

**Autoreferat**

**dr inż. Włodzimierz Strupiński**

**Spis treści**

|   |    |
|---|----|
| 1. CURRICULUM VITAE .....   | 2  |
| 1.1. Dane osobowe .....   | 2  |
| 1.2. Wykształcenie .....  | 2  |
| 1.3. Zatrudnienie .....   | 2  |
| 2. DZIAŁALNOŚĆ DYDAKTYCZNA I ORGANIZACYJNA  |    |
| 2.1. Konferencje i wystąpienia .....  | 3  |
| 2.2. Projekty krajowe i międzynarodowe .....  | 9  |
| 2.3. Opieka naukowa nad studentami i doktorantami .....   | 12 |
| 2.4. Staże w zagranicznych ośrodkach naukowych .....  | 12 |
| 2.5. Recenzje i ekspertyzy .....  | 12 |
| 2.6. Inna działalność organizacyjna .....   | 13 |
| 3. DZIAŁALNOŚĆ NAUKOWO-BADAWCZA .....   | 14 |
| 3.1. Publikacje – podsumowanie .....  | 14 |
| 3.2. Nagrody i wyróżnienia .....  | 14 |
| 3.3. Patenty i wdrożenia .....  | 14 |
| 3.4. Osiągnięcia naukowe nie stanowiące podstawy postępowania habilitacyjnego<br>- po uzyskaniu stopnia doktora ..... | 15 |
| 3.5. Spis publikacji .....  | 18 |
| 4. OSIĄGNIĘCIA NAUKOWE STANOWIĄCE PODSTAWĘ POSTĘPOWANIA<br>HABILITACYJNEGO .....                                      | 30 |
| 4.1. Spis publikacji stanowiących podstawę do ubiegania się o habilitację .....                                       | 30 |
| 4.2. Omówienie osiągniętych wyników .....   | 33 |
| 4.3. Literatura .....   | 46 |

## 1. CURRICULUM VITAE

### 1.1. Dane osobowe

Imię i nazwisko: Włodzimierz Strupiński  
Data urodzenia: 5.12.1957  
Email: [wlodek.strupinski@pw.edu.pl](mailto:wlodek.strupinski@pw.edu.pl); [wlodekstrupinski@gmail.com](mailto:wlodekstrupinski@gmail.com)  
Tel: 502 325 661

### 1.2. Wykształcenie

02.02.1989 stopień doktora nauk fizycznych uzyskany na Wydziale Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej Instytut Fizyki; tytuł rozprawy doktorskiej: „Badanie zależności właściwości elektrooptycznych fosforu galu od parametrów procesu wzrostu epitaksjalnego z fazy gazowej”;  
30.06.1981 stopień magistra inżyniera technologa materiałów uzyskany w Instytucie Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej; praca pt. „Epitaksja arsenku galu metodą MOCVD”

### 1.3. Zatrudnienie

2018 – obecnie Wydział Fizyki Politechniki Warszawskiej  
1983 - 2017 asystent, st.asystent, adiunkt w Instytucie Technologii Materiałów Elektronicznych (ITME), od 1994 kierownik Samodzielnej Pracowni Epitaksji Związków Półprzewodnikowych; od 1997 kierownik Zakładu Epitaksji Związków Półprzewodnikowych (od 2015 Zakładu Epitaksji i Charakteryzacji)  
1991 – 1992 Laboratorium Fizyki Wzrostu Kryształów UW

## 2. DZIAŁALNOŚĆ DYDAKTYCZNA I ORGANIZACYJNA

### 2.1. Konferencje i wystąpienia

#### Referaty zaproszone i plenarne 2018-2007

| Lista zaproszonych referatów konferencyjnych i wykładów w latach 2007-2018 |  |  |  |  |                     |
|--|--|--|--|--|---------------------|
| Lp.  | Rodzaj prezentacji (konferencja/ wykład) | Tytuł prezentacji  | Wydarzenie naukowe   | Instytucja organizująca                                      | Data                |
| 1.   | Referat konferencyjny                    | Interface influence on the properties of the layered materials     | Workshop Graphene Flagship WP3, Fuerteventura, Spain           | EU Graphene Flagship / CORE 1                                | 18-23 February 2018 |
| 2.   | Wykład                                   | Przyszłość aplikacyjna grafenu                                     | Seminar - Oddział Wrocławski Polskiego Towarzystwa Fizycznego, | INTBiS PAN Wrocław, Poland                                   | Jan., 24, 2018      |
| 3.   | Wykład                                   | Graphene in antiques protection                                    | Seminar  | Muzeum Pałac w Wilanowie, Warsaw, Poland                     | Dec., 1, 2017       |
| 4.   | Referat konferencyjny                    | Growth of Graphene on different substrates                         | European Microwave Week 2017 conference, Nuremberg, Germany    | The European Microwave Association (EuMA)                    | October 8-13, 2017  |
| 5.   | Wykład                                   | Graphene Application   | Seminar  | Antoni Jurasz University Hospital No. 1 in Bydgoszcz, Poland | May 15, 2017        |
| 6.   | Referat konferencyjny                    | Semi-metal in a commercialization race – graphene films production | Graphene 2017, Barcelona, Spain                                | Phantoms foundation, ICN2, ICFO, IIT, UCL                    | March 28-31, 2017   |
| 7.   | Referat konferencyjny                    | h-BN technology status at ITME                                     | EU Graphene Flagship WORKSHOP, Barcelona, Spain                | EU Graphene Flagship   | March 28-31, 2017   |
| 8.   | Wykład                                   | Advanced technologies in energetics                                | Seminar  | KGHM, Warsaw, Poland   | March 1, 2017       |
| 9.   | Wykład                                   | Graphene Application   | Antoni Jurasz University Hospital No. 1 in Bydgoszcz, Poland   | University Hospital  | May 15, 2017        |
| 10.  | Wykład                                   | Breakthrough techn. transforming the way we live and work          | BEDB univ. Brunei  | BEDB university  | March 4, 2017       |
| 11.  | Wykład                                   | Advanced technologies in energetics                                | KGHM, Warsaw, Poland   | KGHM   | March 1, 2017       |

|     |                       |  |  |  |                       |
|-----|-----------------------|--|--|--|-----------------------|
| 12. | Referat konferencyjny | Graphene growth on Ge/Si                                     | EU Graphene Flagship WORKSHOP, Barcelona, Spain  | EU Graphene Flagship                         | December 9, 2016      |
| 13. | Referat konferencyjny | Graphene growth on semiconductors and metals                 | 10th Int. Conference of Polish Society for Crystal Growth (ICPSCG10), Zakopane, Poland | Polish Society for Crystal Growth            | 16-21 October 2016    |
| 14. | Referat konferencyjny | Graphene growth on SiC and Ge - from lab scale to production | GraphChina 2016, Qingdao, China  | China Innovat. Alliance of Graphene Industry | September 22-24, 2016 |
| 15. | Referat konferencyjny | Graphene – technology and application                        | TECHNICA conference, NY, USA   | Polonia Technica                             | May 20-22, 2016       |
| 16. | Referat konferencyjny | Technology development on CVD growth and transfer            | EU Graphene Flagship WORKSHOP Fuerteventura 2016, Spain                                | EU Graphene Flagship                         | February 8-12, 2016   |
| 17. | Referat konferencyjny | 2D materials growth, exfoliation and application             | 3rd Euro-Mediterranean Conf. on Materials and Renewable Energies EMCME-3               | University Cadi Ayyad, Morocco               | November 2-6, 2015    |
| 18. | Referat konferencyjny | Will graphene change your world                              | METEC International Metallurgical Technology Trade, Dusseldorf, Germany                | Federal state North Rhine-Westphalia         | June 16, 2015         |
| 19. | Referat konferencyjny | Graphene films growth technology                             | EUROMAT 2015, Materials Weekend  | PMS and WUT                                  | Sept.27, 2015         |
| 20. | Wykład                | Graphene - Features and Applications                         | WIN Semiconductors co., Taiwan   | WIN Semiconductors                           | Nov.24, 2015          |
| 21. | Wykład                | Graphene Technology and Applic.                              | National Chiao Tung University, Taiwan   | Nation. Chiao Tung Univ                      | Nov.24, 2015          |
| 22. | Wykład                | Graphene – Material for Electronics                          | National Nano Device Laboratories, Taiwan  | Nation Nano Device Lab.                      | Nov.25, 2015          |
| 23. | Wykład                | Appl. of Graphene in LEDs and LDs                            | Epistar LED Technology, Taiwan   | Epistar LED Technology                       | Nov.25, 2015          |
| 24. | Wykład                | Graphene growth on SiC                                       | Episil Holding Inc. Power Semic., Taiwan   | Episil co.                                   | Nov.25, 2015          |
| 25. | Wykład                | Graphene Technologies at ITME                                | Industrial Techn. Research Institute, Taiwan   | ITRI   | Nov.26, 2015          |
| 26. | Wykład                | Graphene – Technology and Applications                       | National Tsing Hua University, Taiwan  | National Tsing Hua University, Taiwan        | Nov. 26, 2015         |
| 27. | Wykład                | Graphene – Technology and Applications                       | National Cheng Kung University, Taiwan   | National Cheng Kung University, Taiwan       | Nov. 27, 2015         |
| 28. | Referat konferencyjny | MOCVD growth monitoring and calibration for VCSEL structures | VCSEL Day 2015   | University of Lodz, Poland                   | 2015                  |
| 29. | Wykład                | Przyszłość aplikacyjna grafenu w oparciu o technologie ITME  | Seminar WAT, Poland  | WAT, Poland                                  | 2015                  |
| 30. | Wykład                | Przyszłość aplikacyjna grafenu                               | PIAP, Poland   | PIAP, Poland                                 | 2015                  |

|     |                                      |   |  |                                      |                             |
|-----|--------------------------------------|---|--|--------------------------------------|-----------------------------|
| 31. | Wykład                               | Nanotechnologie<br>półprzewodnikowe   | VER Group Poznań,<br>Poland  | VER Group, Poland                    | 2015                        |
| 32. | Referat<br>konferencyjny             | Materials for electronics –<br>from classical<br>semiconductors to graphene | Polish Innovation in<br>Advanced Materials &<br>Nanotechnologies, Tel<br>Aviv, Israel          | Polish Embassy                       | December<br>1, 2014         |
| 33. | Referat<br>konferencyjny             | Graphene  | Nauka.Infrastruktura.B<br>iznes  | CEZAMAT i<br>NCBR                    | Oct. 13-15<br>2014          |
| 34. | Ref. konf.<br>plenarny               | Graphene– Features and<br>Applications                                      | KKE XIII conference,<br>Darlowko, Poland   | Koszalin Univ. of<br>Tech.           | June 9,<br>2014             |
| 35. | Referat<br>konferencyjny             | QCL Lasers in MOCVD<br>technology   | KKE XIII conference,<br>Darlowko, Poland   | Koszalin Univ. of<br>Tech.           | June 10,<br>2014            |
| 36. | Wykład                               | Graphene – properties,<br>technology and applications                       | Technical University<br>of Wroclaw, Poland   | TUW                                  | March 4,<br>2014            |
| 37. | Wykład                               | Graphene – novel<br>applications  | ABB Research Center,<br>Cracow, Poland   | ABB                                  | March,<br>2014              |
| 38. | Wykład                               | Graphene – Epitaxial and<br>Exfoliated                                      | ALSTOM, Baden,<br>Switzerland  | ALSTOM                               | May 27,<br>2014             |
| 39. | Wykład                               | Graphene and 2D nano-<br>materials  | BEDB university,<br>Brunei   | BEDB univ.                           | Aug. 9,<br>2014             |
| 40. | Wykład                               | Grafen – właściwości,<br>technologia, zastosowania                          | IPPT, Warsaw, Poland   | IPPT Poland                          | 2014                        |
| 41. | Wykład                               | Graphene– Features, Techn.<br>& Appl.                                       | Warsaw University of<br>Technology, Poland   | WUT                                  | 2014                        |
| 42. | Wykład                               | Mater. for next gen. of<br>power devices                                    | TopSil co., Warsaw,<br>Poland  | TopSil                               | Feb., 2014                  |
| 43. | Referat<br>konferencyjny<br>plenarny | Graphene in electronics –<br>properties, technologies,<br>aplication        | XI Konferencja<br>Naukowa Technologia<br>Elektronowa<br>ELTE'2013, Ryn,<br>Poland              | WUT                                  | April 20,<br>2013           |
| 44. | Referat<br>konferencyjny             | CVD of Graphene on SiC  | International<br>Conference on Crystal<br>growth and Epitaxy<br>ICCGE-17                       | Polish Society for<br>Crystal Growth | August<br>11-16,<br>2013    |
| 45. | Referat<br>konferencyjny             | Graphene growth technology  | Taiwan-Poland<br>Workshop on Material<br>Research, Warsaw,<br>Poland                           | NCBiR                                | Sept. 12,<br>2013           |
| 46. | Referat<br>konferencyjny             | Graphene: Epitaxial vs<br>exfoliated  | 15th Int Conf on<br>Defects Recog.,<br>Imaging and Phys in<br>Semic. DRIP-XV<br>Warsaw, Poland | Inst. of Electron<br>Techn.          | September<br>15-19,<br>2013 |
| 47. | Referat<br>konferencyjny             | Graphene and membranes  | Forum MIF, Monaco  | EU Techn. Plat for<br>Water          | Oct. 7,<br>2013             |
| 48. | Referat<br>konferencyjny             | Graphene growth technology  | WORKSHOP of<br>Materials Synthesis<br>Platform, Linköping                                      | Linköping Univ.                      | Nov. 20,<br>2013            |
| 49. | Referat<br>konferencyjny             | MOCVD of III-N<br>compounds at ITME   | WORKSHOP of<br>Materials Synthesis<br>Platform, Linköping                                      | Linköping Univ.                      | Nov. 20,<br>2013            |
| 50. | Wykład                               | Subl. and CVD graphene<br>growth  | IF PAN, Warsaw,<br>Poland  | IF PAN                               | 2013                        |

|     |                       |   |  |                                       |                  |
|-----|-----------------------|---|--|---------------------------------------|------------------|
| 51. | Wykład                | MOCVD Epitaxy of III-V Compounds For Modern Electronics           | Bilkent University, Ankara, Turkey   | Bilkent Univ.                         | 2013             |
| 52. | Wykład                | Graphene growth by CVD vs sublimation methods                     | Erlangen University, Germany   | Erlangen University                   | 2012             |
| 53. | Wykład                | Graphene Epitaxy by Chemical Vapor Deposition on SiC              | Aarhus University, Denmark   | Aarhus University                     | 2012             |
| 54. | Wykład                | Graphene technology   | Institute Europeen des Membranes, Montpellier, France                                    | Institute Europeen des Membranes      | Dec.12, 2012     |
| 55. | Wykład                | Graphene at ITME  | Sejm of Poland   | Commission of Science                 | 2012             |
| 56. | Wykład                | Technologia grafenu   | Instytut Mechaniki Precyzyjnej, Warsaw, Poland   | IMP, Poland                           | 2012             |
| 57. | Referat konferencyjny | Graphene epitaxy by CVD on SiC substrates                         | The Third Int Symp on the Sc. and Techn. of Epitax. Graphene, St Augustine, Florida, USA | Atlanta Univ.                         | Oct. 24-27, 2011 |
| 58. | Referat konferencyjny | Graphene Epitaxy by CVD on SiC substrates                         | Workshop 'Graphene Synthesis and Charact. for Applications' Windermere, UK               | Manchester Univ.                      | Nov. 15-18, 2011 |
| 59. | Wykład                | Grafen – nowe wyzwanie dla nano-technologii                       | IF Uniwersytet Śląski, Katowice, Poland  | IF Uniwersytet Śląski, Poland         | Jan. 12, 2011    |
| 60. | Referat konferencyjny | Methods of Graphene growth  | XLI Zjazd Fizyków Polskich   | Stowarzyszenie Fizyków Lublin, Poland | 2011             |
| 61. | Wykład                | Grafen – nowy materiał w elektronice                              | IF UMK Toruń, Poland   | IF UMK Toruń, Poland                  | March 23, 2011   |
| 62. | Wykład                | Grafen – nadzieja techniki XXI wieku                              | Polska Akademia Nauk, Wydział III, Warsaw, Poland  | PAN, Wydział III, Poland              | May 5, 2011      |
| 63. | Wykład                | Technologie wytwarzania grafenu                                   | Centrum Zaawansowanych Studiów Politechniki Warszawskiej                                 | CZS PW, Warsaw, Poland                | May 12, 2011     |
| 64. | Wykład                | Graphene – material of 21th century                               | Ministerstwo Gospodarki, Warsaw, Poland  | MG Poland                             | May 30, 2011     |
| 65. | Wykład                | Grafen – nadzieja dla elektroniki i wyzwanie dla nano-technologii | IF PAN Warsaw, Poland  | IF PAN Warsaw                         | 2010             |
| 66. | Wykład                | Grafen  | Instytut Telekomunikacji, Warsaw, Poland   | IT Poland                             | 2010             |
| 67. | Wykład                | Grafen – nadzieja dla elektroniki i wyzwanie dla nanotechnologii  | Wydział Fizyki UMC Lublin, Poland  | UMC Lublin Poland                     | Nov. 11, 2010    |
| 68. | Wykład                | Technologia wytwarzania grafenu                                   | IFD UW / prof.Grynberg seminar   | IFD UW                                | Oct. 23, 2009    |

|     |                       |  |  |                             |                         |
|-----|-----------------------|--|--|-----------------------------|-------------------------|
| 69. | Referat konferencyjny | Epitaksja MOCVD materiałów dla elektroniki AlGa <sub>N</sub> -SiC-grafen       | III Krajowa Konferencja Nanotechnologii NANO 2009  | ITE Warszawa, Poland        | June, 22-26, 2009       |
| 70. | Wykład                | CVD Epitaxy of SiC   | Bilkent University, Ankara, Turcja   | Bilkent University          | 2008                    |
| 71. | Wykład                | Epitaxial growth of GaN and SiC for high performance applications              | Bilkent University, Ankara, Turcja   | Bilkent University          | 2008                    |
| 72. | Wykład                | Inżynieria struktur epitaksjalnych GaN i SiC dla współczesnej elektroniki      | Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Materiałowej                                     | WIM PW                      | 2008                    |
| 73. | Referat konferencyjny | Silicon Carbide in CVD Epitaxy - Old Material with New Electronic Applications | International Conference: 5th Wide Bandgap Materials – progress in sythesis and applications | Warsaw Technical University | 28.06-02.2007, Zakopane |
| 74. | Wykład                | Inżynieria materiałów półprzewodnikowych dla współczesnej elektroniki          | Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Materiałowej                                     | WIM PW                      | Nov., 2006              |

### Referaty konferencyjne

| Lp. | Tytuł prezentacji  | Wydarzenie naukowe  | Instytucja organizująca                          | Data               |
|-----|--|---|--|--------------------|
| 1.  | Graphene on Ge: growth and transfer                                    | EU Graphene Flagship Workshop, Goeteborg, Sweden              | Chalmers Univ.                                   | 2015               |
| 2.  | Properties of buffer layer in 4H-SiC(0001)                             | GraphenSP 2014 conf., Lanzarote, Spain                        | ICMM Madrid                                      | March 18-21, 2014  |
| 3.  | Development of graphene epitaxy by chemical vapor deposition on SiC    | GraphHEL conf, Mykonos, Greece                                | Patras Univ.                                     | Sept. 27-30, 2012  |
| 4.  | Grafen - technologia produkcji i perspektywy zastosowań                | II Warsztaty Organicznej Drukowanej i Elastycznej Elektroniki | Politechnika Łódzka                              | Oct. 2012          |
| 5.  | CVD of graphene on SiC   | EPIGRAPHIC 2012, , Catania, Italy                             | Catania Univ.                                    | December 4-7, 2012 |
| 6.  | Growth of graphene by CVD and Si sublimation methods on SiC substrates | NanoSea Conference 2012, Italy                                | Univ. of Aix Marseille Univ. of Roma Tor Vergata | June 25-29, 2012   |
| 7.  | Grafen - nadzieja dla elektroniki i wyzwanie dla nano-technologii      | IX Konferencja Techniki Próżni Cedzynia                       | Polskie Towarzystwo Próżniowe                    | June 6-9, 2011     |

|     |  |  |                               |                       |
|-----|--|--|-------------------------------|-----------------------|
| 8.  | Technologia MOCVD heterostruktur laserów InGaAsSb/AlGaAsSb/GaSb                              | IX Krajowa Konferencja Elektroniki Darłowo   | Politechnika Koszalińska      | 30 May – 2 June, 2010 |
| 9.  | Opracowanie procesów technologicznych homo- i hetero-epitaksji na podłożach z węgliku krzemu | IX Krajowa Konferencja Elektroniki Darłowo   | Politechnika Koszalińska      | 30 May – 2 June, 2010 |
| 10. | Epitaxial Graphene Growth on SiC Substrates  | ELTE 2010, Wrocław, Poland   | Politechnika Wrocławska       | Sept. 25, 2010        |
| 11. | Węglik krzemu w technologii CVD  | XI Seminarium: Powierzchnia i Struktury Cienkowarstwowe, Szklarska Poręba Średnia                          | Politechnika Wrocławska       | May 19-22, 2009       |
| 12. | Domieszkowanie warstw epitaksjalnych węgliku krzemu  | VIII Krajowa Konferencja Elektroniki, Darłowo  | Politechnika Koszalińska      | June 2009             |
| 13. | Growth Rate and Thickness Uniformity of Epitaxial Graphene                                   | 13 <sup>th</sup> International Conference on Silicon Carbide and Related Materials, Nurnberg, Germany 2009 | Erlangen Univ.                | Oct. 11-16, 2009      |
| 14. | Growth of Graphene Layers on Silicon Carbide   | 7th European Conference on Silicon Carbide and Related Materials, Barcelona                                | IEEE Electron Devices Society | Sept. 7-11, 2008      |

### **Plakaty (pierwszy autor)**

1. W.Strupiński, WORKSHOP: *GRAPHENE 2020 – opportunities for Europe*, Bruksela March 21-22, 2011
2. W.Strupinski, A.Grüneis, D.Haberer, T.Szkopek and J.M.Baranowski, *Graphene Epitaxy by Chemical Vapor Deposition on SiC*, Graphene International Conference April 11-14, 2011 Bilbao, Spain
3. W.Strupinski, *Graphene Grown on SiC: Chemical Vapor Deposition vs Sublimation*, Graphene-Week 2011: Fundamental science of graphene and applications of graphene-based devices, Obergurgl, Austria, May 2011
4. W.Strupinski, R.Jakiela, K.Kosciewicz, P.Caban, M.Wesolowski, *P-type Doping Optimisation of Epitaxial 4H-SiC Layers*, International Conference on Silicon Carbide and Related Materials, Nurnberg, Germany 2009
5. W.Strupinski, K.Grodecki, T.Szkopek, A.Wysmolek, K.Kosciewicz, P.Caban, R.Ubick, Lii-Cherng Leu, J.Krupka, J.M.Baranowski, *Technology of Epitaxial Graphene Growth on SiC, Epitaxial growth on 4H-SiC on-axis, 0.5°, 1.25°, 2°, 4°, 8° off-axis substrates – defects analysis and reduction*, 8th European Conference on Silicon Carbide and Related Materials Oslo, Norway August 29 – September 2, 2010.
6. Strupinski W., Baranowski J., Grodecki K., Bozek R., Caban P., Wysmolek A., Szkopek T., Stepniewski R., *Growth of graphene by CVD and Si sublimation methods on SiC substrates*, 2nd International Symposium on the Science and Technology of Epitaxial Graphene. 14-17 Sept. 2010 Amelia Island, Florida.



## 2.2. Projekty krajowe i międzynarodowe

| Lista projektów badawczych w latach 2007-2017 |   |                          |                            |                   |                                      |
|---|---|--------------------------|----------------------------|-------------------|--------------------------------------|
| Lp.   | Tytuł projektu  | Wartość projektu (w PLN) | Instytucja finansująca     | Czas projektu     | Funkcja aplikanta                    |
| 1   | EU 7th Framework Programme Graphene Flagship Graphene-Driven Revolutions in ICT and Beyond                    | 1 800 000                | European Commission        | 2014/09-2016/03   | Kierownik zadań w Polsce             |
| 2   | CORE1 Horizont 2020 (Graphene Flagship) Graphene-Driven Revolutions in ICT and Beyond                         | 3 000 000                | European Commission        | 2016/04-2018/03   | Kierownik zadania w Polsce           |
| 3   | GRAPHICA Graphene for Integrated Circuit Applications   | 1 400 000                | ESF                        | 2015/05-2017/04   | Kierownik zad. 3 i 4                 |
| 4   | FET Young Explorer GRAPHENICS Graphene-enabled on-chip supercontinuum light sources                           | 950 000                  | European Commission        | 2014/-2017/06     | Opiekun naukowy projektu             |
| 5   | Silicon Carbide Device Technology for Energy Efficient handling of Resources with Greatly improved efficiency | 170 000                  | KONNECT Joint Call / NCBiR | 2016/06 – 2018/05 | Kierownik zadania w Polsce           |
| 6   | Hybrydne systemy grafenu-transjencyjnego tlenku metalu: synteza i zastosowanie jako anoda / katoda w OLEDach  | 1 300 000                | OPUS / NCN                 | 2017/04 – 2020/04 | Kierownik zadania                    |
|   | Contactless studies of quantum effects of electrons in graphene   | 480 000                  | OPUS / NCN                 | 2015/07 – 2017/06 | Kierownik zadania                    |
| 7   | GRAF-TECH GrafMet Epitaxial graphene growth on metal substrates   | 5 000 000                | NCBiR                      | 2012/12-2015/05   | Główny realizator / współkoordynator |

|    |  |            |  |                      |                    |
|----|--|------------|--|----------------------|--------------------|
| 8  | GRAF-TECH<br>Flowgraph Graphene based active flow sensors                          | 4 800 000  | NCBiR                                  | 2012/12-<br>2015/11  | Kierownik zadań    |
| 9  | GRAF-TECH<br>GraphMag Graphene magnetic field sensors for industrial application   | 4 000 000  | NCBiR                                  | 2013/06-<br>2016/05  | Kierownik zadań    |
| 10 | GRAF-TECH<br>OptiGraph   | 4 700 000  | NCBiR                                  | 2012/12-<br>2015/11  | Kierownik zadań    |
| 11 | GRAF-TECH<br>GraphTrib Graphene based coatings of special gear-wheels and bearings | 4 900 000  | NCBiR                                  | 2012/12-<br>2015/11  | Kierownik zadań    |
| 12 | GRAF-TECH<br>UltraGraph Ultra fast graphene based fibre-lasers                     | 4 100 000  | NCBiR                                  | 2012/12-<br>2015/12  | Kierownik zadań    |
| 13 | GRAF-TECH<br>GraphPrint Graphene inks and paste and printing method                | 5 100 000  | NCBiR                                  | 2013/05-<br>2016/04  | Kierownik zadań    |
| 14 | EuroGRAPHENE<br>Epitaxial Graphene Transistor (EPIGRAT)                            | 1 500 000  | ESF                                    | 2010/03-<br>2013/03  | Kierownik zadań    |
| 15 | SPUB Special research equipment  | 4 000 000  | Min. of Development                    | 2014/01 –<br>2018/01 | Kierownik projektu |
| 16 | Development of large format graphene growth on copper substrates                   | 1 300 000  | Nano Carbon                            | 2013/09 –<br>2015/12 | Kierownik projektu |
| 17 | Development of large scale graphene growth on 4" SiC substrates                    | 2 000 000  | Nano Carbon                            | 2015/01 –<br>2016/06 | Kierownik projektu |
| 18 | POiG SiCMAT<br>Technological implementation of the SiC epitaxial growth models     | 5 000 000  | NCBiR                                  | 2010/07-<br>2015/12  | Kierownik zadań    |
| 19 | Patent's grant<br>Method of graphene growth on SiC                                 | 500 000    | MNiSW                                  | 2010/01 –<br>2014/12 | Kierownik projektu |
| 20 | Graphene Center investment   | 36 000 000 | Marshal of the Mazowieckie Voivodeship | 2015/06 -<br>2016/10 | Kierownik projektu |
| 21 | Investment in graphene infrastructure  | 9 000 000  | MNiSW                                  | 2012/11 –<br>2013/10 | Kierownik projektu |

|    |  |           |                        |                      |                                   |
|----|--|-----------|------------------------|----------------------|-----------------------------------|
| 22 | POiG ZAMAT<br>Development of<br>nanomaterials on the<br>carbon base -<br>graphene                                  | 2 800 000 | NCBiR                  | 2010/01 -<br>2015/12 | Kierownik projektu                |
| 23 | POiG ZAMAT<br>Development of<br>materials technology<br>for white light  | 2 900 000 | NCBiR                  | 2010/01 -<br>2015/12 | Koordynator/ opiekun<br>naukowy   |
| 24 | POiG ZAMAT<br>Development of<br>fotovoltaic materials<br>technology  | 3 200 000 | NCBiR                  | 2010/01 -<br>2015/12 | Koordynator/ opiekun<br>naukowy   |
| 25 | PBS New wires<br>constructed on the<br>base of graphene-<br>metal composites for<br>electroenergetic<br>conductors | 4 600 000 | NCBiR                  | 2012/13-<br>2016/11  | Kierownik zadania                 |
| 26 | PBZ New<br>technologies on the<br>base of SiC and the<br>application for high<br>power electronics                 | 2 800 000 | MEiN                   | 2006/02 –<br>2009/02 | Kierownik zadania                 |
| 27 | PBZ Advanced<br>technology for<br>semiconductor<br>infrared<br>optoelectronics /<br>MOCVD technology               | 1 800 000 | MNiSW                  | 2007 -               | Kierownik zadania                 |
| 28 | Growth and<br>characterisation of<br>SiC on Si substrate   | 460 000   | NCBiR                  | 2007/03 –<br>2009/03 | Opiekun<br>naukowy/współwykonawca |
| 29 | SSF-HSEP High<br>Speed Electronics<br>and Photonics  | 190 000   | European<br>Commission | 2007/06 –<br>2009/06 | Kierownik projektu                |

### 2.3. Opieka naukowa nad studentami i doktorantami

Opieka nad studentami realizującymi prace inżynierskie i magisterskie w ramach porozumień z wydziałem Elektroniki PW, wydziałem Fizyki UW, wydziałem Inżynierii Materiałowej PW w latach 1994 – 2017.

Pomocniczy opiekun naukowy trzech prac doktorskich:

-dr I.Pasternak, obrona w 2016 r., Temat pracy: „Synthesis of graphene films on copper and germanium-based substrates”. Praca w języku angielskim.

-dr inż. Tymoteusz Ciuk, obrona w 2017 r., Temat pracy: „Study of the electrical properties of epitaxial graphene on silicon carbide for the development of the technology of a graphene-based magnetic field sensor”. Praca w języku angielskim.

-A.Krajewska, Temat pracy: „Modyfikacja struktur grafenowych do zastosowań w fotonice i elektronice”, przewód otwarty w 2017 r. w WAT

Opiekun nieformalny prac doktorskich pracowników Zakładu Epitaksji ITME, realizowanych w zakresie tematyki naukowo-badawczej kierowanego przeze mnie zakładu:

-dr inż. A.Jasik, przewód w Wydział Elektroniki PW

- dr inż. E.Dumiszewska, przewód w Wydział Inżynierii Materiałowej PW

-dr inż. D.Lenkiewicz, przewód w Wydział Inżynierii Materiałowej PW

-dr P.Caban, przewód w Wydział Elektroniki PW

-dr inż. K.Kościewicz, przewód w Wydział Inżynierii Materiałowej PW

-dr inż. D.Teklińska, przewód w Wydział Inżynierii Materiałowej PW

-J.Sobieski, Przewidywana tematyka pracy: „Wytwarzanie i charakterystyka dwuwymiarowego disiarczku molibdenu MoS<sub>2</sub>”, Wydział Fizyki PW

Opiekun zajęć studentów z Wydziału Fizyki UW (2014-2017)

Opiekun praktyk studenckich z uczelni krajowych i zagranicznych (ok.30 studentów krajowych, 7 studentów i doktorantów z zagranicy w latach 2007-2017)

#### **2.4. Staże w zagranicznych ośrodkach naukowych**

1991 - 1992 Chalmers Technical University, Goeteborg, Szwecja; staż podoktorski finansowany przez Organizację Narodów Zjednoczonych

#### **2.5. Recenzje i ekspertyzy**

- Recenzent projektów badawczych i rozwojowych NCBiR, NCN, MNiSW, Urząd Marszałka Mazowieckiego. Ekspert NCBiR.

- Recenzent czasopism naukowych: CARBON, IEEE, Chemistry Materials ACS, ACS Nano, 2D Materials, Applied Surface Science, Journal of Applied Physics, Journal of Crystal Growth, physica status solidi, Sensors, The Journal of Physical Chemistry Letters, Annalen der Physik

- Recenzent projektów badawczych French Agence Nationale de Recherche, Hungarian Research Agency, Linkoping University

- Recenzent kandydatów na stanowisko profesora w Chalmers Technical University, Szwecja

## 2.6. Inna działalność organizacyjna

- członek Towarzystwa Wzrostu Kryształów
- członek Towarzystwa Próżniowego (do 2014)
- członek komitetów naukowych i organizacyjnych kilkunastu konferencji krajowych i Międzynarodowych, m.in.  
Graphene Week 2016, Warsaw, Poland (chairman), Graphene Week 2015, Manchester, UK (scientific committee), Graphene Week 2015, Goteborg, Sweden (scientific committee), Workshop "Advances on Synthesis of Graphene", Fuerteventura, 2016 (scientific committee), GraphITA, Bologna, 2015 (scientific committee), EUROMAT, Warsaw, 2015 (scientific committee), GRAPHEsp2014, Lanzarote, 2014 (scientific committee), ELTE, Poland, 2013 (scientific committee), EPIGRAT Workshop, Poland, 2013 (chairman).
- przewodniczący wielu sesji konferencji międzynarodowych
- przewodniczący komitetu organizacyjnego konferencji międzynarodowej w Krakowie w 2014r. w ramach projektu EPIGRAT
- przewodniczący komitetu naukowego i organizacyjnego międzynarodowej konferencji Graphene Week 2016 w Warszawie (700 uczestników z 43 krajów)
- członek Rady Nadzorczej programu EU Graphene Flagship w latach 2013-2015
- inicjator i koordynator współpracy naukowo-badawczej z wieloma instytucjami naukowymi z kraju i zagranicy
- organizator profesjonalnych laboratoriów nanotechnologii związków półprzewodnikowych i materiałów dwuwymiarowych
- twórca koncepcji prototypowych urządzeń do wzrostu grafenu
- organizator budowy i kierownik Centrum Grafenu przy ITME ze środków Urzędu Marszałka Mazowieckiego
- wykłady na Wydziale Elektroniki PW w ramach studiów podyplomowych
- promocja badań w zakresie nanotechnologii materiałów dwuwymiarowych – wiele wywiadów w prasie, TV, internecie, m.in.:  
Dec.18, 2013, TVN24 W.Strupinski et al., <http://www.tvn24.pl/polska-i-swiat,33,m/polska-grafenowa-potega,380830.html>; Dec.18, 2013, TVP1 W.Strupinski et al., <http://wiadomosci.tvp.pl/13368103/potega-wegla>;  
Dec.18, ARP konf. prasowa (W.Strupinski), [http://www.arp.com.pl/o\\_agencji/Aktualnosci/Spolka\\_grupy\\_ARP\\_SA\\_w\\_grupie\\_liderow\\_produkcji\\_grafenu\\_w\\_Europie.aspx](http://www.arp.com.pl/o_agencji/Aktualnosci/Spolka_grupy_ARP_SA_w_grupie_liderow_produkcji_grafenu_w_Europie.aspx); strona www Premiera RP (W.Strupinski), <https://www.premier.gov.pl/wydarzenia/aktualnosci/premier-poczetek-produkcji-grafenu-w-polsce-to-historyczny-moment.html>; Jan. 14, TVN24, audycja nt grafenu (W.Strupinski et al), <http://www.tvn24.pl/czarno-na-bialym,42,m/polski-grafen-nowej-ery,387842.html>; Wlodek Strupinski, European Forum For New Ideas, Sopot 1-3 October 2014, Panellist; Wlodek Strupinski, TVP Warszawa, wywiad nt osiągnięć w technologii grafenu; Wlodek Strupinski, Polish Radio PR I, wywiad nt grafenu; CNN program "Made in Poland", Grudzień 2015

### 3. DZIAŁALNOŚĆ NAUKOWO-BADAWCZA

#### 3.1. Publikacje - podsumowanie

- Liczba cytowań: 2584
- h-index: 24
- liczba publikacji: >230 wg Web of Science
- liczba ustnych wystąpień konferencyjnych w latach 2007-2018: 14
- liczba wykładów zaproszonych w latach 2007-2018: 73
- liczba konferencyjnych prezentacji plakatowych w latach 2007-2018: >100  
w tym 6 jako pierwszy autor

#### 3.2. Nagrody i wyróżnienia

- 2017 - tytuł Honorowego Ambasadora Kongresów
- 2017 – nominacja do nagrody Architekt Rozwoju 2017 UN Global Compact Poland
- 2016 - Brązowy Laur Lidera Polskiej Gospodarki wg ranking Gazety Bankowej w kategorii Naukowiec Roku
- 2016 - Medal Polonia Technica przyznany w USA za promocję polskiej nauki za granicą
- 2014 - nagroda Polskiej Rady Biznesu im. Jana Weyhertha w kategorii Wizja i Innowacja
- 2013 - nagroda Ministra Gospodarki Prestiż Renoma Roku 2013 w kategorii Wynalazca
- 2012 - laureat Drugiej Nagrody Prezesa Rady Ministrów za Osiągnięcia Naukowo-Techniczne w dziedzinie grafenu

#### 3.3. Patenty i wdrożenia

- Patent no. 224343, “The method of transferring a graphene film”, 07 Dec. 2016
- Patent “Method of graphene manufacturing”,
  - Poland: PAT-213291 (2010)
  - Japan: JP 5662249 (2014)
  - USA: US 9,067,796 B2 (2015)
  - Korea: 10-1465452 (2015)
  - EP 2392547 B1) (2016)
  - China: ZL 201180027996.X (2016)
- Pat. application no. PCT/EP2015/070096 “Method of producing graphene” 2 Sept. 2015
- Pat. application no. EP16461554.4 “Graphene-Enhanced Secondary Ion Mass Spectroscopy Analysis” 24 August 2016
- Pat. application no. EP16461512.2 “Method for passivating graphene”, 21 March 2016
- Pat. application no.16168937.7-1375, “Production method of graphene foil with a pre-defined number of graphene layers”, 10 May 2016

-wdrożenia technologii wytwarzania struktur epitaksjalnych związków półprzewodnikowych na poziomie TRL 9 do zastosowań mikro- i opto-elektronicznych (kilkadziesiąt technologii)

-wdrożenie technologii wytwarzania grafenu na podłożach metalicznych oraz technologii wytwarzania grafenu na podłożach z węgla krzemu w spółce Nano Carbon

-wdrożenie technologii wytwarzania SiC na podłożach SiC w warunkach produkcji seryjnej w spółce Nano Carbon

### **3.4. Osiągnięcia naukowe nie stanowiące bezpośredniej podstawy postępowania habilitacyjnego**

**- po uzyskaniu stopnia doktora** (najważniejsze osiągnięcia w odniesieniu do niżej zamieszczonego wykazu publikacji i innych opracowań nie będących podstawą do ubiegania się o habilitację)

Po uzyskaniu stopnia doktora, przez całą dalszą karierę zawodową, tworzyłem podstawy do rozwoju epitaksji MOCVD i CVD w kraju i wytyczałem nowe kierunki w dziedzinie inżynierii materiałów półprzewodnikowych. Zbudowałem pierwsze w Polsce profesjonalne laboratorium epitaksji MOCVD, szkoliłem nowych pracowników w zakresie technologii i charakteryzacji, opracowałem wiele procesów technologicznych. Moje badania w znacznym stopniu przyczyniły się do tego, że Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych (ITME), w którym pracowałem 35 lat, stał się rozpoznawalną instytucją na całym świecie, jako ośrodek specjalizujący się w wytwarzaniu najbardziej zaawansowanych epitaksjalnych struktur półprzewodnikowych III-V.

Moje badawcze zainteresowania obejmują nanotechnologię i fizykę struktur epitaksjalnych dla tranzystorów MESFET, HEMT, diod mikrofalowych, diod Schottky, waraktorów, laserów Fabry-Perrot, laserów z pionową wnęką rezonansową, kwantowych laserów kaskadowych, fotodetektorów, falowodów, diod LED, kropek kwantowych, wzmacniaczy optycznych SOA, MMICs i innych. Jako pionier w Polsce technologii MOCVD (MOVPE) i CVD opracowałem wiele technologii wzrostu struktur epitaksjalnych związków III-V, później wykorzystywanych w świecie i w kraju w pracach badawczych oraz komercyjnie w przemyśle elektronicznym. Zapoczątkowałem w Polsce badania nad epitaksją arsenku galu, fosforu galu, azotku galu, fosforu indu, związków trój- i cztero-składnikowych oraz węgla krzemu, doprowadzając technologię epitaksji i charakteryzacji do najwyższego światowego poziomu.

W 1990 r. zmodernizowałem wcześniej skonstruowane przeze mnie urządzenie do epitaksji MOCVD i przeprowadziłem optymalizację procesu wytwarzania warstw epitaksjalnych GaAs dla zastosowań w tranzystorach polowych MESFET. W 1990-1991 r. w czasie podoktorskiego stażu naukowego ufundowanego przez ONZ w Chalmers Technical University, w Goeteborgu w Szwecji, zająłem się technologią wzrostu warstw epitaksjalnych GaAs metodą MBE oraz opracowałem metodę wyznaczania maksymalnej prędkości elektronów w tranzystorach GaAs, badając jednocześnie towarzyszący pomiarom efekt Gunna. Wyniki tych badań zostały przedstawione przeze mnie w artykule w czasopiśmie APL (nr 3.5/1,2,3 z poniższego spisu publikacji). Prace nad

wzrostem związków półprzewodnikowych GaAs i AlGaAs prowadziłem następnie w ITME oraz w Laboratorium Fizyki Wzrostu Kryształów UW, gdzie uruchamiałem urządzenie do epitaksji MOCVD firmy Epiquipe Szwecja, opracowałem technologie wzrostu i szkoliłem pracowników Uniwersytetu Warszawskiego. W 1992 r. zająłem się organizacją pierwszego w kraju profesjonalnego laboratorium epitaksji MOCVD (kierowanie wszystkimi pracami budowlanymi, instalacyjnymi, wykończeniowymi, itp.) oraz zakupem, instalacją i uruchomieniem pierwszego w kraju profesjonalnego urządzenia do epitaksji MOCVD produkcji Aixtron, Niemcy. W tym czasie prowadziłem intensywne badania nad wzrostem monokrystalicznych struktur związków półprzewodnikowych w systemie materiałowym: In, Ga, Al, As, P dla zastosowań w mikro- i optoelektronice. Opracowałem technologię wzrostu dwu-barierowych wielostudni kwantowych GaAs-AlGaAs dla diod laserowych o dużej zbieżności wiązki promieniowania (publ. 3.5/6). Zbadałem i opracowałem nowatorski sposób krystalizacji arsenku galu w postaci mikro-piramid na zasadzie selektywnego wzrostu na częściowo maskowanym podłożu (publ. 3.5/14). Kolejnym osiągnięciem było uzyskanie efektu dwuwymiarowego gazu elektronowego w opracowanych przeze mnie strukturach epitaksjalnych, co przedstawiłem w publikacji nr 3.5/26. W ramach ww. działalności opracowywałem także warunki krystalizacji struktur epitaksjalnych oraz metodyki charakterystyczne dla potrzeb badawczych z dziedziny fizyki półprzewodników i elektroniki, co zostało opublikowane w renomowanych czasopismach naukowych.

W 1993 r. rozpocząłem prace badawcze nad wzrostem związków półprzewodnikowych zawierających także ind i fosfor, również jako pierwszy w Polsce. W ramach współpracy badawczej z laboratorium firmy Alcatel SEL, Niemcy dokonałem samodzielnie opracowania, jako pierwszy w Europie, technologii wzrostu warstw na bazie GaAs i InP z wykorzystaniem alternatywnych nietoksycznych źródeł arsenu i fosforu (TBAs i TBP). Technologia została zaimplementowana w Alcatel. Na zamówienie firmy Epi-Chem UK prowadziłem autorskie badania nad wpływem zanieczyszczeń źródeł fosforu (TBP) oraz indu (TMIn) na jakość elektroniczną warstw epitaksjalnych. Dla firmy InPact, Francja, producenta płytek podłożowych InP, opracowałem oryginalny sposób oceny czystości powierzchni płytek półizolacyjnych stosowanych w produkcji tranzystorów typu HEMT, polegający na krystalizacji specjalnej warstwy buforowej i jej charakteryzacji za pomocą spektroskopii masowej jonów wtórnych. Metodę Halla zastosowałem do pomiaru kanału z samoistnym elektronowym gazem dwu-wymiarowym. Opracowałem mechanizmy krystalizacji warstw epitaksjalnych zbudowanych z elementów grupy III i V układu okresowego, tj. Ga, In, Al, P, As o liczbie trzech, czterech i pięciu składników. Zorganizowałem pełną metodologię charakteryzacji hodowanych warstw i struktur w oparciu o mikroskopię optyczną i elektronową, dyfrakcję rtg, fotoluminescencję, metodę Halla i metodę napięciowo-pojemnościową (C-V) z sondą trawiącą. Z opracowanych i wytwarzanych struktur powstało wiele nowatorskich przyrządów elektronowych, m.in.: pseudomorficzne tranzystory z dwu-wymiarowym gazem elektronowym, gdzie należało pokonać barierę niedopasowania sieci krystalicznych i generacji defektów (publ. 3.5/17); waraktory barierowe wymagające zbadania mechanizmu dyfuzji domieszki cynkowej w InP oraz defektów w obszarze interfejsu warstwy podkontaktowej (publ. 3.5/18); generatory i wzmacniacze fal submilimetrowych (publ. 3.5/23) i wiele innych. Istotna dziedzina moich badań obejmowała zagadnienia krystalizacji cienkich warstw wieloskładnikowych związków półprzewodnikowych w formie nano-struktur, kropek kwantowych, warstw naprężonych, pseudomorficznych, metamorficznych, supersieci, studni kwantowych, zwierciadeł Bragga, itp.



Wyniki zostały przedstawione w publikacjach, w których mój udział jako pierwszego autora lub współautora obejmował badania krystalizacji, charakteryzacji, fizyki półprzewodników i zrozumienia korelacji inżynierii materiałów z funkcjonalnością przyrządu elektronowego (publ. 3.5/21,22,26,27,29,30,32,33).

W 2002 r. rozszerzyłem zakres moich prac nad epitaksją o związki typu III-N (azotek galu, azotek glinu, azotek indowo-galowy i glinowo-galowy), instalując nowe urządzenie do epitaksji firmy Aixtron dla związków typu Ga, In, Al - N. Jako pierwszy w Polsce opracowałem technologię MOCVD krystalizacji struktur dla diod świecących „niebieskich”, tranzystorów mocy HEMT oraz fotodetektorów dla zakresu ultrafioletu. Również jako pierwszy w kraju zbadałem i opracowałem warunki wzrostu struktur tranzystorowych na 1-calowych podłożach A-GaN wyprodukowanych przez firmę Ammono metodą amonothermalną. Przeprowadziłem systematyczne badania nad homoepitaksją GaN na tych podłożach pod względem generowanych defektów strukturalnych i ich korelacji z parametrami elektrycznymi. Zajmowałem się badaniami nad domieszkowaniem intencjonalnym warstw GaN domieszkami donorowymi i akceptorowymi oraz warunkami ich elektrycznej aktywacji. W przypadku struktur InGaN osiągnąłem rekordowe rezultaty dotyczące długości fali emisji (barwa zielona). Opracowałem sposób wzrostu warstw AlN z intencjonalną generacją defektów aktywnych elektrycznie kompensujących nośniki ładunku elektrycznego, w wyniku czego można było otrzymywać AlN wysokooporowy jako podłoże dla struktur tranzystorowych przy jednoczesnym zapobieganiu zjawisku relaksacji (publ. 3.5/24,28,31,34,35,36,37,38,41).

Ostatnią grupą nowych związków III-V, nad którymi rozpocząłem prace w 2006 r., były związki zawierające antymon. Ze względu na zastosowania elektroniczne w charakterze fotodetektorów i laserów w zakresie fal o długości powyżej 2 mikrometrów, materiały te uważane są za bardzo atrakcyjne. Celem prac było zbadanie i opracowanie warunków wzrostu struktur z antymonem metodą MOCVD. Zwykle wykorzystuje się tu technikę wzrostu MBE. Zastosowane przez mnie podejście było nowatorskie zarówno w skali krajowej, jak i światowej. Przeprowadzone badania zakończyły się szeregiem opracowań technologii cząstkowych wzrostu warstw związków z Sb o różnym składzie chemicznym oraz dostarczyły wielu obserwacji i wniosków dotyczących zagadnień z zakresu krystalizacji, termodynamiki reakcji, powierzchniowych procesów kinetycznych, itp. prezentowanych przeze mnie jako współautora w artykułach 3.5/58,64,68.

### 3.5. Spis publikacji

1. **W.Strupiński**, H.Zirath, H.Gronqvista, N.Rorsman, "New method for determination of the peak-velocity in epitaxial semiconductor structures by dc measurements on microbridges", Applied Physics Letters vol.59, nr 24, 1991. [Wkład habilitanta: Samodzielnie opisałem wyniki prowadzonych przeze mnie badań. Mój udział procentowy oceniam na 90%.]
2. **W.Strupiński**, „Optymalizacja koncentracji domieszki w warstwach GaAs otrzymywanych metodami MOVPE i HVPE”, Materiały Elektroniczne, nr 1, 1993, T.21. [Wkład habilitanta: Samodzielnie opisałem wyniki prowadzonych przeze mnie badań. Mój udział procentowy oceniam na 100%.]
3. **W.Strupiński**, M.Czub, A.Wagner "Zaawansowane techniki cienkowarstwowe" Materiały Elektroniczne Nr2, 1995 T23. [Wkład habilitanta: Samodzielnie opisałem wyniki prowadzonych przeze mnie badań. Mój udział procentowy oceniam na 90%.]
4. M. Czub, **W. Strupiński**, MOCVD Growth of InP-related Materials Using TBA and TBP. Acta Physica Polonica A vol.88 no.4 (1995) [Wkład habilitanta: Samodzielnie jako drugi autor opisałem wyniki prowadzonych przeze mnie badań. Mój udział procentowy oceniam na 80%.]
5. **W.Strupiński**, M.Czub, M.Wojcik, J.Gaca, B.Surma, "MOCVD technology of thin III-V compounds heterostructures", Electron Technology vol.29, no.2/3 1996, pp. 162-166. [Wkład habilitanta: byłem pomysłodawcą koncepcji pracy, opracowałem technologię oraz przeprowadziłem dyskusję wyników na podstawie przeprowadzonych przez współautorów pomiarów i ich interpretacji. Jestem autorem manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 70%.]
6. A.Maląg, **W.Strupiński**, "Low Beam Divergence Laser Diode Based on MOCVD Grown (ALGa)As Double-Barrier Multiquantum Well (DBMQW) Heterostructure", Electron Technology vol.29, no.2/3 1996, pp.176-181. [Wkład habilitanta: byłem współautorem koncepcji pracy, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 50%.]
7. J.Sass, J.Gaca, M.Wójcik, **W.Strupiński** "The Measurement of the Indium Concentration and Coherency Strain in the InGaAs/InP Superlattice by Means of HR XRD", Electron Technology vol.29, no.2/3 1996. [Wkład habilitanta: byłem współautorem koncepcji pracy, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 35%.]
8. W.Wierzchowski, K.Mazur, **W.Strupiński**, K.Wieteska, W.Graeff "Investigation of Misfit Dislocation Sources in GaAs Epitaxial Layers", Acta Physica Polonica A, vol 89, No3 (1996). [Wkład habilitanta: byłem współautorem koncepcji pracy, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 30%.]
9. J.Kaczanowski, A.Wagner, A.Stonert, **W.Strupiński**, A.Turos "RBS Study on YBa CuO Layers Product by the MOVPE Method". Electron Technology 29 2/3 pp 226-228 (1996). [Wkład habilitanta: byłem współautorem koncepcji pracy, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 30%.]
10. L.Dobrzański, **W. Strupiński**, K.Przyborowska, T.Łukasiewicz, A.Jagoda, K.Góra "Performance of the HEMT Device Obtained Using MOCVD" Electron Technology 29 2/3 pp.174-175 (1996).[ Wkład habilitanta: byłem współautorem koncepcji pracy, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 45%.]
11. Maląg A. **W.Strupiński** "MOVPE-grown (ALGa)As double -barrier multiquantum well(DBMQW) laser diode with low vertical beam divergence", J.Crystal Growth 1997vol. 170 nr1-4 s.408-412 [Wkład habilitanta: byłem współautorem koncepcji pracy, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 50%.]
12. A.Maląg, **W.Strupiński**, D.Kryńska, A.Litkowiec, L.Ilka, I.Wójcik, K.Babska, J.Ratajczyk, M.Wesołowski, E.Dobosz, Z.Szopniewski, M.Bugajski "Electrooptical characteristics of MOVPE grown (AlGa)As double Barrier multiquantum well (DBMQW) laser diodes of low beam divergence" Electron Technology 1997 , vol.30nr4 s.341-348. [Wkład habilitanta: Opracowałem technologię, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 25%.]
13. A.Jasik, K.Kosiel, **W.Strupiński** "Charakteryzacja porównawcza podstawowych materiałów AIII BV dla potrzeb epitaksji" Materiały Elektroniczne ITME. 1997vol.30, nr 4 4-22 il. bibliogr. [Wkład habilitanta: Byłem pomysłodawcą i koordynatorem kierunku badań, uczestniczyłem w dyskusji wyników i weryfikacji ostatecznej formy manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 35%.]
14. **W.Strupiński**, A. Maląg, J. Ratajczak "Selective Area MOVPE Growth of Prism-Shaped GaAs Resonators for Folded cavity Surface Emitting Lasers" J.Crystal Growth 195 (1998) 474-478. [Wkład habilitanta: Opracowałem technologię, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 45%.]
15. A.Turos, W. Wierzchowski, K.Wieteska, E.Wendler, W.Wesch, W.Graeff, R.Grötzschel, **W.Strupiński** " Ion bombardment induced relaxation of strained AlGaAs/GaAs heterostructures studied by the complementary use

- of RBS-channeling and H -ray synchrotron radiation” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 136 -138 (1998) 1062- 1067 [Wkład habilitanta: Opracowałem technologię, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 25%.]
16. A.Jasik, **W.Strupiński**, K.Kosiel „Wytwarzanie heterostruktur InP/InGaAs metodą epitaksji z fazy gazowej z udziałem metaloorganiki (MOCVD)”, Materiały Elektroniczne 1998 nr 3-4. [Wkład habilitanta: Byłem pomysłodawcą i koordynatorem kierunku badań, uczestniczyłem w dyskusji wyników i weryfikacji ostatecznej formy manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 45%.]
  17. M.Nawaz, H.Zirath, E.Choumas, S.H.M.Persson, A.Jasik, **W.Strupiński**, „Hot electron degradation effects in 0.14 mm AlInAs/GaInAs/InP HEMTs”, Microelectronic Reliability 39 (1999) 1765-1771. [Wkład habilitanta: byłem współautorem koncepcji pracy, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 30%.]
  18. L.Dillner, **W.Strupinski**, S.Hollung, C.Mann, J.Stake, M.Beardsley, and E.Kollberg, High efficiency HBV multipliers for millimeter wave generation, IEEE Electron Device Letters Vol.21, No.5, 2000. [Wkład habilitanta: byłem współautorem koncepcji pracy, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 30%.]
  19. G.Tomaka, J.Cebulski, E.M.Sheregii, W.Sciuk, **W.Strupiński**, L.Dobrzański, „Magnetophonon resonance as method of controlling of the thermal stress in the multiple quantum wells”, Materials Science and Engineering A288 (2000) 138-141. [Wkład habilitanta: byłem współautorem koncepcji pracy, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 20%.]
  20. Nawaz, M; **Strupinski, W**; Stenarson, J; Persson, Zirath, H, MOCVD grown AlInAs/GaInAs/InP HEMTs with InP etch-stop layer, MIKON-2000, VOLS 1 & 2, PROCEEDINGS [Wkład habilitanta: byłem współautorem koncepcji pracy, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 40%.]
  21. **Strupinski, W**; Kosiel, K; Jasik, A; Jakiela, R; Jelenski, A; Kollberg, E; Dillner, L, MOVPE InP based material for millimeter and submillimeter wave generation and amplification, MIKON-2000, VOLS 1 & 2, PROCEEDINGS [Wkład habilitanta: byłem pomysłodawcą koncepcji pracy, opracowałem technologię oraz nadzorowałem pomiary, przeprowadziłem dyskusję wyników. Jestem autorem manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 75%.]
  22. **Strupiński Włodzimierz**, Dillner L., Sass Jerzy, Kosiel Kamil, Stake J., Ingvarson M., Jakiela Rafał, *MOVPE strained layers - growth and application.* , J.Cryst.Growth 2000 vol. 221 nr 1-4 s.20-25 [Wkład habilitanta: byłem pomysłodawcą koncepcji pracy, opracowałem technologię oraz nadzorowałem pomiary, przeprowadziłem dyskusję wyników. Jestem autorem manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 75%.]
  23. **Strupiński Włodzimierz**, Kosiel Kamil, Jasik Agata, Jakiela Rafał, Jeleński Andrzej, Kollberg E., Dillner L., Nawaz M., *MOVPE InP based material for millimeter and submillimeter wave generation and amplification.* J.Telecomm.Infor.Technol. 2002 nr 1 s.8-10 [Wkład habilitanta: byłem pomysłodawcą koncepcji pracy, opracowałem technologię oraz nadzorowałem pomiary, przeprowadziłem dyskusję wyników. Jestem autorem manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 75%.]
  24. R.Jakiela, A.Jasik, **W.Strupiński**, K.Góra, K.Kosiel, M.Wesołowski, „Influence of thermal annealing on hydrogen concentration in GaN layers – SIMS characterization”, Optica Applicata, vol.XXXII, No.3, 365-371, 2002. [Wkład habilitanta: Opracowałem technologię, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 25%.]
  25. A.Jasik, K.Kosiel, **W.Strupiński**, M.Wesołowski, „Influence of covering on critical thickness of strained  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  layer”, Thin solid films, 2002, vol 412/1-2, p. 50-54. [Wkład habilitanta: Byłem pomysłodawcą i koordynatorem kierunku badań, uczestniczyłem w dyskusji wyników i weryfikacji ostatecznej formy manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 35%.]
  26. G.Tomaka, E.M.Sheregii ,T.Kąkol, **W.Strupiński**, A.Jasik, R.Jakiela, „The Charge Carriers Parameters in the Conductive Channels of HEMT”, Physica Status Solidi (A), vol.195, nr1, 2003, p.127-132. [Wkład habilitanta: Opracowałem technologię, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 15%.]
  27. G. Tomaka, E. M. Sheregii, T. Kakol, **W. Strupiński**, R. Jakiela, A. Kolek, A. Stadler, K. Mleczko, “Magnetotransport in single InGaAs quantum wells of different shapes”, Cryst. Res. Technol. 38, 407 (2003) [Wkład habilitanta: Opracowałem technologię, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 15%.]
  28. Kudrawiec R, Syperek M, Misiewicz J, Paszkiewicz R, Paszkiewicz B, Tlaczala M, Strupinski W, *Optical investigations of two dimensional electron gas in the AlGaIn heterostructure*, Physica Status Solidi C, vol. 1,

- no.2, 2003, p.378. [Wkład habilitanta: Opracowałem technologię, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 25%.]
29. Zynek Jadwiga, Jasik Agata, **Strupiński Włodzimierz**, Rutkowski J., Jagoda Andrzej, Przyborowska Krystyna, Jakiela Rafał , Piersa Mirosław , Wnuk Artur, *Photodiode with resonant cavity based on InGaAs/InP for 1.9 micrometer band*. Opto-Electron.Rev. 2004 vol. 12 nr 1 s.149-155 [Wkład habilitanta: Opracowałem technologię, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 20%.]
  30. J.Zynek, A.Jasik, **W.Strupiński**, J.Rutkowski, A.Jagoda, K.Przyborowska, R.Jakiela, M.Piersa, A.Wnuk, "Photodiode with resonant cavity base on InGaAs/InP for 1,9 $\mu$ m band", Opto-Electronics Review, 12(1), 149-155, 2004. 155 [Wkład habilitanta: Opracowałem technologię, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 20%.]
  31. A.Szyska, B.Paszkiwicz, R.Paszkiwicz, M.Tłaczała, E.Dumiszewska, **W.Strupiński**, M.Teodorczyk, „Zastosowanie warstw azotków do konstrukcji filtrów z powierzchniową falą akustyczną”, Elektronika 2004 nr 10 s.8-9 [155 [Wkład habilitanta: Opracowałem technologię, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 10%.]
  32. J.Sass, K.Mazur, F.Eichhorn, **W.Strupiński**, A.Turos, A.Soltan, N.Schell, „Determination of In concentration in InGaAs/GaAs 001 epilayers in the early stage anisotropic stress relaxation”, Journal of Alloys and Compounds 401 (2005) 249-253. 155 [Wkład habilitanta: Opracowałem technologię, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 20%.]
  33. Hongbo Yu, **W.Strupinski**, Serkan Butun, Ekmel Ozbay, *Mg-doped AlGaN grown on an AlN/sapphire template by MOCVD.*, phys. stat. sol. (a) 203, No. 5, 868–873 (2006) [Wkład habilitanta: byłem współautorem koncepcji pracy, , brałem udział w opracowaniu technologii i dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 30%.]
  34. B.Paszkiwicz, R.Paszkiwicz, A.Szyska, M.Tłaczała, **W.Strupiński**, *Study of the activation process of Mg dopant in GaN:Mg layers*, phys.stat.sol.(C), No.3, 579-584 (2006) [Wkład habilitanta: Opracowałem technologię, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 20%.]
  35. Hong Bo Yu, **Włodek Strupinski**, Serkan Butun, and Ekmel Ozbay, *High performance P-type Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N (x = 0.35) grown on AlN template*, phys.stat.sol. (a), 1-6 (2006) ) [Wkład habilitanta: byłem współautorem koncepcji pracy, , brałem udział w opracowaniu technologii i dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 30%.]
  36. Dobrzański L., Góra K., Jagoda A., Przyborowska K., Kozłowski A., Stańczyk B., **Strupiński W.**, Lenkiewicz D., Wnuk A., Detektory ultrafioletu z azotku galu. Elektronika 3/2006, ss.8-11. [Wkład habilitanta: Byłem pomysłodawcą i koordynatorem kierunku badań, uczestniczyłem w dyskusji wyników i weryfikacji ostatecznej formy manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 35%.]
  37. Lech Dobrzański, **Włodzimerz Strupinski**, *On charge transport and low-frequency noise in the GaN p-i-n diode*, Journal of Quantum Electronics, vol.43, issue 2 (2007) 188-195 [Wkład habilitanta: byłem współautorem koncepcji pracy, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 40%.]
  38. Dariusz Lenkiewicz, **Włodzimerz Strupiński** i in., *Wpływ zastosowania wysokotemperaturowej warstwy zarodkowej AlN na właściwości GaN osadzanego na podłożach szafirowych*, Materiały Elektroniczne Nr 3/4, 2007 T.35. [Wkład habilitanta: Byłem pomysłodawcą i koordynatorem kierunku badań, uczestniczyłem w dyskusji wyników i weryfikacji ostatecznej formy manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 45%.]
  39. Marek Wesołowski, **Włodzimerz Strupiński**, Jadwiga Zynek, Piotr Caban i in., *Zastosowanie oprogramowania wspomagającego kontrolowanie procesu epitaksji związków półprzewodnikowych w technologii MOCVD*, Materiały Elektroniczne Nr 3/4, 2007 T.35. [Wkład habilitanta: byłem współautorem koncepcji pracy, wykonałem potrzebny materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 35%.]
  40. **Włodzimerz Strupiński**, Marek Wesołowski, Ewa Dumiszewska, Dariusz Lenkiewicz, *Technologia epitaksji materiałów elektronicznych dla niebieskiej optoelektroniki*, NIEBIESKA OPTOELEKTRONIKA lasery, detektory, sensory, Praca zbiorowa pod redakcją M.Leszczynskiego i Z.Mierczyka, Ministerstwo Gospodarki Warszawa 2007. [Wkład habilitanta: Byłem pomysłodawcą i koordynatorem kierunku badań, samodzielnie opisałem wyniki. Mój udział procentowy oceniam na 85%.]
  41. **Włodzimerz Strupiński**, Kinga Kościewicz, Marek Wesołowski, *Epitaksja węgla krzemu metodą CVD*, Elektronika nr 7-8/2008 s.36-42. [Wkład habilitanta: Uruchamiałem reaktor do epitaksji SiC, jestem autorem

- technologii i przeprowadzonych badań, metodyki pomiarów, koncepcji pracy oraz napisałem publikację, przeprowadzając dyskusję wyników. Mój udział procentowy oceniam na 85%.]
42. Piotr Caban, Kinga Kościewicz, **Włodek Strupiński**, Marek Wójcik, Jarosław Gaca, Mustafa Ozturk, Ekmel Ozbay *The influence of substrate preparation on LPMOVPE GaN epitaxy on differently oriented 4H-SiC substrates*, Journal of Crystal Growth 310 (2008) 4876-4879. [Wkład habilitanta: Byłem pomysłodawcą i koordynatorem kierunku badań, uczestniczyłem w dyskusji wyników i weryfikacji ostatecznej formy manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 20%.]
  43. J.Borysiuk, A.Wysmołek, R.Bożek, **W.Strupiński** and J.M.Baranowski. *Transmission Electron Microscopy and Luminescence Studies of Quantum Well Structures Resulting from Stacking Faults Formation in 4H-SiC Layers*, Vol. 114 (2008) Acta Physica Polonica C No.5 [Wkład habilitanta: Opracowałem technologię, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 25%.]
  44. Aneta Drabinska, Jacek M. Baranowski, Krzysztof Pakula, Piotr Caban and **Włodzimierz Strupinski**, *Electroreflectance spectroscopy on III-N quantum wells*, Phys. Status Solidi A 206, No. 5, 816–820 (2009) [Wkład habilitanta: Opracowałem technologię, współwykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 20%.]
  45. A. Jasik, A. Wnuk, A. Wojcik-Jedlinska, R. Jakiela, J. Muszalski, **W. Strupinski**, M.Bugajski, *The influence of the growth temperature and interruption time on the crystal quality of InGaAs/GaAs QW structures grown by MBE and MOCVD methods*, Journal of Crystal Growth 310 (2008) 2785–2792 [Wkład habilitanta: Byłem pomysłodawcą i koordynatorem kierunku części badań dotyczących MOCVD, uczestniczyłem w dyskusji wyników i weryfikacji ostatecznej formy manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 20%.]
  46. M. Marchewka, E.M. Sheregii, I. Tralle, D. Ploch, G. Tomaka, M. Furdak, A. Kolek, A. Stadler, K. Mleczo, D. Zak, **W. Strupinski**, A. Jasik, R. Jakiela, *Magneto spectroscopy of symmetric and anti-symmetric states in double quantum Wells* Physica E 40 (2008) 894–906 [Wkład habilitanta: Opracowałem technologię, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 15%.]
  47. K.P. Korona, A. Drabinska, K. Surowiecka, L. Wolowiec, J. Borysiuk, P. Caban, **W.Strupinski**, *InGaN QW in External Electric Field Controlled by Pumping of 2D-Electron Gas*, Vol. 114 (2008) ACTA PHYSICA POLONICA A No. 5 [Wkład habilitanta: Opracowałem technologię, nadzorowałem wykonanie materiału badawczego, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 15%.]
  48. PiotrCaban, KingaKosciewicz, **WłodekStrupinski**, MarekWojcik, JaroslawGaca, Jan Szmidt, MustafaOzturk, EkmelOzbay *The influence of substrate surface preparation on LP MOVPE GaN epitaxy on differently oriented 4H-SiC substrates* Journal of Crystal Growth 310 (2008) 4876–4879 [Wkład habilitanta: Byłem pomysłodawcą i koordynatorem kierunku badań, uczestniczyłem w dyskusji wyników i weryfikacji ostatecznej formy manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 15%.]
  49. P.Caban, K.Kościewicz, **W.Strupiński**, K.Pągowska, R.Ratajczak, M.Wójcik, J.Gaca, A.Turos, J.Szmidt, “Wpływ trawienia podłoża 4H-SiC na epitaksję GaN”, Materiały Elektroniczne Nr 4 2008 T.36 [Wkład habilitanta: Byłem pomysłodawcą i koordynatorem kierunku badań, uczestniczyłem w dyskusji wyników i weryfikacji ostatecznej formy manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 15%.]
  50. **W.Strupinski**, R.Bozek, J.Borysiuk, K.Kościewicz, A.Wysmołek, R.Stepniewski and J.M.Baranowski, *Growth of Graphene Layers on Silicon Carbide*, Materials Science Forum Vols.615-617 (2009) pp.199-202 [Wkład habilitanta: byłem pomysłodawcą koncepcji pracy, opracowałem technologię oraz przeprowadziłem dyskusję wyników na podstawie przeprowadzonych przez współautorów pomiarów i ich interpretacji. Jestem autorem manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 70%.]
  51. J. Borysiuk, **W. Strupiński**, R. Bożek, A. Wysmołek and J. M. Baranowski *TEM Investigations of Graphene on 4H-SiC(0001)* Materials Science Forum Vols. 615-617 (2009) pp 207-210 [Wkład habilitanta: Byłem pomysłodawcą i koordynatorem kierunku badań, uczestniczyłem w dyskusji wyników i weryfikacji ostatecznej formy manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 45%.]
  52. J. Borysiuk, R. Bożek, **W. Strupiński**, A. Wysmołek, K. Grodecki, R. Stepniewski and J. M. Baranowski *Transmission electron microscopy and scanning tunneling microscopy investigations of graphene on 4H-SiC(0001)* JOURNAL OF APPLIED PHYSICS **105**, 023503 \_2009 [Wkład habilitanta: byłem współautorem koncepcji pracy, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 30%.]
  53. Kinga Kosciewicz, **Włodek Strupinski**, Andrzej Olszyna *Comparison Between Polishing Etching of On and Off-axis C and Sifaces of 4H-SiC Wafers* Materials Science Forum Vols. 615-617 (2009) pp 597-600 [Wkład habilitanta: byłem pomysłodawcą koncepcji pracy, nadzorowałem technologię oraz pomiary, Kierowałem dyskusją wyników i pomagałem napisać manuskrypt. Mój udział procentowy oceniam na 50%.]

54. J. Borysiuk, R. Bożek, **W. Strupiński** and J. M. Baranowski *Graphene Growth on C and Si-face of 4H-SiC – TEM and AFM Studies* Materials Science Forum Vols. 645-648 (2010) pp 577-580 [Wkład habilitanta: Byłem pomysłodawcą i koordynatorem kierunku badań, uczestniczyłem w dyskusji wyników i weryfikacji ostatecznej formy manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 30%.]
55. **Włodek Strupinski**, Kinga Kościewicz, Jan Weyher, Andrzej Olszyna, *Effect of Substrates Thermal Etching on CVD Growth of Epitaxial Silicon Carbide Layers*, Materials Science Forum Vols.600-603 (2009) pp.155-158 [Wkład habilitanta: byłem pomysłodawcą koncepcji pracy, opracowałem technologię oraz nadzorowałem pomiary, przeprowadziłem dyskusję wyników. Jestem autorem manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 75%.]
56. Piotr Caban, Kinga Kosciwicz, **Włodek Strupinski**, Jan Szmidt, Karolina Pagowska, Renata Ratajczak, Marek Wojcik, Jaroslaw Gaca, Andrzej Turos *Structural Characterization of GaN Epitaxial Layers grown on 4H-SiC Substrates with Different Off-cut* Materials Science Forum Vols. 615-617 (2009) pp 939-942 [Wkład habilitanta: Byłem pomysłodawcą i koordynatorem kierunku badań, uczestniczyłem w dyskusji wyników i weryfikacji ostatecznej formy manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 15%.]
57. M.Wesołowski, **W.Strupiński**, "Technologia MOCVD materiałów zawierających antymon na podłożach GaSb dla zastosowań w optoelektronice", Elektronika nr 5/2009, 49-52. [Wkład habilitanta: Byłem pomysłodawcą i koordynatorem kierunku badań, uczestniczyłem w dyskusji wyników i weryfikacji ostatecznej formy manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 50%.]
58. K. Grodecki, A. Drabińska, R. Bożek, A. Wyszmołek, K.P. Korona, **W. Strupiński**, J. Borysiuk, R. Stępniewski, J.M. Baranowski, *Optical absorption and Raman scattering studies of few-layer epitaxial graphene grown on 4H-SiC substrates*, Acta Physica Polonica A volume 116, no.5, p.835, 2009 [Wkład habilitanta: Opracowałem technologię, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 25%.]
59. Kosciwicz, K.; Bozek, R.; **Strupinski, W.**; Olszyna, A., *Microscopic Investigation of SiC Epitaxial Layers on On-Axis 4H-SiC Substrates Using Kelvin Probe Force Microscopy*, ACTA PHYSICA POLONICA A 116 69-71 [Wkład habilitanta: Byłem pomysłodawcą i koordynatorem kierunku badań, uczestniczyłem w dyskusji wyników i weryfikacji ostatecznej formy manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 35%.]
60. K. P. Korona, A. Drabińska, P. Caban and **W. Strupiński**, *Tunable GaN/AlGaIn ultrafiolet detectors with built-in electric field*, Journal of Applied Physics **105**, 083712 (2009) [Wkład habilitanta: Opracowałem technologię, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 15%.]
61. A. Jasik, A. Wnuk, J. Gaca, M. Wójcik, A. Wójcik-Jedlińska, J. Muszalski, **W. Strupiński**, *The influence of the growth rate and V/III ratio on the crystal quality of InGaAs/GaAs QW structures grown by MBE and MOCVD methods*, Journal of Crystal Growth 311 (2009) 4423–4432 [Wkład habilitanta: Byłem pomysłodawcą i koordynatorem kierunku części badań dotyczących MOCVD, uczestniczyłem w dyskusji wyników i weryfikacji ostatecznej formy manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 20%.]
62. R. Kucharski, M. Rudziński, M. Zając, R. Doradziński, J. Garczyński, L. Sierzputowski, R.Kudrawiec, J. Serafińczuk, **W. Strupiński**, and R. Dwiliński, *Nonpolar GaN substrates grown by ammonothermal method*, APPLIED PHYSICS LETTERS **95**, 131119 \_2009. [Wkład habilitanta: konsultacje naukowe, dyskusja wyników. Mój udział procentowy oceniam na 10%.]
63. M.Wesołowski, **W.Strupiński**, *Structural and Optical Properties of Antimony-Containing Epitaxial Layers Grown on GaSb by MOCVD*, ACTA PHYSICA POLONICA A 116 62-64 [Wkład habilitanta: byłem współautorem koncepcji pracy, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 50%.]
64. K.Mazur, W.Wierzchowski, K.Wieteska, W.Hofman, H.Sakowska, K.Kościewicz, **W.Strupiński**, W.Graeff, *X-ray reflectometry investigations of surface roughness of SiC substrate wafers and its influence on the structural perfection of the deposited SiC epitaxial layers*, Acta Physica Polonica A vol.117 (2010) pp.257-261 [Wkład habilitanta: Wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusjach nad rezultatami w odniesieniu do technologii wzrostu grafenu. Mój udział procentowy oceniam na 15%.]
65. Kinga Kosciwicz, **Włodek Strupinski**, Wojciech Wierzchowski, Krzysztof Wieteska and Andrzej Olszyna, *Polytypism Study in SiC Epilayers Using Electron Backscatter Diffraction*, Materials Science Forum Vols. 645-648 (2010) pp 251-254 [Wkład habilitanta: Byłem pomysłodawcą i koordynatorem kierunku badań, uczestniczyłem w dyskusji wyników i weryfikacji ostatecznej formy manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 35%.]
66. P. Caban, **W.Strupiński**, J. Szmidt, *Heterostrukury AlGaIn/AlN/GaN na podłożach 4H-SiC uzyskane metodą LP MOVPE do zastosowań w technologii tranzystorów HEMT* Elektronika nr3/2010 [Wkład habilitanta:

- Byłem pomysłodawcą i koordynatorem kierunku badań, uczestniczyłem w dyskusji wyników i weryfikacji ostatecznej formy manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 15%.]
67. M. Wesolowski, **W. Strupiński**, *Epitaksja warstw GaSb, InGaSb oraz InGaAsSb na podłożach GaSb metodą MOCVD*, Elektronika - Konstrukcje, Technologie, Zastosowania, 2010-1. [Wkład habilitanta: byłem współautorem koncepcji pracy, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 50%.]
  68. **W. Strupinski**, A. Drabinska, R. Bozek, J. Borysiuk, A. Wymolek, R. Stepniewski, K. Kosciwicz, P. Caban, K. Korona, K. Grodecki, Pierre-Antoine Geslin and J. M. Baranowski, *Growth Rate and Thickness Uniformity of Epitaxial Graphene*, Materials Science Forum Vols. 645-648 (2010) pp 569-572 [Wkład habilitanta: byłem pomysłodawcą koncepcji pracy, opracowałem technologię oraz przeprowadziłem dyskusję wyników na podstawie przeprowadzonych przez współautorów pomiarów i ich interpretacji. Jestem autorem manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 75%.]
  69. Aneta Drabińska, J. Borysiuk, **W. Strupiński** and J. M. Baranowski, *Optical Transmission of Epitaxial Graphene Layers on SiC in the Visible Spectral Range*, Materials Science Forum Vols. 645-648 (2010) pp 615-618 [Wkład habilitanta: Wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusjach nad rezultatami w odniesieniu do technologii wzrostu grafenu. Mój udział procentowy oceniam na 15%.]
  70. A. Drabińska, K. Grodecki, **W. Strupiński**, R. Bożek, K. P. Korona, A. Wymolek, R. Stepniewski, and J. M. Baranowski, *Growth kinetics of epitaxial graphene on SiC substrates*, PHYSICAL REVIEW B **81**, 245410 (2010) [Wkład habilitanta: Opracowałem technologię, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 25%.]
  71. J. Krupka and **W. Strupinski**, *Measurements of the sheet resistance and conductivity of thin epitaxial graphene and SiC films* APPLIED PHYSICS LETTERS **96**, 1 (2010) [Wkład habilitanta: Byłem współautorem koncepcji pracy, twórcą technologii i materiału do badań, wykonywałem i nadzorowałem pomiary uzupełniające, byłem współautorem interpretacji wyników, współpracowałem przy pisaniu manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 50%.]
  72. R. Dwiliński, R. Doradziński, J. Garczyński, L. Sierzputowski, R. Kucharski, M. Zając, M. Rudziński, R. Kudrawiec, J. Serafińczuk, **W. Strupiński**, *Recent achievements in AMMONO-bulk method*, Journal of Crystal Growth **312** (2010) 2499–2502 [Wkład habilitanta: konsultacje naukowe, dyskusja wyników. Mój udział procentowy oceniam na 10%.]
  73. M. Witowski, M. Orlita, R. Stepniewski, A. Wymolek, J. M. Baranowski, **W. Strupiński**, C. Faugeras, G. Martinez, and M. Potemski, *Quasiclassical cyclotron resonance of Dirac fermions in highly doped graphene*, PHYSICAL REVIEW B **82**, 165305 (2010) [Wkład habilitanta: Opracowałem technologię, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 25%.]
  74. PE Gaskell, HS. Skulason, **W Strupinski**, T Szkopek, *High-Spatial Resolution Ellipsometry of Continuous Graphene Films*, Optics Letters, **35**, 3336 (2010) [Wkład habilitanta: Opracowałem technologię, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 25%.]
  75. R. R. Nair, W. C. Ren, R. Jalil, I. Riaz, V. G. Kravetz, L. Britnell, P. Blake, F. Schedin, A. S. Mayorov, S. Yuan, M. I. Katsnelson, **W. Strupinski**, L. G. Bulusheva, A. V. Okotrub, I. V. Grigorieva, A. N. Grigorenko, K. S. Novoselov, A. K. Geim *Fluorographene: A Two-Dimensional Counterpart of Teflon*, (2010) *Small*, **6** (24), pp. 2877-2884 [Wkład habilitanta: Opracowałem technologię, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 5%.]
  76. J. Borysiuk, R. Bożek, K. Grodecki, A. Wymolek, **W. Strupiński**, R. Stepniewski, and J. M. Baranowski, *“Transmission electron microscopy investigations of epitaxial graphene on C-terminated 4H-SiC”*, Journal of Applied Physics **108**, 013518 (2010) [Wkład habilitanta: Byłem pomysłodawcą i koordynatorem kierunku badań, uczestniczyłem w dyskusji wyników i weryfikacji ostatecznej formy manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 15%.]
  77. Jerzy Krupka, **Wlodek Strupinski**, and Norbert Kwietniewski, *Microwave Conductivity of Very Thin Graphene and Metal Films*, Journal of Nanoscience and Nanotechnology Vol. **11**, 1–5, 2011 [Wkład habilitanta: byłem współautorem koncepcji pracy, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 30%.]
  78. M. Orlita, C. Faugeras, J. Borysiuk, J. M. Baranowski, **W. Strupinski**, M. Sprinkle, C. Berger, W. A. de Heer, D. M. Basko, G. Martinez, and M. Potemski *Magneto-optics of bilayer graphene inclusions in rotational-stacked multilayer epitaxial graphene* Physical Review B **83**, 125302 (2011) [Wkład habilitanta: Opracowałem technologię, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 15%.]

79. P.Caban, **Wlodek Strupinski**, JanSzmidt, MarekWojcik, JaroslawGaca, OzgurKelekci, Deniz Caliskan, EkmelOzbay, *Effect of growth pressure on coalescence thickness and crystal quality of GaN deposited on 4H-SiC*, Journal of Crystal Growth 315 (2011) 168–173 [Wkład habilitanta: Byłem koordynatorem kierunku badań, uczestniczyłem w dyskusji wyników i weryfikacji ostatecznej formy manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 15%.]
80. Dominika Teklinska, Kinga Kosciwicz, Kacper Grodecki, Mateusz Tokarczyk, Grzegorz Kowalski, **Włodzimierz Strupinski**, Andrzej Olszyna, Jacek Baranowski, *Epitaxial graphene perfection vs. SiC substrate quality*, Cent. Eur. J. Phys. • 9(2) • 2011 • 446-453 [Wkład habilitanta: Byłem koordynatorem kierunku badań, uczestniczyłem w dyskusji wyników i weryfikacji ostatecznej formy manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 15%.]
81. Jerzy Krupka, **Wlodek Strupiński**, Andrzej Stefański, Mikołaj Baszun, Zdzisław Mączyński, *Pomiary elektromagnetycznych właściwości metamateriałów planarnych i grafenu w paśmie częstotliwości mikrofalowych*, Elektronika nr 2/2011 [Wkład habilitanta: Opracowałem technologię, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 25%.]
82. **W.Strupinski**, K.Grodecki, A.Wysmolek, R.Stepniewski, T.Szkopek, P.E.Gaskell, A.Grüneis, D.Haberer, R.Bozek, J.Krupka and J.M.Baranowski, *Graphene Epitaxy by Chemical Vapor Deposition on SiC*, Nano Lett. 2011, 11, 1786–1791 Wkład habilitanta: jestem twórcą wcześniej opatentowanej metody, byłem pomysłodawcą koncepcji pracy, opracowałem technologię oraz byłem współautorem dyskusji wyników na podstawie przeprowadzonej przez współautorów charakteryzacji. Jestem autorem manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 80%.
83. Byung Hwan Chu, Justin Nicolosi, C. F. Lo, **W. Strupinski**, S. J. Pearton and F. Ren, *Effect of Coated Platinum Thickness on Hydrogen Detection Sensitivity of Graphene-Based Sensors*, Electrochemical and Solid-State Letters, 14 (7) K43-K45 (2011) [Wkład habilitanta: byłem współautorem koncepcji pracy, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 30%.]
84. Byung Hwan Chu, C.F. Lo, Justin Nicolosi, C.Y. Chang, Victor Chen, **W. Strupinski**, S.J. Pearton, F. Ren, *Hydrogen Detection Using Platinum Coated Graphene Grown on SiC*, Sensors and Actuators B: Chemical 157 (2011) 500-503 [Wkład habilitanta: byłem współautorem koncepcji pracy, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 30%.]
85. Robert Dwiliński, Roman Doradziński, Jerzy Garczyński, Leszek Sierzputowski, Robert Kucharski, Marcin Zajac, Mariusz Rudziński, Robert Kudrawiec, **Włodzimierz Strupiński**, and Jan Misiewicz, *Ammonothermal GaN substrates: Growth accomplishments and applications* Phys. Status Solidi A, 1–5 (2011) [Wkład habilitanta: konsultacje naukowe, dyskusja wyników. Mój udział procentowy oceniam na 10%.]
86. M. Orlita, C. Faugeras, R. Grill, A. Wysmolek, **W. Strupinski**, C. Berger, W. A. de Heer, G. Martinez, and M. Potemski, *Carrier Scattering from Dynamical Magnetoconductivity in Quasineutral Epitaxial Graphene*, Physical Review Letters 107, 216603 (2011) [Wkład habilitanta: Opracowałem technologię, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 15%.]
87. M. Orlita, C. Faugeras, J. Borysiuk, J. M. Baranowski, **W. Strupinski**, M. Sprinkle, C. Berger, W. A. de Heer, D. M. Basko, G. Martinez, and M. Potemski *Bilayer graphene inclusions in rotational-stacked multilayer epitaxial graphene* Phys. Rev. B 83, 125302 (2011) [Wkład habilitanta: Opracowałem technologię, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 15%.]
88. J. Borysiuk, J. Soltys, R. Bozek, J. Piechota, S. Krukowski, **W. Strupinski**, J. M. Baranowski, and R. Stepniewski *Role of structure of C-terminated 4H-SiC(000) surface in growth of graphene layers: Transmission electron microscopy and density functional theory studies*, Physical Review B, 85, 045426 (2012) [Wkład habilitanta: Opracowałem technologię, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 15%.]
89. Mutlu Gokkavas, Serkan Butun, Piotr Caban, **Wlodek Strupinski** and Ekmel Ozbay, *Integrated AlGaIn quadruple-band ultraviolet photodetectors*, Semicond. Sci. Technol. **27** (2012) 065004 (5pp) [Wkład habilitanta: konsultacje naukowe, dyskusja wyników. Mój udział procentowy oceniam na 10%.]
90. Tymoteusz Ciuk, Jerzy Krupka, Cezariusz Jastrzebski, Jarosław Judek, **Wlodek Strupinski**, Serkan Butun, Ekmel Ozbay and Mariusz Zdrojek, *Contactless magnetoresistance in large area epitaxial graphene grown on SiC substrates*, Journal of Materials Science and Engineering A 2 (7) (2012) 489-493. [Wkład habilitanta: Opracowałem technologię, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 25%.]
91. Piotr Knyps, Ewa Dumiszewska, Marek Wesołowski, **Włodzimierz Strupiński**, *Technological issues and optimization processes of junctions in a multijunction pv cell based on InGaP/InGaAs/Ge materials*: Elektronika 06-2012 [Wkład habilitanta: Byłem pomysłodawcą i koordynatorem kierunku badań,



- uczestniczyłem w dyskusji wyników i weryfikacji ostatecznej formy manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 35%.]
92. T.Pustelny, M.Setkiewicz, S.Drewniak, E.Maciak, A.Stolarczyk, M.Procek, M.Urbańczyk, K.Gut, Z.Opilski, I.Pasternak, **W.Strupinski**, *The influence of Humidity on the resistance Structures with Graphene Sensor Layer*, Acta Physica Polonica A, vol.122 – No 5, 2012 [Wkład habilitanta: byłem współautorem koncepcji pracy, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 10%.]
  93. K. Grodecki, J. A. Blaszczyk, **W. Strupinski**, A. Wysmolek, R. Stępniewski, A. Drabinska, M. Sochacki, A. Dominiak, and J. M. Baranowski, *Pinned and unpinned epitaxial graphene layers on SiC studied by Raman spectroscopy* Journal of Applied Physics 111, 14307 (2012) [Wkład habilitanta: Byłem pomysłodawcą i koordynatorem kierunku badań, uczestniczyłem w dyskusji wyników i weryfikacji ostatecznej formy manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 10%.]
  94. K. Grodecki, R. Bozek, **W. Strupinski**, A. Wysmolek, R. Stepniewski, and J. M. Baranowski *Micro-Raman spectroscopy of graphene grown on stepped 4H-SiC (0001) Surface*, Applied Physics Letters 100, 261604 (2012) [Wkład habilitanta: Byłem pomysłodawcą i koordynatorem kierunku badań, uczestniczyłem w dyskusji wyników i weryfikacji ostatecznej formy manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 25%.]
  95. G Sobon, J Sotor, I Pasternak, **W Strupinski**, K Krzemepek, P Kaczmarek and K M Abramski, *Chirped pulse amplification of a femtosecond Er-doped fiber laser mode-locked by a raphene saturable absorber*, Laser Phys. Lett. 10 (2013) 035104 (6pp) [Wkład habilitanta: konsultacje naukowe, dyskusja wyników. Mój udział procentowy oceniam na 10%.]
  96. G. Sobon, J. Sotor, I. Pasternak, A. Krajewska, **W. Strupinski**, K. M. Abramski, "Thulium-doped all-fiber laser mode-locked by CVD-graphene/PMMA saturable absorber", Optics Express 21, 12797-12802 (2013) [Wkład habilitanta: konsultacje naukowe, dyskusja wyników. Mój udział procentowy oceniam na 10%.]
  97. G. Sobon, J. Sotor, I. Pasternak, K. Grodecki, P. Paletko, **W. Strupinski**, Z. Jankiewicz, K.M. Abramski, „Er-doped Fiber Laser Mode-locked by CVD-graphene Saturable Absorber”, Journal of Lightwave Technology 30, 2770-2775 (2012) [Wkład habilitanta: konsultacje naukowe, dyskusja wyników. Mój udział procentowy oceniam na 10%.]
  98. P. Szroeder, A. Gorska, N.Tsierkezos, Uwe Ritter, **W. Strupinski**, “*The role of band structure in electron transfer kinetics in low-dimensional carbon*”, Mat.-wiss. u.Werkstofftech. 2013, 44, No. 2–3 [Wkład habilitanta: konsultacje naukowe, dyskusja wyników. Mój udział procentowy oceniam na 10%.]
  99. Wlasny, P. Dabrowski, M. Rogala, P. J. Kowalczyk, I. Pasternak, **W. Strupinski**, J. M. Baranowski, and Z. Klusek, *Role of graphene defects in corrosion of graphene-coated Cu(111) surface* APPLIED PHYSICS LETTERS 102, 111601 (2013) [Wkład habilitanta: byłem współautorem koncepcji pracy, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 10%.]
  100. T. Pustelny, M. Setkiewicz, S. Drewniak, E. Maciak, A. Stolarczyk, M. Urbańczyk, M. Procek, K. Gut, Z. Opilski, I. Pasternak, **W. Strupinski**, *The sensibility of resistance sensor structures with graphene to the action of selected gaseous media*, Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences. Vol. 61, No. 2, 2013 [Wkład habilitanta: byłem współautorem koncepcji pracy, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 15%.]
  101. Aneta Drabinska, Maria Kaminska, Agnieszka Wołos, **Wlodek Strupinski**, Andrzej Wysmolek, Witold Bardyszewski, Rafał Bozek, and J. M. Baranowski, *Enhancement of elastic and inelastic scattering lengths in quasi-free-standing graphene measured with contactless microwave spectroscopy* PHYSICAL REVIEW B 88, 165413 (2013) [Wkład habilitanta: Opracowałem technologię, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 15%.]
  102. Tymoteusz Ciuk, Iwona Pasternak, Aleksandra Krajewska, Jan Sobieski, Piotr Caban, Jan Szmiedt, and **Wlodek Strupinski**, *Properties of Chemical Vapor Deposition Graphene Transferred by High-Speed Electrochemical Delamination*, J. Phys. Chem. C, 2013, 117 (40), pp 20833–20837 [Wkład habilitanta: Byłem pomysłodawcą i koordynatorem kierunku badań, uczestniczyłem w dyskusji wyników i weryfikacji ostatecznej formy manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 35%.]
  103. Xianjie Liu, Alexander Grüneis, Danny Haberer, Alexander V. Fedorov, Oleg Vilkov, **Wlodek Strupinski**, and Thomas Pichler, *Tunable Interface Properties between Pentacene and Graphene on the SiC Substrate*, J. Phys. Chem. C 2013, 117, 3969–3975 [Wkład habilitanta: Opracowałem technologię, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 10%.]
  104. M. Tokarczyk, G. Kowalski, M. Mozdzonek, J. Borysiuk, R. Stepniewski, **W. Strupinski**, P. Ciepielewski, and J. M. Baranowski, *Structural investigations of hydrogenated epitaxial graphene grown on 4H-SiC (0001)*, APPLIED PHYSICS LETTERS 103, 241915 (2013) [Wkład habilitanta: Byłem współautorem pomysłu]

- przeprowadzenia charakteryzacji metoda dyfrakcji rgt, wykonałem materiał badawczy i brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 10%.]
105. J. M. Baranowski, M. Mozdzonek, P. Dabrowski, K. Grodecki, P. Osewski, W. Kozłowski, M. Kopciuszynski, M. Jałochowski, **W. Strupinski**, Observation of Electron-Phonon Couplings and Fano Resonances in Epitaxial Bilayer Graphene, *Graphene*, 2013, 2, 115-120 Published Online October 2013 [Wkład habilitanta: byłem współautorem koncepcji pracy, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 30%.]
  106. J. M. Urban, P. Dabrowski, J. Binder, M. Kopciuszynski, A. Wyszomłek, Z. Klusek, M. Jałochowski, **W. Strupinski**, and J. M. Baranowski, Nitrogen doping of chemical vapor deposition grown graphene on 4H-SiC (0001) *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS* 115, 233504 (2014) [Wkład habilitanta: byłem współautorem koncepcji pracy, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 30%.]
  107. Tymoteusz Ciuk, Semih Cakmakçıyan, Ekmel Ozbay, Piotr Caban, Kacper Grodecki, Aleksandra Krajewska, Iwona Pasternak, Jan Szmidt, and **Włodek Strupinski**, Step-edge-induced resistance anisotropy in quasi-free-standing bilayer chemical Vapor deposition graphene on SiC, *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS* 116, 123708 (2014) [Wkład habilitanta: Byłem pomysłodawcą kierunku badań, wykonałem cały materiał badawczy na podstawie opracowanej technologii, wykonywałem pomiary elektryczne, uczestniczyłem znacząco w dyskusji wyników i opracowaniu ostatecznego kształtu manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 40%.]
  108. Karpierz, E.; Drabinska, A.; Bozek, R.; Kazmierczak, P.; Wyszomłek, A.; Kaminska, M.; **Strupinski, W.**, ESR Spectroscopy of Graphene with Adsorbed NaCl Particles, *ACTA PHYSICA POLONICA A NOV* 2014 126 5 1187-1189 [Wkład habilitanta: Opracowałem technologię, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 25%.]
  109. **Włodzimierz Strupiński**, „Grafen – własności, technologia, charakteryzacja”, rozdz. monografii „Zaawansowane Materiały i Technologie ich Wytwarzania” Inst. Met. Nieżelaznych 2014, pp.85-104, Projekt POIG.01.01.02-00-015/09 Kier.proj. prof.dr inż. Zbigniew Śmieszek. [Wkład habilitanta: Samodzielnie opisałem wyniki prowadzonych przeze mnie badań. Mój udział procentowy oceniam na 100%.]
  110. M. Rudziński, M. Wesołowski, **W. Strupiński**, „Opracowanie technologii otrzymywania materiałów na źródła światła białego”, rozdz. monografii „Zaawansowane Materiały i Technologie ich Wytwarzania” Inst. Met. Nieżelaznych 2014, pp.105-122, Projekt POIG.01.01.02-00-015/09 Kier.proj. prof.dr inż. Zbigniew Śmieszek. [Wkład habilitanta: Byłem pomysłodawcą i koordynatorem kierunku badań, uczestniczyłem w dyskusji wyników i weryfikacji ostatecznej formy manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 35%.]
  111. E. Dumiszewska, P. Knyp, M. Wesołowski, **W. Strupiński**, M. Teodorczyk „Wielozłączone ogniwa fotowoltaiczne”, rozdz. monografii „Zaawansowane Materiały i Technologie ich Wytwarzania” Inst. Met. Nieżelaznych 2014, pp.123-136, Projekt POIG.01.01.02-00-015/09 Kier.proj. prof.dr inż. Zbigniew Śmieszek. [Wkład habilitanta: Byłem pomysłodawcą i koordynatorem kierunku badań, uczestniczyłem w dyskusji wyników i weryfikacji ostatecznej formy manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 35%.]
  112. I. Pasternak, A. Krajewska, K. Grodecki, I. Jozwik-Biała, K. Sobczak, and **W. Strupinski**, Graphene films transfer using marker-frame method, *AIP ADVANCES* 4, 097133 (2014) [Wkład habilitanta: Byłem pomysłodawcą i koordynatorem kierunku badań, uczestniczyłem w dyskusji wyników i weryfikacji ostatecznej formy manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 15%.]
  113. Krzysztof Gajewski, Daniel Kopiec, Magdalena Moczala, Adam Piotrowicz, Michał Zielony, Grzegorz Wielgoszewski, Teodor Gotszalk, **Włodek Strupiński**, Scanning probe microscopy investigations of the electrical properties of chemical vapor deposited graphene grown on a 6H-SiC substrate, *MICRON* 68 (2015) 17-22 [Wkład habilitanta: Wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusjach nad rezultatami w odniesieniu do technologii wzrostu grafenu. Mój udział procentowy oceniam na 15%.]
  114. Aneta Drabinska, Piotr Kazmierczak, Rafał Bozek, Ewelina Karpierz, Agnieszka Wołos, Andrzej Wyszomłek, Maria Kaminska, Iwona Pasternak, Aleksandra Krajewska, and **Włodek Strupinski**, Electron scattering in graphene with adsorbed NaCl nanoparticles, *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS* 117, 014308 (2015) [Wkład habilitanta: Wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusjach nad rezultatami w odniesieniu do technologii wzrostu grafenu. Mój udział procentowy oceniam na 15%.]
  115. Christos Melios, Vishal Panchal, Cristina E. Giusca, **Włodek Strupiński**, S. Ravi P. Silva & Olga Kazakova, Carrier type inversion in quasi-free standing graphene: studies of local electronic and structural properties, *Sci. Rep.* 5, 10505; doi: 10.1038/srep10505 (2015) [Wkład habilitanta: byłem współautorem koncepcji pracy, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 30%.]

116. **W. Strupinski**, K. Grodecki, P. Caban, P. Ciepielewski, I. Jozwik-Biala, J.M. Baranowski, Formation mechanism of graphene buffer layer on SiC(0001), *Carbon* 81 (2015) 63-72 [Wkład habilitanta: byłem współpomysłodawcą koncepcji pracy, opracowałem technologię, wykonałem materiał badawczy oraz przeprowadziłem dyskusję wyników na podstawie przeprowadzonych przez współautorów pomiarów i ich interpretacji. Jestem autorem manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 80%.]
117. P. Dabrowski, M. Rogala, I. Wlasny, Z. Klusek, M. Kopciuszynski, M. Jalochowksi, **W. Strupinski**, J.M. Baranowski, Nitrogen doped epitaxial graphene on 4H-SiC(0001) – Experimental and theoretical study, *CARBON* 94 (2015) 214–223 [Wkład habilitanta: byłem współautorem koncepcji pracy, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 10%.]
118. Jurgen Van Erps, Tymoteusz Ciuk, Iwona Pasternak, Aleksandra Krajewska, **Wlodek Strupinski**, Steven Van Put, Geert Van Steenberge, Kitty Baert, Herman Terryn, Hugo Thienpont, and Nathalie Vermeulen, Laser ablation- and plasma etching-based patterning of graphene on silicon-on-insulator waveguides, Vol. 23, No. 20, *OPTICS EXPRESS* 26640, 2015 [Wkład habilitanta: konsultacje naukowe, dyskusja wyników. Mój udział procentowy oceniam na 10%.]
119. Grzegorz Lupina, Julia Kitzmann, Ioan Costina, Mindaugas Lukosius, Christian Wenger, Andre Wolff, Sam Vaziri, Mikael Östling, Iwona Pasternak, Aleksandra Krajewska, **Wlodek Strupinski**, Satender Kataria, Amit Gahoi, Max C. Lemme, Guenther Ruhl, Guenther Zoth, Oliver Luxenhofer, and Wolfgang Meh, Residual Metallic Contamination of Transferred Chemical Vapor Deposited Graphene, *ACS Nano*, 2015, 9 (5), pp 4776–4785 [Wkład habilitanta: konsultacje naukowe, dyskusja wyników. Mój udział procentowy oceniam na 10%.]
120. J. J. van den Berg, **W. Strupinski**, and B. J. van Wees, Observation of anomalous Hanle spin precession line shapes resulting from interaction with localized states, *Phys.Rev.B.* 91, 081403, (2015). [Wkład habilitanta: Opracowałem technologię, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 20%.]
121. Grzegorz Sobon, Jaroslaw Sotor, Iwona Pasternak, Aleksandra Krajewska, **Wlodek Strupinski**, Krzysztof M. Abramski All-polarization maintaining, graphene-based femtosecond Tm-doped fiber laser, *Optics Express* 2015 [Wkład habilitanta: konsultacje naukowe, dyskusja wyników. Mój udział procentowy oceniam na 10%.]
122. Tymoteusz Ciuk, **Wlodek Strupinski**, Statistics of epitaxial graphene for Hall effect Sensors *CARBON* 93 (2015) 1042-1049 [Wkład habilitanta: byłem współautorem koncepcji pracy, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 40%.]
123. Binder J., Urban J.M., Stepniewski R., **Strupinski W.**, Wysmolek A., In situ Raman spectroscopy of the graphene/water interface of a solution-gated field-effect transistor: electron-phonon coupling and spectroelectrochemistry, *NANOTECHNOLOGY*, 27, 4, 2016 [Wkład habilitanta: Opracowałem technologię, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 15%.]
124. Lara Misseeuw, Aleksandra Krajewska, Iwona Pasternak, Tymoteusz Ciuk, **Wlodek Strupinski**, Gunter Reekmans, Peter Adriaenssens, Davy Geldof, Frank Blockhuys, Sandra Van Vlierberghe, Hugo Thienpont, Peter Dubruel and Nathalie Vermeulen, Optical-quality controllable wet-chemical doping of graphene through a uniform, transparent and low-roughness F4-TCNQ/MEK layer, *The Royal Society of Chemistry* 2016 *RSC Adv.*, 2016, 6, 104491–104501 [Wkład habilitanta: konsultacje naukowe, dyskusja wyników. Mój udział procentowy oceniam na 10%.]
125. Tymoteusz Ciuk, Oleg Petruk, Andrzej Kowalik, Iwona Jozwik, Andrzej Rychter, Jan Szmidt, and **Włodzimierz Strupinski**, Low-noise epitaxial graphene on SiC Hall effect element for commercial applications, *Applied Physics Letters* 108, 223504 (2016) [Wkład habilitanta: Byłem pomysłodawcą i koordynatorem kierunku badań, uczestniczyłem w dyskusji wyników i weryfikacji ostatecznej formy manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 35%.]
126. Grodecki K., Jozwik I, Baranowski J.M., Teklinska D., **Strupinski W.**, SEM and Raman analysis of graphene on SiC(0001), *MICRON*, 8, 21, 11241-11247, 2016 [Wkład habilitanta: Opracowałem technologię, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 15%.]
127. Omid Habibpour, Zhongxia Simon He, **Wlodek Strupinski**, Niklas Rorsman, Tymoteusz Ciuk, Pawel Ciepielewski and Herbert Zirath, A 90-100 GHz (W-band) MMIC Resistive Mixer based on Epitaxial Graphene FET, *IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS*, 37, 3, 333-336, 2016 [Wkład habilitanta: Opracowałem technologię, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 15%.]
128. Winters, M ; Sveinbjornsson, EO ; Melios, C ; Kazakova, O ; **Strupinski W.** ; Rorsman, N., Characterization and physical modeling of MOS capacitors in epitaxial graphene monolayers and bilayers on 6H-SiC, *AIP*

- Advances, 6, 8, 10.1063, 2016 [Wkład habilitanta: Opracowałem technologię, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 15%.]
129. Nathalie Vermeulen, David Castell'ó-Lurbe, JinLuo Cheng, Iwona Pasternak, Aleksandra Krajewska, Tymoteusz Ciuk, **Wlodek Strupinski**, Hugo Thienpont, and Jürgen Van Erps, Negative Kerr nonlinearity of graphene: experimental demonstration with chirped-pulse-pumped self-phase modulation, *Physical Review Applied* 6, 044006 October 2016 [Wkład habilitanta: konsultacje naukowe, dyskusja wyników. Mój udział procentowy oceniam na 10%.]
130. Paweł Piotr Michałowski, Wawrzyniec Kaszub, Alexandre Merkulov, and **Wlodek Strupinski**, Secondary ion mass spectroscopy depth profiling of hydrogen-intercalated graphene on SiC, *Applied Physics Letters*, 109, 011904 (2016) [Wkład habilitanta: Byłem pomysłodawcą i koordynatorem kierunku badań, uczestniczyłem w dyskusji wyników i weryfikacji ostatecznej formy manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 35%.]
131. I. Pasternak, P. Dabrowski, P. Ciepiewski, V. Kolkovsky, Z. Klusek, J. M. Baranowski and **W. Strupinski**, Large-area high quality graphene on Ge(001)/Si(001) substrates, *Nanoscale*, 2016, 8, 11241 [Wkład habilitanta: Byłem pomysłodawcą i koordynatorem kierunku badań, uczestniczyłem w dyskusji wyników i weryfikacji ostatecznej formy manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 35%.]
132. Iwona Pasternak, Marek Wesolowski, Iwona Jozwik, Mindaugas Lukosius, Grzegorz Lupina, Paweł Dabrowski, Jacek M. Baranowski & **Wlodek Strupinski**, Graphene growth on Ge(100)/Si(100) substrates by CVD method, *Scientific Reports*, 2016, 6:21773 [Wkład habilitanta: Byłem inicjatorem kierunku badań. Uczestniczyłem w opracowaniu technologii i dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 30%.]
133. Melios C., Spencer S., Shard A., **Strupinski W.**, Silva SRP., Kazakova O., Surface and interface structure of quasi-free standing graphene on SiC, *2D MATERIALS*, vol.3, issue 2, 2016 [Wkład habilitanta: Opracowałem technologię, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 25%.]
134. Krajewska Aleksandra, Oberda Krzysztof, Azpeitia Jon, Gutierrez Alejandro, Pasternak Iwona, Lopez Maria, Mierczyk Zygmunt, Manuera Carmen, **Strupinski Wlodek**, Influence of Au doping on electrical properties of CVD graphene, *CARBON*, 101, 431-438, 2016 [Wkład habilitanta: Byłem pomysłodawcą i koordynatorem kierunku badań, uczestniczyłem w dyskusji wyników i weryfikacji ostatecznej formy manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 35%.]
135. Omid Habibpour, Zhongxia Simon He, **Wlodek Strupinski**, Niklas Rorsman, Tymoteusz Ciuk, Paweł Ciepiewski, and Herbert Zirath, A W-band MMIC Resistive Mixer Based on Epitaxial Graphene FET, *IEEE MICROWAVE AND WIRELESS COMPONENTS LETTERS*, vol.27 Issue 2, 2017 [Wkład habilitanta: Byłem inspiratorem włączenia opracowanego przeze mnie materiału badawczego (grafenu na SiC) do badań nad MMICs, wykonałem materiał i uczestniczyłem w przygotowaniu manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 10%.]
136. Omid Habibpour, Zhongxia Simon He, **Wlodek Strupinski**, Niklas Rorsman & Herbert Zirath, Wafer scale millimeter-wave integrated circuits based on epitaxial graphene in high data rate communication, *Scientific Reports* 7, 41828 (2017) [Wkład habilitanta: Byłem inspiratorem włączenia opracowanego przeze mnie materiału badawczego (grafenu na SiC) do badań nad MMICs, wykonałem materiał i uczestniczyłem w przygotowaniu manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 10%.]
137. C. Melios, M. Winters, **W. Strupinski**, V. Panchal, C. E. Giusca, K.D.G.I. Jayawardena, N. Rorsman<sup>3</sup>, S.R.P. Silva<sup>2</sup> and O. Kazakova, Tuning epitaxial graphene sensitivity to water by hydrogen Intercalation, *Nanoscale*, 2017, 9, 3440-3448, DOI: 10.1039/C6NR09465A [Wkład habilitanta: Opracowałem technologię, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 10%.]
138. S. El-Ahmar, W. Koczorowski, A. A. Poźniak, P. Kuświk, **W. Strupinski**, and R. Czajka, Graphene-based magnetoresistance device utilizing strip pattern geometry, *Appl. Phys. Lett.* 110, 043503 (2017) [Wkład habilitanta: Opracowałem technologię, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 15%.]
139. W. Koczorowski, P. Kuswik, M. Przychodnia, K. Wiesner, S. El-Ahmar, M. Szybowicz, M. Nowicki, **W. Strupinski**, R. Czajka, CMOS-compatible fabrication method of graphene-based micro devices, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 67 (2017) 92-97 [Wkład habilitanta: Opracowałem technologię, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 15%.]
140. Omid Habibpour, **Włodzimierz Strupinski**, Niklas Rorsman, Paweł Ciepiewski, and Herbert Zirath, Generic Graphene Based Components and Circuits for Millimeter Wave High Data-rate Communication Systems, 2017 MRS Spring Meeting, MRSS17-2666989.R1 [Wkład habilitanta: Byłem inspiratorem włączenia opracowanego przeze mnie materiału badawczego (grafenu na SiC) do badań nad MMICs, wykonałem materiał i uczestniczyłem w przygotowaniu manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 10%.]

141. Rebeca A. Bueno, Jose I. Martinez, Roberto F. Luccas, Nerea Ruiz del Arbol, Carmen Munuera, Irene Palacio, Francisco J. Palomares, Koen Lauwaet, Sangeeta Thakur, Jacek M. Baranowski, **Wlodek Strupinski**, Maria F. Lopez, Federico Mompean, Mar Garcia-Hernandez, and Jose A. Martin-Gago, Highly selective covalent organic functionalization of epitaxial graphene, *Nature Communications*, 2017, DOI:10.1038/ncomms15306 [Wkład habilitanta: Wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusjach nad rezultatami w odniesieniu do technologii wzrostu grafenu. Mój udział procentowy oceniam na 10%.]
142. Dabrowski, Pawel; Rogala, Maciej; Pasternak, Iwona; Baranowski, Jacek; **Strupinski, Włodzimierz**; Kopciuszynski, Marek; Zdyb, Ryszard; Jalochoowski, Mieczyslaw; Lutsyk, Iaroslav; Klusek, Zbigniew, The study of the interactions between graphene and Ge(001)/Si(001), *NANO RESEARCH NOV 2017 vol.10 issue 11 3648-3661* [Wkład habilitanta: konsultacje naukowe, dyskusja wyników. Mój udział procentowy oceniam na 5%.]
143. Michalowski, Pawel Piotr; Kaszub, Wawrzyniec; Pasternak, Iwona; **Strupinski, Wlodek**, Graphene Enhanced Secondary Ion Mass Spectrometry (GESIMS), *SCIENTIFIC REPORTS AUG 7 2017 7 7479* [Wkład habilitanta: Byłem pomysłodawcą badań, uczestniczyłem w opracowaniu technologii i wykonaniu materiału badawczego oraz w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 30%.]
144. Binder, J.; Stepniowski, R.; **Strupinski, W.**; Wysmolek, A., In Situ Raman Spectroscopy of Solution-Gated Graphene on Copper, *ACTA PHYSICA POLONICA A AUG 2017 132 2 360-362* [Wkład habilitanta: konsultacje naukowe, dyskusja wyników. Mój udział procentowy oceniam na 5%.]
145. Wierzchowski, Wojciech; Wieteska, Krzysztof; Gaca, Jaroslaw; Wojcik, Marek; Mozdzonek, Malgorzata; **Strupinski, Włodzimierz**; Wesolowski, Marek; Paulmann, Carsten, Characterization of A(III)B(V) superlattices by means of synchrotron diffraction topography and high-resolution X-ray diffraction, *JOURNAL OF APPLIED CRYSTALLOGRAPHY AUG 2017 50 4 1192-1199* [Wkład habilitanta: Opracowałem technologię, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 5%.]
146. Weiss, M.; Walkowiak, M.; Wasinski, K.; Polrolniczak, P.; Kokocinska, B.; **Strupinski, W.**, Comparative Morphological Analysis of Graphene on Copper Substrate obtained by CVD from a Liquid Precursor, *ACTA PHYSICA POLONICA A JUN 2017 131 6 1497-1506* [Wkład habilitanta: Opracowałem technologię, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 10%.]
147. Kachniarz, M.; Petruk, O.; Salach, J.; Ciuk, T.; **Strupinski, W.**; Bienkowski, A.; Szewczyk, R., *ACTA PHYSICA POLONICA A MAY 2017 131 5 1250-1253* [Wkład habilitanta: konsultacje naukowe, dyskusja wyników. Mój udział procentowy oceniam na 5%.]
148. Sotor, Jaroslaw; Boguslawski, Jakub; Martynkien, Tadeusz; Mergo, Pawel; Krajewska, Aleksandra; Przewloka, Aleksandra; **Strupinski, Wlodek**; Sobon, Grzegorz, All-polarization-maintaining, stretched-pulse Tm-doped fiber laser, mode-locked by a graphene saturable absorber, *OPTICS LETTERS APR 15 2017 42 8 1592-1595* [Wkład habilitanta: konsultacje naukowe, dyskusja wyników. Mój udział procentowy oceniam na 5%.]
149. Januszko, Adam; Iwan, Agnieszka; Maleczek, Stanislaw; Przybyl, Wojciech; Pasternak, Iwona; Krajewska, Aleksandra; **Strupinski, Włodzimierz**, CVD-Graphene-Based Flexible, Thermoelectrochromic Sensor, *JOURNAL OF NANOMATERIALS Volume 2017 (2017), Article ID 2757590, 8 pages* [Wkład habilitanta: konsultacje naukowe, dyskusja wyników. Mój udział procentowy oceniam na 15%.]
150. Krajewska, Aleksandra; Pasternak, Iwona; Sobon, Grzegorz; Sotor, Jaroslaw; Przewloka, Aleksandra; Ciuk, Tymoteusz; Sobieski, Jan; Grzonka, Justyna; Abramski, Krzysztof M.; **Strupinski, Wlodek**, Fabrication and applications of multi-layer graphene stack on transparent polymer, *APPLIED PHYSICS LETTERS JAN 23 2017 110 4 41901* [Wkład habilitanta: konsultacje naukowe, dyskusja wyników. Mój udział procentowy oceniam na 5%.]
151. Tarka, Jan; Boguslawski, Jakub; Sobon, Grzegorz; Pasternak, Iwona; Przewloka, Aleksandra; **Strupinski, Wlodek**; Sotor, Jaroslaw; Abramski, Krzysztof Marek, Power Scaling of an All-PM Fiber Er-Doped Mode-Locked Laser Based on Graphene Saturable Absorber, *IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS JAN-FEB 2017 23 1 1100506* [Wkład habilitanta: konsultacje naukowe, dyskusja wyników. Mój udział procentowy oceniam na 5%.]
152. Paweł Piotr Michałowski, Piotr Gutowski, Dorota Pierścińska, Kamil Pierściński, Maciej Bugajski and **Wlodek Strupinski**, Characterization of the superlattice region of a quantum cascade laser by secondary ion mass spectrometry, *Nanoscale Issue 44, 2017 9, 17571-17575* [Wkład habilitanta: byłem współautorem koncepcji pracy, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 10%.]

153. Christian Berger, Rory Phillips, Iwona Pasternak, Jan Sobieski, Wlodek Strupinski and Aravind Vijayaraghavan, Touch-mode capacitive pressure sensor with graphene-polymer heterostructure membrane, 2D Mater. 5 (2018) 015025 [Wkład habilitanta: byłem współtwórcą materiału badawczego, brałem udział w przygotowaniu manuskryptu i w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 10%.]

#### **4. OSIĄGNIĘCIA NAUKOWE STANOWIĄCE PODSTAWĘ POSTĘPOWANIA HABILITACYJNEGO**

Jako osiągnięcie naukowe w rozumieniu art. 16. ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65. poz. 595 ze zm.) zostaje przedstawiony cykl 20 publikacji i jednego patentu międzynarodowego pod wspólnym tytułem:

##### **Badania nad wzrostem, właściwościami i zastosowaniem węgla krzemu i grafenu.**

#### **4.1. Spis publikacji stanowiących podstawę do ubiegania się o habilitację**

- 4.1/1 **Włodzisław Strupiński**, Kinga Kościewicz, Marek Wesołowski, Epitaksja węgla krzemu metodą CVD, Elektronika nr 7-8/2008 s.36-42. Liczba punktów wg MNiSW: 15

Wkład habilitanta: Uruchamiałem reaktor do epitaksji SiC, jestem autorem technologii i przeprowadzonych badań, metodyki pomiarów, koncepcji pracy oraz napisałem publikację, przeprowadzając dyskusję wyników. Mój udział procentowy oceniam na 85%.

- 4.1/2 **Wlodek Strupinski**, Kinga Kościewicz, Jan Weyher, Andrzej Olszyna, Effect of Substrates Thermal Etching on CVD Growth of Epitaxial Silicon Carbide Layers, Materials Science Forum Vols.600-603 (2009) pp.155-158, IF = 0.4 liczba cytowań 4

Wkład habilitanta: byłem pomysłodawcą koncepcji pracy, opracowałem technologię oraz nadzorowałem pomiary, przeprowadziłem dyskusję wyników. Jestem autorem manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 75%.

- 4.1/3 Kinga Kosciwicz, **Wlodek Strupinski**, Andrzej Olszyna Comparison Between Polishing Etching of On and Off-axis C and Si faces of 4H-SiC Wafers Materials Science Forum Vols. 615-617 (2009) pp 597-600, IF = 0.4 liczba cytowań 1

Wkład habilitanta: byłem pomysłodawcą koncepcji pracy, nadzorowałem technologię oraz pomiary, Kierowałem dyskusją wyników i pomagałem napisać manuskrypt. Mój udział procentowy oceniam na 50%.

- 4.1/4 **W.Strupinski**, R.Bozek, J.Borysiuk, K.Kościewicz, A.Wysmolek, R.Stepniewski and J.M.Baranowski, Growth of Graphene Layers on Silicon Carbide, Materials Science Forum Vols.615-617 (2009) pp.199-202 IF = 0.4 liczba cytowań 19

Wkład habilitanta: byłem pomysłodawcą koncepcji pracy, opracowałem technologię oraz przeprowadziłem dyskusję wyników na podstawie przeprowadzonych przez współautorów pomiarów i ich interpretacji. Jestem autorem manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 70%.

- 4.1/5 J. Borysiuk, **W. Strupiński**, R. Bożek, A. Wyszomolek and J. M. Baranowski, TEM Investigations of Graphene on 4H-SiC(0001) Materials Science Forum Vols. 615-617 (2009) pp 207-210, IF = 0.4

Wkład habilitanta: byłem współautorem koncepcji pracy, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 30%.

- 4.1/6 **W.Strupinski**, A.Drabinska, R.Bozek, J.Borysiuk, A.Wyszomolek,R.Stepniwski, K.Kosciewicz, P.Caban, K.Korona, K.Grodecki, Pierre-Antoine Geslin and J.M.Baranowski, Growth Rate and Thickness Uniformity of Epitaxial Graphene, Materials Science Forum Vols. 645-648 (2010) pp 569-572, IF = 0.4  
liczba cytowań 9

Wkład habilitanta: byłem pomysłodawcą koncepcji pracy, opracowałem technologię oraz przeprowadziłem dyskusję wyników na podstawie przeprowadzonych przez współautorów pomiarów i ich interpretacji. Jestem autorem manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 75%.

- 4.1/7 A. Drabińska, K. Grodecki, **W. Strupiński**, R. Bożek, K. P. Korona, A. Wyszomolek, R. Stępniewski, and J. M. Baranowski, Growth kinetics of epitaxial graphene on SiC substrates, PHYSICAL REVIEW B 81, 245410 (2010) IF<sub>2010</sub> = 3.8    liczba cytowań 38

Wkład habilitanta: Opracowałem technologię, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 25%.

- 4.1/8 A.Drabińska, J. Borysiuk, **W. Strupiński** and J. M. Baranowski, Optical Transmission of Epitaxial Graphene Layers on SiC in the Visible Spectral Range Materials Science Forum Vols. 645-648 (2010) pp 615-618, IF = 0.4    liczba cytowań 3

Wkład habilitanta: Wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusjach nad rezultatami w odniesieniu do technologii wzrostu grafenu. Mój udział procentowy oceniam na 15%.

- 4.1/9 J. Krupka and **W. Strupinski**, Measurements of the sheet resistance and conductivity of thin epitaxial graphene and SiC films APPLIED PHYSICS LETTERS 96, 1 (2010) IF = 3.8    liczba cytowań 96

Wkład habilitanta: Byłem współautorem koncepcji pracy, twórcą technologii i materiału do badań, wykonywałem i nadzorowałem pomiary uzupełniające, byłem współautorem interpretacji wyników, współpracowałem przy pisaniu manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 50%.

- 4.1/10 M. Orlita, C. Faugeras, J. Borysiuk, J. M. Baranowski, **W. Strupinski**, M. Sprinkle, C. Berger, W. A. de Heer, D. M. Basko, G. Martinez, and M. Potemski Magneto-optics of bilayer graphene inclusions in rotational-stacked multilayer epitaxial graphene Physical Review B 83, 125302 (2011) IF<sub>2011</sub> = 3.8  
liczba cytowań 1

Wkład habilitanta: Wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników w odniesieniu do opracowanej przeze mnie technologii. Mój udział procentowy oceniam na 15%.

- 4.1/11 **W. Strupinski**, K. Grodecki, P. Caban, P. Ciepielewski, I. Jozwik-Biala, J.M. Baranowski, Formation mechanism of graphene buffer layer on SiC(0001), Carbon 81 (2015) 63-72 IF<sub>2015</sub> = 6.2    liczba cytowań 18

Wkład habilitanta: byłem współpomysłodawcą koncepcji pracy, opracowałem technologię, wykonałem materiał badawczy oraz przeprowadziłem dyskusję wyników na podstawie przeprowadzonych przez współautorów pomiarów i ich interpretacji. Jestem autorem manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 80%.

- 4.1/12 **W.Strupinski**, K.Grodecki, A.Wysmolek, R.Stepniewski, T.Szkopek, P.E.Gaskell, A.Grüneis, D.Haberer, R.Bozek, J.Krupka and J.M.Baranowski, Graphene Epitaxy by Chemical Vapor Deposition on SiC, Nano Lett. 2011, 11, 1786–1791 IF<sub>2011</sub>=13.2 liczba cytowań 231

Wkład habilitanta: jestem twórcą wcześniej opatentowanej metody, byłem pomysłodawcą koncepcji pracy, opracowałem technologię oraz byłem współautorem dyskusji wyników na podstawie przeprowadzonej przez współautorów charakteryzacji. Jestem autorem manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 80%.

- 4.1/12a **Włodzimierz Strupiński**, Polska: PAT-213291 (2010), Japonia: JP 5662249 (2014), USA: US 9,067,796 B2 (2015), Korea: 10-1465452 (2015), EP 2392547 B1) (2016), Chiny: ZL 201180027996.X (2016)

Wkład habilitanta: Jestem twórcą patentu i autorem opisu. Mój udział procentowy oceniam na 100%.

- 4.1/13 Byung Hwan Chu, C.F. Lo, Justin Nicolosi, C.Y. Chang, Victor Chen, **W. Strupinski**, S.J. Pearton, F. Ren, Hydrogen Detection Using Platinum Coated Graphene Grown on SiC, Sensors and Actuators B: Chemical 157 (2011) 500-503 IF<sub>2011</sub>=3.9 liczba cytowań 88

Wkład habilitanta: Byłem współautorem koncepcji pracy, wykonałem materiał badawczy, brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 25%.

- 4.1/14 M. Tokarczyk, G. Kowalski, M. Mozdzonek, J. Borysiuk, R. Stepniewski, **W. Strupinski**, P. Ciepielewski, and J. M. Baranowski, Structural investigations of hydrogenated epitaxial graphene grown on 4H-SiC (0001), APPLIED PHYSICS LETTERS 103, 241915 (2013) IF<sub>2013</sub>=3.8 liczba cytowań 17

Wkład habilitanta: Byłem współautorem pomysłu przeprowadzenia charakteryzacji metoda dyfrakcji rtg, wykonałem materiał badawczy i brałem udział w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 10%.

- 4.1/15 Tymoteusz Ciuk, Semih Cakmakyapan, Ekmel Ozbay, Piotr Caban, Kacper Grodecki, Aleksandra Krajewska, Iwona Pasternak, Jan Szmidt, and **Wlodek Strupinski**, Step-edge-induced resistance anisotropy in quasi-free-standing bilayer chemical vapor deposition graphene on SiC, JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 116, 123708 (2014) IF<sub>2014</sub>=2.32 liczba cytowań 11

Wkład habilitanta: Byłem pomysłodawcą kierunku badań, wykonałem cały materiał badawczy na podstawie opracowanej technologii, wykonywałem pomiary elektryczne, uczestniczyłem znacząco w dyskusji wyników i opracowaniu ostatecznego kształtu manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 40%.

- 4.1/16 Tymoteusz Ciuk, Iwona Pasternak, Aleksandra Krajewska, Jan Sobieski, Piotr Caban, Jan Szmidt, and **Wlodek Strupinski**, Properties of Chemical Vapor Deposition Graphene Transferred by High-Speed Electrochemical Delamination, J. Phys. Chem. C, 2013, 117 (40), pp 20833–20837 IF<sub>2013</sub>=4.8 liczba cyt. 43

Wkład habilitanta: Byłem pomysłodawcą i koordynatorem kierunku badań, uczestniczyłem w dyskusji wyników i weryfikacji ostatecznej formy manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 35%.

- 4.1/17 **Włodzimierz Strupiński**, „Grafen – własności, technologia, charakteryzacja”, rozdz. monografii „Zaawansowane Materiały i Technologie ich Wytwarzania” IMN, 2014, pp.85-104, Projekt POIG.01.01.02-00-015/09

Wkład habilitanta: Samodzielnie opisałem wyniki prowadzonych przeze mnie badań. Mój udział procentowy oceniam na 100%.



- 4.1/18 Michalowski, Pawel Piotr; Kaszub, Wawrzyniec; Pasternak, Iwona; **Strupinski, Wlodek**, Graphene Enhanced Secondary Ion Mass Spectrometry (GESIMS), SCIENTIFIC REPORTS AUG 7 2017 7 7479 IF<sub>2017</sub>=4.3 liczba cytowań 4

Wkład habilitanta: Byłem pomysłodawcą badań, uczestniczyłem w opracowaniu technologii i wykonaniu materiału badawczego oraz w dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 30%.

- 4.1/19 Iwona Pasternak, Marek Wesolowski, Iwona Jozwik, Mindaugas Lukosius, Grzegorz Lupina, Pawel Dabrowski, Jacek M. Baranowski & **Wlodek Strupinski**, Graphene growth on Ge(100)/Si(100) substrates by CVD method, Scientific Reports, 2016, 6:21773 IF<sub>2016</sub> =4.3 liczba cytowań 21

Wkład habilitanta: Byłem inicjatorem kierunku badań. Uczestniczyłem w opracowaniu technologii i dyskusji wyników. Mój udział procentowy oceniam na 30%.

- 4.1/20 Omid Habibpour, Zhongxia Simon He, **Wlodek Strupinski**, Niklas Rorsman & Herbert Zirath, Wafer scale millimeter-wave integrated circuits based on epitaxial graphene in high data rate communication, Scientific Reports 7, 41828 (2017) IF<sub>2017</sub>=4.3 liczba cyt. 6

Wkład habilitanta: Byłem inspiratorem włączenia opracowanego przeze mnie materiału badawczego (grafenu na SiC) do badań nad MMICs, wykonałem materiał i uczestniczyłem w przygotowaniu manuskryptu. Mój udział procentowy oceniam na 10%.

Sumaryczny impact factor powyższych prac wynosi: 60.52

Suma cytowań powyższych prac: 613

## 4.2. Omówienie osiągniętych wyników

Przedstawione powyżej publikacje obejmują dziesięcioletni okres mojej pracy badawczej nad węglikiem krzemu - szerokoprzerwowym materiałem stosowanym m.in. w elektronice oraz nad grafenem, głównym przedstawicielem nowej grupy materiałów 2D. Studia nad inżynierią wytwarzania, właściwościami i zastosowaniami ww. materiałów rozpocząłem w tym samym czasie i ze względu na ich powiązanie w prowadzonych badaniach, kwalifikuję jako jeden cel badawczy stanowiący podstawę postępowania habilitacyjnego. Cel ten mógł być zrealizowany tylko dzięki moim wcześniejszym wieloletnim pracom nad monokryształizacją warstw epitaksjalnych związków półprzewodnikowych III-V i szerokim doświadczeniem w dziedzinie charakteryzacji i aplikacji.

W końcu 2006 r. rozpocząłem badania nad homoepitaksją węgla krzemu (SiC) poprzedzone zakupem i technologicznym uruchomieniem profesjonalnego reaktora do epitaksji CVD. W tym samym czasie, czyli w nie całe dwa lata od opublikowania pierwszego artykułu dotyczącego odkrycia grafenu (2005 r.), zająłem się badaniami nad wzrostem tego materiału wykorzystując urządzenie do epitaksji SiC.

W przypadku węgla krzemu, główne badania poświęciłem studiom nad strukturą defektową monokrystalicznych podłoży SiC stosowanych do epitaksji węgla krzemu, zagadnieniom związanym z optymalizacją defektów generowanych w trakcie krystalizacji epitaksjalnej warstwy, domieszkowaniu azotem i aluminium oraz problemom związanym z zanieczyszczeniami, jednorodnością parametrów i morfologią powierzchni warstwy. Jakość

struktury warstw epitaksjalnych SiC jest nadal uważana za klucz do poprawy parametrów użytkowych elementów elektronicznych. Defekty takie jak politypizm i dyslokacje w rodzaju BPD (basal type dislocations) w kryształach należą do najbardziej szkodliwych. W przypadku struktur bipolarnych tranzystorów wysokiej mocy, dyslokacje BPD są źródłem generacji błędów ułożenia w płaszczyźnie bazowej w czasie wstrzykiwania nośników ładunku.

Zdobytą wiedzę z zakresu krystalizacji i właściwości SiC wykorzystywałem równolegle w badaniach nad grafenem i już w 2008 r. zostałem zaproszony do współpracy z naukowcami z Uniwersytetu w Manchester - Andrem Geimem oraz Konstantinem Novoselovem, którzy otrzymali w 2010 r. nagrodę Nobla z dziedziny fizyki za przełomowe badania nad dwuwymiarowym grafenem, a dokładniej za wyizolowanie tego materiału i zbadanie jego unikatowych właściwości fizycznych i chemicznych. Grafen zbudowany jest z atomów węgla, czyli powszechnie dostępnego pierwiastka na Ziemi, co umożliwia stworzenie nowoczesnej, uniwersalnej i opłacalnej ekonomicznie platformy technologicznej. Z tej przyczyny, badania nad tym właśnie materiałem są prowadzone z niezwykłą dynamiką w wielu ośrodkach badawczych na całym świecie.

Grafen czyli pojedyncza warstwa węgla o hybrydyzacji  $sp^2$  jest podstawowym "budulcem" nano-rurek węglowych, fulerenów i oczywiście grafitu. Komórka elementarna grafenu zbudowana jest z dwóch atomów węgla A i B tworzących dwie podsieci, o wektorze translacji równym, co do wartości odległości atomów węgla 1.42 Å. Pojedynczy atom w stanie niewzbudzonego ma cztery elektrony walencyjne ( $2s^2 2p^2$ ). Chemiczne wiązania między atomami węgla wynikają z hybrydyzacji  $sp^2$  orbitali elektronowych. Każdy atom posiada trzy zhybrydyzowane orbitale  $sp^2$ . Trzy elektrony tworzą trzy silne wiązania C-C typu  $\sigma$  leżące w jednej płaszczyźnie, odpowiedzialne za właściwości mechaniczne, natomiast pozostały orbital  $2p_z$  skierowany prostopadle do płaszczyzny wytwarza słabe wiązania typu  $\pi$  formujące pasmo przewodnictwa ( $\pi^*$ ) i walencyjne ( $\pi$ ). Nakładanie się orbitali  $\pi$  wpływa znacząco na właściwości transportowe grafenu. Struktura pasmowa grafenu ma kształt symetrycznych stożków w punktach K i K', w których pasma walencyjne i przewodnictwa się stykają. Dzięki własnościom elektronicznym, wysokiej ruchliwości pozbawionych masy elektronów i dziur, dużej prędkości nasycenia, wysokiej gęstości nośników oraz dwu-wymiarowości systemu, grafen może znaleźć szerokie zastosowanie w różnych dziedzinach przemysłu, szczególnie w przemyśle elektronicznym.

Paradoksalnie, grafen został odkryty jako ostatni w szeregu form alotropowych węgla, chociaż sama koncepcja węgla dwu-wymiarowego nie jest nowa, bowiem już w 1947r. Wallace wykazał, że mono-warstwa zbudowana z atomów C może charakteryzować się liniową zależnością energii od wektora momentu pędu elektronu  $E(k)$  w strukturze pasmowej, w punkcie K strefy Brillouina. Pierwsze prace eksperymentalne nad grafenem wykonane prawdopodobnie w 1962 r. przez Boehma dotyczyły redukcji tlenu grafenu. Obecnie uznaje się go za materiał strategiczny dla rozwoju technologii w wielu dziedzinach.

Poniżej przedstawione publikacje obejmują zagadnienia dotyczące węgla krzemu i grafenu.

Praca 4.1/1 jest podsumowaniem moich kilkuletnich badań nad technologią epitaksji węgla krzemu metodą CVD [1] i opisem jej aspektów decydujących o własnościach wytwarzanych struktur i ich przydatności w diodach Schottky'ego. Szczególną uwagę

poświęciłem nowym zagadnieniom związanym ze stanem morfologii powierzchni monokrystalicznego podłoża SiC i wpływem zdefektowania sieci krystalicznej wywołanym mechaniczno-chemicznym polerowaniem na strukturę hodowanej warstwy homoepitaksjalnej. Zaproponowałem skuteczny sposób usuwania obszaru zgniotu kryształu podłożowego, co umożliwiło poprawną krystalizację warstwy SiC. W przypadku wzrostu CVD dokładna analiza termodynamiki reakcji zachodzących w reaktorze pozwoliła zrozumieć mechanizm syntezy węgla krzemu, co opisano w publikacji oraz pomogła zastosować optymalne warunki z punktu widzenia kinetyki procesów powierzchniowych, dyfuzji w fazie gazu i termodynamiki, w odniesieniu do wiodących publikacji [2,3,4]. W efekcie osiągnięto najwyższy poziom jakości krystalizowanego materiału w odniesieniu do rezultatów publikowanych w prasie międzynarodowej.

Przeprowadziłem także systematyczne studia nad mechanizmem wbudowywania domieszek elektrycznie aktywnych – donorowych (N) i akceptorowych (Al) na podstawie dostępnej literatury [5,6]. Zbadałem tzw. efekt pamięci występujący przy domieszkowaniu aluminium i zaproponowałem sposób przeciwdziałania oraz zmierzyłem poziom zanieczyszczeń w warstwie SiC i ich wpływ na parametry elektryczne i wyznaczyłem warunki brzegowe dla domieszkowania elektronami i dziurami wykorzystując swoje wcześniejsze osiągnięcia z okresu pracy doktorskiej polegające zwiększaniu koncentracji domieszki izoelektronowej w GaP za pomocą generowania wakansów. Opracowałem metodykę pomiarów z uwzględnieniem faktu, że domieszki w SiC lokują się na głębokich poziomach energetycznych, które w przypadku innych półprzewodników uważane są za poziomy defektowe. Przeprowadziłem także rozległe pomiary metodą fotoluminescencji. Opracowana metodyka umożliwiła porównanie jakości warstw wytwarzanych przeze mnie z produktami dostępnymi komercyjnie na świecie. Badając natężenie rekombinacji FE (swobodnego ekscytonu) i korelację z rekombinacją „Green” i „Red” można było zaobserwować negatywny związek defektów odpowiedzialnych za tę rekombinację z czasem życia nośników mniejszościowych.

Zagadnienia związane ze stanem powierzchni monokrystalicznego podłożowego są niezwykle ważne z punktu widzenia wzrostu epitaksjalnego, a szczególnie istotne w przypadku hodowania materiału dwuwymiarowego. Ten wątek badawczy kontynuowałem w dalszych pracach, których wyniki opublikowałem w artykule 4.1/2, gdzie opisałem szczegółowo wpływ trawienia wodorem i propanem powierzchni politypu 4H-SiC o polarności Si na właściwości morfologiczne krystalizowanej warstwy epitaksjalnej w odniesieniu do wiedzy na temat defektów w SiC publikowanej w [7-9]. Za pomocą pomiarów metodą mikroskopii optycznej i sił atomowych, potwierdziłem i rozwinąłem obserwacje dokonane w [10,11], świadczące o tym, że propan stosowany do ochrony elementów grafitowych reaktora w temperaturze 1400-1600°C poprzez spowolnienie ucieczki węgla w trakcie wygrzewania, bierze udział w procesie trawienia i rekonstrukcji powierzchni. W zależności od temperatury i czasu trawienia, otrzymywano zupełnie inny jej obraz. Propan, reagujący intensywnie z SiC w temperaturze powyżej 1400°C, dodany do gazu nośnego - wodoru został użyty jako narzędzie do zmniejszania chropowatości. Precyzyjna optymalizacja składu mieszanki i czasu ekspozycji pozwoliła kontrolować rezultaty procesu dla wzrostu epitaksjalnego trawienia i przełączać między modem trawienia selektywnego i polerującego. W przypadku grubych warstw SiC (powyżej 5 mikrometrów) chropowatość powierzchni warstwy była akceptowalna nawet w przypadku modu selektywnego. Również defekty punktowe i gęstość dyslokacji ujawniane poprzez trawienie w stopionym KOH

były podobne dla obu modów. Istotą trawienia było usunięcie warstwy zgniotu i wyeksponowanie poprawnej struktury krystalograficznej kryształu dla następującego epitaksjalnego wzrostu.

W przypadku wzrostu grafenu, stan powierzchni jest decydujący. W celu oceny zjawiska, przeprowadziłem badania szczegółowe nad trawieniem polerującym podłoży SiC o polarności krzemowej i węglowej ze szczególnym uwzględnieniem rzeczywistej orientacji krystalograficznej i odchylenia płaszczyzny wzrostu (0001) w zakresie kątów  $0.03 - 8^\circ$ . Wyniki przedstawiono w pracy 4.1/3. Charakteryzacja morfologii powierzchni zmodyfikowanej w wyniku obróbki in-situ w atmosferze wodoru i propanu w temperaturze  $1600^\circ\text{C}$  ujawniła obecność stopni atomowych oraz ich geometrię. Wyniki przedstawione w pracach 4.1/1-3 miały kluczowe znaczenie dla dalszych badań nad wzrostem grafenu na podłożach SiC.

Publikacja 4.1/4 była pierwszą moją pracą na temat wzrostu grafenu na podłożach SiC metodą sublimacji czyli odparowania krzemu z powierzchni kryształu [12,13]. Eksperymenty zostały wykonane z użyciem profesjonalnego urządzenia do produkcji płytek epitaksjalnych SiC. Przeprowadziłem systematyczne badania nad zależnościami między: temperaturą sublimacji i czasem jej trwania, stanem powierzchni podłoża, szybkością nagrzewania podłoża do temperatury  $1600^\circ\text{C}$ , dezorientacją płaszczyzny wzrostu podłoża (0001) lub (000-1) w kierunku [11-20], wpływem ciśnienia w reaktorze a szybkością wzrostu i jakością strukturalną hodowanego grafenu. Zaobserwowałem różnice we wzroście grafenu na węglu krzemu o różnej polarności powierzchni. W przypadku polarności węglowej szybkość budowania warstwy grafenu okazała się znacząco większa. Stwierdziłem także wpływ obecności stopni atomowych [14] i innych defektów powierzchniowych wywołanych dezorientacją lub niewłaściwym stanem przygotowania podłoża na parametry wzrostu i właściwości grafenu. Jednym z bardziej istotnych osiągnięć było odkrycie wpływu ciśnienia argonu w reaktorze na szybkość sublimacji i jakość grafenu, co w konsekwencji, umożliwiło dalsze prowadzenie procesów z kontrolowaną szybkością sublimacji w atmosferze Ar, w przeciwieństwie do powszechnie stosowanej próżni. W artykule jednak nie podkreślałem wagi tego odkrycia. Później inni autorzy opisali tę technologię w publikacji [15] w Nature Materials, z aktualną liczbą cytowań 2126.

Opracowałem także metodykę charakteryzacji hodowanego grafenu czyli pojedynczej warstwy atomów węgla z użyciem mikroskopii sił atomowych (AFM), mikroskopii sił z sondą Kelvina (KPFM), tunelowej mikroskopii skaningowej (STM) i spektroskopii Ramana. Omawiana publikacja odzwierciedla osiągnięcie najwyższego poziomu technologii wzrostu grafenu metodą sublimacji na SiC. Badania zostały także rozszerzone o wykorzystanie warstw epitaksjalnych SiC jako bezpośredniego podłoża do sublimacji Si w jednym procesie technologicznym wzrostu SiC i następnie grafenu. Otworzyło to nowy kierunek badawczy wzrostu warstw SiC na podłożach bez dezorientacji (wymóg dla wzrostu grafenu), co stanowiło swoiste wyzwanie ze względu na trudności utrzymania jednorodnego politypu SiC.

W celu dalszego pogłębiania wiedzy nad monoatomowymi warstwami grafenowymi, zainicjowałem badania z wykorzystaniem wysokorozdzielczego transmisyjnego mikroskopu elektronowego (HR-TEM), które zostały opisane w publikacji 4.1/5. Wykazano tam, w zgodzie z obserwacjami metodą X-ray [16], że pierwsza warstwa atomów węgla powstająca na powierzchni kryształu SiC w wyniku odparowania atomów Si, przyjmująca formę heksagonalnych plastrów miodu o parametrze sieci  $17.5 \pm 1 \text{ \AA}$  znajduje się w odległości  $2 \text{ \AA}$  od tej powierzchni, co jest porównywalne do odległości Si-C w SiC równej  $1.9 \text{ \AA}$  i potwierdza silnie

oddziaływanie kowalencyjne między SiC i grafenem, prowadzące do angażowania p-elektronów z grafenu i elektrycznej obojętności pierwszej warstwy węgla. Dodatkowo, zaobserwowano, że stopnie atomowe powstałe na powierzchni SiC w wyniku wygrzewania, trawienia i sublimacji krzemu są także pokryte grafenem, podobnie jak płaskie tarasy między krawędziami stopni. Oznaczało to, że warstwa grafenu jest ciągła na całej powierzchni podłoża pomimo występujących defektów.

W dalszych badaniach koncentrowałem się na mechanizmach wzrostu warstw grafenu metodą sublimacji Si głównie w aspekcie wpływu defektów krystalicznych i powierzchniowych kryształu podłożowego. Usiłowałem znaleźć relacje jakościowe i ilościowe umożliwiające projektowanie procesu wzrostu i oddziaływanie na parametry strukturalne wytwarzanego grafenu. W publikacji 4.1/6 przedstawiłem rezultaty obserwacji i rozważań nad rolą dyslokacji w SiC w zarodkowaniu domen (ziaren) grafenowych. Jednoznacznie stwierdziłem, że typowe ziarna grafenowe mają wymiary w zakresie 5-100  $\mu\text{m}^2$  w związku z czym przy średniej gęstości defektów strukturalnych  $10^4/\text{cm}^2$  w SiC, jeden defekt odnosi się do powierzchni  $10^4 \mu\text{m}^2$ , zatem nie może stanowić pojedynczego centrum zarodkowania. Wzrost wydajności sublimacji uzyskuje się głównie poprzez sumaryczne zwiększenie gęstości defektów punktowych, krawędzi stopni, mikro-dziur i mikro-rys w powiązaniu z polarnością kryształu i jego dezorientacją płaszczyzny bazowej (0001). Defekty decydują o szybkości wzrostu grafenu, co w konsekwencji powoduje, że otrzymuje się różną liczbę warstw grafenowych w różnych miejscach podłoża. Wyznaczyłem szybkość wzrostu w powiązaniu ze stopniem i rodzajem zdefektowania podłoża oraz ciśnieniem argonu w reaktorze i temperaturą sublimacji.

W przeciwieństwie do większości publikacji, m.in. [17], zastosowałem zredukowane ciśnienie argonu (a nie atmosferyczne) w połączeniu z odpowiednim przygotowaniem powierzchni kryształu SiC. W celu znalezienia skutecznej metodyki szybkich pomiarów grubości grafenu (liczby warstw) zwróciłem uwagę na zmiany w absorpcji światła widzialnego widoczne okiem nieuzbrojonym dla próbek różniących się nawet 1-2 warstwami atomów węgla. Obserwacje te wykorzystałem do zainicjowania opracowania metody pomiaru liczby warstw grafenu metodą absorpcji wykorzystanej w tej publikacji, a także w kolejnych 4.1/7 i 4.1/8, gdzie temat mechanizmu sublimacji atomów krzemu z powierzchni kryształu SiC o orientacji (000-1) został potraktowany bardziej szczegółowo zarówno od strony metody pomiaru liczby warstw grafenu, jak i od strony kinetyki wzrostu grafenu. Moim osiągnięciem było tu opracowanie materiału badawczego umożliwiającego przeprowadzenie studiów nad kinetyką wzrostu oraz udział w dyskusji nad wpływem parowania krzemu oraz powierzchniowej dyfuzji uwalnianych atomów krzemu między warstwami grafenu.

Kolejny etap moich prac nad wzrostem grafenu na podłożach SiC metodą sublimacji dotyczył zagadnień związanych z parametrami elektrycznymi tego materiału, tj. gęstością nośników ładunku, ich ruchliwością oraz opornością (konduktywnością) powierzchniową.

Grafen uważany jest przede wszystkim jako niezwykle atrakcyjny kandydat do zastosowań elektronicznych [18], tak więc głównym celem użytkowym moich wcześniejszych badań było otrzymanie materiału o parametrach transportowych zbliżonych do tych przewidywanych teoretycznie. Jednym z takich parametrów jest oporność lub konduktywność powierzchniowa, którą można wyznaczyć z pomiarów metodą Halla będącej metodą niszczącą (konieczność przygotowania próbki pomiarowej) i wymagającej dobrych kontaktów omowych. Istnieje jednak metoda bezpośredniego, bezkontaktowego pomiaru oporności (konduktywności) w oparciu o

rezonans w zakresie częstotliwości mikrofalowych, opracowana wcześniej dla materiałów dielektrycznych.

W publikacji 4.1/9 przedstawione są pozytywne rezultaty adaptacji ww metody do pomiarów grafenu dokonanej wraz z autorem metody [19]. Do pomiarów zastosowałem grafen wytwarzany na powierzchni SiC politypów 4H i 6H o własnościach półizolacyjnych. Podłoże to zachowujące się jak izolacyjna ceramika charakteryzuje się wysokim współczynnikiem parametru Q czyli dobroci rezonatora. Obecność warstwy węgla o charakterze grafenu wykazującej przewodnictwo elektryczne w sposób mierzalny zmniejsza dobroć rezonatora. Na podstawie pomiarów częstotliwości rezonansowych i dobroci można wyznaczyć zespoloną przenikalność elektryczną w płaszczyźnie próbki, jak i zespoloną przenikalność magnetyczną w kierunku prostopadłym do próbki, co w konsekwencji, na podstawie skomplikowanych obliczeń numerycznych w oparciu o równania Maxwella pozwala wyznaczyć oporność powierzchniową grafenu. Uzyskanie prawidłowych precyzyjnych wartości oporności grafenu było poprzedzone dwuletnim okresem prac nad tym zagadnieniem, wymagających właściwej konstrukcji rezonatora, zdefiniowania grubości materiału przewodzącego (liczby warstw grafenu), zoptymalizowania warunków pomiaru i wreszcie weryfikacji wyników innymi metodami oraz za pomocą porównawczych pomiarów przewodzących warstw epitaksjalnych SiC. W wyniku, została opracowana nowa szybka metoda badania właściwości elektrycznych grafenu w sposób nieniszczący, zajmująca zaledwie kilka minut. Jest to bardzo ważne w przypadku optymalizacji technologii i konieczności pomiarów dużej liczby próbek. Metoda jest wykorzystywana w wielu laboratoriach w kraju i na świecie.

Moje osiągnięcia w zakresie zrozumienia mechanizmów wzrostu grafenu na SiC metodą sublimacji w połączeniu z wypracowaną metodyką charakteryzacji pojedynczej warstwy atomów węgla uruchomiły wielokierunkową współpracę z zagranicznymi ośrodkami naukowymi. Powstało wiele wspólnych publikacji, m.in. z późniejszymi laureatami nagrody Nobla – A.Geimem i K.Novoselovem, opisujących badania, w których brałem czynny udział w zakresie wytwarzania grafenu o zadanych, wymaganych w eksperymencie parametrach, jego charakteryzacji, ustalania warunków eksperymentu i dyskusji otrzymanych wyników.

Do postępowania habilitacyjnego wybrałem przykładową publikację 4.1/10 autorstwa czołowych badaczy grafenu z Waltem deHeer (ponad 60 tys. cytowań) i Claire Berger z Georgia Institute of Technology, twórcami pierwszego patentu nt zastosowania grafenu w elektronice (obecnie jest ponad 20 tysięcy patentów). W pracy tej przeprowadzono pomiary magneto-optyczne grafenu, który wyhodowałem na płaszczyźnie (000-1) czyli na stronie węglowej politypu 4H-SiC w postaci 100 warstw ułożonych turbostratycznie, dzięki czemu każda warstwa węgla zachowywała się jak odizolowana warstwa grafenu nie przechodząc w strukturę grafitu. Na podstawie pomiarów transmitancji w silnym polu magnetycznym do 32T ujawniono obszary dwuwarstwy grafenu w klasycznym ułożeniu bernalowskim AB. Najbardziej interesujące było to, że inkluzje grafenu AB wykazywały bardzo wysoką elektroniczną jakość, nawet lepszą od grafenu eksfoliowanego z grafitu czy też hodowanego po stronie krzemowej SiC. Umożliwiło to wyznaczenie po raz pierwszy przejść „intra-band inter-LL” dotychczas mierzonych tylko w grafenie eksfoliowanym uważanym za najwyższej jakości. Można było także przedstawić poziomy Landau’a w dwuwarstwie grafenu i wyznaczyć zakres parabolicznej aproksymacji pasm elektronicznych w grafenie.

Pewnym zwieńczeniem moich badań prowadzonych nad wzrostem grafenu metodą sublimacji Si była publikacja 4.1/11. Pomimo ogromnej liczby artykułów na ten temat, jakie ukazały się w latach 2005-2015 [20-24], moje obserwacje i hipotezy zostały zaakceptowane do opublikowania w czasopiśmie Carbon o indeksie IF=6.2. W pracy tej przedstawiłem wyniki moich badań nad wczesnym stadium tworzenia się warstwy grafenu na podłożu SiC w wyniku parowania krzemu z powierzchni (0001) kryształu objętościowego SiC. Opisałem, jak rozpoczyna się przetwarzanie struktury węgla krzemu w warstwę węgla a następnie grafenu w wyniku ubytku atomów krzemu.

Pierwszą obserwowaną formą jest warstwa węgla zawierająca znaczną liczbę defektów, w której udział hybrydyzacji  $sp^3$  oceniłem na 10%. Warstwa ta tworząca się na powierzchni tarasów SiC zawiera dużą liczbę wakansów węglowych, ale nie jest przepuszczalna dla dyfundujących atomów krzemu, które mogłyby się uwolnić z wnętrza kryształu. Jednak sublimacja Si może się odbywać z bocznych ścianek stopni atomowych, które są niepokryte warstwą węgla na tym etapie wzrostu. Po odparowaniu krzemu boczne ścianki makro-stopni są źródłem wolnych atomów węgla „zasilających” warstwę ulokowaną na tarasach i wypełniających luki. Dzięki temu udział  $sp^3$  maleje do ok 1-2%, co zaprzecza wcześniejszym stwierdzeniom o 30% udziale atomów węgla w wiązaniach kowalencyjnych z Si poprzez hybrydyzację wiązania  $sp^3$  [25,26]. Pik ramanowski dla energii  $1325\text{cm}^{-1}$  ( $D_B$ ) odpowiada obszarom czystej warstwy buforowej (pierwsza warstwa węgla), gdzie pik 2D (wskazujący na obecność grafenu) jest niewykrywalny. Położenie pików  $G_B$  w tym rejonie odpowiada energii  $1580\text{cm}^{-1}$ , odpowiadający stopień hybrydyzacji  $sp^3$  wynosi ok. 10% dla klastrów grafenowych o wymiarach 15 angstr. To oznacza, że warstwa buforowa nie jest wypełniona atomami węgla, ale pozostaje nieprzepuszczalna dla dyfundujących atomów Si.

W przypadku gdy warstwa buforowa jest pokryta drugą warstwą węgla czyli pierwszą warstwą grafenu, położenie linii  $D_B$  przesunęło się do energii  $1350\text{cm}^{-1}$ . Pik 2D jest doskonale widoczny. Poczynione obserwacje stanowiły dobry wkład do modelowania procesu sublimacji i rzucały nowe światło na jakość strukturalną warstwy buforowej. Z drugiej strony utwierdziły mnie w przekonaniu, że warstwy grafenu wytwarzane na powierzchni węgla krzemu metodą sublimacji Si zawsze będą narażone na wysokie zdefektowanie w wyniku przemieszczania się/dyfuzji dużych atomów krzemu i utrudnienia w rekonstrukcji powierzchni kolejnej warstwy grafenu. Generowane defekty są wydajnymi ośrodkami rozpraszania nośników ładunku w grafenie przez co ich ruchliwość jest daleka od teoretycznej.

Równoległe do studiów nad wzrostem grafenu metodą sublimacji prowadziłem samodzielnie całkowicie nowatorskie badania nad wykorzystaniem klasycznej metody epitaksji CVD do wzrostu grafenu na podłożach SiC. W publikacji 4.1/12 poprzedzonej złożeniem zastrzeżenia patentowego na cały świat – 4.1/12a opisałem metodę mojego autorstwa. W procesie CVD (Chemical Vapor Deposition) atomy węgla dostarczane są za pomocą gazowych prekursorów węglowych i osadzane epitaksjalnie na podłożu. Metoda umożliwia bezpośredni wzrost grafenu na obu polarnościach Si i C kryształu SiC. Jako prekursor węgla można stosować metan, propan lub acetylen dostarczane do reaktora w strumieniu gazu nośnego, w tym przypadku argonu. Metoda umożliwia precyzyjny wzrost zadanej liczby warstw grafenu począwszy od warstwy buforowej (pierwszej warstwy węgla) na podłożu SiC o polarności Si i jest znacznie mniej wrażliwa na defekty obecne na powierzchni podłoża i znacząco wpływające na intensywność sublimacji i w konsekwencji na nierównomierność wzrostu grafenu.

Najważniejszą jednak zaletą, w porównaniu do sublimacji, jest uniknięcie destrukcyjnej dyfuzji atomów krzemu przemieszczających się z dolnych warstw podłoża SiC poprzez tworzącą się warstwę grafenu. W przypadku epitaksji CVD zarodkowanie grafenu rozpoczyna się przy krawędziach stopni atomowych co umożliwia wzrost lateralny warstwy atomowej węgla, tzw. „step-flow epitaxy”, podobnie jak ma to miejsce w epitaksji półprzewodników.

Proces wymaga wysokiej temperatury, podobnej jak w przypadku sublimacji, w zakresie 1500-1800<sup>0</sup>C, co umożliwia poprawną syntezę i wzrost grafenu o niskim zdefektowaniu. Podstawową trudność sprawia fakt, że po osiągnięciu temperatury ok. 1300<sup>0</sup>C następuje samorzutna sublimacja krzemu, zanim jeszcze temperatura procesu zostanie osiągnięta. W takim przypadku grafen byłby wytwarzany na drodze sublimacji a nie w wyniku osadzania CVD. Również po procesie CVD i wyłączeniu prekursorów węgla, w czasie chłodzenia od wysokiej temperatury, znowu będziemy mieli do czynienia z sublimacją i dalszym wzrostem grafenu. W wyniku, otrzymana się bardzo nierównomierną i dużą liczbę warstw węgla na powierzchni SiC o bardzo niskich parametrach strukturalnych i elektrycznych.

Opatentowana przeze mnie metoda w USA, EU, Japonii, Korei i Chinach [4.1/12a] polega na wzroście grafenu na drodze osadzania atomów węgla w warunkach kiedy proces sublimacji jest całkowicie zatrzymany. Najprostszym sposobem wstrzymania sublimacji byłoby zwiększenie ciśnienia argonu w reaktorze, jednakże w tych warunkach węgiel krystalizuje w postaci trójwymiarowych obiektów wykazując znaczny udział frakcji amorficznej. Jedyna metoda, jaka okazała się skuteczna polega na odpowiednim sterowaniu dynamiką laminarnego przepływu gazu nad płytką podłożową. Zgodnie z zasadą Hagen-Poiseuille’a dla mechaniki płynów i przypadku laminarnego charakteru przepływu, tzw. parametr Reynoldsa (Re) zależny od właściwości gazu i geometrii reaktora jest proporcjonalny do różnicy ciśnienia na wejściu i wyjściu z reaktora ( $\Delta P$ ) i jest opisany równaniem:

$$Re = \rho V d / \mu,$$

gdzie V – prędkość gazu,  $\mu$  – lepkość dynamiczna,  $\rho$  – gęstość gazu, d – wielkość związana z geometrią reaktora, (lepkość dynamiczna jest związana z lepkością kinetyczną v zależnością:  $v = \mu/\rho$ , która zależy głównie od typu gazu, ciśnienia i temperatury).

Nad powierzchnią podłoża tworzy się stojąca warstwa przypowierzchniowa gazu (BL – boundary layer), której grubość jest proporcjonalna do  $1/Re$  i  $1/\Delta P$ . Sterując parametrem Re można zatem regulować grubość przypowierzchniowej warstwy gazu czyli prędkość liniową poszczególnych laminarnych warstw gazu przemieszczających się nad podłożem.

Umożliwia to z jednej strony optymalizację wydajności zderzeń atomów gazu nośnego argonu z atomami krzemu wydostającymi się z powierzchni SiC, a w konsekwencji pełną kontrolę szybkości sublimacji. Z drugiej strony, optymalizacja grubości BL umożliwia dyfuzję węglowodoru do powierzchni płytki podłożowej i transport masy węgla oraz oddziaływanie na kinetykę procesów powierzchniowych prowadzących do wzrostu dwu-wymiarowego w postaci mono-atomowej warstwy grafenu [27]. Metoda CVD umożliwia zastosowania przemysłowe, gdzie jedynym ograniczeniem jest wielkość płytek SiC (obecnie  $\phi=150\text{mm}$ ), charakteryzuje się dużą elastycznością w modyfikowaniu procesu (np. umożliwia domieszkowanie) oraz



charakteryzuje się znacząco krótszym czasem wzrostu - 2-3 minuty w porównaniu do kilku godzin w przypadku sublimacji. Jednak, najistotniejszy argument przemawiający za stosowaniem wzrostu grafenu metodą CVD to lepsza jednorodność i znacznie wyższe wartości ruchliwości nośników w porównaniu do grafenu otrzymywanego metodą sublimacji. Efekt "step-bunching" w przypadku CVD jest słabszy, ponieważ po etapie trawienia wodorem jest on całkowicie zahamowany. W przypadku sublimacji, eskalacja stopni atomowych następuje także w trakcie sublimacji krzemu i następującego chłodzenia i może prowadzić do pogorszenia morfologii powierzchni podłoża.

Zastosowanie epitaksji CVD do wzrostu grafenu umożliwia także otrzymywanie dowolnej liczby warstw atomowych na powierzchni węglowej SiC poczynając od jednej oraz więcej niż jedna warstwa na powierzchni krzemowej, co jest niewykonalne metodą sublimacji. Należy jednak stwierdzić, że wzrost po stronie krzemowej jest bardziej pożądanym ze względu na wolniejsze procesy kinetyczne, co prowadzi do lepszej jakości grafenu. W tym przypadku, podobnie jak dla sublimacji pierwsza warstwa węgla jest warstwą buforową, nieaktywną elektrycznie.

Produkowany w ten sposób grafen na podłożach SiC charakteryzuje się nadal najwyższą jakością na skalę światową. Opracowana metoda i całokształt badań z tym związanych w dużej mierze umożliwił kwalifikację dla Polski do prestiżowego programu EU Graphene Flagship. Pozytywne rezultaty moich badań nad wzrostem grafenu na SiC z użyciem metody CVD zachęciły mnie do pierwszych działań aplikacyjnych. Doskonałe predyspozycje grafenu do wykorzystania w sensorach i detektorach, zachęciły znanych amerykańskich specjalistów z Uniwersytetu Floryda do skonstruowania pierwszego przyrządu z grafenu wytwarzanego moją metodą. W publikacji 4.1/13 zaprezentowany jest działający grafenowy detektor wodoru zbudowany z 2-3 warstw grafenu osadzonych na krzemowej stronie SiC. Selektywność do wodoru uzyskano dzięki pokryciu grafenu warstwą platyny. Zdolność detekcyjną wodoru potwierdziły pomiary I-V i pomiary prądowe przyrządu w czasie rzeczywistym. Dodatkowo odkryto działanie platyny jako źródła nośników ładunku zwiększających przewodność grafenu. Ekspozycja detektora w wodorze powodowała zmniejszanie oporu elektrycznego. Detektor wykazywał wysoką powtarzalność, czułość i trwałość.

Zainspirowany wcześniejszymi pracami [28] rozpocząłem badania nad zmniejszeniem oddziaływania podłoża SiC poprzez różne mechanizmy rozpraszania, m.in. rozpraszanie Coulombowskie dalekiego zasięgu na zjonizowanych zanieczyszczeniach pułapkowanych w obszarze interfejsu podłoże-grafen. W tym celu, wykorzystując opis mechanizmu w [28] opracowałem własną technologię interkalacji grafenu wodorem w tym samym procesie, bezpośrednio po wzroście grafenu w fazie studzenia reaktora. W temperaturze ok. 1000<sup>0</sup>C można wprowadzić wodór do reaktora, bez ryzyka wytrawienia grafenu, w celu przeprowadzenia interkalacji czyli wysycania tzw. wiszących wiązań na powierzchni SiC odpowiedzialnych za częściową hybrydyzację sp<sup>3</sup> pierwszej warstwy węgla. W wyniku tworzy się tzw. QFSML („Quasi Free Standing Monolayer”). Interkalacja powoduje zerwanie wiązań między węglem a Si, co prowadzi do odizolowania węgla od powierzchni SiC w sensie chemicznym, a w konsekwencji uruchomienie transportu nośników w pierwszej warstwie węgla, która staje się w tym momencie pierwszą warstwą grafenu. Dzięki temu, ruchliwość nośników wzrasta kilkukrotnie przy jednoczesnej zmianie typu przewodnictwa oraz ustaleniu koncentracji na poziomie 1-2x10<sup>12</sup>/cm<sup>2</sup>. Dla grafenu wytwarzanego metodą CVD uzyskałem rekordowe wartości

ruchliwości w 300K powyżej  $8000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ , a dla metody sublimacji –  $3600 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ . Ma to kluczowe znaczenie dla zastosowań grafenu w tzw. szybkiej elektronice. Należy też zauważyć, że interkalacja powoduje zmianę typu nośników większościowych w grafenie z elektronów na dziury. Warstwa grafenu interkalowana wodorem wykazuje wysoką odporność na działanie fotorezystu i rozpuszczalników i wytrzymuje temperatury do min  $700^\circ\text{C}$  spełniając wymagania przyrządów elektronicznych i sensorów pracujących w podwyższonych temperaturach.

W publikacji 4.1/14 przedstawione są wyniki pomiarów grafenu interkalowanego wodorem, do przeprowadzenia których zainteresowałem uczonych z Uniwersytetu Warszawskiego. Celem współpracy, z mojego punktu widzenia, było dokładniejsze przyjrzenie się strukturze. W oparciu o charakteryzację metodami FTiR-AR, HRTEM, spektroskopią Ramana i dyfrakcją rtg potwierdzono obecność wodoru między powierzchnią kryształu podłożowego a warstwą grafenu. Wyraźnie większe odległości międzypłaszczyznowe dowodzą obecności atomów wodoru –  $3.6\text{\AA}$  w stosunku do  $3.4\text{\AA}$ . Stwierdzono także większe odległości między warstwami węgla w przypadku zastosowania interkalacji, co świadczy także o dyfuzji wodoru między warstwy grafenu. Poza wyraźnym wzrostem ruchliwości nośników w grafenie i obserwowaną zmianą typu przewodnictwa, opublikowane tu rezultaty potwierdziły skuteczność opracowanej przeze mnie interkalacji wodoru. W stosunku do innych publikacji, w moim przypadku zastosowałem znacznie wyższą temperaturę interkalacji blisko  $1200^\circ\text{C}$ . Dzięki korzystniejszym warunkom termicznym dla dyfuzji wodoru efekt ekranowania jest intensywniejszy, co przekłada się na wyższe parametry transportowe nośników ładunku w grafenie.

Kontynuując wątek badawczy związany z rozpraszaniem krótkiego zasięgu wywołanym przez defekty powierzchniowe, dyslokacje, pofałdowania powłoki grafenowej oraz fonony akustyczne poszukiwałem sposobu optymalizacji ruchliwości nośników. Duże różnice między ruchliwością w mikrometrycznych płatkach grafenu eksfoliowanego z grafitu (metoda Noblistów) w porównaniu z grafenem wielkoformatowym wytwarzanym na płytkach SiC zmotywowały mnie do zbadania wpływu krawędzi stopni atomowych na powierzchni podłoża SiC oraz innych defektów powierzchniowych. W związku z tym, zaproponowałem przeprowadzenie systematycznych badań nad powiązaniem ruchliwości nośników i ich koncentracji z rodzajem politypu SiC oraz stanem powierzchni. W publikacji 4.1/15 zawierającej bogaty wykaz literatury, przedstawiono rezultaty statystycznych pomiarów właściwości elektrycznych dokonywanych metodą Halla ujawniające anizotropię oporności powierzchniowej spowodowaną obecnością krawędzi stopni atomowych o wysokości do 10 nm, które mogą być dodatkowym źródłem rozpraszania. Wyznaczoną stosunkowo wysoką oporność krawędzi stopnia  $\sim 190\Omega\mu\text{m}$  zinterpretowałem jako spowodowaną obniżoną koncentracją nośników w tym obszarze. Pomiary objęły 200 próbek grafenu hodowanego metodą CVD na podłożach 4H- i 6H-SiC i interkalowanego wodorem o rozmiarach 10mm x 10mm, których wiele wykonywałem osobiście. Dodatkowym czynnikiem zwiększającym rozpraszanie krótkiego zasięgu może też być zaburzenie wzrostu warstwy grafenowej na krawędziach i bocznych ściankach stopni atomowych. Wnioski z tej pracy stały się dla mnie wyznacznikiem do dalszego studiowania mechanizmu efektu „step bunching” i obniżania wysokości stopni przy zachowaniu poprawnej jakości krystalograficznej powierzchni kryształu podłożowego.

Niezależnie od prowadzonych przeze mnie prac badawczych nad wzrostem i właściwościami grafenu na węglu krzemu zajmowałem się także wzrostem grafenu na podłożach metalicznych, głównie miedzi i niklu [29-31]. Charakteryzacja i zastosowanie grafenu

krystalizowanego na metalu wymaga przeniesienia warstwy grafenowej na podłoże wysokorezystywne lub izolator typu  $\text{SiO}_2$ . Przenoszenie grafenu realizowano powszechnie za pomocą nośnika polimerowego odtrawiając metal. Inny sposób został zaproponowany przez uczonych z Singapuru polegający na delaminacji warstwy grafenu w procesie elektrochemicznym [32]. Metodę odtrawiania uważałem za zbyt inwazyjną, wprowadzającą zbyt wiele uszkodzeń w przenoszonych warstwie grafenu, w związku z czym zdecydowałem się wykorzystać opublikowany w [32] nowy sposób i opracować własną technikę z naciskiem na osiągnięcie dużej szybkości procesu. W publikacji 4.1/16 przedstawiono rezultaty charakterystyki grafenu przenieszonego ww metodą na podłoże  $\text{SiO}_2$  z szybkością delaminacji z folii Cu równą 1mm/s. Proces zoptymalizowano na podstawie pomiarów oporności powierzchniowej, koncentracji i ruchliwości nośników oraz tzw. jakości ramanowskiej. Przeprowadzone eksperymenty i pomiary grafenu, którymi kierowałem merytorycznie, dowiodły, że na tym etapie prac optymalizacyjnych i stosowania niedoskonałego urządzenia jakość grafenu nie odbiega od grafenu przenieszonego metodą trawienia. Nie stwierdzono pogorszenia właściwości elektrycznych w funkcji stężenia elektrolitu, co pozwoliło uzyskać dużą szybkość delaminacji. W wyniku dalszych inicjowanych i nadzorowanych przeze mnie optymalizacji konstrukcyjno-technologicznych, metoda delaminacji grafenu stała się „polską specjalnością”, a co najważniejsze umożliwiła dalsze badania nad wzrostem grafenu na metalach i nad jego zastosowaniami.

W rozdziale monografii 4.1/17 przedstawiłem rezultaty kilku lat badań nad wzrostem grafenu na metalach, które rozpocząłem w 2009r. W pracy tej zawarłem także opis grafenu oraz wyniki badań nad wzrostem i charakterystyką grafenu na SiC. Jest to skondensowane (20 stron) kompendium wiedzy na temat technologii grafenowych w oparciu o badania, które prowadziłem i którymi kierowałem.

W przypadku wzrostu grafenu na podłożach metalicznych najkorzystniejszą okazała się miedź. Powszechnie stosuje się metodę osadzania z fazy gazowej CVD z użyciem węglowodoru - zwykle metanu [33-40]. Otrzymywane warstwy wykazują polikrystaliczny charakter o średnicy ziaren rzędu kilkunastu mikrometrów. Głównym wyzwaniem jest uzyskanie poprawnej jakości strukturalnej grafenu krystalizującego na stosunkowo nierównej powierzchni Cu oraz zwiększenie rozmiaru domen (ziaren) grafenowych w celu poprawy parametrów mechanicznych i elektronicznych. Powierzchnia miedzi jest katalizatorem dla wzrostu warstwy węgla, który to pierwiastek praktycznie w miedzi się nie rozpuszcza nawet w temperaturach bliskich temperaturze topnienia Cu. Wzrost grafenu odbywa się na zasadzie adsorpcji atomów węgla na odkrytej powierzchni Cu aż do jej całkowitego zapełnienia. Wtedy szybkość wzrostu wyraźnie się obniża, ale nie ustaje. Do badań stosowałem miedź w formie cienkiej folii, warstw miedzi na podłożach z Si/SiO<sub>2</sub> oraz monokryształy miedzi.

Podstawowym celem było uzyskanie jednorodnej i ciągłej warstwy węgla o grubości jednego atomu o jak największych ziarnach. Systematyczne badania prowadzone przeze mnie i pod moim kierunkiem obejmowały różnorodne zagadnienia, takie jak: przygotowanie powierzchni folii miedzianej, badanie wpływu jej czystości (głównie zawartości tlenu), redukcji tlenków na powierzchni, wielkości i orientacji ziaren, rekrytalizacji, parowania, płynięcia, itp. Redukcję tlenków na powierzchni Cu wykonuje się w tym samym procesie bezpośrednio przed właściwym wzrostem przez wprowadzenie do reaktora mieszanki redukującej (argon i wodór) i wygrzewanie w temperaturze 950<sup>0</sup>C. Rekrytalizacja następuje w wyniku wygrzewania w tej

samej temperaturze w atmosferze czystego argonu przez okres ok. 1 godziny. Powiększanie ziaren miedzi wpływa na poprawę jednorodności warstwy grafenu, ale nie zwiększa domen monokrystalicznych. Jedyńm sposobem jest obniżenie gęstości zarodkowania węgla na powierzchni Cu za pomocą zabiegów technologicznych.

Najlepsze wyniki uzyskano dla wysokiej temperatury wzrostu, ok. 40<sup>0</sup>C poniżej temperatury topnienia miedzi. Tak wysoka temperatura powoduje jednak zjawisko niekorzystne, jakim jest intensywne parowanie miedzi. W przypadku stosowania cienkiej folii o grubości 18 mikrometrów, parowanie może powodować powstawanie dziur w folii. Największy nacisk kładłem na zbadanie kinetyki początkowej fazy wzrostu odpowiedzialnej za kontrolę gęstości i kształtu zarodków. W zależności od kombinacji temperatury wzrostu, ciśnienia, przepływu prekursora węgla, szybkości chłodzenia po procesie, czasu wygrzewania przed procesem, typu gazu nośnego, itp. można uzyskać różną geometrię ziaren grafenowych. Wielkość domen zwykle nie przekracza ok. 300-500 mikrometrów średnicy. Przy pewnych zabiegach można uzyskiwać domeny nawet centymetrowe, ale jest to związane z bardzo długim czasem wzrostu, ekonomicznie nie do zaakceptowania. W celu oceny jakości grafenu wyhodowanego na Cu zastosowałem pomiary parametrów elektrycznych (koncentracja nośników i ruchliwość), które można jednak zmierzyć dopiero po przeniesieniu warstwy grafenu na podłożu wysokorezystywnym, dlatego też przykładałem tak wielką wagę do opracowania właściwej techniki przenoszenia. Uzyskiwane średnie parametry nie odbiegają od poziomu światowego (max ruchliwość ok. 3000 cm<sup>2</sup>/Vs), a w ramach realizowanego przeze mnie zadania projektu EU Graphene Flagship, mój zespół zajął I miejsce wśród wszystkich grup europejskich zajmujących się wzrostem grafenu na miedzi.

Przeprowadzone i koordynowane przeze mnie badania nad wzrostem grafenu na podłożu z miedzi zaowocowały opracowaniem technologii umożliwiającej znaczne zwiększenie skali. W tym celu, przygotowałem założenia projektowe dwóch urządzeń prototypowych wyprodukowanych na zamówienie przez firmę CVD Corporation z USA i Seco Warwick ze Świebodzina. Opracowana technologia na tych urządzeniach umożliwia wytwarzanie grafenu na folii Cu o wymiarach 30cmx30cm i 50cmx50cm, odpowiednio.

W trakcie badań prowadzonych w ramach programu Flagship nad implementacją grafenu wytwarzanego na Cu do technologii elektroniki krzemowej CMOS wynikł problem zanieczyszczenia grafenu miedzią na poziomie niedopuszczalnym w technologii Si. Pomiary wykonywano metodą spektroskopii fluoroscencji rentgenowskiej (TXRF) polegającej na emisji charakterystycznego wtórnego promieniowania rtg z materiału wzbudzanego bombardowaniem wiązką rtg o wysokiej energii lub promieniowaniem gamma oraz metodą ToF-SIMS (Time-of-Flight) czyli odmianą spektroskopii masowej jonów wtórnych [41]. Otrzymywane wyniki przekraczały znacznie, moje oparte na doświadczeniu, wyobrażenie o spodziewanym poziomie wbudowywania się miedzi do grafenu. W związku z tym, postawiłem tezę nieprawidłowej interpretacji wyników pomiarowych. Korzystając z zakupionego do Centrum Grafenu przy ITME urządzenia SIMS o wysokiej rozdzielczości zainicjowałem systematyczne badania nad wyznaczeniem rzeczywistej koncentracji miedzi realizowane przez członka mojego zespołu i eksperta w tej dziedzinie. Poczynione obserwacje rzuciły zupełnie nowe światło na stosowanie techniki SIMS do grafenu [42-44]. W publikacji 4.1/18 zaproponowaliśmy nową metodę GESIMS (Graphene Enhanced SIMS).

W przypadku stosowania SIMS o wysokiej rozdzielczości czyli niskiej energii wiązki pierwotnej warstwa grafenu działa początkowo jak bariera znacząco zmniejszając liczbę jonów wtórnych. W trakcie bombardowania stopniowo ulega destrukcji (można to osiągnąć szybciej przechodząc do modu dSIMS (dynamic)) dzięki czemu odsłaniane są coraz to większe obszary materii znajdującej się pod grafenem. W tym momencie, mimo że wiązka pierwotna jest nadal częściowo ekranowana przez porozrywany grafen to jednak prawdopodobieństwo jonizacji gwałtownie wzrasta, czego efektem jest bardzo intensywny sygnał mylnie świadczący o wysokiej koncentracji danego elementu w matrycy. Za pomocą pomiarów próbek nie mających kontaktu z miedzią oraz analizując dokładnie interferencję mas jonów wtórnych można było wyznaczyć rzeczywistą koncentrację zanieczyszczenia jaką jest miedź w grafenie, która okazała się o ok. 2 rzędy niższa. Wy tłumaczeniem zwiększonego prawdopodobieństwa jonizacji jest duża liczba elektronów pochodząca z grafenu. Uszkodzenie powłoki grafenowej jest konieczne aby wiązka pierwotna mogła dotrzeć do badanej powierzchni. Metoda ma bardzo duży potencjał dla pomiarów materiałów dwuwymiarowych, gdzie objętość materiału badanego jest znikoma i tradycyjny SIMS nie umożliwia detekcji.

Ostatnim wątkiem badawczym, który chciałbym tu przedstawić, jest wzrost grafenu na podłożach germanu opisany m.in. w publikacji 4.1/19. Integracja technologii grafenu z technologią krzemu wymaga możliwości automatyzacji procesów i w związku z tym użycia płytek podłożowych o dużej średnicy np. 12 cali o bardzo niskim poziomie zanieczyszczeń, zwłaszcza miedzią. Grafen osadzany właśnie na folii miedzianej i transferowany w procesie ręcznym lub półautomatycznym nie spełnia oczekiwań. Dobrym rozwiązaniem jest natomiast użycie podłoża krzemowego z epitaksjalną warstwą germanu o orientacji (100). Badania nad wzrostem grafenu na takich podłożach, zakończone sukcesem, prowadziliśmy jako pierwsi na świecie wyznaczając nowy „the state-of-the-art”. Wcześniejsze doniesienia [45,46] dotyczyły wzrostu grafenu na Ge o orientacji (111).

W celu uzyskania warstwy grafenu na Ge o tzw. jakości ramanowskiej, kluczowe okazało się zastosowanie moich wcześniejszych opracowań wzrostu grafenu na SiC metodą CVD. Zrozumienie mechanizmu wzrostu pozwoliło rozszerzyć zakres warunków brzegowych i zaadaptować także inne urządzenia technologiczne w celu zwiększenia rozmiaru podłoża do 8 cali. Zbadany został wpływ przepływu metanu na mechanizm zarodkowania, szybkość wzrostu, jednorodność i jakość strukturalną krystalizowanego grafenu.

Omawianie osiągniętych wyników zakończę publikacją 4.1/20, która jest aplikacyjnym potwierdzeniem moich osiągnięć badawczych nad wzrostem grafenu na SiC. W pracy tej przedstawione są rezultaty zastosowania grafenu w elektronice fal o długościach milimetrowych. Zaprezentowano w niej przełomowe rezultaty dotyczące monolitycznych zintegrowanych układów scalonych z wykorzystaniem grafenu, o niespotykanej dotąd wysokiej częstotliwości na poziomie 80-100GHz. Tak wysoka częstotliwość możliwa była do uzyskania dzięki wysokiej jakości grafenu osadzanego na wysokooporowych podłożach SiC opracowaną przeze mnie metodą. Ważnym osiągnięciem, na skalę globalną było to, że procesy wzrostu grafenu były wykonane przy użyciu produkcyjnego urządzenia do epitaksji CVD na podłożach o średnicy 4 cale, własności spółki Nano Carbon, co umożliwia już regularną produkcję tego materiału.

### 4.3. Literatura

- [1] R.L. Myers, et al, Journal of Crystal Growth 285 (2005) 486–490
- [2] Shin-ichi Nishizawa, et al, Chem. Vap. Deposition 2006, 12, 516–522
- [3] J. Meziere, et al, Journal of Crystal Growth 267 (2004) 436–451
- [4] O. Danielsson, et al, Appl. Phys. Lett. 65 (13), 26 September 1994
- [6] D. J. Larkin, Phys. stat. sol. (b) 202, 305 (1997)
- [7] H.Tsuchida, et al: Journal of Crystal Growth Vol. 306 (2007), p.254
- [8] T.Hori, et al: Journal of Crystal Growth Vol. 306 (2007), p.297
- [9] S.Ha, et al, J.of Crystal Growth, Vol.262 (2004), p.130
- [10] G.Wagner, et al, Applied Surface Science Vol.184 (2001), p.55
- [11] Shin-ichi Nishizawa and M.Pons, Chem.Vap. Deposition, vol.12 (2006), p.516
- [12] A. J. Van Bommel et al.: Surf. Sci. Vol. 48 (1975), p. 463
- [13] C. Berger, et al.: Phys. Rev. B Vol. 77 (2008), p.155426
- [15] K.V.Emtsev at al, Nature Materials volume 8, pages 203–207 (2009)
- [16] F. Varchon, et al, Phys. Rev. Lett. Vol. 99 (2007), p. 126805
- [17] C.Virojanadara, et al:Phys. Rev. B Vol. 78 (2008), p. 245403
- [18] K. S.Novoselov, A. K.Geim, et al : Science Vol. 306 (2004), p. 666
- [19] J. Krupka and J. Mazierska, IEEE Trans. Med. Imaging 56, 1839 (2007)
- [20] Berger C, et al, Science 2006;312:1191–6
- [21] Hass J, et al, . Appl Phys Lett 2006;89:143106
- [22] Hass J, et al, Phys Rev Lett 2008;100:125504
- [23] Kim S, et al, Phys Rev Lett 2008;100:176802
- [24] Varchon F, et al, Phys Rev B 2008;77:235412
- [25] Emtsev KV, et al, Phys Rev B 2008;77:155303
- [26] Emery JD, et al. Phys Rev Lett 2013;111:215501
- [27] Bennett, C. O., et al, Phys. Rev. Lett. 103 (2009) 246804
- [28] C. Riedl, et al, Phys. Rev. Lett. 103 (2009) 246804
- [29] Kim, K. S. et al. Nature 457, 706–710 (2009)
- [30] Reina, A. et al. Nano Lett. 9, 30–35 (2009)
- [31] Bae, S. et al. Nature Nanotech. 4, 574–578 (2010)
- [32] Wang, Y. et al, ACS Nano 5, 9927–9933 (2011)
- [33] Li, X. S. et al, Science 324, 1312–1314 (2009)
- [34] Gao, L. B. et al, Appl. Phys. Lett. 97, 183109 (2010)
- [35] Li, X. S. et al, Nano Lett. 10, 4328–4334 (2010)
- [36] Gao, L., Guest, J. R. & Guisinger, N. P., Nano Lett. 10, 3512–3516 (2010)
- [37] Wofford, J. M., Nano Lett. 10, 4890–4896 (2010)
- [38] Li, X. S. et al, J. Am. Chem. Soc. 133, 2816–2819 (2011)
- [39] Huang, P. Y. et al, Nature 469, 389–392 (2011)
- [40] Yazyev, O. V. & Louie, S. G., Nat. Mater. 9, 806–809 (2010)
- [41] Grzegorz Lupina, et al, ACS Nano, 2015, 9 (5), pp 4776–4785
- [42] Z.Luo et al., J.Mater.Chem. 21, 8038, (2011)
- [43] N.Dwivedi et al., Sci.Rep. 5, 11607, (2015)

- [44] H.Chou et al., Nat.Commun. 6, 7482 (2015)  
[45] Lippert, Gunther et al, Carbon 75, 104–112 (2014)  
[46] Lee, Jae-Hyun et al, Science 344, 286–289 (2014).

