

CZU: 621.315.5

## CERCETĂRI XRD ȘI XPS ALE STRATURILOR DE AlN, AlGaN, GaN DEPUSE PE SILICIU PRIN METODA HVPE

*Simion RAEVSCHI, Nicolae SPALATU, Vasile BOTNARIUC,  
Leonid GORCEAC, Tamara POTLOG, Marius DOBROMIR\**

*Universitatea de Stat din Moldova*

*\*Universitatea „Al.I. Cuza” din Iași (România)*

Prin metoda reacțiilor chimice de transport HVPE (Hydride Vapor Phase Epitaxy) în sistemul (H<sub>2</sub>-NH<sub>3</sub>-HCl-Al-Ga-Si) au fost sintetizate straturi subțiri de AlN, AlGaN, GaN pe substraturi de siliciu, Si(111). Morfologia suprafeței, precum și a secțiunilor transversale ale structurilor a fost cercetată prin metoda SEM (Scanning Electron Microscopy) de rezoluție înaltă. Compoziția în secțiune transversală a structurilor a fost studiată prin metoda XRD (X-Ray Diffraction method), iar de suprafață – prin metoda XPS (X-Ray Photoelectronic Spectroscopy). Afară de aluminiu, galiu și azot în straturi au fost depistate oxigen și carbon. S-a stabilit că concentrația oxigenului pe suprafața straturilor de GaN, depuse la temperaturi relativ mai joase, este mai mică. Se presupune că concentrația ridicată a oxigenului în straturi are loc în urma descompunerii cuarțului, din care este confecționat reactorul, la temperaturi ridicate. S-a constatat că încorporarea galiului în straturile de AlGaN este diminuată de fluxul precursorilor aluminiului. Prin aceasta se demonstrează că viteza reacțiilor chimice ale precursorilor azotului cu ale aluminiului este semnificativ mai mare decât cu ale galiului, ultimele fiind înlăturate din zona de depunere de fluxul gazului de transport.

*Cuvinte-cheie: GaN, Si, AlN, AlGaN, SEM, XRD, XPS, HVPE.*

### XRD AND XPS INVESTIGATIONS OF THE AlN, AlGaN, GaN LAYERS DEPOSITED ON SILICON BY THE HVPE METHOD

Using the HVPE (Hydride Vapor Phase Epitaxy) transport method, in system (H<sub>2</sub>-NH<sub>3</sub>-HCl-Al-Ga-Si), thin layers of AlN, AlGaN, GaN on silicon substrates were synthesized. Surface morphology as well as transverse sections of structures was investigated by the high resolution SEM (Scanning Electron Microscopy) method. The cross-sectional composition of the structures was studied by the X-Ray Diffraction Method (XRD) and Surface X-Ray (X-Ray Photoelectronic Spectroscopy). Outside of aluminum, gallium and nitrogen in the layers were detected oxygen and carbon. It has been established that the concentration of oxygen on the surface of the GaN layers deposited at relatively lower temperatures is lower. It is assumed that the high concentration of oxygen in the layers takes place after the decomposition of the quartz, from which the reactor is made, at high temperatures. It has been found that the incorporation of gallium into the AlGaN layers is diminished by the flux of aluminum precursors. This demonstrates that the rate of chemical reactions of the nitrogen precursors with the aluminum is significantly higher than with the latter being removed from the deposition area by the transport gas stream.

*Keywords: GaN, Si, AlN, AlGaN, SEM, XRD, XPS, HVPE.*

### Introducere

În prezent, nitrura de galiu (GaN) este materialul semiconductor principal aplicat la confecționarea dispozitivelor optoelectronice (diodelor și laserelor luminescente, detectoarelor de raze ultraviolete); are aplicare în electronica de putere și frecvențe înalte, de funcționare la temperaturi ridicate în medii agresive (chimic, de radiație nucleară etc.); poate fi aplicat la elaborarea senzorilor de diferite gaze etc. Nano -, micro- particulele de GaN sunt compatibile cu țesuturile organice vii, au perspectivă de aplicare în medicină cu scop terapeutic [1-3]. Din lipsa cristalelor proprii, dispozitivele corespunzătoare sunt produse pe substraturi eterogene, de obicei, pe safir (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). O alternativă a safirului, în calitate de substrat, poate fi siliciul. Siliciul este cu mult mai ieftin, diametrul substraturilor accesibile poate depăși 200 mm și el poate fi ușor înlăturat prin corodare chimică nu doar la temperatura camerei, dar și în procesul de sintetizare a straturilor de GaN (*in situ*) la temperatura de obținere [4]. În ultimul caz se reduc substanțial defectele mecanice provocate de diferența dintre coeficienții de dilatare termică GaN - Si la răcire, se exclude curbarea straturilor, pot fi obținute straturi FS (Free-Stand). Obținerea straturilor epitaxiale, perfecte, de nitrură de galiu pe siliciu se confruntă cu mai multe obstacole. Din cauza diferenței mari dintre parametrii rețelelor cristaline (de ordinul 17%)

ale acestor materiale la interfața structurilor apar defecte de necoincidență chiar la începutul procesului de creștere, de nuclearizare. Diferența mare dintre coeficienții de dilatare termică (de ordinul a 56%) provoacă crăpături, încovoierea structurilor. La temperaturile ridicate de obținere a nitrurii de galiu siliciul difuzionează din substrat, dezlocuiește galiul din stratul sintetizat de GaN, formează compusul  $\text{Si}_3\text{N}_4$  cu degajarea picăturilor de eutectică Ga:Si și deteriorarea suprafeței substratului. Un rezultat decisiv la depășirea acestor obstacole a fost obținut utilizând concepția creșterii structurilor GaN/.../Si cu straturi buferale, de nuclearizare și antidifuzionale, depuse pe substrat la etapa inițială a procesului. Cu scopul de a reduce concentrația defectelor și tensiunile mecanice, în prezent se utilizează interstraturi template de diferită geometrie și componență, monostraturi metalice, suprarețele etc. În lucrarea de față au fost utilizate straturi subțiri de AlN, obținute la temperaturi ridicate, precum și soluții solide (ss) din straturi de AlGaN. Straturile AlN, AlGaN, GaN au fost sintetizate pe substraturi eterogene prin metoda HVPE într-un singur proces tehnologic. Tehnologia este relativ simplă, permite obținerea unei viteze de creștere a straturilor de peste 10 ori mai mare decât prin alte metode cunoscute. Poate fi utilizată și la obținerea straturilor cvasimasive de GaN. În tehnologia HVPE de sintetizare a compușilor III-N sunt utilizate reactoare din sticlă de cuarț, precum și piese din carbon. Foile de carbon sunt necesare la protejarea reactorului de interacțiunea cu compușii precursorilor (alumiului, galiului, amoniacului). Temperatura de sintetizare a straturilor III-N variază în intervalul de  $\sim 400\text{-}500^\circ\text{C}$  și poate atinge valori de ordinul  $1100^\circ\text{C}$ . La aceste temperaturi, în medii agresive de HCl,  $\text{NH}_3$  etc., are loc descompunerea parțială a cuarțului, generarea oxigenului. De aceea, un scop deosebit al cercetărilor este depistarea gradului de contaminare a straturilor sintetizate cu carbon și oxigen. Un alt scop al cercetărilor este studierea corelației dintre raportul concentrației alumiului și galiului în precursori și în stratul sintetizat de AlGaN.

### Experiment

Straturile de AlN, AlGaN au fost sintetizate pe siliciu prin metoda HVPE. Presiunea în reactorul de cuarț situat orizontal era mai mare decât cea atmosferică cu 70 mbar. Ca gaz de transport a fost utilizat hidrogenul purificat cu un filtru de paladiu. În calitate de reagenți s-a utilizat amoniacul, clorura de hidrogen, galiul (5N) și alumiul (5N). Fluxurile de clorură de hidrogen în conductele galiului, alumiului erau diluate cu un flux de hidrogen de 200 smlpm. Consumul total de hidrogen constituia 3,6 slpm, iar cel de amoniac varia în limitele de 0,4-1,5 slpm. La sintetizarea straturilor consumul de clorură de hidrogen se afla în limitele de 2-20 smlpm. În timpul depunerii substraturile erau rotite cu un flux de hidrogen cu o viteză unghiulară de 50-100 Hz. Profilul termic în reactor era asigurat de un încălzitor electric rezistiv cu stabilizare. Temperatura surselor cu Al, Ga era constantă, de ordinul  $850^\circ\text{C}$ . Au fost utilizate plachete de Si(111) cu diametrul de  $\sim 50$  mm. Nemijlocit înainte de a fi introduse în reactor plachetele erau tratate chimic conform procedurilor standard pentru siliciu. Compoziția chimică de suprafață a straturilor a fost studiată prin metoda XPS. Spectrele XPS erau măsurate cu spectrometrul *PHI-5000 Versa Probe* cu radiație monocromatică  $\text{AlK}\alpha$  (1486.7 eV). Fotoelectronii erau colectați sub unghiul de  $45^\circ$ . Cuantificarea de suprafață s-a efectuat conform procedurilor standard, iar spectrele XPS de înaltă rezoluție au fost procesate folosind PHI MultiPak software. Poziția picurilor în spectrele XPS au fost calibrate în conformitate cu poziția picului C 1s cu energia de legătură (BE) de 284,6 eV. Identificarea diferitelor tipuri de legături chimice, formate la suprafață, a fost apreciată prin deconvoluționarea spectrelor de rezoluție înaltă. Concentrația atomică a elementelor a fost determinată după suprafața picurilor, luându-se în considerare factorii de sensibilitate a elementelor analizate. Compoziția și proprietățile cristalografice au fost analizate prin metoda XRD. Picurile XRD au fost racordate la Universitatea Tehnologică din Tallinn cu sistemul Rigaku Ultima IV cu folosirea radiației monocromatice  $\text{Cu K}\alpha$  ( $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$ , 40 kV at 40 mA) și echipamentul cu detector în baza siliciului (D/teX Ultra silicon line detector) în regimul  $2\theta$  (Bragg-Brentano).

### Rezultate și discuții

Structurile cercetate au fost obținute după un anumit algoritm tehnologic. După lucrările de purificare a instalației și dislocuirii atmosferei reactorului cu gazul de transport temperatura substratului ( $T_0$ ) era ridicată la  $1000^\circ\text{C}$ , substratul era supus unei corodări de scurtă durată ( $\sim 5$  min) cu un consum redus de clorură de hidrogen (de  $\sim 5$  smlpm). În continuare, temperatura substratului ( $T_1$ ) era ridicată la  $\sim 1100^\circ\text{C}$  la care era sintetizat primul strat buferal de nitrură de aluminiu (AlN). La următoarea etapă temperatura era coborâtă la

nivelul ( $T_2$ ) de depunere a straturilor de AlN<sub>2</sub>, AlGa<sub>N</sub> și Ga<sub>N</sub>. Mai detaliat condițiile de creștere a structurilor cercetate prin metoda XPS sunt prezentate în Tabelul 1.

Tabelul 1

Temperatura și durata de depunere a straturilor de AlN, AlGa<sub>N</sub> și Ga<sub>N</sub> pe siliciu

#	AlN-1		AlN-2		AlGa <sub>N</sub>		Ga <sub>N</sub>	
	T <sub>1</sub> , °C	t, min	T <sub>2</sub> , °C	t, min	T <sub>2</sub> , °C	t, min	T <sub>2</sub> , °C	t, min
153	1100	2	1010	2	1010	10	-	-
155	1105	2	1025	2	1025	10	-	-
156	1100	2	1005	2	1005	10	1005	30
162	1090	1.5	955	2	955	10	955	60
164	1105	1	955	1	955	10	955	60

Straturile inițiale, de nuclearizare, de nitrură de aluminiu (AlN<sub>1</sub>), precum și cele intermediare de AlGa<sub>N</sub>, sunt uniforme, mirror-like, iar culoarea lor variază, de obicei, de la verde la albastru, în conformitate cu grosimile obținute. În Figura 1 este prezentată morfologia suprafeței stratului de Ga<sub>N</sub> (a), precum și a secțiunii transversale a structurii Ga<sub>N</sub>/.../Si (#49) în întregime (b). În Figura 2 sunt prezentate imaginile SEM ale structurii Ga<sub>N</sub>/.../Si în regiunea straturilor intermediare la o rezoluție ridicată. Stratul AlN<sub>1</sub> în această mostră a fost crescut în mai multe etape (2+3=5 min la 1110°C și 2 min la 1035°C) la un consum de clorură de hidrogen în conducta de aluminiu de 11 smlpm cu o durată totală de 7 minute. Stratul de AlGa<sub>N</sub> a fost depus pe stratul de AlN<sub>1</sub> timp de 10 minute cu un consum de clorură de hidrogen în conducta de galiu de 8,5 smlpm și, corespunzător, în conducta de aluminiu, de 11 smlpm.

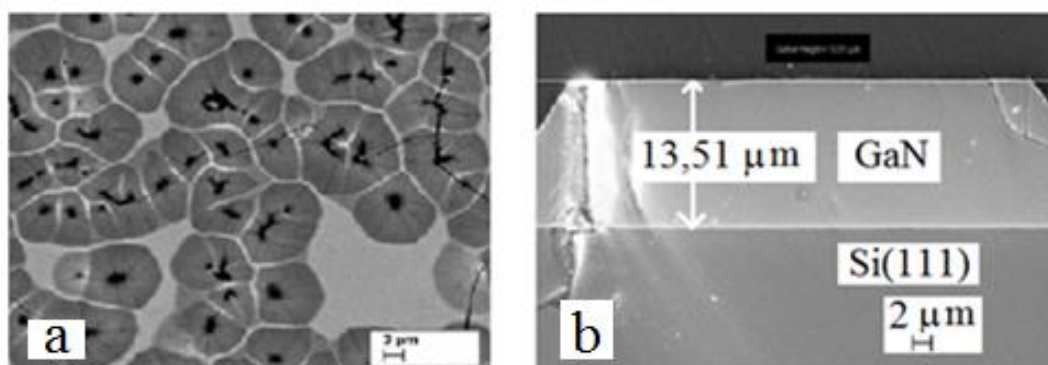


Fig.1. Morfologia suprafeței unui strat de Ga<sub>N</sub> depus pe siliciu cu straturi intermediare de AlN, AlGa<sub>N</sub> (a). Secțiunea transversală a structurii Ga<sub>N</sub>/.../Si (b). Imagini SEM (#49).

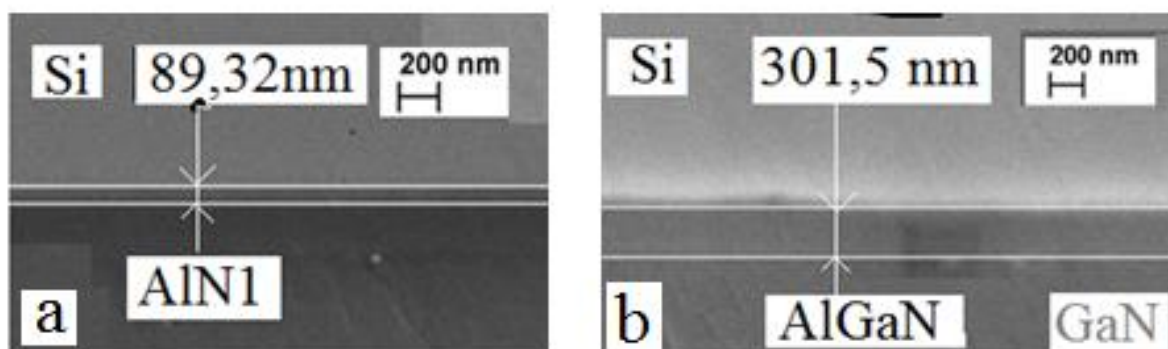
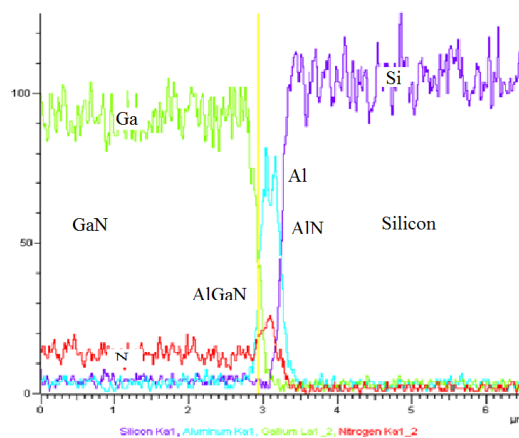


Fig.2. Imaginile SEM ale secțiunii transversale a unei structuri Ga<sub>N</sub>/.../Si în regiunea straturilor intermediare: a) strat buferal AlN<sub>1</sub>; b) strat intermediar de AlGa<sub>N</sub>, 20000x. Substratul de siliciu este situat în partea de sus a imaginilor (#49).

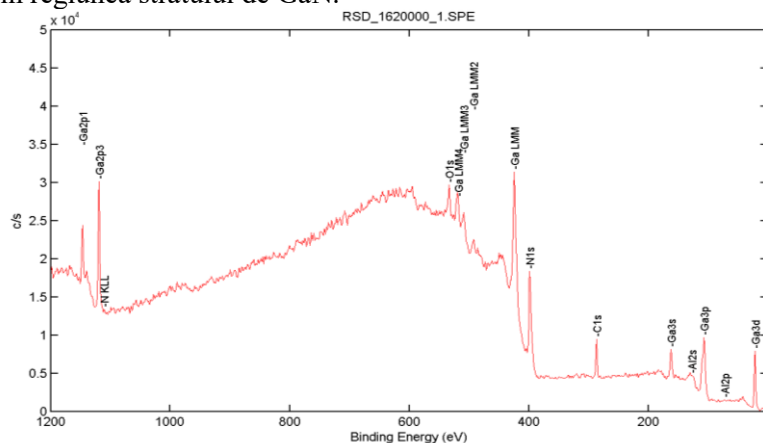
Grosimea specifică ( $t_1$ ) calculată la un mililitru de HCl la creșterea stratului de AlN1 (Fig.2a) constituie  $t_1 = 89,32/7 \cdot 11 = 1,16$  nm/ml. La depunerea straturilor de AlGa<sub>3</sub>N, GaN obținem, corespunzător,  $t_2 = 301,5/10 \cdot (8,5+11) = 1,546$  și  $t_3 = 13510/30 \cdot 8,5 = 52,98$  nm/ml. Dacă viteza de creștere a stratului ss ar fi aditivă vitezelor de creștere a straturilor de AlN, GaN, efectuate separat, atunci grosimea lui, obținută timp de 10 minute, la consumurile corespunzătoare de HCl, ar constitui  $d_3^1 = 1,16 \cdot 11 \cdot 10 + 52,98 \cdot 8,5 \cdot 10 = 4630,9$  nm, ceea ce este de  $15,35 = 4630,9/301,5$  ori mai mare decât grosimea stratului obținută experimental. Pentru aprecierea vitezei de încorporare ( $t_4$ ) a galiului în straturile de ss vom presupune că încorporarea aluminiului în stratul de AlGa<sub>3</sub>N nu se schimbă, la trecerea de la creșterea stratului de AlN I la creșterea stratului ss ( $d_3$ ). Atunci,  $d_3 = 301,5 = 1,16 \cdot 18 \cdot 11 + t_4 \cdot 10 \cdot 8,5$ . Din această expresie obținem  $t_4 = 2,04$  nm/ml. Deci, viteza de încorporare a galiului în straturile de ss este de  $25,89 = 52,98/2,04$  ori mai mică decât în straturile de GaN. Acest fenomen poate fi explicat prin faptul că masa moleculară a precursorului aluminiului (AlCl<sub>3</sub>) este de 27,44 =  $M_{AlCl_3} / M_{GaCl}$  ori mai mare decât a precursorului galiului (GaCl), deci și mobilitatea lui browniană în atmosfera fluxului gazos este mai mică. Precursorii cu mobilitate mai mică sunt mai inerti, mai efectiv reacționează cu atomii azotului.



**Fig.3.** Distribuția elementelor în secțiune transversală a structurilor de GaN /.../ Si cu straturi intermediare de AlN, AlGaN (#49).

Precursorii galiului, cu mobilitate mai mare, rămân într-un mediu cu o concentrație redusă a azotului atomic, fiind în continuare înlăturați de fluxul gazos. Aceste rezultate confirmă, indirect, că precursorii principali ai aluminiului și ai galiului la sintetizarea straturilor III-N sunt de AlCl<sub>x</sub> și GaCl<sub>y</sub>, unde ( $x > y$ ).

Distribuția elementelor în secțiune transversală, în structurile cercetate, apreciată prin metoda XRD, este prezentată în Figura 3. Graficul aluminiului are două picuri care corespund straturilor de AlN1 și de AlGa<sub>3</sub>N. În regiunea straturilor intermediare graficul azotului de asemenea are două picuri: unul cu intensitate mai mică corespunzătoare stratului de AlN1 și altul cu intensitate și suprafață mai mare corespunzătoare stratului de AlGa<sub>3</sub>N. Din figură se observă că ultimul pic este slab structurat, ceea ce ar demonstra că compoziția stratului cu grosimea se schimbă. De menționat că concentrația siliciului în regiunea straturilor intermediare este ceva mai mică decât în regiunea stratului de GaN.



**Fig.4.** Spectrul XPS al stratului GaN/AlGaN/AlN2/AlN1/Si(111), (#162).

Spectrele XPS au fost măsurate pentru straturile de AlGa<sub>N</sub> (#153, 155) și de Ga<sub>N</sub> (156, 162, 164). Spectrul în întregime al unui strat de Ga<sub>N</sub> (#162) este prezentat în Figura 4. Din figură se vede că, în afară de galiu și azot, suprafața stratului mai conține carbon(C1s) și oxigen(O1s). În spectru mai este și o grupă de Auger electroni (GaLMM, GaLMM2, GaLMM3, GaLMM4), precum și urme de aluminiu (Al2s, Al2p). Picurile oxigenului, carbonului și aluminiului sunt de o intensitate neînsemnată. Menționăm ca în spectrul prezentat nu este depistat siliciu; deci, difuziunea lui din substrat a fost blocată. În stratul intermediar de AlGa<sub>N</sub> urme de Si mai erau evidențiate (#153), (Si2s, Si2p). În stratul de Ga<sub>N</sub> crescut timp 30 de minute depistăm o concentrație a aluminiului de 5% at., de cinci ori mai mică decât în stratul de AlGa<sub>N</sub> (#153). După o depunere a stratului de Ga<sub>N</sub> timp de 60 de minute urmele aluminiului pe suprafața mostrei dispar. Rezultatele cercetărilor prin metoda XPS privind energia de legătură a electronilor în atomi, precum și concentrația lor pe suprafața straturilor sunt prezentate în Tabelul 2.

Tabelul 2

Energia de legătura (BE), eV, și concentrația de suprafață, % at., a elementelor

#	C1s eV; at. %	N1s eV; at. %	O1s eV; at. %	Al2p eV; at. %	Ga2p <sub>3/2</sub> eV; at. %	Ga2p <sub>1/2</sub> eV; at. %
153	285.9; 6.6	398.2; 45.6	532.9; 24.5	71.5; 21.5	1119.2; 1.8	1146.1; 1.8
155	287; 25	399.4; 22.7	533.9; 26	76.1; 25.6	1120.4; 0.7	1147.3; 0.7
156	285.8; 6.3	397.6; 61.6	532.1; 10.5	74.4; 5.1	1123.8; 16.5 1118.2; 16.5	1150.8; 16.5 1145.0; 16.5
162	285.4; 9.5	397.0; 61.6	531.6; 6.2	?; <0.1	1117.6; 22.6	1144.6; 22.6
164	285.6; 6.1	397.7; 61.5	532.2; 11.9	?; 0.5	1118; 20	1144.6; 20
Average,E	285.94	397.98	532.34	74	1119.53	
Er [1,2]	288.23	403.78	538.25	76.753	1128.1	
(Er-E)/E, %	0.8	1.45	1.07	3.72	0.76	

Datele din tabel denotă că la suprafața straturilor concentrația carbonului și a oxigenului este ridicată. Ea este generată în incinta reactorului, deoarece precursorii și gazul de transport utilizați au un grad înalt de puritate (5N). Carbonul provine din foaia de grafit utilizată la protejarea reactorului de interacțiune cu compuşii mediului de sinteză a straturilor la temperaturi ridicate. Se presupune că oxigenul apare în urma descompunerii sticlei din cuarț din care este confecționat reactorul ( $\text{SiO}_2 \rightarrow \text{Si} + \text{O}_2$ ). De menționat că concentrația oxigenului în straturile de AlGa<sub>N</sub> (# 153, 155) este cu mult mai mare decât în straturile de Ga<sub>N</sub> (#156, 162, 164) sintetizate la o temperatură mai joasă. Straturile ss au la suprafață o concentrație mai ridicată de aluminiu care, conform [5], acționează mai intens cu oxigenul formând legături de tipul Al-O. În straturile de Ga<sub>N</sub>, sintetizate la temperaturi mai joase, concentrația de suprafață a oxigenului este mai mică decât în straturile ss, însă rămâne încă destul de ridicată ca să poată fi ignorată, ceea ce demonstrează ca și la temperaturile de depunere de ~ 1000°C sursa de oxigen nu dispăre. Valoarea energiei de legătură Al<sub>2p</sub> de 76,1 (#155) corelează satisfăcător cu valoarea de 75,6 eV, care, conform [6], este atribuită legăturii Al-O. De subliniat că concentrația oxigenului (26% at.) în această mostră este de ordinul concentrației aluminiului (de 25, 6% at.). Spectrele XPS ale galiului au 2 picuri care corespund stărilor Ga2p<sub>1/2</sub> și Ga2p<sub>3/2</sub>. Forma și valorile acestor curbe sunt în bună corelație cu cele descrise în literatură [7,8]. În spectrul mostrei #156, pe lângă picurile principale cu energiile de 1118,2 și 1145 eV, mai sunt și două replici de o intensitate mai mică și deplasate cu 1,2 eV la energii mai mari. Aceste picuri nu au fost depistate de noi în literatura accesibilă, proveniența lor va fi investigată în viitor. Valorile energiilor de legătură prezentate în tabel se află în corespundere satisfăcătoare (de ~1%) cu cele publicate de alți cercetători [9-11]. Aceste devieri sunt cauzate de mai mulți factori, cum ar fi puritatea și structura straturilor și suprafețelor, echipamentul de cercetare etc. Analiza compoziției de suprafață arată că concentrația atomilor de galiu în straturile de AlGa<sub>N</sub> este de ~10 ori mai mică decât a aluminiului, cu toate că precursorii elementelor corespunzătoare erau transportați în zona de sinteză în raport aproape echimolar.

### Concluzii

Prin metoda HVPE au fost sintetizate straturi de GaN pe siliciu cu straturi buferale, intermediare de AlN, AlGa<sub>0.3</sub>N. Straturile au fost studiate prin metodele SEM, XRD și XPS. Pe suprafețele straturilor de GaN, AlGa<sub>0.3</sub>N au fost depistate, afară de Al, Ga și N, carbon și oxigen. Carbonul provine din piesele de grafit, care au fost utilizate ca protector al reactorului confecționat din sticlă de cuarț. Se presupune că oxigenul apare în reactor în urma descompunerii sticlei de cuarț (SiO<sub>2</sub>) la temperaturi ridicate în procesul de sintetizare a straturilor. Difuziunea siliciului din substrat este efectiv blocată de straturile de AlN, AlGa<sub>0.3</sub>N. La sintetizarea straturilor de AlGa<sub>0.3</sub>N viteza de încorporare a galiului este de peste 10 ori mai mică decât cea de sintetizare a straturilor de GaN. Precursorii aluminiului reacționează cu mult mai efectiv cu precursorii azotului decât cei ai galiului, ultimii fiind înlăturați din zona de sintetizare de fluxul gazelor de transport.

### Referințe:

1. Gallium Nitride (GaN) Semiconductor Devices Market Analysis By Product (GaN Radio Frequency Devices, Opto-semiconductors, Power Semiconductors), By Wafer Size, By Application, By Region, And Segment Forecasts, 2018-2025.
2. LIDOW, A., STRYDOM, J., ROOIJ, M., REUSCH, D. *GaN Transistors for Efficient Power Conversion*. 2nd Edition, 2014. 266 p. ISBN: 978-1-118-84476-2
3. BRANISTE, T., TIGINYANU, I., HORVATH, T., RAEVSCHI, S., CEBOTARI, S. LUX, M., HAVERICH, A., HILFIKER, A. Viability and proliferation of endothelial cells upon exposure to GaN nanoparticles. In: *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 2016, no7, p.1330-1337.
4. MOONSANG, L., MIKULIK, D., YANG, M., PARK, S. The investigation of stress in freestanding GaN crystals grown from Si substrates by HVPE. In: *Scientific Reports*, 2017, vol.7, Article number: 8587(2017).doi:10.1038/s41598-017-08905-y
5. YANG, H., ZHANG, X, WANG, Sh., ZHU, M., CUI, Y., DAI, N. Surface properties of AlN and Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N epitaxial layers characterized by angle resolved X-ray photoelectron spectroscopy. In: *J. Mater. Sci: Mater. Electron.*, 2015, no26, p.950-954.
6. BIND, D.T. *Energies of Electrons in Atoms from H (Z=1) to Lw (Z=103)*. thomas@chembio.uoguelph.ca.
7. <http://srdata.nist.gov>. База данных по полосам РФЭС.
8. MOTAMEDI, P., CADIEN, K. XPS analysis of AlN thin films deposited by plasma enhanced atomic layer deposition. In: *Applied Surface Science*, 2014, no315, p.104-109.
9. Yang Yingge, MA Honglei, HAO Xiaotao, Ma Jin, XUE Chengshan, ZHUANG Huizhao. Preparation and properties of GaN films on Si(111) substrates. In: *Science in China (Series G)*, vol.46, no.2, p.173-177.
10. CHAUDHARI, G.N., CHINCHAMALATPURE, V.R., GHOSH, S.A. Structural and Electrical Characterization of GaN Thin Films on Si(100). In: *American Journal of Analytical Chemistry*, 2011, no2, p.984-988.
11. PETER, Y.Yu. *Manuel Cardona. Fundamentals of Semiconductors*. Physics and Materials Properties. Springer, 2002.

**Notă:** Aceste cercetări au fost parțial efectuate în cadrul Proiectului Instituțional 15.817.02.34A.

### Date despre autori:

**Simion RAEVSCHI**, cercetător științific coordonator în LCȘ „Fizica semiconductorilor”, Universitatea de Stat din Moldova.

**E-mail:** raevskis@mail.ru

**Nicolae SPALATU**, doctor, Departamentul de Materiale și Tehnologia Mediului, Universitatea Tehnologică din Tallin (Estonia).

**E-mail:** nickspalatu@gmail.com

**Vasile BOTNARIUC**, cercetător științific coordonator în LCȘ „Fizica semiconductorilor”, Universitatea de Stat din Moldova

**E-mail:** v\_botnariuc@hotmail.com

**Leonid GORCEAC**, cercetător științific coordonator în LCȘ „Fizica semiconductorilor”, Universitatea de Stat din Moldova.

**E-mail:** lgorceac@yahoo.com

**Tamara POTLOG**, doctor, conferențiar universitar; șef LCȘ „Materiale organice/anorganice în optoelectronică”, Universitatea de Stat din Moldova.

**E-mail:** tpotlog@gmail.com

**Marius DOBROMIR**, doctor, Facultatea de Fizică, Universitatea „Al.I. Cuza” din Iași (România)

**E-mail:** mariusdobromir@yahoo.com

Prezentat la 11.05.2018