

AZƏRBAYCAN MİLLİ ELMLƏR AKADEMİYASI
akademik H.M. ABDULLAYEV adına FİZİKA İNSTİTUTU

Əlyazması hüququnda

GÜLNAZ KAMAL qızı QƏHRƏMANOVA

**$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ÇOXQAT KVANT ÇUXURLU HETEROKEÇİDLƏRİN
ALINMASI VƏ OPTİK XASSƏLƏRİ**

2220.01 – yarımkəçiricilər fizikası

Fizika üzrə fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi
almaq üçün təqdim olunmuş dissertasiyanın

A V T O R E F E R A T I

BAKI -2016

Dissertasiya işi Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının H.M. Abdullayev adına Fizika İnstitutunda yerinə yetirilmişdir.

Elmi rəhbər:

Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru

R. B. Cabbarov

Rəsmi opponentlər:

Fizika üzrə elmlər doktoru

İ. S. Həsənov

Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor

E. M. Qocayev

Aparıcı təşkilat: Bakı Dövlət Universiteti, “Yarımkeçiricilər fizikası” kafedrası

Dissertasiyanın müdafiəsi “ **14** ” *dekabr* 2016-cı il saat **11⁰⁰** -da AMEA-nın H.M. Abdullayev adına Fizika İnstitutu nəzdində D.01.011 sayılı Dissertasiya Şurasının iclasında keçiriləcək.

Ünvan: AZ1143, Bakı ş. H. Cavid prospekti 131.

E-mail: director@ physics.ab.az.

Dissertasiya ilə Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyası H.M. Abdullayev adına Fizika İnstitutunun kitabxanasında tanış olmaq olar.

Avtoreferat “ ___ ” _____ 2016-cı ildə göndərilmişdir.

Dissertasiya Şurasının elmi katibi:

Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor

D.H. Arash

İŞİN ÜMUMİ XARAKTERİSTİKASI

Mövzunun aktuallığı. III-N yarımkeçirici birləşmələr müasir dövrdə optoelektronikada, xüsusi ilə infraqırmızı oblastdan ultrabənövşəyi oblasta kimi geniş dalğa uzunluğu oblastında işıq şüalandırma xassələrinə görə bərk cisim işıqlanmasında (BCI) istifadəsi geniş tədqiq olunan materiallardır. Bu dissertasiya işinin tədqiqat obyektı III-N birləşmələrindən ibarət optik cihazların aktiv oblastı olan $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ çoxqat kvant çuxurlu (ÇKÇ) heteroqəçidlərdir. Müasir dövrdə yüksək effektivli $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ kvant çuxurlu (KÇ) heteroqəçidlərin alınmasında bəzi məhdudiyyətlər mövcuddur. Belə ki, mavi oblasta işıq şüalandırın $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ KÇ-larının effektivliyi gözlənilən nəticəni versə də yaşıl şüalanma oblastında (500 nm-560 nm) bu heteroqəçidlərin effektivliyi kəskin aşağı düşür və bu problem “yaşıl oblast” və “effektivliyin düşməsi” kimi tanınır. Bu problemlərin aradan qaldırılması istiqamətində $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ KÇ-ları müasir dövrdə çox aktual tədqiq olunan mövzudur. InGaN əsaslı mavi işıq diodlarının (LED-lərin) tədqiqində əldə etdikləri nəaliyyətlərə görə Shuji Nakamura (ABŞ-Kaliforniya Universiteti), Isamu Akasaki və Hiroshi Amano (Yaponiya-Nagoya Universiteti) 2014-cü ildə Nobel mükafatı laureatları olmuşlar.

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ KÇ-larının kvant effektivliyinin aşağı düşməsinə səbəblərdən biri, GaN ilə InN birləşmələri arasındakı qəfəs sabitlərinin və istidən genişlənmə əmsallarının uyğunsuzluğudur. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ilə GaN arasındakı qəfəs sabiti KÇ-da indiumun faizi (x) artdıqca artır və KÇ daxilində gərilməyə, nəticədə bu da piezoelektrik effektinin artmasına səbəb olur. Beləliklə, elektronların və deşiklərin dalğa funksiyası qeyd edildiyi kimi bir-birinə nəzərən tamamilə sürüşür və nəticədə effektiv enerji zonası (qadağan olunmuş zonanın eni) E_g azalır. Qəfəs uyğunsuzluğu nəticəsində III-N yarımkeçirici birləşmələrində piezoelektrik və spontan polarizasiya sahələrinin yaranmasına səbəb olur. InGaN/GaN heteroqəçidlərdə InGaN ilə GaN arasındakı spontan polarizasiya da öz növbəsində daxili elektrik sahəsinin E_{sp} yaranmasına səbəb olur. Beləliklə, heteroqəçidlər daxilində InGaN laylarının gərilməsi nəticəsində piezoelektrik polarizasiya da daxili elektrik E_{pz} sahəsinin yaranmasına səbəb olur. Nəticədə keçirici zonadakı elektronların və valent zonasındakı deşiklərin dalğa funksiyasının bir-birini örtməsi azalır. Daxili elektrik sahəsi təsiri nəticəsində KÇ-larının qadağan olunmuş zonasının eninin kiçilməsinə və dalğa uzunluğunun qırmızı oblasta doğru dəyişməsinə gətirib çıxaran bu hadisə Kvant Məhdudlaşdırıcı Stark Effekti (KMSE)

adlanır. Bu çatışmazlıqları aradan qaldırmaq üçün heteroqeçidlərin yetişmə istiqamətini dəyişməklə KMSE təsirini aradan qaldırmaq mümkündür. Belə ki, ədəbiyyatlardan məlumdur ki, piezoelektrik sahəsinin təsiri c-istiqamətdə, yəni polyar {0001} istiqamətdə yüksəkdir. Lakin qeyri-polyar istiqamətdə piezoelektrik sahəsinin təsiri nəzərə alınmayacaq dərəcədədir. Yəni, nümunələrin polyar istiqamətdə yetişdirilməsindən yarım-polyar istiqamətə yetişdirilməyə keçdikcə daxili elektrik sahəsinin təsiri azalır. Eyni zamanda aktiv oblastda indium atomlarının faizini (x) dəyişməklə $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ KÇ-larının alınması bu mövzuda aktual tədqiqat istiqamətləridir. Belə ki, indiumun faizini dəyişməsi heteroqeçidlərin qadağan olunmuş zonasının eninin dəyişməsinə səbəb olur. Yuxarıda qeyd etdiyimiz kimi, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ kvant çuxurlarında indiumun miqdarını (x) artırıldıqda çuxurların qadağan olunmuş zonası daralır və lüminessenssiyanın dalğa uzunluğu uzun dalğalara doğru sürüşür, nəticədə yaşıl oblastda şüalananan yarımkeçirici materiallar almaq mümkün olur. Lakin, kvant çuxurunda indiumun miqdarının artırılması ilə InGaN kvant çuxuru ilə GaN baryer laylarının arasındakı qəfəs ölçülərinin uyğunsuzluğu da artır və keçid oblasta yaranan bu hadisə daxili elektrik sahəsi yaradır. Sadaladığımız bu uyğunsuzluq alınan strukturlarda layların ayrılma sərhəddində böyük miqdarda müxtəlif təbiətli defektlər yaradır və kristalın xassələrinin pisləşməsinə gətirir. Belə ki, valent zona ilə keçirici zonanın formasının dəyişməsi nəticəsində şüalanmasız keçidlərin sayı artır. Buna görə də, III-N birləşmələrinin enerji zonasında elektronların və deşiklərin dalğa funksiyasının bir-birinə nəzərən sürüşməsinə səbəb olan qəfəs parametrlərinin uyğunsuzluğunun və heteroqeçidlərdə piezoelektrik sahəsinin təsirinin azaldılması istiqamətində aparılan tədqiqatlar baxımından $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ heteroqeçidlərinin tədqiqi və bu birləşmələrdə kvant effektivliyinin artırılması aktual mövzudur.

Dissertasiya işinin məqsədi: $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ çoxqat kvant çuxurlu heteroqeçidlərin lüminessenssiya xassələrinin onların yetişdirilmə istiqamətlərindən və qəfəs parametrlərdən asılı olaraq öyrənilməsi, heteroqeçidlərin daxili kvant effektivliklərinin təyini və onlar əsasında optoelektronika üçün enerji effektivli işıq diodlarının effektivliyinin artırılması imkanlarının araşdırılmasıdır.

Qarşıya qoyulan məqsədə çatmaq üçün aşağıdakı məsələlər həll edilmişdir:

- $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ çoxqat kvant çuxurlu heteroqeçidlər Aixtron 200/RF-S horizontal reaktorunda yarım-polyar istiqamətində yetişdirilərək

tədqiq edilmiş və c-istiqamətdə yetişdirilən nümunələrlə müqayisəli şəkildə öyrənilmişdir.

- Tədqiq etdiyimiz strukturların aktiv oblastının yetişdirilməsində In-un axma dərəcəsini (mol/dəq) dəyişərək müxtəlif In miqdarlı (x,y) $In_xGa_{1-x}N/In_yGa_{1-y}N$ beşqat KÇ-lu heteroqeçidlər tədqiq edilərək optimal yetişmə rejimi tapılmışdır.
- R-müstəvi saffir altlıq üzərində MOVPE və HVPE üsulu ilə yarımolyar {11-22} GaN strukturları yetişdirilmiş və alınan 2 mkm qalınlıqlı {11-22} GaN üzərində $In_xGa_{1-x}N/In_yGa_{1-y}N$ heteroqeçidlər yetişdirilərək tədqiq edilmişdir.
- Yaşıl oblastda yüksək effektivli KÇ-larının alınması üçün nümunələr müxtəlif yetişmə şəraitində yetişdirilərək (yetişmə temperaturu, III/N nisbəti, kütlə axın dərəcəsi və.s) optimal yetişmə rejimi tapılmışdır.
- $In_xGa_{1-x}N/GaN$ strukturlu nümunələri Skanedicci Elektron Mikroskopu (SEM), Atom Qüvvə Mikroskopu (AQM), Transmissiya Elektron Mikroskopu (TEM) vasitəsi ilə analiz edilmiş və katodalüminessensiya (KL), elektrolüminessensiya (EL), fotolüminessensiya (FL) xarakteristikaları öyrənilmişdir. Fotolüminessensiya ölçülərinə əsasən daxili kvant effektivlikləri temperaturdan və şüalandırıcının gücündən asılı olaraq təyin edilmişdir.
- Yetişdirilən kvant çuxurları əsasında c-{0001} və yarımolyar {11-22} istiqamətdə $In_xGa_{1-x}N/GaN$ əsaslı işıq diodları (LED) yetişdirilmiş, nümunələrin Holl ölçüləri tədqiq edilmişdir. Tədqiq edilən LED nümunələrdə şüalanmanın çıxış gücü tapılmışdır və xarici kvant effektivliyi təyin edilmişdir.
- Tədqiq edilən $In_xGa_{1-x}N/GaN$ çoxqat kvant çuxurlu heteroqeçidlər əsaslı LED nümunənin $Y_3Al_2O_{15}:Ce^{3+}$ fosforu ilə kombinasiyasından ağ işıq diodlarının alınmış və elektrik xassələri öyrənilmişdir.

Tədqiqat obyektləri və üsulları. Tədqiqat obyektini kimi aşağıdakı nümunələr götürülmüşdür:

- Saffir altlıq üzərində polyar {0001} və yarımolyar {11-22} istiqamətdə yetişdirilmiş $In_xGa_{1-x}N/GaN$ (0.1; 0.2; 0.4; 0.6) çoxqat kvant çuxurlu heteroqeçidlər;

- Saphir altlıq üzərində yarımolyar {11-22} istiqamətdə yetişdirilmiş $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ ($x=0.08, 0.1; 0.15; 0.2; 0.3; 0.6$; $y=0.01; 0.02; 0.03$) çoxqat kvant çuxurlu heteroqeyidlər;
- Polyar və yarımolyar istiqamətdə yetişdirilmiş $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ ($x=0.2; 0.4; 0.6$) beşqat kvant çuxurlu mavi və yaşıl işıq diodları.

Tədqiq olunan nümunələr Almanyanın Ulm Universitetinin Optoelektronika İnstitutunda MOVPE (Metal Orqanik Buxar Faza Epitaksiya) qurğusu ilə Aixtron-200/4 RF-S reaktorunda yetişdirilmişdir. Tədqiqat üsulları zamanı ən müasir tədqiqat qurğularından istifadə olunmuşdur. Tədqiqat üsulları kimi rentgenfaza analizi (HRXRD), Skanedici Elektron Mikroskopu (SEM), Atom Qüvvə Mikroskopu (AQM), Transmissiya Elektron Mikroskopu (TEM) istifadə edilmişdir. Həmçinin nümunələrin katodalüminessensiya (KL), elektrolüminessensiya (EL), temperaturdan asılı olaraq geniş temperatur intervalında (10 K-300 K) fotolüminessensiya (FL) xarakteristikaları öyrənilmişdir. FL xarakteristikalarına əsasən tədqiq olunan nümunələrin kvant effektivlikləri hesablanmışdır. Fotolüminessensiya ölçülərinə əsasən daxili kvant effektivlikləri temperaturdan və şüalandırıcının gücündən asılı olaraq təyin edilmişdir. Həmçinin nümunələrin daxilindəki yükdaşıyıcıları təyin etmək məqsədi ilə Holl ölçmələri aparılmışdır və alınan nümunələrdən yüksək effektivlikli yaşıl və mavi işıq diodlarının hazırlanmasının mümkünlüyünün yoxlanılması üçün p- və n- kontaktlarının nümunəyə yerləşdirmək məqsədi ilə Elektron Şüa Buxarlanma metodlarından istifadə edilmişdir. Alınmış mavi və ağ işıq diodunun işıq parametrləri spektrofotokalorimetr və GO-2000 Ganiofotometri istifadə edilərək müəyyən edilmişdir.

Elmi yeniliklər. Dissertasiyada ilk dəfə:

- Dalğa uzunluğunun 500-530 nm intervalında (yaşıl oblastda) şüalanan yarımolyar {11-22} istiqamətdə yetişdirilən $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ kvant çuxurlu heteroqeyidlərdə kvant çuxurları ilə baryer laylar arasındakı keçid interfeysləri yaxşılaşdırılmış və bu elmi yenilik TEM analizləri vasitəsi ilə sübut edilmişdir.
- Yarımolyar $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ KÇ-lu heteroqeyidlərində $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ KÇ ilə $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ baryer layları arasında qəfəs uyğunsuzluğunun azaltmaqla strukturların kristallik keyfiyyətlərinin yüksəldilməsi və səth homogenliyinin artırılması müşahidə edilmişdir.
- InGaN KÇ ilə GaN baryer layları arasındakı qəfəs uyğunsuzluğunu azaltmaq məqsədi ilə GaN baryer layına az miqdarda In əlavə

etməklə yetişdirilən $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ ($x=0.1, 0.15, 0.2, 0.3$; $y=0.01, 0.02, 0.03$) çoxqat kvant çuxurlu heteroqeyidlərin daxili kvant effektivliyinin 20% artırılmasına nail olunmuşdur.

- Yetişmə şəraitini və heteroqeyidlərdəki indiumun miqdarını dəyişməklə tədqiq olunan beşqat $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ KÇ-larının FL intensivliyinin aşağı temperaturda (15 K) ~12 dəfə, otaq temperaturuna yaxın temperaturlarda (300 K) isə ~3 dəfə artırılmasına nail olunmuşdur.
- Yarımpolyar {11-22} $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ heteroqeyidlərindən ibarət LED strukturu ilə polyar {0001} $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ heteroqeyidli LED strukturlarının xarici kvant effektivliklərinin müqayisəsindən məlum olmuşdur ki, cərəyan sıxlığının artması ilə polyar istiqamətdə yetişdirilən nümunələrdə effektivliyin düşməsi 60% olduğu halda bizim tədqiq etdiyimiz nümunələrdə bu düşmə 25 % - dir.

İşin praktiki əhəmiyyəti: III-N yarımqeyirici birləşmələrin infraqırmızı (İQ) oblastdan ultrabənövşəyi (UB) oblast sərhəddinə kimi şüalanma qabiliyyətinə malik olması müasir dövrdə optoelektronikada bir çox yarımqeyirici cihazların tətbiqində geniş istifadə olunmasına gətirib çıxarmışdır. Belə ki, bərk cisim işıqlanmasında $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ əsaslı işıq diodları (LED) praktikada geniş tətbiq olunmaqdadır. Müasir dövrdə dünyada istifadə olunan enerjinin nəzərə çarpacaq faizi işıqlanmaya sərf olunur. Dünyada bu enerji sərfiyyatını azaltmaq üçün enerji effektivliyi işıq diodlarından istifadəyə keçilir. LED işıqlanma sistemlərinə keçid dünya üzrə işıqlanmaya olan tələbatı (hal-hazırda dünya üzrə enerjiyə olan tələbat 10 TVt, 2050-ci il üçün 30TVt gözlənilir) kifayət qədər azaldacaqdır. Bu elmi istiqamət üzrə məlum “yaşıl oblast” problemi və umümiyyətlə “effektivliyin düşməsi” problemlərinin həlli həm elmi həm də texnoloji baxımdan aktual məsələlərdəndir. Bu baxımdan $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ kvant çuxurlu heteroqeyidlər tədqiqi dissertasiya mövzusunun aktuallığını göstərir.

InGaN/GaN heteroqeyidli çoxqat kvant çuxurlarının ən önəmli praktiki əhəmiyyətlərindən biri də aktiv oblastı InGaN olan yüksək effektivlikli günəş elementlərinin alınmasıdır. Bundan başqa $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ əsasında lazer diodları (LD), detektorlar, sensorlar geniş tədqiq və tətbiq olunmaqdadır.

Müdafiyə çıxarılan əsas elmi müddəalar:

1. Yetişmə istiqamətlərinin polyar və yarım-polyar istiqamətdə olmasından asılı olaraq $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ KÇ-lu heteroqəçidlərin xassələrinin kəskin dəyişməsi müşahidə olunur. Bunu nəzərə alaraq sapfir altlığın səth strukturlarını və $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ KÇ-lu heteroqəçidlərin yetişdirilmə istiqamətlərini fotolitoqrafiya üsulu ilə dəyişməklə şüalanmanın dalğa uzunluğunun 500-530 nm oblastında olan kvant çuxurlu heteroqəçidlərin daxili kvant effektivliyinin dəyişməsi;
2. Sapfir altlıq üzərində yetişdirilən $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ heteroqəçidlərində InGaN kvant çuxurları ilə GaN baryer layları arasındakı qəfəs uyğunsuzluğunun KÇ-lu layda indiumun konsentrasiyasından asılı olaraq azaldılması;
3. Şüalanmanın dalğa uzunluğunu (500 nm) sabit saxlayaraq yetişdirilən {11-22} $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ KÇ-nun FL intensivliyinin artırılması üçün kvant çuxurları və baryer laylar arasında qəfəs uyğunsuzluğunu azaltmaqla polyarizasiya sahəsinin təsirinin azaldılması;
4. Yarım-polyar {11-22} $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ KÇ-larının səth morfologiyasından KÇ üçün dominant dalğa uzunluğunun 500 nm olduğu və baryer laylarda 1% In atomları olan strukturun daxili kvant effektivliyinin GaN baryer laylı struktura nəzərən yüksək olması;
5. Heteroqəçidlərin qalınlığını təyin edən ölçmələrə əsasən KÇ-nun və baryer layın qalınlığının təyini; {11-22} $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ KÇ-larında yaranan defektlərin və dislokasiyaların müşahidə edilməsi və azaldılması; Rekombinasiya növlərini nəzərə alaraq ABC modelinə (rekombinasiya dərəcələrinə) və FL-nın temperatur asılılığına əsasən aşağı və yuxarı temperatur intervalında nümunələrin daxili kvant effektivliyinin (DKE) hesablanması;
6. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ KÇ-ları r-sapfir altlıq üzərində MOVPE və HVPE üsulu ilə yetişdirilmiş {11-22} GaN üzərində eyni şəraitdə yetişdirilərək 500 nm dalğa uzunluğu oblastında şüalanmanın alınması və müqayisəli xarakterizə edilməsi.
7. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ əsasında polyar {0001} və yarım-polyar {11-22} istiqamətlərdə mavi/yaşıl işıq diodların xarakteristikaları və onların $\text{YAG}:\text{Ce}^{3+}$ ($\text{Y}_3\text{Al}_2\text{O}_{15}:\text{Ce}^{3+}$) fosforu ilə kombinasiyasından ağ işıq diodlarının alınması və xarici kvant effektivliyinin ölçülməsi;

8. Yarım-polyar $\{11-22\}$ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ beşqat KÇ əsasında alınan LED lüminessensiya effektivliyinin təyini;

Tədqiqatın nəticələrinin aprobeşiyası. Dissertasiya işinin əsas nəticələri “7th Led&Led Lighting conference” (Turkey, 2015), “Materials international scientific conference for the modern scientific and technological research and energy issues” (Sumgait State University, 2015) beynəlxalq konfranslarında məruzə və müzakirə edilmişdir.

Nəşrlər. Dissertasiya mövzusu üzrə 9 elmi iş (2 məqalə beynəlxalq konfrans materialı, 6 məqalə Respublikada nəşr olunan jurnallarda, 1 məqalə 1.6 impakt faktorlu xarici jurnalda (PSSb),) nəşr olunmuşdur. Dissertasiya mövzusunə aid əsas nəşrlərin siyahısı avtoreferatda göstərilmişdir.

Dissertasiyanın strukturu və həcmi. Dissertasiya işi girişdən, beş fəsildən, əsas nəticələr və ədəbiyyat siyahısından ibarətdir. Dissertasiyanın həcmi 64 ədəd şəkil və 12 ədəd cədvəldən, həmçinin 94 adda istinad olunmuş ədəbiyyat siyahısından ibarət olmaqla 146 kompüter çap səhifəsindən ibarətdir.

İşin qısa məzmunu.

Girişdə mövzunun aktuallığı, dissertasiyanın elmi məqsədi, onun elmi və praktiki əhəmiyyəti, əldə olunan yeniliklər, müdafiəyə çıxarılan əsas müddəalar, işin aprobeşiyası, quruluşu və qısa xülasəsi şərh olunmuşdur.

Birinci fəsildə dissertasiya işinin yerinə yetirilməsində istifadə olunan III-V qrup yarımkeçirici heterostrukturların xassələri və kristal strukturları haqqında ədəbiyyat xülasəsi göstərilmişdir və III-V qrup ikiqat birləşmələri üçün tədqiqatçıların təcrübələrindən və hesablamalardan aldıkları nəticələr qeyd olunmuşdur. Göstərilmişdir ki, ideal vurtsit strukturda qəfəs sabitləri arasındakı nisbət $c/a=1.633$ -dür və III-N yarımkeçirici ikiqat birləşmələr geniş qadağan olunmuş zonaya malik birləşmələrdir. Ümumilikdə kristallarda yetişmə istiqamətləri polyar, yarım-polyar və qeyri-polyar olmaqla üç yerə ayrılır. Polyar istiqamət heksaqonal kristal strukturunda vertikal istiqamət olub, $c-\{0001\}$ istiqamətidir. Yarım-polyar istiqamətlər isə polyar və qeyri-polyar müstəvilər (istiqamətlər) arasında müəyyən bucaq təşkil edir ($0^\circ < \alpha < 90^\circ$). Heksaqonal simmetriyalı qəfəs elementi üçün kristal istiqamətlər və müstəvilər dörd Miller indeksi (hkil) vasitəsi ilə təsvir olunmuşdur və $i=-(h+k)$ kimi təyin olunur. Bu dissertasiyada istifadə olunan mürəkkəb

yarımkeçirici birləşmələr olan III-N materiallar düz keçid materiallardır. Düz keçid nəticəsində rekombinasiya edən elektronlar birbaşa foton şüalandırır.

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ heteroqəçidlərin yetişdirilməsi üçün qəfəs parametrlərinin uyğunluğu baxımından ən uyğun altlıq olaraq sapfir seçilmişdir. Sapfir altlıq ilə GaN arasında qəfəs uyğunsuzluğu təxminən 14%-dir. Tədqiq olunan heteroqəçidlər daxilində pizoelektrik sahəsinin təsirini azaltmaq məqsədi ilə yetişdirilmə istiqaməti olaraq yarımolyar istiqamət seçilmişdir. Yarımolyar- $\{11-22\}$ istiqamətdə kvant çuxurlarının yetişdirilməsi üçün mümkün metodlar araşdırılmışdır.

Yüksək şüalanma effektivinə malik InGaN/GaN ÇKÇ-lu heteroqəçidlərin alınması üçün şüalanmalı rekombinasiyanın yüksək olmasına mane olan bir neçə problem, polyarizasiya, gərilmə, qəfəs sabitləri arasındakı uyğunsuzluq, termik genişlənmə əmsalının uyğunsuzluğu və s. ətraflı verilmişdir. İndiumun miqdarının dəyişməsi ilə $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ kvant çuxurlarının qəfəs parametrlərinin və qadağan olunmuş zonasının dəyişməsi müzakirə edilmişdir. Belə ki, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ kvant çuxurlu heteroqəçidlərdə Vegard qanununa əsasən indiumun miqdarının artması ilə qəfəs parametrləri artır, qadağan olunmuş zonanın eni isə azalır.

İkinci fəsildə $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ kvant çuxurlu (KÇ) heteroqəçidlərin müasir yetişdirilməsi metodları olaraq dissertasiya işinin yerinə yetirilməsində istifadə olunan MOVPE (Metal Orqanik Buxar Faza Epitaksiyası) və HVPE (Hidrogen Buxar Faza Epitaksiyası) metodları şərh edilmişdir. Həmçinin nümunənin polyar və yarımolyar istiqamətlərdə yetişdirilməsinin nümunənin optik xassələrinə təsiri şərh olunmuşdur. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ birləşmələrinin müxtəlif istiqamətlərdə yetişdirilməsi üçün bu işdə istifadə olunan müasir fotolitoqrafiya və aşınma metodları ilə sapfir altlığın hazırlanma prosesləri geniş təsvir edilmişdir. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ KÇ-larının yarımolyar $\{11-22\}$ müstəvisində yetişdirilməsi üçün r-sapfir altlıq üzərinə müasir fotolitoqrafiya üsulu tətbiq edilərək altlığın hazırlanması xarakterizə edilmişdir. c-müstəvi $\{0001\}$ sapfir altlıq ilə $57,6^0$ bucağı təşkil edən yarımolyar r-müstəvi $\{10-12\}$ sapfir altlığın səhtinə müasir üsullar ilə negativ fotorezist əlavə edilmiş və növbəti mərhələdə Reaktiv İon Aşınma metodu ilə qeyd olunan bucağın $58,4^0$ olmasına nail olunmaqla sapfir altlıq yarımolyar $\{11-22\}$ strukturların yetişdirilməsi üçün hazırlanmışdır. Belə ki, r-müstəvi sapfir c-müstəvisinə nəzərən $57,6^0$ bucaq təşkil etdiyi halda yarımolyar $\{11-22\}$ müstəvi c-müstəviyə nəzərən $58,4^0$ bucaq təşkil edir. Qeyd edək ki, yarımolyar $\{11-22\}$ sapfir altlıq çox az tapılan altlıq materialdır, buna görə də $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ kvant çuxurunun

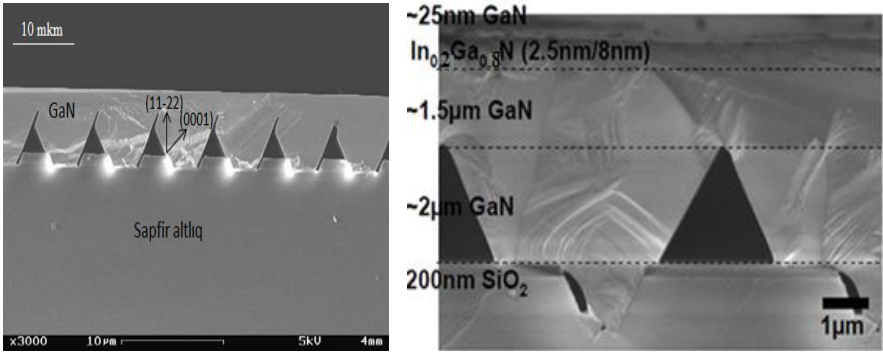
yetişdirilməsindən əvvəl r-müstəvi sapfir altlıq üzərinə fotolitoqrafiya üsulu tətbiq edilir. c- $\{0001\}$ istiqamətində yetişdirilməni aradan qaldırmaq üçün istifadə olunan SiO_2 layının altlığın səthinə çökdürülmə metodu qeyd edilmişdir. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ çoxqat kvant çuxurlarından ibarət LED strukturlarının elektrolüminessensiyasını xarakterizə etmək üçün nümunənin üzərinə, n-GaN layına n-kontakt, p-GaN layına isə p-kontaktının çökdürülməsi mərhələsi təsvir edilmişdir. Alınan $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ beşqat kvant çuxurlu nümunələrin elektrolüminessensiya xassələrinin öyrənilməsi üçün p-GaN və n-GaN laylarına omik kontaktların yerləşdirilməsi metodları qeyd edilmişdir.

Üçüncü fəsildə r-müstəvi sapfir altlıq üzərində MOVPE üsulu ilə yarımolyar 2 mkm qalınlıqlı $\{11-22\}$ GaN nümunə Aixtron-200/4 RF-S reaktorda standart amonyak (NH_3), trimetilalüminium (TMAl) və trimetilqallium (TMGa), istifadə etməklə yetişdirilmişdir. Yetişmə prosesində altlıq ilə GaN arasındakı qəfəs uyğunsuzluğunu azaldaraq dislokasiya sıxlığının qarşısının almaq üçün altlığın səthinin SiO_2 ilə örtülməyən hissəsində 20 nm qalınlıqlı AlN və daha sonra SiN özək laylarının yetişdirilməsi şərh edilmişdir. AlN layının rolu sapfir altlıq ilə 3-3.5 mkm qalınlıqlı GaN layı arasındakı dislokasiyaların sayının azaldılmasıdır. Belə ki, AlN layının çökdürülməsi ilə dislokasiyaların sayı $10^{11}-10^{12} \text{ sm}^{-1}$ -dən $10^9-10^8 \text{ sm}^{-1}$ -ə kimi azaldılmışdır. AQM analizlərinə əsasən GaN strukturunun səth morfoloji analizləri aparılmış və nümunələrin nahamarlıqları 20-22 nm olduğu müəyyən edilmişdir. Yarımolyar istiqamətdə yetişdirilən kvant çuxurlu heteroqəçidlərdə qəçidlər arasında və səth boyunca defektlər gözlənilən olduğundan bu işdə tədqiq olunan $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ və $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ kvant çuxurlu heteroqəçidləri üçün nahamarlığın bu qiyməti yaxşı nəticə hesab olunur. Kvant çuxurlarının sayının artırılması ilə yetişdirilən nümunələrin lüminessensiya intensivliyi də artır. Lakin, kvant çuxurlarının sayının müəyyən qiymətindən sonra intensivlik kəskin aşağı düşür. Bu da ÇKÇ-lu heteroqəçidlərdə defektlərin və dislokasiya sıxlıqlarının sayının artması ilə izah olunur və kvant çuxurlarının optimal qiyməti olaraq beşqat $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ tədqiq edilmişdir.

MOVPE üsulu ilə Aixtron-200/4 RF-S reaktorda standart trietilqallium (TEGa) və amonyak (NH_3) ilə birlikdə trimetilindium (TMIn) istifadə edilməklə 500 nm dalğa uzunluğunda şüalanan nümunələr alınması üçün indiumun miqdarı 20% olan yüksək kristallik keyfiyyətli yarımolyar $\{11-22\}$ $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ beşqat KÇ-lu heteroqəçidlər yetişdirilməsinə nail olunmuşdur. Sadalanna bu nümunə optimal rejimdə yetişdirilən nümunə

hesab olunur. Yarımpolyar- $\{11-22\}$ GaN strukturunun və həmin GaN layının üzərində yerləşən $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ beşqat KÇ-lu heterostrukturun eninə kəsik oblastından SEM analizləri aparılmışdır (şəkil 1).

Nümunələrin FL xassələri həyəcanlandırıcı mənbə olaraq 325 nm He-Cd lazeri istifadə etməklə geniş temperatur (14 K-300 K) intervalında tədqiq edilmişdir. FL xarakteristikasından alınan nəticələrə əsasən nümunələrin şüalanmasının dominant dalğa uzunluğu 500 nm təşkil edir və baryer layının qalınlığı 8 nm olan nümunələr yüksək şüalanma intensivliyi nümayiş etdirmişdir (şəkil 2a-2b). Laylar arasındakı qəfəs uyğunsuzluğunu azaltmaq üçün şüalanmasının dalğa uzunluğunu sabit (500 nm) saxlamaqla baryer laya indium əlavə edilərək $\{11-22\}$ $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ ÇKÇ-lu heteroqəçidlər tədqiq edilmiş və müəyyən edilmişdir ki, baryer layda 1% indium olan nümunələrin FL intensivliyi baryer layları GaN olan nümunələrə nisbətən 17 K- temperaturda 10-12 dəfə, otaq temperaturunda isə 2-3 dəfə yüksəkdir (şəkil 2a-2b)



Şəkil 1. Yarımpolyar- $\{11-22\}$ GaN strukturunun (a) və $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ beşqat KÇ-lu heteroqəçidlərin eninə kəsik oblastından aparılan SEM analizləri.

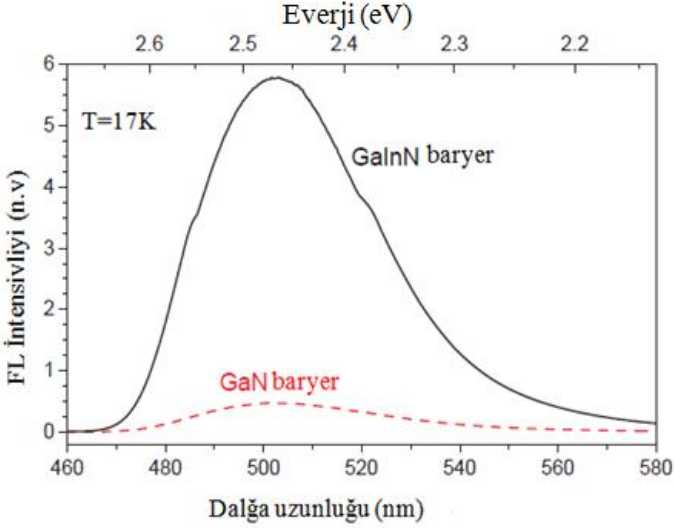
Tədqiq olunan nümunələrdə kvant çuxurları ilə baryer laylar arasındakı qəfəs parametrləri arasındakı fərq indiumun miqdarından asılı olaraq hesablanmışdır. $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ heteroqəçidli nümunə üçün kvant çuxurları və baryer laylar arasındakı qəfəs parametrlərini dəyişmək məqsədi ilə $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ heteroqəçidli nümunə yetişdirilərək Vegard qanununa əsasən qəfəs parametrləri hər iki nümunə üçün hesablanmışdır. Kvant çuxurlarında 15%, baryer laylarda isə 1% indium

otomları olan nümunədə kvant çuxuru ilə baryer lay arasındakı fərq əvvəl qeyd edilən nümunəyə nəzərən 30% azaldılmışdır. Nəticədə, $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ beşqat kvant çuxurlu heteroqeçidi 20% daha çox effektivlik nümayiş etdirmişdir.

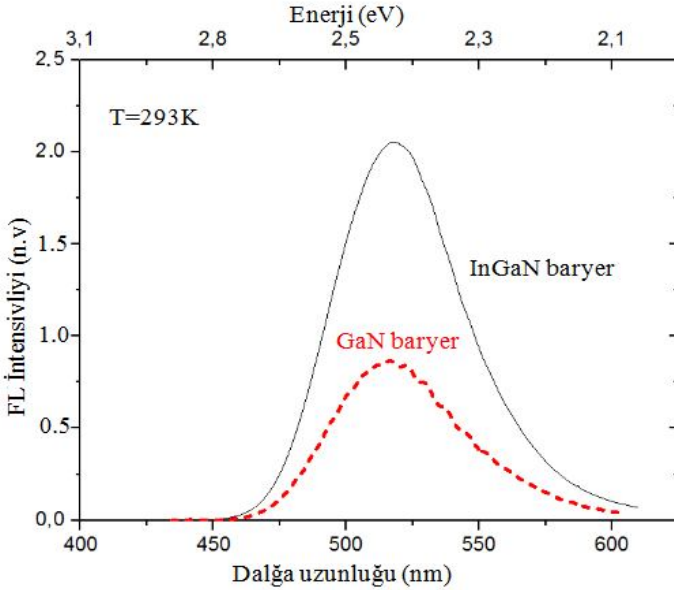
Bundan əlavə nümunələrin rentgen difraksiya və katodalüminessensiya (KL) xarakteristikaları öyrənilmiş, SEM və TEM analizləri aparılmışdır. 10 K temperaturda aparılan KL ölçülərindən $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ KÇ-lu heteroqeçidlərin intensivliyinin $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ KÇ-lu heteroqeçidlərinə nisbətən ~3 dəfə yüksək olması müşahidə edilmişdir.

Yarımpolyar {11-22} $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ və $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ beşqat KÇ-lu heteroqeçidlərin daxili kvant effektivliyi FL intensivliyinin temperaturdan asılılığına və rekombinasiya mexanizmlərinə (ABC modelinə) əsasən təyin edilmişdir. ABC modelinə görə InGaN/GaN əsaslı birləşmələrin şüalanma intensivliyinə və DKE-nə təsir edən üç rekombinasiya: şüalanmalı rekombinasiya, Auger rekombinasiyası və Şokley-Read-Hall (ŞRH) rekombinasiyası mövcuddur. Şokley-Read-Holl və ya tələ-yardımcı rekombinasiya halında ilk öncə elektronlar daha sonra dəşiklər defektlərin və aşqar atomlarının sayəsində qadağan olunmuş zona aralığındakı enerji səviyyələrini tərəfindən tutulur. Şokley-Read-Holl modelinə əsasən şüalanmasız rekombinasiya defektlərlə əlaqələndirilir. Bu zaman elektronun enerjisinin itirilməsi nəticəsində fononlar yaranır. Auger rekombinasiyası halında rekombinasiya olunan elektronların enerjisinin elektronların və ya dəşiklərin kinetik enerjisinə çevrilməsi sayəsində valent zonada elektronlar birbaşa dəşiklərlə neytrallaşır. Həyəcanlandırıcı mənbə kimi şüalanma spektrinin dalğa uzunluğu 405 nm olan mavi lazerdən istifadə edilərək KÇ-larının otaq temperaturunda FL intensivlikləri ölçülmüşdür. Lazərə tətbiq olunan cərəyanı 55mA-dən 195 mA-ə kimi hər 5 mA intervalında dəyişərək lazer şüasının (həyəcanlandırıcının) gücündən asılı olaraq nümunələrin FL intensivliyi ölçülmüşdür (şəkil 2c). Beləliklə alınmış ayrılərə əsasən FL intensivliyinin həyəcanlandırıcının (lazerin) gücündən asılı olaraq dəyişməsinin xətti olaraq artması müşahidə edilmişdir (şəkil 2c). Bu qiymətlərə əsasən 3.2 düsturundan istifadə edilərək DKE hesablanmışdır. Müəyyən edilmişdir ki, DKE-nin $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ beşqat KÇ-lu heteroqeçidləri üçün alınan qiyməti $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ beşqat KÇ-lu heteroqeçidlərinə nisbətən 20% yüksəkdir. Aparılan ölçmələr göstərmişdir ki, baryer layda 1% In miqdarı ilə yetişdirilən $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ 5 qat KÇ-ları üçün şüalandırıcının (lazerin) aşağı gücündə DKE maksimum qiymət olaraq təxminən 100%-ə

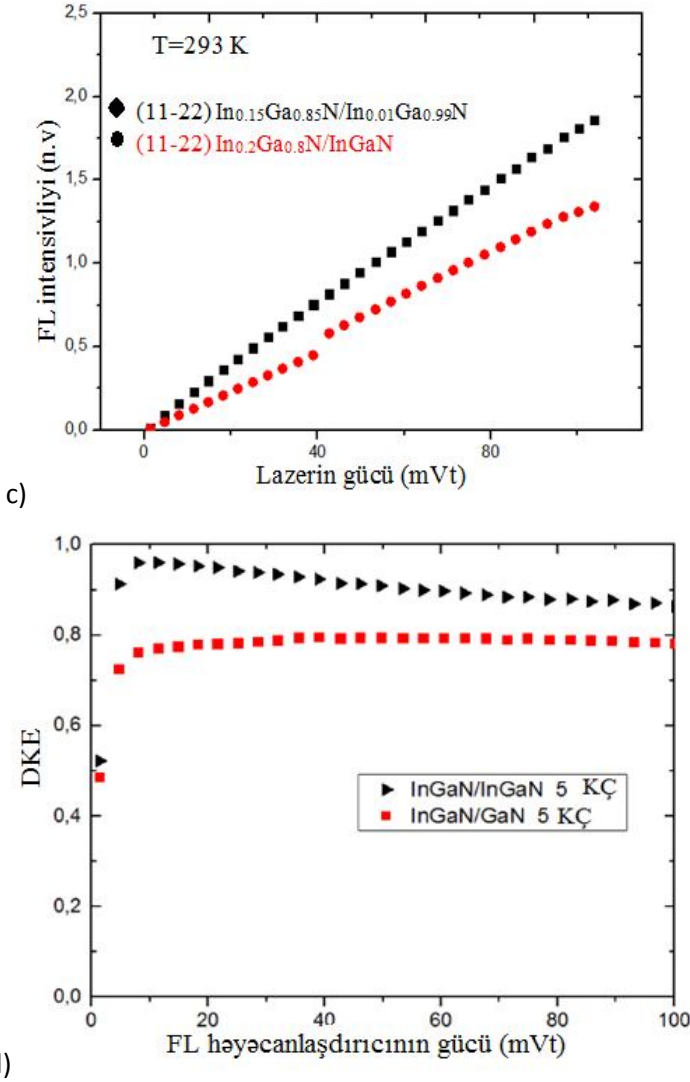
yaxınlaşmışdır və lazerin şüasının gücünün artması ilə 85%-dək azalır (şəkil 3.17-qara əyri). $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ KÇ-ları şüalandırıcının aşağı gücündə $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ KÇ-na nisbətən 20% aşağı DKE-nə malik olaraq təxminən 75% olmuşdur (şəkil 3.17-qırmızı əyri).



a)



b)



Şəkil 2. Yarımpolyar-{11-22} In_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN (qırıq-qırıq xətlə əyri) və In_{0.15}Ga_{0.85}N/In_{0.01}Ga_{0.99}N (bütöv xətlə əyri) beşqat KÇ-lu heteroqəidlərin 17 K-də (a) və otaq temperaturunda (b) fotoluminessensiya xassələri. Həmin nümunələrin FL intensivliyinin (c) və daxili kvant effektivliyinin (d) müqayisəli şəkildə həyəcanlaşdırıcı lazerin gücündən asılılığı.

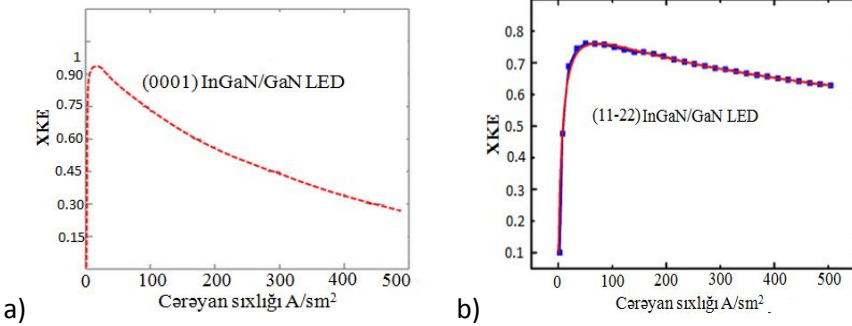
Dördüncü fəsildə HVPE və MOVPE üsulu ilə yetişdirilmiş ayrı-ayrı {11-22} GaN üzərinə əvvəlki fəsildə yetişdirilən nümunələr üçün tapılmış optimal yetişmə rejimi tətbiq edilərək $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/(\text{In})\text{GaN}$ ÇKÇ-ları yetişdirilmiş və öyrənilmişdir. Nümunələrin aşağı temperaturda (10 K) aparılan katodalüminessensiya xassələrindən şüalanma spektrinin intensivliklərinin MOVPE üsulu ilə alınan hər iki nümunə üçün HVPE üsulu ilə alınaraq xarakterizə edilən digər iki nümunələrdən daha yüksək olması müşahidə edilmişdir. Səfir üzərində HVPE üsulu ilə yetişdirilən {11-22} GaN təbəqəsi üzərində yetişdirilərək tədqiq edilən 5 qat {11-22} $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ KÇ ilə $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ KÇ-nun FL xassələri müxtəlif temperaturlarda xarakterizə edilmişdir. Temperatur fərqi təxminən 20 K olmaqla 300 K-dən 17 K-nə kimi ayrı-ayrı temperaturlarda aparılan FL ölçmələri göstərir ki, uyğun temperaturlarda yarımolyar-{11-22} $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ KÇ-larının FL intensivliyi yarımolyar-{11-22}- $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ KÇ-larının intensivliyindən 2-3 dəfə yüsəkdir. Eyni ilə, yarımolyar-{11-22} $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ heretokeçidli KÇ-ları yarımolyar-{11-22} $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{GaN}$ KÇ-larına nisbətən daha yüksək (~3 dəfə çox) KL şüalanma intensivliyinə malikdir.

Beşinci fəsildə FL xarakteristikalarından alınan şüalanmasının dominant dalğa uzunluğu 500 nm olan 5 cüt {11-22} $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ və {0001} $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}/\text{GaN}$ KÇ-lu işıq diodları (LED) yetişdirilərək xarakterizə olunmuşdur. LED strukturunda p-GaN və n-GaN laylarının alınması üçün yetişdirilmə zamanı uyğun olaraq $\text{Mg}(\text{C}_2\text{H}_5)_3$ və SiH_4 istifadə edilmişdir. LED strukturlu nümunələr yetişdirildikdən sonra çökdürülmə üsulu ilə GaN:Si layına n-kontakt GaN:Mg layına isə p-kontakt olaraq {0001} $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}/\text{GaN}$ ÇKÇ-lu LED nümunəsinə Au, {11-22} $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ ÇKÇ-lu LED nümunəyə isə In kontaktları yerləşdirilmişdir. Şüalanmanın dalğa uzunluğunu sabit saxlamaq (470-500 nm) məqsədi ilə alınan yarımolyar $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ və polyar $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}/\text{GaN}$ beşqat kvant çuxurlu işıq diodlarının (LED nümunələrin) Holl ölçüləri və elektrolüminessensiya xassələri tədqiq edilmişdir.

Holl ölçüləri vasitəsi ilə {11-22} $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ ÇKÇ-lu LED strukturun n-GaN layındakı yükdaşıyıcıların konsentrasiyası $5 \times 10^{18} \text{ sm}^{-3}$, p-GaN layında konsentrasiyası $1.2 \times 10^{17} \text{ sm}^{-3}$, xüsusi müqavimətin 2.5 Om·sm olması təyin edilmişdir. Bundan əlavə, fotolüminessensiyasının dalğa uzunluğunu sabit (500 nm) saxlamaqla yetişdirilən yarımolyar-{11-22} $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ və polyar-{0001} $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}/\text{GaN}$ beşqat KÇ-lu heterokeçidlərdən ibarət LED nümunələrin otaq temperaturunda volt-ampere xarakteristikaları aparılmış və uyğun olaraq 2.5 V və 3.9 V gərginliklərdə

cərəyanın keçdiyi müəyyən edilmişdir. Otaq temperaturunda aparılan elektrolüminessensiya xassələrindən polyar- $\{0001\}$ $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}/\text{GaN}$ və yarım-polyar- $\{11-22\}$ $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ ÇKÇ LED nümunəsi üçün şüalanmanın dominant dalğa uzunluğu uyğun olaraq, 470 nm və 465 nm olduğunu müşahidə edilmişdir. $\{11-22\}$ $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ ÇKÇ-lu LED-in elektrolüminessensiya xassələrinə əsasən 20 mA cərəyanda şüalanmanın çıxış gücü 90 mkVt, 70mA cərəyanda isə çıxış gücü artaraq 250 mkVt qiymət almışdır.

Otaq temperaturunda aparılan elektrolüminessensiya ölçmələrindən yarım-polyar- $\{11-22\}$ və polyar- $\{0001\}$ müstəvidə yetişdirilən və şüalanmasının dominant dalğa uzunluğu 470 nm olan işıq diodlarının (LED nümunələrin) xarici kvant effektivliyi (XKE) öyrənilmiş və effektivliyin düşməsi hesablanılaraq müqayisə edilmişdir. Məlum olmuşdur ki, polyar istiqamətdə yetişdirilən nümunələrdə effektivliyin düşməsi 60% olduğu halda, yarım-polyar istiqamətdə yetişdirilən nümunələrdə isə 25 % -dir (şəkil 3).



Şəkil 3. (a) Polyar- $\{0001\}$ və (b) yarım-polyar- $\{11-22\}$ $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ beşqat kvant çuxurlu heteroqəidlər əsasında alınan mavi LED nümunələrin xarici kvant effektivliyi

Polyar- $\{0001\}$ istiqamətdə (c-istiqamətində) yetişdirilən LED strukturların $\text{YAG}:\text{Ce}^{3+}$ ($\text{Y}_3\text{Al}_2\text{O}_{15}:\text{Ce}^{3+}$) fosforu ilə kombinasiyasından alınan ağ işıq diodları xarakterizə edilmişdir və fosforsuz nümunənin rəng koordinatlarının $x=0.156$ və $y=0.022$, nümunələrin fosforla uyğun kombinasiyasından sonra isə alınan ağ işıq diodlarının (LED nümunələrin) rəng koordinatları $x=0.35$ və $y=0.40$ olması təyin edilmişdir. Qeyd edək ki, bu rəqəmlər ideal ağ işığın rəng koordinatlarına ($x=0.33$; $y=0.33$) çox yaxındır.

ƏSAS NƏTİCƏLƏR

1. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ (0.1, 0.15, 0.2, 0.3) kvant çuxurlu heteroqeyidlərin kristallaşma istiqamətləri yarımolyar {11-22} istiqamətdə olan və şüalanmasının dominant dalğa uzunluğu 500-520 nm olan kvant çuxurlu heteroqeyidlər yetişdirilmişdir.
2. KÇ və baryer laylarının qəfəs uyğunsuzluqları arasındakı fərqi azaldılması məqsədi ilə baryer laya indium əlavə edilərək yetişdirilən {11-22} $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ KÇ-nun FL intensivliyi {11-22} $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ KÇ ilə müqayisədə aşağı temperaturda (15 K) ~10-12 dəfə, otaq temperaturunda isə ~3 dəfə yüksək olmuşdur.
3. Aşağı temperaturlarda (10 K) aparılan KL spektrindən müəyyən edilmişdir ki, dominant dalğa uzunluğu 500 nm olan {11-22} $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ KÇ-lu heteroqeyidlərin KL intensivliyi {11-22} $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ KÇ-lu heterostrukturda nəzərə alın ~2-3 dəfə yüksəkdir.
4. AQM ilə aparılan səthin morfoloji analizləri göstərmişdir ki, $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ KÇ nahamarlıq 20 nm, $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ KÇ üçün 22 nm olmuşdur. Bu nəticə yarımolyar {11-22} istiqamətli strukturlar üçün yaxşı nəticə hesab olunur.
5. Hər birində KÇ və baryer layının qalınlığı uyğun olaraq 2.8 nm və 8 nm olan yarımolyar {11-22} $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ KÇ-lu heterostrukturların TEM görüntülərində xətti defektlər müşahidə edilsə də {11-22} $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ KÇ-larında belə defektlər aşkarlanmamışdır və eyni zamanda KÇ ilə baryer layları arasındakı interfeys aydın seçilir.
6. FL ölçmələrinə və rekombinasiya mexanizmlərinə (ABC modelinə) əsasən nümunələrin DKE hesablanmışdır. Müəyyən edilmişdir ki, DKE $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ ÇKÇ üçün $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ ÇKÇ-larına nisbətən 20% yüksəkdir.
6. Tədqiq edilən beşqat {11-22} $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ aktiv layından ibarət LED strukturlarının EL-nın dominant dalğa uzunluğunun 470 nm olduğu və 20 mA cərəyanda şüalanmanın çıxış gücünün 90 mW olduğu müəyyən olunmuşdur.
7. Yarımolyar {11-22} $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ heteroqeyidlərindən ibarət LED strukturu ilə polyar (0001) $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ heteroqeyidli LED strukturlarının EL ölçmələrindən hesablanmış XKE müqayisə edilmiş və məlum olmuşdur ki, cərəyan sıxlığının artması

ilə polyar istiqamətdə yetişdirilən nümunələrdə effektivliyin düşməsi 60% olduğu halda yarımolyar $\{11-22\}$ $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ LED strukturunda effektivliyin düşməsi 25% -dir.

DƏRC OLUNMUŞ ELMİ İŞLƏRİN SİYAHISI

1. Qəhrəmanova G. K., InGaN/GaN çoxqat kvant çuxurlu mavi LED çiplərin Metal Orqanik Kimyəvi Qaz Faza Epitaksiya üsulu ilə alınması və tədqiqi // Azerbaijan Journal of Physics, Vol. XIX, section: Az, 2013, № 3, səh. 15-17
2. Jabbarov R., Orudjov S., Musayeva N., Gahramanova G. Growth and optimization of InGaN/GaN multi quantum well and fabricated white light emitting diode // Azerbaijan Technical University, Scientific works, 2014, v.2, No 2, pp. 52-57
3. Gahramanova G., Meisch T., Abdullayeva S., Musayeva N., Ozcelik S., Scholz F., Jabbarov R. Semipolar $\{11-22\}$ InGaN/(In)GaN quantum well optimization using barriers with low In content // 7th Led&Led Lighting conference, Turkey, 2015, pp.11-15
4. Gahramanova G., Mammadova S., Orujov S., Musayeva N., Abdullayeva S., Jabbarov R. Optical study of InGaN/GaN MQWs on $\{11-22\}$ sapphire // Materials international scientific conference for the modern scientific and technological research and energy issues, SSU, 2015, pp.145-147
5. Abdullayeva S., Gahramanova G., Jabbarov R. Optimization and characterization of semipolar MOVPE and HVPE growth $\{11-22\}$ InGaN/(In)GaN quantum well heterojunctions // Azerbaijan Journal of Physics, 2015, v. XXI, No 4, Section: En, pp. 47-51
6. Scholz F., Caliebe M., Gahramanova G., Heinz D., Klein M., Leute R.A., Meisch T., J Wang., Hocker M., and Thonke K. Semipolar GaN-based heterostructures on foreign substrates // Phys. Status Solidi B 253, 2016, No 1, pp. 13–22
7. Abdullayeva S., Gahramanova G., Jabbarov R., Orujov T. Internal quantum efficiency of $\{11-22\}$ GaInN/(In)GaN multiple quantum wells with different measurements methods // Azerbaijan Journal of Physics, 2016, v. XXII, No 1, Section: En, pp. 49-51
8. Qəhrəmanova G., Orucov S., Cabbarov R. Polyar $\{0001\}$ və yarımolyar $\{11-22\}$ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ çoxqat kvant çuxurlu işiq diodlarının effektivliyi // Azərbaycan Texniki Universiteti, Elmi əsərlər, cild 2, №2 , 2016, səh. 10-13

9. Qəhrəmanova G., Meiş T., Cabbarov R. Enerji effektivli işıq diodlarının (LED) aktiv oblasti olan {11-22} $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ çoxqat kvant çuxurlu heteroqəçidlərin tədqiqi // Azerbaijan Journal of Physic, Vol. XXII , № 2, Section: Az, 2016, səh. 17-21

**РОСТ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ГЕТЕРОПЕРЕХОДОВ С МНОЖЕСТВЕННЫМИ
КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ И ИХ ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
РЕЗЮМЕ**

Оптоэлектронные структуры на основе GaN получили огромное развитие за последние 2-3 десятилетия. Высокоэффективные синий и белый светодиоды (LED) теперь вездесущи, и твердотельное освещение на основе таких устройств позволяет существенно экономить электроэнергию.

Диссертационная работа посвящена исследованию гетероструктур из $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ с мульти-квантовыми ямами (КЯ), которые были выращены на сапфировой подложке пятью 2.8нм слоями с КЯ InGaN и 8нм барьерами методом металлоорганической газофазной эпитаксии в реакторе Aixtron-200/4 RF-S. Направление роста КЯ было изменено с полярного (0001) на полуполярное (11-22) для повышения интенсивности излучения и квантовой эффективности структур $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ путём избежания пьезоэлектрической поляризации в КЯ. Между КЯ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ и барьерными слоями структуры имеются несоответствия решетки, что является основной проблемой при получении высококачественных структур $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. В этой диссертационной работе при выращивании барьера интенсивность излучения полученных полуполярных гетеропереходов $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ КЯ была значительно увеличена путем добавления небольшого (около 2 моль/мин) потока In.

Атомный силовой микроскоп, сканирующий электронный микроскоп, трансмиссионный микроскоп, рентгено-фазовый анализ высокого разрешения, температурно-зависимая интенсивность фотолюминесценции и катодолуминесценция были применены для исследования характеристик образцов.

Таким образом, при 17К ~10-12-кратное повышение интенсивности фотолюминесценции наблюдалось в (11-22) $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ КЯ в сравнении с (11-22) $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ КЯ. Внутренняя квантовая эффективность $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ и $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ КЯ структур была рассчитана в соответствии с температурно-зависимой фотолюминесценцией и ABC моделью. Было получено, что внутренний квантовый выход увеличился на 20% при добавлении 1% In в барьерный слой гетеропереходов.

**GROWTH OF $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ MULTI-QUANTUM WELLS
HETEROJUNCTIONS AND THEIR OPTICAL PROPERTIES**

SUMMARY

GaN based optoelectronic structures have seen a tremendous development over the last 2–3 decades. Highly efficient blue and white light-emitting diodes (LEDs) are now omnipresent, and solid-state lighting based on such devices helps saving electrical energy significantly.

The dissertational work is devoted to the investigation of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ multi-quantum well (QWs) heterojunctions, which have been grown on the sapphire substrate in 5pairs of 2.8 nm InGaN QWs and 8 nm barriers by Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy in Aixtron-200/4 RF-S reactor. The growth direction of quantum wells has been changed from polar (0001) direction to the semi-polar (11-22) direction to improve emission intensity and quantum efficiency of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ structures by avoiding the piezoelectric polarization in the quantum wells. There is a lattice mismatch between $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ quantum wells and barriers layers in structures, which is a main problem in obtaining high quality $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ structures. In this dissertational work, during the barrier growth the quantum wells emission intensity of obtained semi-polar (11-22) $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ heterojunction could be significantly increased by adding a small In flow of about 2 mole/min. The atom force microscope, scanning electron microscope, transmission emission microscope, high resolution x-ray diffraction, temperature dependent photoluminescence intensity, cathode-luminescence characterization of the samples were investigated.

Therefore, at 17K ~10-12 times higher PL intensity was observed for (11-22) $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ QWs compared to (11-22) $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ QWs. The internal quantum efficiency of the (11-22) $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ and (11-22) $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ QWs structures was calculated according to the temperature-dependent photoluminescence and ABC model. It was found that the internal quantum efficiency increased by 20% after adding 1% In in the barrier layer of the heterojunctions.

Format 60x80 1/16
AMEA-nın mətbəəsində çap olunub.
Sayı: 100 nüsxə.

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК АЗЕРБАЙДЖАНА
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ им. Академика Г.М. Абдуллаева**

На правах рукописи

ГАХРАМАНОВА ГЮЛЬНАЗ КАМАЛ ГЫЗЫ

**РОСТ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ГЕТЕРОПЕРЕХОДОВ С МНОЖЕСТВЕННЫМИ
КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ И ИХ ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА**

2220.01 – физика полупроводников

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
доктора философии по физике

БАКУ -2016