

AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASI

Əlyazması hüququnda

**NAZİK TƏBƏQƏLİ VƏ NANO ÖLÇÜLÜ InSe və GaSe
YARIMKEÇİRİCİLƏRİNİN ELEKTRİK VƏ OPTİK
XASSƏLƏRİ**

İxtisas: 2220.01-Yarımkeçiricilər fizikası

Elm sahəsi: Fizika

İddiaçı: **Fidan Şirvan qızı Əhmədova**

Fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi
almaq üçün təqdim edilmiş dissertasiyanın

AVTOREFERATI

Bakı-2021

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

Elmi rəhbər: Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor
Vaqif Müseyib oğlu Salmanov

Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor
Nizami Məmməd oğlu Həsənlı

Rəsmi opponentlər: Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor
Kərim Rəhim oğlu Allahverdiyev

Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor
Hüseyn Behbud oğlu İbrahimov

Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor
Rauf Mədət oğlu Sərdarlı

Azərbaycan Respublikasının Prezidenti yanında Ali Attestasiya Komissiyasının Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Fizika İnstitutunun nəzdində fəaliyyət göstərən ED 1.14 Dissertasiya şurası

Dissertasiya şurasının sədri:

AMEA-nın həqiqi üzvü,
fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor
Nazim Timur oğlu Məmmədov

Dissertasiya şurasının elmi katibi:

Fizika elmləri doktoru, dosent
Rəfiqə Zabil qızı Mehdiyeva

Elmi seminarın sədri:

Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, dosent
Tələt Rzaqulu oğlu Mehdiyev



İşin ümumi xarakteristikası

Mövzunun aktuallığı və işlənmə dərəcəsi: Dissertasiya işi laylı GaSe və InSe nazik təbəqə və nanozərrəciklərinin lazer şüaları ilə qarşılıqlı təsirinin nəzəri və təcrübi tədqiqinə həsr olunmuşdur. Bu sahədə elmi-tədqiqat işlərinin aparılması böyük məsuliyyət tələb edirdi. Bir tərəfdən bu kristalların respublikamızın Fizika İnstitutu və Bakı Dövlət Universitetində, eyni zamanda keçmiş Sovetlər ittifaqının və bir sıra xarici ölkələrin elm mərkəzlərində uzun illər geniş tədqiq olunmasını, digər tərəfdən isə yarımkeçiricilər fizikasının yeni nailiyyətlərini nəzərə almaq lazım idi. Yarımkeçiricilər fizikasının son nailiyyətləri, xüsusi ilə yarımkeçiricilərin lazer şüaları ilə qarşılıqlı təsirinin tədqiqi fizikanın yeni elm sahələrinin yaranmasına səbəb oldu. İndi mübahiləsiz söyləmək olar ki, GaSe və InSe kristalları kvant elektronikasının, qeyri-xətti optikanın əsas elementlərinə çevrilmişdir. Bu kristallarda harmonikaların generasiyası, çoxfotonlu udma hadisəsi, işığın parametrik çevrilməsi və s. kimi effektlər aşkar edilmişdir. Yarımkeçirici nazik təbəqələrin və nanozərrəciklərin meydana gəlməsi və bununla bağlı yeni fiziki hadisələrin yaranması, GaSe və InSe yarımkeçirici birləşmələrində tədqiqat işlərinin aparılmasını yenidən ön plana çəkdi. Bu maddələrdə aşkar edilən kvant nöqtəsində lazer, miniatur terahert lazerlər, nanoölçülülük borular buna əyani misaldır. Bütün bunları nəzərə alaraq, GaSe və InSe nazik təbəqə və nanozərrəciklərində kompleks tədqiqat işlərinin aparılması nəzərdə tutulurdu.

Tədqiqatın obyektı və predmeti: Nazik təbəqəli və nano ölçülü InSe və GaSe yarımkeçiriciləri, onların qeyri-xətti optik, fotoelektrik və lüminessensiya xassələri.

Tədqiqatın məqsəd və vəzifələri: Dissertasiya işinin əsas məqsədi InSe və GaSe kristallarının vakuumda diskret ani termik buxarlandırma və modifikasiya olunmuş kimyəvi çökdürmə (SİLAR) üsulları ilə nazik təbəqə və nanozərrəciklərinin alınması, struktur və tərkib analizlərinin aparılması, alınan nümunələrdə lazer şüalarının təsiri ilə onların elektrik, optik, fotoelektrik və lüminessensiya xassələrindəki xüsusiyyətləri müəyyən edərək, praktik əhəmiyyət

kəsb edən tərəflərini göstərməkdən ibarətdir. Elmi tədqiqatın vəzifələri optimal texnoloji üsullar və rejimlər seçməklə InSe və GaSe kristallarının nazik təbəqələrini və nanohissəciklərini almaq, yüksək optik həyacanlaşmada nümunələrdə baş verə bilən qeyri-xətti optik, fotoelektrik və lüminessensiya hadisələrinin izahı üçün nəzəri biliklərə yiyələnmək və alınan eksperimental nəticələrin interpretasiyasında bilikləri tətbiq etməkdən ibarətdir.

Tədqiqat metodları:

Dissertasiya işinin yerinə yetirilməsində mükəmməl nəzəriyyələrə əsaslanmış müasir tədqiqat metodlarından və sınaq olmuş müasir texniki avadanlıqlardan istifadə olunmuşdur. InSe və GaSe monokristalları Bridgman-Stokbarger üsulu ilə yetişdirilmişdir. Termik buxarlanma üsulu ilə nazik təbəqələrin alınması ani buxarlandırma metodu ilə 10^{-7} mm.c.st. təzyiqi verə bilən vakuum kamerasında həyata keçirilmişdir. Nanozərrəciklərin və nanozərrəcikli nazik təbəqələrin alınmasında ardıcıl ion implantasiyası və reaksiya (SİLAR) üsulundan istifadə olunmuşdur. Alınan InSe və GaSe nazik təbəqə və nanozərrəciklərində müasir tədqiqat üsulları olan Rentgen Şüalarının Difraksiyası (XRD), Skanedicil Elektron Mikroskopu (SEM), Atom Qüvvə Mikroskopu (AQM) və Rentgen Şüalarının Dispers Enerji Spektroskopiyası (EDAX) vasitəsilə fiziki-kimyəvi analizlər aparılmışdır.

İşıq mənbəyi olaraq Nd^{+3} :YAG lazerindən, Rodamin boya lazerindən, He-Ne qaz lazerindən və halogen işıq lampasından istifadə olunmuşdur. İmpuls rejimində işləyən Nd^{+3} :YAG lazeri üç harmonikaya (1064, 532 və 355 nm), 12 MVt/sm² gücə, 10ns davam etmə müddətinə malik idi. Aktiv mühiti Rodamin 6G olan maye lazerin dalğa uzunluğu 594-643 nm oblastını əhatə edirdi. Lazer şüalanmasının gücü 120 kVt, impulsun müddəti 10ns, implusun təkrarlanma tezliyi isə 20 Hs -ə bərabər idi. Kəsilməz rejimdə işləyən He-Ne qaz lazerinin dalğa uzunluğu 632,8 nm, gücü 20Vt tərtibində idi.

Optik udma və lüminessensiya spektrləri ikiqat dispersiyaya, 600 nm dalğa uzunluğunda ayırdetmə qabiliyyəti 0,024 nm-ə bərabər olan M833 monoxromatordan, kompüterlə avtomatik rejimdə işləyən, 350-2000 nm dalğa uzunluğu intervalında şüaları qəbul edə

bilən detektordan istifadə edilməklə ölçülmüşdür. Fotoelektrik hadisələrinin ölçülməsində nanosaniyəli cərəyan impulslarını ölçə bilən Le Croy və Textronic tipli yaddaşlı ossilloqraflardan istifadə olunmuşdur.

Qeyri-xətti optik hadisələrin ölçülməsində ənənəvi üsullarla yanaşı İkişüallı lazer spektroskopiyası (Pump-probe spectroscopy) və Şüa distorsiyası (Beam-distortion technique) üsullarından istifadə olunmuşdur.

Müdafiəyə çıxarılan əsas müddəalar:

1. GaSe və InSe nazik təbəqə və nanozərrəciklərin kimyəvi çökdürmə üsulu ilə alınması və onların müasir tədqiqat üsulları ilə struktur analizinin aparılması,
2. GaSe və InSe nazik təbəqə və nanozərrəciklərinin optik udma və lüminessensiya spektrlərinin təcrübi tədqiqi,
3. GaSe nazik təbəqələrinin anizotropluğunun yüksək optik həyəcanlaşmada fotokeçiriciliyin ölçmə üsulu ilə təyin edilməsi,
4. 2D InSe kristalında cərəyan impulsunun relaksasiyasının təcrübi tədqiq olunması,
5. Lazer şüalarının təsiri ilə GaSe və InSe nazik təbəqələrində yaranan qeyri-xətti optik udma əmsalının və sındırma əmsalının təcrübi yolla təyin edilməsi,
6. Nd:GaS kristallarının termolüminessensiyasının xarakteristik əlamətlərinin müəyyən edilməsi və p-GaS/n-InSe heteroqəidlərinin hazırlanması,
7. Lazer şüalarının təsiri ilə InSe nazik təbəqələrinin elektrik-keçiriciliyinin inversiyasıyasının aşkar edilməsi,
8. GaSe nazik təbəqələri əsasında lazer şüalarının intensivliyini idarə edən optik filtrlərin hazırlanması,
9. InSe nazik təbəqələrində nanosaniyəli lazer impulslarının ölçülməsi.

Tədqiqatın elmi yeniliyi:

1. Selenosulfat natrium turşusundan anion məhlulu, GaCl_3 və InCl_3 duzlarının məhlulundan kation məhlulu kimi istifadə etməklə ardıcıl ion laminasiyası və reaksiya üsulu ilə şüşə və GaSe kristal

- lövhləri üzərində GaSe və InSe nazik təbəqələri və nanozərrəcikləri alınıb,
2. InSe və GaSe nazik təbəqə və nanozərrəciklərinin XRD, SEM, AQM və EDAX üsulları ilə fiziki-kimyəvi analizləri aparılıb.
 3. GaSe və InSe nazik təbəqə və nanozərrəciklərinin optik udma və lüminesensiya spektrlərinin sərbəst eksiton keçidləri ilə baş verdiyi müəyyən edilib,
 4. InSe nanozərrəciklərinin qadağan olunmuş zolağının eninin kvantölçülü effekt hesabına massiv kristallara nəzərən artması müəyyən edilmişdir,
 5. GaSe nazik təbəqələrinin anizotropluğu yüksək optik həyəcanlaşmada fotokeçiriciliyin ölçmə üsulu ilə təyin edilmişdir,
 6. 2D InSe kristalında yüksək optik həyəcanlaşmada fotocərəyan impulsunun relaksasiyasının $i = Ae^{-\frac{t}{\tau}} - A'e^{-\delta t} \cos \omega t$ qanunu ilə dəyişməsi müəyyən edilmişdir,
 7. GaSe və InSe nazik təbəqələrində yüksək optik həyəcanlaşmada yaranan qeyri-xətti optik udma əmsalı və sındırma əmsalı təcrübi yolla müəyyən edilmişdir,
 8. Nd:GaS kristallarının termolüminessensiyasının xarakteristik əlamətləri müəyyən edilmiş və p-GaS/n-InSe heteroqeydi hazırlanmışdır,
 9. InSe nazik təbəqələrində lazer şüalarının təsiri ilə elektrikkeçiriciliyinin inversiyası aşkar edilmişdir,
 10. GaSe nazik təbəqələri əsasında lazer şüalarının intensivliyini idarə edən optik filtrlər hazırlanıb,
 11. InSe nazik təbəqələri əsasında, nanosaniyəli lazer impulslarının qeyd edilməsi üçün detektorun hazırlanmasının mümkünlüyü göstərilmişdir.

Tədqiqatın nəzəri və praktiki əhəmiyyəti:

1. GaSe nazik təbəqələrində lazer şüalarının təsiri ilə sındırma əmsalının dəyişməsi yüksək optik həyəcanlaşmada zonaların optik dolma effekti ilə izah oluna bilər,
2. InSe nazik təbəqələrində lazer şüalarının təsiri ilə optik udma və sındırma əmsallarının dəyişməsi yüksək optik həyəcanlaşmada

- yaranan elektron-deşik cütünün enerjisinin qeyri-radiativ rekombinasiya nəticəsində fononların şüalanması ilə kristal qəfəsə verilməsi ilə izah oluna bilər,
3. GaSe kristallarının anizotropluğuna səbəb olan laylararası potensial baryerin enerjisi (ΔE_0) yüksək optik həyəcanlaşmada yükdaşıyıcıların fotokeçiriciliyi ilə müəyyən edilə bilər $\Delta E_0 = kT \ln \left[\frac{\Delta \sigma_2}{\Delta \sigma_1} \left(\frac{I_1}{I_2} \right)^\alpha \right]$.
 4. 2D-InSe kristallarında fotocərəyan impulsunun relaksasiyası prosesinə dissipativ sel üçün Maksvell-Kattaneo tənliyinin tətbiq olunması ilə cərəyanın zamandan asılılığını ifadə edən düsturu almaq olar $i = Ae^{-\frac{t}{\tau}} - A'e^{-\delta t} \cos \omega t$,
 5. Lazer şüalarının təsiri ilə InSe nazik təbəqələrinin elektrikkeçiriciliyinin tipini dəyişməklə p-n keçid yaratmaq olar,
 6. n-InSe–p-GaS heteroquruluşunda $\lambda = 562\text{nm}$ dalğa uzunluğunda müşahidə olunan ensiz ($\sim 10\text{nm}$) lüminessensiya xətti onlar əsasında lazer effektinin alınmasını mümkün edə bilər,
 7. GaSe və InSe nazik təbəqələri əsasında müvafiq lazer şüalları-nın intensivliyinin qiymətini kəsilməz olaraq tənzim edə bilən optik filtrlərin hazırlanmasının mümkünlüyü göstərilmişdir,
 8. InSe nazik təbəqələrində olan sürətli rekombinasiya mərkəzi vasitəsilə nanosaniyəli lazer impulslarını ölçmək üçün detektorların hazırlanması mümkün ola bilər.

İşin aprobasiyası və tətbiqi:

Dissertasiya işinin materialları Doktorantların və gənc tədqiqatçıların XXI Respublika elmi konfransı (Bakı, 2017), “International Conference Modern Trends in Physics” Beynəlxalq elmi konfransı (Bakı 2017), Ümummilli lider Heydər Əliyevin anadan olmasının 94-cü ildönümünə həsr olunmuş “Müasir təbiət elmlərinin aktual problemləri Beynəlxalq Elmi Konfrans” (Gəncə 2017), Azərbaycan Xalq Cümhuriyyətinin yaranmasının 100 illiyinə həsr olunmuş professor-müəllim heyətinin “Doktorantların və Gənc tədqiqatçıların Beynəlxalq Elmi konfransı” (Baku 2018), Gəncə Dövlət Universiteti Beynəlxalq Elmi Konfrans (Gəncə 2018), Magistrantların və Gənc tədqiqatçıların “Fizika və astronomiya

problemləri” Beynəlxalq Elmi Konfransı (Bakı 2018), Tətbiqi fizika və energetikanın aktual məsələləri Beynəlxalq Elmi Konfransın (Sumqayıt 2018), Международная научно–техническая конференция микро и нанотехнологии в электронике (Нальчик, Россия 2021) və Bakı Dövlət Universitetinin Yarımkəçiricilər fizikası kafedrasının elmi seminarlarında məruzə və müzakirə edilmişdir.

Dissertasiyanın mövzusunə aid 25 iş (17 məqalə, 8 tezis) çap olunmuşdur. Bu işlərdən 8 məqalə və 1 tezis olmaqla 9-u xaricdə, impakt faktoru olan jurnallarda və 1 konfrans materialında, 9 məqalə və 7 tezis isə yerli nəşr və konfrans materialında çap olunmuşdur.

Dissertasiya işinin yerinə yetirildiyi təşkilatın adı: Bakı Dövlət Universitetinin Yarımkəçiricilər fizikası kafedrası.

Dissertasiyanın strukturu və həcmi:

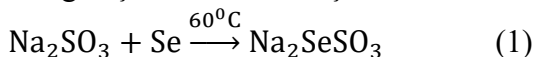
Dissertasiya işi girişdən, dörd fəsildən, nəticələrdən və 147 adda istinad edilmiş ədəbiyyat siyahısından ibarət olmaqla, 178 səhifədə şərh olunmuşdur. Dissertasiya işində 84 şəkil və 1 cədvəl vardır. Şəkillər, cədvəllər və istinad edilmiş ədəbiyyat siyahısı istisna olmaqla, giriş 12280, I fəsil 36287, II fəsil 65427, III fəsil 31697, IV fəsil 42506, nəticələr 2145, ixtisarlara və şərti işarələr isə 685 işarədən ibarətdir. Dissertasiya işinin ümumi həcmi 196939 işarədən ibarətdir.

Dissertasiyanın qısa məzmunu

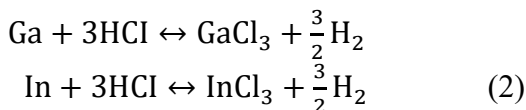
Girişdə dissertasiya işinin mövzusunun aktuallığı əsaslandırılmış, tədqiqatın məqsəd və vəzifələri, tədqiqat metodları, müdafiyyə çıxarılan əsas müddəalar, işin elmi yeniliyi, nəzəri və praktiki əhəmiyyəti göstərilmiş, aprobeasiya dərəcəsi, nəşrlər barədə məlumat verilmiş, həmçinin fəsilər üzrə dissertasiyanın əsas məzmunu qısaca şərh olunmuşdur.

Birinci fəsildə InSe və GaSe nazik təbəqələrinin və nanozərrəciklərinin alınması, alınan nümunələrin struktur analizi verilmişdir. Məlumdur ki, yarımkəçirici nazik təbəqə və nanozərrəciklərin

alınmasında müxtəlif üsullardan istifadə olunur: diskret buxarlanma üsulu, molekul selinin epitaksiyası, lazer ablasiyası, kimyəvi çökdürmə üsulu və s. Bu üsulların bəzilərindən istifadə edilərək müxtəlif nümunələr hazırlansada sonda kimyəvi çökdürmə üsuluna üstünlük verilmişdir. Buna səbəb kimyəvi çökdürmə üsulu ilə müxtəlif yarımkeçiricilərin nanozərrəciklərinin alınma praktikasının olması, təcrübənin otaq temperaturuna yaxın temperaturlarda aparılması, materialın resorbsiya sürətinin dəqiq olaraq tənzimlənməsi, materialı təşkil edən komponentlərin konsentrasiyalarının nisbətlərinin məqsədyönlü tərzdə seçilə bilinməsi və ən əsası isə maddənin stexiometrik tərkibinin saxlanılmasıdır. Yuxarıda deyilənləri nəzərə alaraq, GaSe və InSe yarımkeçirici birləşmələrin modifikasiya olunmuş kimyəvi çökdürmə (Silar) üsulu ilə nazik təbəqə və nanozərrəciklərinin alınması texnologiyası işlənmişdir. Silar üsulu ilə nanozərrəciklərin alınması prosesində maye məhlulların tədarükü üçün Se, İn, Ga, Na₂SO₃, HCl və bidistillə olunmuş su ilkin materiallar kimi istifadə olunmuşdur. Elementar Se, İn və Ga maddələri 99,99998% təmizliyə, Na₂SO₃ və HCl turşuları isə «xüsusi təmiz maddə» kateqoriyalı təmizliyə malik olmuşdurlar. Na₂SO₃ turşusuna Se dənəcikləri əlavə etməklə aşağıdakı reaksiyanın gedishinə nail olunmuşdur:



Kation məhlulu adlandırılan İnCl₂ və GaCl₂ birləşməsi isə aşağıdakı reaksiya nəticəsində alınmışdır:

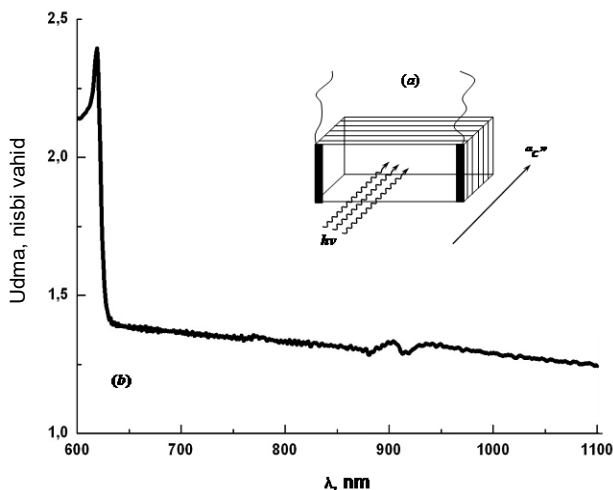


Bu reaksiyaların son məhsulları olan Na₂SeSO₃ və GaCl₃ və InCl₃ birləşmələrinin suda məhlullarının hidrogen aktivliyini pH=5 çatdırılaraq ilkin məmulat kimi istifadə etməklə GaSe və InSe nanozərrəcikləri alınmışdır.

Rentgen Şüalarının Difraksiyası (XRD), Skanedicci Elektron Mikroskopu (SEM), Atom Qüvvə Mikroskopu (AQM) və Rentgen

Şüalarının Dispers Enerji Spektroskopiyası (EDAX) vasitəsilə InSe və GaSe nazik təbəqə və nanozərrəciklərinin səth morfologiyası və struktur analizi aparılmışdır. XRD üsulu ilə GaSe və InSe nanozərrəciklərinin heksaqonal quruluşa malik olduğu müəyyən edilmiş, rentgenoqramlar əsasında GaSe və InSe nanozərrəciklərinin ölçülərinin $4\div 20\text{nm}$ intervalında olduğu göstərilmişdir. Alınmış nümunələrin SEM təsvirlərindən məlum olmuşdur ki, nazik təbəqələr diskret strukturdan ibarətdir və strukturu təşkil edən zərrəciklər forma və quruluş etibarlı ilə eynidirlər. Şüşə lövhələr üzərində yetişdirilmiş GaSe və InSe nanozərrəciklərin AQM təsvirlərində nanozərrəciklərin homogen paylanması müşahidə olunmuşdur. EDAX üsulu ilə InSe nanozərrəciyində indium atomlarının selen atomlarına nisbətinin götürülmüş maddələrinin stexiometrik nisbətinə uyğun olduğu göstərilmişdir.

İkinci fəsildə lazer şüalarının təsiri ilə InSe, GaSe və GaS nazik təbəqə və nanozərrəciklərin optik, fotoelektrik və lüminessensiya xassələri nəzəri və təcrübi tədqiqi verilmişdir. Şəkil 1-də GaSe nazik təbəqəsinin optik udma spektri verilmişdir [6, s.90-100].

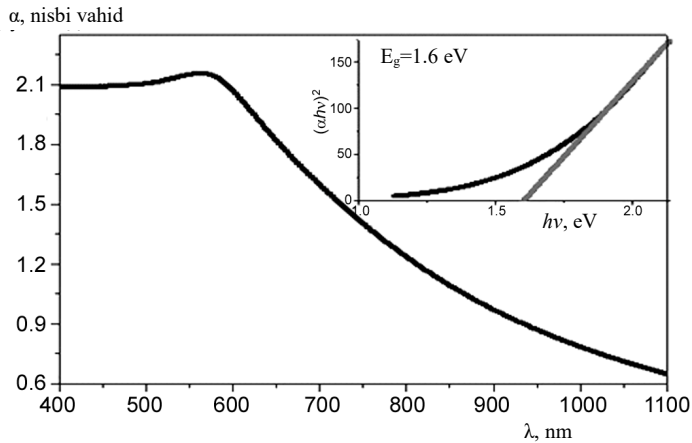


Şəkil 1. GaSe nazik təbəqəsinin optik udma spektri.

Şəkildən göründüyü kimi udma spektrinin maksimumu $\lambda = 620\text{nm}$ -ə

uyğun gələn çox ensiz pikdən ibarətdir. Uzun dalğalı oblast tərəfdə udma əmsalının kəskin azalması müşahidə olunur. $\alpha^2 \sim f(h\nu)$ asılılığından GaSe nazik təbəqəsinin qadağan edilmiş zolağının eni təyin edilmiş və onun $E_g \approx 2,02 \text{ eV}$ -a bərabər olduğu göstərilmişdir. Eksitonların əlaqə enerjisi $E_{\text{eks.}} \approx 20 \text{ meV}$ olduğundan təcrübədə müşahidə olunan $\lambda = 620 \text{ nm}$ olan maksimumu sərbəst eksiton keçidləri ilə əlaqələndirmək olar. Qeyd etmək istərdik ki, GaSe nazik təbəqələrində yarımeni bir neçə anqstrom tərtibində olan sərbəst eksiton pikinin müşahidə olunması və udma kənarının uzun dalğalı oblastda kəskin azalması bu nazik təbəqələrin həddindən artıq dərəcədə təmiz olmasını göstərir.

InSe nanozərrəciklərinin optik udma spektri Şəkil 2-də verilmişdir. InSe kristallarının fundamental udma kənarı spektrin yaxın infraqırmızı oblastına uyğun gəlir [13, s.60-63].



Şəkil 2. Şüşə altlıq üzərində alınmış InSe nanozərrəciklərinin optik udma spektri.

Şəkildən göründüyü kimi udma spektri dalğa uzunluğunun 400-1100 nm intervalını əhatə edir. Udma spektrində dalğa uzunluğunun $\lambda = 580 \text{ nm}$ qiymətində maksimum müşahidə olunur. InSe kristalları düz qadağan olunmuş zolağa malik olan yarımkeçiricilərə aid olduğundan $\lambda = 580 \text{ nm}$ asılılığından

nanozərrəciklərin qadağan olunmuş zolağının eninin $E_g=1,60\text{eV}$ -a bərabər olduğu müəyyən edilmişdir. Göründüyü kimi InSe nanozərrəciklərinin qadağan olunmuş zolağının eni massiv kristallara nəzərən ($E_g=1,34\text{ eV}$) böyük qiymətə malikdir.

Məlumdur ki, yarımkeçirici nanozərrəciklərin qadağan olunmuş zolağının eni onun ölçülərindən asılı olaraq dəyişir, bu da onlarda kvantölçülü effektin yaranmasını göstərir. Yarımkeçirici nanozərrəciklərin qadağan olunmuş zolağının eninin onun ölçülərindən asılılığını aşağıdakı düsturla ifadə etmək olar:

$$E_g = E_g^{(kristal)} + E_b \left(\frac{\pi a_b}{D} \right)^2 \quad (3)$$

burada E_g –nanostrukturun qadağan olunmuş zolağının eni, $E_g^{(kristal)}$ - massiv kristalın qadağan olunmuş zolağının eni, E_b -eksitonların əlaqə enerjisi, a_b -eksitonun Bor radiusu, D -nanozərrəciklərin ölçüsüdür.

Hesablamalar göstərir ki, InSe kristallarında $E_g^{(kristal)}=1,34\text{eV}$, $E_b=25\text{meV}$, $a_b=37\text{\AA}$, $D=12\text{nm}$ olduğunu nəzərə alsaq, nanozərrəciklərin qadağan olunmuş zolağının eninin $E_g=1,55\text{eV}$ -a bərabər olduğunu görürük. Bu da E_g -nin hesablanmış qiymətinin təcrübədən alınmış qiymətlə uyğun olduğunu göstərir.

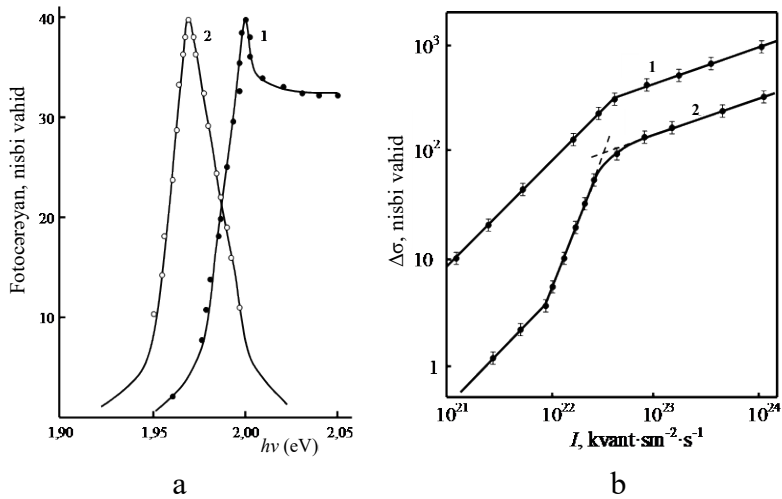
GaSe nazik təbəqələrində eksiton keçidlərinin varlığı onların luminessensiya spektrlərində də özünü göstərir. Spektirlərində maksimumu $\lambda = 620\text{nm}$, ensiz ($\sim 10\text{\AA}$) pikin müşahidə olunması fundamental udma kənarında sərbəst eksiton keçidləri ilə əlaqələndirilir. Doğrudan da lazer şüalarının təsiri ilə yaranan böyük konsentrasiyalı elektron-deşik cütü Kulon cazibəsi nəticəsində fundamental udma kənarının yaxınlığında sərbəst eksitonların yaranmasına səbəb olur. Hesablamalar göstərir ki, lazer şüalarının təsiri ilə yaranan elektron-deşik cütünün konsentrasiyası $\Delta n = \alpha I_0 \Delta t = 4,5 \times 10^{19} \text{ sm}^{-3}$ tərtibindədir (burada $\alpha = 1 \times 10^3 \text{ sm}^{-1}$ - fundamental udma kənarında udma əmsalı, $I_0 = 1,5 \times 10^{25} \frac{\text{foton}}{\text{sm}^2 \cdot \text{san}}$ -

lazer şüalarının intensivliyi, $\Delta t = 3 \times 10^{-9} \text{ san}$ – lazer impulsunun müddətidir). Analoji asılılıqlar InSe nazik təbəqələrinin

lüminessensiya spektrlərində də müşahidə olunur. Ancaq onların lüminessensiya xətləri optik diapazonun yaxın infraqırmızı oblastında ($\lambda=935\text{nm}$) yerləşir.

GaSe kristalları laylı quruluşa malik olduqlarından kristalda yükdaşıyıcıların yürüklüyü güclü anizotropiyaya malik olur. Əksər hallarda kristalın anizotropluğu elektrik xassələrinin tədqiqi ilə müəyyən edilir. Tədqiq olunan nazik təbəqələr yüksək müqavimətə malik olduqlarından elektrik ölçmələrindən laylararası potensial baryerin təbiətini müəyyən etmək mümkün olmur. Eyni sözləri optik və lüminessensiya üsulları haqqında da söyləmək olar. GaSe kristallarının laylı quruluşa malik olması laylara paralel istiqamətlərdə optik ölçülərin aparılmasına imkan vermir, lüminessensiya spektrlərində müşahidə olunan şüalanma xətlərini isə heç də həmişə birmənalı interpretasiya oluna bilmir. Yuxarıda sadalanan çətinlikləri aradan qaldırmaq üçün yüksək optik həyəcənlaşma şəraitində laylı kristallarda fotokeçiriciliyin tədqiqi üsulunu seçmək daha əlverişlidir. Nümunəyə qoyulan kontaktların konfigurasiyalarını dəyişməklə onlara laylara paralel və perpendikulyar istiqamətlərdə xarici elektrik sahəsini tətbiq etmək olar. Digər tərəfdən, yüksək optik həyəcənlaşma nəticəsində generasiya olunan böyük konsentrasiyalı elektron-deşik cütü potensial baryerin hündürlüyünü ifrat cırlaşma halına kimi idarə etməyə imkan verir. Beləliklə, laylı quruluşa malik olan GaSe kristallarında yüksək optik həyəcənlaşma şəraitində fotokeçiriciliyin ölçülməsi üsulu anizotropluğun tədqiqi üçün çox əlverişlidir. Təcrübələr qalınlığı 30-100mkm olan GaSe nazik təbəqələrində aparılmışdır [3, s.31-35]. Optik həyəcənlaşma “Rodamin 6G” maye lazeri ilə həyata keçirilmişdir. Şəkil 3,a-da GaSe nazik təbəqələrində elektrik kontaktlarının $\vec{E} \perp \vec{c}$ və $\vec{E} \parallel \vec{c}$ oriyentasiyalarına uyğun qoyulmuş hallarda fotocərəyanın spektrləri təsvir edilmişdir. Şəkildən göründüyü kimi, hər iki kontaktın işıqlanan səthdə yerləşdiyi halda $\vec{E} \perp \vec{c}$ (1-əyrisi) səthin işıqlanması ilə elektromaqnit dalğalarının (1.95÷2.05)eV enerji oblastında yüksək fəthəssaslığa malik eksiton piki müşahidə olunur. Elektrik sahəsinin istiqaməti $\vec{c}$ oxuna paralel yönəldikdə ($\vec{E} \parallel \vec{c}$) fotocərəyanın spektri əsaslı sürətdə

dəyişir (2 əyrisi). Nümunə əvvəlki spektrə nəzərən daha kiçik enerjilərdə fətohəssas olur və spektrin maksimal piki $\hbar\omega = 1.967\text{eV}$ enerjiddə müşahidə olunur. Enerjinin bu qiymətdən başlayaraq artması ilə fotocərəyanın kəskin azalması müşahidə olunur.



Şəkil 3, a-GaSe nazik təbəqələrində elektrik kontaktlarının müxtəlif oriyentasiyalarında fətokeçiriciliyin spektral

xarakteristikaları: 1- $\vec{E} \perp \vec{c}$, 2- $\vec{E} \parallel \vec{c}$;

b-GaSe kristallarının fətokeçiriciliyinin lazer şüalarının

intensivliyindən asılılıqları: 1- $\vec{E} \perp \vec{c}$, 2- $\vec{E} \parallel \vec{c}$

Şəkil 3,b-də kontaktlarının $\vec{E} \perp \vec{c}$, $\vec{E} \parallel \vec{c}$ istiqamətlərindəki oriyentasiyalarında, lazer şüalarının intensivliyinin 10^{21} - 10^{25} kvant/sm²·s intervalında dəyişməsində, fətohəssaslığın maksimal qiymətlərinə uyğun olan dalğa uzunluqlarında ($\lambda_1 = 620\text{nm}$, $\lambda_2 = 630\text{nm}$) fətokeçiriciliyin lüks-ampər xarakteristikaları verilmişdir. Şəkildən göründüyü kimi $\vec{E} \perp \vec{c}$ halında fotocərəyanın ($\Delta\sigma$) lazer şüalarının intensivliyindən (I) asılılığı xətti xarakter daşıyır (1 əyrisi), $\vec{E} \parallel \vec{c}$ halında isə müəyyən intensivlik diapazonunda xətti asılılıq daha güclü asılılıqla əvəz olunur $\Delta\sigma \sim I^{2.5}$

(2 əyrisi). Lazer şüalarının intensivliyinin 10^{23} - 10^{25} kvant/sm²·s intervalında hər iki xarakteristika eyni xarakterlidir və fotokeçiriciliyin intensivlikdən zəif asılı olduğu müşahidə olunur. GaSe nazik təbəqələrində fotokeçiriciliyinin spektral və lüks-ampere xarakteristikalarında müşahidə olunan xüsusiyyətlər $\vec{c}$ oxuna paralel istiqamətdə qeyri-tarazlıqlı yükdaşıyıcıların qadağan olunmuş zolağın fluktuasiyası nəticəsində yaranmış potensial çuxurlardan delokalizasiya olunması ilə əlaqədardır. Potensial baryerin enerjisinin yükdaşıyıcıların fotokeçiriciliyindən və lazer şüalarının intensivliyindən asılılığı aşağıdakı düsturla ifadə olunur

$$\Delta E_0 = kT \ln \left[\frac{\Delta \sigma_2}{\Delta \sigma_1} \left(\frac{I_1}{I_2} \right)^\alpha \right] \quad (4)$$

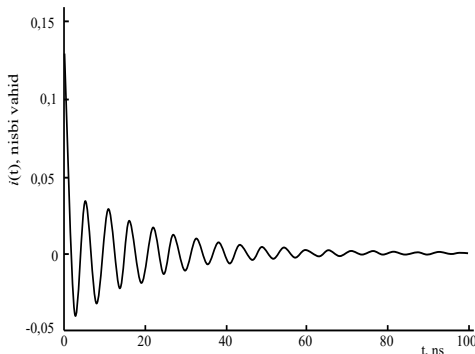
burada $\Delta \sigma_1$ və $\Delta \sigma_2$ fotokeçiriciliyin I_1 və I_2 intensivliklərdəki qiymətləri, $\alpha - \Delta n \sim I^\alpha$ asılılığının göstəricisidir. Hesablamalar göstərir ki, $\Delta E_0 = 50 meV$ tərtibindədir.

2D-ölçülü materiallar sırasında atomar nazik InSe təbəqəsi nanoelektronika və fotonika üçün ən perspektivli material hesab olunur. Qrafen, Mo₂S və başqaları kimi 2D materiallar qarşısında 2D InSe kristalının əsas üstünlüyü ondan ibarətdir ki, nazik InSe təbəqələrində keçirici elektronların yüürlüyü çox böyük ($\sim 7000 \text{ sm}^2 \text{V} \cdot \text{s}^{-1}$), qeyri-tarazlıqlı yükdaşıyıcıların yaşama müddəti çox kiçik ($\sim 10^{-9} \text{ s}$) olur. 2D kristallarında cərəyanın keçmə mexanizmi həcmi kristallardan kəskin fərqlənir. Belə nazik təbəqələrdən cərəyan keçməsi xüsusi hallarda təbəqə daxilində dreyf tutumunun yaranmasına səbəb olur. Dreyf tutumunun yaranması üçün zəruri şərt təbəqə daxilində yükdaşıyıcıların yüürlüklərinin biri-birindən kəskin fərqlənməsidir. InSe nazik təbəqələrində elektronların yüürlüyü dəşiklərin yüürlüyündən təqribən iki tərtib böyükdür. InSe nazik təbəqələrində cərəyan impulsunun relaksasiyası aşkar edilmişdir. InSe nazik təbəqəsinə lazer şüaları ilə təsir etdikdə təbəqə daxilində yüksək konsentrasiyalı yükdaşıyıcılar yaranır. Böyük yüürlüklü elektronların sürətli ekstraksiyası və nümunənin girişində “yavaş” dəşiklərin elektron injeksiyasını məhdudlaşdırması nümunənin girişində müsbət, çıxışında isə mənfi

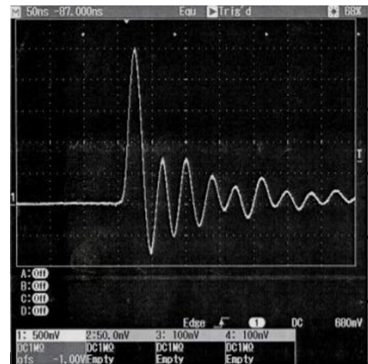
yüklərin yığılması dreyf tutumu formalaşdırır. Bu halda tutum və müqavimətdən ibarət olan dövrədə sönən elektromaqnit rəqsləri generasiya olunur [17, s.9-13]. Ona görə də fotocərəyanın relaksasiyasına relaksasiya tipli dissipativ sel kimi baxmaq və ona Maksvell-Kattaneo tənliyini tətbiq etmək olar:

$$i = Ae^{-\frac{t}{\tau}} - A'e^{-\delta t} \cos \omega t \quad (5)$$

Şəkil 4,a-da (5) ifadəsinə əsasən alınan $i(t)$ asılılığı verilmişdir. İnSe nazik təbəqəsində davamətmə müddəti 12ns və dalğa uzunluğu $\lambda = 535nm$ olan lazer şüalarının yaratdığı fotocərəyanın kinetikasi isə şəkil 4,b-də verilmişdir. Nəzəri hesablanmış və təcrübi alınmış $i(t)$ ayrılarının müqayisəsində çox yaxşı uyğunluğun olduğu görünür.



a

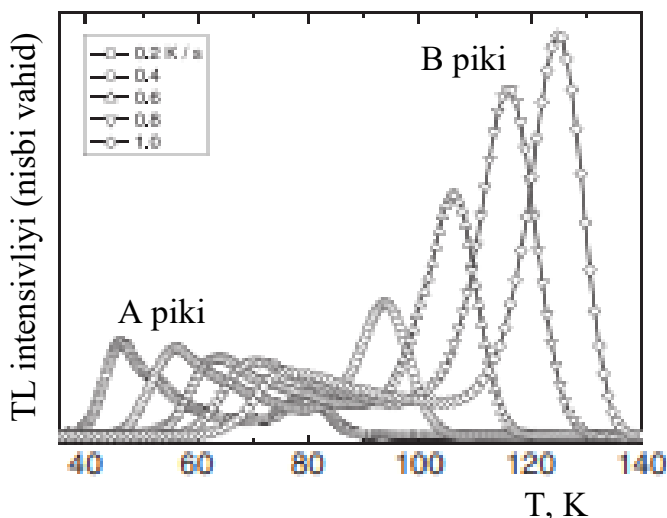


b

Şəkil 4, a- (5) tənliyi ilə hesablanmış relaksasiya ayrısı, b- İnSe nazik təbəqəsində təcrübi alınan fotocərəyanın kinetikasi.

Neodim aşqarlarının GaS kristallarında və nanozərrəciklərində neytral mövqedə özünə yer tutması və dayaz donor aşqarlarının kompensasiya olması belə bir ideya yaranmasına səbəb oldu ki, neodim atomları ilə GaS kristallarını aşqarlamaq və n-İnSe-p-GaS<Nd> heteroqəçidi hazırlamaqla göy rəngli işıq mənbəyi əldə etmək olar. Məlumdur ki, GaS kristalının otaq temperaturunda qadağan olunmuş çəpinə zolağının eni 2.53eV, düzünə zolağının eni

isə 3.04eV təşkil edir. Deməli, genişzonalı GaS kristalında şüalanma mərkəzləri yaratmaqla göy rəngdən başlayaraq qırmızı rəngə qədər geniş diapazonda lüminessensiya almaq olar. TL-in intensivliyinin müxtəlif qızdırılma sürətlərində temperaturdan asılılıqları şəkil 5-də verilmişdir [10, s.1-5]. Şəkildən göründüyü kimi TL parlaqlıq ayrılalarında iki pik müşahidə olunmuşdur, A və B pikləri.



Şəkil 5. GaS:Nd kristalında müxtəlif qızdırılma sürətlərində TL-in parlaqlıq ayrılaları.

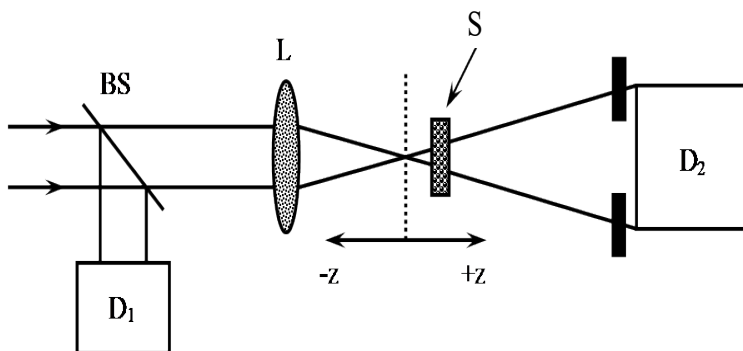
A və B pikləri qızma sürətindən asılı olaraq özlərini müxtəlif cür aparırlar. Qızma sürətinin artması ilə A pikinin intensivliyi kiçilir, B pikinin isə böyüyür. A pikinin davranışı gözlənilən nəticədir və bir tutma mərkəzi-bir rekombinasiya modelinə cavab verir. B pikinin isə GaS kristalının məxsusi defektləri hesabına yarandığı mülahizə olunur.

Dissertasiya işinin **üçüncü fəsilində** lazer şüalarının təsiri ilə GaSe və InSe kristallarında qeyri-xətti optik udma əmsalı və sındırma əmsalı təcrübi olaraq təyin edilmişdir. Mühitin optik həyəcənlaşmaya münasibəti onun optik parametrləri ilə xarakterizə olunur. Yüksək optik həyəcənlaşmada, elektromaqnit sahəsinin

gərginliyi atomdaxili sahənin gərginliyi tərtibində və ya ondan böyük olduqda ($10^9\text{--}10^{12}$ V/m) maddələrin optik xassələri modifikasiya olunur, yəni mühitin işığın təsirinə reaksiyası həyəcanlaşma intensivliyindən asılı olur. Yüksək optik həyəcanlaşmada bütün maddələr, demək olar ki, qeyri-xətti xarakteristikaya malik olur. Bu şəraitdə mühitin fiziki xarakteristikaları (dielektrik nüfuzluğu, udma əmsalı, sındırma əmsalı və s.) mühitdən keçən işığın intensivliyindən asılı olur.

Belə tədqiqat işlərinin aparılması bu kristalların nəinki qeyri-xətti optikada tədqiq olunma imkanlarını genişləndirir, eyni zamanda onların əsasında optik düzləndirici sistemlərin, logiq sxemlərin, optik informasiya sistemlərinin hazırlanmasının mümkünlüyünü göstərir [21, s.121-131].

GaSe nazik təbəqələrində qeyri-xətti optik udma hadisəsini tədqiq etmək üçün Rodamin 6G olan maye lazerindən istifadə edilmişdir. Optik sabitləri müəyyən etmək üçün şüa distorsiyası (Z-skan metodu) üsulundan istifadə edilmişdir. Bu üsul tədqiq olunan nümunənin linzanın fokusu ətrafında yerdəyişməsindən və nümunədən keçən işıq şüalarının intensivliyinin ölçülməsindən ibarətdir. Şəkil 6-da şüa distorsiyası üsulunun təcrübi sxemi verilmişdir.

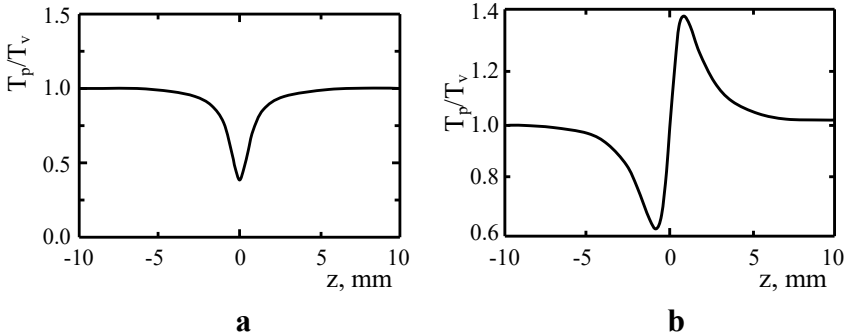


Şəkil 6. Z-skan metodunun təcrübi sxemi.

S nümunəsi Z-oxu boyunca hərəkət etdirilir və nümunədən keçən şüalar D_2 detektoru vasitəsilə qeyd olunur. D_1 detektoru vasitəsilə lazer şüalarının intensivliyinə nəzarət edilir. Nümunədən keçən lazer

şüalarının intensivliyinin dəyişməsi nümunənin qeyri-xətti sındırma əmsalı ilə əlaqələndirilir.

Z-skan metodu ilə “açıq aperture” rejimində nümunədən keçən lazer şüalarının intensivliyinin onun fokus nöqtəsinə nəzərən yerdəyişməsindən asılılığı ölçülmüşdür (Şəkil 7,a).



Şəkil 7. GaSe nazik təbəqələrində açıq (a) və qapalı (b) aperture rejimlərində buraxma əmsalının nümunənin fokus nöqtəsinə nəzərən yerdəyişməsindən asılılığı. T_v – alçaq intensivlikdə, T_p isə yüksək intensivlikdə buraxma əmsalıdır.

Şəkildən göründüyü kimi bu asılılıq linzanın fokusuna nəzərən simmetrikdir ($z=0$ mm). Qeyri-xətti sındırma əmsalını müəyyən etmək üçün “qapalı aperture” rejimindən istifadə edilmişdir. Öz-özünə fokuslama effekti nəticəsində detektorun müstəvisində işığın intensivliyi dəyişdiyi üçün detektorun qarşısında qoyulan diafraqma vasitəsilə qeyri-xətti sındırma əmsalını ölçmək mümkün olmuşdur. Şəkil 7,b-də “qapalı aperture” rejimində buraxma əmsalının nümunənin fokus nöqtəsinə nəzərən yerdəyişməsindən asılılığı göstərilmişdir. Şəkildən göründüyü kimi nümunə fokus nöqtəsindən uzaqda yerləşdikdə, nümunədən keçən işığın intensivliyi azalır. Nümunə fokus nöqtəsinə yaxınlaşdıqca işığın intensivliyi artaraq nümunədə öz-özünə fokuslama hadisəsinin yaranmasına səbəb olur. Sındırma əmsalının dəyişməsi nümunədən keçən şüaların fazasının dəyişməsinə səbəb olur.

$$\Delta\Phi_0 = (2\pi/\lambda)\Delta n(\omega)d \quad (6)$$

burada d -nümunənin effektiv uzunluğu, λ -lazer şüalarının dalğa uzunluğudur.

Fazanın dəyişməsi nəticəsində sındırma əmsalının dəyişməsi təcrübədə ölçülən $\Delta T_{pv} = T_p - T_v$ kəmiyyəti ilə müəyyən edilir. ΔT_{pv} -nin $\Delta\Phi$ faza asılılığını bilərək $\Delta T_{pv} \approx 0.45(\Delta\Phi)$, $\Delta n(\omega)$ aşağıdakı düsturla təyin edə bilərik:

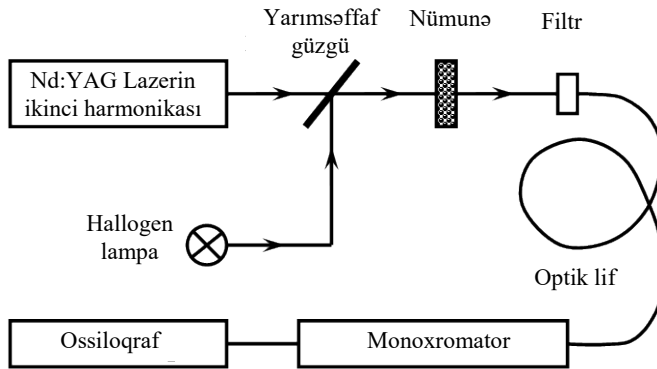
$$\Delta n(\omega) = \frac{\Delta T_{pv} \cdot \lambda \cdot \alpha}{0.45 \cdot 2\pi(1 - \exp(-\alpha l))} \quad (7)$$

burada $\lambda = 620\text{nm}$ lazer şüalarının dalğa uzunluğu, $\alpha \approx 10^3 \text{ sm}^{-1}$ GaSe kristalının fundamental udma kənarında optik udma əmsalıdır. Hesablamalar göstərir ki, lazer şüalarının gücünün $W \sim 10 \text{ MVt/sm}^2$ qiymətində sındırma əmsalının dəyişməsi $\Delta n(\omega) \approx 0.12$ -ə bərabərdir. Təbii ki, lazer şüalarının intensivliyi azaldıqca sındırma əmsalının dəyişməsi də azalacaqdır. Belə ki, lazer şüalarının gücünün $W \sim 0.5 \text{ MVt/sm}^2$ qiymətində sındırma əmsalının dəyişməsi $\Delta n(\omega) \approx 0.069$ -a bərabər olur.

Lazer şüalarının təsiri ilə yarımkeçiricilərdə daha başqa bir qeyri-xətti optik udma hadisəsi də baş verə bilər. Məlumdur ki, yarımkeçiricilərdə lazer şüalarının təsiri ilə böyük konsentrasiyalı elektron-deşik cütü ($\sim 10^{18} - 10^{19} \text{ sm}^{-3}$) yaratmaq mümkündür. Bu yükdaşıyıcıların rekombinasiyası əsasən iki yolla baş verə bilər, radiaktiv (şüalanma) və ya qeyri-radiaktiv (şüalanmasız). Adətən radiaktiv rekombinasiya prosesi zona-zona, eksiton və aşqar səviyyələrindəki optik keçidlərlə əlaqədardır. Qadağan olunmuş zolağın eni nisbətən böyük olan ($1-2\text{eV}$) yarımkeçiricilərdə radiaktiv rekombinasiyanın intensivliyi nəzərə cəpacaq dərəcədə kiçikdir. Qeyri-radiaktiv rekombinasiya prosesində lazer şüalarının təsiri ilə yaranan elektron-deşik cütünün enerjisi fononların şüalanması vasitəsilə kristal qəfəsə verilir və nəticədə kristalın temperaturu artır. Kristal qəfəsin temperaturunun artması yükdaşıyıcıların şüalanmasız rekombinasiyası zamanı ayrılan enerjinin birbaşa kristal qəfəsə, plazmonlar və ya Oje rekombinasiyası vasitəsilə verilməsi nəticəsində ola bilər. Bütün bu proseslər yarımkeçiricilərin fundamental udma kənarının uzundalğalı oblasta tərəf sürüşməsinə səbəb olacaqdır. Beləliklə lazer şüalarının təsiri ilə meydana gələn

istilik qeyri-xəttilik prosesi vasitəsilə optik udma əmsalı və sındırma əmsalının dəyişməsinə təcrübi olaraq müəyyən etmək mümkündür. Dissertasiya işində InSe nazik təbəqələrdə istilik qeyri-xətti effekti aşkar edilmiş və onun nəzəri və təcrübi tədqiqi aparılmışdır [22,s.148-153; 24,s.63-69].

Təcrübələr 20-150 mkm ölçülü InSe nazik təbəqələrdə iki şüalı lazer spektroskopiyası üsulu ilə aparılmışdır (şəkil 8).



Şəkil 8. InSe kristallarında istilik qeyri-xətti effektini ölçmək üçün istifadə olunan qurğunun sxemi.

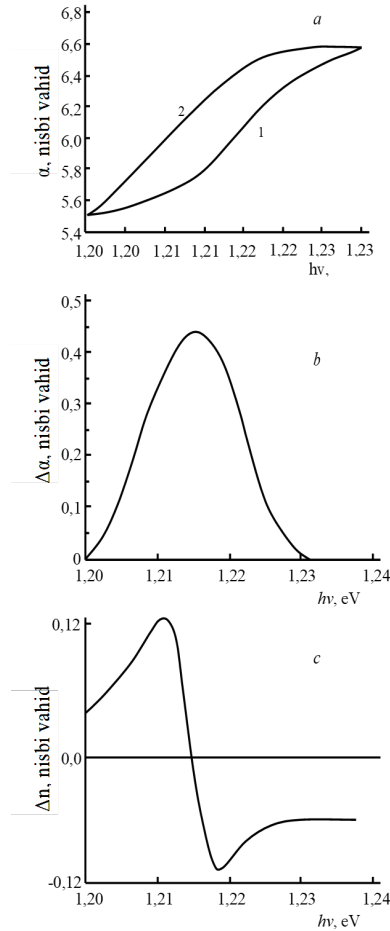
Lazer şüaları qismində Nd:YAG-lazerinin ikinci harmonikasından ($\lambda = 532nm$) istifadə edilmişdir. İkinci şüa mənbəyi olaraq halogen lampasından istifadə olunmuşdur. Bu şüalar vasitəsilə nümunələrin optik buraxma spektrləri ölçülmüşdür.

Şəkil 9,a-da InSe kristalının udma əmsalının, müqayisəli şəkildə (lazer şüalarının intensivliyi kiçik və böyük olan halda) enerjiden asılılığı göstərilmişdir. Şəkildən göründüyü kimi lazer şüalarının intensivliyinin yüksək qiymətində udma kənarının spektrin kiçik enerji oblastına tərəf sürüşməsi müşahidə olunur (2 əyrisi). Bu halda udma əmsalının optik həyacanlaşmadan asılı olaraq dəyişməsinə ($\Delta\alpha$) 1 və 2 əyrilərinin bilavasitə fərqiindən müəyyən etmək olar (Şəkil 9,b). Göründüyü kimi udma əmsalının maksimum dəyişməsi qadağan olunmuş zolağın bilavasitə yaxınlığında baş verir.

Fotonun verilmiş enerjisində sındırma əmsalının dəyişməsini Kramers-Kroniq ifadəsinə görə aşağıdakı kimi ifadə etmək olar:

$$\Delta n(\hbar\omega) = \frac{hc}{\pi} \int_0^\infty \frac{\Delta\alpha(\hbar\omega')}{(\hbar\omega')^2 - (\hbar\omega)^2} d(\hbar\omega') \quad (8)$$

Şəkil 9,c- də sındırma əmsalının dəyişməsinin enerjidən asılılığı göstərilmişdir.



Şəkil 9. InSe kristallarında lazer şüaların təsiri ilə qeyri-xətti optik udma hadisəsi: (a)- kiçik (0,5 MVt/sm², 1 əyrisi) və yüksək

**(10 MVt/sm², 2 əyrisi) həyəcanlaşmada optik udma spektrləri,
(b)-udma əmsalının, (c)-sındırma əmsalının dəyişməsidir
[22, s.148-153].**

Şəkildən göründüyü kimi sındırma əmsalının dəyişməsi fundamental udma kənarından kiçik enerjilərdə müsbət, böyük enerjilərdə isə mənfi qiymətə malikdir. Lazer şüasının təsiri ilə sındırma əmsalının induksiyanlanmış mənfi dəyişməsi öz-özünə səpilmə effekti yaradır. $\Delta n(\omega) > 0$ öz-özünə fokuslanan qeyri-xətli optik effekt adlanır və mühit toplayıcı linza rolunu oynayır. Buna səbəb lazer şüalarının intensivliyinin şüanın mərkəzində kənarlarına nisbətən böyük olmasıdır. Deməli, birmodalı lazer şüası ($\lambda=535\text{nm}$) InSe kristalından keçdikdə şüalanmanın mərkəzində intensivlik çox olduğu üçün sındırma əmsalı dəyişir, lakin kənarlarda intensivliyin nisbətən az olması sındırma əmsalını dəyişməz saxlayır.

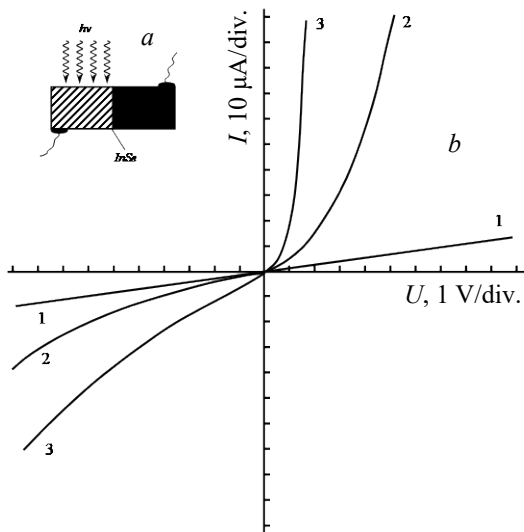
Məlumdur ki, yarımkeçiricilərdə kristal qəfəsin temperaturunun artması qadağan olunmuş zolağın eninin azalmasına səbəb olur. İstilik qeyri-xətli optik effekti nəticəsində qadağan olunmuş zolağın eninin azalması aşağıdakı düsturla hesablanı bilər:

$$E_g(T) = 1250\text{meV} - \frac{0.58T^2}{T+226\text{K}} \frac{\text{meV}}{\text{K}} \quad (9)$$

Təcrübə göstərir ki, lazer şüalarının təsiri ilə fundamental udma kənarının uzun dalğalara tərəf sürüşməsi 10nm tərtibindədir. Sonuncu (9) ifadəsi göstərir ki, temperaturun 50-60⁰C artması E_g -nin 0.01eV azalmasına səbəb olur. Bu rəqəm təcrübədə əldə olunan qiymətlə uyğunluq təşkil edir.

Dissertasiya işinin **dördüncü fəsl**i GaSe və InSe nazik təbəqələrində aparılan elmi tədqiqat işlərinin praktik əhəmiyyətinə həsr olunmuşdur. Aparılan təcrübələr göstərdi ki, n-InSe nazik təbəqələrinə lazer şüaları ilə təsir etdikdə onların elektrikkeçiriciliyinin inversiyasına nail olmaq mümkündür. Təcrübələr Nd:YAG impuls lazeri vasitəsilə həyata keçirilmişdir. Şəkil 10,a-da təcrübənin sxemi göstərilmişdir. İstifadə olunan n-InSe nazik təbəqəsinin bir hissəsinə lazer şüaları ilə təsir etdikdə elektrikkeçiriciliyinin tipi dəyişərək p-tip olmuşdur. Eyni zamanda

nümunənin volt-ampere xarakteristikasında (VAX) da əsaslı dəyişiklik müşahidə olunmuşdur (şəkil 10,b). Şəkildən görüldüyü kimi lazer şüalanmasına qədər VAX simmetrik xarakteristikaya malikdir (1 əyrisi). Lazer şüalarının təsirindən sonra VAX diod xarakteristikasına malik olur (2,3 əyriyələri). Bu zaman düzləndirmə əmsalı nümunəyə verilən gərginliyin 2V qiymətində $\sim 2 \cdot 10^2$ tərtibində olmuşdur (3 əyrisi).



Şəkil 10. a- InSe nazik təbəqəsində olan cərəyan kontaktlarının lazer şüalarına nəzərən vəziyyəti, b-lazer şüalarının müxtəlif gücündə volt-ampere xarakteristikaları: 1- lazer şüalanmasına qədər, 2 - lazer şüalanmasından sonra $W \sim 6.0 \text{ MVt/cm}^2$, 3- lazer şüalanmasından sonra $W \sim 10 \text{ MVt/cm}^2$.

InSe nazik təbəqəsinin rentgen şüalarının dispers spektroskopiyaya vasitəsilə aparılan struktur analizi (EDAX) göstərdi ki, maddənin tərkibi lazer şüalarının təsirindən sonra heç bir dəyişikliyə məruz qalmamışdır. InSe nazik təbəqəsini təşkil edən hər bir komponentin kütlə miqdarı bütövlükdə maddənin stexiometrik tərkibini saxlanıldığını söyləməyə imkan verir. InSe nazik təbəqəsinin skanedici elektron mikroskopu vasitəsilə təsviri lazer şüalarının

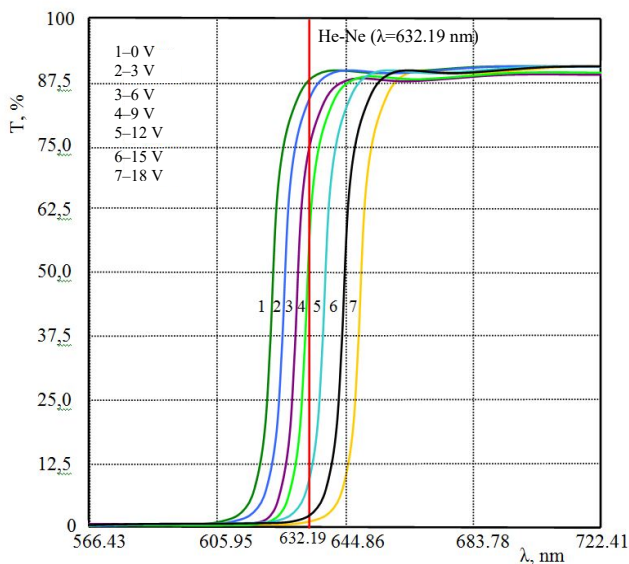
təsirindən sonra nazik təbəqənin tərkibinin bircins olduğunu göstərir. Bizim fikrimizcə, lazer şüalarının təsiri ilə InSe nazik təbəqələrinin keçiriciliyinin tipinin dəyişməsi kristalda mövcud olan defektlərin dinamikasının dəyişməsi və ya lazer şüalarının struktur qeyri-bircinsliklərində udulması ilə əlaqədar ola bilər. Hər iki halda qəfəs udulması kristalın temperaturunun artmasına səbəb olur.

Lazer fizikasının ən aktual problemlərindən biri də lazer şüalarının intensivliyinin idarə olunmasıdır. Hesablamalar göstərir ki, müasir lazer impulslarının müddətinin 1fs ($1\text{fs}=10^{-15}\text{san}$), enerjisinin 1Mj ($1\text{Mj}=10^6\text{j}$) və fokuslandığı sahənin $\sim 10^{-4}\text{sm}^2$ olduğunu nəzərə alsaq, lazerin enerji selinin sıxlığının $q = \frac{E}{S\tau} = 10^{25}\text{Vt/sm}^2$ tərtibində olduğunu görürük.

Belə bir böyük intensivliyə (gücə) malik olan lazer şüalarını birbaşa tədqiq olunan nümunəyə yönəltmək praktik olaraq mümkün deyildir, çünki, bu zaman lazer şüalarının gücündən asılı olaraq, maddənin əriməsi, buxarlanması, plazma əmələ gəlməsi və s. baş verə bilər. Odur ki, lazer şüalarının intensivliyini geniş diapazonda dəyişə bilən və eyni zamanda impulsun formasını təhrif etməyən elementlərə bu gün də böyük ehtiyac vardır. Doğrudur, bu sahədə artıq müəyyən nailiyyətlər əldə edilmişdir. Hal-hazırda lazer şüalarının intensivliyini azaltmaq məqsədilə müxtəlif neytral filtrlər, idarə olunan mexaniki diafraqmalar, optik polarizatorlar və integral sistemlərdən istifadə olunur. Ancaq bu cihazların hamısının müəyyən çatışmamazlıqları vardır. Dissertasiya işində lazer şüalarının intensivliyinin dəyişməsi üçün başqa bir üsul təqdim olunur. Bu üsul elektrik sahəsinin təsiri ilə optik udma əmsalının dəyişməsinə əsaslanır. Müəyyən edilmişdir ki, laylı quruluşa malik olan GaSe və InSe nazik təbəqələrinin fundamental udma kənarı xarici elektrik sahəsinin təsiri ilə spektrin uzundalğalı oblastına tərəf anomal sürüşməyə məruz qalır. Təcrübələr göstərir ki, GaSe nazik təbəqələrinə verilən gərginliyin $\sim 20\text{V}$ (10^3 V/sm) qiymətində maksimal sürüşmə $\sim 16\text{ nm}$ və ya 50 meV -ə bərabər olur (Şəkil 11) [12, s.18-25]. Bu da He-Ne qaz lazerinin intensivliyini modulyasiya etməyə imkan verir. Belə ki, He-Ne qaz lazerinin maksimal şüalanması $\lambda = 632,8\text{ nm}$ -ə bərabər olduğundan, nümunəyə tətbiq olunan xarici gərginliyin $U=18\text{V}$ qiymətində

buraxma əmsalı sıfıra bərabər olacaqdır.

Analoji təcrübələr InSe, GaS nazik təbəqələri, $\text{GaS}_x\text{Se}_{1-x}$ bərk məhlulları və Bor atomları ilə aşqarlanmış GaSe(B) nazik təbəqələrində də aparılmış və müəyyən edilmişdir ki, bu yarımkeçirici birləşmələr əsasında He-Ne qaz lazerinin ($\lambda = 632,8\text{nm}$), Nd:YAG lazerinin ($\lambda = 1060\text{nm}$) və müxtəlif dalğa uzunluğuna malik olan maye lazerin (625, 629, 632,8, 634nm) intensivliyini iki tərtib dəyişmək olar.



Şəkil 11. GaSe nazik təbəqəsinin buraxma spektrinin ona tətbiq olunan elektrik sahəsinin gərginliyindən asılılığı.

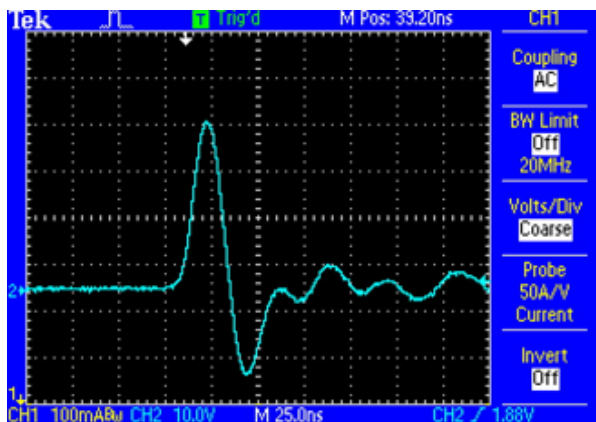
Aparılan təcrübi tədqiqatlar və hesablamalara əsasən GaSe nazik təbəqələrinin optik udma kənarının uzundalğa oblastına tərəf sürüşməsi aşağıdakı kimi izah oluna bilər: nümunəyə tətbiq olunan elektrik sahəsi onun temperaturunun artmasına və nəticədə udma kənarının uzundalğalı oblasta tərəf sürüşməsinə səbəb olur. Hesablamalar göstərir ki, xüsusi müqaviməti $\rho \sim 10^3 \text{Om} \cdot \text{sm}$ olan nümunəyə $U=20\text{V}$ tərtibində elektrik sahəsi tətbiq etdikdə $\sim 1.9 \text{ Vt/sm}^2$ enerji ayrılacaqdır. Bu nümunədə temperaturun $\sim 45\text{-}50^\circ\text{C}$ olmasına səbəb olacaqdır. Beləliklə, GaSe nazik təbəqələrinin optik

udma kənarının uzundalğa oblastına tərəf sürüşməsi nəticəsində He-Ne lazerinin, maye lazerin bəzi dalğa uzunluğuna malik olan impulslarının intensivliyini idarə etmək mümkün olmuşdur. Əlbəttə, laylı A^3B^6 yarımkəçiri birləşmələrin (GaSe, InSe, GaS, $Ga_{0.5}Se_{0.5}$) fundamental udma kənarının xarici elektrik sahəsinin təsiri ilə spektrin uzundalğalı oblastına anomal böyük məsafəyə ($\sim 160 \text{ \AA}$ və ya 50 meV) tərəf sürüşməsi böyük marağa səbəb olmuşdur. Analoji təcrübələrin klassik yarımkəçiricilər olan Ge, Si, GaAs və başqaları ilə aparılması bu sürüşmənin olduqca cüzi (bir neçə millielektron volt) və Frans-Keldiş effekti ilə izah olunduğunu göstərir. Hal-hazırda bu məsələyə birqiymətli yanaşmaq mümkün deyildir. Çox güman ki, belə anomal böyük sürüşməyə səbəb, laylı quruluşu bu yarımkəçiricilərdə lay boyunca kovalent, laylar arasında isə zəif Van-der-Vaals qarşılıqlı təsirinin olmasıdır. Laylar arası zəif Van-der-Vaals qarşılıqlı təsirinin olması qadağan olunmuş zolağın eninin temperaturdan asılı olaraq uzundalğalı oblasta tərəf böyük sürüşməsinə səbəb olur. Yuxarıda deyilənləri bor atomları ilə aşqarlanmış GaSe nazik təbəqələrində apardığımız təcrübələr də təsdiq edir. Belə ki, GaSe(B) nazik təbəqələrdə sürüşmə olduqca kiçikdir ($1-3 \text{ meV}$). Buna səbəb kimi GaSe kristal quruluşunda Ga atomlarının B atomları ilə əvəz edilməsi nəticəsində Se atomları ilə daha güclü rabitə yaradılmasıdır.

Nanosaniyəli lazer impulslarını ölçə bilən qəbuledicilərin hazırlanması lazer fizikasının ən aktual problemlərindən biridir. Hal-hazırda bu məqsədlə bir neçə üsuldən istifadə olunur. Xarici fotoeffekt hadisəsinə əsaslanan vakuum fotoelementləri çox mürəkkəb quruluşa malikdir. Eyni zamanda bu cihazın işləməsi üçün yüksək gərginlikli cərəyan mənbəyi tələb olunur. Ge və Si əsasında hazırlanan fotodiodların effektivliyi az, hazırlanma texnologiyaları isə olduqca mürəkkəbdir. Digər tərəfdən sadə quruluşa malik olan fotorezistorlar böyük ətalətə malik olduqlarından onların vasitəsilə sürətli işıq siqnallarını ölçmək mümkün deyildir.

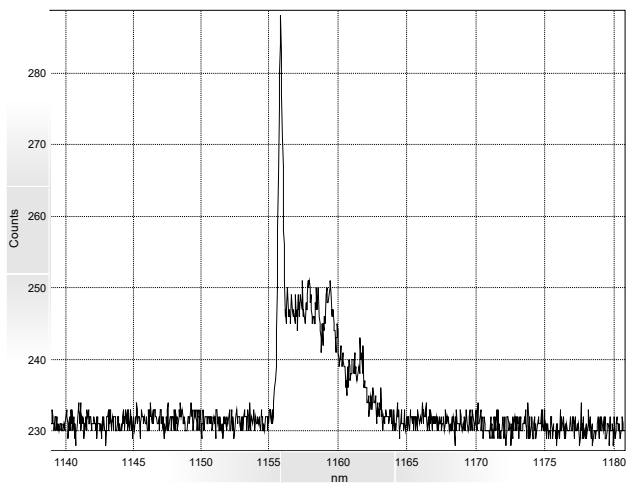
Bizim apardığımız tədqiqat işləri göstərdi ki, InSe nazik təbəqələrindən hazırlanmış sadə quruluşa malik olan qəbuledici vasitəsilə nanosaniyəli lazer impulslarını otaq temperaturunda ölçmək mümkündür. Şəkil 12-də InSe nazik təbəqələrində Nd:YAG

lazer şüalarının təsiri ilə yaranan fotocərəyanın ossilloqramı verilmişdir. Şəkildən görüldüyü kimi fotocərəyanın relaksasiya müddəti ~ 10 nanosaniyə müddətindədir [9, s.9-13]. Bizim fikrimizcə, InSe nazik təbəqələrində sürətli fotocərəyanın yaranmasına səbəb onların qadağan olunmuş zolağında sürətli rekombinasiya mərkəzinin ($\Delta E_i = 0,23 \text{ eV}$) olmasıdır. InSe nazik təbəqələrində ifratsürətli fotocərəyanın yaranmasında S-mərkəzinin bilavasitə iştirakı bizim apardığımız lüminessensiya hadisəsində də özünü büruzə verir.



Şəkil 12. InSe nazik təbəqələrində Nd:YAG lazer şüalarının təsiri ilə yaranan fotocərəyanın ossilloqramı.

Belə ki, InSe nazik təbəqələrini Nd:YAG lazerinin 2-ci harmonikası ilə həyəcanlaşdırdıqda ($\hbar\omega = 2.34 \text{ eV}$) maksimumu $\lambda = 1156 \text{ nm}$, yarımənini $\sim 8 \text{ \AA}$ olan lüminessensiya xətti müşahidə olunur (Şəkil 13).



Şəkil 13. Nd:YAG-lazerinin təsiri ilə InSe nazik təbəqələrinin lüminessensiya spektri, $T=300\text{K}$.

InSe kristalının qadağan olunmuş zolağının eninin $E_g \approx 1,30\text{ eV}$ olduğunu nəzərə alsaq, onda təcrübədə müşahidə olunan lüminessensiya şüalanmasının ($\hbar\omega = 1,073\text{ eV}$) keçirici zonadan $E_s \approx 0,23\text{ eV}$ məsafədə yerləşən S mərkəzi ilə əlaqədar olduğunu söyləyə bilərik. InSe nazik təbəqələrində otaq temperaturunda belə intensiv və yarımeni $\sim 8\text{ \AA}$ olan şüalanma spektrinin mövcudluğu bu kristallardan spektrin yaxın infraqırmızı oblastında işıq mənbəyi kimi istifadə olunmasının mümkünlüyünü göstərir.

Nəticə

1. Kimyəvi çökdürmə (SİLAR) üsulu ilə GaSe və InSe nazik təbəqələri və nanozərrəciklərinin alınma texnologiyası işlənib hazırlanmış və alınmış nümunələrin qalınlığının $4\div 20\text{nm}$ intervalında olduğu müəyyən edilmişdir.
2. InSe və GaSe nazik təbəqə və nanozərrəciklərinin Rentgen Şüalarının Difraksiyası (XRD), Skanedici Elektron Mikroskopu (SEM), Atom Qüvvə Mikroskopu (AQM) və Rentgen Şüalarının Dispers Enerji Spektroskopiyası (EDAX) vasitəsilə səth morfologiyası və struktur analizi aparılmış, onların heksaqonal quruluşa, homogen paylanmaya və stexiometrik tərkibə malik olduğu göstərilmişdir.
3. InSe nanozərrəciklərində kvantölçülü effekt aşkar edilmişdir, qalınlığı 10nm olan nanozərrəciyin qadağan olunmuş zolağının eninin massiv kristallara nəzərən $1,34\text{eV}$ -dan $1,60\text{ eV}$ -a qədər artması müəyyən edilmişdir.
4. Laylı quruluşa malik olan GaSe nazik təbəqələrində köçürmə hadisələrinin anizotropluğu fotokeçiriciliyin yüksək optik həyəcanlaşma şəraitində ölçülməsi ilə laylara perpendikulyar istiqamətdə mövcud olan potensial baryerin enerjisinin $\sim 50\text{meV}$ –a bərabər olduğu müəyyən edilmişdir.
5. Müəyyən edilmişdir ki, InSe tipli yarımkeçirici 2D-kristallarında yüksək səviyyəli optik həyəcanlaşmada fotocərəyan impulsunun relaksasiyası $i = Ae^{-\frac{t}{\tau}} - A'e^{-\delta t} \cos \omega t$ qanunu ilə baş verir.
6. Göstərilmişdir ki, yüksək optik həyəcanlaşmada GaSe və InSe nazik təbəqələrində aşkar olunan qeyri-xətti optik udma hadisəsi onların optik udma və sındırma əmsallarının dəyişməsi ilə əlaqədardır. Müəyyən edilmişdir ki, GaSe nazik təbəqələrində lazer şüalarının gücünün $W \sim 10\text{ MVt/sm}^2$ qiymətində sındırma əmsalının dəyişməsi $\Delta n(\omega) \approx 0.12$ -ə bərabər olmuşdur.
7. Müəyyən edilmişdir ki, InSe nazik təbəqələrində müşahidə olunan elektrikkeçiriciliyinin tipinin inversiyası lazer şüalarının təsiri ilə kristal qəfəsin temperaturunun artması nəticəsində kristalda mövcud olan defektlərin dinamikasının dəyişməsi ilə əlaqədardır.

8. Göstərilmişdir ki, GaSe, InSe, GaS, $\text{GaS}_{0,5}\text{Se}_{0,5}$ və GaSe(B) nazik təbəqələrinin buraxma spektrlərinin xarici elektrik sahəsinin təsiri ilə spektrin uzundalğalı oblastına tərəf anomal sürüşməsi müxtəlif lazer şüalarının (He-Ne, GaAs-diod, maye lazerin) intensivliyini təxminən iki tərtib dəyişdirməyə imkan verir.
9. Göstərilmişdir ki, InSe nazik təbəqələrinin daxilində sürətli rekombinasiya mərkəzinin olması onların əsasında hazırlanan qəbuledicilər vasitəsilə nanosaniyəli lazer impulslarını ölçməyə imkan verir.

Dissertasiyanın mövzusu üzrə dərc olunmuş işlərin siyahısı

1. Kyazimzade, A.G. Nonlinear optical and quanta-dimensional effects in monoselenide of gallium and indium / A.G. Kyazimzade, V.M. Salmanov, A.G. Huseynov [et al.], // Nanosystems: physics, chemistry, mathematics, - 2017, 8(5), - p.654-660.
2. Ахмедова, Ф.Ш. Получение и свойства наноструктуры селенида индия // Doktorontların və gənc tədqiqatçıların XXI Respublika Elmi Konfransı. – Bakı: 24-25 oktyabr BDU, - 2017, - səh.3-5.
3. Салманов, В.М. Особенности фотопроводимости GaSe при высоких уровнях оптического возбуждения / В.М. Салманов, А.Г. Гусейнов, И.М. Алиев [и др.] // Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Xəbərləri Fizika-texnika və riyaziyyat elmləri seriyası, fizika və astronomiya, - 2017. №5, - s.31-35.
4. Салманов, В.М. Влияние примесей Бора на оптическое поглощение и фотопроводимость селенида галлия / В.М. Салманов, А.Г. Гусейнов, Р.М. Мамедов, [и др.] // Journal of Baku Engineering University-Physics, - 2017, т.1. №1, - с.77-82.
5. Гусейнов, А.Г. Оптические свойства селенида галлия, легированного бором, Оптика и спектроскопия / А.Г. Гусейнов, В.М. Салманов, Р.М. Мамедов, [и др.] – 2017. т. 123, № 6, - с.871-876.
6. Кязым-заде, А.Г. Особенности люминесценции и фотопроводимости GaSe и InSe при лазерном возбуждении / А.Г.

- Кязым-заде, В.М. Салманов, А.Г. Гусейнов [и др.] // BDU xəbərləri, - 2017. № 3, - с.90-100.
7. Кязымзаде, А.Г. Особенности оптического поглощения и фото про водимости моноселенида индия при лазерном возбуждении / А.Г. Кязым-заде, В.М. Салманов, А.Г. Гусейнов [и др.] // Известия Вузов, - 2017. т.60, №10, - с.30-33.
 8. Kyazim-zade, A.G., Salmanov, V.M., Huseynov, A.G., Mamedov, R.M., Salmanova, A.A., Aliyev, I.M., Ahmedova, F.Sh. Nonlinear absorption in monoselenide of gallium and indium in laser excitation // International Conference Modern Trends in Physics, - Baku: - 10-22 April, - 2017, - p.52-54.
 9. Кязым-заде, А.Г. Сверхбыстрые фототоки в моноселениде индия при лазерном возбуждении / А.Г. Кязым-заде, В.М. Салманов, А.Г. Гусейнов [и др.]. // Ümummilli lider Heydər Əliyevin anadan olmasının 94-cü ildönümünə həsr olunmuş “Müasir təbiət elmlərinin aktual problemləri Beynəlxalq Elmi Konfrans” Gəncə: - 04-05 may, 2017, с.163-165.
 10. Guler, I. Characteristic features of thermoluminescence in neodymium doped gallium sulfide / I. Guler, M. Isik, F. Ahmedova [et al.] // Wiley luminescence. -2018, - p.1-5.
 11. 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 lüminessensiya xassələri // Azərbaycan Xalq Cümhuriyyətinin yaranmasının 100 illiyinə həsr olunmuş professor-müəllim heyətinin, doktorantların və gənc tədqiqatçıların Beynəlxalq Elmi konfransı, - Bakı: - 26-27 aprel, -2018, - s.188-191
 12. Kyazimzade, A.G. Laser radiation attenuater on the basis of A^3B^6 layered semiconductor connections / A.G. Kyazimzade, V.M. Salmanov, A.G. Huseynov [et al.] // Journal of Baku engineering University-Physics, Baku: - 2018, v.2, №1, - p.18-25.
 13. Кязым-заде, 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 Dövlət Universiteti Beynəlxalq Elmi Konfrans, - Gəncə: - 24-25 may, - 2018, - с.60-63.
14. Huseynov, A.G., Salmanov, V.M., Mamedov, R.M., Salmanova, A.A., F. Sh. Akhmedova., Luminescence and photoconductivity of the p-GaS/n-InSe heterojunction under the action of laser radiation // Magistrantların və Gənc tədqiqatçıların “Fizika və astronomiya problemləri” Beynəlxalq Elmi Konfransının materalları, - Bakı: 24-25 may, - 2018, - p.70-73.
 15. Салманов, В.М., Гусейнов, А.Г., Мамедов, Р.М., Салманова, А.А., Ахмедова, Ф.Ш. Лазерная абляция тонких пленок моноселенида индия // Тətbiqi fizika və energetikanın aktual məsələləri Beynəlxalq Elmi Konfransın materalları, - Sumqayıt: - 24-25 may, - 2018, - с.198-199.
 16. Салманов, В.М. Влияние лазерного излучения на тонкие пленки InSe и GaSe выращенные лазерной возгонкой и химическим осаждением / В.М. Салманов, А.Г. Гусейнов, Р.М. Мамедов [и др.] // Журнал физической химии, -2018. №9, - с.1461-1465
 17. Guseinov, A.G. The Emergence of Drift Capacity in 2D InSe Crystals / A.G. Guseinov, V.M. Salmanov, R.M. Mamedov [et al.] // Journal of Low Dimensional Systems, - 2019, v.3(1) - p.9-13.
 18. Kyazim-zade, A.G. Bandfilling effect in GaSe and InSe at high optical exchange levels / A.G. Kyazim-zade, V.M. Salmanov, A.G. Guseinov [et al.] // Chalcogenide letters, - 2019, Vol 16, № 10, - p.465-469.
 19. Guseinov, A.G. Optical and Photoelectric Properties of GaS Thin Films and GaS/InSe Heterostructure / A.G. Guseinov, V.M. Salmanov, R.M. Mamedov [et al.] // Optics and Spectroscopy, - 2019, v.126, №5, - p.538-543.
 20. Кязым-заде, А.Г. Инверсия типа проводимости тонких пленок n-InSe под действием лазерного излучения / А.Г. Кязым-заде, В.М. Салманов, А.Г. Гусейнов [и др.] // ЖТФ, - 2019. т.89, вып. 4, - с.599-603.
 21. Кязым-заде, А.Г. Нелинейный коэффициент поглощения и показатель преломления в GaSe при лазерном возбуждении /

- А.Г. Кязым-заде, В.М. Салманов, А.Г. Гусейнов [и др.] // BDU, -2019. №4, - с.121-131.
22. Салманов, В.М., Гусейнов, А.Г., Рагимов, С.С., Салманова, А.А., Мамедов, Р.М., Ахмедова, Ф.Ш. Влияние лазерного излучения на оптическое поглощение и показатель преломления GaSe // Konfrans materialları, - SDU, - 2020, №7, - с.148-153.
23. Ахмедова, Ф.Ш. Фотопроводимость в области сплошного спектра в тонких пленках селенида галлия. // Azərbaycan milli elmlər akademiyasının xəbərləri fizika-texnika və riyaziyyat elmləri seriyası, fizika və astronomiya, - Bakı: - 2021, № 2, - стр. 54-57
24. Əhmədova, F.Ş. Lazer şüalarının təsiri ilə InSe kristallarında qeyri-xətti istilik hadisəsinin təcrübi tədqiqi // Gənc tədqiqatçı, – Bakı: - 2021, № 2, - səh.43-47
25. Гусейнов, А.Г., Салманов, В.М., Рагимов, С.С., Мамедов, Р.М., Ахмедова, Ф.Ш. Получения сверхтонкой пленки селенида индия и галлия на поверхности жидкой фазы // XII Международная научно–техническая конференция «Микро– и нанотехнологии в электронике», - Нальчик, - Россия: - 31 мая–5 июня 2021 г, - с.120-124

Dissertasiyanın müdafiəsi 02 fevral 2022 il
tarixində saat 11⁰⁰ da Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının
Fizika İnstitutunun nəzdində fəaliyyət göstərən ED 1.14 Dissertasiya
şurasının iclasında keçiriləcək.

Ünvan: Az-1143, Bakı şəh., H. Cavid pr. 131

Dissertasiya ilə Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Fizika
İnstitutunun kitabxanasında tanış olmaq mümkündür.

Dissertasiya və avtoreferatın elektron versiyaları Azərbaycan Milli
Elmlər Akademiyasının Fizika İnstitutunun rəsmi internet saytında
yerləşdirilmişdir.

Avtoreferat 29 dekabr 2021-ci il tarixində zəruri
ünvanlara göndərilmişdir.

Çapa imzalanıb: 27.12.2021
Kağızın formatı: A5
Həcm: 39116
Tiraj: 100