

Warszawa 01.03.2013

Michał Boćkowski

Instytut Wysokich Ciśnień PAN

Sokołowska 29/37, 01-142 Warszawa

Autoreferat

Spis treści

1. Dane personalne.....	2
2. Wykształcenie i stopnie naukowe.....	2
3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu.....	3
4. Informacje o opublikowanych pracach naukowych i twórczych pracach zawodowych.....	3
4.1 Całkowita liczba publikacji.....	3
4.2 Sumaryczny Impact Factor publikacji według listy Journal Citation Report.....	4
4.3 Całkowita liczba cytowań publikacji i indeks Hirsh'a według bazy Web of Science z dnia 01.03.2013.....	4
4.4 Inne twórcze prace zawodowe.....	4
5. Kierowanie i udział w krajowych i międzynarodowych projektach badawczych.....	5
6. Wykaz referatów zaproszonych wygłoszonych na międzynarodowych lub krajowych konferencjach tematycznych.....	8
7. Wykaz opublikowanego cyklu artykułów stanowiących osiągnięcie naukowe zgodnie z art. 16 ust 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. Nr 65 poz. 595 z późn. zm).....	9
8. Przebieg pracy naukowej.....	11
8.1 Dorobek naukowy do uzyskania stopnia doktora.....	11
8.2 Dorobek naukowy po uzyskaniu stopnia doktora.....	11
8.2.1 Osiągnięcie naukowe stanowiące przedmiot habilitacji-cykl publikacji pt. Ukierunkowany wzrost kryształów azotku galu na zarodkach metodą krystalizacji wysokociśnieniowej z roztworu atomowego azotu w galu -omówienie celu naukowego wybranego cyklu publikacji i osiągniętych wyników.....	12
8.2.2 Działalność w innych tematykach badawczych.....	17
8.2.3 Pozostałe osiągnięcia.....	17
8.3 Podsumowanie.....	19
8.4 Spis cytowanej literatury.....	20

1. Dane personalne

Imię i Nazwisko:

Michał Stanisław Boćkowski

Data i miejsce urodzenia:

1985-03-03, Milanówek, Polska

Narodowość:



Stan cywilny:

Adres:

Domowy:

Praca:

Instytut Wysokich Ciśnień PAN, Sokołowska 29/37 01-142, Warszawa, Polska

TopGaN Sp. z o.o., Sokołowska 29/37, 01-142, Warszawa, Polska

Tel. kom:

e-mail:

2. Wykształcenie i stopnie naukowe

Stopnie naukowe:

mgr inż. Podstawowych Problemów Techniki, kierunek: Fizyka Ciała Stałego, Wydział Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej, Politechnika Warszawska, Polska, 1989

doktor Uniwersytetu Montpellier II (Francja), **Studia doktoranckie: Materia Skondensowana; Dziedzina: Materiały Elektroniczne i Joniki Ciała Stałego;** Specjalność: Chemia Materiałowa; 1995,

Temat pracy doktorskiej:

"Synthèse du nitrure d'aluminium par combustion auto-propagée sous haute pression hydrostatique de gaz"

(Otrzymywanie azotku glinu poprzez reakcję samo propagującego się spalania w wysokim ciśnieniu hydrostatycznym gazu)

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu

1989-1991 - Asystent, IWC PAN

1992-1995 - studia doktoranckie: Materia Skondensowana; Dziedzina: Materiały Elektroniczne i Joniki Ciała Stałego; Specjalność: Chemia Materiałowa; Uniwersytet Montpellier II (Francja),

1996 do dziś – Adiunkt, IWC PAN

prowadzenie prac badawczych nad krystalizacją objętościowych kryształów azotku galu metodą wysokociśnieniową (krystalizacja z roztworu) i niskociśnieniową (krystalizacja z fazy gazowej); prowadzenie prac nad przygotowaniem powierzchni kryształów azotku galu do stanu nadającego się do epitaksji.

2004-2008 – Technolog, TopGaN Sp. z o.o.

praca przy krystalizacji objętościowych kryształów azotku galu metodą wysokociśnieniową (krystalizacja z roztworu) i niskociśnieniową (krystalizacja z fazy gazowej); praca przy przygotowaniu powierzchni kryształów azotku galu do stanu nadającego się do epitaksji.

Wrzesień 2008-do dziś - Wiceprezes TopGaN Sp. z o.o.

odpowiedzialny za prace bieżące Zarządu; odpowiedzialny za realizację projektów naukowo-technologicznych i wdrożeniowych prowadzonych przez Spółkę; odpowiedzialny za prace związane z krystalizacją azotku galu oraz przygotowania powierzchni kryształów do stanu nadającego się do epitaksji.

4. Informacje o opublikowanych pracach naukowych i twórczych pracach zawodowych

4.1 Całkowita liczba publikacji

154 publikacje (na dzień 01.03.2013 zgodnie z bazą danych ISI Web of Knowledge; <http://pcs.isiknowledge.com>)
(w momencie obrony doktoratu 16 prac)

w tym , między innymi:

23 prace opublikowane w Journal of Crystal Growth

9 prac opublikowanych w Applied Physics Letters

8 prac opublikowanych w Physica Review B

7 prac opublikowanych w Journal of Applied Physics

4.2 Sumaryczny Impact Factor publikacji według listy Journal Citation Report (zgodnie z rokiem opublikowania)

216,515

4.3 Całkowita liczba cytowań publikacji i indeks Hirsh'a według-bazy Web of Science z dnia 01.03.2013

2068 cytowań

(w momencie obrony doktoratu-380 cytowań)

Hirsh factor: 26

(w momencie obrony doktoratu -7)

4.4 Inne twórcze prace zawodowe

Udział w 45 konferencjach naukowych

19 wygłoszonych referatów zaproszonych

Współedytor książki "Technology of Gallium Nitride Crystal Growth" (Springer Series in Materials Science 133) Springer; 1st Edition. (Feb 12 2010) ISBN-10: 3642048285; ISBN-13: 978-3642048289

Edytor (gościnnie) - Journal of Crystal Growth Vol 312 Issue 18 1 Sept. 2010 ISSN 0022-0248

Przewodniczący 6th International Workshop on Bulk Nitride Semiconductors (IWBNS-VI), 23rd-28th August 2009, Galindia Mazurski Eden, Poland

Współprzewodniczący 7th International Workshop on Bulk Nitride Semiconductors (IWBNS-VII), 15th-20th March, 2011, Koyasan, Wakayama, Japan

Współprzewodniczący-2013 Japanese Society of Applied Physics (JSAP) Autumn Meeting Symposium J: Nitride Semiconductors-Bulk and Related Growth and Characterization, 16-20 Sept. 2013, Kyoto, Japan

Przewodniczący i współprzewodniczący wielu sesji poświęconych wzrostowi półprzewodników azotkowych na głównych konferencjach poświęconych półprzewodnikom azotkowym, takich jak International Workshop of Nitrides (IWN), czy International Conference on Nitride

Semiconductors (ICNS), jak również International Workshop of Bulk Nitride Semiconductors (IWBNS)

Ekspert w Narodowym Programie Foresight "Polska 2020" w latach 2007-2008

Ekspert kluczowy w projekcie „Monitorowanie i prognozowanie (Foresight) priorytetowych, innowacyjnych technologii dla zrównoważonego rozwoju województwa mazowieckiego” 2007

Członek sekcji Technologii Elektronowej i Technologii Materiałów Elektronicznych Komitetu Elektroniki i Komunikacji PAN, 2003 - 2006

Członek Polskiego Towarzystwa Wzrostu Kryształów, od 2001 do dziś

Członek Rady Naukowej IWC PAN, od 1995 to 2010

5. Kierowanie i udział w krajowych i międzynarodowych projektach badawczych

Ze strony IWC PAN:

1. Od 2012 r. do 2014 r. **kierownik w projekcie NCBiR PBS No 177589** „Zbadanie procesów objętościowej krystalizacji GaN metodą HVPE na podłożach Ammono-GaN”
2. Od 2013 do 2015 r. **kierownik w projekcie NCN 2012/05/B/ST3/02516** „Wyznaczenie nieliniowych stałych sprężystości, piezoelektrycznych, elektrostrykcyjnych i dielektrycznych objętościowego azotku galu”
3. Od 2012 do 2015 r. **wykonawca w projekcie NCN 2011/03/B/ST3/02647** „Azotek galu domieszkowany berylem w kierunku nowej generacji konwerterów optycznych”
4. Od 2012 do 2015 r. **wykonawca (odpowiedzialny za budowę i rozwój Laboratorium Krystalizacji; Park Innowacyjny Celestynów Unipress- Rozbudowa laboratoriów i stworzenie prototypów linii doświadczalnych dla innowacyjnych technologii przygotowanych do wdrożenia przez grupy badawcze Instytutu Wysokich Ciśnień Polskiej Akademii Nauk; Wydatek współfinansowany przez Unię Europejską z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Mazowieckiego 2007-2013; Działanie 1.1 Wzmocnienie sektora badawczo-rozwojowego**
5. Od 2008 do 2013 r. **wykonawca w projekcie No POIG.01.01.02-00-008/08** „Kwantowe nanostruktury półprzewodnikowe do zastosowań w biologii i medycynie - Rozwój i komercjalizacja nowej generacji urządzeń diagnostyki molekularnej opartych o nowe polskie przyrządy półprzewodnikowe”
6. Od 2007 do 2008 **kierownik projektu (ze strony IWC PAN) WKP_1/1.4.3/2/2005/13/132/322/2007/U** „Centrum Technologii Nanostruktur Półprzewodnikowych i Biosensorów” w ramach Sektorowego Programu Operacyjnego Wzrost Konkurencyjności Przedsiębiorstw, lata 2004-2006, Priorytet 1

Rozwój Przedsiębiorczości i Wzrost Innowacyjności poprzez wzmocnienie instytucji otoczenia biznesu, działanie 1.4 wzmocnienie współpracy między sferą badawczo-rozwojową, a gospodarką, w ramach umowy o realizację zadań Nr **FS/2/IWC/322/2007** podpisanej z Instytutem Fizyki PAN

7. Od 2006 do 2008 **główny wykonawca w projekcie rozwojowym MNiSW No R003601** „Opracowanie technologii otrzymywania kryształów podłożowych azotku galu (GaN) o średnicy 2 cale i gęstości dyslokacji poniżej 10^5 cm^{-2} metodą wysokociśnieniową w połączeniu z metodą HVPE”
8. Od 2005 do 2007 **wykonawca w projekcie MNiSW No 3T08A03329** „Monokryształy podłożowe GaN o orientacjach niepolarnych: krystalizacja metodą HVPE i własności fizyczne”
9. Od 2000 do 2004 **wykonawca w projekcie strategicznym KBN No 2700/C.T11-8/2000** „Niebieska Optoelektronika”
10. Od 2000 do 2002 **kierownik projektu KBN No 1291/T08/2000/18** „Krystalizacja azotku glinu (AlN) w wysokim ciśnieniu azotu”
11. Od 1995 do 1998 **wykonawca w projekcie celowym KBN No 1270/C T08-7/95** „Uruchomienie produkcji monokryształów GaN na podłoża do wytwarzania laserów na niebieski zakres widma.”

Ze strony TopGaN Sp. z o.o.:

1. Od 01.12.2009 do 01.12.2013 **nadzór formalny i merytoryczny** nad realizacją projektu „Surface engineered InGaN heterostructures on N-polar and nonpolar GaN-substrates for green light emitters” (**SINOPE**) **PIAP-GA-2009-230765**; projekt realizowany we współpracy z dwoma niemieckimi Instytutami naukowymi: IKZ i Paul Drudee; projekt poświęcony budowie struktur optoelektronicznych dla emiterów światła zielonego.
2. Od 01.05.2011 do 30.04.2013 **nadzór formalny i merytoryczny** nad realizacją projektu „Microsystem Based on Wide Band Gap Materials for Future Space Transmitting Ultra Wideband Receiving Systems” (**SATURNE**) **242458**; projekt realizowany we współpracy z wieloma partnerami europejskimi, w tym z firmą Thales; projekt poświęcony krystalizacji struktur półprzewodnikowych dla budowy tranzystorów.
3. Od 01.05.2011 do 30.04.2013 **nadzór formalny i merytoryczny** nad realizacją projektu „Nanostructured materials and RF-MEMS RFIC/MMIC technologies for highly adaptive and reliable RF systems” (**NANOTEC**) **288531**; projekt realizowany we współpracy z wieloma partnerami europejskimi; projekt poświęcony krystalizacji struktur półprzewodnikowych dla budowy tranzystorów wysokiej mocy.
4. Od 01.03.2010 do 28.02.2013 **nadzór formalny i merytoryczny** nad realizacją projektu „Micro and Nano Technologies Based on Wide Band Materials for Future Transmitting Receiving and Sensing Systems” (**MERCURE**) **NCBiR/ENIAC-2009-1/3/2010**; projekt realizowany we współpracy z wieloma partnerami europejskimi; finansowany poprzez agencję ENIAC; projekt poświęcony krystalizacji struktur półprzewodnikowych dla budowy sensorów i tranzystorów
5. Od 02.01.2011 do 31.12.2013 **nadzór formalny i merytoryczny** nad realizacją projektu „Reconfigurable Microsystem Based on Wide Band Gap Materials, Miniaturized and Nanostructured RF-MEMS” (**NANOCOM**) **ENIAC-2010-1/3/2010**; projekt realizowany we współpracy z wieloma partnerami europejskimi; finansowany

- poprzez agencję ENIAC; projekt poświęcony krystalizacji struktur półprzewodnikowych dla budowy tranzystorów wysokiej mocy MEMS.
6. Od 01.01.2011 do 31.10.2012 **nadzór formalny i merytoryczny** nad realizacją projektu „Next Generation Intelligent Microsystems Based on Wide Band Gap Materials” (MEGA) **E!Eur-07-304/27/NCBiR/11**; projekt realizowany we współpracy z wieloma partnerami europejskimi; projekt poświęcony krystalizacji struktur półprzewodnikowych dla budowy tranzystorów wysokiej mocy.
 7. Od 01.09.2008 do 01.08. 2011 **nadzór formalny i merytoryczny** nad realizacją projektu „Matryce ultrafioletowych diod laserowych” **UDA-POIG.01.04.00-14-052/09 UDA-POIG.04.01.00-14-052/09**; projekt poświęcony opracowaniu budowy matryc laserowych.
 8. Od 01.03.2012 do 28.02.2014 **nadzór formalny i merytoryczny** nad realizacją projektu „Nowe generacje kształtowanych przestrzennie podłoży plazmowych GaN” **POIG .01.04.00-14-153/11**; projekt poświęcony krystalizacji azotku galu.
 9. Od 01.10.2012-30.09.2014 **nadzór formalny i merytoryczny** nad realizacją projektu „Optymalizacja dezorientacji podłoży GaN i SiC do produkcji przyrządów elektronicznych i optoelektronicznych” **POIG.01.04.00-14-007/12**; projekt poświęcony optymalizacji dezorientacji różnych podłoży GaN (amonotermalnych, ciśnieniowych, HVPE) oraz SiC.
 10. Od 01.10.2011 do 30.09.2013 **nadzór formalny i merytoryczny** nad realizacją projektu „Ultrafioletowe diody laserowe i ich matryce oparte o AlGaInN” **uv LASE (EUROSTARS)**; projekt międzynarodowy, realizowany we współpracy z firmami szkockimi, poświęcony budowie matryc diod laserowych.
 11. Od 01.01.2012 do 01.12.2014 **nadzór formalny i merytoryczny** nad realizacją projektu „Ultrafioletowe (380nm) diody laserowe do zastosowań spektroskopowych” (UFOLA), **NCBIR ID: 157751**; projekt poświęcony budowie diod laserowych.
 12. Od 01.05.2012 do 30.04.2015 **nadzór formalny i merytoryczny** nad realizacją projektu „Zielone i niebieskie nanostruktury laserowe wytwarzane metodą epitaksją z wiązek molekularnych na podłożach krystalicznego azotku galu” **(ZNANO) INNOTECH-K1/IN1/68/157829/NCBR/12**; projekt realizowany we współpracy z firmą Ammono S.A. oraz IWC PAN poświęcony diodom laserowym.
 13. Od 01.10.2012 do 31.03.2015 **nadzór formalny i merytoryczny** nad realizacją projektu „Struktury laserów półprzewodnikowych na podłożach z azotku galu o orientacji półpolarnej” **(POLARPOL) PBS1/B5/8/2012**; projekt realizowany we współpracy z IWC PAN poświęcony diodom laserowym
 14. Od 03.2012 do 06.2013 **nadzór formalny i merytoryczny** nad realizacją projektu „Podniesienie konkurencyjności TopGaN Sp. z o.o. poprzez uczestnictwo w międzynarodowych imprezach targowo wystawienniczych i misji gospodarczej” **Działanie 1.7 - Promocja gospodarcza**;
 15. Od 01.11.2012 do 30.10.2014 **nadzór formalny i merytoryczny** nad realizacją projektu „Moduł laserowy do paneli barwnych” **(MILLE) (EUROSTARS)**; projekt międzynarodowy, realizowany we współpracy z firmami szkockimi, poświęcony budowie modułów laserowych.
 16. Od 01.05.2012 do 30.04.2016 **nadzór formalny i merytoryczny** nad realizacją projektu „Sustainable Hydrothermal Manufacturing of Nanomaterials” **(SHYMAN); 280983**; projekt realizowany we współpracy z wieloma partnerami europejskimi poświęcony luminoforom do diod elektroluminescencyjnych.

17. Od 01.05.2012 do 30.04.2016 **nadzór formalny i merytoryczny** nad realizacją projektu „Nanostructured Efficient White LEDs based on short-period superlattices and quantum dots” (**NEWLED**) **318388**; projekt realizowany we współpracy z wieloma partnerami europejskimi poświęcony diodom elektroluminescencyjnym.

6. Wykaz referatów zaproszonych wygłoszonych na międzynarodowych lub krajowych konferencjach tematycznych

1. “Recent results in the crystal growth of GaN at high N₂ pressure” EGW 1 (European GaN Workshop), 12-14th June, 1996, Rigi, Switzerland
2. “High pressure direct synthesis of III-V nitrides” XXXVI EHPRG (European High Pressure Research Group), 6-12th September 1998, Catania, Italy
3. “Growth and doping of single crystals of GaN and AlN under high nitrogen pressure” PCCG VI (Polish Conference on Crystal Growth), 20-23rd Mai 2001, Poznan, Poland
4. “Directional crystallization of GaN on high-pressure solution grown substrates by growth from solution and HVPE” 2nd International Workshop of Bulk Nitride Semiconductors II, 18-23 May, 2002, Amazonas, Brazil (workshop by invitation only)
5. “Device advantage of the dislocation free pressure grown GaN substrates” ISPN-2003 (1st International Symposium on Point Defect and Nonstoichiometry), 20-22 March 2003, Sendai, Japan
6. “Growth of GaN on patterned GaN/sapphire substrates by high pressure solution method” 3rd International Workshop of Bulk Nitride Semiconductors III, 4-9 September, 2004 Zakopane, Poland (workshop by invitation only)
7. “Growth of GaN on patterned GaN/sapphire substrates with various metallic masks by high pressure solution method” Photonics West Optoelectronics 2006 Gallium Nitride Materials and Devices, 22-26 January, 2006, San Jose, USA “Platelets and needles: Two habits of pressure-grown GaN crystals” 4th International Workshop of Bulk Nitride Semiconductors, 17-22 October, 2006 Makino, Shiga-pref., Japan (workshop by invitation only)
9. “Bulk growth of gallium nitride. Challenges and difficulties” The Fifth International Conference on Solid State Crystals & Eight Polish Conference on Crystal Growth (ICSSC-5 & PCCG-8 Conference), 20-24 May, 2007, Zakopane
10. “GaN crystallization by the high-pressure solution growth method on HVPE bulk seed” 5th International Workshop on Bulk Nitride Semiconductors, 24-28 September, 2007, Itaparica, Salvador, Bahia, Brazil (workshop by invitation only)- scene setter;
11. „Polski wkład w rodzący się rynek niebieskiej optoelektroniki” Ogólnopolska konferencja naukowo-techniczna „Warunki rozwoju innowacji w Polsce” Akademia Inżynierska w Polsce, Autorski Park Technologiczny W. Nawrota, 24 Października 2007
12. „Rola azotku galu we współczesnej fizyce i technologii” Otwarte spotkanie „Monitorowanie i prognozowanie (Foresight) priorytetowych, innowacyjnych technologii dla zrównoważonego rozwoju województwa mazowieckiego” w obszarach: Energia, Zasoby Naturalne i Nowe Materiały, Przemysłowy Instytut Automatyk i Pomiarów PIAP, 11 Grudnia 2007
13. “Ca₃N₂ as a flux for crystallization of GaN” 6th International Workshop on Bulk Nitride Semiconductors, 23-28 August, 2009, Galindia Mazurski Eden, Poland (workshop by invitation only)

14. "Multi feed seed (MFS) high pressure crystallization of 1-2 in GaN" 7th International Workshop on Bulk Nitride Semiconductors, 15-20 March, 2011, Koyasan, Wakayama, Japan (workshop by invitation only)-_scene setter;
15. "High nitrogen pressure solution growth of GaN in multi-feed-seed configuration" 2011 International Symposium on Crystal Growth, 13th – 15th October 2011, Seoul, Korea
16. "Growth of GaN from Ga Solution" German-Polish Workshop on Nitride-Semiconductors-WideBase, 19th March 2012 Berlin, Germany
17. "Growth of GaN from solution" 2012 International Symposium on Strategy of III-Nitride Epitaxial Substrates and Epi-wafer Development 22nd-23rd Sept. 2012 Dongguan, Guangdong, China
18. "High Nitrogen Pressure Solution (HNPS) growth of GaN in Multi Feed Seed (MFS) configuration. Highly conductive and semi-insulating crystals. Role of impurities: oxygen, magnesium and beryllium." International Workshop on Nitride Semiconductors IWN 2012 14-19 Oct. 2012 Sapporo, Japan
19. "Growth of bulk GaN" Intensive Discussion on Growth of Nitride Semiconductors 22-23 Oct. 2012, Sendai, Japan

7. Wykaz opublikowanego cyklu artykułów stanowiących osiągnięcie naukowe zgodnie z art. 16 ust 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. Nr 65 poz. 595 z późn. zm)

Tematyka publikacji:

Ukierunkowany wzrost kryształów azotku galu na zarodkach metodą krystalizacji wysokociśnieniowej z roztworu atomowego azotu w galu

H1 M. Bockowski, I. Grzegory, S. Krukowski, B. Lucznik, Z. Romanowski, M. Wroblewski, J. Borysiuk, J. Weyher, P. Hageman, S. Porowski,. Directional crystallization of GaN on high-pressure solution grown substrates by growth from solution and HVPE. *Journal of Crystal Growth*, 246 (2002) 194-206.

Mój wkład do tej publikacji polegał na zaplanowaniu, wykonaniu i analizowaniu wszystkich procesów krystalizacji wysokociśnieniowej oraz porównywaniu wyników krystalizacji wysokociśnieniowej z wynikami krystalizacji metodą HVPE. Moją rolą było pełne przygotowanie i zredagowanie manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 60%.

H2 M. Boćkowski, I. Grzegory, S. Krukowski, B. Łucznik, M. Wróblewski, G. Kamler, J. Borysiuk, P. Kwiatkowski, K. Jasik and S. Porowski, Deposition of bulk GaN from solution in gallium under high N₂ pressure on silicon carbide and sapphire substrates. *Journal of Crystal Growth* 270 (2004) 409-419

Mój wkład do tej publikacji polegał na zaplanowaniu, wykonaniu i analizowaniu wszystkich procesów krystalizacji wysokociśnieniowej oraz pełnym przygotowaniu i zredagowaniu manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 60%.

H3 M. Boćkowski; I. Grzegory; S. Krukowski; B. Lucznik, M. Wróblewski; G. Kamler. J. Borysiuk, P. Kwiatkowski, K. Jasik and S. Porowski, Gallium nitride growth on sapphire/GaN templates at high pressure and high temperatures. *Journal of Crystal Growth* 274 (2005) 55-64

Mój wkład do tej publikacji polegał na zaplanowaniu, wykonaniu i analizowaniu wszystkich procesów krystalizacji wysokociśnieniowej oraz pełnym przygotowaniu i zredagowaniu manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 60%.

H4. M. Boćkowski; I. Grzegory; S. Krukowski; B. Lucznik, M. Wróblewski; G. Kamler. J. Borysiuk, P. Kwiatkowski, K. Jasik and S. Porowski, Growth of GaN on patterned GaN/sapphire substrates by high pressure solution method *Journal of Crystal Growth*, 281 (2005) 11-16

Mój wkład do tej publikacji polegał na zaplanowaniu, wykonaniu i analizowaniu wszystkich procesów krystalizacji wysokociśnieniowej oraz pełnym przygotowaniu i zredagowaniu manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 60%.

H5 M. Bockowski, P. Strak, P. Kempisty, I. Grzegory, S. Krukowski, B. Lucznik, S. Porowski, High pressure-high temperature seeded growth of GaN on 1 in sapphire/GaN templates: analysis of convective transport, *Journal-of-Crystal-Growth*.307 (2007) 259-267

Mój wkład do tej publikacji polegał na zaplanowaniu, wykonaniu i analizowaniu wszystkich procesów krystalizacji wysokociśnieniowej, analizowaniu wyników obliczeniowych oraz pełnym przygotowaniu i zredagowaniu manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 60%.

H6 M. Bockowski, P. Strak, I. Grzegory, B. Lucznik, S. Porowski, GaN crystallization by the high-pressure solution growth method on HVPE bulk seed, *Journal-of-Crystal-Growth*. 310 (2008) 3924-3933

Mój wkład do tej publikacji polegał na zaplanowaniu, wykonaniu i analizowaniu wszystkich procesów krystalizacji wysokociśnieniowej, analizowaniu wyników obliczeniowych oraz pełnym przygotowaniu i zredagowaniu manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 60%.

H7 M. Bockowski, I. Grzegory, B. Lucznik, T. Sochacki, G. Nowak B. Sadovyi, P. Strak, G. Kamler, E. Litwin-Staszewska and S. Porowski, Multi feed seed (MFS) high pressure crystallization of 1-2 in GaN, *Journal-of-Crystal-Growth*. 350, (2012) 5-10

Mój wkład do tej publikacji polegał na zaplanowaniu, wykonaniu i analizowaniu wszystkich procesów krystalizacji wysokociśnieniowej, analizowaniu wyników obliczeniowych oraz pełnym przygotowaniu i zredagowaniu manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 60%.

Oświadczenia współautorów określające indywidualny wkład każdego z nich w powstanie ww. publikacji załączone są w porządku alfabetycznym w załączniku 9 pt. „Oświadczenia współautorów”.

8 Przebieg pracy naukowej

8.1 Dorobek naukowy do uzyskania stopnia doktora

W roku 1989 ukończyłem Wydział Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej Politechniki Warszawskiej uzyskując tytuł mgr. inż. Podstawowych Problemów Techniki w kierunku Fizyki Ciała Stałego. W tym samym roku rozpocząłem pracę w Laboratorium Krystalizacji Instytutu Wysokich Ciśnień PAN (IWC PAN), wtedy Centrum Badań Wysokociśnieniowych PAN, na stanowisku asystenta. Zajmowałem się termodynamiką i wzrostem kryształów półprzewodnikowych z grupy III-V, tzw. azotków: azotkiem galu, indu i glinu oraz badaniem diagramów fazowych: ciśnienie-temperatura dla półprzewodników z grupy II-VI (selenki, telurki). W roku 1992 rozpocząłem studia doktoranckie na Uniwersytecie Montpellier II we Francji. W roku 1995 obroniłem, z najwyższym wyróżnieniem („Trés honorable avec félicitations”), pracę poświęconą otrzymywaniu azotku glinu poprzez reakcję samo-propagującego się spalania w wysokim ciśnieniu hydrostatycznym gazu („Synthèse du nitrure d'aluminium par combustion auto-propagée sous haute pression hydrostatique de gaz”). Do momentu uzyskania stopnia doktora byłem autorem lub współautorem 16 prac, cytowanych 380 razy, a mój indeks Hirsha wynosił 7. Wziąłem udział w 6 konferencjach naukowych i jednej letniej szkole fizyki pt. “Conception of Materials under High Pressure” w Arcachon (Francja) w 1990 r.

8.2 Dorobek naukowy po uzyskaniu stopnia doktora

W roku 1996, po zakończeniu studiów doktoranckich we Francji, ponownie podjąłem pracę w Laboratorium Krystalizacji IWC PAN, tym razem na stanowisku adiunkta, zajmując się krystalizacją azotku galu i azotku glinu w warunkach wysokich ciśnień. W roku 1998 otrzymałem nagrodę European High Pressure Research Group (EHPRG) za wkład pracy nad półprzewodnikami, w szczególności z grupy azotków. W roku 2010 zostałem jednym z trzech edytorów książki “Technology of Gallium Nitride Crystal Growth” wydanej przez Springer’a. W 2011 r. książką została przetłumaczona na język rosyjski i wydana w Rosji przez wydawnictwo Technosfera. Książka była i jest również dostępna internetowo na stronach wydawnictwa (Springer online platform). Do czerwca 2012 r. rozdziały książki były pobierane ze strony internetowej 2552 razy. Do końca 2012 r. mój dorobek naukowy obejmował dwa patenty międzynarodowe, 150 publikacji cytowanych 2018 razy, a indeks Hirsha wynosił 26. Uczestniczyłem w ponad 40 konferencjach naukowych wygłaszając 19 wykładów zaproszonych. Byłem współautorem kilku rozdziałów do książek wydawanych przez takie wydawnictwa jak: Wiley, Oxford University Press, czy Springer. Byłem i jestem kierownikiem, głównym wykonawcą oraz wykonawcą w wielu polskich i europejskich projektach naukowych, naukowo-technologicznych i wdrożeniowych. W latach 2004-2008 pracowałem jako technolog w spółce TopGaN, odpryskowej (spin-off) spółce IWC PAN, dedykowanej rozwojowi technologii i produkcji elektronicznych i optoelektronicznych przyrządów półprzewodnikowych opartych o półprzewodniki azotkowe. W roku 2008 zostałem jednym z dwóch wiceprezesów tej spółki. Funkcję tę pełnię do dziś.

8.2.1 Osiągnięcie naukowe stanowiące przedmiot habilitacji-cykl publikacji pt. „Ukierunkowany wzrost kryształów azotku galu na zarodkach metodą krystalizacji wysokociśnieniowej z roztworu atomowego azotu w galu”- omówienie celu naukowego wybranego cyklu publikacji i osiągniętych wyników

Celem przedstawionego zbioru prac było określenie i zbadanie optymalnej konfiguracji eksperymentalnej dla ukierunkowanego wzrostu azotku galu na zarodkach, metodą krystalizacji wysokociśnieniowej z roztworu atomowego azotu w galu (High Nitrogen Pressure Solution (HNPS) growth method). Wszystkie prace zostały opublikowane w tym samym czasopiśmie, a mianowicie Journal of Crystal Growth, i przedstawiają nie tylko badania procesu krystalizacji, ale również drogę opracowania technologii wytwarzania kryształów azotku galu nadających się na podłoża do budowy urządzeń optoelektronicznych (diod laserowych).

W latach 90-tych ubiegłego stulecia i w początkach 21 wieku w środowisku półprzewodników azotkowych tryumf święciły spontanicznie wzrastane z roztworu atomowego azotu w galu, kryształy azotku galu o pokroju płytek i igieł [1]. W związku z problemami związanymi z powiększeniem rozmiaru kryształów, jak i powtarzalnością procesów, zdecydowano się na rozpoczęcie prac w kierunku opracowania technologii krystalizacji na zarodkach. W tym samym czasie, na świecie, rozwijano technologię krystalizacji z fazy gazowej, metodą HVPE (Hydride Vapor Phase Epitaxy). Zaowocowała ona, w połowie pierwszej dekady 21 wieku, 2 calowymi kryształami azotku galu [2,3]. W 2007 roku pokazały się pierwsze doniesienia o kryształach azotku galu otrzymywanych metodą amonotermalną [4]. W początkach drugiej dekady 21 wieku obserwuje się nasilenie prac związanych z krystalizacją GaN. Doskonałe wyniki otrzymuje się w krystalizacji metodą HVPE [5,6,7,8]. Z kolei, najlepsze jakościowo kryształy, wzrastane są dziś metodą amonotermalną [9]. Coraz większe i również jakościowo lepsze kryształy otrzymywane są z flux'u galowo-sodowego (tzw. metoda sodowa) [10]. W krystalizacji wysokociśnieniowej wprowadzono konfigurację multi-feed-seed (MFS), pozwalającą na uzyskiwanie kryształów GaN nadających się do dalszych zastosowań praktycznych (wytwarzanie substratów do budowy przyrządów optoelektronicznych) [11]. To właśnie droga do tej konfiguracji przedstawiona jest w niniejszej habilitacji.

Pierwsza praca [H1], opublikowana w 2002 r., przedstawia rezultaty wzrostu GaN na zarodkach o pokroju heksagonalnym. Były to bezdyslokacyjne płytki z azotku galu, wzrastane na potrzeby rozpatrywanej pracy, w krystalizacji spontanicznej w warunkach wysokich ciśnień azotu, metodą HNPS. Wzrost odbywał się w kierunku $\langle 0001 \rangle$ oraz $\langle 000\bar{1} \rangle$ w konfiguracji przedstawionej na Rys. 1a. Określono metodę przygotowania powierzchni c (zarówno azotowej jak i galowej) do wzrostu. Określono warunki zwilżania zarodków poprzez ciekły gal (tzw. back etching (wetting); proces sprzęgający zarodek z roztworem). Uzyskano makroskopowo stabilny wzrost GaN jedynie w kierunku $\langle 0001 \rangle$. Krystalizacja w kierunku przeciwnym, a więc na tzw. stronie azotowej zarodków, prowadziła do wielu niestabilności i wtórnej parazytycznej (spontanicznej) krystalizacji. Prędkość wzrostu w kierunku $\langle 0001 \rangle$ wahała się od 2 $\mu\text{m/h}$ do 10 $\mu\text{m/h}$ i zależała od stosowanych gradientów temperatury. Dla małych gradientów, do 20°C/cm, obserwowano płaski front krystalizacji. Średnia prędkość wzrostu nie przekraczała 2 $\mu\text{m/h}$. Dla dużych gradientów prędkość wzrostu rosła (osiągając niekiedy nawet 10 $\mu\text{m/h}$) ale front krystalizacji się destabilizował. Obserwowano formowanie

się centralnego wzgórza i makrostopni płynących od wierzchołka. Makrostopnie często nachodziły na siebie prowadząc do tzw. efektu step bunching'u. Grubości wykrysztalizowanych warstw dochodziły do 200 μm . Nowo wykrysztalizowany materiał wysokociśnieniowy był bezdyslokacyjny (gęstość dyslokacji (TDD) była na poziomie zarodzi, a więc 10^2 cm^{-2}).

Dla porównania, w przedstawianej pracy, opisano (po raz pierwszy) wzrost metodą HVPE na wysokociśnieniowych heksagonalnych płytkach GaN. Uzyskano zadowalające prędkości stabilnego wzrostu dochodzące do 50 $\mu\text{m/h}$ dla warstw HVPE-GaN o grubości 200 μm . Uzyskano bezdyslokacyjny materiał. Zaobserwowano problemy z przygotowaniem powierzchni kryształów wysokociśnieniowych (HNPS-GaN) do wzrostu z fazy gazowej. Procesy kryształizacji HVPE wykonywane były w Holandii, na Uniwersytecie w Nijmegen. IWC PAN nie posiadał jeszcze wtedy reaktorów HVPE. Co ciekawe, po 10 latach, autor niniejszej pracy jest kierownikiem projektu PBS (No 177589) dotyczącego kryształizacji HVPE-GaN na bezdyslokacyjnych kryształach GaN uzyskiwanych metodą kryształizacji amonotermalnej (tzw. Ammono-GaN).

W drugiej pracy [H2] opisano ukierunkowaną kryształizację, w konfiguracji eksperymentalnej przedstawionej w pierwszej pracy (patrz Rys. 1 a), ale z użyciem obcych podłoży, takich jak: węglík krzemu, szafir, cienka warstwa MOCVD-GaN na szafirze. Główną motywacją użycia obcych podłoży była chęć sprawdzenia ich zachowania podczas kryształizacji (epitaksji z fazy ciekłej) w wysokich temperaturach. Tego typu podłoża były i są używane rutynowo w technikach epitaksji z fazy gazowej, w temperaturach do 1100°C. Zachodziło więc pytanie jak wymienione podłoża zachowują się w temperaturach powyżej 1400°C w procesach epitaksji z fazy ciekłej. Poza tym wymienione podłoża były dostępne w rozmiarach cała i dwóch cali. Pozytywny wynik kryształizacji mógł pozwolić na otrzymywanie podłoży GaN o rozmiarach większych niż dotychczas spontanicznie wzrastane płytki, czyli 1 cm^2 .

W pracy opisano wyznaczanie takich parametrów procesu kryształizacji jak: równowagowe ciśnienie azotu dla kryształizacji na obcych podłożach (bardziej zdefektowanych niż podłoża rodzime (native substrates)), temperatura kryształizacji, przechłodzenie czy przesycenie. Opisano obserwowane mechanizmy wzrostu i wyznaczono prędkości wzrostu w kryształizowanych kierunkach. Wyniki porównywano z istniejącymi wynikami kryształizacji na monokryształach GaN. Ustalono, że dla stabilnego wzrostu GaN na obcych podłożach ciśnienie azotu dla danej temperatury wzrostu musi być wyższe niż to stosowane przy wzroście na monokryształach GaN. To dodatkowe „nadciśnienie: (w stosunku do równowagowego) dla temperatur kryształizacji powyżej 1400°C wynosiło około 100 MPa. Jest to wynik wykorzystywany do dziś w kryształizacji GaN w IWC PAN i TopGaN Sp. z o.o.. Dodatkowo, określono prędkości stabilnego wzrostu, które nie przekraczały 2 $\mu\text{m/h}$. Prędkości bardzo zależały od stosowanego przechłodzenia i gradientu temperatury. Zauważono, że prędkość wzrostu rośnie dla konfiguracji przeciwnej do tej dotychczas stosowanej. Do tej pory podłoże leżało na dnie tygla (konfiguracja „naturalna”-Rys. 1a). Konfiguracja „odwrotna” (patrz Rys. 1b) polegała i polega na umieszczeniu podłoża w górnej części tygla i zmianie kierunku gradientu temperatury.

Ustalono, że wzrost na szafirze jest polikrysztaliczny. Wzrost na templejtach szafirowych (MOCVD-GaN/szafir) okazał się bardziej „rokujący”. Morfologicznie był identyczny ze wzrostem na monokryształach GaN. Odróżniała go jedynie gęstość defektów sięgająca $5 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$ w miejsce 10^2 cm^{-2} . Kryształizacja na SiC odbywała się w całkowicie innym modzie niż na templejcie. Tu obserwowano wzrost wielu małych wzgórz wzrostu (hillocks) i ich koalescencję. Gęstość defektów w GaN/SiC była w zakresie $5 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$. O ile wzrost na

templejcie szafirowym wyginał podłoże, o tyle w przypadku wzrostu na SiC, warstwa GaN była po prostu spękana.

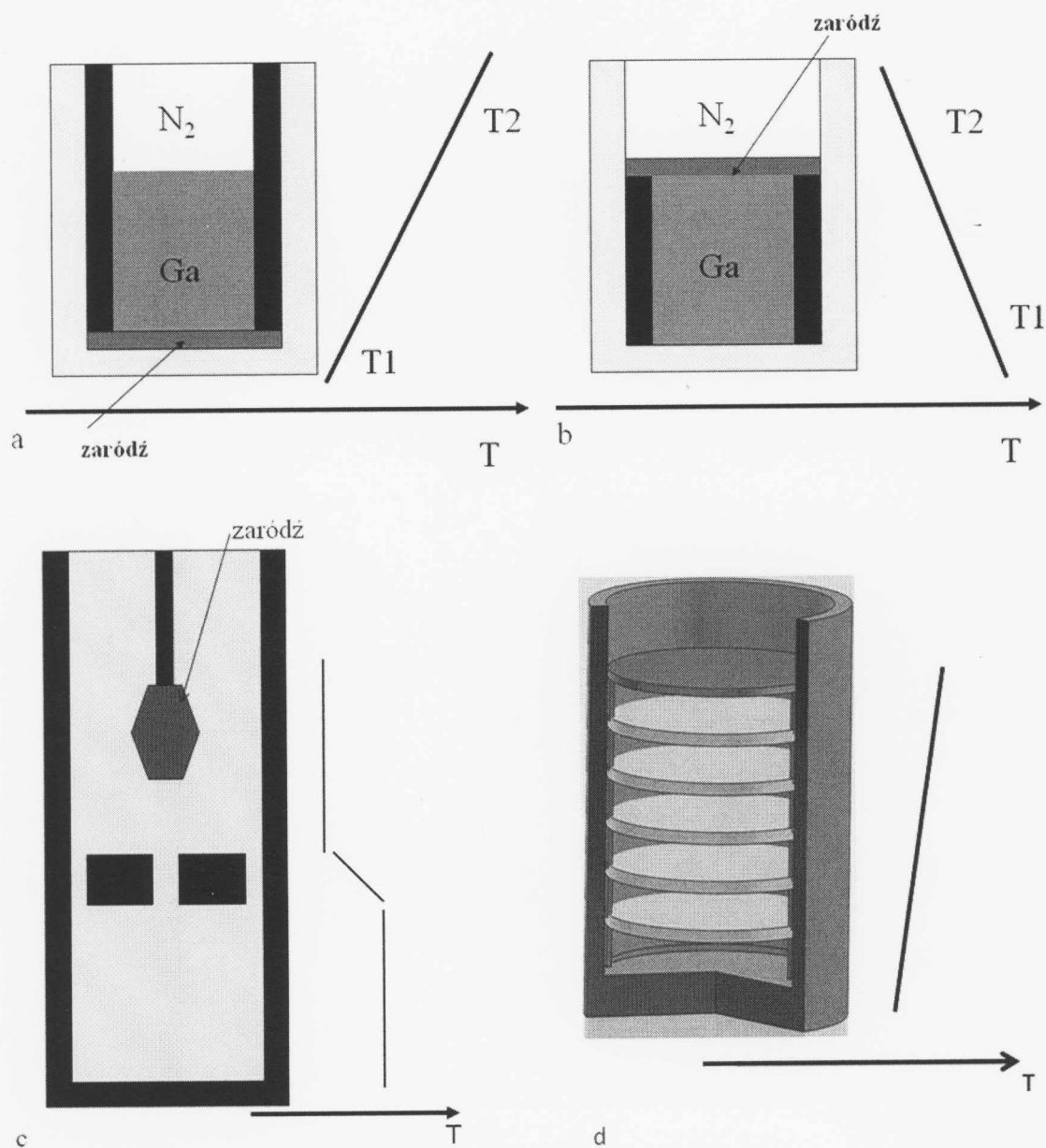
W kolejnej pracy [H3] opisano wyniki krystalizacji głównie na templejtach MOCVD-GaN/szafir. Pracowano w dwóch konfiguracjach krystalizacji („naturalnej” i „odwrotnej”). Po raz pierwszy zastosowano przegrodę w roztworze. Było to konieczne, gdyż zaobserwowano, że makroskopowo stabilny wzrost kończy się przy grubości wzrastanego kryształu, około 100 μm . Właściwe użycie przegrody spowodowało, że można było w sposób stabilny wzrastać grubsze warstwy. W pracy analizowano zachowanie się prędkości wzrostu w funkcji czasu krystalizacji jak również stosowanego gradientu temperatury. Na bazie tych dwóch analiz wysnuto wnioski, że dla krótkiego czasu krystalizacji do 30 h. prędkość wzrostu zależy od transportu azotu do strefy krystalizacji. Im większy dostęp azotu (im większy gradient temperatury-większe przesycenie i przechłodzenie) tym szybciej kryształ rośnie. Przy dłuższych czasach kinetyka powierzchni zaczyna odgrywać podstawową rolę. Formowanie się stopni i tarasów zwalniało prędkość wzrostu w kierunku osi c, prowadząc do całkowitego zatrzymania procesu krystalizacji. Pokazano, że przedstawione wyżej wnioski dotyczyły również krystalizacji na monokryształach GaN (monokrystalicznych płytkach wzrastanych spontanicznie).

W kolejnej pracy [H4] przedstawiono wyniki krystalizacji na templejtach MOCVD-GaN/szafir z powierzchniami ukształtowanymi w pasy. Wzrost mógł odbywać się nie tylko w kierunku osi c, ale również (a może głównie) w kierunkach niepolarnych $\langle 10\text{-}10 \rangle$ i $\langle 11\text{-}20 \rangle$. Postanowiono wykorzystać cechę obserwowaną we wzroście spontanicznym GaN z roztworu atomowego azotu w galu, a mianowicie, że prędkość wzrostu w wymienionych wyżej kierunkach jest 100 razy większa niż w kierunku osi c. Wytworzone na powierzchni templejtu (poprzez odpowiednie procesy trawienia) paski GaN rozrastały się lateralnie. Lateralnie wzrastany materiał był bezdyslokacyjny. Kłopotami okazały się być parazytyczna nukleacja GaN odbywająca się między paskami oraz efekt koalescencji rozrastanych pasków, który prowadził do generacji naprężeń i defektów we wzrastanym materiale. W późniejszym czasie prace kontynuowano stosując nakładanie masek z różnego rodzaju materiałów pomiędzy paskami GaN [12,13]. Prace te nie zostały włączone do niniejszej habilitacji.

W kolejnej pracy [H5] powrócono do wzrostu GaN na czystych templejtach MOCVD-GaN/szafir. Używano podłoży o rozmiarze lateralnym 1 cal, a więc zdecydowanie większym niż dotychczasowy-1 cm^2 . Opisano pięć różnych geometrycznych konfiguracji procesu krystalizacji ukierunkowanej, przeprowadzonych w tych samych warunkach eksperymentalnych (ciśnienie, temperatura, gradient temperatury, czas krystalizacji). Analiza masy wykrywanego materiału w procesach, doprowadziła do wniosku, że prędkość wzrostu mocno zależy od zjawisk zachodzących na powierzchni zarodki (o prędkości wzrostu decyduje kinetyka powierzchni zarodki). Pokazano, że wszystkie atomy azotu dochodzące do powierzchni zarodki nie są na niej adsorbowane. Tym samym, obok zarodki, na ściankach tygla obserwowana była spontaniczna (parazytyczna) krystalizacja. W pracy przedstawiono wyniki modelowania przeprowadzanych eksperymentów za pomocą metody elementów skończonych. Linie prądu oraz wektory prędkości w roztworze, jak również izotermy w ściankach tygla i w roztworze zostały wyznaczone. Pokazano, że pomiary temperatury w ściankach i dnie tygla nie odzwierciedlają realnego rozkładu temperatury w ciekłym galu. Analizowano rolę przegrody i jej wpływ na otrzymywanie płaskiego frontu krystalizacji na wzrastanych powierzchniach zarodki. Pokazano w jaki sposób przegroda ogranicza ruch konwekcyjny przy zarodki w stosunku do ruchu w roztworze. Prace obliczeniowe kontynuowano używając jako podłoża GaN i SiC. Wyniki opublikowano w pracy [14], która nie jest rozpatrywana w niniejszej habilitacji.

Rozwój technologii HVPE (również w IWC PAN) spowodował, że dostępnymi stały się krysztaly hodowane tą metodą, krysztaly HVPE-GaN. Posiadały one kilka podstawowych wad (niska koncentracja swobodnych nośników, duża gęstość defektów, wygięcie płaszczyzn krystalograficznych) wykluczających je z użycia jako podłoża do budowy przyrządów elektronicznych lub optoelektronicznych. Rozpoczęto więc używanie ich jako zarodki do krystalizacji wysokociśnieniowej. Kolejna praca [H6] opisuje właśnie takie ich użycie oraz otrzymane wyniki. Zrezygnowano z dotychczasowej konfiguracji, a więc wzrostu ukierunkowanego, na rzecz konfiguracji pozwalającej na wzrost krysztalu w każdym, fizycznie możliwym, kierunku-Rys 1c. Krysztaly HVPE były zawieszane i zanurzone w roztworze. Były one w formie płytek o rozmiarach kilku centymetrów kwadratowych. Analizowano wzrost w kierunkach $\langle 0001 \rangle$ i $\langle 000\bar{1} \rangle$. Tylko wzrost w kierunku $\langle 0001 \rangle$ (po tzw. stronie galowej) okazał się stabilny. Dla uzyskania stabilnego wzrostu znaleziono eksperymentalnie obszar Ostwalda-Miersa. Ponownie analizowano przepływy konwekcyjne w roztworze, tym razem uwzględniając zależności czasowe. Określono wektory prędkości, ich kierunki i wartości. Wyniki przedstawione w tej publikacji, doprowadziły później do uzyskania pierwszego wysokociśnieniowego, odseparowanego od zarodki, wolno stojącego (free-standing) krysztalu GaN o własnościach nadających się do przygotowania go jako podłoża dla budowy przyrządów elektronicznych i optoelektronicznych.

W ostatniej pracy [H7], która wchodzi w zakres niniejszej habilitacji powrócono do krystalizacji ukierunkowanej, w absolutnie nowej konfiguracji, zaproponowanej przez I. Grzegory, a mianowicie konfiguracji multi-feed-seed (MFS)-Rys. 1d. Konfiguracja ta polega na ułożeniu kilku zarodki jeden nad drugim i przedzieleniu ich ciekłym galem. Na skutek przyłożonego gradientu temperatury, po górnej stronie zarodki odbywa się krystalizacja GaN, a dolna część (strona) zarodki jest rozpuszczana. Dopuszcza się więc konwersję zarodki do wysokociśnieniowego krysztalu GaN. Używając jako zarodki krysztalów HVPE-GaN uzyskano stabilny wzrost ciśnieniowych krysztalów HNPS-GaN. Badania pokazały, że własności uzyskanego materiału są zdecydowanie lepsze od własności zarodki. Zdecydowanie poprawia się jakość strukturalna. Spada gęstość dyslokacji. Koncentracja swobodnych nośników przewyższa $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. W prezentowanej pracy ponownie użyto metody elementów skończonych dla określenia kierunków przepływów konwekcyjnych, wartości prędkości konwekcji w galu oraz rozkładu izoterm. Warto również zauważyć, że rozwój metody krystalizacji w konfiguracji MFS pozwolił na otrzymanie nie tylko wysoko-przewodzących krysztalów GaN, ale również wysoko-oporowych (poprzez domieszkowanie Mg) [15]. Dziś ta konfiguracja stanowi podstawę otrzymywania podłoży dla budowy przyrządów elektronicznych i optoelektronicznych w IWC PAN i TopGaN Sp. z o.o. Konfiguracja MFS została opisana w czasopiśmie Compound Semiconductor [11], jak również była tematem referatu zaproszonego na największej konferencji poświęconej materiałom azotkowym-IWN w 2012 r.. Opisują ją również artykuły [16,17,18]. Na bazie konfiguracji MFS opracowywana jest w TopGaN Sp. z o.o. technologia otrzymywania plazmonicznych podłoży GaN, w ramach realizacji projektu „Nowe generacje kształtowanych przestrzennie podłoży plazmonicznych GaN” POIG .01.04.00-14-153/11.



Rys 1 Konfiguracje eksperymentalne stosowane w ukierunkowanej krystalizacji GaN metodą HNPS: a) konfiguracja „naturalna”; zaródź spoczywa na dnie tygla; b) konfiguracja „odwrotna”; zaródź spoczywa na górze tygla; w stosunku do konfiguracji z a) zamieniono kierunek gradientu temperatury; c) konfiguracja zezwalająca na wzrost zarodki z dowolnym kierunkiem; używając płytek jako zarodki, kryształy rosły w kierunkach polarnych $\langle 0001 \rangle$ i $\langle 000\bar{1} \rangle$; d) konfiguracja MFS; zarodki ułożone jeden nad drugą; pomiędzy nimi gal.

8.2.2 Działalność w innych tematykach badawczych

Moja praca skoncentrowana była i jest wyłącznie na krystalizacji azotków, w szczególności azotku galu (prace nad krystalizacją azotku glinu zostały zarzucone po roku 2002). Moja działalność w innych tematykach badawczych, niż ta przedstawiona w pkt. 8.2.1, a dotycząca krystalizacji na zarodki, może być podzielona na kilka następujących tematów:

i/ prace nad krystalizacją azotku galu w celu otrzymania podłoży nadających się do epitaksji elektronicznych i optoelektronicznych kwantowych nanostruktur półprzewodnikowych. Prace wykonywane głównie we współpracy z Laboratorium NL-2 IWC PAN, kierowanym przez prof. T. Suskiego, oraz z i w firmie TopGaN i grupach badawczo-rozwojowych kierowanych odpowiednio przez profesorów M. Leszczyńskiego, P. Perlina i C. Skierbiszewskiego.

ii/ prace nad krystalizacją azotku galu domieszkowanego magnezem i berylem w celu otrzymania pół-izolujących monokryształów GaN. Prace prowadzone głównie we współpracy z Laboratorium NL-2 IWC PAN, kierowanym przez prof. T. Suskiego, a ostatnio również we współpracy z Instytutem Fizyki PAN (uczestnictwo w grantie NCN kierowanym przez dr. H. Teisseyra pt „Azotek galu domieszkowany berylem w kierunku nowej generacji konwerterów optycznych” NCN 2011/03/B/ST3/02647)

iii/ prace nad krystalizacją azotku galu domieszkowanego materiałami magnetycznymi oraz ziemiami rzadkimi. Prace wykonywane we współpracy z Wydziałem Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, Instytutem Fizyki PAN oraz Instytutem Fizyki Politechniki Warszawskiej.

iv/ prace związane z wygrzewaniem kryształów GaN oraz warstw MOCVD-GaN/szafir i MOCVD-AlN/szafir, domieszkowanych ziemiami rzadkimi lub innymi pierwiastkami, w warunkach wysokich ciśnień i temperatur. Prace prowadzone głównie z grupami K. Lorentz z Instytutu Technologii Nuklearnych z Portugalii, K. O'Donnell'a ze University of Strathclyde w Szkocji, uniwersytetem Linköping w Szwecji oraz Aalto w Finlandii.

v/ prace nad krystalizacją HVPE-GaN prowadzone w Laboratorium NL-3 IWC PAN, które dopiero teraz (w przypadku autora) nabierają tempa w związku z funkcją kierownika projektu NCBiR PBS (No 177589) poświęconego krystalizacji HVPE-GaN na monokryształach GaN otrzymywanych metodą amonotermalną.

vi/ prace związane z badaniami własności fizycznych monokryształów GaN prowadzone we współpracy z Wydziałem Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, Instytutem Fizyki PAN, Instytutem Niskich Temperatur PAN i innymi ośrodkami polskimi oraz wieloma zagranicznymi (wspólne prace z takimi profesorami jak B. Monemar, czy M. Cardona).

8.2.3 Pozostałe osiągnięcia

W roku 2010 na światowym rynku ukazała się książka *Technology of Gallium Nitride Crystal Growth* (Springer Series in Materials Science 133) Springer; 1st Edition. (Feb 12 2010) ISBN-10: 3642048285; ISBN-13: 978-3642048289, której miałem przyjemność być współ-edytorem wraz z dwójką moich niemieckich kolegów i przyjaciół prof. Elke Meissner i prof. D. Ehretraut'em. Jak dotychczas jest to jedyna pozycja książkowa opisująca światowe dokonania w krystalizacji objętościowego azotku galu. W 2011 r. książką została

przetłumaczona na język rosyjski i wydana w Rosji przez wydawnictwo Technosfera. Książka była i jest również dostępna internetowo na stronach wydawnictwa (Springer online platform). Do czerwca 2012 r. rozdziały książki były pobierane ze strony internetowej 2552 razy.

W roku 2010 byłem również (gościnnie) edytorem Journal of Crystal Growth Vol 312 Issue 18 1 Sept. 2010 ISSN 0022-0248. Było to wydanie specjalne czasopisma, w którym zawarto artykuły prezentowane na konferencji IWBNS-VI, której to konferencji miałem przyjemność przewodniczyć (6th International Workshop on Bulk Nitride Semiconductors (IWBNS-VI), 23rd-28th August 2009, Galindia Mazurski Eden, Poland). Dwa lata później byłem współprzewodniczącym kolejnej konferencji z tej serii 7th International Workshop on Bulk Nitride Semiconductors (IWBNS-VII), 15th-20th March, 2011, Koyasan, Wakayama, Japan. Od 2007 r. należę do International Advisory Committee tej konferencji.

Bywam przewodniczącym i współprzewodniczącym wielu sesji poświęconych wzrostowi półprzewodników azotkowych na głównych konferencjach poświęconych azotkom, takich jak International Workshop of Nitrides (IWN), czy International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS). Ostatnio zostałem zaproszony do bycia współprzewodniczącym konferencji organizowanej przez Japanese Society of Applied Physics (JSAP) Autumn Meeting Symposium J: Nitride Semiconductors-Bulk and Related Growth and Characterization, 16-20 września 2013, w Kyoto w Japonii.

W latach 2007-2008 byłem ekspertem w Narodowym Programie Foresight "Polska 2020". W 2007 r. byłem ekspertem kluczowym w projekcie „Monitorowanie i prognozowanie (Foresight) priorytetowych, innowacyjnych technologii dla zrównoważonego rozwoju województwa mazowieckiego”

W latach 2003 - 2006 byłem Członkiem sekcji Technologii Elektronowej i Technologii Materiałów Elektronicznych Komitetu Elektroniki i Komunikacji PAN, a od 2001 do dziś jestem Członkiem Polskiego Towarzystwa Wzrostu Kryształów.

W latach 1995 to 2010 byłem członkiem Rady Naukowej IWC PAN z ramienia młodych pracowników naukowych.

W roku 1998 otrzymałem Nagrodę European High Pressure Research Group (EHPRG) za wkład pracy nad półprzewodnikami, w szczególności z grupy azotków-Catania, 1998, a w roku 2011 uznanie za wkład do Międzynarodowego Sympozjum na temat Wzrostu Kryształów; Korean Association of Crystal Growth Plaque of Appreciation.

Od roku 2004 do 2008 pracowałem na stanowisku technologa w firmie TopGaN Sp. z o.o.. Od września 2008 r. jestem wiceprezesem tej firmy.

8.3 Podsumowanie

24 lata mojej pracy w Laboratorium NL-3 IWC PAN i 24 lata współpracy z tak znakomitymi fizykami jak profesorowie I. Grzegory, S. Porowski, S. Krukowski, B. Łuczniak, M. Leszczyński, P. Perlin, C. Skierbiszewski i T. Suski zaowocowało wieloma pracami i wystąpieniami konferencyjnymi, których byłem autorem lub współautorem. Badania nad azotkami w IWC PAN i TopGaN Sp. z o.o. wciąż trwają i się rozwijają. Przykładem niech będą ostatnie realizowane projekty NCBiR w ramach konkursów Innotech i PBS (w jednym z nich pełnię rolę kierownika). W laboratoriach IWC PAN pojawia się coraz więcej młodych pracowników naukowych. Wciąż rodzą się nowe idee, pomysły i możliwości dotyczące krystalizacji azotku galu. Prowadzone są zaawansowane badania krystalizacji wysokociśnieniowej na zarodkach otrzymywanych metodą HVPE, rozpoczęto prace nad krystalizacją HVPE na zarodkach otrzymywanych metodą amonotermalną. Uzyskane kryształy będą ponownie używane jako zarodki w metodach wysokociśnieniowej, amonotermalnej i HVPE. W tej ostatniej metodzie (technologii) czekają badania nad domieszkowaniem wzrastających kryształów na typowo wysoko-przewodzący, jak i pół-izolujący. Z kolei w metodzie wysokociśnieniowej planowane jest rozpoczęcie prac mających na celu przyspieszenie wzrostu w kierunku osi *c* poprzez krystalizację z roztworu galu z pierwiastkami grupy I, przede wszystkim z flux'u galowo-litowo-sodowego. Dotychczasowe próby (krystalizacja z użyciem wapnia i jego azotku) nie dały pozytywnych rezultatów [19]. Uzyskiwane nowe kryształy pozwolą na wyznaczenie ich, nieokreślonych dotychczas, własności i parametrów. Przykładem może być tu projekt NCN 2012/05/B/ST3/02516 „Wyznaczenie nieliniowych stałych sprężystości, piezoelektrycznych, elektrostrykcyjnych i dielektrycznych objętościowego azotku galu” realizowany od niedawna w IWC PAN, którego autor niniejszej habilitacji jest kierownikiem.

8.4 Spis cytowanej literatury

- [1] M. Bockowski, I. Grzegory, G. Kamler, B. Lucznik, S. Krukowski, M. Wroblewski, P. Kwiatkowski, K. Jasik, S. Porowski, *Journal-of-Crystal-Growth*; 305(2): 414-20 (2007)
- [2] Y. Oshima, T. Eri, M. Shibata, H. Sunakawa, K. Kobayashi, T. Ichihashi, A. Usui, *Japanese Journal of Applied Physics Part 2-Letters* Vol: 42, Issue: 1A-B, Pages: L1-L3 (2003)
- [3] K. Motoki, T. Okahisa, R. Hirota, S. Nakahata, K. Uematsu, N. Matsumoto J. *Cryst Growth* 305 (2007) 377
- [4] R. Dwilinski, R. Doradzinski, J. Garczynski, L.P. Sierzputowski, A. Puchalski, Y. Kanbara, K. Yagi, H. Minakuchi, H. Hayashi, *Excellent crystallinity of truly bulk ammonothermal GaN*, *Journal of Crystal Growth* **310** (2008), pp. 3911
- [5] K. Motoki, *SEI Technical Review*, Number 70, April 2010; 28
- [6] Y. Oshima, T. Yoshida, T. Eri, K. Watanabe, M. Shibata, T. Mishima in *Technology of Gallium Nitride Crystal Growth*, edited by D.Ehrentraut, E. Meissner, and M. Boćkowski, (Springer-Verlag, Heidelberg, ISBN 978-3-642-04828-9), 79-95 (2010)
- [7] H. Geng, H. Sunakawa, N. Sumi, K. Yamamoto, A.A. Yamaguchi, A. Usui, *Journal of Crystal Growth*, 350 (1), 44-49, (2012)
- [8] B. Lucznik, B. Pastuszka, G. Kamler, I. Grzegory, S. Porowski in *Technology of Gallium Nitride Crystal Growth*, edited by D.Ehrentraut, E. Meissner, and M. Boćkowski, (Springer-Verlag, Heidelberg, ISBN 978-3-642-04828-9), 61-78 (2010)
- [9] R. Doradziński, R. Dwilinski, J. Garczynski, L.P. Sierzputowski, Y. Kanbara, in *Technology of Gallium Nitride Crystal Growth*, edited by D.Ehrentraut, E. Meissner, and M. Boćkowski, (Springer-Verlag, Heidelberg, ISBN 978-3-642-04828-9), 137-158, (2010)
- [10] Y. Mori, M. Imade, K. Murakami, H. Takazawa, H. Imabayashi, Y. Todoroki, K. Kikamoto, M. Maruyama, M. Yoshimura, Y. Kitaoka, T. Sasaki, *Journal of Crystal Growth*, 350 (1), 72-74, (2012)
- [11] *Compound Semiconductor*, Jan/Feb 2012, p 42
- [12] M. Bockowski, I. Grzegory, G. Nowak, B. Lucznik, B. Pastuszka, G. Kamler, M. Wroblewski, P. Kwiatkowski, K. Jasik, W. Wawer, S. Krukowski, S. Porowski, *Physica Status Solidi C*, 6 1487 (2006)
- [13] M. Boćkowski, I. Grzegory, G. Nowak, G. Kamler, B. Łucznik, M. Wróblewski, P. Kwiatkowski, K. Jasik, S. Krukowski, S. Porowski, *Proc. of SPIE* Vol. 6121, 612103 (2006)
- [14] M. Bockowski, P. Strak, P. Kempisty, I. Grzegory, B. Lucznik, S. Krukowski, S. Porowski, *Physica-Status-Solidi-C*; 5(6): 1539-42 (2008)
- [15] I. Grzegory, M. Bockowski, B. Lucznik, J. L. Weyher, E. Litwin-Staszewska, L. Konczewicz, B. Sadovyi, P. Nowakowski, S. Porowski. *Journal of Crystal Growth* 350 (1), 50-55 (2012)
- [16] M. Bockowski, I. Grzegory, B. Łucznik, T. Sochacki, M. Krysko, G. Kamler, S. Porowski, *Sci China Tech Sci*, 54 (1), 42-46, (2011)
- [17] M. Bockowski, I. Grzegory, B. Łucznik, T. Sochacki, M. Kryśko, P. Strak, I. Dzięciolewski, E. Litwin-Staszewska and S. Porowski, *Phys. Status Solidi A*, 208 (7) 1507-1510, (2011)
- [18] M. Bockowski, B. Łucznik, T. Sochacki, B. Sadovyi, G. Nowak, E. Litwin-Staszewska, I. Grzegory, *Phys. Status Solidi C* 9 (3-4), 453-456 (2012)
- [19] M. Bockowski, I. Grzegory, A. Kchahapuridze, S. Gierlotka, S. Porowski, *Journal of Crystal Growth* Vol: 312, Issue: 18, 2574-2578 (2010)

8.4 Spis cytowanej literatury

- [1] M. Bockowski, I. Grzegory, G. Kamler, B. Lucznik, S. Krukowski, M. Wroblewski, P. Kwiatkowski, K. Jasik, S. Porowski, *Journal-of-Crystal-Growth*; 305(2): 414-20 (2007)
- [2] Y. Oshima, T. Eri, M. Shibata, H. Sunakawa, K. Kobayashi, T. Ichihashi, A. Usui, *Japanese Journal of Applied Physics Part 2-Letters* Vol: 42, Issue: 1A-B, Pages: L1-L3 (2003)
- [3] K. Motoki, T. Okahisa, R. Hirota, S. Nakahata, K. Uematsu, N. Matsumoto *J. Cryst Growth* 305 (2007) 377
- [4] R. Dwilinski, R. Doradzinski, J. Garczynski, L.P. Sierzputowski, A. Puchalski, Y. Kanbara, K. Yagi, H. Minakuchi, H. Hayashi, *Excellent crystallinity of truly bulk ammonothermal GaN*, *Journal of Crystal Growth* **310** (2008), pp. 3911
- [5] K. Motoki, SEI Technical Review, Number 70, April 2010; 28
- [6] Y. Oshima, T. Yoshida, T. Eri, K. Watanabe, M. Shibata, T. Mishima in *Technology of Gallium Nitride Crystal Growth*, edited by D.Ehrentaut, E. Meissner, and M. Bockowski, (Springer-Verlag, Heidelberg, ISBN 978-3-642-04828-9), 79-95 (2010)
- [7] H. Geng, H. Sunakawa, N. Sumi, K. Yamamoto, A.A. Yamaguchi, A. Usui, *Journal of Crystal Growth*, 350 (1), 44-49, (2012)
- [8] B. Lucznik, B. Pastuszka, G. Kamler, I. Grzegory, S. Porowski in *Technology of Gallium Nitride Crystal Growth*, edited by D.Ehrentaut, E. Meissner, and M. Bockowski, (Springer-Verlag, Heidelberg, ISBN 978-3-642-04828-9), 61-78 (2010)
- [9] R. Doradziński, R. Dwilinski, J. Garczynski, L.P. Sierzputowski, Y. Kanbara, in *Technology of Gallium Nitride Crystal Growth*, edited by D.Ehrentaut, E. Meissner, and M. Bockowski, (Springer-Verlag, Heidelberg, ISBN 978-3-642-04828-9), 137-158, (2010)
- [10] Y. Mori, M. Imade, K. Murakami, H. Takazawa, H. Imabayashi, Y. Todoroki, K. Kikamoto, M. Maruyama, M. Yoshimura, Y. Kitaoka, T. Sasaki, *Journal of Crystal Growth*, 350 (1), 72-74, (2012)
- [11] *Compound Semiconductor*, Jan/Feb 2012, p 42
- [12] M. Bockowski, I. Grzegory, G. Nowak, B. Lucznik, B. Pastuszka, G. Kamler, M. Wroblewski, P. Kwiatkowski, K. Jasik, W. Wawer, S. Krukowski, S. Porowski, *Physica Status Solidi C*, 6 1487 (2006)
- [13] M. Bockowski, I. Grzegory, G. Nowak, G. Kamler, B. Lucznik, M. Wroblewski, P. Kwiatkowski, K. Jasik, S. Krukowski, S. Porowski, *Proc. of SPIE* Vol. 6121, 612103 (2006)
- [14] M. Bockowski, P. Strak, P. Kempisty, I. Grzegory, B. Lucznik, S. Krukowski, S. Porowski, *Physica-Status-Solidi-C*; 5(6): 1539-42 (2008)
- [15] I. Grzegory, M. Bockowski, B. Lucznik, J. L. Weyher, E. Litwin-Staszewska, L. Konczewicz, B. Sadovyi, P. Nowakowski, S. Porowski, *Journal of Crystal Growth* 350 (1), 50-55 (2012)
- [16] M. Bockowski, I. Grzegory, B. Lucznik, T. Sochacki, M. Krysko, G. Kamler, S. Porowski, *Sci China Tech Sci*, 54 (1), 42-46, (2011)
- [17] M. Bockowski, I. Grzegory, B. Lucznik, T. Sochacki, M. Krysko, P. Strak, I. Dziecielewski, E. Litwin-Staszewska and S. Porowski, *Phys. Status Solidi A*, 208 (7) 1507-1510, (2011)
- [18] M. Bockowski, B. Lucznik, T. Sochacki, B. Sadovyi, G. Nowak, E. Litwin-Staszewska, I. Grzegory, *Phys. Status Solidi C* 9 (3-4), 453-456 (2012)
- [19] M. Bockowski, I. Grzegory, A. Kchahapuri, S. Gierlotka, S. Porowski, *Journal of Crystal Growth* Vol: 312, Issue: 18, 2574-2578 (2010)

Warszawa 2013.03.01

20

M. Bockowski