AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASI

Əlyazması hüququnda

LAZER ABLYASİYASI ÜSULU İLƏ METAL (Ga, İn, Cd) HALKOGENİDLƏRİN (Se, S, Te) NANOZƏRRƏCİKLƏRİNİN ALINMASI VƏ OPTİK XASSƏLƏRİ

İxtisas: 2220.01-Yarımkeçiricilər fizikası

Elm sahəsi: Fizika

İddiaçı: **Turanə Akif qızı Məmmədova**

Fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi
almaq üçün təqdim edilmiş dissertasiyanın

AVTOREFERATI

BAKI-2025

Dissertasiya işi Bakı Dövlət Universitetinin "Yarımkeçiricilər fizikası" kafedrasında yerinə yetirilmişdir.

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

Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor
Maarif Əli oğlu Cəfərov

Rəsmi opponentlər: Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, dosent
Vüqar Əmir oğlu Əliyev

Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor
Rauf Mədət oğlu Sərdarlı

Fizika elmləri doktoru, dosent
Mehriban Şirin qızı Həsənova

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

Dissertasiya şurasının sədri:

Akademik
Arif Məmməd oğlu Həşimov

Dissertasiya şurasının elmi katibi:

Fizika elmləri doktoru,professor
Rəfiqə Zabil qızı Mehdiyeva

Elmi seminarın sədri:

Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor
Hüseyn Behbud oğlu İbrahimov

İŞİN ÜMUMİ XARAKTERİSTİKASI

Mövzunun aktuallığı və işlənmə dərəcəsi. Son zamanlar nanohissəciklər həm fundamental elm sahəsi kimi, həm də praktik əhəmiyyətinə görə yarımkeçiricilər fizikasının mühüm tədqiqat obyektlərindən birinə çevrilmişdir. Yarımkeçirici nanohissəciklərin unikal fiziki xassələrə malik olması onlarda kvant ölçülü effektlərin yaranması ilə əlaqədardır. Yarımkeçirici nanohissəciklərin optik və elektron xassələrinin onların həndəsi ölçülərindən asılılığı yeni nəsl işıq diodlarının, tranzistorların, Günəş batareyalarının və kvant lazerlərin yaradılmasına geniş imkanlar yaradır. Yarımkeçirici nanostrukturların intensiv tədqiq olunmalarına baxmayaraq, hal-hazırda az öyrənilmiş və eyni zamanda perspektivli $A^{III}B^{VI}$ və $A^{II}B^{VI}$ tipli yarımkeçirici birləşmələr əsasında nanostrukturların alınması və onların tədqiqi böyük maraq doğurur[1,2,3]. Yarımkeçirici nanohissəciklərin alınmasının ən yeni üsullarından biri vakuumda, qaz və ya maye mühitdə yerləşən bərk cisimlərin impuls lazerləri vasitəsilə ablyasiya üsuludur. Lazer ablyasiya üsulu nanohissəciklərin sintezi üçün kifayət qədər sadə, sürətli və birbaşa üsuldur. Bu üsul kimyəvi reaksiyaların, eləcə də yüksək temperatur və təzyiqlərin və ya kimyəvi sintezə xarakterik olan çoxmərhələli proseslərin aparılmasına uzun müddət tələb etmir. Sintez edilmiş nanohissəciklərin xassələri götürülmüş materialının forma, ölçü, tərkib və strukturundan, ablyasiyada istifadə olunan lazerin parametrlərindən (radiasiya dalğasının uzunluğu, impulsun müddəti, tezliyi və enerjisi), həmçinin ətraf mühit şəraitindən (vakuum, qaz və ya maye) asılıdır.

---

[1] В.М. Салманов, А.Г. Гусейнов, Р.М. Мамедов, А.А. Салманова. Нелинейные оптическое поглощение в GaSe при лазерном возбуждении. Оптика и спектроскопия 2020, т. 128, в.4, 513-516.

[2] D.A.Bandurin, A.V.Tyurnina at al. High electron mobility, quantum Hall effect and anomalous optical response in atomically thin InSe. Nature Nanotech., 2016, 3, 223-227.

[3] N.G.Semaltianos, S.Logothetidis, W. Perrie at al. Appllied physics letters 2009, 95, 033301-033306

Dissertasiya işində lazer şüalarının təsiri ilə həyata keçirilən digər bir mühüm problem müxtəlif yarımkeçiricilərdən ibarət olan çoxlaylı strukturun əsas parametrlərin təyin edilməsi üsuludur. Dəyişən qadağan olunmuş zolağa malik olan yarımkeçirici strukturlar əsasında optoelektron cihazların hazırlanmasında həmin strukturların tərkibi, qadağan olunmuş zolağının eni, təbəqənin qalınlığı, dərin və dayaz aşqarların konsentrasiyası, rekombinasiya proseslərinin xarakteri və nəticədə həyata keçirilən strukturların səmərəliliyini müəyyən edən xüsusiyyətləri öyrənmək çox mühümdür.

Tədqiqatın məqsəd və vəzifələri:

Lazer ablyasiyası üsulu ilə InSe, GaSe, GaS, $GaSe_{1-x}S_x$, CdTe, CdS və $Cd_{1-x}Zn_xS$ yarımkeçirici birləşmələrinin nanozərrəciklərinin sintezi, struktur analizi, onlarda optik və fotolüminessensiya hadisələrinin, o cümlədən qeyri-xətti optik effektlərin aşkarlanıb, öyrənilməsi və çoxlaylı yarımkeçirici strukturlarda ikifotonlu optik udulma mexanizminin müəyyənləşdirilməsi.

Dissertasiya işində qarşıya qoyulmuş məqsədə uyğun olaraq, aşağıdakı məsələlər həll edilmişdir:

- Lazer ablyasiyası üsulu ilə InSe, GaSe, GaS, $GaSe_{1-x}S_x$, CdTe, CdS və $Cd_{1-x}Zn_xS$ yarımkeçirici birləşmələrinin nanohissəciklərinin sintezi;
- Rentgen difraksiya analizi (XRD), skan edici elektron mikroskopu (SEM), atom qüvvə mikroskopu (AFM) və rentgen dispersiya enerji spektroskopiyası (EDAX) metodları vasitəsilə sintez olunan nanohissəciklərin səth morfologiyası və daxili strukturunun öyrənilməsi;
- Lazer ablyasiyası prosesində tədqiq olunan yarımkeçiricilərdə lazer şüalarının optik udma mexanizminin və plazma temperaturunun təyini;
- InSe, GaSe, CdS və CdTe nanohissəciklərinin optik udma və lüminessensiya parametrlərinin (udma əmsalı, qadağan olunmuş zolağın eni, eksitonların əlaqə enerjisi və s.) təyin edilməsi;

- InSe nanohissəciklərində məcburi şüalanma effektinin aşkar edilməsi;
- Yüksək optik həyəcanlaşma intensivliyində InSe,GaS və CdS nanohissəciklərində qeyri-xətti optik udma prosesinin aşkar edilməsi;
- Çoxqatlı yarımkeçirici strukturturların parametrlərinin (qadağan olunmuş zolağın eni, layların qalınlığı, yükdaşıyıcıların konsentrasiyası, rekombinasiya proseslərinin xarakteri) ikifotonlu həyəcanlandırma üsulu ilə müəyyən edilməsi.

Tədqiqatın obyektləri. Tədqiqat obyektləri olaraq InSe, GaSe, GaS, CdTe, CdS yarımkeçirici birləşmələrinin nanohissəcikləri, $GaSe_{1-x}S_x$ və $Cd_{1-x}Zn_xS$ bərk məhlulları və GaS/GaSe və GaSe/InSe heterostrukturlarının nazik təbəqələri götürülmüşdür. Tədqiqat obyektinin bu seçimi, ilk növbədə, bu materialların kristal quruluşunun xüsusiyyətləri, laylı quruluşa və güclü anizotropiyaya malik olmaları, geniş tezlik diapazonunda şəffaflıq və mükəmməl kristalların alınması üçün işlənmiş texnologiyanın mövcudluğu ilə müəyyən edilmişdir. Digər tərəfdən, tədqiqat obyektinin seçiminə istifadə olunan yarımkeçiricilərin qadağan olunmuş zolağının eninin lazer şüalarının enerjisi ilə uyğunluq təşkil etməsi əhəmiyyətli dərəcədə təsir göstərmişdir.

Tədqiqatın metodları. Dissertasiya işində qarşıya qoyulan məsələlər eksperimental və nəzəri tədqiqatlar əsasında həyata keçirilmişdir. İstifadə olunan işıq mənbələri Helium-Neon (He-Ne) və Azot (N_2) qaz lazerləri, üç harmonikaya (1060 nm, 532 nm və 335 nm) malik olan nanosaniyəli Nd:YAG lazeri, geniş dalğa uzunluğu (594-642nm) diapazonunda şüa mənbəyi olan Rodamin 6G maye lazeri və kollimasiya olunmuş işıq lampası. Tədqiqat aparılarkən tədqiq olunan yarımkeçiricilərin nanohissəciklərinin lazer ablyasiya üsulu ilə alınma texnologiyası işlənib hazırlanmış, müasir struktur analiz üsulları olan rentgen şüalarının difraksiya analizi, skan edici elektron mikroskopu, atom qüvvə mikroskopu və rentgen dispers enerji spektroskopiyası üsullarından istifadə etməklə nanohissəciklərin səth morfologiyası və struktur analizi aparılmış və lazer spektroskopiyasının müasir

tədqiqat üsulları olan ikişüalı lazer spektroskopiyası (pump-probe spectroscopy), şüa distorsiyası (beam distorsion), qeyri-xətti optikanın digər metodlarından və alınan nəticələrin analitik təhlili üçün xüsusi proqramlı kompüter sistemindən (board Master 800 ABI 8) istifadə etməklə tədqiq olunan nanozərrəciklərin yüksək optik həyəcanlanmada optik, lüminesssensiya, qeyri-xətti optik, fotokeçiricilk və digər fiziki xassələri aşkar edilib, öyrənilmişdir.

Müdafiəyə çıxarılan əsas müddəalar:

1.InSe, GaSe, GaS ,CdS və CdTe yarımkeçirici birləşmələrinin nanohissəciklərinin lazer ablyasiya üsulu ilə sintezi və struktur analizi;

2. InSe, GaS və CdS nanohissəciklərində yüksək optik həyəcanlanma intensivliyində qeyri-xətti optik hadisənin aşkar edilməsi;

3. Lazer şüalarının təsiri ilə InSe nanohissəciklərində qeyri-xətti sındırma əmsalının təyini;

4. Çoxlaylı yarımkeçirici strukturların parametrlərinin ikifotonlu optuk udulma üsulu ilə müəyyən edilməsi;

5. Lazer ablyasiya prosesində yaranan plazma temperaturunun təyini;

6. GaSe nanohissəciklərində kvantölçülü effektin aşkar edilməsi;

7. InSe, GaS və CdS nanohissəciklərində məcburi şüalanma effektinin aşkar edilməsi;

Tədqiqatın elmi yeniliyi:

1. Lazer ablyasiyası üsulu ilə InSe, GaSe, GaS ,CdS və CdTe yarımkeçirici birləşmələrinin nanohissəcikləri sintez edilmişdir;
2. Lazer ablyasiyası üsulu ilə In, Ga və Cd elementləri və SeO_2, $(NH_2)_2CS$ məhlullarından istifadə etməklə InSe, GaSe və CdS nanohissəcikləri sintez edilmişdir;
3. Rentgen difraksiya analizi, Skanedici elektron mikroskopu, Atom qüvvə mikroskopu və Rentgen dispersiya enerji spektroskopiyası metodları vasitəsilə sintez olunan nanohissəciklərin səth morfologiyası və daxili strukturu öyrənilmişdir;

4. Lazer ablyasiya prosesində tədqiq olunan yarımkeçiricilərdə lazer şüalarının optik udulma mexanizmi və plazma temperaturu müəyyən edilmişdir;
5. Lazer şüalarının təsiri ilə InSe, GaSe, CdS və CdTe nanohissəciklərinin əsas parametrləri (udulma əmsalı, qadağan zonanın eni, eksitonun əlaqə enerjisi) təyin edilmişdir;
6. InSe, GaS və CdS nanohissəciklərində məcburi şüalanma effekti aşkar edilmişdir;
7. Yüksək həyəcanlaşma intensivliyində InSe, GaS və CdS nanohissəciklərində qeyri-xətti optik udulma prosesi aşkar edilmişdir;
8.Çoxqatlı yarımkeçirici strukturların ikifotonlu həyəcanlandırma üsulu ilə əsas parametrləri (zolağın boşluğu, layın qalınlığı, çirklərin konsentrasiyası, rekombinasiya proseslərinin xarakteri) müəyyən edilmişdir;

Tədqiqatın nəzəri və praktiki əhəmiyyəti:

- InSe, GaSe, GaS, $GaSe_{1-x}S_x$, CdTe, CdS və $Cd_{1-x}Zn_xS$ yarımkeçirici birləşmələrin nanohissəciklərinin lazer ablyasiyası ilə alınması və onların fiziki xassələrinin öyrənilməsi bu nanohissəciklərin optoelektronikanın əsas materialları və elementləri kimi istifadə olunmasına imkan verə bilər;
- $GaSe_{1-x}S_x$ bərk məhlullarında aşkar edilən iki və üçfotonlu fotolüminessensiya hadisəsi çoxqatlı yarımkeçirici epitaksial heterostrukturların öyrənilməsi üçün əsas metod kimi istifadə oluna bilər;
- InSe nanohissəciklərində aşkar edilmiş məcburi şüalanma effekti onların əsasında lazer şüalanma generatorlarının yaradılmasına imkan verə bilər;
- InSe nanohissəciklərində eksitonların udulma oblastında aşkar edilmiş "şəffaflaşma hadisəsi" onların əsasında lazer şüalanmasının optik modulyatorların yaradılmasına imkan verə bilər;
- Yüksək optik həyəcanlanma intensivliyində InSe nanohissəciklərində sındırma əmsalının dəyişməsi onlardan qeyri-xətti optikada şüalanmanın tezlik çeviricisi kimi istifadə edilməsinə imkan verə bilər.

Nəşrlər. Dissertasiyanın mövzusu 22 əsərdə öz əksini

tapmışdır. Dissertasiya üzrə dərc olunmuş məqalələrin sayı 13-dür. Onnlardan 6-sı Web of Science bazasında olan impakt faktorlu jurnallarda ("Оптика и спектроскопия", "Physics,Chemistry, Mathematics", "Physics of Solid State", "Semiconductors", "Russian Journal of Physical Chemistry A"), 7-si isə respublika səviyyəli jurnallarda çap olunmuşdur. Beynəlxalq səviyyəli xarici (3) və respublika(6) konfranslarında 9 məruzə edilmişdir.

Aprobasiya. Dissertasiya işinin materialları "İnternational conference Modern Trends in Physics" Beynəlxalq Elmi Konfransı (Baku 2023), Ümummilli lider Heydər Əliyevin anadan olmasının 100-cü ildönümünə həsr olunmuş "Müasir təbiət və iqtisad elmlərinin aktual problemləri" adlı Beynəlxalq Elmi Konfransı, (Gəncə 2023), Ümummilli lider Heydər Əliyevin anadan olmasının 101-ci ildönümünə həsr olunmuş "Müasir təbiət və iqtisad elmlərinin aktual problemləri" adlı Beynəlxalq Elmi Konfransı (Gəncə 2024) "İnnovativ ekosistemlərin inkişafında universitetlərin rolu" Respublika Elmi-Praktik Konfransı (Gəncə 2024), "Микро-и нанотехнологии в электронике" XIV Beynəlxalq Elmi-texniki konfransı (Россия, г.Нальчик 2024) və 8th International Scientific Conference «Scientific Results» Beynəlxalq Elmi Konfransında (Rome, Italy 2024) məruzə və müzakirə edilmişdir.

Dissertasiyanın strukturu və həcmi. Təqdim olunan dissertasiya işi girişdə 13035 işarə, I fəsildə 56730 işarə, II fəsildə 11357 işarə, III fəsildə 31666 işarə, IV fəsildə 64678, nəticələrdə isə 3151 işarə olmaqla ümumilikdə 181494 işarədən ibarətdir. Dissertasiya işi 148 səhifədən, o cümlədən 102 səhifə ancaq mətn (22755 işarə), 20 şəkil, 51 qrafik, 6 cədvəldən ibarətdir.

Dissertasiya işinin yerinə yetirildiyi təşkilatın adı:

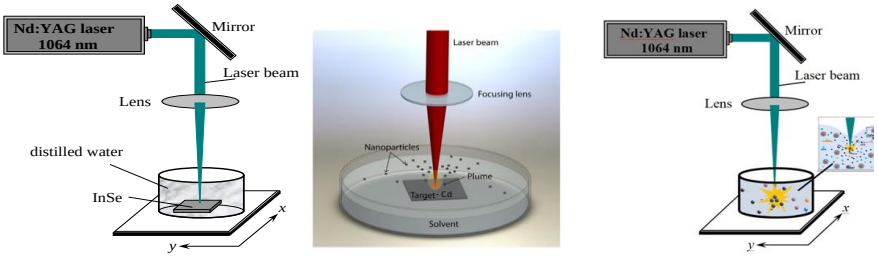
Dissertasiya işi Bakı Dövlət Universitetinin Yarımkeçiricilər fizikası kafedrasında yerinə yetirilmişdir.

İŞİN MƏZMUNU

Girişdə, dissertasiya işinin mövzusunun aktuallığı və işlənmə dərəcəsi, dissertasiya işinin əsas məqsədi, elmi yenilik, elmi və praktiki əhəmiyyəti, qarşıya qoyulmuş məqsəd və müdafiəyə

çıxarılan müddəalar əsaslandırılmışdır.

Dissertasiya işinin birinci fəsli mayedə lazer ablyasiyası üsulu ilə InSe, GaSe, GaS, CdS və CdTe yarımkeçirici nanohissəciklərinin sintezinə həsr edilmişdir. İşıq mənbəyi olaraq Nd:YAG lazerindən istifadə edilmişdir. Lazer impulsunun müddəti 10 ns, impulsun təkrarlanma tezliyi 10Hz, maksimal gücü isə ~12 MVt/sm^2 olmuşdur. Lazer şüalarının intensivliyi neytral işıq filtrləri vasitəsilə idarə olunurdu. Toplayıcı linza ilə (f =11sm) fokuslanmış 1064 nm dalğa uzunluğunda olan lazer şüalanması ~1,5sm diametrli tədqiq olunan maddənin səthinə fokuslanır. Lazer ablyasiyası kvars kyuvetdə, distillə edilmiş suda, əlavə aktiv maddələr daxil edilmədən aparılmışdır. Ablyasiya prosesi tezliyi 10Hz, enerjisi 135mJ olan lazer şüaları vasitəsilə normal təzyiqdə, 10 dəqiqə müddətində həyata keçirilmişdir (şəkil 1).



a **b** **c**

Şəkil 1. Yarımkeçirici $A^{III}B^{VI}$ və $A^{II}B^{VI}$ yarımkeçirici birləşmələrin mayedən lazer ablyasiyası üsulu ilə sintez olunması: a- InSe, GaSe, GaS kristallarından lazer ablyasiya üsulu ilə nanozərrəciklərin alınması, b - InSe, GaSe və CdS nanohissəciklərinin sintezi üçün yüksək təmizliyə malik (99%) In, Ga və Cd elementlərindən və distillə edilmiş su ilə qarışdırılmış SeO_2 və $(NH_2)_2CS$ məhlullarından istifadə edilməklə nanozərrəciklərin alınması, c-CdTe nanohissəcikləri məhlulda reaktiv lazer ablasiya üsulu ilə alınması.

Yarımkeçirici nanohissəciklərin ənənəvi lazer ablyasiyası üsulu ilə sintez olunması ilə yanaşı, ilk dəfə olaraq tədqiq olunan yarımkeçiricilərin bilavasitə tərkib atomlarından istifadə etməklə

onların nanohissəciklərinin lazer ablyasiyası üsulu ilə sintez edilməsinin yeni üsulu təklif edilmişdir. InSe, GaSe və CdS nanohissəciklərinin sintezi üçün yüksək təmizliyə malik (99%) In, Ga və Cd elementlərindən və distillə edilmiş su ilə qarışdırılmış SeO_2 və $(NH_2)_2CS$ məhlullarından istifadə edilmişdir.

Müəyyən edilmişdir ki, kolloid məhlullarının suspenziyalarının rəngi lazer şüalanmasının intensivliyindən asılıdır. Lazer şüalarının kiçik intensivliyində sintez edilmiş GaSe nanohissəciklərinin açıq narıncı rəngi, lazer şüalarının yüksək intensivliyində tünd narıncı rəngə çevrilmişdir. Nanozərrəciklərin alınması aşağıda göstərilən reaksiyalar üzrə həyata keçirilmişdir:

$$Ga+SeO_2+H_2O=GaSe+H_2O+O_2 \quad (1)$$

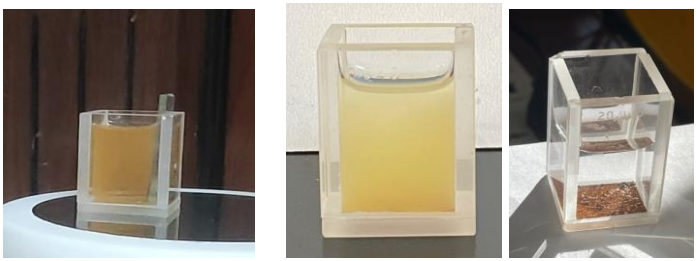
$$İn+SeO_2+H_2O=İnSe+H_2O+O_2 \quad (2)$$

$$Cd+(NH_2)_2+CS+ H_2O=CdS+(NH_2)_2CO_{+}H_2 \quad (3)$$

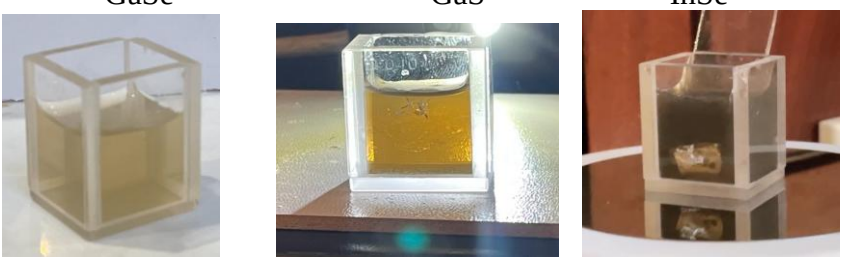
$$2CdCl_2+ 2TeO_2 + 2H_2O = 2CdTe + 4HCL + 3O_2 \quad (4)$$

$$2CdCl_2+ 2TeO_2+Na_2S_2O_3+H_2=2CdSTe+2NaCL+2HCL+4O_2 \quad (5)$$

Şəkil 2-də lazer ablasiya üsulu ilə alınmış GaSe, GaS, InSe, CdS, CdSTe və CdTe nanozərrəciklərin kolloid məhlulları göstərilmişdir.



GaSe GaS InSe



CdS CdSTe CdTe

Şəkil 2. Lazer ablasiya üsulu ilə alınmış nanozərrəciklərin kolloid məhlulları.

İkinci fəsildə mayedə lazer ablyasiya üsulu ilə sintez edilmiş InSe, GaSe, GaS ,CdS və CdTe nanohissəciklərinin səth morfologiyasının və struktur analizinin təcrübi tədqiqi barədə məlumatlar təqdim olunmuşdur. Bu məqsədlə rentgen difraksiya analizi (XRD), Skanedici electron mikroskop (SEM), Atom qüvvəsi mikroskopu (AFM) və Enerji dispersive roentgen spektroskopiyası (EDAX) kimi müasir tədqiqat üsullarından istifadə edilmişdir. Rentgen difraksiya analizi əsasında alınan nanohissəciklərin ölçüləri Debay-Şerrer düsturundan istifadə etməklə hesablanmışdır[4]:

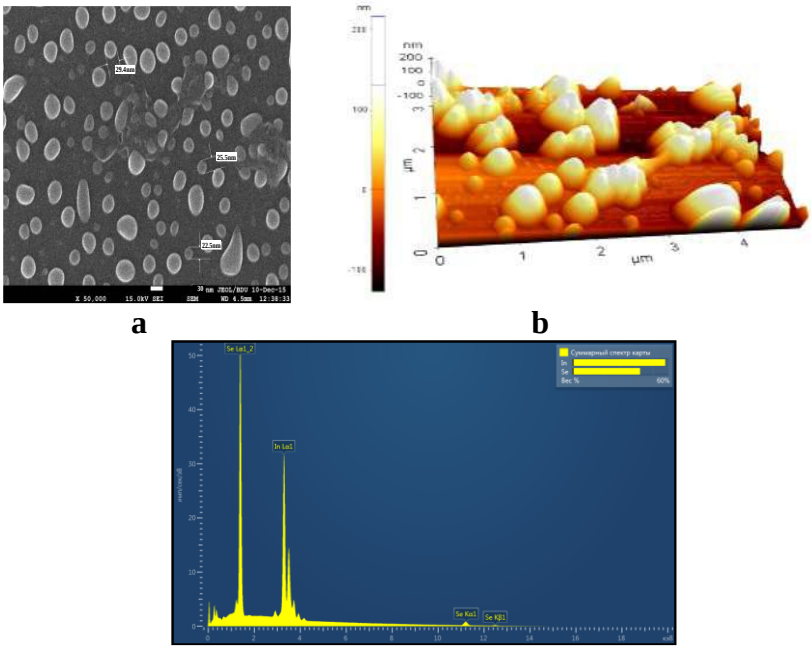
$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos\theta} \qquad (6)$$

burada D -nanohissəciklərin ölçüsü, k = 0,9 forma faktoru, β = 0,035 A^0 - yarımmaksimumun tam eni (FWHM- FullWidth at HalfMaximum), λ –rentgen şüalanmasının dalğa uzunluğu (λ=1,54 A^0), θ –Braqq bucağıdır (cos θ=0,727).

Hesablamalar göstərir ki, tədqiq olunan nanohissəciklərinin ölçüləri~(7-50) nm intervalında dəyişir.

Şəkil 3,a-da şüşə altlıq üzərinə çökdürülmüş InSe nanohissəciklərinin SEM təsviri göstərilmişdir. SEM təsvirıı göstərir ki, alınan maddə polidispers formada toplanan (7-30)nm ölçülü sferik nanokristallardan ibarətdir. Təqdim olunan AFM təsvirində hissəciklərin homogen paylanması müşahidə edilmir (şəkil 3,b). InSe nanohissəciklərinin EDAX təhlili göstərir ki, maddədə indium atomunun miqdarı selen atomunun miqdarına In:Se=1:1 nisbətdədir, bu da tərkibin stoxiometriyaya malik olduğunu göstərir. (şəkil 3, c).

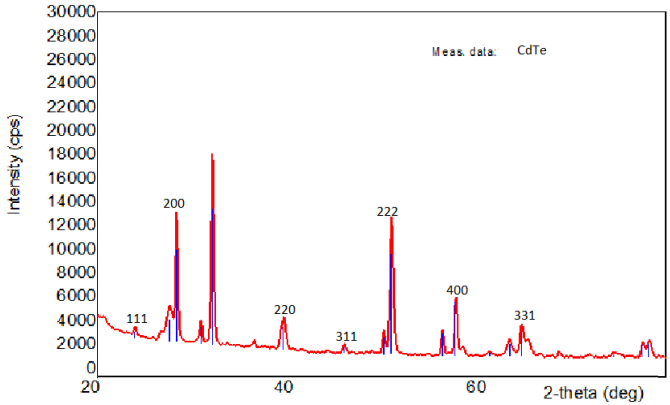
[4]S.S. Mao, Nanolasers: lasing from nanoscale quantum wires. Int.J.Nanotech. 2004, 1, 42-85.



Şəkil 3. InSe nanohissəciklərinin SEM (a), AFM (b) və EDAX(c) təsvirləri.

Şəkil 4-də nanokolloid məhluldan təmiz şüşə altlıq üzərinə çökdürülmüş CdTe nanohissəciklərin XRD analizi göstərilmişdir. CuK_{α}, λ=1,544178A^0 SSFOM: F17-610.0.5.10.60 şüalanma mənbəyi kimi istifadə edilmişdir. XRD nəticəsindən məlum olur ki,nanohissəciklərin 2θ difraksiya bucağının 23.620, 27.890, 38.970, 45.280, 49.340, 56.750, 63.600, 73.220, 76.840 qiymətlərinə uyğun(111), (200), (220), (311), (222), (400), (331), (422) və (511) Miller indeksləri CdTe kristalının kubik (sink blend) quruluşuna uyğundur.

XRD nəticəsi əsasında əldə edilən nanohissəciklərin ölçüləri Debay-Şerrer düsturundan istifadə edərək hesablanmışdır. Hesablamalardan məlum olur ki, CdTe kristalitlərinin orta ölçüsü 27.434 nm tərtibindədir.



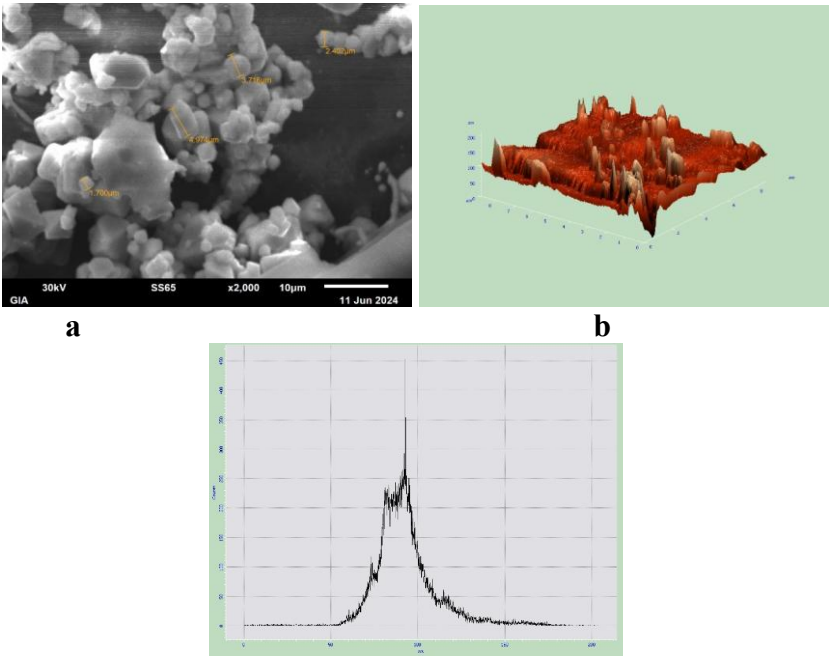
Şəkil 4. Şüşə altlıq üzərində qurudulmuş CdTe nanohissəciklərinin rentgen difraksiya əyriləri.

Şəkil 5,a-da lazer ablyasiya üsulu ilə sintez edilmiş CdS nanohissəciklərinin SEM təsviri göstərilmişdir. Göstərilmişdir ki, nanohissəciklərin ölçüləri və morfologiyası lazer şüalarının intensivliyindən asılıdır. Şəkil 5,b-də CdS nanohissəciklərinin üçölçülü AFM təsviri göstərilir. Şəkildən göründüyü kimi nanohissəciklərin homogen paylanması müşahidə olunmur. Nanohissəciklərin ölçülərə görə paylanma histoqramı şəkil 5,c-də göstərilmişdir. Şəkildən göründüyü kimi, proqram təminatı ilə hesablanmış nanohissəciklərin orta ölçüsü 60 nm-dir. CdS nanohissəciklərinin strukturunun enerji dispersive reentgen spektroskopiyası (EDAX) ilə təhlili göstərir ki, cadmium və kükürdün nisbəti Cd:S =1:1-dir, bu da maddənin tərkibinin stokiometrik olduğunu göstərir.

Lazer ablyasiyası zamanı nümunənin səthində yaranan plazma buludunun temperaturunu müəyyən etmək üçün istilikkeçirmə tənliyindən istifadə edilmişdir

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + divJ_Q = 0, \qquad (7)$$

burada Q-müəyyən həcmdə istilik miqdarı, J_Q-istilik axınının sıxlıq vektorudur.



Şəkil 5. CdS nanohissəciklərinin SEM(a), AFM(b) və Histoqram(c) təsvirləri.

(7) ifadəsi kəsilməzlik tənliyidir və ayrılan həcmdə istilik miqdarının dəyişməsini göstərir.

$Q = \rho c T$ və $J_Q = -\chi \dfrac{\partial T}{\partial x^2}$, olduğundan (7) tənliyini aşağıdakı şəkildə yazmaq olar

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \chi \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \qquad (8)$$

burada T-temperatur, ρ-materialın sıxlığı, c-xüsusi istilik tutumu, χ- istilik keçiriciliyidir.

Xarici mənbə olduqda (8) ifadəsinə ($rkI_0\hbar\omega$) həddi əlavə edilməlidir. burada r-əksetmə əmsalı, k-işığın udulma əmsalı, I_0-düşən işığın intensivliyi, $\hbar\omega$-düşən kvantın enerjisidir.

Onda (8) tənliyi aşağıdakı şəkildə olacaqdır

$$\rho c\frac{\partial T}{\partial t} = \chi\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + rkI_0\hbar\omega e^{-kx} \qquad (9)$$

Sonuncu ifadə lazer impulsunun parametrləri, götürülmüş maddənin əsas xarakteristikaları və ablyasiya zamanı ayrılan temperatur arasında əlaqəni göstərir. (9) tənliyinin həllindən ablyasiya prosesi zamanı ayrılan istiliyin temperaturunu hesablamaq olar

$$T = \frac{2(1-r)E}{\sqrt{\pi c\rho\chi t_0}}\frac{1}{S} \qquad (10)$$

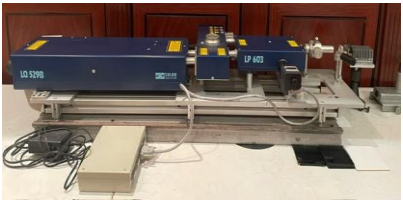
burada E-impulsun enerjisi, S-işığın əhatə etdiyi sahədir.

Hesablamalar göstərir ki, InSe nanozərrəciklərinin səthindəki temperatur ~10^5K qiymətinə qədər artır. Bu zaman InSe-nin aşağıda göstərilən parametrlərindən istifadə edilmişdir:

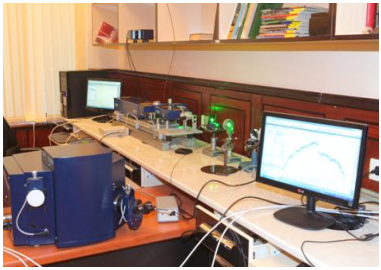
c = 1.3 C/K•sm^3, χ = 8.2 Vt/m·K, r=0.3, ρ=2.3 q/sm^3, t_0=12·10^{-8} san, S=5.10^{-3} sm^2. Bundan əlavə, (10) ifadəsindən göründüyü kimi, lazer impulsu ilə maddəni buxarlandırmaq üçün tələb olunan enerji E, impuls müddətinin kvadrat kökü ilə mütənasibdir, E~$\sqrt{t_0}$.

Üçüncü fəsildə lazer ablyasiyası üsulu ilə alınan InSe, GaSe, GaS, CdTe, CdS nanozərrəciklərinin və $Cd_{1-x}Zn_xS$ bərk məhlulunun optik udulma və fotolüminessensiya xassələri təqdim edilmişdir. Şəkil 6-da yarımkeçirici nanozərrəciklərin optik və fotoelektrik xassələrinin ölçülməsində istifadə olunan qurğuların təsviri verilmişdir. İşıq mənbəyi olaraq Nd:YAG – lazerindən istifadə edilmişdir. Üç harmonikaya malik olan lazer impulslarının dalğa uzunluğu 1064, 532 və 335 nm, gücü ~ 12 MVt/sm^2, impulsun müddəti isə 10ns olmuşdur. Lazer şüalarının intensivliyi kalibrə olunmuş neytral işıq filtrləri ilə tənzimlənmişdir. Nanozərrəciklərin optik udulma və lüminessensiya spektrləri avtomatik rejimdə işləyən, 600nm dalğa uzunluğunda ayırdetmə

qabiliyyəti ~ 0,024nm-ə bərabər olan, ikiqat dispersiyalı M833 monoxromatoru, kompüter sistemi və 350-2000 nm dalğa uzunluğu intervalında işıq şüalarını qəbul edən detektor vasitəsilə həyata keçirilmişdir. Fotokeçiricilik ölçmələrində nano-piko saniyəli cərəyan impulslarını ölçə bilən yaddaşlı Le Croy 900 ossilloqrafından istifadə edilmişdir.



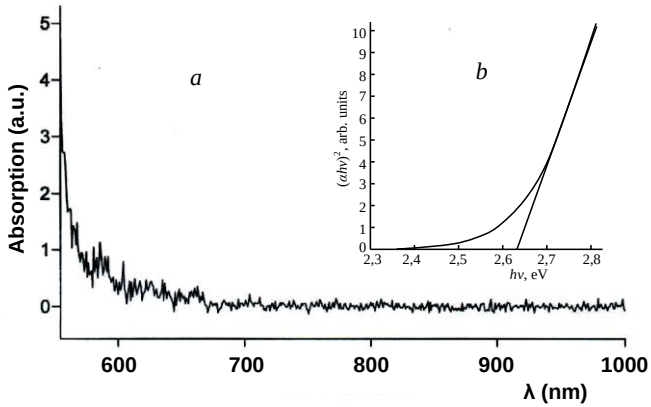
a)



b) c)

Şəkil 6. Nd:YAG – lazerin (a) və nanozərrəciklərin optik (b), fotoelektrik (c) xassələrini ölçmək üçün istifadə olunan qurğuların təsviri.

Şəkil 7,a-da GaSe nanohissəciklərin udma əyrisi göstərilmişdir. Dalğa uzunluğunun λ=550nm qiymətindən başlayaraq udma əmsalının kəskin artması müşahidə olunur. GaSe düz optik keçidə malik olan yarımkeçirici olduğundan, $\alpha^2 \sim f(h\nu)$ asılılığından nanozərrəciklərin qadağan zonasının eninin Eg = 2.62eV-a bərabər olduğu hesablanmışdır (şəkil 7,b). Bu rəqəm massiv GaSe kristallarının qadağan zonasının enindən 0,62 eV çoxdur, Eg(kristal) =2,02eV).

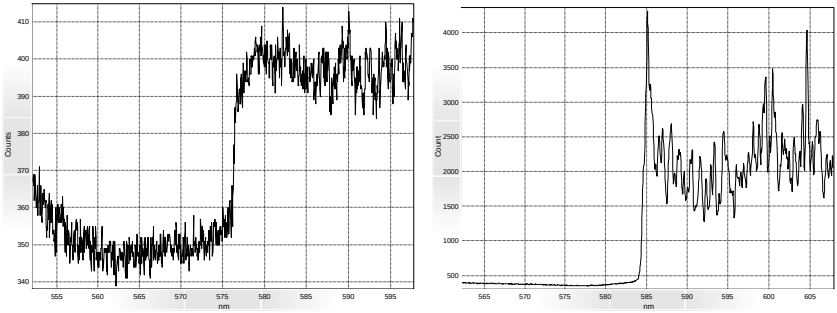


Şəkil 7. Kolloid məhlulda alınan GaSe nanohissəciklərinin optik udulma spektri (a) və $\alpha^2 \sim f(h\nu)$ asılılığı (b).

Şəkil 8,a-da Nd:YAG lazerinin ikinci harmonikası ($\hbar\omega = 2.34\,\text{eV}$) ilə həyəcanlanan GaSe nanohissəciklərinin fotolüminessensiya spektri göstərilmişdir. Şəkildən göründüyü kimi, nanohissəciklərin maksimum şüalanması λ =473 nm (2,62eV) dalğa uzunluğuna uyğundur. Şəkil 8,b-də isə lazer şüalanmasının Ga elementi və SeO_2 məhlulunun qarşılıqlı təsiri nəticəsində alınan GaSe nanohissəciklərinin fotolüminessensiya spektri verilmişdir. Emissiya xəttinin yarımeni ~7A^0-dır. Müşahidə olunan lüminessensiya xəttinin bir neçə angstrem tərtibində olması lazer həyəcanlanması ilə GaSe nanostrukturlarında stimullaşdırılmış emissiyanın aşkar olunduğunu göstərir. Şəkil 8,a və 8,b-nin müqayisəsindən göründüyü kimi, lazer ablyasiya prosesində bilavasitə GaSe kristallarından alınan nanozərrəciklərin lüminessensiya spektri, Ga elementi və SeO_2 məhlulunun qarışığından alınan nanozərrəciklərin lüminessensiya spektrindən əhəmiyyətli dərəcədə fərqlənir.

Qallium sulfid (GaS) kristalları unikal fiziki və kimyəvi xüsusiyyətlərinə görə laylı quruluşa malik yarımkeçiricilər arasında xüsusi yer tutur. Bu qrupun digər laylı kristallardan (məsələn, GaSe və InSe) fərqli olması onların böyük qadağan zonaya malik olmasıdır: T=300 K temperaturda çəp keçid Eg ~ 2,5 eV; düz keçid

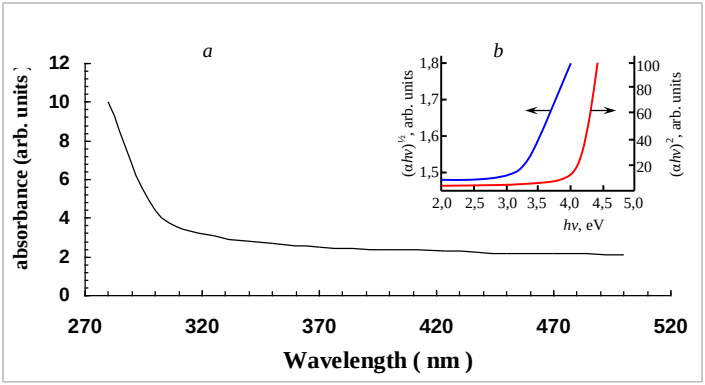
isə Eg~3,0eV-a bərabərdir. Beləliklə, GaS kristalları yarımkeçiricilər və izolyatorlar arasındakı boşluğu doldurur, bu da rəng tənzimlənən mavi/UV işıq diodlarları ilə ultrabənövşəyi (UV)-selektiv fotodetektorların tətbiqi üçün istifadə oluna bilər.



a **b**

Şəkil 8. Ga elementi və SeO_2 məhlulunun qarışığından (a) və bilavasitə GaSe kristallarından (b) lazer ablasiyası üsulu ilə sintez edilmiş nanohissəciklərinin fotolüminessensiya spektrləri.

GaS nanohissəciklərinin optik udma spektri şəkil 9,a-da verilmişdir. $\alpha^{1/2} \sim f(h\nu)$ asılılığından çəp keçidlər (şəkil 9,b, əyri 1) və $\alpha^{2} \sim f(h\nu)$ asılılığndan isə düz keçidlər (şəkil 9,b, əyri 2) üçün qadağan olunmuş zolağın eni müəyyən edilmişdir. Şəkildən göründüyü kimi, GaS nanohissəciklərinin çəp və düz keçidlər üçün qadağan olunmuş zolağın eni müvafiq olaraq Eg ≈ 3.0 eV və Eg ≈ 4.0 eV-a bərabər olmuşdur. Bu qiymətlərin GaS kristallı ilə müqayisədə daha böyük olduğu məlum olur(0,5-1,0 eV). GaS nanohissəciklərinin Nd:YAG lazerinin ikinci harmonikası ilə ($\hbar\omega = 2{,}34\,\text{eV}$) alınmış lüminessensiya spektrlərinin onların optik udulma spektrləri ilə müqayisəsi onu deməyə əsas verir ki, lüminessensiya spektrlərində müşahidə olunan qısa dalğalı lüminessensiya xətti düz optik keçidlərlə, daha uzun dalğalı xətt isə çəp optik keçidlərlə əlaqədardır.



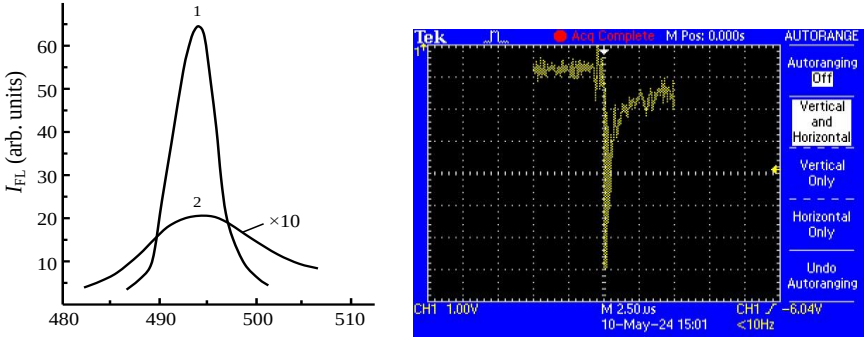
Şəkil 9. a-GaS nanozərrəciklərinin udulma spektri, b- $\alpha^{\frac{1}{2}} \sim f(h\nu)$ və $\alpha^{2} \sim f(h\nu)$ asılılıqları.

CdS nazik təbəqələrinin fotolüminessensiya spektrləri Rodamin 6G maye (boya) lazeri ilə ölçülmüşdür. İmpulsun gücü 120 kVt, müddəti 3ns, təkrarlanma tezliyi isə 20Hz olmuşdur. Şəkil 10,a-da CdS nanozərrəciklərinin fotolüminessensiya spektrləri verilmişdir. Şəkildən göründüyü kimi lazer şüalarının gücünün 8MVt/sm^2-dan 12MVt/sm^2-a qədər artması fotolüminessensiya intensivliyinin əhəmiyyətli dərəcədə artmasına səbəb olur,~30 dəfə.

CdS nanohissəciklərinin maksimum dalğa uzunluğunda ($\lambda = 499$ nm) fotolüminessensiya intensivliyinin ($I_{люм}$) lazer şüalarının intensivliyindən ($I_{лаз.}$) asılılığı $I_{люм.} \sim I_{лаз.}^{3.5}$ düsturu ilə ifadə olunur. Belə qeyri-xətti asılılıq CdS nazik təbəqələrində lazer şüalanmasının baş verdiyini söyləməyə imkan verir. Şəkil 10,b-də CdS nazik təbəqələrində fotolüminessensiyanın kinetikası verilmişdir. Şəkildən göründüyü kimi, relaksasiya müddəti $\tau \approx 5 \cdot 10^{-7}$san tərtibindədir. Sürətli relaksasiya müddətinin olması CdS nazik təbəqələrində lazer effektinin olması ilə izah oluna bilər.

Dissertasiya işində həmçinin $Cd_{1-x}Zn_xS$ bərk məhlullarının fotokeçiriciliyi və lüminessensiya spektrləri təcrübi olaraq tədqiq edilmişdir. Şəkil 11,a-da $Cd_{1-x}Zn_xS$ bərk məhlullarının T=300 K-də

lazer şüalanmasının təsiri altında fotokeçiricilik spektrləri göstərilmişdir.



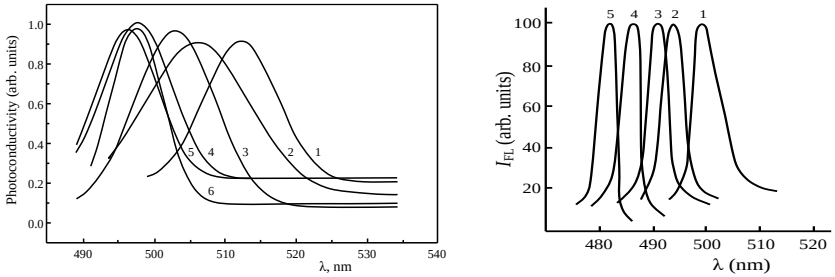
a **b**

Şəkil 10. a-Lazer şüalanmasının müxtəlif intensivliyində CdS nazik təbəqələrinin fotolüminessensiya spektrləri, $I_{лаз.}$(MVt/sm^2): 1-8; 2-12; b-CdS nanozərrəciklərində fotolüminessensiyanın relaksasiya əyrisi.

Şəkildən göründüyü kimi $Cd_{1-x}Zn_xS$ nazik təbəqələrinin (x=0÷0,30) fotohəssaslıq spektrləri dalğa uzunluğunun (490-520)nm diapazonunu əhatə edir. Şəkil 11,b-də $Cd_{1-x}Zn_xS$ bərk məhlullarının T=80K temperaturunda fotolüminessensiya spektrləri göstərilir. Şəkildən göründüyü kimi, $Cd_{1-x}Zn_xS$ bərk məhlullarında Zn–in miqdarının artması ilə fotolüminessensiya spektrləri də daha qısa dalğa uzunluqlarına doğru sürüşür. Tədqiq olunan nümunələrin müqavimətindən asılı olaraq $Cd_{1-x}Zn_xS$ fotokeçiricilik spektrlərində müşahidə olunan xüsusiyyətlər göstərir ki, fotokeçiricilik aşqarların təsirindən deyil, zona-zona optik udulma ilə əlaqədardır.

Dissertasiya işinin **dördüncü fəsli** InSe, GaSe, GaS, CdS və CdTe, CdS yarımkeçirici birləşmələrin nazik təbəqə və nanohissəciklərində qeyri-xətti optik hadisələrin nəzəri və təcrübi tədqiqinə həsr olunub. Şəkil 12,a-da InSe nanohissəciklərinin udma spektri verilmişdir. InSe kristalları düz qadağan olunmuş zolağa malik olduqlarından $\alpha^2 \sim f(h\nu)$ düsturu ilə nanozərrəciklərin qadağan olunmuş zolağının eninin Eg=2,15 eV-ə bərabər olduğu

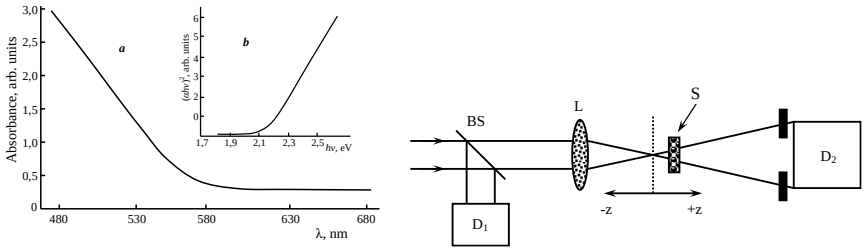
müəyyən edilmişdir. Alınan nəticələr göstərir ki, InSe nanohissəciklərinin qadağan olunmuş zolağının eni massiv InSe kristallarının qadağan olunmuş zolağının enindən (Eg=1,25 eV) ~ 0,9 eV böyükdür.



a **b**

Şəkil 11. a- $Cd_{1-x}Zn_xS$ (x=0÷0,30) bərk məhlullarının fotokeçiricilik spektrləri: 1 – 0; 2 – 0,05; 3 – 0,10; 4 – 0,15; 5 – 0,25; 6 – 0,30. T=300 K, b-Lazer şüalarının təsiri ilə $Cd_{1-x}Zn_xS$ bərk məhlullarında x-ın müxtəlif qiymətlərində fotolüminessensiya spektrləri, x: 1– 0; 2 – 0.05; 3 – 0.15; 4 – 0.25; 5 – 0.30. T=80 K.

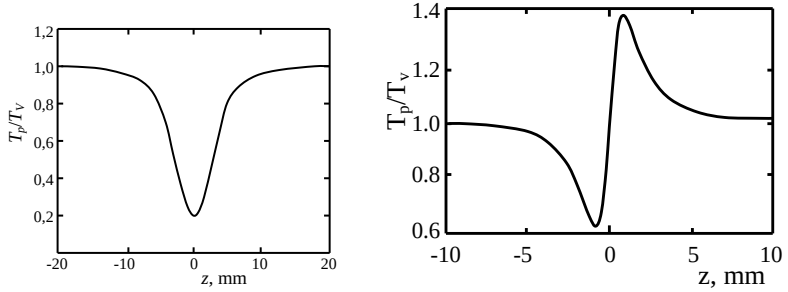
InSe nanohissəciklərinin qeyri-xətti optik xüsusiyyətlərini öyrənmək üçün şüa distorsiyası (z-scan) üsulundan istifadə edilmişdir (Şəkil 12,b). Açıq diafraqma texnikasından istifadə edərək, nümunənin mövqeyindən asılı olaraq ondan keçən intensivlik (nümunənin buraxma qabiliyyəti) ölçülmüşdür (şəkil 13,a).



a **b**

Şəkil 12. a- InSe nanohissəciklərinin udulma spektri, b- Z-scan qurğusunun sxematik sxemi.

Şəkildən göründüyü kimi, bu asılılıq minimum buraxma müşahidə olunduğu halda linzanın fokusuna (z=0 mm) nəzərən simmetrikdir. T_V-radiasiyasının aşağı intensivliyində (qeyri-xətti effektlər olmadıqda) nümunənin buraxma qabiliyyəti, T_R - radiasiyasının yüksək intensivliyində nümunənin buraxma qabiliyyətidir. Qeyri-xətti sınma əmsalını təyin etmək üçün qapalı diafraqma texnikasından istifadə edilmişdir. Öz-özünə fokuslanma effektinə görə, detektor müstəvisindəki işıq ləkəsinin ölçüsü dəyişdiyindən, sonlu diafraqmanın detektorun qarşısında yerləşdirilməsi qeyri-xətti sındırma əmsalının ölçülməsini təmin edir. Buraxma funksiyasının xarakterik forması şəkil 13,b-də göstərilmişdir.



a **b**

Şəkil 13. a- Açıq diafraqma halında linzanın fokusuna nisbətən nümunənin mövqeyinin funksiyası kimi buraxma qabiliyyəti, **b-** qapalı diafraqma halında nümunənin mövqeyinin funksiyası kimi buraxma qabiliyyəti.

Müsbət qeyri-xətti sınma indeksi (Δn) olan nümunə linzanın fokusundan uzaqda yerləşdiyi təqdirdə, nümunədən keçən radiasiyanın intensivliyi aşağı olur və nümunənin qalınlığı böyük olmadığı üçün keçiricilik nümunə hərəkət etdikcə bir qədər dəyişir. Nümunə fokusa yaxınlaşan kimi şüadakı intensivlik nümunədə özünə fokuslanmanın baş verməsi üçün kifayət edir. Δn(ω) -nin qiyməti linzanın fokusuna nisbətən nümunənin mövqeyindən asılı olaraq buraxma əmsalını təhlil etməklə müəyyən edilə bilər.

Sındırma indeksinin dəyişməsi fazanın dəyişməsinə səbəb olur, $\Delta\Phi_0 = (2\pi/\lambda)\Delta n(\omega)L_{eff}$, burada $L_{eff} = (1-\exp(-\alpha l)/\alpha$ - nümunənin effektiv uzunluğu, λ isə lazer dalğa uzunluğudur. Fazanın dəyişməsi və deməli, sınma indeksinin dəyişməsi maksimum və minimum arasındakı fərq olan ΔT_{pv} ölçülən kəmiyyətindən müəyyən edilə bilər, $\Delta T_{pv} = T_p - T_v$, burada Tp(Tv) zirvə (dərə) buraxma qabiliyyətidir. $\Delta T_{pv} \approx 0{,}45(\Delta\Phi)$ olduğundan, qeyri-xətti sındırma əmsalı Δn(ω) aşağıdakı tənliyə uyğun olaraq verilir:

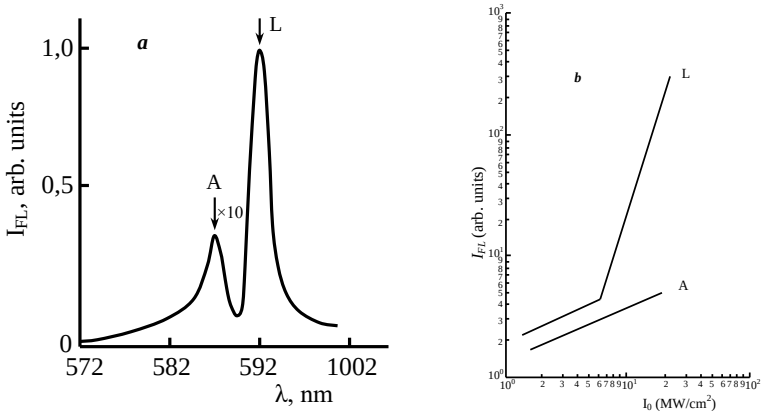
$$\Delta n(\omega) = \frac{\Delta T_{PV} \cdot \lambda \cdot \alpha}{0.405 \cdot 2\pi(1-\exp(-\alpha l)} \qquad (11)$$

burada λ = 535 nm lazerin dalğa uzunluğu, $\alpha \approx 10^3$ sm^{-1} tədqiq olunan maddənin optik udulma əmsalı, l = 20 nm nümunənin qalınlığıdır.

Hesablamalar göstərir ki, InSe nanohissəciklərinin W~10 MVt/sm^2 gücündə lazer şüaları ilə həyənlaşdırdıqda qeyri-xətti optik hadisənin yaranması nəticəsində sındırma əmsalının dəyişməsi Δn(ω) ≈ 0,24 təşkil edir.

InSe nanozərrəciklərinin eksiton udma oblastında qeyri-xətti optik udma hadisəsi aşkar edilmişdir. Nd:YAG lazerinin ikinci harmonikası ($\hbar\omega = 2{,}34\,\text{eV}$) ilə həyəcanlanan InSe nanohissəciklərinin lüminessensiya spektri şəkil 14,a-da verilmişdir. Şəkildən göründüyü kimi, spektrdə maksimumları 587 nm (A xətti) və 592 nm (L xətti) olan iki emissiya xətti müşahidə olunur. Həyəcanlandırıcı şüaların intensivliyi artdıqca emissiya spektrində L xətti dominant olur, 10MVt/sm^2 həyəcanlanma gücündə L xəttinin intensivliyi A xəttinin intensivliyindən 2 tərtib yüksəkdir. Qeyd etmək lazımdır ki, həyəcanın intensivliyindən asılı olaraq L-xəttinin mövqeyi dəyişir, uzun dalğalara doğru sürüşməsi müşahidə olunur, lazer şüalarının ~8 MVt/sm^2 gücündə L-xəttinin yerdəyişməsi ΔE ~15 meV təşkil edir. Şəkil 14,b-də A-xəttinin və L-xəttinin lüminessensiya intensivliyinin lazer şüalanma gücündən asılılılıqları göstərilmişdir. Şəkildən göründüyü kimi, A-xəttinin intensivliyi lazer şüalarının gücündən xətti asılıdır, L-xəttində isə aşağı həyəcanlaşma intensivliyində müşahidə olunan xətti asılılıq

yüksək həyəcanlaşma intensivliyibdə kvadratik asılılıqla əvəz olunur. Fikrimizcə, belə superxətti asılılıq InSe nanohissəciklərində stimullaşdırılmış emissiya hadisəsinin müşahidə olunmasını göstərir. Nanohissəciklərin lüminessensiya spektrinin InSe-nin udulma spektri ilə müqayisəsi onu deməyə əsas verir ki, lüminessansiya spektrində müşahidə olunan A xətti sərbəst eksitonların annigilyasiyası ilə bağlıdır. Bunu lüminessensiya xəttinin stabilliyi, dar enə (~10 A^0) malik olması və bu xəttin spektrin uzundalğalı oblastında fundamental udma zolağının kənarından eksitonun əlaqə enerjisinə (E_b=20meV) bərabər məsafədə yerləşməsi sübut edir.



a **b**

Şəkil 14. a-Nd:YAG lazerinin ikinci harmonikası ($\hbar\omega = 2{,}34\,\text{eV}$) ilə həyəcanlanan InSe nanohissəciklərinin lüminessensiya spektri, **б**- A və L lüminessensiya xəttlərinin intensivliyinin lazer şüalanma gücündən asılılıqları.

Stimullaşdırılmış emissiyanın baş verdiyi L zolağının təbiətinin araşdırılması böyük əhəmiyyətə malikdir. Bizim fikrimizcə, bu zolaq optik həyəcanlanmanının yüksək səviyyələrində yarımkeçiricilərdə baş verən eksiton-eksiton qarşılıqlı təsiri ilə əlaqələndirilə bilər. Doğrudan da, həyəcanlanma intensivliyi artdıqca eksitonların konsentrasiyası artır və müəyyən

bir kritik qiymətə çatdıqda, eksitonlar arasında qarşılıqlı təsir baş verir ki, bu da eksitonların parçalanmasına və sərbəst elektron-deşik cütlərinin yaranmasına səbəb olur. Bu hadisə Mott kriteriyası adlanır. Elektronların və deşiklərin effektiv kütlələrini (m_e=0.12m_0, m_h = 0.6 m_0), həmçinin InSe üçün Bohr radiusunun a_{ex} = 37A^0 olduğunu bilməklə, eksitonların konsentrasiyasını (n_{Mott}) təyin edə bilərik:

$$n_{Momm} = \frac{\pi}{3}\left(\frac{1{,}46}{4a_{экс.}}\frac{m_0}{m_e + m_h}\right)^3 \qquad (12)$$

(12) düsturundan istifadə etməklə hesablanmış InSe üçün eksitonların kritik konsentrasiyası n_{Mott} ~2,5×10^{16} sm^{-3}-ə bərabər olmuşdur. Hesablamalar göstərir ki, intensivliyi I_0=1,5x10^{25} foton/sm^2·san və impulsun müddəti müddəti Δt=3×10^{-9} san olan lazerin yaratdığı qeyri-tarazlıq yükdaşıyıcıların konsentrasiyası aşağıdakı qiymətə bərabərdir:

$$\Delta n = \alpha I_0 \Delta t = 4{,}5\times10^{19}\ sm^{-3} \qquad (13)$$

burada α ≈ 10^3 sm^{-3} –fundamental udulma kənarında udulma əmsalıdır.

(12) və (13) düsturlarının müqayisəsindən göründüyü kimi, əldə etdiyimiz qeyri-tarazlıq daşıyıcılarının konsentrasiyası Mott keçidi üçün tələb olunan konsentrasiyadan 3 tərtib çoxdur. Exciton-exciton qarşılıqlı təsirini aşağıdakı düsturla ifadə etmək olar:

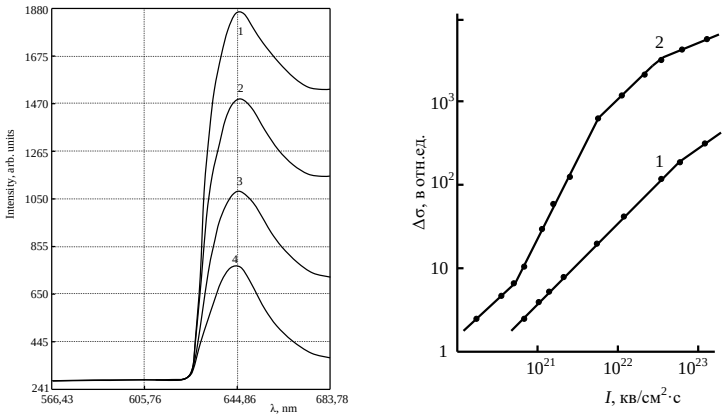
$$h\nu = E_g - 2E_b - E_k E_{k'} - \frac{\hbar k^2}{2\mu} = E_g - 2E_{св} - \Delta E \qquad (14)$$

burada E_g – qadağan olunmuş zolağın eni, $\mu = \left(\frac{1}{m_e} + \frac{1}{m_h}\right)^{-1}$ – elektron-deşik cütünün gətirilmiş effektiv kütləsi, $\frac{\hbar^2 k^2}{2M}$ – elektron-deşik cütünün tam enerjisi, $M = m_e + m_h$, $E_{св}$ – eksitonun əlaqə enerjisi, $\hbar k_e (baş.son.)$ – elektronun toqquşmadan əvvəl (sonra) momenti, $E_{kk'}$ – eksitonun toqquşmadan əvvəlki kinetik enerjisi, ΔE isə aşağıda göstərilən ifadə ilə təyin olunur:

$$\Delta E = \frac{1}{\mu}\frac{h^2}{8}\left(\frac{3}{8\pi}\right)^{2/3}\left(\frac{N}{V}\right)^{2/3} \qquad (15)$$

Təcrübələr göstərir ki, ΔE-nin həyəcanlanma intensivliyindən asılılığı ΔE ~ $I_0^{1/3}$ şəklində olur. (16) düsturu ilə aparılan hesablamalar göstərir ki, m_e=0.12m_0, m_h=0.6m_0 və $I_{лазер}$≈10MVt/sm^2 dəyəri ilə ΔE~15meV-ə bərabərdir, bu da ΔE üçün eksperimental olaraq tapılmış qiymətlərlə uyğunluq təşkil edir.

Məlumdur ki, laylı quruluşa malik olan GaSe kristallarında mövcud olan struktur defektləri onların elektrik, optik və fotoelektrik xassələrinə güclü təsir göstərir. Struktur defektlərin GaSe nanohissəciklərinin fiziki xassələrinə təcirinin müəyyən edilməsi böyük maraq doğurur. Bu məqsədlə dissertasiya işində lazer şüalarının təsiri ilə GaSe nazik təbəqələrinin və nanozərrəciklərinin optik və fotoelektrik xassələri təcrübi olaraq tədqiq edilmişdir. Qalınlığı (100-200)mkm olan nazik təbəqələr massiv kristaldan mexaniki parçalanma yolu ilə əldə edilmişdir. Şəkil 15,a-da GaSe nazik təbəqələrinin buraxma spektrləri göstərilmişdir. Şəkildən göründüyü kimi, optik udulma kənarı enerjinin ~2,02eV qiymətinə uyğundur.

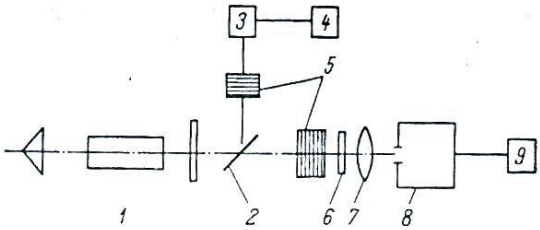


a **b**

Şəkil. 15. GaSe nazik təbəqələrinin buraxma spektri (a) və fotokeçiriciliyin lüks-amper xarakteristikası.

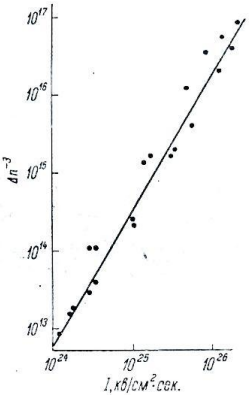
Lazer şüalarının intensivliyinin artması buraxma spektrinin azalmasına səbəb olur. Belə ki, intensivliyin 0.1-10 MVt/sm^2 intervalında dəyişməsi buraxma əmsalının 35% azalmasına səbəb olur. Şəkil 15,b-də laylara perpendikulyar (1 əyrisi) və paralel (2 əyrisi) istiqamətlərdə fotokeçiriciliyin ($\Delta\sigma$) lazer şüalanma intensivliyindən (I) asılılığı verilmişdir. Şəkildən göründüyü kimi, E⊥c (1əyrisi) vəziyyətində geniş intensivlik diapazonunda $\Delta\sigma$ fotokeçiriciliyi lazer şüalarının I intensivliyindən xətti asılıdır, E//c (2əyrisi) vəziyyətində isə müəyyən intensivlik diapazonunda $I_1 \le I \le I_2$ ($I_1 = 6.5 \cdot 10^{22}, I_2 = 6.5 \cdot 10^{23}$ kv/sm^2•san) kvadratik asılılıq müşahidə olunur, $\Delta\sigma \sim I^2$. GaSe nazik təbəqələrinin buraxma spektrində və fotokeçiriciliyin lüks-amper xarakteristikasında müşahidə olunan xüsusiyyətlər "c" optik oxuna paralel istiqamətdə struktur defektlərinin yaratdığı potensial baryerlə əlaqədardır. GaSe nazik təbəqələrində müşahidə olunan bu xüsusiyyətlər nanozərrəciklərdə müşahidə olunmur. Bizim fikrimizcə, GaSe nazik təbəqələrində laylar arasında mövcud olan struktur defektlərinin onların nanozərrəciklərində müşahidə olunmaması bu maddələrin optoelektronikada geniş tətbiqinə imkanlar yaradır.

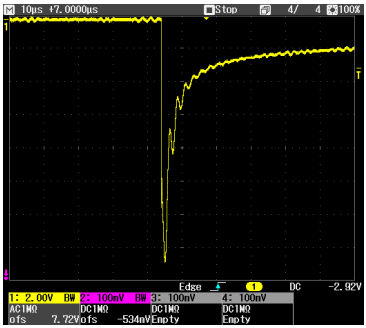
CdS nazik təbəqələrində lazer şüalarının təsiri ilə ikifotonlu fotokeçiricilik hadisəsi aşkar edilmişdir. Şəkil 16-da CdS nazik təbəqələrində lazer şüalarının təsiri ilə fotokeçiriciliyin ölçü sxemi verilmişdir.



Şəkil 16. CdS nazik təbəqələrində fotokeçiriciliyin ölçü sxemi: 1-lazer; 2-meyletdirici lövhə; 3-nanosaniyəli fotodiod; 4,9- yaddaşlı ossilloqraflar; 5-neytral işıq filtrləri; 6-kənar işıqlanmaları kəsən işıq filtrləri; 7-toplayıcı linza; 8-nümunənin yerləşdiyi kamera.

CdS nazik təbəqələrinin qadağan olunmuş zolağının eni ~2.45 eV-dur, ona görə də Nd:YAG-lazerinin ikinci harmonikasının ($\hbar\omega = 2{,}34\,\text{eV}$) təsiri ilə onlarda ikifotonlu udulma hadisəsi baş verə bilər. Şəkil 17,a-da lazer şüalarının təsiri ilə yaranan qeyri-tarazlıqlı yükdaşıyıcılarının Δn konsentrasiyasının lazer şüalarının I_0 intensivliyindən asılılığı verilmişdir. Şəkildən göründüyü kimi Δn-nin I_0-dan asılılığı kvadratik xarakter daşıyır. Kvadratik asılılıq intensivliyin geniş diapazonunda ödənilir. Lazer şüalarının intensivliyinin ~$2\cdot10^{26}$ kV/sm^2·san. qiymətində yükdaşıyıcıların konsentrasiyası ~10^{17}sm^{-3} tərtibindədir.





a b

Şəkil 17. a- Lazer şüalarının təsiri ilə CdS nazik təbəqələrində yaranan qeyri-tarazlıqlı yükdaşıyıcılarının Δn konsentrasiyasının lazer şüalarının I_0 intensivliyindən asılılığı, b- CdS nazik təbəqələrində fotokeçiriciliyin ossilloqramması.

Bizim fikrimizcə, müşahidə olunan Δn-nin I_0-dan kvadratik asılılığı qeyr-tarazlıqlı yükdaşıyıcılarının lazer şüalarının təsiri ilə ikifotonlu fotokeçiricilik nəticəsində yarandığını göstərir. Məlumdur ki, qeyri-tarazlıqlı yükdaşıyıcılarının Δn konsentrasiyası aşağıdakı düsturla təyin edilir

$$\Delta n = \beta k I \mu \tau (1 - e^{-t/\tau}) \qquad (16)$$

burada β -kvant çıxışı, I-işığın intensivliyi, к- işığın udulma əmsalı, μ -yükdaşıyıcıların yürüklüyü, τ -yükdaşıyıcıların yaşama müddəti.

Lazer impulsun müddəti (Δt=10ns) yükdaşıyıcıların xarakterik yaşama müddətindən kiçik olduqda τ ($\Delta t < \tau$), fotokeçiriciliyin qiyməti yalnız generasiyanın tempi ilə müəyyən olunur.

$$\Delta n = kI\Delta t \qquad (17)$$

Çoxfotonlu udulma prosesində $k^n \sim I^n$ olduğundan, ikifotonlu udulma prosesində к~ I olacaqdır. Onda yaranan qeyri-tarazlıqlı yükdaşıyıcılarının konsentrasiyası lazer şüalarının intensivliyindən kvadratik asılı olacaqdır

$$\Delta n = k(I)I\Delta t = kI^2\Delta t \qquad (18)$$

Beləliklə qeyri-tarazlıqlı yükdaşıyıcıların konsentrasiyasının lazer şüalarının intensivliyindən kvadratik asılılığı ($\Delta n \sim I^2$) nümunədə ikifotonlu fotokeçiriciliyin baş verdiyini söyləməyə imkan verir. Şəkil 17,b-də CdS nazik təbəqələrində fotokeçiriciliyin relaksasiya əyrisi verilmişdir. Şəkildən göründüyü kimi relaksasiya əyrisi iki komponentdən ibarətdir: sürətli və yavaş komponentlər. Yüksək optik həyəcanlaşma intensivliyində yapışma mərkəzlərinin yükdaşıcılarla dolması nəticəsində yavaş komponent demək olar ki, tamamilə aradan gedir.

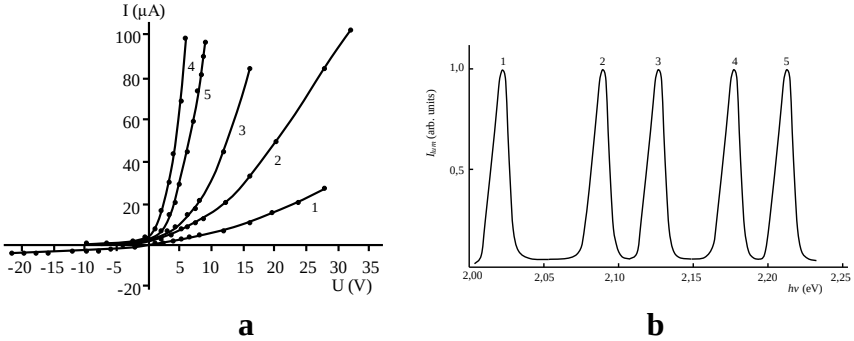
Dissertasiya işində həmçinin çoxfotonlu optik udma metodu ilə optoelektronikada çox geniş tətbiq olunan çoxlaylı strukturların parametrləri müəyyən edilmişdir. Bu məqsədlə hal-hazırda rentgen spektral mikroanaliz və ayrı-ayrı layların birfotonlu həyəcanlanma üsullarından istifadə olunur. Bu üsullar nümunənin bütövlüyünü pozur və ölçmələrə kifayət qədər vaxt tələb edir. Bunlardan fərqli olaraq, dissertasiya işində təqdim olunan ikifotonlu udma metodu layların tərkibi, hər bir layda iştirak edən yarımkeçiri maddənin qadağan olunmuş zolağının eni, dərin və dayaz aşqarların konsentrasiyası və layların qalınlığıni müəyyən etməyə imkan verir.

Məlumdur ki, yarımkeçiricilərə enerjisi qadağan olunmuş zolağın enindən kiçik olan lazer şüaları ilə təsir etdikdə ($\hbar\omega < E_g$)

çoxfotonlu udma hadisəsi baş verur. Laylı $GaSe_{1-x}S_x$ yarımkeçirici birləşmələri bu tip tədqiqatların aparılması üçün əlverişli obyektlərdir. $GaSe_{1-x}S_x$ qadağan olunmuş zolağının eni tərkibdən (x=0÷0,25) asılı olaraq 2,02÷2,21eV intervalında dəyişir, ona görə də Nd:YAG lazerinin 1-ci harmonikası (ħω=1,17 eV) ikifotonlu udulma hadisəsinə səbəb ola bilər. Çoxqatlı $GaSe_{1-x}S_x$ strukturu optik kontakta üsulu ilə yaradılmışdır. Optik kontakta metodunun mahiyyəti ondan ibarətdir ki, kontaktda olan iki yarımkeçirici material demək olar ki, "ideal" səthə malik olmalıdır. Başqa sözlə, optik kontakt üçün materialların səthinin girintiiyi-çıxışlılığı işığın dalğa uzunluğunun dörddə birindən çox olmamalıdır. Təbii ki, bütün yarımkeçiricilər bu tələblərə cavab vermir. İstifadə etdiyimiz $GaSe_{1-x}S_x$ kristalları bu məqsəd üçün idealdır. Bu kristallar təbii güzgü səthinə malik laylı quruluşa malikdir. Bu halda nümunələrin mexaniki və kimyəvi emalına ehtiyac olmur. Çoxtəbəqəli strukturun hazırlanmasında qalınlığı 20÷100μm olan $GaSe_{1-x}S_x$ kristallarından istifadə edilmişdir. Sonra nümunələr bir-birinə sıxılır və bir neçə saat təzyiq altında saxlanılır. Təmasda olan nümunələrin səthləri onların arasında yaranan molekuldaxili qüvvələr səbəbindən yapışır. Ən aşağı təbəqə GaSe (Eg=2.02 eV), qalan təbəqələr isə Eg-nin artan qiymətləri ilə yerləşdiyindən ikifotonlu həyəcanlanma nəticəsində yaranan rekombinasiya şüalanması nümunədən zəifləmədən geniş diapazonda baş verir. $GaSe_{1-x}S_x$ bərk məhlulları (x=0÷0,25) əsasında hazırlanmış müxtəlif sayda təbəqələr (ikidən beşə qədər) təcrübi olaraq ölçülmüşdür. Çoxqatlı strukturun sıx təmas sahələrinin həyata keçirilməsi üçün təcrübələr təzyiq altında aparılmışdır. Şəkil 18,a-da tətbiq olunan müxtəlif xarici təzyiqlərdə $GaSe_{0,5}S_{0,5}$ strukturun volt-amper xarakteristikaları göstərilmişdir. Bu təbəqələr səth müstəvisinə perpendikulyar (kristallarının “c” simmetriya oxu boyunca) istiqamətdə yönəldilmiş mexaniki təzyiqə məruz qalmışdır. Təzyiq (5-500) kq/sm^2 intervalında dəyişirdi. Göründüyü kimi təzyiq artıqca volt-amper xarakteristikanda düz istiqamətdəki cərəyanın qiyməti artır. Ancaq təzyiqin 500 kq/sm^2 qiymətindən başlayaraq volt-amper xarakteristikası pisləşir.

Şəkil 18-b-də Nd:YAG lazerinin birinci harmonikası (ħω=1,17 eV) ilə ikifotonlu həyəcanlandırmada beşqatlı $GaSe_{1-x}S_x$

strukturunun fotolüminessensiya spektrlərini göstərilmişdir. Şəkildən göründüyü kimi, fotolüminessensiya spektrlərindəki xəttlərin sayı strukturdakı təbəqələrin sayı ilə üst-üstə düşür. Müşahidə olunan emissiya xəttlərinin xarakterini müəyyən etmək üçün fundamental udulma kənarında ayrı-ayrı təbəqələrin optik udulma spektrləri ölçülmüşdür. Udulma spektrləri ilə lüminessensiya spektrlərinin müqayisəsi onlar arasında uyğunluğun olduğunu göstərir. Beləliklə, aparılan tədqiqatlara əsasən qeyd etmək olar ki, $GaSe_{1-x}S_x$ çoxlaylı strukturunda hər bir kompozisiyanın qadağan olunmuş zolağı üçün müvafiq olaraq 2.020 eV, 2.084 eV, 2.127 eV, 2.175 eV və 2.210 eV-ə qiymətləri alınmışdır. x: 1-0; 2=0,5; 3=0,1; 4=0,2; 5=0,25. Onu da qeyd etmək lazımdır ki, $GaSe_{1-x}S_x$ bərk məhlulları üçün müəyyən edilmiş qadağan olunmuş zolağının eni dövrü ədəbiyyatda onlar haqqında verilən məlumatlar ilə qənaətbəxş uyğunluq təşkil edir.



Şəkil 18. a-GaSe nazik təbəqələrinin müxtəlif xarici təzyiqlərdə (P) volt-amper xarakteristikaları, P (кг/см^2): 1-50, 2-100; 3-300; 4–500; 5–600, **b-**Çoxtəbəqəli $GaSe_{1-x}S_x$ strukturun fotolüminessensiya spektrləri. x: 1-0; 2=0,5; 3=0,1; 4=0,2; 5=0,25.

Şəkil 18,b-dən göründüyü kimi, şüalanma rekombinasiyasının intensivliyi çoxqatlı strukturun bütün həcmi boyunca demək olar ki, eynidir və bu, lüminessensiya spektrlərindəki xəttlərin intensivliyinin təbəqənin qalınlığı ilə mütənasib olduğunu deməyə əsas verir. Bu halda, lüminessensiya spektrində xəttlərin

intensivliklərinin nisbəti ilə strukturdakı təbəqələrin nisbi qalınlıqlarını müqayisə etmək və onun ümumi qalınlığını bilməklə təbəqə qalınlığının mütləq dəyərlərini təyin etmək olar. Bizim ölçmələrə görə, təbəqələrin ümumi qalınlığı ~500 mkm-ə bərabər oldu və bu, çoxqatlı strukturda hər bir təbəqənin qalınlığının ~100 mkm-ə bərabər olduğunu söyləməyə imkan verir.

Dissertasiyada işində əldə edilən nəticələr

1. Nd:YAG nanosaniyəli impuls lazeri vasitəsilə lazer ablasiya üsulu ilə InSe, GaSe, GaS , CdS və CdTe yarımkeçirici birləşmələrin nanozərrəcikləri sintez edilmiş, ilk dəfə olaraq InSe, GaSe və CdS nanohissəcikləri yüksək təmizliyə malik (99%) In, Ga və Cd istifadə edilməsi ilə alınmışdır.

2. InSe, GaSe, GaS , CdS və CdTe nanohissəciklərinin səth morfologiyası və strukturu rentgen difraksiya analizi (XRD), skanedici elektron mikroskopu (SEM), atom qüvvə mikroskopu (AFM) və enerji dispersiv rentgen spektroskopiyası (EDAX) vasitəsilə öyrənilmişdir. Göstərilmişdir ki, alınan nanozərrəciklər istifadə olunan yarımkeçirici kristalların strukturunu və steoxiometriyasını tamamilə əks etdirir.

3.Lazer ablasiyası prosesində tədqiq olunan yarımkeçiricilərdə lazer şüasının udulma mexanizmi və plazma temperaturu müəyyən edilmişdir. Göstərilmişdir ki, güclü lazer şüalarının təsiri ilə kristallarda yaranan elektron-deşik cütlərinin şüalanmasız rekombinasiyası nəticəsində kristal qəfəsin ~10^5K temperaturuna qədər qızması baş verir.

4.InSe, GaSe, GaS, CdS və CdTe nanohissəciklərinin optik və lüminessensiya parametrləri (udulma əmsalı, qadağan zonanın eni, eksitonun əlaqə enerjisi) təyin edilmiş, müəyyən edilmişdir ki, nanozərrəciklərin qadağan zonanın eni tədqiq olunan yarımkeçiricilərinkindən 0.5-1.0 eV qədər boyükdür. Geniş qadağan zonalı GaS kristalın (E_g=2.52eV) nanozərrəciklərində qadağan zonanın eni 4 eV-a bərabər olur.

5 Nd:YAG lazerinin ikinci harmonikası ($\hbar\omega = 2{,}34\,\text{eV}$) ilə həyəcanlanan InSe nanohissəciklərinin lüminessensiya spektrində $\lambda = 592$ nm dalğa uzunluğunda maksimum müşahidə olunur.

Yüksək optik həyəcanlaşmada (I_0=1,5x10^{25} foton/sm^2·san) fotolüminessensiya maksimumunun yarım eninin bir neçə anqstrem tərtibində olması, lüminessensiya intensivliyinin lazerin gücündən kvadratik asılılığı, lazer şüalarının yaratdığı elektron-deşik cütünün yüksək konsentrasiyası($\Delta n=4,5\times10^{19}sm^{-3}$) InSe nanozərrəciklərində məcburi şüalanma effektinin yarandığını göstərir.

6. Yüksək lazer şüalanma intensivliyində InSe nanohissəciklərində qeyri-xətti optik udulma prosesi aşkar edilmiş, lazer şüalarının həyəcanlanma intensivliyinin ~10MVt/sm^2 gücündə InSe nanohissəciklərinin sındırma əmsalının dəyişməsi $\Delta n(\omega) \approx$ 0,24 müşahidə olunmuşdur. Yüksək optik həyəcanlaşmada eksiton-eksiton qarşılıqlı təsiri nəticəsində eksitonların annihilyasiyası baş verir və bu da eksiton oblastında optik udulmanın azalaraq aradan çıxmasına səbəb olur.

7. Çoxlaylı yarımkeçirici strukturun lazer şüaları ilə ikifotonlu həyəcanlaşdırma üsulu ilə qadağan zonanın eni, layların qalınlığı, aşqarların konsentrasiyası, rekombinasiya proseslərinin mexanizmi müəyyən edilmişdir.

Dissertasiya mövzusu üzrə çap olunmuş elmi işlər

1.Салманов,В.М. Особенности фотопроводимости и люминесценции тонких пленок CdS и твердых растворов $Cd_{1-x}Zn_xS$ при лазерном возбуждении / В.М. Салманов, А.Г.Гусейнов, М.А.Джафаров [и др.] // Оптика и спектроскопия, – 2022. 130(10), – с. 1567-1570.

2. Салманов, В.М. Спектры поглощения и люминесценции наноструктуры GaSe и гетероперехода GaSe/InSe при лазерном возбуждении / В.М. Салманов, А.Г. Гусейнов, Г.Б.Ибрагимов [и др.] // Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Xəbərləri, – 2023. 5, –s.16-22.

3. Jafarov, M.A. A new method for synthesis of CdTe nanoparticles by laser radiation / M.A. Jafarov, V.M. Salmanov, A.G. Guseinov [et al.] // AJP FİZİKA–2023. 29 (3), – s. 13-18.

4. Jafarov, M.A. GaSe nanoparticles synthesized by laser ablation method / M.A. Jafarov, V.M. Salmanov, A.G. Guseinov

[et.al.] // UNEC Journal of Engineering and Applied sciences, – 2023. 3(2), – p. 55-61.

5. Jafarov M.A. CdS nanoparticles synthesized by laser ablation / M.A. Jafarov , V.M. Salmanov, A.G.Huseynov [et.al.] // 8th International Conference Modern Trends in Physics, – Baku: – 30 nov.-1 dec., – 2023, – p. 47-48.

6. Salmanov V.M. The use of multi-quantum absorption for the study of semiconductor multilayer structures / V.M. Salmanov, A.G. Huseynov, R.M. Mamedov [et.al.] // 8th International Conference Modern Trends in Physics, – Baku: – 30 nov.-1 dec., – 2023, – p. 45-46.

7. М.А. Джафаров, Т.А.Мамедова. Оптические и фотоэлектрические свойстватонких пленок CdS и гетеропереходов $CuInSe_2$/ $Cd_{1-x}Zn_xS$. “Müasir təbiət və iqtisad elmlərinin aktual problemləri “ adlı Beynəlxalq elmi konfransı, Gəncə 2023, səh. 14-17.

8. Салманов В.М., Гусейнов А.Г., Мамедов Р.М., Мамедова Т.А., Ахмедова Ф.Ш. Оптическое поглощение и люминесценция в наночастицах İnSe, полученные методом лазерной абляции. “ Müasir təbiət və iqtisad elmlərinin aktual problemləri “ adlı Beynəlxalq elmi konfransı, Gəncə 2024, səh. 30-33.

9. M.A. Jafarov, V.M. Salmanov, R.M. Mamedov, E.F.Nasirov , T.A.Mamedova. Synthesis of CdSTe nanoparticles by laser ablation. Phys. Chem. Math., 2024,15(5), 1-6.

10. V.M. Salmanov, A.G. Guseinov, M.A. Jafarov, R.M. Mamedov, M.M.Jahangirli , T.A. Mamedova, F. Sh. Akhmedova. Optical properties of GaS nanoparticles prepared by laser ablation. Physics of Solid State,2024,Vol 66, No 11,pp 484-488.

11. V.M. Salmanov, A.G. Guseinov, M.A. Jafarov, R.M. Mamedov, T.A.Mamedova, F.Sh. Akhmedova. Nonlinear transmission and photoluminescence of colloidal solution of İndium-Selenide-Based nanocrystals. Semiconductors**,** 2024 ,Vol 58 ,No 7,pp 580-584.

12. V.M. Salmanov, A.G. Guseinov, M.A. Jafarov, R.M. Mamedov, T.A.Mamedova, E.F.Nasirov

CdS nanoparticles synthesized by laser ablation in liquid**.** Semiconductors, 2024 ,Vol 58 ,No 6,pp 533-537.

13. V.M. Salmanov, A.G. Guseinov, M.A. Jafarov, R.M. Mamedov, F.Sh. Akhmedova, T.A.Mamedova. Preparation of gallium selenide nanoparticles by laser ablation in liquid. Russian Journal of Physical Chemistry A, 2024, pp 1-5.

14. V.M. Salmanov, A.G. Guseinov, G.B. Ibrahimov, M.A. Jafarov,, R.M. Mamedov, T.A.Mamedova ,F. Sh. Akhmedova. Optical absorption and luminescence in İnSe nanoparticles obtained by laser ablation. AJP FİZİKA,2024, vol XXX , No 2, Səh 3-8.

15. V.M. Salmanov, A.G. Guseinov,R.M. Mamedov, T.A.Mamedova, F.Sh. Akhmedova. Determination of the mechanism of absorption and temperature of laser ablation in liquid of indium selenide nanoparticles. Baku State University: Journal Physics, 2024, v 1(2), pp.1-8.

16.V.M.Salmanov,A.G.Guseinov,G.B.Ibrahimov,R.M.Mamedov,T.A.Mamedov,F.Sh. Akhmedova.

Features of transmission spectra of GaSe thin films and nanoparticles synthesized by laser ablation. AJP FİZİKA,2024, Section C, Səh 71-73.

17. В.М. Салманов, А.Г. Гусейнов, Г.Б.Ибрагимов , М.Б. Джафаров, Р.М. Мамедов, Ф. Ш. Ахмедова, Т.А.Мамедова. Оптическое поглощение и люминесценция в наночастицах İnSe, полученных методом лазерной абляции.Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Xəbərləri , 2024,No 5, səh 38-45.

18. В.М. Салманов, А.Г. Гусейнов, М.Б. Джафаров, Р.М. Мамедов, Ф. Ш. Ахмедова, Т.А.Мамедова. Экситонное поглощение в наночастицах селенида галлия при лазерном возбуждении. “İnnovativ ekosistemlərin inkişafında universitetlərin rolu” Respublika Elmi-Praktik Konfransı, Gəncə 2024, səh 243-244.

19.Абасова А.З., Джфаров М.Б., Гасанова М.Г., Магомедов А.З., Джахангирова С.А., Мамедова Т.А. Влияние лазерного излучения на структуру слоистых кристаллов GaSe. “Müasir təbiət və iqtisad elmlərinin aktual problemləri “ adlı Beynəlxalq elmi konfransı, Gəncə 2024, səh. 76-78.

20. В.М. Салманов, А.Г. Гусейнов, Р.М. Мамедов, С.С. Рагимов, Т.А. Мамедова, Ф.Ш. Ахмедов, М.М. Джахангиров. Наночастицы InSe, GaSe и GaS, синтезированные методом лазерной абляции в жидкости. “Микро- и нанотехнологии в электронике” XIV Международная научно-техническая конференция.Россия, г. Нальчик. 2024 сс.165-169.

21. V.M. Salmanov, M.A. Jafarov, R.M. Mamedov , T.A. Mamedova. Synthesis and optical properties of layered $A^{III}B^{VI}$ semiconductor nanoparticles by laser ablation. 8th International Scientific Conference «Scientific Results». Rome, Italy, 2024

22. F.SH. Ahmadova, L.A. Balayeva, Di Sun Xiaozhou. InSe Semiconductor crystal. 8-th International congress on mult. scient. research. Istanbul 2024, 3-5 decem.

Dissertasiyanın müdafiəsi 8 oktyabr 2025-ci il tarixində saat 9^30 -da Azərbaycan Respublikası Elm və Təhsil Nazirliyi Fizika İnstitutunun nəzdində fəaliyyət göstərən ED 1.14 Dissertasiya şurasının iclasında keçiriləcək.

Ünvan: AZ-1073, H.Cavid prospekti 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 "5" sentyabr 2025-ci il tarixində zəruri ünvanlara göndərilmişdir.

Çapa imzalanıb:30.06.2025

Kağızın formatı: A5

Həcmi:

Tiraj:100

.