

ENERJİ EFFEKTİVLİ İŞIĞI DİODLARININ (LED) AKTİV 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 HETEROKEÇİDLƏRİN TƏDQIQI

G.K. QƏHRƏMANOVA¹, T. MEİŞ², R.B. CABBAROV¹

¹*Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyası, H.M. Abdullayev adına Fizika İnstitutu,
AZ1143, Bakı şəhəri, H.Cavid pr. 131*

²*Ulm Universiteti, Optoelektronika İnstitutu, Albert-Eynşteyn pr. 45, 89081 Ulm, Almaniya
e-mail: gulnaz_qehremanova@hotmail.com*

Bu məqalədə MOVPE üsulu ilə sapphire altlıq üzərində yarım-polyar (11-22) istiqamətində yetişdirilən $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ ($x=0.15, 0.2$; $y=0, 0.01$) çoxqat kvant çuxurlu heteroqəçidlərin katodoluminensensiya xassələri tədqiq edilmişdir. Strukturların SEM, AQM və TEM mikroskopları vasitəsi ilə səth morfologiyası analiz edilmiş və eyni zamanda kvant çuxurları ilə baryer laylar arasındakı qəfəs uyğunsuzluğunun səbəb olduğu defektlər öyrənilmişdir.

Açar sözlər: InGaN/GaN, LED, MOVPE, SEM, TEM, AQM
UOT: 78.20.±e, 81.05.Ea, 81.10.±h

GİRİŞ

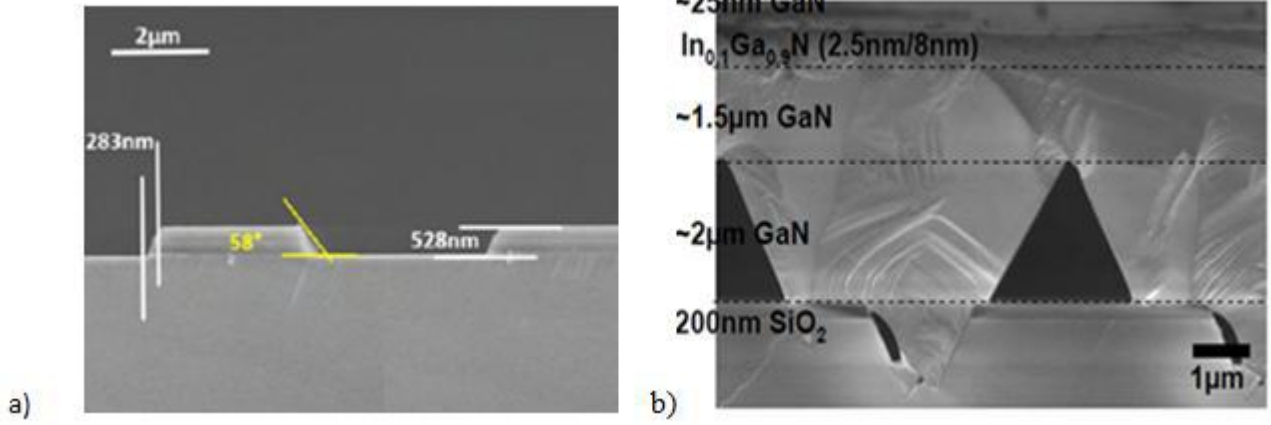
Optoelektronikanın getdikcə inkişafı və enerji effektivliyi, optik cihazlara tələbatın artması yeni tip yarımkeçirici birləşmələrin tədqiqini stimullaşdırır. III-N yarımkeçirici materiallar son 20-30 ildə tədqiqat institutlarının diqqətini ən çox cəlb etmiş mürəkkəb yarımkeçirici materiallardır. III-N yarımkeçirici birləşmələr (InN, GaN, InGaN və s.) müasir dövrdə ən çox bərk cisim işıqlanmasında, enerji effektivliyi işıq diodlarında (LED) geniş istifadə olunur. Birinci səbəb bu birləşmələrin qadağan olunmuş zonasının eninin (E_g) AlN, GaN və InN üçün, uyğun olaraq, 6.2eV, 3.4eV və 0.7eV olmasıdır [3,7]. Lakin, yüksək effektivliyi $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ KÇ alınmasında bəzi məhdudluqlar mövcuddur. Belə ki, mavi oblasta işıq şüalanıran $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ kvant çuxurlarının (KÇ) effektivliyi nisbətən gözlənilən olsa da, yaşıl şüalanma oblastında (500nm-dən yuxarı şüalanma oblastında) bu heteroqəçidlərin effektivliyi kəskin aşağı düşür və bu problem “yaşıl oblast” və “effektivliyin düşməsi” kimi tanınır. Kvant effektivliyinin aşağı düşməsinə səbəb GaN ilə InN birləşmələri arasındakı qəfəs sabitlərinin və istidən genişlənmə əmsallarının uyğunsuzluğudur [4]. Bu uyğunsuzluqlar III-N birləşməsində piezoelektrik və spontan polarizasiya sahələrinin yaranmasına səbəb olur. InGaN/GaN heteroqəçidlərdə InGaN ilə GaN arasındakı spontan və piezoelektrik polarizasiya da öz növbəsində daxili elektrik sahəsinin yaranmasına səbəb olur. Nəticədə, keçirici zonalarda elektronların və valent zonasındakı deşiklərin dalğa funksiyasının bir-birini örtməsi azalır və KÇ-nun aşağı effektivliyinə səbəb olur. Daxili elektrik sahəsi KÇ-larının qadağan olunmuş zonasının eninin kiçilməsinə və dalğa uzunluğunun qırmızı oblasta doğru dəyişməsinə gətirib çıxarır. Bu fenomen Kvant Məhdudlaşdırıcı Stark Effekti (KMSE) adlanır [6]. Bu çatışmazlıqları aradan qaldırmaq üçün, heteroqəçidlərin yetişmə istiqamətini və eyni zamanda aktiv oblastda In atomlarının faizini (x) dəyişməklə $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ KÇ-larının alınması aktual tədqiqat istiqamətlərindəndir. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ heteroqəçidləri yarım-polyar istiqamətlərdə yetişdirilərək şüalanmanın yaşıl oblas-

tında effektivliyin artırılması istiqamətində tədqiqatlar aparılır.

EKSPERİMENTLƏR

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ KÇ-ları yarım-polyar (11-22) istiqamətində sapphire altlıq üzərində yetişdirilmək üçün r -müstəvi sapphire altlıq xüsusi fotolitografiya prosesi ilə hazırlanmışdır [1,5]. Yarım-polyar (11-22) və r -müstəvi (10-12) sapphire altlıq c -müstəvi (0001) sapphire altlıq ilə, uyğun olaraq, 58.4° və 57.6° dönmə bucağı təşkil edir [5]. Bunu nəzərə alaraq, r -müstəvi (10-12) sapphire götürülərək üzərinə fotolitografiya prosesi tətbiq edilmişdir və nəticədə, yetişmə istiqamətində təxminən 1° dəyişiklik aparmaqla (11-22) yarım-polyar istiqamətdə yetişdirilmə prosesi üçün altlıq hazırlanmışdır [1,5] (şəkil 1a). c -istiqamətində yetişməni aradan qaldırmaq üçün sapphire səthinə SiO_2 layı çökdürülmüşdür.

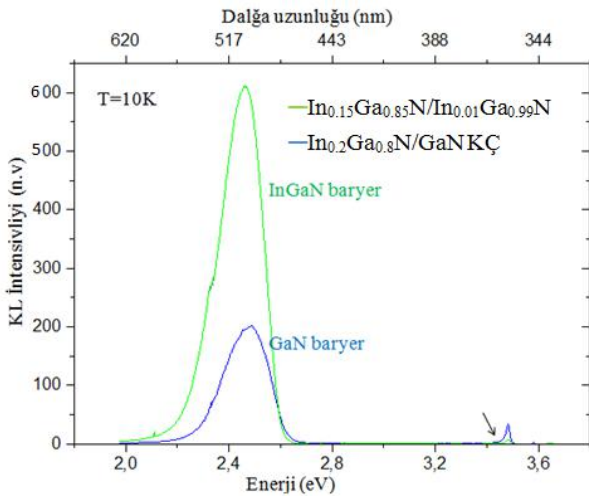
Yetişdirilmə Metal-Orqanik Buxar Faza Epitaksiya (MOVPE) üsulu ilə Aixtron-200/4 RF-S reaktorda standart mənbə trimetilqallium (TMGa və ya $\text{Ga}(\text{CH}_3)_3$), trietilqallium (TEGa), trimetilalüminium (TMAI), trimetillindium (TMIn) və ammoniyak (NH_3) istifadə edilməklə yetişdirilmişdir. Reaktorda sapphire altlıq üzərinə 2 mkm və 1.5 mkm qalınlıqlı GaN layları yetişdirilmişdir. GaN layları yetişdirildikdən sonra KÇ və baryer lay yetişdirilməyə başlamışdır. Optimal yetişmə rejimi olaraq KÇ-ları ilə baryer lay arasında yetişmə temperaturu fərqi 35K olmaqla, sabit saxlanılmış və KÇ-ları 720°C , baryer laylar isə 755°C temperaturda yetişdirilmişdir. Beləliklə, baryer layı GaN-dən ibarət $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ və InGaN dən ibarət $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ KÇ-lu heterostrukturlar yetişdirilmişdir. Struktur baryer laylarının qalınlığı 8 nm, kvant çuxurlarının qalınlığı 2.5 nm olmaqla beş cüt KÇ-dən ibarətdir (şəkil 1 b). Alınan nümunələrin fotoluminensensiya (FL) və rentgen analizləri müqayisə edilmişdir. Müşahidə edilmişdir ki, baryer laylara In atomları daxil olan nümunədə FL intensivliyi GaN baryer laylı nümunəyə nisbətən 17 K temperaturda 10-12 dəfə, otaq temperaturunda isə 2-3 dəfə yüksəkdir [2].



Şəkil 1. r -müstəvi sapfir altlığın və sapfir altlıq üzərində yarımolyar (11-22) müstəvidə yetişdirilən $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ kvant çuxurunun eninə kəsik oblastından SEM analizləri.

NƏTİCƏLƏR VƏ ONLARIN MÜZAKİRƏLƏRİ

$\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ kvant çuxurlu nümunələrdə katodoluminensensiya (KL) ölçmələrindən alınan nəticələr FL ölçmələrindən alınan nəticələrə uyğun olaraq $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ KÇ-na nisbətən yüksək şüalanma intensivliyi nümayiş etdirmişdir (şəkil 2). Belə ki, 10 K temperaturda aparılan KL ölçmələrindən $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ KÇ-lu nümunənin $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ KÇ-lu nümunəyə nəzərən KL intensivliyi 3 dəfə yüksək olmuşdur. Hər iki nümunənin səth morfoloqiyası 10 K temperaturda KL-SEM ilə tədqiq edilmişdir.



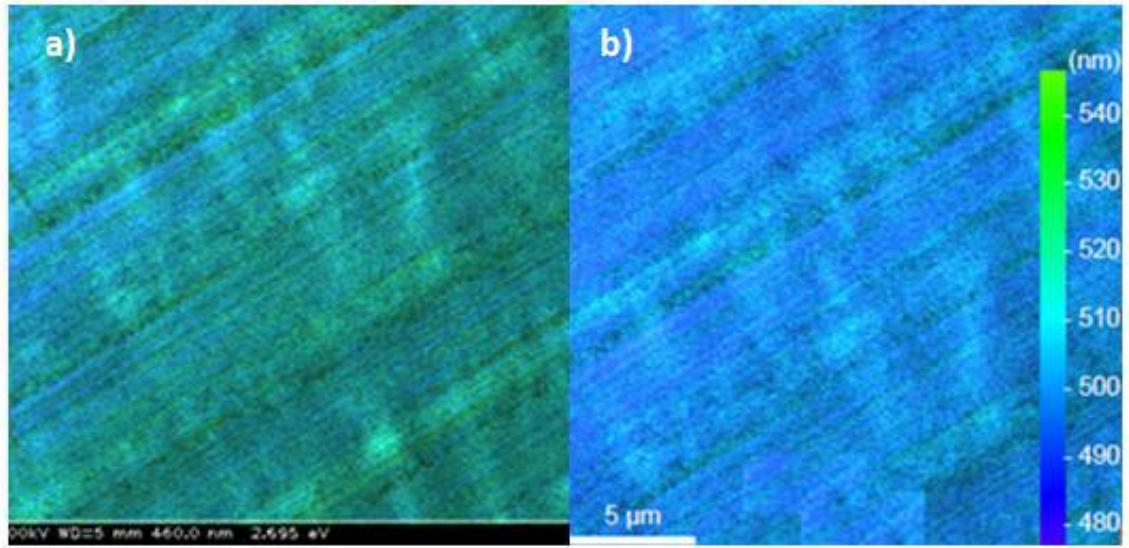
Şəkil 2. $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ və $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ 5 period KÇ-larının 10 K temperaturda KL-SEM xarakteristikaları.

10 K temperaturda nümunələrin səthində aparılan KL-SEM tədqiqatları hər iki nümunə üçün dominant dalğa uzunluğunun 500 nm olduğunu göstərir (şəkil 3 a, b). Hər iki nümunənin səth morfoloqiyası homogenidir. Sadəcə $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ nümunəsinin səthi dah çox homogenlik nümayiş etdirir, bəzi ərazilərdə 510 nm-dən uzun dalğa uzunluğuna uyğun zolaqların olması müşahidə

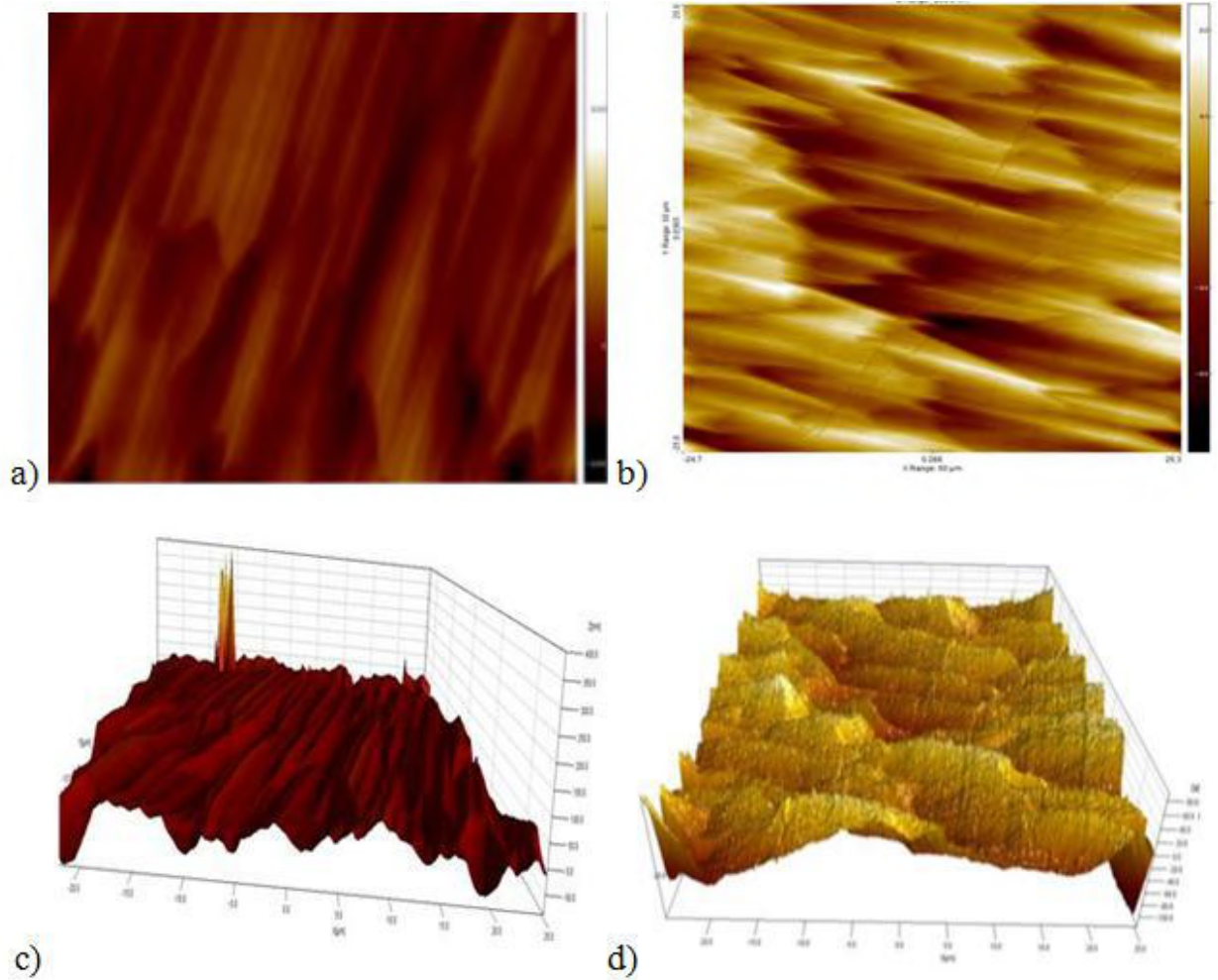
edilir (şəkil 3. b). Nümunələrin səthində defektlərin olmasını göstərən 6 mkm period ilə təkrarlanan qara zolaqlar müşahidə olunur. Bu zolaqlar yetişmənin istiqamətindən asılı olaraq yarımolyar (11-22) istiqamətə nəzərən təxminən 35° təşkil edən istiqamətdə yönəlir. $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ KÇ-lu strukturun səthində bu zolaqlar $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ KÇ-na nisbətən daha çoxdur.

Atom Qüvvə Mikroskopu (AQM) vasitəsi ilə 2D və 3D ölçüsündə aparılan tədqiqatlarda müşahidə olunmuşdur ki, $70 \times 70 \text{ mkm}^2$ səthdə səth ölçülərindən GaN baryer laylı strukturlar üçün nahamarlıq 20 nm, $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ baryer laylardan ibarət strukturlar üçün isə nahamarlıq 22 nm-dir (şəkil 4). Səth ölçüləri hər iki tip nümunənin eyni bir cinsliyə malik olduğunu göstərir.

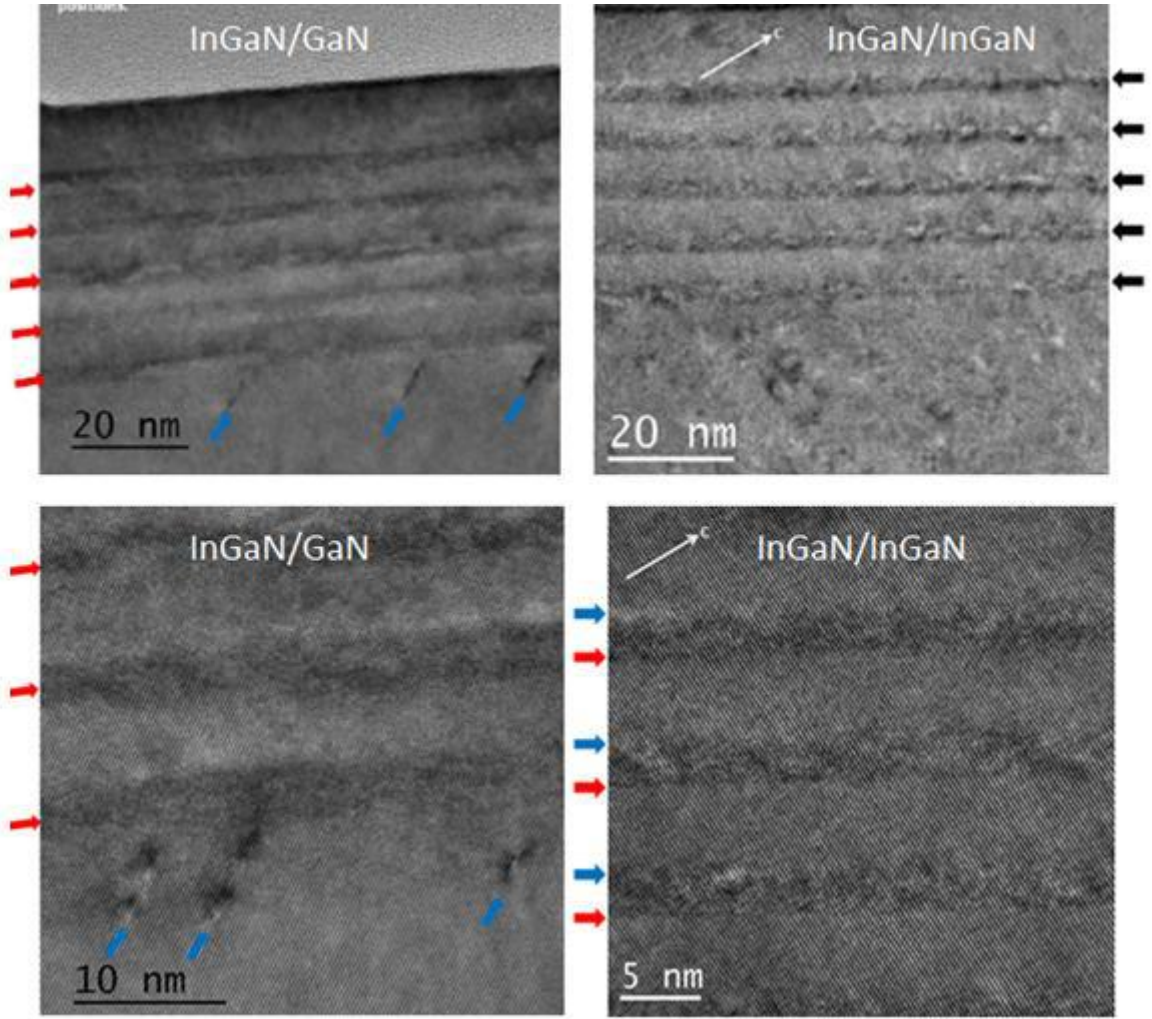
Nümunələrin Transmissiya Elektron Mikroskop (TEM) analizləri 20, 10 və 5 nm miqyaslarda aparılmışdır. Şəkil 5-dən görünür ki, 5 qat $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ strukturunun aktiv oblastında KÇ-ları ilə baryer laylar arasında keçid oblastı aydın görünür və xətti defektlərin olması müşahidə edilir (göy oxlar), $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ KÇ heteroqeyidlərin TEM ölçülərində isə belə defektlər müşahidə edilməmişdir. $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ nümunəsində beş KÇ-larının sayı aydın görünür (qırmızı oxlar). $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ strukturlarının aktiv oblastında 5 qat KÇ ilə baryer laylar arasındakı keçidlər aydın fərqlənir (qara işarələr). Bundan əlavə $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ KÇ-lu heteroqeyidlərin 5 nm məsəhbda aparılan TEM analizləri göstərir ki, bu nümunədə $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ baryer layından $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ kvant çuxuruna keçiddə bu laylar arasındakı interfeys aydın seçilir (şəkil 5, alt-sağ-qırmızı oxlar), lakin $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ kvant çuxurundan $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ baryer laya keçən interfeys isə aydın seçilmir (şəkil 5, alt-sağ-göy oxlar) və xətti defektlərin olması aydın görünür (şəkil 5, alt-sol). Eyni zamanda, nümunələrin daxilindən transmissiya olunan elektronların qeydə alınması ilə müşahidə olunmuşdur ki, tədqiq etdiyimiz hər iki nümunədə KÇ-larının hər birinin qalınlığı 2.5-2.8 nm, baryer layların qalınlığı isə 8 nm-dir (şəkil 6).



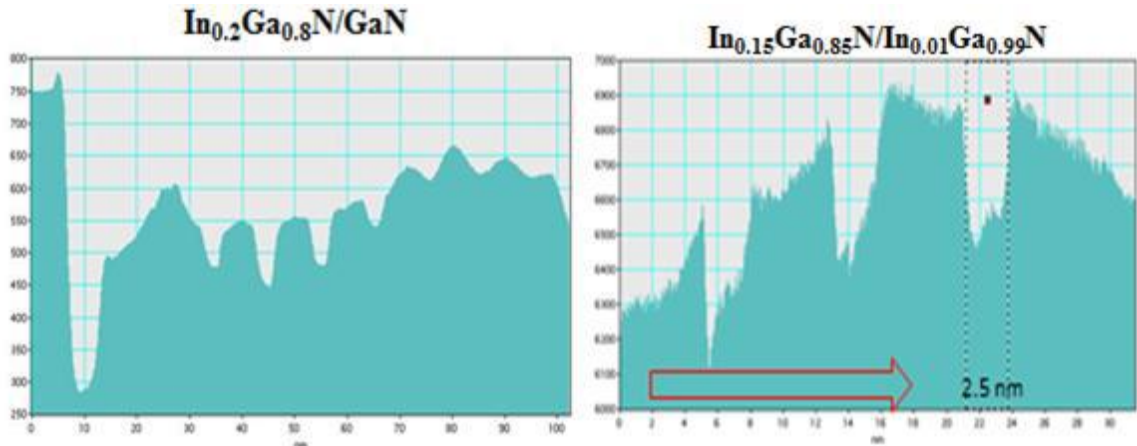
Şəkil 3. $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ (sol) və $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ (sağ) 5 period KÇ-larının 10K temperaturda KL-SEM analizləri.



Şəkil 4. AQM vasitəsi ilə 5 qat KÇ-larının $70 \times 70 \text{ mkm}^2$ səthində aparılan səth morfolojiyaları və nahamarlığı; a) $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ 2D ölçüdə və b) $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ 2D ölçüdə, c) $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ 3D ölçüdə və d) $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ 3D ölçüdə



Şəkil 5. Yarımpolyar (11-22) $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ (sol) və $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ (sağ) çoxqat kvant çuxurlarının TEM analizləri.



Şəkil 6. Yarımpolyar (11-22) $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ (sol) və $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ (sağ) çoxqat kvant çuxurlu strukturların TEM analizləri vasitəsi ilə KÇ və baryer layların qalınlıqlarının təyini

NƏTİCƏLƏR

Yarımpolyar (11-22) istiqamətində $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ ($x=0.15, 0.2$; $y=0, 0.01$) beş cüt KÇ-lu heteroqeyidlər MOVPE üsulu ilə safir altlıq üzərində yetişdirilmişdir. Nümunələrin SEM və AFM analizləri vasitəsilə eninə kəsik oblastı və səth morfolojiyası tədqiq

edilmişdir. TEM analizlərindən müəyyən edilmişdir ki, $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ KÇ-lü nümunədə KÇ ilə baryer laylar arasındakı keçid interfeysi aydın seçilir. Müşahidə edilmişdir ki, KÇ-lu strukturlarda baryer laya az miqdarda (1%) indium əlavə edilmiş nümunədə intensivlik GaN baryer laylı nümunəyə nisbətən 2- dəfə yüksəkdir və bu nümunədə defektlər müşahidə edilməmişdir.

- [1] *S.Abdullayeva, G. Gahramanova, R. Jabbarov.* Azerbaijan Journal of Physics, 2015, v. XXI, No 4, Section: En, pp. 47-51.
- [2] *G. Gahramanova, T. Meisch, R. Jabbarov et. al.* Semipolar (11-22) $\text{InGaN}/(\text{In})\text{GaN}$ quantum well optimization using barriers with low In content // 7th Led&Led Lighting conference, Turkey, 2015, pp.11-15.
- [3] *S.J. Chang, Y.C. Lin, Y.K. Su, C.S. Chang, T.C. Wen, S.C. Shei, J.C. Ke, C. Kuo, S.C. Chen and C.H. Liu.* J. Solid State Electron. 2003, 47 1539.
- [4] *S.F. Chichibu and Sh.Nakamura.* Introduction to Nitride Semiconductor due Lasers and Light Emitting Diodes. London ; New York : Taylor & Francis, 2000, 327 p.
- [5] *F. Scholz, M. Caliebe, G. Gahramanova et. al.* Phys. Status Solidi B, 2016, v.253,No1, pp. 13-22.
- [6] *F. Scholz.* Compound Semiconductors: Physics, Technology and Concepts. Lecture script, chapter 11. Institute of Optoelectronics, University of Ulm, 2007, 198 p.
- [7] *S.D. Lester, F.Ponce, M.G. Craford and D.A.Steigerwald.* Phys. Lett. 66 1249, 1995 Appl.

G.K. Gahramanova, T. Meisch, R.B. Jabbarov

INVESTIGATION OF SEMIPOLAR (11-22) $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ MULTIPLE QUANTUM WELL HETEROJUNCTIONS

In this paper, the cathodoluminescence properties of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ ($x=0.15, 0.2; y=0, 0.01$) multiple quantum well heterojunctions were investigated, which have been grown on sapphire in the semipolar (11-22) direction by MOVPE. The surface morphology and crystalline quality were analyzed by SEM, AFM and TEM. It was revealed that the samples, with the barrier layers of 1% In show higher luminescence properties.

Г.К. Гахраманова, Т. Меиш, Р. Джаббаров

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПОЛЯРНОЙ (11-22) $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ НЕСКОЛЬКИХ КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ ГЕТЕРОПЕРЕХОДОВ

В данной работе были исследованы катодолуминесцентные свойства $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ ($x=0.15, 0.2; y=0, 0.01$) многоквантовых гетероструктур, выращенных на сапфире в полуполярном (11-22) направлении с помощью MOVPE. Морфология поверхности и кристаллическое качество были проанализированы с помощью SEM, AFM и TEM. Было обнаружено, что образцы, у которых барьерные слои имеют 1% In, показывают более высокие свойства люминесценции.

Qəbul olunma tarixi: 26.05.2016