

AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASI

Əlyazması hüququnda

Si, ZnO, CdS, MoSe₂, InAs_{1-x}Sb_x OPTOELEKTRON MƏTERİALLARIN NAZİK TƏBƏQƏLƏRİNİN MİKROSTRUKTURU VƏ OPTİK XASSƏLƏRİ

İxtisas: 2220.01 – Yarımkəçiricilər fizikası

Elm sahəsi: Fizika

İddiaçı: **Yeganə Nağı qızı Əliyeva**

Fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi
almaq üçün təqdim edilmiş dissertasiyanın

AVTOREFERATI

Bakı – 2021

Dissertasiya işi Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının (AMEA) Fizika İnstitutunda yerinə yetirilmişdir.

Elmi rəhbər:

fizika-riyaziyyat elmlər doktoru,
dosent

Ayaz Hidayət oğlu Bayramov

Rəsmi opponentlər:

AMEA-nın müxbir üzvü,
fizika-riyaziyyat elmləri doktoru,
professor

Aydın Həsən oğlu Kazımzadə

fizika-riyaziyyat elmləri doktoru,
professor

Eldar Mehralı oğlu Qocayev

fizika-riyaziyyat elmləri doktoru,
professor

Kərim Rəhim oğlu Allahverdiyev

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-riyaziyyat elmləri doktoru,
dosent

Rəfiqə Zabil qızı Mehdiyeva

Elmi seminarın sədri:

Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru,
dosent

Tələt Rzaqulu oğlu Mehdiyev



İŞİN ÜMUMİ XARAKTERİSTİKASI

Mövzunun aktuallığı və yenilik dərəcəsi. Elmin son onilliklərdə sürətli inkişafı elektron qurğuların miniatürləşdirilməsi səbəbindən fizikanın nisbətən yeni sahəsi olan mikroelektronikanın daha perspektiv sayılan bir sahə – nanoelektronika ilə əvəz olunmasına gətirib çıxarmışdır. Tədqiq olunan obyektlərin həndəsi ölçüləri nanometr oblastına yaxınlaşdıqca nanostrukturaların tədqiq edilməsində prinsip etibarilə yeni tədqiqat üsullarının istifadəsinə ehtiyac yaranmışdır. Digər tərəfdən məlumdur ki, mövcud optik mikroskopların ayırdetmə qabiliyyəti Reley difraksiya kriteriyaları ilə müəyyən olunur və 200 nm ilə məhdudlaşır.

Skanedici tunel mikroskopunun (STM), atom-qüvvə mikroskopunun (AQM) və onlar əsasında müxtəlif yeni metodların yaradılması aşağı ölçülü sistemlər və mikroobyektlər fizikasının inkişafına və müasir dövrdə fiziki tədqiqatların yeni istiqamətinin – skanedici zond mikroskopiyasının (SZM) yaranmasına səbəb oldu. Mövcud skanedici zond mikroskopu fəzaca yüksək ayırdetməyə ($\approx 1 \text{ \AA}$) malik olub, bərk cisimlərin səth morfologiyasını və səthinin lokal xassələrini öyrənməyə imkan verən ən müasir metodlardan biri hesab olunur.

Son illər skanedici zond mikroskopu bir tədqiqat aləti olmaqla yanaşı, həm də texnoloji alət kimi istifadə olunur. Bu mikroskopdan birelektronlu tranzistor və spin tranzistoru kimi yeni unikal fiziki cihazların hazırlanmasında, həmçinin çox böyük qeydetmə sıxlığına malik (10^{10} bit/cm^2 -ə qədər) yaddaş daşıyıcılarının istehsalında uğurla istifadə olunur.

Skanedici zond metodundan daha çox nazik təbəqəli örtüklərin tədqiqi zamanı istifadə olunur. Məlum olduğu kimi, hal-hazırda optoelektron cihazlarda kiçik həcmli və geniş funksional imkanlara malik olan nazik təbəqəli materiallardan geniş istifadə olunur ki, bu da öz növbəsində həmin cihazların maya dəyərinin aşağı salınmasına və miniatürləşməsinə imkan verir.

Nazik təbəqəli materiallar əsasən iki üsulla – fiziki və kimyəvi üsullarla hazırlanır. Fiziki metodlarda maddənin altlıq səthinə düşən

zərrəciklərinin enerjisi kimyəvi üsullarla müqayisədə daha böyükdür. Belə ki, əksər hallarda çökdürmə maqnetron tozlanma ("magnetron sputtering"), molekulyar şüa epitaksiyası ("molecular beam epitaxy") və ya impuls lazer çökdürmə ("pulsed laser deposition") üsulları ilə aparılır. Bu cür metodlarda zərrəciklərin böyük kinetik enerjiyə və zərrəciklərin yüksək səth diffuziya yürüklüyünə malik olması daha mükəmməl kristallik quruluşlu təbəqələrin alınmasına imkan verir.

Daxili gərginlik və dislokasiyalara malik olmayan yüksək keyfiyyətli nazik təbəqələrin alınma texnologiyasında adətən altlığın seçimi mühüm rol oynayır. Belə mikrostrukturların alınması öz-özlüyündə unikal və mürəkkəb texnoloji bir məsələdir. Belə ki, interfeys oblastında lokallaşmış uyğunsuzluq hesabına əmələ gələn dislokasiyaların gərginlik relaksasiyası nazik təbəqələrin çökdürülməsində xüsusi metod və rejimlərdən istifadə etməklə aradan qaldırıla bilər.

Müasir optoelektronikada yüksək keyfiyyətli nazik təbəqəli materiallara (günəş və termoelektrik çeviricilər, diod lazerləri, işıq diodları, fotoqəbuledicilər, termovizorlar, udular, modulyatorlar, filtrlər və s.), nazik təbəqələrin fiziki xassələrinin hərtərəfli öyrənilməsinə olan tələbat və diaqnostika üçün yeni yüksək texnoloji cihazların yaranması bu istiqamətdə intensiv tədqiqatların aparılmasını aktual edir.

Cihazda nazik təbəqənin funksional yükü müxtəlif ola bilər. Tələb olunan funksionallıqdan (tələb olunan dizayndan) asılı olaraq təbəqənin alınma texnologiyası (texnoloji dizaynı) dəyişə bilər və əsas alınma üsulundan başqa, alınmış təbəqənin səthinin əlavə aşqarlanması və hətta modifikasiyası zərurəti yarana bilər. Optimal dizayn və son alınma texnologiyası, tələb olunan funksionallığa nail olana qədər müxtəlif alınma üsulları və əlavə üsulların araşdırılması yolu ilə əldə olunur ki, bu da artıq öz növbəsində sırf fiziki metodlarla yoxlanılır.

Təqdim olunmuş tədqiqat işi, dizaynının, mikroquruluşunun, optik və bəzi hallarda isə elektrik xassələrinin əsaslı nəzərdən keçirilməsini nəzərə almaqla Si, ZnO, CdS, MoSe₂ və InAs_{1-x}Sb_x nazik təbəqələrindəki fiziki hadisələrin post-texnoloji analizinə həsr edilmişdir.

Tədqiqatın məqsədi və vəzifələri. Dissertasiya işinin məqsədi Si, ZnO, CdS, MoSe₂ və InAs_{1-x}Sb_x kimi kommersiya yönümlü yarımkeçirici materialların müxtəlif texnoloji dizayna malik nazik təbəqələrinin mikroquruluşunu, optik və bəzi hallarda isə elektrik xassələrini tədqiq etməkdir.

Qoyulan məqsədə nail olmaq üçün adıçəkilən materialların hər biri üçün texnoloji dizaynı aşağıdakı kimi olan nazik təbəqələrin quruluşu, morfologiyası, optik və bəzi hallarda elektrik xassələrinin tam post-texnoloji xarakterizə edilməsi kimi vəzifələr qarşıya qoyulmuş və həll edilmişdir:

1. Si:B/SiO₂ (çökdürülmüş bufer silisium-oksidi layı)/Si:B (altlıq) kimi silisium əsaslı standart kommersiya strukturu və lazer litografiya üsulundan istifadə etməklə Si:B nazik layının səthinin nanoovulması ilə alınmış subdalğa difraksiya qəfəslili analoji strukturlar;
2. Fulleren C₆₀/Si və fulleren C₆₀/Si (məsaməli) nazik təbəqəli strukturlar;
3. ZnO/altlıq kimi nazik təbəqəli strukturlar və müxtəlif O/Ar nisbətlili (0-6% O₂) oksigen/argon qaz qarışıqlı atmosferdə natrium-əhəng şüşəsi altlıqlar üzərində maqnetron çiləmə üsulu ilə alınmış ZnO:Al/altlıq nazik təbəqəli strukturlar;
4. Müxtəlif pH göstəricili məhlullardan aerozol piroliz üsulu ilə şüşə altlıq üzərində alınmış nanostrukturlaşdırılmış CdS nazik təbəqələri əsasında CdS/ altlıq nazik təbəqəli strukturlar;
5. Qəfəs parametrlinin hamar dəyişikliyi, uyğun qalınlığın seçilməsi, bufer və işçi layların epitaksial böyümə rejimlərinin (temperatur və zaman) optimal seçilməsi zamanı dəyişən tərkibli aralıq buferin optimal seçimi üçün molekulyar-şüa epitaksiya üsulu ilə alınmış InAs_{1-x}Sb_x kimi (burada, $x = 0.43$ və 0.38) relaksasiya olunmamış heteroepitaksial quruluşlar;
6. Şüşə altlıq üzərinə Mo-nin maqnetron çilənməsi və sonra alınmış təbəqənin doymuş selen buxarında termik emalı nəticəsində hazırlanmış MoSe₂/altlıq nazik təbəqəli strukturlar.

Tədqiqat metodları. İşdə mikroquruluş haqqında məlumatların əldə olunması üçün:

–Skandecici zond mikroskopiyası (SZM);

- Atom-qüvvə mikroskopiyası (AQM);
- Skanedici tunel mikroskopiyası (STM);
- Skanedici elektron mikroskopiyası (SEM), element tərkibinin analizi də daxil olmaqla (EDRS - Enerji-dispers Rentgen Spektroskopiyası);
- Keçici Elektron Mikroskopiyası (KEM);
- Rentgen difraktometriyası

kimi əsas mənbələrdən istifadə olunmuşdur.

Optik xassələrin tədqiqi zamanı istifadə edilmiş üsullar:

- Lüminesensiya və Raman səpilməsi istisna olmaqla, materialın bütün optik xassələrini təsvir edən dielektrik funksiyası haqqında tam məlumat verən spektroskopik ellipsometriya;
- Standart və konfokal fotolüminessensiya spektroskopiyası;
- Raman səpilməsinin konfokal mikroskopiyası.

Müdafiyyə çıxarılan əsas müddəalar. Fermi səviyyəsi yaxınlığındakı elektronların de-Broyl dalğa uzunluğu ilə müqayisə edilə bilən perioda malik nanoovulmuş səth, nazik silisium lay/silisium-oksüd bufer lay interfeysində silisiumun elektron spektrinin əsaslı şəkildə yenidən qurulması və keçiriciliyin ifrat böyük dərəcədə artmasının səbəbidir;

1. Bərk cisim əsaslı fulleren C_{60} /məsaməli silisium/silisium strukturlarında şüşə və ya silisium altlıqlar üzərinə çökdürülmüş analogi fulleren strukturları ilə müqayisədə intesivliyin iki tərtib artması və molekulyar şüalanma keçidlərinin zonalararası keçidlər üzərində dominantlığı, monomolekulyar C_{60} -ın silisiumun məsamələrinə dərin nüfuz etməsi və nüfuz olunmuş molekulların məsamə divarları ilə güclü qarşılıqlı təsiri nəticəsində optik keçidlər üçün seçmə qaydalarının relaksasiyası ilə əlaqədardır;
2. Matris daxilində ölçüləri 10 nm-dən kiçik kristal dənəciklərə malik olan CdS nazik təbəqələrində fotolüminesensiyasının spektral xüsusiyyətləri kvant ölçü effekti ilə əlaqədar olması;
3. Nanoölçülü (< 10 nm) CdS dənəciklərinin kiçik konsentrasiyası, böyük ossilyator gücünə malik, lakin həcmi CdS-in

məxsusi halları ilə müqayisədə nəzərə alınmayacaq dərəcədə kiçik hal sıxlığına malik şüalanma mərkəzləri CdS-nin dielektrik funksiyasında kvant ölçü effektinin aşkar olunmasını çətinləşdirir;

4. Effektiv mühitin Bruqqeman yaxınlaşmasında nazik təbəqədə kristallaşmanın optik dərəcəsini təsvir edən parametrlər analitik olaraq tapılır;
5. AlGaInSb və GaInSb qradiyent bufer laylarında uyğun olaraq $\text{InAs}_{0,57}\text{Sb}_{0,43}$ və $\text{InAs}_{0,62}\text{Sb}_{0,38}$ bərk məhlullarının koherent böyüməsi altlıq-bufer interfeyslərindəki uyğunsuzluq defektlərinin lokalizasiyası və nüfuzedici dislokasiyaların kiçik sıxlığı (10^7 cm^{-2} -dən kiçik) ilə şərtlənir;
6. Spektral ellipsometriya yolu ilə təcrübi olaraq tapılan və sıxlıq funksionalından istifadə edilərək analitik hesablanan MoSe_2 -nin dielektrik funksiyasının xəyali hissəsi, birelektronlu yaxınlaşmada elektron və dəşik arasındakı Kulon qarşılıqlı təsirinə nəzərə alınmaması nəticəsində enerji yarığı yaxınlığında optik keçidlər istisna olmaqla, foton enerjisinin geniş oblastında keyfiyyətcə yaxşı uyğunlaşır.

Tədqiqatın elmi yeniliyi.

1. Göstərilmişdir ki, nazik silisium lay/silisium-oksidi bufer lay interfeysində nanoovulma (periodu 250 nm-dən az olmaqla) kvant çuxurunda xarakterik şüalanma keçidləri olan səth ifrat qəfəsinin əmələ gəlməsinə səbəb olur.
2. Subdalğa difraksiya qəfəslili silisium strukturlarında sərbəst elektronların konsentrasiyasının əhəmiyyətli dərəcədə artdığı (2-3 tərtib) göstərilmişdir.
3. Müəyyən edilmişdir ki, şüşə altlıqlar üzərində alınmış C_{60} fulleren nazik təbəqələri bir tərəfdən Frenkel sinqlet eksitonunun vibron halları arasında xarakterik şüalanma keçidləri, digər tərəfdən isə fundamental udma kənarında zonalararası şüalanma keçidlərinə malik olan molekulyar kristal-zona yarımkeçiricisi kimi qarışıq bir sistemdir.
4. Göstərilmişdir ki, geniş qadağan olunmuş zonaya malik yarımkeçirici təbəqələr üçün (məsələn, ZnO) təbəqənin dielektrik funksiyasının ideal monokristaldakı qiymətindən fərqi müəyyən

etmək üçün heç olmazsa, kristallaşmanın optik dərəcəsini daxil etmək lazımdır.

5. Müəyyən edilmişdir ki, $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ bərk məhlullarının nazik təbəqələrində, qadağan olunmuş zonanın enini 100 meV-ə qədər azaltmağa imkan verən x tərkibinin dəyişməsi, InAs və InSb-yə xas olan defektliliyin artmasına və yüksək bircinslik dərəcəsinin dəyişməsinə səbəb olmur.

Tədqiqatın nəzəri və praktiki əhəmiyyəti. Dissertasiyada aparılmış tədqiqatların nəzəri əhəmiyyəti tədqiq olunan fərqli dizayna malik nazik təbəqələrdə, həm səthində kristalda elektronların De-Broyl dalğa uzunluğu ilə müqayisəli perioda malik subdalğalı difraksiya qəfəsi olan, həm də yarımkeçirici-molekulyar qarışıq sistemlər halında elektromaqnit şüalanmanın bərk cisimlərlə qarşılıqlı təsiri haqqında mövcud nəzəri təsəvvürləri çərçivəsində müşahidə olunan mürəkkəb optik hadisələrin təsviri ilə əlaqədardır.

Dissertasiyada subdalğa difraksiya qəfəsli silisium quruluşlarının tədqiqi zamanı alınmış nəticələr, difraksiya qəfəsinin periodu ilə idarə olunan dalğa uzunluqlu kvant çuxurlarında lazerlərin yaradılması baxımından ilk addımdır. Nanoovulma kimyəvi aşqarları daxil etmədən yarımkeçirici materialların elektron aşqarlanması üçün istifadə edilə bilər (G-aşqarlanma).

ZnO , ZnO:Al və CdS nazik təbəqələrin tədqiqi zamanı alınmış nəticələr, ikinci nəsil günəş elementlərinin alınması üçün TCO (“Transparent Conductive Oxide”) texnologiyaları çərçivəsində enli zolaqlı pəncərə layının yaradılması üçün faydalı ola bilər.

İşdə daxil edilmiş optik kristallıq dərəcəsi kimi universal bir parametr, bu və ya digər texnoloji proses nəticəsində alınmış optoelektron materialın ekspres təhlili və keyfiyyətinin dəqiq qiymətləndirilməsinə xidmət edə bilər.

$\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($x = 0.43$ və 0.38 olduqda) kimi relaksasiya olunmamış heteroepitaksial strukturların tədqiqi zamanı alınmış nəticələr, spektrin 3 mkm - 12 mkm atmosferin şəffaflıq pəncərəsi hesab olunan dalğa uzunluğu oblastında diod lazerləri, işıq diodları (LED), fotoqəbuledicilər və s. cihazların hazırlanması üçün istifadə edilə bilər.

MoSe_2 daxil olmaqla nazik təbəqəli strukturların mikroquruluşu

və optik parametrləri haqqında məlumatlar miniatür və ucuz fototranzistorlar və sensorların dizaynı və yaradılmasında istifadə edilə bilər.

İddiaçının şəxsi töhfəsi. İddiaçı özü nazik təbəqələrin mikrostrukturunun tədqiqi və analizini aparmış, optik eksperimentlərdə birbaşa iştirak etmiş, alınmış nəticələri xüsusi proqram təminatı əsasında işləmiş və bütün alınmış nəticələrin yarımkəçirici və molekulyar kristallarda struktur və fiziki proseslərin elektromaqnit şüalanmanın təsiri altında baş verən əlaqələrin müasir təsəvvürləri əsasında kompleks analizini aparmışdır.

Aprobasiyası və tətbiqi. Dissertasiyada təqdim olunmuş tədqiqatların nəticələri International Conference Thin Films ICTF 16, (Хорватия, Дубровник, 2014), Baku World Forum of Young Scientists (Azerbaijan, Baku, 2014), International Conference on Ternary and Multinary Compounds ICTMC 19 (Japan, Niigata, 2014), Materials Science and Engineering MSE 2014 (Germany, Darmstadt, 2014), International Conference on Spectroscopic Ellipsometry ICSE-7 (Germany, Berlin, 2016), ICTMC 20 (Germany, Halle, 2016), XIV Межд. Конференции «Физика диэлектриков» (Россия, Санкт-Петербург, 2017), 17 International Workshop on New Approaches to High-Tech: Nano-Design, Technology, Computer Simulations (Belarus, Minsk, 2017), 25 Annual International Conference on Composites/nano engineering ICCE-25 (Italy, Rome, 2017), 52-ой Школы ФГБУ «ПИЯФ» по физике конденсированного состояния (Россия, Петербург, 2018) kimi beynəlxalq elmi konfranslarda məruzə edilmişdir.

Mövcud sənaye texnologiyaları üçün hələ əlçatmaz olan, yarımkəçiricilərin səthində periodu 100 nm olan difraksiya qəfəslərini almaq üçün AQM-dən istifadə edərək hazırlanmış ovulma metodu, yarımkəçiricilərdə ovulmanın periodunu elektronların de-Broyl dalğa uzunluğuna yaxınlaşdıran vacib bir nanotexnoloji prosesdir. Bu metod otaq temperaturunda belə kommersiya materiallarında kvant effektlərinin istifadəsinə yol açır. Təqdim olunmuş metod patentləşdirilmişdir.

(Patent: "Yarımkəçirici materialın nazik layında nanoölçülü elementlərin əmələ gəlməsi üçün metod" i 2016 0086)

Dissertasiya işinin yerinə yetirildiyi təşkilatın adı. Dissertasiya işi Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Fizika İnstitutunun İnnovasiya sektorunda yerinə yetirilmişdir.

Nəşr olunmuş elmi işlər. Dissertasiya işinin məzmunu 28 elmi əsərdə, o cümlədən 15 məqalə (9-u impakt faktorlu xarici jurnalda olmaqla) və 13 tezis şəklində çap olunmuşdur.

Dissertasiya işinin həcmi, quruluşu və əsas məzmunu.

Dissertasiya işi girişdən 8 səhifə (14125), beş fəsildən (I fəsil 18 səhifə (17275), II fəsil 44 səhifə (49261), III fəsil 24 səhifə (22723), IV fəsil 36 səhifə (32804), V fəsil 28 səhifə (22323)), nəticələrdən (2 səhifə (2938)), 68 şəkil, 6 cədvəl və 115 adda istifadə olunmuş ədəbiyyat siyahısından ibarət olmaqla 176 səhifədə öz əksini tapmışdır.

İŞİN MƏZMUNU

Girişdə seçilmiş mövzunun aktuallığı əsaslandırılmış, işin məqsədi və əsas vəzifələri, elmi yeniliyi, praktiki əhəmiyyəti formalaşdırılmış, müdafiəyə çıxarılan əsas müddəalar göstərilmiş və dissertasiya işinin əsas məzmununun qısa icmal verilmişdir.

Dissertasiyanın «**Həcmi və nazik təbəqəli materialların kristallik strukturu və səth morfologiyasının tədqiqat üsulları**» adlanan **birinci fəsilində** atom-güvvə mikroskopunun və skanedici tunel mikroskopunun quruluşu və iş prinsipi ətraflı olaraq təsvir edilmişdir. Atom-güvvə və skanedici tunel mikroskoplarının iş rejimləri verilmişdir. Ölçmələrin dəqiqliyi, qurğuların həssaslığı və fəza ayırdetmə qabiliyyətinə təsir edən amillər verilmişdir.

Həcmi və nazik təbəqəli materialların kristallik quruluşunun tədqiqinin rentgen şüalarının, neytronların (neytronoqrafiya) və elektronların (elektronoqrafiya) difraksiyası kimi müxtəlif üsulları mövcuddur.

Kristalların strukturunun tədqiqi üçün əsasən yüksək dəqiqliyə malik rentgen difraksiyası üsulu istifadə olunmuşdur. Nazik təbəqəli strukturların və altlığın qəfəs parametrlərinin uyğunluğunu aydınlaşdırmaq üçün müvafiq əyrilər və əks fəza xəritələri tədqiq olunmuşdur.

Həcmi və nazik təbəqəli materialların səthinin morfologiyasının və səthin lokal xassələrinin tədqiqi üçün fəzaca yüksək ayırdetməyə

malik skanedici zond mikroskopiyaşının - atom-qüvvət mikroskopiyaşısı, tunel mikroskopiyaşısı və skanedici elektron mikroskopiyaşısı kimi müasir üsullarından istifadə edilmişdir.

Alınmış nazik təbəqəli strukturların rentgenostruktur tədqiqatları Bruker D8 Advance Bruker comp., Germany və Bruker D2 Phaser, Bruker comp., Germany rentgen difraktometrlərində aparılmışdır.

Bruker D8 Advance rentgen difraktometr vasitəsi ilə aşağıdakıları həyata keçirmək mümkün olmuşdur:

1. kristallik fazaların keyfiyyət və kəmiyyət analizi;
2. kristallitlərin ölçülərini müəyyən etmək;

Skanedici zond mikroskopiyaşısı (SZM) bərk cisimlərdə səthin morfologiyaşının və lokal xüsusiyyətlərinin öyrənilməsinə imkan verən yüksək həssaslığa malik müasir metodlardan biridir. İşdə atom qüvvə (AQM) və tunel mikroskopiya (STM) rejimlərində işləyən AIST-NT mikroskopundan (Tokyo Instruments, Yaponiya) istifadə edilmişdir.

Tədqiqat rejimindən asılı olaraq, zondların işçi hissəsi (ucu) nanometr tərtibində ölçülərə malikdir. Skanedici zond mikroskoplarında zond ilə nümunələrin səthi arasındakı xarakterik məsafə 0.1 - 10 nm təşkil edir.

«Səthində subdalğa difraksiya qəfəsi və fulleren (C₆₀) layı olan silisium strukturları» adlı ikinci fəsildə Si/SiO₂ strukturunun səthində alınmış nanoovulmuş Si layının elektrik və optik xassələrinin tədqiqinin nəticələri və həmçinin məsaməli silisium (PS) üzərinə çökdürülmüş C₆₀ fullerenin nazik təbəqələrinin optik xassələri təsvir olunmuşdur. Elektrik xassələrin tədqiqi 4-zondlu üsulla aparılmışdır.

Silisiumun valent zonasında tutulmuş kvant hallarının depressiyaşısı səbəbindən keçirici elektronların sayının artması ilə izah olunan Si/SiO₂ nanoovulmuş strukturun nəzərə çarpan metallaşması aşkar edilmişdir.

Qeyd edək ki, yuxarıda göstərilən elektronların konsentrasiyaşının artması və ya həndəsi induksiyaşlanmış aşqarlanma (G-doping) elektronların məxsusi hallarının spektrinin yenidən qurulmasının ("rearrangement") nəticəsidir. Həmçinin, səth qəfəşli yarımqeçirici təbəqənin enerji yarığından yuxarıdakı oblastdakı optik

keçidlərdə G-aşqarlanmanın təsiri aşkar olunmuşdur. Xüsusilə, Si-də zolaqlararası optik keçidlərin qadağan olunduğu 1.1-3.2 eV foton enerji aralığındakı nanoovulmuş strukturlarda qismən icazəli və təxminən ekvidistant (~ 130 meV ilə ayrılmış) maksimumlu geniş və intensiv şüalanma müşahidə olunur.

C_{60} /şüşə, C_{60} /Si, C_{60} /PS/Si və müqayisə üçün istifadə olunmuş məsaməli nazik təbəqəli PS/Si strukturları otaq temperaturunda fotoluminescent spektroskopiyası ilə tədqiq edilmişdir. Qadağan olunmuş optik keçidlərə uyğun olan olan 1.774 eV foton enerji diapazonunda geniş zolaqlı aşağı enerjili şüalanma ilə yanaşı şüşə altlıq üzərindəki C_{60} təbəqələri icazəli dipol keçidlər diapazonunda 2.115 eV və 2.342 eV-də yüksək enerjili şüalanma nümayiş etdirir. Digər tərəfdən, Si və ya PS/Si üzərindəki C_{60} nazik təbəqələri yalnız 1.774 eV şüalanma nümayiş etdirir. C_{60} /PS/Si-dakı bu şüalanmanın intensivliyi C_{60} /Si-dən 200 dəfə, məsaməli-Si/Si-da müşahidə olunan şüalanmanın intensivliyindən isə ən azı 20 dəfə çoxdur. Şüalanmanın intensivliyinin bu qədər kəskin artması, nominal olaraq qadağan olunmuş optik keçidlər üçün seçim qaydalarının zəiflədiyini göstərir və C_{60} molekulalarının məsaməli silisiumun divarları ilə güclü qarşılıqlı əlaqəsini nəzərdə tutur. C_{60} /PS/Si-də 1.774 eV şüalanma zolağında müşahidə olunan şüalanma səviyyələri arasında 60 meV (Ag-modun enerjisi) enerji fərqi olan vibron keçidlərdə C_{60} nazik təbəqələrin molekulyar siqnaturları özlərini aydın şəkildə göstərir. 2.115 və 2.342 eV şüalanma zolaqlarının mənşəyi, standart yarımkeçiricinin zona quruluşu və əldə edilmiş ellipsometrik məlumatlar əsasında təhlil olunur. Birincinin əmələ gəlməsi, keçirici zonanın dibi ilə valent zonanın tavanı arasındakı zonalararası keçidlərə cavab verir. İkincinin əmələ gəlməsi isə, C_{60} nazik təbəqəsində Brüllien zonasının X nöqtəsində valent zonanın kristaldaxili sahəsi səbəbi ilə parçalanması ilə əlaqədardır və kristal sahə ilə parçalanma dərəcəsi ~ 200 meV-dir.

«Effektiv günəş çeviricilərində tətbiq olunan ZnO və CdS nazik təbəqələri» adlı üçüncü fəsildə ZnO, ZnO:Al və CdS nazik təbəqələrinin alınma texnologiyası, onların fiziki xassələrinin hərtərəfli araşdırılması təsvir edilmişdir.

ZnO və ZnO:Al nazik təbəqələri müxtəlif nisbətli oksigen/argon qaz qarışığında (0-6% O₂) altlığın 200-400°C temperaturunda maqnetron çiləmə üsulu ilə natrium-əhəng şüşə altlıqları üzərinə çökdürülmüşdür. ZnO:Al və ZnO nazik təbəqələri üçün daha yüksək kristallaşma dərəcələri: altlığın temperaturu 400°C və O/Ar qarışığı nisbətinin müvafiq olaraq 0% və 4% qiymətlərində alınmışdır. 300°C temperaturda çökdürülmüş təbəqələrin kristallaşma dərəcəsi nisbətən zəif olmuş və 2% O₂-də maksimum qiymət almışdır.

ZnO təbəqələrin səthinin ASM tədqiqatları səthin bəzi boşluqlardan ibarət nizamsız xarakter daşdığını, O/Ar = 4% nisbətində isə təkmilləşdiyini göstərmişdir ki, bu da təbəqələrin kristallılığının rentgendifraktometrik tədqiqatlarından alınan nəticələrlə üst-üstə düşmüşdür.

Spektral ellipsometrik tədqiqatlardan məlum olmuşdur ki, O/Ar 2-4 % nisbətində çökdürülmüş ZnO:Al təbəqələrinin dielektrik funksiyasındakı (həm real (ϵ_i), həm də xəyali (ϵ_r) hissələrində) strukturlar genişlənir və kiçik enerjilər oblastına tərəf sürüşür ki, bu da bu nümunələrdə defektlərin yüksək konsentrasiyasının olduğunu göstərir. ZnO təbəqələrində dielektrik funksiyanın minimum genişlənməsi oksigenin 4% konsentrasiyasında baş verir və udma maksimumunun mövqeyi 3.29 eV-da sabilləşir.

ZnO:Al və ZnO üçün ASM və rentgen məlumatlarının təhlili və dielektrik funksiyasına aid məlumatlar onu göstərir ki, bu məlumatlar arasında ciddi uyğunluq həmişə müşahidə olunmur (nəzərə almaq lazımdır ki, dielektrik funksiyanın xəyali hissəsinin genişlənməsi dənəciklərin ölçüləri ilə tərs mütənasibdir). Ona görə dielektrik funksiyanın mükəmməl kristal üçün olan qiymətlərdən nə qədər fərqləndiyini göstərən kristallaşmanın optik dərəcəsini tətbiq etmək arzuolunandır.

Tutaq ki, ϵ_i polikristal təbəqədə ölçülmüş ϵ dielektrik funksiyanın xəyali hissəsi, ϵ_i^c monokristalda ölçülmüş ϵ^c etalon dielektrik funksiyanın xəyali hissəsi, ϵ_i^a amorf material üçün ϵ^a hipotetik dielektrik funksiyanın xəyali hissəsidir. Onda, kristallıq dərəcəsinin tərifinə görə: $\epsilon_i = f\epsilon_i^c + (1 - f)\epsilon_i^a$, burada f kristallıq dərəcəsidir.

Digər tərəfdən, BEMA¹ (Bruggeman Effective Medium Approximation) yanaşmasından alırıq:

$$f \frac{\varepsilon^c - \varepsilon}{\varepsilon^c - 2\varepsilon} + (1 - f) \frac{\varepsilon^a - \varepsilon}{\varepsilon^a - 2\varepsilon} = 0.$$

Onda kristallılıq dərəcəsini təyin etmək üçün kompleks tənlik iki bərabərlikdən (biri həqiqi, digəri xəyali hissə üçün) və məchul olan f kristallılıq dərəcəsindən ibarət olmaqla aşağıdakı kimi olar:

$$\begin{aligned} 1 + \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \omega' \frac{\varepsilon_i(\omega') - f\varepsilon_i^c(\omega')}{(\omega')^2 - \omega^2} d\omega' + i \frac{\varepsilon_i(\omega) - f\varepsilon_i^c(\omega)}{1 - f} \\ = Re \left(\frac{\varepsilon(\omega)\varepsilon^c(\omega) + 2\varepsilon(\omega)^2 - 3f\varepsilon(\omega)\varepsilon^c(\omega)}{\varepsilon^c(\omega) + 2\varepsilon(\omega) - 3f\varepsilon(\omega)} \right) \\ + Im \left(\frac{\varepsilon(\omega)\varepsilon^c(\omega) + 2\varepsilon(\omega)^2 - 3f\varepsilon(\omega)\varepsilon^c(\omega)}{\varepsilon^c(\omega) + 2\varepsilon(\omega) - 3f\varepsilon(\omega)} \right) \end{aligned}$$

Ona görə də, bu tənliyin sol və sağ xəyali hissələrini bərabərləşdirmək kifayətdir ki, f -ə nəzərən kub tənliyi alaql. Bu tənliyin analitik formada həlli məlumdur. Bunun üçün üç variant mövcuddur: a) həll bir həqiqi və iki xəyali köklərə malikdir, b) həll iki həqiqi və bir xəyali kökə malikdir və c) hər üç kök həqiqidir və bir-birindən fərqlidir. Bu halların hər birində 0-1 aralığında olan həqiqi müsbət kök seçilir.

ZnO və ZnO:Al təbəqələrinin elektrik keçiriciliyinin tədqiqi aparılmışdır. Təmiz Ar atmosferində, 400°C temperaturunda alınmış təbəqənin keçiriciliyi $3.5 \times 10^2 \text{Om}^{-1}\text{cm}^{-1}$ təşkil edir və O/Ar qarışığında oksigenin miqdarının artması ilə azalır. 400°C temperaturda çökdürülmüş ZnO:Al təbəqəsində oksigenin miqdarının artması ilə keçiriciliyin azalması oksigenin çox olan halında ZnO-da akseptor defektləri olan Zn vakansiyalarının əmələ gəlməsi ilə izah edilə bilər.

¹ Adachi, S. Optical Properties of Crystalline and Amorphous Semiconductors: Materials and Fundamental Principles / – Springer Science, –1999. – 271 p. p.120–124.

Fəslin sonunda CdS nazik təbəqələrinin alınma metodu təsvir edilmişdir. Adi piroliz metodu ilə çökdürülən CdS nazik təbəqələrinin dənəciklərinin ölçüsü reaksiya məhlulunun pH-nın artması ilə azalır. pH = 10.2 olan məhluldan çökdürülmüş təbəqənin fotoluminissensiya spektri (PL), 460 nm (2.7 eV)-də yerləşən geniş zolaqlı emissiyanı göstərir ki, bu da dənələrin <10 nm ölçülərində kvant-ölçü effekti ilə izah edilə bilər. Kvant-ölçü effekti səbəbindən dielektrik funksiyasında heç bir dəyişiklik müşahidə olunmur ki, buna da güclü ossilyator, lakin kiçik hal sıxlığına malik şüalamna mərkəzləri olan nanoölçülü CdS dənəciklərinin kiçik konsentrasiyası səbəb olur.

«InAs_{1-x}Sb_x (x = 0,43 və 0,38) relaksə olunmamış hetero epitaksial strukturlar» adlı dördüncü fəsildə relaksə olunmamış InAs_{1-x}Sb_x heteroepitaksial strukturların alınma texnologiyası və onların müxtəlif fiziki metodlarla tədqiqi haqqında məlumatlar verilmişdir.

Müxtəlif tərkibli InAs_{1-x}Sb_x bərk məhlullarının rentgen difraksiyasının tədqiqindən məlum olmuşdur ki, bərk məhlulun tərkibində Sb atomlarının miqdarının azalması ilə reflekslərin intensivliyi dəyişməklə yanaşı, reflekslərin piklərinin yeri böyük bucaqlar tərəfə sürüşür ki, bu da qəfəs sabitinin azalmasını göstərir. Sürmə atomları arsenium atomları ilə müqayisədə böyük radiusa malikdir və onların bərk məhlulda nisbi miqdarı azaldıqda qəfəs sabitinin azalmasını gözləmək təbiidir ki, bu da Vegard qaydasına uyğundur.

Yüksək ayırdetməyə malik rentgen və elektron mikroskopiya üsulları ilə əldə edilmiş eksperimental məlumatların birgə təhlili göstərir ki, alınmış InAs_{0.57}Sb_{0.43} və InAs_{0.62}Sb_{0.38} bərk məhlulları müvafiq olaraq AlGaInSb və GaInSb qradiyent bufer laylarında koherent böyüyür.

Alınan heteroepitaksial strukturlar yaxşı quruluş keyfiyyətinə malikdir ki, bunu da əks fəzada reflekslərin simmetrik və asimmetrik formasından izləmək olar.

İşıqlandırıcı elektron mikroskopiyanın nəticələri göstərir ki, InAs_{1-x}Sb_x heteroepitaksial strukturun üst qatları relaksə olunmamış və gərginləşməmiş olur, oradakı dislokasiyalar isə əsasən interfeys yaxınlığında lokallaşdırılmışdır.

Atom-qüvvə mikroskopiya üsulu ilə səth morfologiyasının tədqiqi, alınmış heteroepitaksial quruluşların yüksək səth keyfiyyətinə malik olduqlarını göstərir. RMS-in (Root Mean Squared) qiyməti ilə təyin olunan təbəqələrin nahamarlığı, AlGaInSb aralıq buferinə çökdürülmüş InAs_{0.57}Sb_{0.43} təbəqələri üçün GaInSb buferinə çökdürülmüş InAs_{0.62}Sb_{0.38}-ə nisbətən azdır: InAs_{0.57}Sb_{0.43} üçün - 4.3 nm, InAs_{0.62}Sb_{0.38} üçün - 5.8 nm.

Enerji-dispers rentgen spektroskopiya (EDX və ya EDS) üsulu ilə InAs_{1-x}Sb_x heteroepitaksial quruluşunun yüksək fəza ayırdetmə ilə element analizi aparılmışdır. EMF analizinin ayırdetməsi nümunənin qalınlığından, sürətləndirən gərginlikdən və elektron zondunun diametrindən (0,2 nm) asılıdır. Epitaksial heterostrukturun element tərkibinin analizindən görünür ki, səthdə əsasən In, As və Sb elementləri mövcuddur – ortada, yəni aralıq bufer oblastında Ga və Al elementlərinin və altlığa yaxınlaşdıqda isə Ga və Sb elementlərinin konsentrasiyası üstünlük təşkil edir.

InAs_{1-x}Sb_x heteroepitaksial quruluşlarda kombinə olunmuş (Raman) işığın səpilməsi tədqiqatlarının nəticələri ətraflı şəkildə təqdim edilmişdir. Məlumdur ki, InAs monokristallarında uzununa LO-fononun tezliyi 242 cm⁻¹-ə bərabərdir, TO isə - 220 cm⁻¹, InSb-da uzununa LO-fononun tezliyi 193 cm⁻¹-ə, TO isə - 185 cm⁻¹-ə bərabərdir. Bu, 187 cm⁻¹ (InAs_{0.57}Sb_{0.43}) və 186 cm⁻¹ (InAs_{0.62}Sb_{0.38}) tezliklərdə müəyyən bir səpilmə həndəsəsi üçün seçim qaydaları ilə icazə verilən, InSb-dakı uzununa optik fonona uyğun olan fonon zolağıdır və 222 cm⁻¹ (InAs_{0.62}Sb_{0.38}) və 223 cm⁻¹ (InAs_{0.62}Sb_{0.38}) tezliklərdə, InAs uzununa və eninə optik fononların toplanmasından əmələ gələn asimmetrik geniş fonon zolaqdır. Göründüyü kimi, InAs_{1-x}Sb_x-da (InAs_{0.62}Sb_{0.38}) Sb atomlarının sayı azaldıqca 222 cm⁻¹ tezliyi daha yüksək tezliklərə doğru – InAs üçün xarakterik olan KR aktiv fononların tezliklərinə doğru sürüşür. Konfokal Raman Spektroskopiyanın (KRS) nəticələri InAs_{1-x}Sb_x bərk məhlullarında fonon spektrlərinin ikimodlu tip yenidənqurmasını göstərir.

Alınan heteroepitaksial strukturların yüksək bircinsliyi, xəritələşdirmə rejimində strukturun səthində (sahəsi 50×50 μm) lazer şüa-

sının qeyd edilməsi ilə mikro-KRS spektrlərinin tədqiqatları ilə təsdiqlənir. Bu fəsilə pikin yerinin, 187 cm^{-1} və 222 cm^{-1} spektral xətlərin yarım eninin xəritələnməsinin nəticələri təqdim olunmuşdur.

$\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ heteroepitaksial quruluşların spektral ellipsometrik tədqiqatları aparılmışdır. Müxtəlif foton enerjiləri üçün $\text{InAs}_{0,57}\text{Sb}_{0,43}$ və $\text{InAs}_{0,62}\text{Sb}_{0,38}$ dielektrik funksiyalarının həqiqi ε_i və xəyali ε_r hissələri müəyyən edilmişdir. Oxşar strukturu və yaxın tərkibi olan birləşmələrə xas olan asılılıqların oxşar xarakteri qeyd olunur. InAs və InSb -in $\varepsilon_r(E)$ və $\varepsilon_i(E)$ asılılıqlarında yaxşı uyğunluq müşahidə olunur. $\text{InAs}_{0,57}\text{Sb}_{0,43}$ təbəqəsi üçün sındırma $n(E)$ və ekstinsiya $k(E)$ əmsallarının dispersiya asılılıqları hesablanmış və qurulmuşdur.

«MoSe₂ nazik təbəqələrinin strukturu və optik xassələri» adlı beşinci fəsilə MoSe₂ nazik təbəqələrinin alınma texnologiyası, rentgen difraksiyası və işığın Raman səpilməsi üsulu ilə səciyyələndirilməsi, optik xassələrin spektral ellipsometriya üsulu ilə tədqiqi və elektron zona quruluşunun nəzəri hesablamaları barədə məlumatlar verilir.

100 nm-dən kiçik qalınlıqlı MoSe₂ təbəqələri doymuş selen buxarında molibden təbəqələrin qızdırılması üsulu ilə alınmışdır. Kristallik quruluş və qəfəs dinamikası, müvafiq olaraq rentgen difraksiya və işığın Raman səpilməsi üsulu ilə tədqiq olunmuşdur. MoSe₂ üçün xarakterik olan E_{1g} (167.5 cm^{-1}), A_{1g} (241 cm^{-1}) и E_{2g}^{-1} (286 cm^{-1}) KR-aktiv optik fonların spektral xətləri aşkar edilmişdir. $1\times 1\text{ mkm}$ sahədə ASM üsulu ilə MoSe₂ nazik təbəqələrinin morfologiyası tədqiq edilmiş və kristallitlərin orta ölçüsü ($\sim 10\text{-}50\text{ nm}$) müəyyən edilmişdir.

Ultrabənövşəyi/görünən/infrakırmızı spektr diapazonunda MoSe₂ nazik təbəqələri və MoSe₂ polikristallik hədəf nümunələr spektroskopik ellipsometriya üsulu ilə tədqiq edilmişdir. Təcrübə nəticələri B-spline proseduru ilə təsvir olunan (bu prosedur Complete Ease proqram paketinin bazasında mövcuddur) optik dispersiyalı model çərçivəsində işlənmişdir. Həm nazik təbəqə, həm də hədəf üçün dielektrik funksiyalar alınmışdır. Məlum olmuşdur ki, ən yaxşı uyğunlaşma MoSe₂-nin dielektrik funksiyasının təmiz selenin dielektrik funksiyası ilə qarışığında alınır.

Bruggemanın effektiv mühit yaxınlaşmasında (“Bruggemann effective medium approximation”) selenin tələb olunan zəruri miqdarı 16 faiz təşkil edir.

Ölçmələr vakumda qızdırılma ilə hazırlanmış nümunələrdə aparıldığından təmiz selenin mövcudluğu aydın olaraq hiss olunur. Hər üç düşmə bucaqlarının uyğunlaşdırılması zamanı ortalama kvadrat səhvi (MSE) 11.4-dən aşağı olmuşdur. Seçilmiş optik modeldən MoSe_2 təbəqələrinin kompleks dielektrik funksiyasının (real və xəyali hissələr, ε_i və ε_r) dispersiyası təyin edilmişdir, n sındırma və k ekstinsiya əmsallarının dispersiyası hesablanmışdır.

Sıxlığın funksional (DFT) və tam potensiallı xətlənmiş müstəvi dalğaları (DFT) nəzəriyyələri əsasında WEIN2k proqram paketindən istifadə edilərək MoSe_2 -nin zona quruluşu hesablanmışdır. Mübadilə-korrelyasiya effektləri lokal sıxlığı yaxınlaşmasında (LDA-local density approximation) təsvir edilmişdir. Görünən oblastda dielektrik funksiyanın xəyali hissəsi kombinə hal sıxlığından istifadə edilərək hesablanmışdır. Brillüen zonasına görə integrallama Monhorst-Pak üsulu ilə aparılmışdır. Dielektrik funksiyanın həqiqi hissəsi Kramers-Croning münasibətindən istifadə etməklə hesablanmışdır. Alınan dielektrik funksiyası 1 eV-dən yuxarı enerji diapazonundakı MoSe_2 hədəfinin ellipsometrik nəticələrin analizindən alınan dielektrik funksiyası ilə yaxşı uyğunlaşır. 1 eV-da müşahidə olunan dielektrik funksiyanın xəyali hissəsinin xüsusiyyətinin çəp eksiton keçidləri ilə əlaqəli olduğu güman edilir.

NƏTİCƏLƏR

1. Skanedici zond mikroskopiyası metodundan istifadə etməklə materialdan asılı olaraq, müxtəlif texnoloji dizayna malik olan Si , ZnO , CdS , MoSe_2 və $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ kimi kommersiya yarımkeçirici materiallarının nazik təbəqələrinin mikroquruluşu müəyyən edilmişdir.
2. Elektrik keçiriciliyinin ölçülməsi üsulu ilə nanoovulmuş səthə malik silisium quruluşlarındakı sərbəst elektronların konsentrasiyasının nazik silisium layının müstəvi səthi ilə müqayisədə xeyli artması (2-3 tərtib) müəyyən edilmişdir.

3. Nanoovulma, zonalararası hal sıxlığında optik keçidlər və enerji vəziyyəti həyəcanlanmanın dalğa uzunluğundan asılı olan və standart silisiumdakı qadağan olunmuş keçid oblastına uyğun olan ekvidistant pikli geniş zolaqlı fotoluminesensiya üçün yeni kritik nöqtənin yaranmasına səbəb olur.
4. Şüşə altlıq üzərinə çökdürülmüş nazik C_{60} fulleren təbəqəsinin dielektrik funksiyasını formalaşdıran 2 eV-dən yuxarı optik keçidlər, qadağan olunmuş zonasının enerjisi 2.115 eV və otaq temperaturunda kristal sahəsinin parçalanma enerjisi ~ 200 meV olan standart düz keçidli yarımkeçirici modeli ilə yaxşı təsvir olunur.
5. $C_{60}/PS/Si$ strukturlarında şüalanma intensivliyinin $C_{60}/$ şüşə və C_{60}/Si strukturları ilə müqayisədə kəskin artması, məsələli silisiumda adi silisium üçün qadağan olunmuş keçidlərdə seçmə qaydalarının relaksasiyasının nəticəsidir.
6. Alınmış mikrostruktur məlumatlara görə $ZnO:Al$ və ZnO -nun maqnetron çiləmə ilə alınan nazik təbəqələrində kristallaşma dərəcələrinin daha yüksək qiyməti altlığın temperaturunun $400^{\circ}C$ və qarışıqın nisbətindən uyğun olaraq (O/Ar) 0% və 4% qiymətlərində əldə edilir.
7. Alınmış mikrostruktur məlumatlarına görə, adi piroliz üsulu ilə çökdürülmüş CdS nazik təbəqələrinin dənəciklərinin ölçüsü reaksiya məhlulunda pH-ın artması ilə azalır. $pH=10.2$ olan məhluldan çökdürülmüş təbəqələrin fotoluminesensiya spektri 460 nm-də (2.7 eV) geniş emissiya zolağına malikdir və dənəciklərin ölçüsünün <10 nm qiymətində kvant ölçü effektləri ilə izah edilir.
8. Yüksək ayırdetmə qabiliyyətli rentgen difraksiyası, atom-qüvvət və işıqlandırıcı elektron mikroskopiyası üsullarından istifadə edilərək müəyyən edilmişdir ki, $InAs_{0.57}Sb_{0.43}$ və $InAs_{0.62}Sb_{0.38}$ bərk məhlulları $AlGaInSb$ və $GaInSb$ qradient bufer laylarında koherent yetişir, uyğunsuzluq defektləri altlıq/bufer interfeysində lokallaşır və nüfuzədiçi dislokasiyaların sıxlığı 10^7 cm^{-2} -dən az olur.
9. $InAs_{1-x}Sb_x$ bərk məhlulun epilaylarının konfokal Raman mikroskopiyası fonon modlarının ikimodlu xüsusiyyətlərini və

$x = 0.43$ və 0.38 tərkibli nümunələrin yüksək tərtibli bircinsliyini təsdiqləyir.

10. MoSe₂ nazik təbəqələrin dielektrik funksiyasının xəyali hissəsinin 1 eV yaxınlığında müşahidə olunan xüsusiyyəti çəp eksiton keçidləri ilə izah olunur. Bu xüsusiyyətdən uzaq sahədə, dielektrik funksiyasına aid təcrübi məlumatlar birelektronlu yaxınlaşmada sıxlıq funksionalından istifadə edilərək aparılmış analitik hesablamaların nəticələri ilə yaxşı uyğunlaşır.

DİSSERTASIYA MÖVZUSU ÜZRƏ DƏRC EDİLMİŞ İŞLƏRİN SİYAHISI

1. Bayramov, A. Characterization of ZnO thin films prepared by magnetron sputtering method / A. Bayramov, Y. Aliyeva, E. Bagiyev, N. Gasimov, N. Satoh, M. Nakajima, R. Hajimammadov // AJP Fizika, – 2013, – 19 (2), – p. 84-85.
2. Mamiyev, Z.Q. Structural and optical characterization of nanostructured CdS thin films deposited by spray pyrolysis method / Z.Q. Mamiyev, N.O. Balayeva, N.M. Fathi, A.M. Kerimova, Y.N. Aliyeva, N.A. Qasimov, A.H. Bayramov // AJP Fizika, – 2014, – 20 (4), – p. 26-28.
3. Aliyeva, Y., Khalilova, Kh., Kerimova, A., Huseynov, E., Mehdiyev, T.R., Alekperov, O., Mamedov N. SmS thin films with nanosize surface architecture // ICTF-16, Conference program and abstract, – Dubrovnik, Croatia, – 2014, – p.158.
4. Aliyeva, Y.N., Kerimova, A.M., Alekperov, O.Z., Hasanov, I.S., Huseynov, E.K., Mehdiyev, T.R., Mamedov N.T. Preparation of Nanostructures on the surface of SmS Thin Films by using AFM Technique // World Forum of Young Scientists «Collection of abstracts», – Baku, – 2014, – p. 204.
5. Aliyeva, Y., Bagiyev, E., Valiyev, R., Kerimova, A., Mamiyev, Z., Bayramov A. Optimization of preparation technology of ZnO and ZnO:Al thin films for solar cell applications // ICTMC-19, Conference program and abstract, – Niigata, Japan, – September 1-5, – 2014, – p. 94.

6. Aliyeva, Y., Mekhdiev, T., Huseynov, E., Alekperov, O., Maharramov, H., Mammadov, N. Nanostructured elements obtained on the surface of SmS thin films by Atomic Force Microscopy // MSE2014, Conference program and abstract, – Darmstadt, Germany, – 2014, – p. 166.
7. Aliyeva, Y., Kerimova, A., Alekperov, O., Hasanov, I., Huseynov, E., Mehdiyev, T., Mamedov N. Preparation and properties of nanodimensional diffraction lattice on the base of SmS // ICTMC-19, Conference program and abstract, – Niigata, Japan, – September 1-5, – 2014, – p. 83.
8. Bagiyev, E., Aliyeva, Y., Valiyev, R., Kerimova, A., Mamiyev, Z., Gasimov, N., Balayeva, N., Bayramov, A. Optimization of preparation technology of ZnO and ZnO:Al thin films for solar cell applications // 1st International Scientific Conference of young scientists and specialists, «Book of abstracts», – Baku, – October 15-16, – 2014, – p. 451.
9. Bagiyev, E. Optimization of preparation technology of ZnO and ZnO: Al thin films for solar cell applications / E. Bagiyev, Y. Aliyeva, N. Balayeva, A. Kerimova, R. Valiyev, Z. Mamiyev, N. Gasimov, A. Bayramov // Physica Status Solidi C, – 2015. – 12 (6), – p. 536-539.
10. Aliyeva, Y.N., Abdullayev, N.A., Guseynov, R.R., Tanriverdiyev, V., Kipshidze, G., Aliquliyeva, X.V., Mamedov, N.T. Epitaxial unrelaxed layers of $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ grown on compositionally graded buffers // ICTMC-20, – Halle, Germany, – 2016, – REF 86.
11. Aliyeva, Y.N. Confocal Raman mapping of the topmost layer heteroepitaxial $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ structures / Y.N. Aliyeva, N.A. Abdullayev, G. Kipshidze, V. Tanriverdiyev, I.A. Mamedova, N.T. Mamedov, A.A. Sadikhova // AJP Fizika, – 2016. – 22 (4), – p. 3-6.
12. Гусейнов, Р.Р., Танрывердиев, В., Kipshidze, G., Алиева, Е.Н., Абдуллаев, Н.А., Мамедов Н.Т. Нералаксированные слои $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ на градиентных буферных слоях // Труды XIV-ой

- межд. Конференции «Физика диэлектриков», – Санкт-Петербург, Россия, – 29 мая - 2 июня, – 2017, – с. 143.
13. Sadikhova, A.A., Kipshidze, G., Aliyeva, Y.N., Abdullayev, N.A., Ahmedova Sh. Unrelaxed $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ alloys grown on compositionally graded buffers with molecular beam epitaxy // Proceedings of 17th International Workshop on New Approaches to High-Tech: Nano-Design, Technology, Computer Simulations, – Minsk, Belarus, – October 26-27, – 2017, – p. 29-32.
 14. Aliyeva, Y.N. Исследования гетероэпитаксиальных структур $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ методами высокоразрешающей рентгеновской и электронной микроскопии / Y.N. Aliyeva, H.A. Абдуллаев, X.B. Алигулиева, P.P. Гусейнов, G. Kipshidze, B. Танрывердиев, H.T. Мамедов // ANAS Transactions, – 2017. – 37 (2), – с.101-109.
 15. Гусейнов, P.P. Гетероэпитаксиальные структуры $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ на градиентных буферных слоях GaInSb и AlGaInSb / P.P. Гусейнов, B. Танрывердиев, G. Kipshidze, E.H. Алиева, H.A. Абдуллаев, X.B. Алигулиева, H.T. Мамедов // Физика и техника полупроводников, – Санкт-Петербург, – 2017, – 51 (4), – с. 551-557.
 16. Kerimova, E. Nanostructured CdS thin films deposited by spray pyrolysis method / E. Kerimova, E. Bagiyev, Y. Aliyeva, A. Bayramov // Physica Status Solidi C, – 2017, – 14 (6), – p. 1600144.
 17. Tavkhelidze, A. Optical and electronic properties of periodic Si nanostructures / A. Tavkhelidze, A. Bayramov, Y. Aliyeva, L. Jangidze, G. Skhiladze, S. Asadullayeva, O. Alekperov, and N. Mamedov // Physica Status Solidi C, – 2017. –14 (7), – p. 1700093/1-5.
 18. Mamedov, N. Spectroscopic planar diffraction ellipsometry of Si-based multilayer structure with subwavelength grating / N. Mamedov, A. Tavkhelidze, A. Bayramov, Kh. Akhmedova,

- Y. Aliyeva, G. Eyyubov, L. Jangidze, G. Skhiladze // *Physica Status Solidi C*, – 2017. – 14, – p. 1700092/1-4.
19. Mamedov, N., Tavkhelidze, A., Bayramov, A., Akhmedova, Kh., Aliyeva, Y., Eyyubov, G., Jangidze, L., Skhiladze, G. Optical properties of Si-based multilayer structure with subwavelength grating // *The Twenty-fifth Annual International Conference on Composites/nano engineering (ICCE-25)* ICCE-25, – Rome, Italy, – July 16-22, – 2017.
 20. Bayramov, A. Ellipsometric characterization of MoSe₂ thin layers obtained by thermal treatment of molybdenum in selenium vapor / A. Bayramov, Y. Aliyeva, G. Eyyubov, E. Mammadov, Z. Jahangirli, D. Lincot, N. Mamedov // *Applied Surface Science*, – 2017. – 421, – p. 310-314.
 21. Алигулиева, Х.В., Абдуллаев, Н.А., Алиева, Е.Н., Садыхова, А. Электрические и гальваномагнитные эффекты в гетероэпитаксиальных структурах InAs_{0,57}Sb_{0,43} // Сб. тезисов 52-ой Школы ФГБУ «ПИАФ» по физике конденсированного состояния, – Петербург, Россия, – 2018, – с. 220-221.
 22. Гусейнов, Р.Р. Электрические и оптические свойства нерелаксированных гетероэпитаксиальных структур InAs_{1-x}Sb_x / Р.Р. Гусейнов, В.А. Танрывердиев, G.L. Belenky, G. Kipshidze Е.Н. Алиева, Х.В. Алигулиева, Э.Г. Ализаде, Х.Н. Ахмедова, Н.А. Абдуллаев, Н.Т. Мамедов, В.Н. Зверев // *Физика и техника полупроводников*, – 2019, – 53 (7), – с. 906-910.
 23. Alizade, E.H., Mammadov, N.T. Mammadov, S.N. Tavkhelidze, A., Bayramov, A.H., Aliyeva, Y.N., Ahmedova, Kh.N., Jangidze, L., Skhiladze, G. Optical Properties of Nano-Grated Si-Based Multilayer Structure // *ICSE-8*, – Barcelona, – May 26-31, – 2019, – p. 159.
 24. Bayramov, A., Dzhaferov, T., Aliyeva, Y., Ahmadova, Kh., Alizade, E., Asadullayeva, S., Mammadov, S., Mammadov, N., Sadigov, M., Ragimov, Sh. Optical Properties of Fullerene

Embedded Porous Silicon // ICSE-8, – Barcelona, – May 26-31, – 2019, – p. 281.

25. Bayramov, A.I. Photoluminescence and optical transitions in C₆₀ fullerene thin films deposited on glass, silicon and porous silicon / A.I. Bayramov, N.T. Mamedov, T.D. Dzhafarov, Y.N. Aliyeva, Kh.N. Ahmadova, E.H. Alizade, S.Q. Asadullayeva, M.S. Sadigov, Sh.Kh. Ragimov // Thin Solid Films, – 2019. – 690, – p.137566/1-5.
26. Bayramov, A. Optical properties of surface grated Si-based multilayer structure / A. Bayramov, E. Alizade, S. Mammadov, A. Tavkhelidze, N. Mamedov, Y. Aliyeva, Kh. Ahmedova, S. Asadullayeva, L. Jangidze, and G. Skhiladze // Journal of Vacuum Science and Technology B, – 2019. – 37, – p. 061807 /1-4.
27. Aliyeva, Y. Scanning probe microscopy studies of fullerene C60/porous silicon multilayer structures // Fizika, – 2019. – 3, – p. 44-46.
28. Aliyeva, Y. SmS thin films with nanosize surface architecture // Fizika, – 2019. – 3, – p. 46-51.

Patent: Mehdiyev T.R. Yarımkeçirici material üzərində nanoölçülü elementlərin yaradılması üsulu. ixtira i20160086, Azərbaycan Respublikası / Əliyeva Y.H., Hüseynov E.K., Ələkbərov O.Z., Məmmədov N.T., Kərimova A.M.

Dissertasiyanın müdafiəsi "23" iyun 2021-ci il tarixində saat 11⁰⁰ Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Fizika İnstitutunun nəzdində fəaliyyət göstərən ED 1.14 Dissertasiya şurasının iclasında keçiriləcək.

Ünvan: AZ1143, Azərbaycan, Bakı şəhəri, H.Cavid prospekti 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 "21" may 2021-ci il tarixində zəruri ünvanlara göndərilmişdir.

Çapa imzalanıb: 16.04.2021

Kağız formatı: A5

Həcm: 30783

Tiraj: 30