

AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASI

Əlyazması hüququnda

ELEKTROKİMYƏVİ ÇÖKDÜRÜLMÜŞ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}$ NAZİK TƏBƏQƏLƏRİ VƏ ONLAR ƏSASINDAKI STRUKTURLARIN ELEKTRİK, FOTOELEKTRİK VƏ OPTİK XASSƏLƏRİ

İxtisas: 2211.01 – Bərk cisimlər fizikası

Elm sahəsi: Fizika

İddiaçı: **Vüsalə Cəlali qızı Məmmədova**

Fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi almaq
üçün təqdim edilmiş dissertasiyanın

AVTOREFERATI

Bakı – 2022

Dissertasiya işi Bakı Dövlət Universitetinin Fiziki elektronika və Optika və molekulyar fizika kafedralarında yerinə yetirilmişdir.

Elmi rəhbərlər:

- fizika elmləri doktoru, dosent
Hüseyn Mikayıl oğlu Məmmədov,
- fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor
Rəna Cümşüd qızı Qasımova.

Rəsmi opponətlər:

- fizika elmləri doktoru, professor
Rəna Fikrət qızı Babayeva,
- fizika elmləri doktoru, dosent
İzzət Məmməd qızı Əfəndiyeva,
- fizika-riyaziyyat elmləri namizədi, dosent
Arzu Oruc oğlu Daşdəmirov.

Azərbaycan Respublikasının Prezidenti yanında Ali Attestasiya Komissiyasının Bakı Dövlət Universitetinin nəzdində fəaliyyət göstərən ED 2.19 Dissertasiya Şurası

Dissertasiya Şurasının sədri:



fizika elmləri doktoru, dosent
Hüseyn Mikayıl oğlu Məmmədov,

Dissertasiya Şurasının elmi katibi:



fizika-riyaziyyat elmləri namizədi, dosent
Bəxtiyar Gülmalı oğlu Paşayev,

Elmi seminarın sədri:

İmza və təsdiq edilmiş
BAKİ DÖVLƏT UNIVERSİTETİNİN
ELMI KATIBI
prof. V.M. SALMANOV
«01» 02 2022 il

fizika elmləri doktoru, dosent
Sədiyar Soltan oğlu Rəhimov.



İŞİN ÜMUMİ XARAKTERİSTİKASI

Mövzunun aktuallığı və işlənmə dərəcəsi. Şəffaf keçirici oksidlər qrupuna daxil olan ZnO, otaq temperaturunda $E_g=3.36$ eV qadağan olunmuş zonaya malik düz zonalı n-tip yarımkəçirici kimi kimyəvi cəhətdən dayanıqlı olması ilə bərabər, maya dəyəri ucuz və nisbətən asan alınma texnologiyasına malik olub, unikal elektrofiziki və optik xassələr nümayiş etdirir. Ona görə də ZnO əsəsindəki materiallardan hal-hazırda fotosensorlar, qaz sensorları, biosensorlar, optoelektron çeviricilər, luminescent materiallar, şəffaf elektrodlar, ultrabənövşəyi (UB) və rentgen şüalarının qeydediciləri üçün istifadə olunur. ZnO eksiton rabitə enerjisinin $54\div 63$ eV malik olması onlardan otaq temperaturunda lazer şüa mənbəyi kimi də istifadə etməyə imkan verir.

Sadalanan üstünlükləri ilə yanaşı, ZnO nazik təbəqələrinin çatışmazlıqları da az deyil. Belə ki, alınma texnologiyalarının təkmilləşdirilməsinə, metallarla aşqarlanmalarına və müxtəlif mühitlərdə termik işlənməyə (Tİ) məruz qoyulmalarına baxmayaraq, ZnO nazik təbəqələrinin optimal keçiriciliyə malik nümunələrinin alınması hələ də problem olaraq qalmaqdadır.

Sink oksiddən fərqli olaraq, CdO nazik təbəqələri otaq temperaturunda $E_g=2.3$ eV qadağan olunmuş zonaya malikdir və şüalanma spektrinin görünən oblastında şəffafdır. Onların elektrik və optik xassələri geniş temperatur intervalında tədqiq edilmiş, günəş elementlərində, fotoelektrokimyəvi cihazlarda, fototranzistorlarda, fotodiodlarda və qaz sensorlarında istifadəsinin mümkünlüyü araşdırılmışdır.

Lakin CdO nazik təbəqələrinin görünən oblastda optik buraxması ($60\div 70\%$) ZnO nazik təbəqələri ilə (90%) müqayisədə daha kiçikdir. Çatışmayan cəhətlərinin aradan qaldırılması və üstün cəhətlərinin daha da yaxşılaşdırılması üçün elmi ədəbiyyatda son dövrlər ZnO-CdO sistemi bərk məhlullarının nazik təbəqələri ($Cd_{1-x}Zn_xO$) geniş tətbiq olunur. Belə ki, $Cd_{1-x}Zn_xO$ nazik təbəqələrinin tərkibini, texnoloji rejimi, Tİ-nin mühit və rejimini seçməklə, onların və onlar əsəsindəki heteroqəçidlərin elektrik, optik və fotoelektrik xassələrini məqsədyönlü olaraq idarə etmək mümkündür. Digər tərəfdən, $Cd_{1-x}Zn_xO$ bərk məhlullarının nazik təbəqələrinin alınmasında daha çox istifadə edilən sol-gel, piroliz və molekulyar şüa epitaksiyası və s. kimi üsullardan

fərqli olaraq, dissertasiya işində elektrokimyəvi çökdürülmə üsulundan istifadə edilməsi bu üsulun daha asan idarə edilə bilən olması, böyük sahəyə malik nazik təbəqələrin alınmasına imkan verməsi və hazırlanan cihazların maya dəyərinin daha ucuz olması baxımından mövzunun aktuallığını daha da artırır.

Tədqiqatın obyektı və predmeti. Tədqiqat obyektı olaraq elektrokimyəvi üsulla katod potensialının müxtəlif qiymətlərində çökdürülmüş $Cd_{1-x}Zn_xO$ nazik təbəqələri və onların əsasında hazırlanmış p-Si/ $Cd_{1-x}Zn_xO$ tipli heteroqecidlər götürülmüşdür. Nazik təbəqələrin quruluşu, morfoloji xüsusiyyətləri, elektrik, fotoelektrik və optik xassələri öyrənilmiş, nəzəri və eksperimental nəticələrin müqayisəli təhlili əsasında p-Si/ $Cd_{1-x}Zn_xO$ tipli heteroqecidlərin optimal elektrik, fotoelektrik və optik parametrləri üçün nazik təbəqələrin tərkibi, elektrokimyəvi çökdürülmə və Tİ-nin rejimləri seçilmişdir.

Tədqiqatın məqsəd və vəzifələri. Dissertasiya işinin əsas məqsədi sulu məhluldan katod elektrokimyəvi çökdürmə üsulu ilə müxtəlif tərkibli $Cd_{1-x}Zn_xO$ nazik təbəqələrini almaq, onların struktur, morfoloji, elektrik və optik xassələrini texnoloji rejimdən, təbəqələrin tərkibindən və Tİ-nin mühit və rejimindən asılı olaraq tədqiq etməklə, nazik təbəqələr və onların əsasındakı heteroqecidlərdə baş verən elektron proseslərinin mexanizmini aydınlaşdırmaq və praktiki tətbiq imkanlarını aşkar etməkdən ibarətdir.

Məqsədə nail olmaq üçün aşağıdakı **məsələlərin** həlli qarşıya qoyulmuşdur:

1. Reaksiyaya daxil edilmiş kimyəvi duzların sulu məhlullarının voltamoqramma tədqiqatları əsasında müxtəlif tərkibli $Cd_{1-x}Zn_xO$ ($0 \leq x \leq 1$) bərk məhlullarının nazik təbəqələrinin çökdürülməsi üçün optimal texnoloji rejimi seçmək;

2. Sulu məhluldan elektrokimyəvi çökdürmə üsulu ilə müxtəlif tərkibli $Cd_{1-x}Zn_xO$ bərk məhlullarının mikro- və nanoteksturalı, habelə hamar səth morfolojiyalı nazik təbəqələrinin alınması üçün məhlulun optimal turşuluğunu, kimyəvi tərkibini, temperaturunu və çökdürmə potensialını seçmək;

3. Çökdürmə potensialının və cərəyanın, sulu məhlulun turşuluğunun, Tİ-nin mühit (açıq hava, oksigen və arqon) və rejiminin nazik təbəqələrin kristal quruluşuna, səth morfolojiyasına, elektrik, fotoelektrik və optik xassələrinə təsirini öyrənmək;

4. $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}$ bərk məhlulların nazik təbəqələrində texnoloji və oksigenlə bağlı defektlərin təbiətini, assosiasiya və dissosiasiya mexanizmini müəyyən etmək, defektlərin əsas parametrlərini təyin etmək;

5. $\text{p-Si/Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}$ tipli heteroqəçidlərini sulu məhluldan elektrokimyəvi çökdürülmə üsulu ilə hazırlamaq;

6. Alınmış heteroqəçidlərdə baş verən elektron proseslərə çökdürülmə potensialının, nazik təbəqələrin tərkibinin və müxtəlif mühitlərdə Tİ-nin təsirini elektrik, fotoelektrik, tutum spektroskopiyası və mikroskopik üsullarla müəyyən etmək;

7. $\text{p-Si/Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}$ heteroqəçidlərinin qəçid oblastından cərəyanın daşınma mexanizmini $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}$ təbəqələrinin tərkibindən, çökdürülmə və termik işlənmə rejimlərindən asılı olaraq tədqiq etmək və onların elektrik parametrlərinin optimal və stabil qiymətlərini müəyyən etmək;

8. $\text{p-Si/Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}$ heteroqəçidləri əsasında yaradılmış nazik təbəqəli fotoçeviricilərin spektrin ultrabənövşəyi və görünən oblastlarında maksimal və stabil fotoelektrik parametrlərini təmin edən optimal tərkib və texnoloji rejimi müəyyənləşdirmək.

Tədqiqat metodları. Elektrokimyəvi çökdürülmə üsulu ilə alınmış müxtəlif tərkibli $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}$ nazik təbəqələri və onların əsasında $\text{p-Si/Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}$ tipli heteroqəçidlərin quruluşunun və elektron xassələrinin kompleks tədqiqi zamanı voltametrik, elektrik, fotoelektrik, optik və tutum ölçmələri, rentgen quruluş, spektroskopik və mikroskopik üsullardan istifadə edilmişdir.

Müdafiəyə çıxarılan əsas müddəalar:

1. $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}$ nazik təbəqələrinin vürsit və ya kubik (sfalerit) qəfəs quruluşu, habelə səth morfologiyası sulu məhlulun qatılığı, temperaturu və turşuluğu ilə müəyyən olunur;

2. Bilavasitə çökdürülmədən sonra $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}$ nazik təbəqələrinin elektrik, fotoelektrik və optik parametrlərinin qeyri-stabilliyi təbəqələrin tərkibi və termik Tİ-nin optimal rejimindən asılıdır;

3. $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}$ nazik təbəqələrinin açıq havada və oksigendə yüksək temperaturlu Tİ-dən sonra optik buraxma spektrində udma sərhədinin daha qısa dalğa uzunluqları tərəfə sürüşməsi və kəskinləşməsi, oksigenin səthdəki müstəqil Cd və Zn atomları ilə birləşməsi nəticəsində defektlərin konsentrasiyasının azalması ilə əlaqədardır;

4. $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}$ nazik təbəqələrinin zona quruluşu nazik təbəqələrin

tərkibindən asılıdır – $x \leq 0.7$ tərkibli təbəqələr düz zonalı, $x > 0.7$ tərkibli təbəqələr isə çəp zonalıdır;

5. p-Si/Cd_{1-x}Zn_xO heteroqəçidlərinin elektrik və fotoelektrik xassələri, habelə keçid oblastında cərəyanın daşınması mexanizmi texnoloji rejim, təbəqələrin tərkibi və Tİ rejimindən asılıdır;

6. Cd_{1-x}Zn_xO nazik təbəqələri optik filtrlər və fotorezistorların, p-Si/Cd_{1-x}Zn_xO heteroqəçidləri isə UB oblastın fotodetektorları və günəş elementlərinin hazırlanmasında istifadə oluna bilər.

İşin elmi yenilikləri:

1. Katod çökdürmə potensialının $-1.28 \div -1.32$ V qiymətlərinə qədər artması ilə Cd_{1-x}Zn_xO nazik təbəqələrinin səthindəki kristallitlərin ölçüsünün böyüməsi və səthdəki defektlərin konsentrasiyasının azalması elektron-ion mübadiləsinin altlığın bütün səthi üzrə stabil baş verməsi ilə əlaqədardır.

2. Cd_{1-x}Zn_xO nazik təbəqələrinin elektrik, optik və fotoelektrik parametrlərinin qeyri-stabilliyini müəyyənləşdirən Zn(OH)₂ və Cd(OH)₂ tipli hidroksidlərin və absorbsiya olunmuş oksigen molekullarının yaratdığı (V_{Cd}-Cd_i)⁺ və ya (V_{Zn}-Zn_i)⁺ tipli kompleks vakansiyaların konsentrasiyası elektrokimyəvi çökdürülmənin və Tİ-nin optimal rejimlərini və nazik təbəqələrin tərkibini seçməklə məqsədyönlü olaraq idarə olunur;

3. Açıq havada və oksigendə yüksək temperaturlarda Tİ zamanı Zn(OH)₂ və Cd(OH)₂ tipli hidroksidlərin parçalanması və oksigen molekullarının səthdəki müstəqil Cd və Zn atomları ilə birləşməsi udma sərhədinin kəskinləşməsinin səbəbidir;

4. Bilavasitə çökdürülmədən sonra p-Si/Cd_{1-x}Zn_xO heteroqəçidlərində elektrik və fotoelektrik parametrlərin qeyri-stabilliyi nazik təbəqələrin ardıcıl müqavimətinin böyük olması, kontakta gətirilmiş materialların qəfəs parametrləri arasındakı uyğunsuzluğu, reaksiyaya girməmiş kadmium, sink, oksigen və metal hidroksidləri ilə əlaqədardır.

5. p-Si/Cd_{0.4}Zn_{0.6}O heteroqəçidlərində cərəyanın daşınması çoxpilləli tunel-emissiya mexanizminə tabedir.

6. p-Si/Cd_{0.4}Zn_{0.6}O heteroqəçidləri əsasında günəş elementləri oksigen mühitində 600°C temperaturda 15 dəqiqə Tİ-dən sonra $U_{ad}=448$ mV, $J_{qq}=22.1$ mA/sm², FF=0.6 və $\eta=5.94$ % kimi fotoelektrik parametrlər nümayiş etdirir.

7. Sabit intensivlik yaxınlaşmasında (SIY) aparılan təhlillər əsasında müəyyən olunmuşdur ki, mislə aşqarlanmış ZnO nazik təbəqələ-rində üçüncü harmonika generasiyasının effektivliyi gümüşlə aşqar-lanmışlara nisbətən daha yüksəkdir.

Tədqiqatın nəzəri və praktik əhəmiyyəti. İşin praktik əhəmiyyəti $Cd_{1-x}Zn_xO$ nazik təbəqələri və onların əsasında p-Si/ $Cd_{1-x}Zn_xO$ tipli heteroqəçidlərinin alınmasının elektrokimyəvi üsulunun texnoloji rej-i-mi işlənilib hazırlanmasıdır. Bu təbəqələrdən optik filtrlər, fotorezistor-lar kimi; heteroqəçidlərdən isə düzləndirici diodlar, UB fotosensorları, optoelektronikada, fotovoltaikada günəş fotoelementləri kimi istifadə oluna bilər.

İşin nəzəri əhəmiyyəti isə təklif olunan üsul və modelin digər tip heteroqəçidlərin tədqiqi zamanı da istifadə oluna bilməsidir.

Aprobasiyası və tətbiqi. Dissertasiya işinə daxil edilən tədqiq-atların nəticələri aşağıda adları qeyd olunan Respublika və Beynəl-xalq elmi konfranslarda müzakirə edilmiş və onların materiallarında dərc olunmuşdur:

–«Fizikanın müasir problemləri»nə həsr olunmuş «Opto-, nano-elektronika, kondensə olunmuş mühit və yüksək enerjilər fizikası» VII Respublika konfransı (Bakı, 20-21 dekabr 2013);

–«Fizikanın müasir problemləri»nə həsr olunmuş «Opto-, nano-elektronika, kondensə olunmuş mühit və yüksək enerjilər fizikası» VIII Respublika konfransı (Bakı, 24-25 dekabr 2014);

–BDU-nun Fizika Problemləri İnstitutunun yaradılmasının 10 illiyinə həsr olunmuş «Opto-, nanoelektronika, kondensə olunmuş mü-hit və yüksək enerjilər fizikası» Beynəlxalq konfransı (Bakı, 25-26 dekabr 2015);

–8th International Scientific Conference «Science and Society» (London, 24-29 noyabr 2015);

–Magistrantların və gənc tədqiqatçıların «Fizika və astronomiya problemləri» Beynəlxalq Elmi Konfrans (Bakı, 24-25 may 2018);

–International Conference of Young Scientists Problems of Physics and Astronomy (Baku, 25 may 2018).

Dissertasiya işinin materialları əsasında 12 elmi məqalə (onlardan 4-i Web of science və 2-si Scopus bazasında indeksləşən jurnallarda dərc olunub) və 6 tezis (1-i xaricdə) çap olunmuşdur.

Dissertasiya işinin yerinə yetirildiyi təşkilatın adı. Dissertasiya işi Bakı Dövlət Universitetinin Fiziki elektronika və Optika və molekulyar fizika kafedralarında yerinə yetirilmişdir.

Dissertasiyanın struktur bölmələrinin ayrılıqda həcmi qeyd olunmaqla dissertasiyanın işarə ilə ümumi həcmi.

Dissertasiya işi 174 səhifə çap olunmuş mətndə təqdim olunur, giriş, dörd fəsil, nəticələr, praktik tövsiyələr, 58 şəkil, 14 cədvəl və 203 adda ədəbiyyat siyahısından ibarətdir. Ədəbiyyatda 14 əsər rus dilində, 181 əsər ingilis dilində və 8 ədəbiyyat azərbaycan dilindədir. Dissertasiyanın həcmi (mətndəki boşluqlar və şəkillər, cədvəllər, qrafiklər, əlavələr və ədəbiyyat siyahısı istisna edilməklə) – 203741 işarədir (Giriş – 38409, I fəsil – 44351, II fəsil – 25168, III fəsil – 56520, IV fəsil – 37085, Nəticə – 2208 işarə).

İŞİN MƏZMUNU

Girişdə mövzunun aktuallığı, işin məqsədi, məqsədə çatmaq üçün həll edilmiş məsələlər, işin elmi yeniliyi və praktiki dəyəri, müdafiəyə çıxarılan əsas müddəalar, materialların aprobeşiyası və dissertasiya işinin fəsilələrinin qısa məzmunu şərh olunmuşdur.

Birinci fəsil müxtəlif üsullarla hazırlanmış ZnO, CdO birləşmələri və $Cd_{1-x}Zn_xO$ bərk məhlullarına aid mövcud olan elmi ədəbiyyatın təhlilini özündə əks etdirir.

Müəyyən olmuşdur ki, ZnO, CdO və $Cd_{1-x}Zn_xO$ nazik təbəqələrinin alınması üçün bir sıra üsullar mövcuddur ki, onlardan ən əlverişli və ucuzu elektrokimyəvi üsuldur və nazik təbəqələrin səthinin quruluşu katod potensialının qiymətindən asılı olaraq dəyişir. Katod potensialının artması ilə reaksiya sürətinin artması nəticəsində kristallitlərin ölçüsü böyüyür. Məhlulun temperaturundan asılı olaraq ZnO, CdO və $Cd_{1-x}Zn_xO$ nazik təbəqələri müxtəlif tip kristal quruluş nümayiş etdirir. Nazik təbəqələrin səthinin skanedici elektron mikroskop SEM təsvirləri göstərmişdir ki, məhlulun temperaturu yüksəldikcə səthin bircinsliyi artır. Fotonun enerjisinin $1.5 \div 2.3$ eV intervalında təbəqələrin dielektrik sabiti və optik keçiriciliyi ilkin enerjilərdə azalır və daha sonra ($2.3 \div 2.7$ eV) isə artır. Alınmış nazik təbəqələr optik filtrlər və günəş elementlərində bufer təbəqə kimi istifadə oluna bilər.

Ədəbiyyat icmalının yekun şərhinə görə Al, Ag, In, Cu kimi elementlərlə aşqarlanma zamanı ZnO nazik təbəqələrinin bir çox elektrik, optik və fotoelektrik parametrlərinin yaxşılaşmasına baxmayaraq, Cd-la aşqarlanmış ZnO nazik təbəqələri təmiz təbəqələrə nisbətən daha az defekt və dislokasiyalara malik olur. Bu isə bizə $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}$ bərk məhlullarında defektlərin konsentrasiyasının idarə oluna bilinməsinin daha asan olduğuna və onların daha perspektivli olmasına aid fikir söyləməyə imkan verir.

İkinci fəsil $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}$ bərk məhlullarının nazik təbəqələrinin sulu məhluldan elektrokimyəvi çökdürülmə üsulu ilə alınmasına, təbəqələrin səth morfologiyasının və kristal quruluşunun öyrənilməsinə həsr olunmuşdur.

$\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}$ nazik təbəqələrinin elektrokimyəvi çökdürülməsi üçün üçelektrodlu sistemdən istifadə edilmiş və bu zaman anod materialı olaraq qrafit çubuqlar, köməkçi elektrod kimi Ag/AgCl_3 və katod materialı kimi, Mo, $\text{Şüşə}/\text{SnO}_2$ (struktur, element analizi, optik, elektrik və fotoelektrik tədqiqatları üçün), 0.8 mm qalınlıqlı və $1 \div 1.3 \text{ Om}\cdot\text{sm}$ xüsusi müqavimətə malik p-Si lövhələri və ya vakuumda buxarlanma üsulu ilə hazırlanmış $\text{Şüşə}/\text{Al}$ altlıqları üzərində alınmış 200 mkm qalınlıqlı və $2.5 \text{ Om}\cdot\text{sm}$ xüsusi müqavimətə malik p-Si lövhələri götürülmüşdür. Nazik təbəqələrin çökdürülməsində otaq temperaturu və $50 \div 80^\circ\text{C}$ temperaturu sulu məhlullardan istifadə edilmişdir. Dissertasiya işində istifadə olunmuş altlıqlar reaksiya məhluluna salınmazdan əvvəl çirklənmələrdən fiziki və kimyəvi üsullarla təmizlənməmişdir. $\text{Şüşə}/\text{SnO}_2$ altlıqları üzərində alınmış $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}$ nazik təbəqələr optik, Mo altlıqlar üzərində alınmış nazik təbəqələr isə struktur, element analizi, elektrik və fotoelektrik tədqiqatlar zamanı istifadə edilmişdir. Dissertasiya işində $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}$ nazik təbəqələrinin alınmasında reaksiya maddəsi olaraq yüksək kimyəvi təmizliyə malik (99.95 %) kadmium ($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$) və sink ($\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$) nitrat duzlarının sulu məhlulundan istifadə edilmişdir. Nazik təbəqələrin elektrokimyəvi üsulla çökdürülməsi mexanizmini öyrənmək və çökdürülmə rejiminə nəzarət etmək məqsədilə $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 + \text{Zn}(\text{NO}_3)_2 + \text{KNO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ sulu məhlulundakı duzların otaq temperaturunda və 80°C temperaturda əvvəlcə ayrı-ayrılıqda, daha sonra isə əvvəlki konsentrasiya və pH-turşuluğunda qarışığının tsiklik volt-ampere xarakteristikaları (voltamperometriya)

tədqiq edilmişdir. Tsiklik voltamperogrammalar xarici gərginliyin $-1.6 \div +1.1$ V intervalında çəkilməmişdir. Xarakteristikaların ölçülməsi əvvəlcə katoda tətbiq edilən xarici gərginliyin mənfi, sonra isə müsbət qiymətlərində aparılmışdır. Tsiklik volt-ampere tədqiqatları sulu məhluldan katod çökdürmə üsulu ilə *şüşə/SnO₂* altlıqları üzərində alınmış $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}$ nazik təbəqələr üzərində aparılmışdır. Anod materialı kimi reaksiyada qrafit elektrodlardan istifadə edilmişdir. Reaksiya məhlulunun turşuluğu azot turşusunun əlavə edilməsi ilə idarə edilmişdir ($\text{pH} = 3 \div 5$).

Müəyyən olunmuşdur ki, $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ məhlulunda cərəyan xarici gərginliyin $U_k = -0.95$ V qiymətində artmağa başlayır və katod gərginliyinin $-1.2 \div -1.55$ V qiymətlərində altlıq üzərinə Zn ionlarının reduksiyası və nəticə etibarilə ZnO nazik təbəqələrinin alınması baş verir.

Təyin edilmişdir ki, CdO nazik təbəqələrinin işçi elektrod (altlıq) üzərinə reduksiyası gərginliyin -0.25 V qiymətlərindən başlayaraq baş verir və $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}$ nazik təbəqələrinin formalaşması üçün katod gərginliyinin qiyməti $-0.8 \div -1.46$ V intervalında dəyişdirilməlidir. Voltamperogrammaların tədqiqi üsulu ilə işdə $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}$ nazik təbəqələrinin müxtəlif tərkiblərdə alınması üçün reaksiya duzlarının mol miqdarı, çökdürmə cərəyanı və gərginliyinin optimal qiymətləri müəyyən edilmişdir.

$\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}$ nazik təbəqələrinin səthinin morfologiyası və kristal quruluşu çökdürmə potensialından asılıdır. $\text{Cd}_{0.4}\text{Zn}_{0.6}\text{O}$ nazik təbəqələri elektrokimyəvi üsulla katod potensialının müxtəlif qiymətlərində alınmışdır.

SEM tədqiqatları əsasında müəyyən edilmişdir ki, katod potensialının -0.9 V qiymətlərində alınmış $\text{Cd}_{0.4}\text{Zn}_{0.6}\text{O}$ nazik təbəqələri hamar və bircins səth nümayiş etdirir. Katod potensialının -0.9 V qiymətində çökdürülmüş nazik təbəqələrin rentgenoqramlarında zəif intensivlikli və eni böyük olan xətlər müşahidə edilir ki, bu da onların polikristal və əksər hallarda hətta amorf olmasına dəlalət edir.

Katod potensialının qiymətinin cüzi olaraq artması ($-1.22 < U_c \leq -1.25$ V) nazik təbəqələrin səth quruluşunu kəskin olaraq dəyişir. Belə ki, səthdəki məsamələrin konsentrasiyası kəskin olaraq azalır, kristallitlərin ölçüsü kiçilir ($5 \div 7$ nm) və nazik təbəqələr bircins nanoquruluşlu səth nümayiş etdirir. Çökdürmə gərginliyinin bu qiymətində

alınmış nazik təbəqələrin rentgenoqramlarında xətlərin intensivliyi artsa da, onların eni çox da kiçilmir. Bu da $\text{Cd}_{0.4}\text{Zn}_{0.6}\text{O}$ təbəqələrinin nanoölçülü polikristallitlərdən ibarət olmasını göstərir.

Katod çökdürmə potensialının $-1.28 \div -1.32$ V qiymətlərinə qədər artması ilə, nazik təbəqələrin səthindəki kristallitlərin ölçüsünün artması ilə bərabər, səthdəki defektlərin konsentrasiyası da kəskin şəkildə azalır. Bu zaman rentgenoqramlarda piklərin intensivliyi böyüyür, eni isə kiçilir ki, bu da onların kristallaşma dərəcəsinin artdığını göstərir. Qeyd etmək lazımdır ki, otaq temperaturunda həyata keçirilmiş çökdürülmə prosesi nəticəsində alınmış $\text{Cd}_{0.4}\text{Zn}_{0.6}\text{O}$ nazik təbəqələrinin əksəriyyətinin difraktoqramlarında bütün xətlər ya cüt, ya da tək indekslər nümayiş etdirir. Bu da onların vyürsit qəfəs quruluşuna malik olduqlarını göstərir. Demək olar ki, bütün nümunələrin rentgenoqramlarında çox zəif difraksiya pikləri müşahidə edilir. Bu piklərin metal hidroksidlərə aid olduğu fərz olunur. Lakin məhlulu otaq temperaturundan 80°C -yə qədər qızdırmaqla və məhlulun pH-turşuluğuna nəzarət etməklə, kubik (sfalerit) quruluşlu nazik təbəqələr də alınır və bu nümunələrin rentgenoqramlarında hidroksid artıqlığına aid difraksiya pikləri demək olar ki, müşahidə olunmur.

Üçüncü fəsilə müxtəlif tərkibli $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}$ nazik təbəqələrinin elektrik, fotoelektrik və optik xassələrinin texnoloji və Tİ rejimindən, habelə, nazik təbəqələrin tərkibindən asılı olaraq tədqiqindən alınmış nəticələr şərh və təhlil edilmişdir.

Dissertasiya işində həm texnoloji, həm də Tİ rejimlərinin $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}$ nazik təbəqələrinin elektrik xassələrinə təsirinin mexanizmini aydınlaşdırmaq məqsədilə, termoqravimetriya və elektrik spektroskopiyaları paralel olaraq aparılmışdır. Elektrik xassələrinin tədqiqi zamanı Mo altlıqlar üzərində alınmış nazik təbəqələrdən istifadə edilmişdir. $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}$ nazik təbəqələrinin elektrik xassələrinin tədqiqi zamanı çökdürülmə potensialının -0.8 V; -0.9 V; -1.2 V; -1.28 V və -1.35 V qiymətlərində alınmış 800 nm qalınlıqlı $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}$ ($0.2 \leq x \leq 0.9$) nazik təbəqələrindən istifadə edilmişdir. Tədqiqatlar $300 \div 500$ K temperatur intervalında və ≈ 0.3 sm² (3×10 mm) sahəyə malik nazik təbəqələrdə həyata keçirilmişdir. Təbəqələrdə temperaturla əlaqədar olan fiziki və kimyəvi proseslərin baş verməməsi, başqa sözlə bu proseslərə uyğun aktivləşmə enerjilərini hesablamaq üçün tədqiqatlar maye azot

temperaturundan başlayaraq otaq temperaturuna qədər aparılmışdır. Müəyyən olunmuşdur ki, $\ln p = f(1/T)$ asılılıqlarında aşağı temperaturlara ($T \leq 170$ K) uyğun hissələrin meyli bütün tərkib təbəqələr üçün (təbəqənin vahid həndəsi ölçüsü üçün) demək olar ki, eynidir. Bu hissəyə uyğun aktivləşmə enerjisinin qiyməti $E_1 = 0.28 \div 0.31$ eV təşkil edir ki, bu da metal hidroksidlərinə və oksigenin desorbsiyasına uyğun olan enerjidir. Elmi ədəbiyyatda oksigen üçün aktivləşmə enerjisinin qiyməti $0.11 \div 0.19$ eV müəyyən edilir. Bizim tədqiqatlarda alınan qiymətin nisbətən böyük olması həm metal hidroksidlərinin, həm də oksigenin eyni anda desorbsiyası ilə əlaqədar ola bilər. Metal hidroksidləri üçün aktivləşmə enerjisi $0.12 \div 0.14$ eV təşkil edir. Tərkibdə Zn-in konsentrasiyasının $x=0.6$ -ya qədər artması ilə aktivləşmə enerjisinin qiyməti azalır və daha böyük konsentrasiyalarda demək olar ki, sabit qalır. Bu fakt bir daha Zn-in yüksək konsentrasiyalarında nazik təbəqələrin səthində metal hidroksidlərinin və reaksiyaya girməmiş metal artıqlıqlarının konsentrasiyasının az olmasına dəlalət edir. Ümumi halda qaranlıq müqavimətinin aktivləşmə xüsusiyyətinə malik olması elektrokimyəvi çökdürülmə üsulu ilə alınmış $Cd_{1-x}Zn_xO$ təbəqələrinin yarımkeçirici xüsusiyyətinə malik olmasını bir daha təsdiq edir. Belə ki, təbəqələrin xüsusi elektrik müqavimətinin temperaturdan asılılığı qrafiklərindəki metal-hidroksidləri və metal artıqları ilə əlaqədar olan meyillər uyğun aktivləşmə enerjisi (E_1) idarə oluna bilər. Onu da qeyd edək ki, bu meyillər T_I -nin mühitindən asılı olmadığı halda, ikinci tip meyillərə uyğun aktivləşmə enerjisi (E_2) mühitin növündən kəskin asılıdır. Açıq havada T_I temperaturunun artması ilə səthdəki metal-hidroksid artıqlarının və oksigenin desorbsiyası nəticəsində E_2 -yə uyğun hissələr demək olar ki, itir və təbəqələrin qaranlıq müqavimətinə uyğun aktivləşmə enerjisi nəzərəcərpacaq dərəcədə artır. Açıq havada 600°C temperaturda 15 dəqiqə ərzində T_I -dən sonra $\ln p = f(1/T)$ asılılığının qrafiklərində yalnız bir meyilli hissələr müşahidə edilir.

Bu fakt T_I -dən sonra $Cd_{1-x}Zn_xO$ nazik təbəqələrində həm defektlərin konsentrasiyasının azalması, həm də təbəqələrin rekristallaşması nəticəsində kristal quruluşlarının təkmilləşməsini və elektrik parametrlərinin yaxşılaşmasını təsdiqləyir. Daha yuxarı temperaturlarda T_I zamanı birinci hissənin meyli azalır və yenidən ikinci bir hissə əmələ

gəlir. Eyni bir rejimdə (600°C , 15 dəq) açıq havada, oksigendə və arqonda Tİ-dən sonra nazik təbəqələrin elektrik müqavimətinin temperaturdan asılılığına uyğun aktivləşmə enerjisinin qiyməti fərqli olur. Oksigen mühitində Tİ-dən sonra nazik təbəqələr daha stabil və yaxşı elektrik parametrləri nümayiş etdirir. Bilavasitə çökdürülmədən sonra nazik təbəqələrin volt-ampere xarakteristikası (VAX) $I \sim U^m$ şəklində üstlü qanuna və eksponensial qanuna tabe olan hissələrdən ibarət olmaqla mürəkkəb xarakterə malikdir və tərkibdən asılı olaraq üstlü funksiyanın dərəcəsi (m) dəyişir. Belə ki, $x \leq 0.6$ tərkibli nazik təbəqələrdə gərginliyin nisbətən kiçik ($U < 14 \text{ V}$) qiymətlərində əsasən eksponensial hissə, daha yuxarı gərginliklərdə isə subxətti ($m < 1$) hissələr müşahidə olunur. Qrafiklərdə subxətti hissələrin müşahidə olunması həmin tərkib nazik təbəqələrdə səthdəki defektlərlə əlaqədar olan rekombinasiya aktlarının böyük olmasına dəlalət edir. Tərkibdə Zn-in konsentrasiyasının sonrakı artımlarında isə eksponensial hissə demək olar ki, yox olaraq xətti qanunla əvəz olunur ($m=1$). Bu da tərkibin dəyişməsi ilə səthdəki defektlərin konsentrasiyasının azalmasını bir daha təsdiqləyir.

Müəyyən olunmuşdur ki, $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}$ nazik təbəqələrinin VAX-nın xarakteri təbəqələrin tərkibindən asılı olmaqla bərabər, Tİ rejimindən qeyri-monoton asılıdır. Belə ki, oksigen mühitində $300 \div 400^{\circ}\text{C}$ temperaturda 15 dəqiqə ərzində Tİ-dən sonra VAX-ın qeyri-xətti hissələri sırf xətti hissələrlə əvəz olunur. 600°C temperaturda 15 dəqiqə ərzində Tİ-dən sonra VAX-da yalnız xətti hissələr müşahidə olunur. Bu rejimdə Tİ-dən sonra nazik təbəqələr nəzərəcarpacaq dərəcədə fəthəssaslıq nümayiş etdirir. Belə ki, təbəqələrin $W=100 \text{ mVt/sm}^2$ işıqlanmada VAX-ı xətti qanuna tabe olur ki, bu da onlardan yaxın UB oblastda stabil parametrlərə malik fəthəzistorlar kimi tətbiq etməyə imkan verir. Səthdə özlərini akseptor mərkəzləri kimi aparan metal-hidroksid defektləri özlərini təbəqələrin lüks-ampere xarakteristikalarında (LAX) da göstərir. Belə ki, Tİ-dən əvvəl təbəqələr yalnız kiçik işıqlanmalarda xətti ($W \leq 20 \text{ mVt/sm}^2$), nisbətən yüksək intensivliklərdə isə subxətti hissələr nümayiş etdirir ki, bu da səth rekombinasiyalarının üstünlük təşkil etməsini bir daha təsdiqləyir.

Lakin optimal rejimdə Tİ-dən sonra təbəqələr geniş işıq intervalındakı intensivliklərdə yalnız xətti qanun nümayiş etdirir. Oksigen mühitində 600°C temperaturda 15 dəqiqə ərzində Tİ-dən sonra $W=100 \text{ mVt/sm}^2$ işıqlanmada təbəqələrdə işıq və qaranlıq cərəyanlarının nisbəti tərkibdən asılı olaraq $I_f/I_q=20\div 90$ təşkil etmişdir.

Dissertasiya işində optik xassələrin tədqiqi üçün istifadə olunmuş $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}$ nazik təbəqələri elektrokimyəvi üsulla *şüşə/SnO₂* altlıqları üzərində alınmışdır. İstifadə edilmiş təbəqələrin qalınlığı elektrokimyəvi çökdürülmə prosesinin davamətmə müddəti ilə idarə olunmuşdur və təbəqələrin qalınlığı 0.02÷1.00 mkm aralığında olmuşdur.

Sulu məhluldan elektrokimyəvi çökdürülmə üsulu ilə alınmış $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}$ nazik təbəqələrinin spektrin görünən və yaxın infraqırmızı oblastlarında 360÷1100 nm optik xassələri Tİ-nin həyata keçirildiyi mühitdən və işlənmə rejimlərindən asılı olaraq tədqiq edilmişdir. Tİ-dən əvvəl və 600°C-də 10 dəq ərzində havada, oksigen və arqon mühitlərində Tİ-dən sonra $\text{Cd}_{0.4}\text{Zn}_{0.6}\text{O}$ nazik təbəqələrində optik buraxmanın spektral paylanma ayrıləri əsasında müəyyən edilmişdir ki, bilavasitə çökdürülmədən sonra nazik təbəqələrin fundamental udma sərhədi o qədər də kəskin olmayıb, mürəkkəb quruluşa malikdir. Bu, həmin təbəqələrin çökdürülmə zamanı ion mübadiləsinin qeyrisinxron olaraq baş verməsi nəticəsində, daha dəqiq desək, çökdürülmə cərəyanı və potensialına dəqiq nəzarətin mümkün olmaması səbəbindən kristal qəfəsdə rabitə yarada bilməmiş Cd və ya Zn vakansiya-larının olması, yəni hamar, bircins və defektsiz mükəmməl səthin olmaması ilə izah oluna bilər.

Açıq havada və oksigendə yüksək temperaturalarda Tİ zamanı oksigen molekulaları səthdəki sərbəst Cd və Zn atomları ilə birləşərək səthin təkmilləşməsinə – səthdəki defektlərin konsentrasiyasının azal-masına səbəb olur və bu da udma sərhədinin qısa dalğa uzunluqları tərəfə sürüşməsi və sərhədin kəskinləşməsi ilə nəticələnir. Bu sürüşmə oksigen mühitində Tİ zamanı özünü daha nəzərəcərpacaq dərəcədə göstərir. Nəticədə, tədqiq olunan nazik təbəqələrin qısa dalğa uzunluğu oblastındakı optik şəffaflığı artır. Nümunələrin arqon mühitində Tİ zamanı spektrin udma sərhədinə uyğun hissəsinin meylliliyi kəskin artır ki, bu da onların kristallaşma cəhətdən tam formalaşmasına dəlalat edir. Bu nümunələrdən kəskin buraxma sərhədinə malik optik filtrlər hazırlanmasında istifadə edilə bilər. Onu da qeyd edək ki, hər

üç mühitdə Tİ-dən sonra nazik təbəqələrin qadağan olunmuş zonasının eni dəyişməmişdir. Qadağan olunmuş zonanın eninin nazik təbəqələrin tərkibindən asılılığı xətti qanuna tabe olan iki hissədən ibarət olmuşdur. $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}$ nazik təbəqələrinin $x \leq 0.7$ qədər sırf xətti qanun müşahidə olunmuşdur ki, bu tərkiblər üçün yarımloqarifmik miqyasda qurulmuş $\ln \alpha = f(h\nu)$ asılılıqları xətti qanuna – Urbax qaydasına tabe olmuşdur. Bu tərkibli nazik təbəqələr kubik quruluşa malik olub, Veqard qaydasına və Urbax qaydasına tabe olduqlarından düz zonalı, $x > 0.7$ tərkiblərində isə Urbax qaydasına tabe olmayıb, çəp zonalı yarımkeçirici nazik təbəqələrdir. $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}$ bərk məhlullarının elektrokimyəvi çökdürülmə üsulu ilə alınmış nazik təbəqələrinin, eyni rejimdə, 600°C -də arqon mühitində 10 dəqiqə ərzində Tİ-si zamanı bu cür dəyişikliklər o qədər də kəskin müşahidə edilmir. İstənilən mühitdə Tİ zamanı təbəqələrdə baş verən yenidən kristallaşma kimi sırf fiziki proseslər onların bütün elektrik və optik xassələrini dəyişsə də, inert mühitlərdə aparılan Tİ zamanı kimyəvi proseslər demək olar ki, baş vermir. Yəni hava və oksigen kimi aktiv mühitlərdə aparılan Tİ təbəqələrin əsasındakı cihazlarda sonradan baş verə biləcək dəyişiklikləri təhlil etmək üçün daha məqsəduyğun hesab edilə bilər. Nazik təbəqələrin $600 \div 1000$ nm dalğa uzunluğu oblastında oksigen mühitində Tİ-dən sonra optik şəffaflığı ən böyük qiymətə ($\sim 95\%$ -ə) bərabər olur. Ümumi halda $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}$ nazik təbəqələrinin Tİ-dən sonra optik şəffaflığı $64 \div 96\%$ intervalında dəyişir. Nazik təbəqələrin optik buraxma əmsalının böyük qiymətə malik olması, onlardan günəş enerjisi çeviricilərinin hazırlanmasında həm bufer, həm də şəffaf parlaq keçirici təbəqə kimi istifadə etməyə imkan verir.

Dissertasiya işində aşqarlanmış və aşqarlanmamış ZnO, nazik təbəqələrinin qeyri-xətti optik xassələrinin ikinci harmonika generasiyası (İHG) və üçüncü harmonika generasiyası (ÜHG) üsulları ilə tədqiqi zamanı əldə edilmiş nəticələr əsasında qeyri-xətti tezlik çevrilmələri üçün nəzəri hesablamalar həyata keçirilmişdir. Bu məqsədlə fundamental şüalanmanın SİY-sı üsulu tətbiq edilmişdir. Dissertasiya işində eksperimental tədqiqatlar zamanı əldə olunmuş və elmi ədəbiyyatda verilmiş optik parametrlərdən hesablamalarda istifadə edilmişdir. Ag və Cu ilə aşqarlanma zamanı qeyri-xətti optik çevrilmənin intensivliyi, daha dəqiq desək ÜHG zəifləyir. Bu isə aşqarlanmanın heç də bütün qırıq rabitələrin bərpa olunacağını əvvəlcədən söyləməyə imkan

vermir. Belə ki, bəzi aşqarlar təbəqələrin qeyri-bircinsliklərini azaltdığı halda, bəziləri onların parametrlərini daha da pisləşdirir. SİY-də aparılan təhlil göstərir ki, ZnO:Cu nazik təbəqələrində ÜHG-nin effektivliyi ZnO:Ag nazik təbəqələrinə nisbətən daha yüksəkdir (Bu nəticə Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının 2017-ci il üçün mühüm elmi nəticələrə dair illik elmi hesabatına daxil edilmişdir).

Dördüncü fəsil p-Si/Cd_{1-x}Zn_xO heteroqəçidlərinin elektrik və fotoelektrik xassələrinin tədqiqinə həsr edilmişdir.

Elektrokimyəvi çökdürülmə üsulu ilə alınmış p-Si/Cd_{1-x}Zn_xO heteroqəçidlərinin elektrik xassələri çökdürülmə rejimindən, Cd_{1-x}Zn_xO nazik təbəqələrinin tərkibindən və müxtəlif mühitlərdə (hava, arqon və oksigen) Tİ rejimlərindən asılı olaraq tədqiq edilmişdir. Müxtəlif çökdürülmə potensiallarında hazırlanmış p-Si/Cd_{1-x}Zn_xO heteroqəçidlərinin qaranlıq VAX-ı əsasında müəyyən edilmişdir ki, katod potensialının -0.8 V qiymətində alınmış heteroqəçidlər $U = 1$ V gərginliyə qədər demək olar ki, düzləndirmə nümayiş etdirmir. Düzünə gərginliyin $U = 1.5 \div 1.75$ V qiymətlərində düzünə cərəyanın nisbi artım sürəti zəifləyir və $U \geq 1.75$ V qiymətlərində yenidən kəskin olaraq artır. Tətbiq olunmuş xarici gərginliyin $U = 2$ V qiymətində heteroqəçidlərin düzləndirmə əmsalı $k = 2 \div 2.3$ bərabərdir. Düzünə istiqamətdəki VAX-da cərəyanın nisbi artım sürətinin zəifləməsi katod çökdürülmə potensialının -0.9 V qiymətində alınmış heteroqəçidlərdə daha geniş intervalı əhatə edir və özünü daha qabarıq şəkildə büruzə verir. Lakin katod potensialının -1.2 V qiymətinə qədər artırılması VAX-da müşahidə olunan bu cür hissələrin tamamilə aradan qalxmasına səbəb olur və heteroqəçidlərdə düzləndirmə əmsalının kəskin olaraq artmasına gətirir (nazik təbəqələrin tərkibindən asılı olaraq $k = 200 \div 1640$). Katod çökdürülmə potensialının növbəti artımında (-1.32 V) cərəyanın artım sürətinin zəifləməsi prosesi yenidən müşahidə olunur. Qəçid oblastındakı defektlərin təbiətini və xarakterini aydınlaşdırmaq üçün dissertasiya işində VAX-ın temperatur asılılıqları və qəçidin elektrik tutumunun gərginlikdən və xarici sahənin tezliyindən asılılıqları da tədqiq edilmişdir. VAX-ın temperatur asılılıqları göstərmişdir ki, cərəyanın nisbi artım sürətinin azalması temperaturun artması ilə, daha doğrusu temperaturun müəyyən bir qiymətində ($120 \div 130^\circ\text{C}$) aradan qalxır və bu proses dönən prosesdir. Temperaturu azaltdıqda effekt yenidən meydana

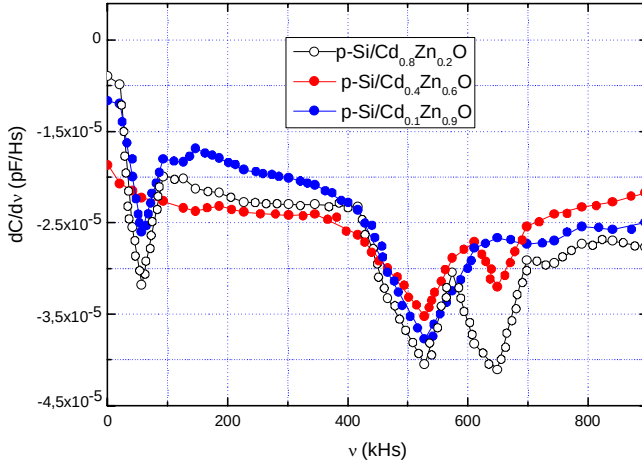
çıxır. Keçid oblastının diaqnostikası məqsədilə heterokeçidlərin otaq temperaturunda yarımloqarifmik miqyasda qurulmuş VAX-dan istifadə edilmişdir. Çökdürmə potensialı heterokeçidlərin keçid oblastının topoqrafiyasını idarə etməyə imkan verir. Belə ki, çökdürmə potensialının $U_{\zeta} < -1.2$ V qiymətində alınmış heterokeçidlərdə $A \geq 1.9$ qiymətlərini alır ki, bu da onlarda rekombinasiya mərkəzlərinin konsentrasiyasının yüksək olmasını sübut edir. Müəyyən edilmişdir ki, çökdürmə potensialının artırılması ilə ($-1.2 \leq U_{\zeta} \leq -1.25$ V) VAX-ın qeyri-ideallıq əmsalının qiyməti kəskin şəkildə azalır ($A=1.46$). Çökdürülmə potensialının $U_{\zeta} > -1.25$ V qiymətlərində heterokeçidlərdə düzləndirmə qabiliyyətinin pisləşməsi ilə bərabər, qeyri-ideallıq əmsalının da qiyməti yenidən artır. Fikrimizcə keçid oblastındakı defektlər iki səbəbdən ola bilər: kontakta gətirilmiş materialların (p-Si və n-Cd_{1-x}Zn_xO) qəfəs parametrləri arasındakı uyğunsuzluqla; n-Cd_{1-x}Zn_xO nazik təbəqələrinin elektrik və optik xassələrinin tədqiqi zamanı müəyyən etdiyimiz kimi, reaksiyaya girməmiş metal artıqlıqları və ya oksigenlə. Müəyyən olunmuşdur ki, Cd_{1-x}Zn_xO nazik təbəqələrinin tərkibini seçməklə, yəni kontakta gətirilmiş materialların qəfəs parametrləri arasındakı uyğunsuzluqları minimuma endirməklə p-Si/Cd_{1-x}Zn_xO heterokeçidlərinin elektrik parametrlərini müəyyən mənada yaxşılaşdırmaq mümkündür. Katod potensialının optimal (-1.2 V) qiymətində hazırlanmış heterokeçidlərin düzləndirmə əmsalının nazik təbəqələrin tərkibindən asılılığı qeyri-monotondur. Ən yaxşı düzləndirmə $x=0.6$ və 0.7 tərkibli nazik təbəqələr əsasında heterokeçidlərdə müşahidə olunur ki, bu da onların p-Si-la qəfəs parametrləri arasındakı fərqlərin minimum olmasına dəlalət edir. Digər tərəfdən Cd_{1-x}Zn_xO nazik təbəqələrində xüsusi elektrik müqavimətinin təbəqələrin tərkibindən asılılığı da qeyri-monoton xarakterlidir. Bu effekt də özünü heterokeçidlərin ardıcıl müqavimətinin (R_s) təbəqələrin tərkibindən asılılığında da büruzə verir. Heterokeçidlərdə ardıcıl müqavimətin də təbəqələrin tərkibindən asılılığı qeyri-monotondur.

VAX-ın qeyri-ideallıq əmsalının qiymətlərinin də təbəqələrin tərkibindən asılılığı qeyri-monotondur. Tərkibi $x \neq 0.6$ heterokeçidlərdə $\ln I = f(U)$ asılılıqları iki hissədən ibarətdir və xətti hissələrin meyli temperaturdan kəskin asılıdır. Qrafiklərin iki hissədən ibarət olması

qəfəs parametrləri uyğunsuzluğu və çökdürülmə zamanı təbəqələrin həcmində və səthində qalan metal hidroksidləri hesabına olması ilə təsdiq edilir. Bu nəticə göstərilən tərkib heteroqeçidlərdə rekombinasiya cərəyanlarının üstün olmasına dəlalət edir. Belə ki, $x=0.6$ tərkibli heteroqeçidlərdə $\ln I = f(U)$ asılılıq qrafiklərində yalnız bir meyilli hissə müşahidə edilir. $\text{Cd}_{0.4}\text{Zn}_{0.6}\text{O}$ və p-Si-un qəfəs parametrlərinin uyğun olması digər tərkiblərdə müşahidə edilən ikinci hissənin aradan qalxmasına səbəb olur. Dissertasiya işində $\text{Cd}_{0.4}\text{Zn}_{0.6}\text{O}$ və p-Si-un qəfəs parametrlərinin uyğunsuzluğu ilə əlaqədar olan səth hallarının konsentrasiyası hesablanmışdır: $N_d \approx 6 \cdot 10^{13} \text{ sm}^{-3}$. Həmçinin $x=0.6$ tərkibli heteroqeçidlərdə $\ln I = f(U)$ asılılıq qrafiklərinin meylinin temperaturdan demək olar ki, çox zəif asılı olması onlarda çoxpilləli tunnel-emissiya cərəyanlarının üstünlük təşkil etməsini göstərir. Heteroqeçidlərdə çəpər tutumu da defektlərin konsentrasiyası ilə müəyyən olunur. $x \neq 0.6$ tərkibli heteroqeçidlərin $C^{-2} = f(U)$ miqyasında volt-farad xarakteristikaları (VFX) nisbi olaraq xətti qanuna tabe olmaqla bir neçə meyilli hissələrdən ibarətdir. Bu tip heteroqeçidlərdə həm elektrik tutumunun qiyməti xarici sahənin tezliyindən asılıdır, həm də onlarda kontakt potensiallar fərqi (V_c) VAX və VFX-dan tapılmış qiymətləri bir-birindən fərqlənir. Bununla bərabər, $x=0.6$ tərkibli heteroqeçidlərdə $C^{-2} = f(U)$ miqyasında VFX-rı demək olar ki xətti qanuna tabedir və elektrik tutumunun qiyməti digərlərinə nisbətən kiçik olmaqla bərabər tezlikdən zəif asılıdır. Bu tip heteroqeçidlərdə VFX-nın $C^{-2} = f(U)$ miqyasında xətti qanuna tabe olması onların keçid oblastının sərhədinin kəskin olmasına dəlalət edir. VFX-da müşahidə edilən nisbi kənarəçıxmalar $x=0.6$ tərkibli heteroqeçidlərdə qəfəs parametrləri uyğunsuzluğunun həll olunmasına baxmayaraq, metal hidroksidlərinin qalmasını göstərir. Keçid oblastındakı defektlərin təbiətini və energetik dərinliyini müəyyən etmək məqsədilə elmi ədəbiyyatda ən çox tətbiq tapmış üsullardan biri – tutum-tezlik spektroskopiyasından istifadə etməklə keçid oblastındakı defektlərin enerji dərinliyi və təbiəti müəyyənləşdirilmişdir.

Keçid oblastının tutum spektroskopiya üsulları içərisində isə tutum-tezlik-temperatur spektroskopiya üsulları daha geniş tətbiq olunur və keçid oblastının daha dəqiq diaqnostikasını aparmağa imkan verir. Şəkil 1-də müşahidə edilən birinci pillə yalnız $x \neq 0.6$ tərkibli

heterokeçidlərindədir və kontakta gətirilmiş materialların qəfəs parametrlərinin uyğunsuzluğu ilə əlaqədardır. Lakin $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}$ nazik təbəqələrinin tərkibindən asılı olmayaraq keçid oblastındakı ikinci və üçüncü tip mərkəzlərin aktivləşmə enerjisi üçün eyni bir qiymət alınır.



Şəkil 1. Bilavasitə çökdürülmədən sonra $\text{p-Si/Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}$ heterokeçidləri üçün müxtəlif temperaturlarda $dC/dv = f(v)$ qrafikləri

Tutum-tezlik spektroskopiyası vasitəsilə keçid oblastındakı rekombinasiya mərkəzlərinin energetik dərinliyi hesablanmışdır. Bunun üçün keçid tutumunun xarici sahənin tezliyindən asılılığı əsasında rekombinasiya səviyyələrinin xarakteristik tezliyi (ν_0) hesablanmışdır. Müxtəlif temperaturlar üçün $dC/dv = f(\nu)$ qrafikləri qurulmuş və qrafiklərdən müəyyən edilmiş xarakteristik tezliklər əsasında $\ln(\nu/T) = f(1000/T)$ asılılıq qrafikləri qurulmuşdur. Qrafiklərdən xətlərin meyli əsasında rekombinasiya səviyyələrinin energetik dərinliyi hesablanmışdır ($E_1=0.148$ eV və $E_2=0.196$ eV).

Çökdürmə potensialının optimal qiymətinin (-1.2 V) seçilməsinə və kontakta gətirilmiş p-Si və $\text{Cd}_{0.4}\text{Zn}_{0.6}\text{O}$ -in qəfəs parametrləri arasındakı uyğunsuzluğun minimuma endirilməsinə baxmayaraq, bilavasitə çökdürülmüş heterokeçidlərdə fotocərəyanın LAX-ı qeyri-xətti olur. Belə ki, kiçik işıq intensivliklərində LAX-da xətti hissə, nisbətən yuxarı intensivliklərdə subxətti hissə və daha yuxarı intensivliklərdə

isə yenidən xətti asılılıq müşahidə edilir. Əslində eyni xarakteristikanı biz heteroqecidlərin elektrik xassələrinin tədqiqində də müşahidə etmişdik.

Oksigen mühitində optimal rejimdə (600°C temperaturda 15 dəqiqə) Tİ-dən sonra heteroqecidlərin keçid oblastının rekonstruksiyası və nazik təbəqələrin səthində və həcmində baş verən elektron-molekulyar proseslər (rekristallaşma, metal hidroksidlərinin parçalanması, oksigenin desorbsiyası və s.) nəticəsində keçidin yenidən formalaşması qısa qapanma cərəyanının (J_{qq}) və açıq dövrə gərginliyinin (U_{ad}) qiymətini də nəzərəcərpacaq dərəcədə dəyişdirir (cədvəl 1).

Cədvəl 1

p-Si/ Cd_{0.4}Zn_{0.6}O	Nümunələr, x	U_{ad} (mV)	J_{qq} (mA/sm²)	FF	η, %
	Tİ-dən əvvəl	442	19.9	0.59	5.1
	200°C, 5 dəq	444	20.1	0.6	5.4
	200°C, 15 dəq	446	20.9	0.6	5.6
	400°C, 15 dəq	446	21.2	0.6	5.67
	600°C, 15 dəq	448	22.1	0.6	5.94
	600°C, 20 dəq	440	16.2	0.59	4.2

NƏTİCƏ

1. Cd_{1-x}Zn_xO nazik təbəqələrinin kubik və ya vyürsit kristal quruluşu, habelə, nano- və ya mikroteksturalı səthə malik olması elektrokimyəvi çökdürülmənin optimal rejimi (məhlulun temperaturu və çökdürülmə potensialı) ilə təyin olunur;

2. Bilavasitə çökdürülmədən sonra Cd_{1-x}Zn_xO nazik təbəqələrinin elektrik parametrlərinin qeyri-stabilliyi səthdə 0.12÷0.14 eV aktivləşmə enerjisinə malik metal hidroksidləri ilə əlaqədardır və onların konsentrasiyası çökdürülmə potensialı, təbəqələrin tərkibi və Tİ-nin optimal rejiminin seçilməsi ilə idarə oluna bilər;

3. Cd_{1-x}Zn_xO nazik təbəqələrində oksigen mühitində 600°C temperaturda 15 dəqiqə ərzində Tİ-dən sonra $W=100 \text{ mVt/sm}^2$ işıqlanmada təbəqələrdə işıq və qaranlıq cərəyanlarının nisbətini

tərkibdən asılı olaraq $I_f/I_q=20\div90$ təşkil etməsi və VAX-nın xətti qanuna tabe olması onları yaxın UB-oblastda stabil parametrlərə malik fotorezistorlar kimi tətbiq etməyə imkan verir;

4. $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}$ nazik təbəqələrinin açıq havada və oksigendə yüksək temperaturlu (600°C -də $10\div15$ dəq) Tİ-dən sonra optik buraxma spektrində udma sərhədinin qısa dalğa uzunluqları tərəfə sürüşməsi və fundamental udma sərhədinin kəskinləşməsi səthə absorbsiya etmiş oksigen molekullarının səthdəki müstəqil Cd və Zn atomları ilə birləşərək səthdəki defektlərin konsentrasiyasının azalması ilə əlaqədardır; $x\leq 0.7$ tərkibli $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}$ nazik təbəqələr düz zonalı, $x>0.7$ tərkibli nazik təbəqələr isə çap zonalıdır;

5. p-Si/ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}$ heterokeçidlərinin bilavasitə çökdürülmədən sonra zəif və qeyri-stabil parametrlərə malik olması qəfəs parametrləri arasındakı uyğunsuzluqla bərabər, uyğun olaraq, 0.148 eV və 0.196 eV aktivləşmə enerjisinə malik metal hidroksidləri və absorbsiya olunmuş oksigen molekullarının yaratdığı səviyyələrlə $((V_{\text{Cd}}-\text{Cd}_i)^+$ və ya $(V_{\text{Zn}}-\text{Zn}_i)^+$ tipli kompleks vakansiyalarla) bağlıdır;

6. p-Si/ $\text{Cd}_{0.4}\text{Zn}_{0.6}\text{O}$ qəfəs parametrlərinin uyğunsuzluğu ilə əlaqədar olan səth hallarının konsentrasiyası $N_d \approx 6 \times 10^{13} \text{sm}^{-3}$ təşkil edir və onlarda cərəyanın daşınması çoxpilləli tunel-emissiya mexanizminə tabedir;

7. $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}$ nazik təbəqələrinin optimal tərkibini ($x=0.6$), qalınlığını (400 nm), Tİ-nin mühitini (oksigen) və rejimini (600°C temperaturda 15 dəqiqə) seçməklə ətraf mühitə zərərsiz, 5.94% effektivliyə malik p-Si/ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}$ tipli fotoçeviricilər hazırlamaq mümkündür;

8. ZnO nazik təbəqələrində SİY-sı üsulu ilə müəyyən edilmişdir ki, əsas şüalanmanın dalğa uzunluğunun artması ilə ikinci harmonika signalı azalır, lakin nazik təbəqələrin qalınlığı artdıqca güclü harmonika signalı əldə edilə bilər.

Dissertasiya mövzusu üzrə çap olunmuş elmi işlər

1. Məmmədov, H.M., Məmmədova V.C. $\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$ nazik təbəqələrinin səth morfologiyasına katod çökdürmə potensialının təsiri //

Fizikanın müasir problemləri»nə həsr olunmuş «Opto-, nanoelektronika, kondensə olunmuş mühit və yüksək enerjilər fizikası» VII Respublika konfransının materialları, – Bakı: – 20 – 21 dekabr, –2013, – s. 31-34.

2. Məmmədov, H.M., Məmmədova, V.C. $Zn_{1-x}Cd_xO$ nazik təbəqələrinin optik xassələrinə və səth morfologiyasına katod çökdürmə potensialının təsiri // – Bakı: AJP Fizika jurnalı, – 2014, – s.12-16.

3. Məmmədov, H.M., Məmmədova, V.C., Rəsulov, E.A. $Zn_{1-x}Cd_xO$ nazik təbəqələrinin optik xassələrinə katod çökdürmə potensialının təsiri // «Fizikanın müasir problemləri»nə həsr olunmuş «Opto-, nanoelektronika, kondensə olunmuş mühit və yüksək enerjilər fizikası» VIII Respublika konfransının materialları, –Bakı: – 24 – 25 dekabr, – 2014, s.337-339.

4. Mamedov, H.M. Investigation of p-GaAs/n- $Cd_{1-x}Zn_xS_{1-y}Te_y / Cd_{1-x}Zn_xO$ heterojunctions deposited by electrochemical deposition / H.M.Mamedov, V.C.Mamedova, V.U.Mamedov [et al.] // Journal of optoelectronics and advanced materials. – 2015. Feb; 17, 1-2, – c. 67-73.

5. Mamedov, H.M., Mamedova, V.J., Ahmadova, Kh.M., Shamilova, Sh.A., Safarov, V.H., Garibov, G.I. Effect of deposition and heat treatment regimes on the electrical and photoelectrical properties of heterojunctions p-Si/ $Cd_{1-x}Zn_xO$ // BDU-nun Fizika Problemləri İnstitutunun yaradılmasının 10 illiyinə həsr olunmuş «Opto-, nanoelektronika, kondensə olunmuş mühit və yüksək enerjilər fizikası» Beynəlxalq konfransın materialları, – Bakı, – 25 – 26 dekabr, – 2015, – s.218-221.

6. Kasumova, R.J., Mamedov, H.M., Shamilova, Sh.A., Mamedova, V.C. Angular dispersion coefficient for $Ga_{0.4}Se_{0.6}$ at 6.45 mcm // Materials of 8th International Scientific Conference «Science and Society», – London: – 24-29 November, – 2015, – p. 43-46.

7. Mamedov, H.M., Ahmadova, Kh.M., Mamedova, V.J. Electrical and photoelectrical properties of heterojunctions p-Si/ $Cd_{1-x}Zn_xO$ // Journal of Qafqaz University – Physics, – Bakı: – 2016. V. 4, № 2, – s. 136-140.

8. Kasumova, R.J., Safarova, G.A., Mamedova, V.J. Phase effects at Second Harmonic Generation in zinc oxide, grown on glass substrate // International Journal of Engineering and Technology, – 2016. 5, № 9, – p. 7-13.

9. Kasumova, R.J. On increasing the conversion efficiency to second-harmonic for undoped and doped ZnO nanocomposites / R.J.Kasumova, G.A.Safarova, V.J.Mamedova [et al.] // International Journal of Engineering and Technology, – 2016. 6, № 5, – p. 27-32.

10. Kasumova, R.J., Kerimova, N.V., Mamedova, V.J. Influence of doping materials on third harmonic generation in zinc oxide nanocomposites // Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials, – 2017, 26, № 2, – p. 1750019-1-11.

11. Mamedov, H.M. Surface morphology effects in p-Si/Cd_{1-x}Zn_xO heterojunctions / H.M.Mamedov, A.Sh.Abdinov, V.J.Mamedova [et al.] // Bakı Universitetinin Xəbərləri, fizika-riyaziyyat elmləri seriyası, – Bakı: – 2017. №4, – p. 147-156.

12. Мамедов, Г.М., Мамедова, В.Дж. Электрические свойства Cd_{1-x}Zn_xO, электрохимически осажденных из растворов // Magistrantların və gənc tədqiqatçıların «Fizika və astronomiya problemləri» Beynəlxalq Elmi Konfransın materialları, – Bakı: – 24 – 25 may 2018, – s.168-172.

13. Mamedov, H.M. Effect of composition and heat treatment regimes on the electrical parameters of Cd_{1-x}Zn_xO films / H.M.Mamedov, K.Kordas, V.J.Mamedova [et al.] // – Baku: Journal of Low Dimensional Systems, – 2018. 2, №1, – p.28-31.

14. Mamedov, H.M. Photovoltaic performance of p-Si / Cd_{1-x}Zn_xO heterojunctions / H.M.Mamedov, S.I.Shan, V.J.Mamedova [et al.] // Photonics Letters of Poland, – 2018. 10, №1, – p. 26-28.

15. Mamedov, H.M. Nano-structure solar cells on the base of p-Si/Cd_{1-x}Zn_xO thin film heterojunctions / H.M.Mamedov, Kh.M.Ahmedova, V.J.Mamedova [et al.] // Journal of optoelectronics and advanced materials, – 2018. Sep-Oct; V. 20, № 9-10, – p. 468-473.

16. Mamedov, H.M., Kasumova, R.J., Mamedova, V.J. Electrical

properties of films $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}$ deposited by electrochemical way // Proceedings of International Conference of Young Scientists Problems of Physics and Astronomy. – Bakı, – 25 May, – 2018, – s. 91-94.

17. Məmmədova, V.C. $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}$ nazik təbəqələrinin elektrokimyəvi çökdürülmə üsulu ilə alınması, kristal qəfəs quruluşu və səth morfologiyası // Bakı Universiteti xəbərləri. Fizika-riyaziyyat elmləri seriyası, – 2019. №2, s. 144-152.

18. Məmmədova, V.C. $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}$ nazik təbəqələrinin elektrik və fotoelektrik xassələri // Pedaqoji Universitetin Xəbərləri. Riyaziyyat və təbiət elmləri seriyası, – 2019. №4, – s. 132-140.

Dissertasiyanın müdafiəsi **11 mart 2022-ci** il tarixində saat **15⁰⁰** Bakı Dövlət Universitetinin nəzdində fəaliyyət göstərən ED 2.19 Dissertasiya şurasının iclasında keçiriləcəkdir.

Ünvan: AZ 1148, Bakı şəh., Z.Xəlilov küç., 23, Bakı Dövlət Universiteti, Əsas bina, Elmi kitabxana.

Dissertasiya ilə Bakı Dövlət Universitetinin Elmi Kitabxanasında tanış olmaq mümkündür.

Dissertasiya və avtoreferatın elektron versiyaları Bakı Dövlət Universitetinin rəsmi internet saytında yerləşdirilmişdir.

Avtoreferat **04 fevral 2022-ci** il tarixində zəruri ünvanlara göndərilmişdir.

Çapa imzalanıb: **21.01.2022**
Kağızın formatı: **A5 (60×90 1/16)**
Həcm: **36 589 işarə**
Tiraj: **100 nüsxə**