

Prof. dr hab. Marek Berkowski
Instytut Fizyki PAN

Ocena prac stanowiących jednotematyczny cykl publikacji będących podstawą postępowania habilitacyjnego oraz dorobku naukowego doktora Michała Boćkowskiego

Podstawą postępowania habilitacyjnego jest cykl siedmiu prac naukowych opublikowanych w latach 2002 – 2012, trzy z nich to artykuły naukowe, a cztery to recenzowane prace konferencyjne. Wszystkie zostały opublikowane w czasopiśmie Journal of Crystal Growth, IF (Impact Factor) = 1.74.

We wszystkich siedmiu pracach dr Boćkowski jest pierwszym autorem. Biorąc to pod uwagę oraz na podstawie analizy dołączonych do dokumentacji habilitacyjnej oświadczeń współautorów, należy uznać, że wkład naukowy habilitanta w realizacji tych prac był dominujący. Prace będące podstawą postępowania habilitacyjnego stanowią logiczny ciąg badań nad określeniem optymalnej konfiguracji eksperymentalnej dla ukierunkowanego wzrostu azotku galu (GaN), głównie na podłożach GaN, metodą krystalizacji wysokociśnieniowej z roztworu atomowego azotu w galu (High Nitrogen Pressure Solution method, HNPS). Tematykę tę z całą pewnością można uznać za bardzo ważną, zarówno z punktu widzenia badań podstawowych, jak i zastosowań. Pomimo dynamicznego rozwoju technologii krystalizacji z fazy gazowej (Hydride Vapor Phase Epitaxy, HVPE) oraz otrzymaniem najlepszych jakościowo kryształów GaN metodą amonotermalną metoda krystalizacji wysokociśnieniowej HNPS dalej się rozwija i pozwala na uzyskiwanie kryształów nadających się do zastosowań praktycznych.

Poniżej omówię bardziej szczegółowo prace będące podstawą postępowania habilitacyjnego. Cykl siedmiu publikacji cytowany był łącznie 74 razy, przy czym dwie prace konferencyjne, które z reguły mają mniejszy oddźwięk w środowisku i traktowane są jako wstępne doniesienia, cytowane są nieznacznie lepiej niż prace oryginalne.

W publikacji H1 opublikowanej w 2002 r. przedstawiono wyniki krystalizacji GaN na podłożach przygotowanych z heksagonalnych płytek azotku galu otrzymanych w wyniku spontanicznej krystalizacji metodą wysokociśnieniową HNPS. Przedstawiono metodę przygotowywania powierzchni płytek do epitaksji. Proces krystalizacji prowadzono w konfiguracji naturalnej, podłoże umieszczone było na dnie komory wzrostu. Przedstawiono standardową procedurę stosowaną w celu zwilżenia przez ciekły gal powierzchni podłoża i określono parametry technologiczne tego procesu. Badano warunki krystalizacji zarówno na

kierunku $\langle 0001 \rangle$ jak i na $\langle 000\bar{1} \rangle$. Stabilny wzrost kryształu uzyskano tylko na kierunku $\langle 0001 \rangle$. Wzrost na kierunku przeciwnym (strona azotowa podłoża) prowadził do niestabilności i spontanicznej krystalizacji. Prędkość wzrostu kryształu zależała od stosowanego gradientu temperatury. Przy gradencie do $20^\circ\text{C}/\text{cm}$ uzyskiwano wzrost kryształu z płaskim frontem krystalizacji i średnimi prędkościami wzrostu do $2 \mu\text{m}/\text{h}$. Przy gradencie od $20^\circ\text{C}/\text{cm}$ do $50^\circ\text{C}/\text{cm}$ prędkość wzrostu kryształu rosła do $10 \mu\text{m}/\text{h}$ ale prowadziło to do destabilizacji płaskiego frontu krystalizacji, formowania się centralnego wzniesienia i makroskopowych stopni. Grubości otrzymanych warstw dochodziły do $200 \mu\text{m}$. Wzrost kryształu był bezdyslokacyjny a gęstość dyslokacji była na poziomie $10^2/\text{cm}^2$ a więc na poziomie stosowanej zarodki.

W dalszej części pracy przedstawiono po raz pierwszy wyniki krystalizacji metodą z fazy gazowej HVPE na podłożach azotku galu otrzymanych w wyniku spontanicznej krystalizacji metodą wysokociśnieniową. Uzyskano zadowalające prędkości wzrostu do $50 \mu\text{m}/\text{h}$ i bezdyslokacyjne warstwy o grubości ponad $200 \mu\text{m}$. Autorzy zwracają również uwagę na to, że rysy powstałe podczas obróbki mechanicznej podłoża powodują generowanie w rosnącej warstwie dyslokacji układających się w linie zgodne z kierunkami tych rys na uszkodzonej powierzchni podłoża. Praca ta ma najwięcej cytowań (23) ze wszystkich prac stanowiących podstawę postępowania habilitacyjnego. Najprawdopodobniej jest to spowodowane tym, że w drugiej części pracy już w 2002 r. pokazano korzystny kierunek w jakim powinny iść badania - krystalizację z fazy gazowej na podłożach o niskiej gęstości dyslokacji. Istotnym problemem do rozwiązania utrudniającym szerokie stosowanie tej metody była konieczność zwiększenia rozmiaru bezdyslokacyjnych podłoży GaN, co nie było możliwe w 2002 r.

W pracy H2 przedstawiono wyniki badań nad wzrostem kryształów GaN na podłożach z węgla krzemowego, szafiru, i na podłożu z cienką warstwą GaN otrzymaną metodą HVPE na szafirze. Wysokociśnieniowe procesy krystalizacji z fazy ciekłej prowadzono w temperaturze 1400°C , wyższej niż stosowana na tych samych podłożach podczas procesów epitaksji z fazy gazowej. Ustalono, że równowagowe ciśnienie azotu przy krystalizacji na obcych podłożach musi być wyższe o około 100MPa niż na podłożach GaN. Procesy krystalizacji prowadzono zarówno dla konfiguracji naturalnej jak i odwrotnej (podłoże w górnej części tygla i zmieniony kierunek gradientu temperatury). Warstwy rosnące na szafirze były polikrystaliczne a na SiC polikrystaliczne i spękane. Pozytywne rezultaty uzyskano wyłącznie na podłożach GaN/szafirze. Prędkości stabilnego wzrostu wynosiły $1-2 \mu\text{m}/\text{h}$ i przy tej samej wartości gradientu temperatury były dwukrotnie wyższe przy konfiguracji odwrotnej niż dla

normalnej. Gęstość dyslokacji w osadzonej warstwie zmniejszyła się więcej niż o jeden rząd w porównaniu z gęstością dyslokacji w stosowanym podłożu.

Kolejna praca H3 zawiera wyniki krystalizacji na podłożach GaN/szafirze o powierzchni 1 cm^2 w obu konfiguracjach, naturalnej i odwrotnej. Zastosowano po raz pierwszy przegrodę w roztworze położoną tuż przy podłożu ułatwiającą wzrost warstwy z płaskim frontem krystalizacji. Zbadano szczegółowo proces krystalizacji przy różnych wartościach gradientu temperatury. Potwierdzono wyniki z poprzedniej publikacji, że prędkość wzrostu warstwy wzrasta wraz ze wzrostem wartości gradientu temperatury. Udokumentowano, że zastosowanie przegrody w roztworze pozwala na uzyskanie stabilnego wzrostu przy większych gradientach temperatury, jednak obniża średnią prędkość wzrostu. Pokazano, że przy utrzymywaniu stałej wartości gradientu temperatury, początkowa wysoka prędkość wzrostu, związana głównie z transportem azotu do strefy krystalizacji, prędko obniża się do wartości $1 - 2 \mu\text{m/h}$. Po dłuższym czasie, nawet przy dużym gradientie temperatury zaczyna dominować kinetyka powierzchni, która w końcu zatrzymuje wzrost kryształu.

W kolejnej doświadczalnej pracy H4 omówiono wyniki krystalizacji na podłożach GaN/szafirze o powierzchni ukształtowanej w pasy wzdłuż kierunków $\langle 10-10 \rangle$ i $\langle 11-20 \rangle$. Utworzone poprzez procesy trawienia na powierzchni podłoża paski GaN rozrastały się lateralnie powiększając swoją szerokość od 3 do 10 razy w zależności od odległości pomiędzy pasami. Kierunek $\langle 11-20 \rangle$ był korzystniejszy dla wzrostu lateralnego. Gęstość dyslokacji na obszarach gdzie zachodził wzrost lateralny była niższa o około dwa rzędy wielkości. Pomiedzy paskami obserwowano spontaniczną krystalizację.

Prace H5 do H7 są w zasadzie również doświadczalne, chociaż są w znaczącym stopniu uzupełnione wynikami symulacji numerycznych. Są to prace, które zostały opublikowane w latach 2007 - 2012. Chcę zaznaczyć, że tę grupę prac oceniam wyżej od prac czysto eksperymentalnych.

W pracy H5 badano krystalizację na podłożach GaN/szafirze o rozmiarze 1 cala. Omówiono pięć różnych konfiguracji procesu krystalizacji z krystalizacją na dnie tygla, w naturalnym gradiencie temperatury. Trzy z tych konfiguracji realizowano z przegrodą w pobliżu podłoża, jednak z różnymi wartościami otwarcia jej dla dostępu roztworu do podłoża. Wszystkie eksperymenty przeprowadzono w tych samych warunkach eksperymentalnych. Porównano wartości mas GaN osadzonych przy różnych konfiguracjach na podłożu i w innych miejscach tygla. Pozwoliło to na stwierdzenie, że prędkość wzrostu warstwy bardzo silnie zależy od kinetyki zjawisk zachodzących na powierzchni podłoża i że nie wszystkie

atomy azotu dochodzące do zarodki są na niej absorbowane. Przeprowadzono modelowanie linii prądu i wektorów prędkości w roztworze. Wyznaczono izotermy na ściankach tygla i w roztworze. Analizowana była rola przegrody, pokazano, że redukuje ona przepływ roztworu w pobliżu podłoża i ma znaczący wpływ na wzrost kryształu z makroskopowo płaskim frontem krystalizacji. W przypadku tej pracy należy stwierdzić, że uzyskano szereg cennych wyników zarówno eksperymentalnych jak i wynikających z modelowania numerycznego.

W pracy H6 zrezygnowano z krystalizacji ukierunkowanej na rzecz konfiguracji pozwalającej na wzrost kryształu w każdym kierunku. Podłoża HVPE-GaN w formie płytek były zawieszane i zanurzone w roztworze galu. Określono przepływy konwekcyjne w roztworze i znaleziono eksperymentalnie obszar Ostwalda-Miersa dla uzyskania stabilnego wzrostu kryształu. Analizowano wzrost w obu kierunkach $\langle 0001 \rangle$ i $\langle 000\bar{1} \rangle$ lecz tylko wzrost w kierunku $\langle 0001 \rangle$ (po t.zw. stronie galowej) okazał się stabilny. Wyniki uzyskane w tej publikacji sugerują, że możliwy jest wzrost relatywnie grubej warstwy GaN na podłożu HVPE-GaN, która po odseparowaniu od zarodki stanie się wolno stojącym kryształem GaN.

W ostatniej pracy z tego cyklu, H7, powrócono do krystalizacji ukierunkowanej w konfiguracji multi-feed-seed (MFS) zaproponowanej przez I. Grzegory. Polega ona na ułożeniu kilku podłoży HVPE-GaN jedno nad drugim, przedzielonych ciekłym galem. Podłoża znajdują się w naturalnym gradiencie temperatury. Na górnej stronie podłoża zachodzi krystalizacja GaN, a dolna strona podłoża jest rozpuszczana. W pracy określono metodami numerycznymi kierunki przepływów konwekcyjnych roztworu, wartości prędkości konwekcji i rozkład izoterm w komorze wzrostu. Właściwości strukturalne uzyskanych warstw są znacznie lepsze niż stosowanych w procesie krystalizacji podłoża HVPE-GaN. Gęstość dyslokacji w otrzymanej warstwie obniża się, a koncentracja swobodnych nośników wzrasta wraz ze wzrostem temperatury procesu krystalizacji. Dalszy rozwój tej metody pozwolił na otrzymanie zarówno wysoko- przewodzących jak i (przy domieszkowaniu Mg) wysoko-oporowych kryształów GaN. Obecnie konfiguracja MFS jest podstawową metodą otrzymywania podłoży dla budowy przyrządów elektronicznych i optoelektronicznych w IWC PAN.

Dorobek naukowy dr Boćkowskiego, zgodnie z bazą Web of Science (WoS), składa się ze 157 publikacji. Szesnaście z tych publikacji ukazało się przed uzyskaniem stopnia doktora. Należy podkreślić, że część artykułów współautorstwa dr Boćkowskiego została opublikowana w czasopiśmie o wysokim IF -9 prac w Appl. Phys. Lett. (IF = 3.8), 8 prac w Phys. Rev. B. (IF = 3.7), 7 prac w J. of Appl. Phys. (IF = 2.1), 23 prace w J. of Crystal Growth. (IF = 1.74). Prace te były dotychczas cytowane 1909 razy (bez uwzględnienia

autocytowań), indeks Hirscha wynosi 26. Należy uznać, że liczba cytowań jest bardzo wysoka. Dorobek naukowy dr Boćkowskiego oceniam zdecydowanie pozytywnie.

Dr Boćkowski po ukończeniu studiów na kierunku Fizyka Ciała Stałego na Wydziale Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej Politechniki Warszawskiej rozpoczął w 1989 r. pracę jako asystent w Instytucie Wysokich Ciśnień PAN. Studia doktoranckie odbył w latach 1992 - 1995 na Uniwersytecie Montpellier II (Francja) i zakończył je z wynikiem celującym obroną pracy doktorskiej pod tytułem „Otrzymywanie azotku glinu poprzez reakcję samo propagującego się spalania w wysokim ciśnieniu hydrostatycznym gazu”. Od 1996 r. do dziś pracuje jako adiunkt w IWC PAN. Od początku swojej pracy naukowej specjalizował się w pracach badawczych nad krystalizacją objętościowych kryształów azotku galu metodą wysokociśnieniową i krystalizacją z fazy gazowej. Ponadto prowadził prace nad przygotowaniem powierzchni kryształów GaN do epitaksji. Od 2004 r. pracował jako technolog w spółce z o.o. TopGaN kontynuując tą samą tematykę badawczą a od 2008 r. objął funkcję Wiceprezesa TopGaN gdzie jest odpowiedzialny za prace bieżące Zarządu i realizację projektów naukowo-technologicznych i wdrożeniowych. Praktycznie cała jego działalność zawodowa była związana z pracami będącymi podstawą postępowania habilitacyjnego.

Dr Boćkowski uczestniczył w 45 konferencjach krajowych i międzynarodowych. Wygłosił 19 referatów zaproszonych w tym 12 z nich na konferencjach międzynarodowych. W 2009 r. był przewodniczącym 6th International Workshop of Nitrides (IWBNS-VI) w Polsce a w dwa lata później współprzewodniczącym IWBNS-VII w Koyasan, Wakayama w Japonii. Był przewodniczącym i współprzewodniczącym wielu sesji poświęconych wzrostowi półprzewodników azotkowych na konferencjach takich jak International Workshop of Nitrides (IWN), International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS). Pozostała działalność dydaktyczna Dr Boćkowskiego ograniczała się do prowadzenia w latach 2002 - 2012 praktyk studenckich w Laboratorium Krystalizacji IWC PAN, a w działalności popularyzatorskiej do uczestnictwa w Piknikach Naukowych.

Dr Boćkowski kierował bądź aktualnie kieruje czterema projektami badawczymi i był aktywnym wykonawcą w siedmiu projektach wykonywanych w ramach Krajowych Sieci Naukowych i programu POIG. Ponadto jako Wiceprezes spółki TopGaN prowadził bądź prowadzi nadzór formalny i merytoryczny nad 17. projektami badawczymi.

Dr Boćkowski owocnie współpracuje z grupami naukowymi w kilku ośrodkach zagranicznych (m. in.: z Instytutem Technologii Nuklearnych w Portugalii, University of Strathclyde w Szkocji, uniwersytetem Linkoping w Szwecji oraz Aalto w Finlandii). Ma

bardzo dobrą współpracę z szeregiem Ośrodków naukowych w Polsce takich jak: Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, Instytut Fizyki PAN, Instytut Fizyki Politechniki Warszawskiej czy Instytut Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN we Wrocławiu. Należy także pamiętać o jego działalności organizacyjnej. W latach 2007-2008 był ekspertem w narodowym Programie Foresight „Polska 2020”, a w roku 2007 ekspertem kluczowym w projekcie „Monitorowanie i prognozowanie priorytetowych, innowacyjnych technologii dla zrównoważonego rozwoju województwa mazowieckiego”. Dr Boćkowski w roku 1998 otrzymał nagrodę European High Pressure Research Group za wkład pracy nad półprzewodnikami z grupy azotków, a w roku 2011 uznanie za wkład do Międzynarodowego sympozjum na temat Wzrostu Kryształów, Korean Association of Crystal Growth Plaue of Appreciation. Część publikacji zgłoszonych jako osiągnięcie habilitacyjne to prace eksperymentalne, jednak zawierają one ważne wyniki istotne dla rozwoju technologii krystalizacji GaN. Oceniając łącznie prace stanowiące jednotematyczny cykl publikacji będących podstawą postępowania habilitacyjnego i dorobek naukowy dr Michała Boćkowskiego, uznaję, że spełnione są wymagania określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki. Wniosuję o nadanie dr Boćkowskiemu stopnia naukowego doktora habilitowanego.

