

# Badanie elektrycznych właściwości powierzchni heterostruktur AlGaIn/GaN/Si techniką skaningowej mikroskopii pojemnościowej

**Streszczenie.** Znaczne niedopasowanie stałych sieciowych oraz współczynników rozszerzalności cieplnej występujące pomiędzy warstwą epitaksjalną, a podłożem w heterostrukturach AlGaIn/GaN/Si skutkuje dużą ilością defektów strukturalnych oraz występowaniem niejednorodności właściwości półprzewodnika. W prezentowanej pracy do zobrazowania lokalnych powierzchniowych niejednorodności elektrycznych właściwości AlGaIn/GaN osadzanych na podłożu krzemowym techniką MOCVD została wykorzystana technika skaningowej mikroskopii pojemnościowej. Z analizy dwuwymiarowych map sygnału SCM oraz widm  $dC/dV_{amp} = f(V_{DC})$  w różnych obszarach powierzchni próbki wynika, że ujemny ładunek zgromadzony na dyslokacjach wstępujących w warstwach epitaksjalnych wpływa na właściwości powierzchni, lecz może nie mieć zdecydowanego wpływu na powstawanie dwuwymiarowego gazu elektronowego na interfejsie AlGaIn/GaN.

**Abstract.** Large mismatch of lattice constants and thermal expansion coefficients between materials in AlGaIn/GaN/Si heterostructures lead to high density of structural defects and material inhomogeneities in layers. In the presented work, local electronic properties of AlGaIn/GaN/Si heterostructures are investigated using scanning capacitance microscopy. Analysis of two dimensional images of SCM signal and  $dC/dV_{amp} = f(V_{DC})$  spectrum allowed to conclude that negative charge accumulated at dislocations in epitaxial layers could affect the surface electronic state of the structure but might not have major impact on two dimensional electron gas formation at the AlGaIn/GaN interface. (Electrical surface characterization of AlGaIn/GaN/Si heterostructures by scanning capacitance microscopy).

**Słowa kluczowe:** SCM, skaningowa mikroskopia pojemnościowa, AlGaIn/GaN/Si, azotek galu, C-V

**Keywords:** scanning capacitance microscopy, SCM, AlGaIn/GaN/Si, gallium nitride, C-V

## Wprowadzenie

Duża koncentracja i ruchliwość dwuwymiarowego gazu elektronowego (2DEG) na interfejsie AlGaIn/GaN, bardzo dobra stabilność termiczna oraz duże napięcie przebicia, czynią przyrządy wykonane na bazie wspomnianych heterostruktur ważnymi elementami elektroniki wysokich częstotliwości i mocy. Dodatkowo, zastosowanie krzemu jako podłoża epitaksjalnego obniża koszty produkcji oraz umożliwia integrację z istniejącą technologią CMOS. Jednakże istniejące niedopasowanie stałych sieciowych oraz współczynników rozszerzalności cieplnej występujące pomiędzy warstwą epitaksjalną a podłożem w heterostrukturach AlGaIn/GaN/Si skutkuje dużą ilością defektów strukturalnych oraz występowaniem niejednorodności elektrycznych i optycznych właściwości powstającej warstwy [1, 2]. W przedstawionej pracy do zobrazowania lokalnych powierzchniowych niejednorodności elektrycznych właściwości heterostruktur AlGaIn/GaN/Si wykorzystano skaningową mikroskopię pojemnościową (SCM) będącą jedną z zaawansowanych technik mikroskopii sił atomowych (AFM). W technice tej zmiennym napięciem polaryzowane jest przewodzące ostrze mikroskopu, skanujące w trybie kontaktowym powierzchnię półprzewodnika pokrytą cienką warstwą tlenku. Dla każdego położenia ostrza zmiana pojemności ( $dC$ ) powodowana zmianą napięcia ( $dV_{amp}$ ) w tak wytworzonej strukturze MOS (ang.: metal-oxide-semiconductor) jest rejestrowana. Wielkość sygnału SCM ( $dC/dV_{amp}$ ) zależy od koncentracji wolnych nośników prądu pod ostrzem AFM i w czasie pomiaru próbki powstaje dwuwymiarowy obraz rozkładu tego parametru jednocześnie z obrazem topografii. Dokładny opis zasady pomiaru oraz budowy systemu do pomiarów metodą SCM znajduje się w [3].

## Eksperyment

Pomiary zostały wykonane z wykorzystaniem mikroskopu AFM Bruker Multimode V wyposażonym w moduł Skaningowej Mikroskopii Pojemnościowej. Zastosowano przewodzące krzemowe ostrze pokryte

warstwą Pr/Ir o nominalnym promieniu krzywizny wynoszącym 20 nm do którego przyłożono napięcie zmienne  $V_{amp} = 1000$  mV i którym skanowano powierzchnię próbki z szybkością 3  $\mu\text{m/s}$  oraz siłą nacisku około 200 nN. Jako warstwę izolatora wykorzystano tlenek samoistny występujący na powierzchni heterostruktury a jako dolny kontakt zastosowano srebrną pastę przewodzącą. Opis sposobu przygotowania próbek oraz doboru właściwych parametrów pomiaru przedstawiono w [4].

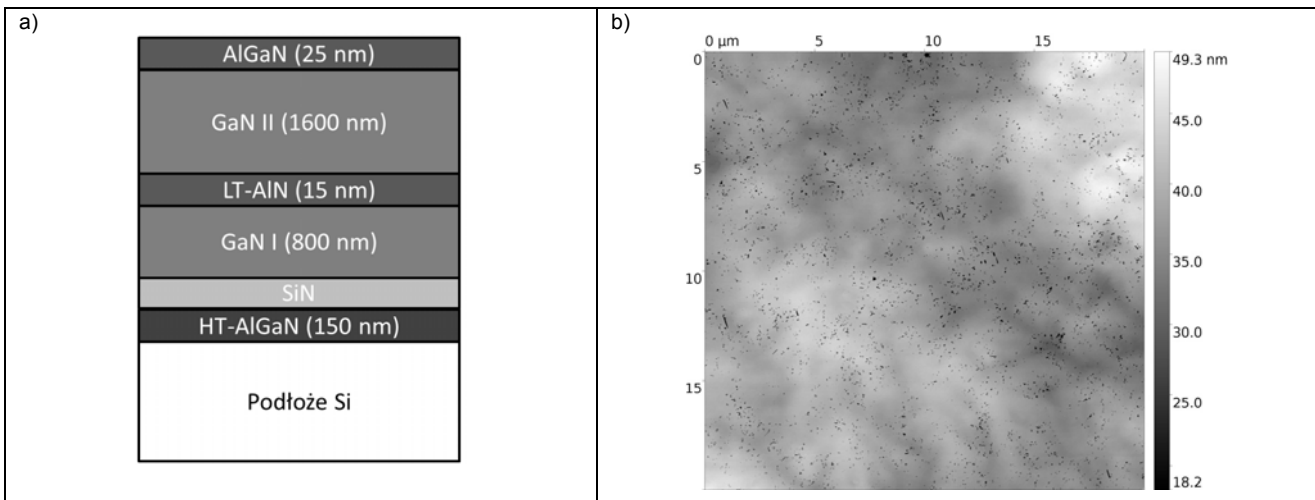
Do osadzenia heterostruktury AlGaIn/GaN na podłożu krzemowym o konstrukcji przedstawionej na rysunku 1a wykorzystano technikę epitaksji z fazy gazowej z użyciem wykorzystano metaloorganicznych. Szczegółowy opis procesu projektowania i wytwarzania, a także wyniki badań strukturalnych mierzonej próbki można znaleźć w [5]. Cechą charakterystyczną powierzchni badanej heterostruktury jest występowanie dużej gęstości defektów ( $\sim 1 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ ) w postaci regularnych V-kształtnych mikrowgłębi o głębokości dziesiątków nanometrów wiążących dyslokację lub aglomeracje dyslokacji wstępujące w warstwie GaN [5]. Zasadniczym celem badań metodą SCM było określenie, czy i jaki wpływ mogą one mieć na lokalne właściwości elektryczne struktury.

## Wyniki

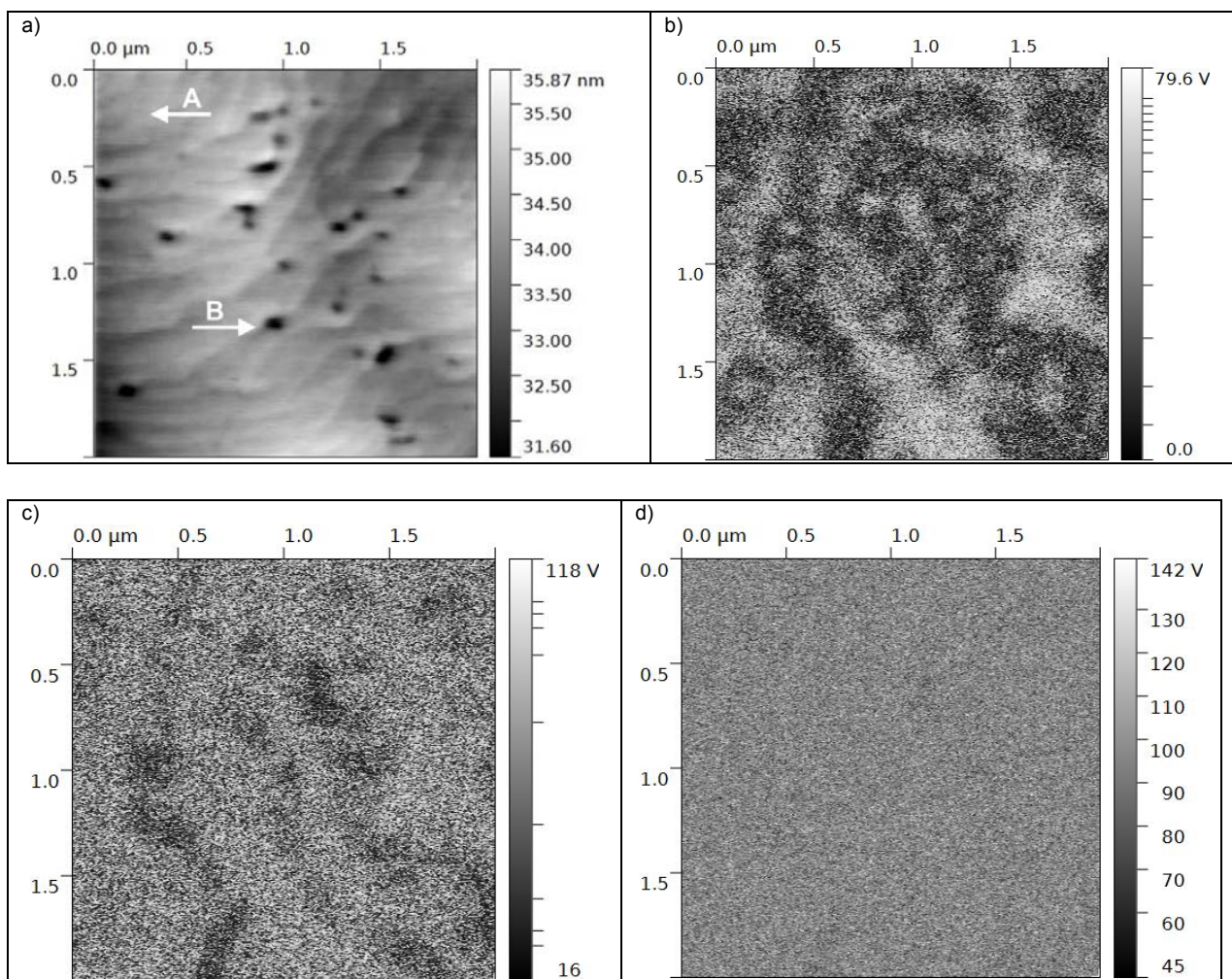
Przeprowadzono dwa rodzaje charakteryzacji metodą SCM. W pierwszym przypadku otrzymywano mapy sygnału  $dC/dV_{amp}$  z powierzchni o wymiarach  $2\mu\text{m} \times 2\mu\text{m}$  dla różnych napięć stałych ( $V_{DC}$ ) polaryzujących próbkę (rys.2). Drugi etap polegał na pomiarze, widma  $dC/dV_{amp} = f(V_{DC})$  w dwóch charakterystycznych obszarach powierzchni próbki: w pobliżu defektu powierzchni i w obszarze bezdefektowym, wyniki przedstawiono na rysunku 3. Obszary te zostały zaznaczone odpowiednio na rysunku 2a. Na wykresach widmowych widoczne jest występowanie dwóch sygnałów związanych z dwoma napięciami progowymi:  $V_{th1}$  – napięcie tworzenia się 2DEG na interfejsie AlGaIn/GaN i  $V_{th2}$  – napięcie „wyptywania” nośników z 2DEG w kierunku powierzchni bariery AlGaIn. Występowanie tych wartości szczytowych jest zgodne z wynikami symulacji

przedstawionymi w pracy [6]. Przesunięcie punktu  $V_{th2}$  dla obszaru w pobliżu mikrowgłębienia w stosunku do obszaru bezdefektowego ( $\Delta V_{th2} = -0,01$  V), otrzymane dzięki dopasowaniu funkcją Gaussa, świadczy o ujemnym ładunku elektrycznym zgromadzonym w pobliżu defektu powierzchniowego. Jest to zgodne z wcześniejszymi

obserwacjami dotyczącymi gromadzenia się ujemnego ładunku na głębokich stanach akceptorowych w pobliżu pasma podstawowego związanych z dyslokacjami wstępującymi [7].

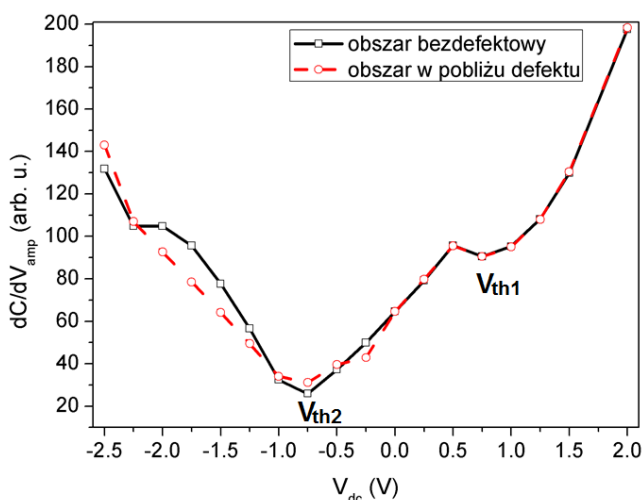


Rys.1. a) Schematyczny przekrój konstrukcji badanej heterostrukcji AlGaIn/GaN/Si, b) obraz AFM topografii powierzchni



Rys.2. a) Mapa topografii oraz mapa sygnału SCM dla różnych napięć  $V_{DC}$  przyłożonych do próbek: b)  $V_{DC} = -0,50$  V, c)  $V_{DC} = 0$  V, d)  $V_{DC} = 0,75$  V

Jednocześnie, można zaobserwować brak przesunięcia wartości szczytowej  $V_{th1}$  co pozwala wnioskować, że ujemny ładunek związany z dyslokacją nie ma istotnego wpływu na powstawanie dwuwymiarowego gazu elektronowego na interfejsie AlGaIn/GaN. Potwierdza to, wcześniejsze badania dowodzące, że pomimo stosunkowo dużej gęstości defektów w heteroepitaksjalnych warstwach azotkowych (w porównaniu np. do krzemu czy arsenku galu) nie mają one decydującego wpływu na zjawiska transportu nośników prądu w 2DEG [8]. Mapa SCM (rys.4d) dla napięcia  $V_{DC} = 0,75$  V potwierdza brak występowania niejednorodności sygnału w okolicach punktu  $V_{th1}$  na skutek ekranowania ładunku na dyslokacji dużą koncentracją elektronów z 2DEG. Natomiast na mapie SCM uzyskanej przy polaryzacji próbki napięciem stałym o wartości bliskiej  $V_{th2}$ , widać, że niejednorodności sygnału nie występują tylko w miejscach mikrowgłębieni, ale także obszarach między nimi, co może być efektem istnienia ładunku na liniach granic ziaren w warstwie epitaksjalnej, które również mogą łądować się ujemnie [9].



Rys.3. Widmo  $dC/dV_{amp} = f(V_{DC})$  zmierzone w z daleka od defektu i w pobliżu defektu

### Podsumowanie

Skaningowa mikroskopia pojemnościowa pozwoliła na obserwację powierzchniowych niejednorodności właściwości elektrycznych warstw AlGaIn/GaN/Si z rozdzielczością dziesiątków nanometrów. Zaobserwowano wpływ ładunku zgromadzonego na dyslokacjach wstępujących na zjawiska akumulacji nośników przy powierzchni bariery AlGaIn, jednak nie zaobserwowano takiego wpływu na proces powstawania 2DEG na interfejsie AlGaIn/GaN. W ten sposób po raz pierwszy pokazano, przy pomocy bezpośredniego pomiaru, że defekty strukturalne występujące w heterostrukturach AlGaIn/GaN mogą nie

mieć znacznego wpływu na zjawiska transportu prądu w przyrządach bazujących na tych strukturach.

Praca była współfinansowana w ramach badań statutowych Politechniki Wrocławskiej, przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Innowacyjna Gospodarka (POIG.01.01.02-00-008/08), przez NCBIR w ramach projektu LIDER/027/533/L-5/13/NCBIR/2014, przez NCN w ramach projektu 2015/19/B/ST7/02494, oraz przez Slovak-Polish International Cooperation Program.

**Autorzy:** dr inż. Adam Szyszka, mgr inż. Tomasz Szymański, prof. dr hab. inż. Marek Tłaczała, dr inż. Mateusz Wośko, prof. dr hab. inż. Regina Paszkiewicz, Politechnika Wroclawska, Wydział Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki, ul. Janiszewskiego 11/17, 50-372 Wrocław, E-mail: [adam.szyszka@pwr.edu.pl](mailto:adam.szyszka@pwr.edu.pl), [marek.tlaczala@pwr.edu.pl](mailto:marek.tlaczala@pwr.edu.pl), [regina.paszkiewicz@pwr.edu.pl](mailto:regina.paszkiewicz@pwr.edu.pl).

### LITERATURA

- [1] Kwon Y.B., Je J.H., Ruterana P., and Nouet G., On the origin of aa-type threading dislocations in GaN layers, *Journal of Vacuum Science & Technology A* 23 (2005), 1588
- [2] Simpkins B.S., Yu E.T., Waltereit P. and Speck J.S., Correlated scanning Kelvin probe and conductive atomic force microscopy studies of dislocations in gallium nitride, *J. Appl. Phys.*, 94 (2003), 1448
- [3] Bhushan B. (Ed.), *Scanning Probe Microscopy in Nanoscience and Nanotechnology 2*, Springer International Publishing AG, 2011
- [4] Szyszka A., Oblak M., Szymański T., Wośko M., Dawidowski W., Paszkiewicz R., Scanning Capacitance Microscopy characterization of AlInBV epitaxial layers, *Materials Science-Poland* 34 (2016), 845
- [5] Szymański T., Wośko M., Wzorek M., Paszkiewicz B. and Paszkiewicz R., Origin of surface defects and influence of an in situ deposited SiN nanomask on the properties of strained AlGaIn/GaN heterostructures grown on Si(111) using metal-organic vapour phase epitaxy, *CrystEngComm*, 18 (2016), 8747
- [6] Smith K.V., Yu E.T., Redwing J.M. and Boutros K.S., Scanning capacitance microscopy of AlGaIn/GaN heterostructure field-effect transistor epitaxial layer structure, *Appl. Phys. Lett.* 75 (1999), 2250
- [7] Koley G. and M.G. Spencer, *Scanning Kelvin probe microscopy characterization of dislocations in III-nitrides grown by metalorganic chemical vapor deposition*, *Phys. Lett.*, 78 (2001), 2873
- [8] Protasov D.Yu., Malin T.V., Tikhonov A.V., Tsatsulnikov A.F., and Zhuravlev K.S., Electron scattering in AlGaIn/GaN heterostructures with a two-dimensional electron gas, *Semiconductors*, 47 (2013), 33
- [9] Hsu J.W.P., Ng H.M., Sergent A.M., Chu S.N.G., Scanning Kelvin force microscopy imaging of surface potential variations near threading dislocations in GaN, *Appl. Phys. Lett.*, 81 (2002), 3579