наноструктур InSe // ADNSU, Intern. Conf. on

- “Energy of the Future; Challenges and Opportunities”, – 11-12 September, – 2018, – p. 103-105.
52. Hüseynov, Ə.H., Salmanov, V.M., Rzayev, R.M., Məmmədov, R.M. $Ag_3Ga_5S_9$ əsasında rütubətə həssas element // ADİU, “Respublikamızda qida və tekstil sənəyesinin inkişafı perspektivləri və qarşıda duran vəzifələr”, Res.konf. – 25 apr., – 2018, – s. 22-24.
 53. Salmanov, V.M. Current passing mechanism and electrical parametrs of InSe / A.G.Huseynov, R.M.Mamedov [et al.] // Journal of Qafqaz University-Physics, – 2018, – 4(1), – pp.59-67.
 54. Салманов, В.М., Гусейнов, А.Г., Мамедов, Р.М., Салманова, А.А., Ахмедова, Ф.Ш. Лазерная абляция тонких пленок моноселенида индия // SDU, Beynəlxalq Elmi Konfrans «Актualityные вопросы прикладной физики и энергетики - 2018», – 24-25 may, – 2018, – s.178-182.
 55. Салманов, В.М. Оптические и фотоэлектрические свойства тонких пленок GaS и гетероструктуры GaS/InSe / А.Г.Гусейнов, Р.М.Мамедов [и др.] // Optics and Spectroscopy, – 2019, – 126(5), – pp. 540–545.
 56. Кязымзаде, А.Г. Инверсия типа проводимости тонких пленок n -InSe под действием лазерного излучения / В.М.Салманов, А.Г.Гусейнов, Р.М.Мамедов [и др.] // ЖТФ, – 2019, – 89(4), – с. 599-602.
 57. Huseynov, A.G. The emergence of drift capacity in 2D InSe crystals / V.M.Salmanov, R.M.Mamedov [et al.] // Journal of Low Dimensional Systems, – 2019, – 3 (1), – p. 9-13.
 58. Салманов, В.М. Влияние электрического поля и лазерного возбуждения на спектры поглощения и люминесценции тонких пленок GaSe и InSe / А.Г.Гусейнов, А.Г.Кязымзаде, Р.М.Мамедов [и др.] // Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının xəbərləri, Fizika-texnika və riyaziyyat elmləri seriyası, fizika və astronomiya, – 2019, – №2, – s. 23-29.
 59. Кязым-заде, А.Г., Салманов, В.М., Гусейнов, А.Г., Мамедов, Р.М., Салманова, А.А., Халилова, А.Ф., Дашдамирова, Н.Д. Изменение оптических свойств тонких пленок InSe под действием лазерного излучения.

- Ümummilli lider Heydər Əliyevin anadan olmasının 95-ci ildönümünə həsr olunmuş “Müasir təbiət elmlərinin aktual problemləri Beynəlxalq Elmi Konfrans”: – Gəncə, – 03-04 may, – 2019, – s. 64-66.
60. Гусейнов, А.Г., Салманов, В.М., Джафаров, М.Б., Мамедов, Р.М., Байрамова, А.И. Особенности фотоэлектрических свойств $\text{Cu}_3\text{In}_5\text{S}_9$ // Ümummilli lider Heydər Əliyevin anadan olmasının 95-ci ildönümünə həsr olunmuş “Müasir təbiət elmlərinin aktual problemləri Beynəlxalq Elmi Konfrans”, – Gəncə, – 03-04 may, – 2019, – s. 55-57.
 61. Kyazim-Zade, A.G., Salmanov, V.M., Guseinov, A.G., Mamedov, R.M., Salmanova, A.A., Dashdamirova, N.D. Photovoltaic properties of $\text{In}_2\text{O}_3\text{-InSe-Pt}$ system // International Conference Modern Trends in Physics, Azərbaycan, Bakı BDU, – 1-3 may, – 2019, – p.16-19.
 62. Salmanov, V.M., Guseinov, A.G., Mamedov, R.M., Salmanova, A.A. The destruction of transparent dielectrics under the action of laser radiation // International Conference Modern Trends in Physics, Azərbaycan, Bakı BDU, – 1-3 may, – 2019, – p.133-136.
 63. Kyazymzade, A.G. Bandfilling effect in GaSe and InSe At high optical exchange levels / A.G.Huseynov, V.M.Salmanov, R.M.Mamedov [et al.] // Chalcogenide Letters, – 16(10), – 2019, – p. 465 – 469.
 64. Салманов, В.М., Гусейнов, А.Г., Рагимов, С.С., Мамедов, Р.М. Получение и свойства структуры $\text{InSe}_{(\text{наночастица})}$ – $\text{InSe}_{(\text{кристалл})}$ // Микро и нанотехнологии в электронике Материалы XI Межд. научно-технической конференции, Россия Кабардино-балкария, Нальчик, К-БГУ, – 03-08 июнь, – 2019, – с. 75-79.
 65. Салманов, В.М., Гусейнов, А.Г., Джафаров, М.Б., Мамедов, Р.М., Салманова, А.А. Влияние отжига в парах селена на фоточувствительность тонких пленок соединения $\text{Cu}_3\text{In}_5\text{Se}_9$ // Актуальные проблемы пищевой и легкой промышленности, Гəncə, GTU, – 2019, – s. 269-272.

66. Jafarov, M.A. Nanostructured por Si-Cu₂ZnSnS₄ thin films / E.F.Nasirov, R.M.Mammadov, S.A.Jahangirova // Chalcogenide Letters, – 2019, – 16(7), – p. 357-363.
67. Jafarov, M.A. Nanostructured Cu₂ZnSnS₄ Thin Films on Porous-Si Wafer / E.F.Nasirov, R.M.Mammadov, S.A.Jahangirova // Journal of Materials and Applications, – 2019, – 8(1), – p. 28-33.
68. Кязымзаде, А.Г. Нелинейные коэффициент поглощения и показатель преломления в GaSe при лазерном возбуждении / В.М.Салманов, А.Г.Гусейнов, Р.М.Мамедов [и др.] // BDU xəbərlər, – 2019, – №4, – с. 1-10.
69. Салманов, В.М. Нелинейное оптическое поглощение в GaSe при лазерном возбуждении / А.Г.Гусейнов, Р.М.Мамедов [и др.] // Оптика и спектроскопия, – 2020, – 128(4), – стр. 513-516.
70. Гусейнов, А.Г. Особенности фотолюминесценции и наносекундная релаксация фототока в кристаллах CuIn₅S₈ при высоком уровне оптического возбуждения / В.М.Салманов, Р.М.Мамедов [и др.] // Оптика и спектроскопия, – 2020, – 128(12), – с. 1849-1853.
71. Салманов, В.М. Поглощение ИК-света свободными носителями, созданными лазерным излучением в кристаллах InSe / А.Г.Гусейнов, Р.М.Мамедов [и др.] // АМЕА xəbərləri, Fizika-texnika və riyaziyyat elmləri seriyası, fizika və astronomiya, – 2020, – № 2, – s.163-167.
72. Гусейнов, А.Г., Салманов, В.М., Джафаров, М.Б., Мамедов, Р.М., Салманова, А.А., Байрамова А.И. Фотопроводимость и люминесценция кристаллов Cu₃Ga₅Se₉ под действием лазерного излучения // Müasir təbiət elmlərinin aktual problemləri Beynəlxalq Elmi konfrans, Gəncə Dövlət Universiteti, – 01-02 may, – 2020. – s. 28-34.
73. Салманов, В.М., Гусейнов, А.Г., Рагимов, С.С., Мамедов, Р.М., Салманова, А.А., Ахмедова, Ф.Ш. Влияние лазерного излучения на оптическое поглощение и показатель преломления GaSe // Sumqayıt Dövlət

- Universiteti, Tətbiqi fizika və energetikanın aktual məsələləri, II Beynəlxalq elmi konfrans, – 2020, – №7, – s.151-156.
74. Mamedov, R.M. A New Way of Obtaining Ultrathin Films of Indium Selenide // Russian Journal of Physical Chemistry A, – 2020, – 94(6), – pp. 1272–1275.
 75. Salmanov, V.M. Thermal nonlinearities in GaSe / A.G.Guseinov, M.A.Jafarov, R.M.Mamedov [et al.] // Chalcogenide Letters, – 2021, –18(4), – pp. 155–159.
 76. Kazim-zade, A.G. Bandgap renormalization of the InSe by laser radiation / V.M.Salmanov, A.G.Guseinov, R.M.Mamedov [et al.] // Azerbaijan Journal of Physics, – 2021, – XXVII(1), – pp. 24-28.
 77. Мамедов, Р.М. Нелинейное поглощение в InSe под действием лазерного излучения // BDU xəbərləri, – 2021, – №3, – с. 78-84.
 78. Салманов, В.М., Гусейнов, А.Г., Рагимов, С.С., Мамедов, Р.М., Ахмедова, Ф.Ш. Получение сверхтонкой пленки селенида индия и галлия на поверхности жидкой фазы. Микро- и нанотехнологии в электронике // Материалы XII Международной научно-технической конференции - Нальчик: Каб.-Балк. ун-т., – 2021, – с. 120-124.
 79. Salmanov, V.M., Məmmədov, R.M., Salmanova, A.A., Daşdəmirova, N.D. Borla aşqarlanmış InSe kristallarında enerji səviyyələri // Azərbaycan xalqının Ümummilli Lideri Heydər Əliyevin anadan olmasının 98-ci ildönümünə həsr olunmuş “Gələcəyin Alimləri” tələbələrin VI Respublika Elmi Konfransının materialları, GDU, – 06-07 may, – 2021, – s. 328-330.
 80. Гусейнов, А.Г. Особенности динамики спектра фотолюминесценции кристалла $\text{Cu}_3\text{In}_5\text{S}_9$ при изменении интенсивности лазерного возбуждения / Р.М.Мамедов, А.И.Байрамова, М.М.Джавадова // Оптика и спектроскопия, – 2022, – 130(8), – с. 1201-1204.
 81. Салманов, В.М. Особенности фотопроводимости и люминесценции тонких пленок CdS и твердых растворов $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ при лазерном возбуждении / А.Г.Гусейнов,

- М.А.Джафаров, Р.М.Мамедов [и др.] // Оптика и спектроскопия. – 2022, – 130(10), – с. 1567-1570.
82. Салманов, В.М., Мамедов, Р.М., Алиева, А.М. Экспериментальное наблюдение процессов двухквантового и трехквантового поглощения в сульфиде галлия // “Müasir təbiət elmlərinin aktual problemləri Beynəlxalq Elmi Konfrans” Gəncə, – 06-07 may, – 2022, – s. 7-10.
83. Салманов, В.М. Фотолуминесценция гетероструктур GaS-GaSe при двух и трехфотонном возбуждении лазерным излучением / А.Г.Гусейнов, Р.М.Мамедов [и др.] // Известия ВУЗ-ов, Физика, Томск, – 2022, – 65(9), – с. 54-59.
84. Mamedov, R.M. Luminescence and photoconductivity of CdS upon multiphoton excitation // AJP, Fizika, – 2022, – XXVIII(4), – pp. 57–60.
85. Мамедов, Р.М. Люминесценция и фотопроводимость в гетероструктурах GaSe/InSe при лазерном возбуждении // BDU xəbərləri, – 2022, – №3, – s. 125-133.
86. Мамедов, Р.М. Люминесценция и фотопроводимость в гетероструктурах GaS/GaSe при лазерном возбуждении // BDU xəbərləri, – 2022, – №3, – s. 103-110.
87. Салманов, В.М. Нелинейное поглощение в сульфиде галлия при лазерном возбуждении / А.Г.Гусейнов, Р.М.Мамедов [и др.] // AMEA Xəbərləri, – 2022, – № 5, – с. 74-78.



Dissertasiyanın müdafiəsi 16 oktyabr 2024-cü il tarixində saat 9³⁰ da Azərbaycan Respublikası Elm və Təhsil Nazirliyi Fizika İnstitutunun nəzdində fəaliyyət göstərən ED 1.14 Dissertasiya şurasının iclasında keçiriləcək.

Ünvan: Az-1073, Bakı şəh., H.Cavid pr.131.

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

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

Avtoreferat 13 sentyabr 2024-ci il tarixində zəruri ünvanlara göndərilmişdir.

Çapa imzalanıb: 11.09. 2024

Kağızın formatı: A5

Həcm: 77688

Tiraj: 100