

Dr inż. Alicja Bachmatiuk

Centrum Materiałów Polimerowych i Węglowych Polskiej Akademii Nauk

AUTOREFERAT

ZAŁĄCZNIK 2

DO WNIOSKU O PRZEPROWADZENIE POSTĘPOWANIA HABILITACYJNEGO

Zabrze, 30.04.2016

SPIS TREŚCI

1.	Imię i nazwisko habilitanta.....	2
2.	Wykształcenie i stopnie naukowe.....	2
3.	Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych.....	2
4.	Działalność naukowo-badawcza.....	3
4.1.	Przed uzyskaniem stopnia doktora.....	3
4.2.	Po uzyskaniu stopnia doktora.....	3
5.	Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.).....	4
5.1.	Tytuł osiągnięcia naukowego.....	4
5.2.	Cykl publikacji powiązanych tematycznie – spis prac.....	4
5.3.	Omówienie celu naukowego prac.....	6
5.4.	Wyniki badań.....	7
5.5.	Podsumowanie i wykorzystanie wyników.....	16
6.	Przyszłe cele badawcze.....	19
7.	Współpraca z jednostkami naukowymi.....	20
8.	Doświadczenie naukowe zdobyte w kraju i za granicą.....	20
9.	Działalność dydaktyczna.....	21
10.	Działalność organizacyjna i na rzecz środowiska naukowego.....	21
11.	Dorobek naukowy obejmujący lata 2006-2016 – zestawienie.....	21
11.1.	Przed uzyskaniem stopnia doktora.....	22
11.2.	Po uzyskaniu stopnia doktora (w 2009 r.).....	22
12.	Publikacje stanowiące dorobek naukowy – lista.....	23
12.1.	Przed uzyskaniem stopnia doktora.....	23
12.2.	Po uzyskaniu stopnia doktora.....	24
13.	Wystąpienia konferencyjne stanowiące dorobek naukowy – lista.....	33
13.1.	Przed uzyskaniem stopnia doktora.....	33
13.2.	Po uzyskaniu stopnia doktora.....	33

1. Imię i nazwisko habilitanta

Alicja Bachmatiuk

2. Wykształcenie i stopnie naukowe

10. 2005 – 01. 2009 Stopień doktora z technologii chemicznej na Zachodnio-pomorskim Uniwersytecie Technologicznym, tytuł pracy: *„Badania nad technologią otrzymywania i właściwościami nanorurek węglowych”*.
Promotor: prof. dr hab. inż. Ryszard J. Kaleńczuk,
Recenzenci: prof. dr hab. inż. Henryk Górecki, Politechnika Wrocławska; prof. dr hab. inż. Urszula Narkiewicz, Zachodnio-pomorski Uniwersytet Technologiczny.
01. 2008 – 06. 2008 Kurs pedagogiczny dla nauczycieli akademickich.
10. 2000 – 07. 2005 Tytuł magistra inżyniera z technologii chemicznej nieorganicznej na Politechnice Szczecińskiej, tytuł pracy: *„Badania procesu otrzymywania wysokoazotowych granulowanych nawozów wieloskładnikowych”*.
Promotor: prof. dr hab. inż. Barbara Grzmil.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

08. 2015 – do teraz Kierownik laboratorium mikroskopii elektronowej,
Wrocławskie Centrum Badań EIT+.
08. 2013 – do teraz Adiunkt, Centrum Materiałów Polimerowych i Węglowych PAN,
Zabrze.
07. 2013 – 12. 2014 Research Professor na Sungkyunkwan University, Suwon, Korea Południowa.
09. 2012 – 06. 2013 Kierownik laboratorium mikroskopii elektronowej,
Wrocławskie Centrum Badań EIT+.
02. 2009 – 11. 2012 Staż podoktorski w Leibniz Institute for Solid State and Materials Research (IFW Dresden), Niemcy;
stypendysta RTN Marie Curie i Fundacji Alexandra von Humboldta.
02. 2008 – 01. 2010 Asystent naukowy na Zachodniopomorskim Uniwersytecie Technologicznym w Szczecinie.

4. Działalność naukowo-badawcza

4.1. Przed uzyskaniem stopnia doktora

W 2000 r. ukończyłam I Liceum Ogólnokształcące im. Marii Skłodowskiej-Curie w Szczecinie o profilu biologiczno-chemicznym. W tym samym roku rozpoczęłam studia na kierunku Technologia Chemiczna na Wydziale Technologii i Inżynierii Chemicznej Politechniki Szczecińskiej. W ramach pracy magisterskiej pod kierunkiem prof. Barbary Grzmil prowadziłam badania procesów otrzymywania wysokoazotowych nawozów wieloskładnikowych z dodatkiem mocznika.

Po obronie pracy magisterskiej rozpoczęłam studia doktoranckie na Politechnice Szczecińskiej na wydziale Technologii i Inżynierii Chemicznej pod opieką prof. Ryszarda Kaleńczuka i dr Ewy Borowiak-Paleń. Badania prowadzone w ramach pracy doktorskiej dotyczyły opracowania procesów otrzymywania, modyfikacji i badania własności nanorurek węglowych. Do wytwarzania nanorurek węglowych (jedno-, dwu- i wielościennych) wykorzystywałam technikę chemicznego osadzania z fazy gazowej (CVD). Jako źródła węgla wykorzystywałam głównie metan i alkohol etylowy, procesy prowadziłam pod ciśnieniem atmosferycznym w przepływach gazu obojętnego, jak również pod obniżonym ciśnieniem [A8-A13, A15-A17]. Do modyfikacji nanorurek węglowych wykorzystywałam związki żelaza [A1, A2, A6, A14], chlorek srebra [A5, P4] i związki tytanu [A2, P1], azotan (V) kobaltu [P2] oraz azotan (V) niklu [P3]. Prace wykonywane w ramach doktoratu zostały ujęte w 17 publikacjach [A1-A17]. Zostały także zaprezentowane przeze mnie jako 2 wystąpienia konferencyjne. Modyfikacja nanorurek węglowych była ponadto przedmiotem 4 patentów [P1-P4]. 26 stycznia 2009 r. obroniłam z wyróżnieniem pracę doktorską pt.: „Badania nad technologią otrzymywania i właściwościami nanorurek węglowych”.

4.2. Po uzyskaniu stopnia doktora

Po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych 26 stycznia 2009 roku wyjechałam do Dreżna na staż podoktorski do Leibniz Institute for Solid State and Materials Research (IFW Dresden) w ramach projektu „Carbio” – Marie Curie Research Training Networks (RTN) oraz jako stypendysta fundacji Alexandra von Humboldta. Prowadzone przeze mnie badania dotyczyły otrzymywania nanorurek węglowych, włókien węglowych oraz grafenu z wykorzystaniem katalizatorów niemetalicznych i technik CVD [B1, B4-B6, B8, B12, B13, B16, B18, B21, B25-B27, B33]. Równocześnie prowadziłam prace nad zastosowaniem transmisyjnej mikroskopii elektronowej do obrazowania materiałów, zwłaszcza węglowych [B2, B3, B7, B9-B11, B14, B15, B17, B19, B20, B22, B24, B28, B29, B36, B38]. We wrześniu 2012 roku rozpoczęłam pracę we Wrocławskim Centrum Badań EIT + na stanowisku kierownika laboratorium mikroskopii elektronowej, jednak pod koniec czerwca 2013 roku z powodu braku odpowiedniego sprzętu do moich badań złożyłam rezygnację. Od lipca 2013 rozpoczęłam równoległe pracę w dwóch ośrodkach badawczych, jednym w Polsce – Centrum Materiałów Polimerowych i Węglowych Polskiej Akademii Nauk (CMPW PAN) w Zabrze jako specjalista, a następnie adiunkt, oraz w drugim ośrodku w Korei Południowej w Suwon na

uniwersytecie Sungkyunkwan (SKKU) jako Research Professor. Zająłam się tematyką związaną z wytwarzaniem i charakteryzacją materiałów węglowych (grafen 2D, 3D, tlenek grafenu) oraz innymi materiałami dwuwymiarowymi jak dichalkogenki metali przejściowych, azotek boru i fosforen [B62, B64, B66, B68-B72]. W międzyczasie uzyskałam finansowanie z Fundacji na rzecz Nauki Polskiej w programie Homing Plus (2013-2015: „Direct synthesis of graphene and 3D-graphene structures over metal oxide supports”), w ramach którego powstało 7 publikacji [B63, B68, B69, B70, B74, B77, B78].

Pod koniec grudnia 2014 roku zakończyłam prace na uniwersytecie SKKU w Korei Południowej, natomiast kontynuuję pracę w CMPW PAN w Zabrze gdzie zajmuję się tematyką związaną z wytwarzaniem grafenowych form 2D (grafenu oraz tlenku grafenu). Od marca 2015 r. realizuję projekt z Narodowego Centrum Nauki (Sonata 7) związany z wykorzystaniem materiałów grafenowych do procesów separacji w ramach którego powstały trzy prace [B76, B81, B83]. Dodatkowo od sierpnia 2015 r. do dnia dzisiejszego pracuję w wymiarze czasu 0,5 etatu we Wrocławskim Centrum Badań EIT+, ponownie jako kierownik laboratorium mikroskopii elektronowej. Decyzję tę podjęłam ze względu na możliwość dostępu do niezbędnego do moich badań, najlepszego w Polsce, wysokorozdzielczego transmisyjnego mikroskopu elektronowego z podwójną korekcją aberracji sferycznej zarówno dla wiązki elektronowej jak i dla uzyskiwanego obrazu.

5. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z 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.)

5.1. Tytuł osiągnięcia naukowego

OTRZYMYWANIE I CHARAKTERYSTYKA RÓŻNOWYMIAROWYCH MATERIAŁÓW WĘGLOWYCH NA PODŁOŻACH CERAMICZNYCH I METALICZNYCH.

5.2. Cykl publikacji powiązanych tematycznie – spis prac

(*) Autor korespondencyjny

H1 Bachmatiuk A.*, Börrnert F., Grobosch M., Schäffel F., Wolff U., Scott A., Zaka M., Warner J.H., Klingeler R., Knupfer M., Büchner B., Rümmeli M.H.* (2009): *Investigating the Graphitization Mechanism of SiO₂ Nanoparticles in Chemical Vapor Deposition*. ACS Nano 3, 4098-4104. **IF (2009) = 7,493**

Szacowany udział własny = 70 %; ilość cytowań: 46

H2 Bachmatiuk A.*, Börrnert F., Schäffel F., Zaka M., Simha Martynkova G., Placha D., Schoenfelder R., Costa P.M.F.J., Ioannides N., Warner J.H., Klingeler R., Büchner B., Rümmeli M.H. (2010): *The formation of stacked-cup carbon nanotubes using chemical vapor deposition from ethanol over silica*. Carbon 48, 3175-3181. **IF (2010) = 4,896**

Szacowany udział własny = 80 %; ilość cytowań: 18

- H3** Rümmeli M.H.*, Bachmatiuk A., Scott A., Börrnert F., Warner J.H., Hoffmann V., Lin J.H., Cuniberti G., Büchner B. (2010): *Direct low-temperature nanographene CVD synthesis over a dielectric insulator*. ACS Nano 4, 4206-4210. **IF (2010) = 9,865**
Szacowany udział własny = 50 %; ilość cytowań: 105
- H4** Scott A., Dianat A., Börrnert F.*, Bachmatiuk A., Zhang S., Warner J.H., Borowiak-Palen E., Knupfer M., Büchner B., Cuniberti G., Rümmele M.H.* (2011): *The catalytic potential of high K dielectrics for graphene formation*. Applied Physics Letters 98, 073110/1-3. **IF (2011) = 3,844**
Szacowany udział własny = 40 %; ilość cytowań: 21
- H5** Bachmatiuk A.*, Börrnert F., Hoffmann V., Lindackers D., Lin J.H., Büchner B., Rümmele M.H. (2011): *Hydrogen induced self-assembly of helical carbon nanostructures from ethanol over SiO₂ catalysts*. Journal of Applied Physics 109, 94317/1-4. **IF (2014) = 2,168** Szacowany udział własny = 80 %; ilość cytowań: 3
- H6** Rümmele M.H.*, Gorantla S., Bachmatiuk A., Phielers J., Geißler N., Ibrahim I., Pang J., Eckert J. (2013): *On the Role of Vapor Trapping for Chemical Vapor Deposition (CVD) Grown Graphene over Copper*. Chemistry of Materials 25, 4861–4866. **IF (2014) = 8,535**
Szacowany udział własny = 40 %; ilość cytowań: 6
- H7** Bachmatiuk A., Mendes R.G., Hirsch C., Jähne C., Lohe M.R., Grothe J., Kaskel S., Fu L., Klingeler R., Eckert J., Wick P., Rümmele M.H.* (2014): *Few-Layer Graphene Shells and Nonmagnetic Encapsulates: A Versatile and Nontoxic Carbon Nanomaterial*. ACS Nano 7, 10552–10562. **IF (2014) = 12,881**
Szacowany udział własny = 65 %; ilość cytowań: 6
- H8** Bachmatiuk A., Dianat A., Ortmann F., Quang H. T., Cichocka M. O., Gonzalez-Martinez I., Fu L., Rellinghaus B., Eckert J., Cuniberti G., Rümmele M.H.* (2014): *Graphene Coatings for the Mitigation of Electron Stimulated Desorption and Fullerene Cap Formation*. Chemistry of Materials 26, 4998. **IF (2014) = 8,354**
Szacowany udział własny = 50 %; ilość cytowań: 0
- H9** Pang J., Bachmatiuk A., Fu L., Yan C., Zeng M., Wang J., Trzebicka B., Gemming T., Eckert J., Rümmele M.H.* (2015): *Oxidation as a means to remove surface contaminants on Cu foil prior to graphene growth by chemical vapor deposition*. Journal of Physical Chemistry C 119, 13363-13368. **IF (2014) = 4,772**
Szacowany udział własny = 50 %; ilość cytowań: 1
- H10** Bachmatiuk A., Boeckl J., Smith H., Ibrahim I., Gemming T., Oswald S.; Kazmierczak W., Makarov D., Schmidt O., Eckert J., Fu L., Rümmele M.H.* (2015): *Vertical Graphene Growth from Amorphous Carbon Films using Oxidizing Gases*.

Journal of Physical Chemistry C 119, 17965-17970. IF (2014) = 4,772

Szacowany udział własny = 70 %; ilość cytowań: 1

- H11** Pang J., Bachmatiuk A., Fu L., Mendes R.G., Libera M., Placha D., Simha Martynkova G., Trzebicka B., Gemming T., Eckert J., Rummeli, M.H.* (2015): *Direct synthesis of graphene from adsorbed organic solvent molecules over copper*. RSC Advances 5, 60884-60891. IF (2014) = 3,840

Szacowany udział własny = 50 %; ilość cytowań: 1

Sumaryczny impact factor cyklu publikacji (11 prac) wchodzącego w skład rozprawy habilitacyjnej według listy Journal Citation Reports, zgodnie z rokiem opublikowania: **70,364**

5.3. Omówienie celu naukowego wyżej wymienionych prac

Ze względu na swoje wyjątkowe właściwości nanorurki węglowe i grafen mogą znaleźć zastosowanie w różnych dziedzinach takich jak: wytwarzanie wysokowytrzymałych kompozytów^{1,2}, wytwarzanie katod do emisji polowej elektronów^{3,4}, wytwarzanie sond skanujących dla mikroskopii^{5,6} czy elektronika molekularna^{7,8}. Powszechnie uważa się, że do syntezy tych materiałów niezbędny jest katalizator metaliczny, pomimo innych odmiennych doniesień literaturowych, zwłaszcza pionierskiej pracy Iijimy⁹, który otrzymał nanorurki węglowe bez udziału jakiegokolwiek katalizatora. To błędne przekonanie prawdopodobnie powstało ze względu na sukces katalizatorów metalicznych w procesach otrzymywania struktur węglowych. Ogólnie uważa się, że katalizowany metalami wzrost nanorurek węglowych zachodzi poprzez wytworzenie stopu metal-węgiel, który może występować zarówno w postaci ciekłej, jak i niezwykle ruchliwej postaci stałej, tzw. „liquidlike”. Następnie węgiel wytrąca się ze stopu zgodnie z mechanizmem para-ciecz-ciało stałe (*eng.* vapor-liquid-solid – VLS)¹⁰.

Jednym z największych problemów związanych z wykorzystaniem do dalszych zastosowań materiałów węglowych otrzymanych typową metodą (wykorzystującą metale) jest trudność ich wytwarzania w sposób czysty i powtarzalny. Zanieczyszczenia metaliczne bardzo często

¹ Ma W., Liu L., Zhang Z., Yang R., Liu G., Zhang T., An X., Yi X., Ren Y., Niu Z., et al. (2009): *High-Strength Composite Fibers: Realizing True Potential of Carbon Nanotubes in Polymer Matrix through Continuous Reticulate Architecture and Molecular Level Couplings*. Nano Letters 9, 2855–2861.

² Stankovich S., Dikin, D. A., Dommett G. H. B., Kohlhaas K. M., Zimney E. J., Stach E. A., Piner R. D., Nguyen S. T., Ruoff R. S. (2006): *Graphene-Based Composite Materials*. Nature 442, 282–286.

³ de Heer W. A., Chatelain A., Ugarte D. A. A (1995): *Carbon Nanotube Field-Emission Electron Source*. Science 270, 1179–1180.

⁴ Tans S. J., Verschueren A., Dekker C. (1998): *Room-Temperature Transistor Based on a Single Carbon Nanotube*. Nature 393, 49–52.

⁵ Dai H. J., Hafner J. H., Rinzler A. G., Colbert D. T., Smalley R. E. (1996): *Nanotubes as Nanoprobes in Scanning Probe Microscopy*. Nature 384, 147–150.

⁶ Hafner J., Cheung C., Lieber C. (1998): *Growth of Nanotubes for Probe Microscopy Tips*. Nature 398, 761–762.

⁷ Martel R., Schmidt T., Shea H. R., Hertel T., Avarious P. (1998): *Single- and Multi-Wall Carbon Nanotube Field-Effect Transistors*. Appl. Phys. Lett. 73, 2447–2449.

⁸ Soh H., Morpungo A., Kong J., Marcus C., Quante C., Dai H. (1999): *Integrated Nanotube Circuits: Controlled Growth and Ohmic Contacting of Single-Walled Carbon Nanotubes*. Appl. Phys. Lett. 75, 627.

⁹ Iijima S. (1991): *Helical Microtubules of Graphitic Carbon*. Nature 354, 56–58.

¹⁰ Wagner R. S., Ellis W. C. (1964): *Vapor-Liquid-Solid Mechanism of Single Crystal Growth*. Appl. Phys. Lett. 4, 89–90.

przeszkadzają zastosowaniu materiałów węglowych w elektronice, w magazynowaniu energii, w medycynie. Zakłócają one bowiem przewodnictwo prądowe, a także mają wpływ na toksyczność biologiczną. Aby grafen mógł być wykorzystywany w elektronice musi być wytwarzany w sposób powtarzalny. Zarówno jego budowa jak i skład nie mogą się różnić w kolejnych procesach. Struktura grafenu musi być płaska i nie może zawierać zanieczyszczeń metalicznych. Do celów aplikacyjnych nie nadają się również materiały grafenowe wyizolowane z bardzo czystych grafitów krystalicznych czy też z powierzchni węgla krzemu, ponieważ warstwy grafenowe otrzymane w ten sposób różnią się rozmiarem i kształtem oraz zawierają tworzące się podczas tego procesu defekty. Rozwiązanie problemu otrzymywania wolnych od zanieczyszczeń metalicznych struktur węglowych jest więc decydujące dla dalszych możliwości wykorzystywania tych materiałów. Fakt ten skłonił mnie do zorientowania moich badań na poszukiwanie metod wytwarzania czystych struktur węglowych o powtarzalnych i kontrolowanych parametrach przy równoczesnym wykorzystaniu łatwo dostępnych źródeł węgla i uproszczeniu procesu.

Celem prowadzonych przeze mnie badań było opracowanie metod wytwarzania nanomateriałów węglowych o strukturze sp^2 , o pożądanych właściwościach i o odpowiedniej czystości na podłożach tlenkowych i metalicznych z wykorzystaniem techniki CVD. Struktura i właściwości otrzymanych materiałów węglowych zostały scharakteryzowane pod kątem morfologii, składu, czystości oraz przewidywanych zastosowań.

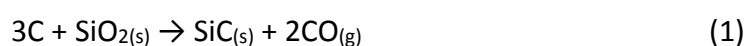
5.4. Wyniki badań

Publikacje przedstawione jako osiągnięcie naukowe omawiają wpływ metod otrzymywania materiałów węglowych o różnej morfologii – nanorurek węglowych, nanowłókien, grafenu (w postaci dwu- i trójwymiarowej), oraz fulerenów na ich strukturę i parametry. Materiały, opisane w pracach [H1-H5, H7, H8, H10] wytwarzane były w wyniku procesów chemicznego osadzania par z fazy gazowej na katalizatorach ceramicznych i metalicznych [H6, H9, H11] przy wykorzystaniu różnych źródeł węgla, różnych atmosfer reakcyjnych i różnych temperatur. Przeprowadzone badania wykazały, że otrzymywane materiały powstawały w sposób powtarzalny i charakteryzowały się wysokim stopniem czystości (wyeliminowanie zanieczyszczeń metalicznych).

Wykorzystanie katalizatora SiO_2 do syntezy materiałów węglowych (H1, H2, H5)

W syntezie materiałów węglowych z wykorzystaniem katalizatora SiO_2 kluczowe jest ustalenie, czy katalizator podczas syntezy CVD ulega redukcji do węgla krzemu.

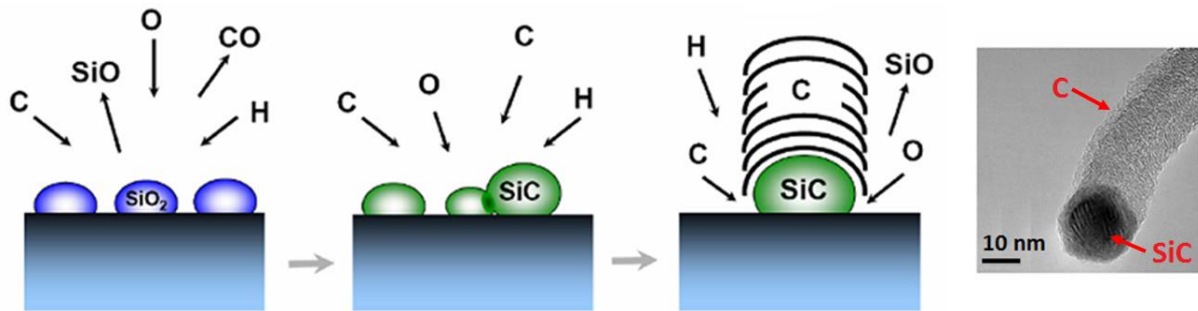
Przeprowadzone przeze mnie badania wykazały, że proces wytwarzania materiałów węglowych na powierzchni SiO_2 z wykorzystaniem techniki CVD zachodzi dzięki mechanizmowi VLS. W reakcji tej dwutlenek krzemu (VI) przechodzi w wysyconą węglem formę węgla, z którego następnie wytrąca się węgiel w postaci zgrafityzowanej [H1, H2, H5]. Proces ten zwany redukcją karbotermiczną zachodzi podczas endotermicznej reakcji:



która może być podzielona na dwie reakcje pośrednie, z wytworzeniem SiO jako produktu pośredniego



Na rysunku 1 przedstawiono schemat powstawania włókien węglowych na powierzchni nośnika kwarcowego.



Rys. 1. Schemat powstawania włókien węglowych w procesie karbotermicznej redukcji na powierzchni nośnika kwarcowego (wyniki z pracy **H1**).

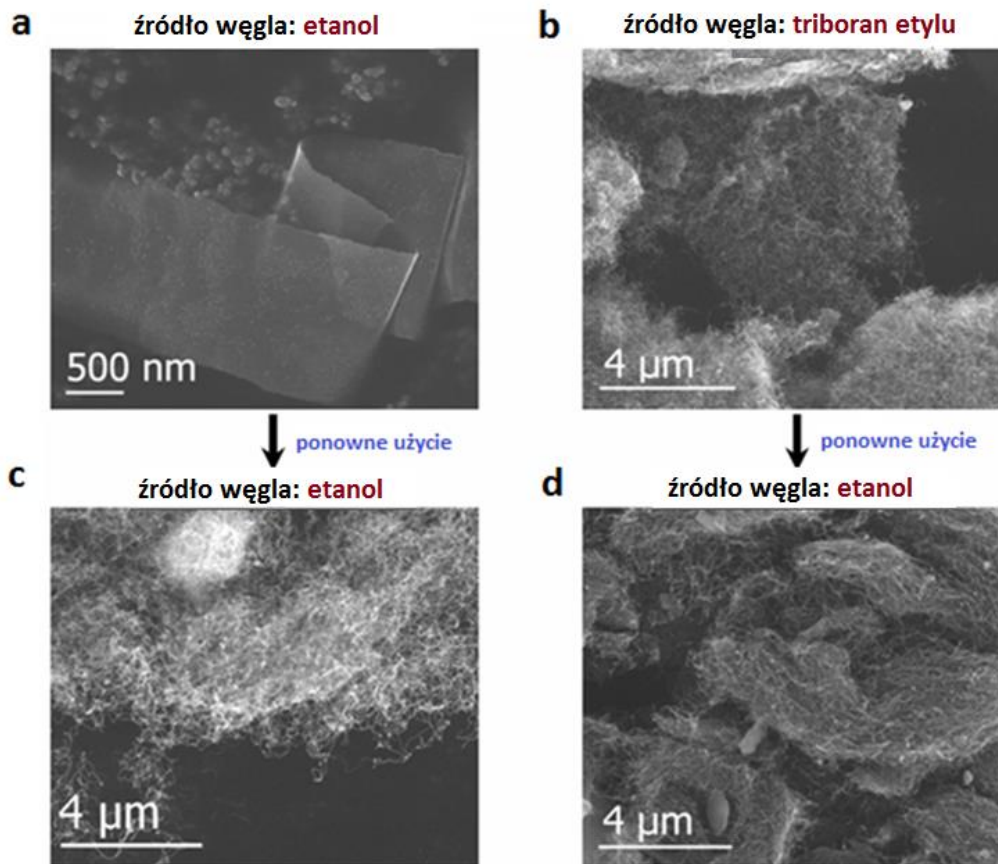
W pierwszym etapie reakcji z obecnych na powierzchni kwarcu cząstek SiO₂ tworzą się cząstki SiC, które następnie spiekają się w większe cząstki. Po uzyskaniu wysokiego nasycenia węglem, węgiel zaczyna się wytrącać w formie zgrafityzowanej, w tym przypadku w formie włókien.

Na podstawie przeglądu literaturowego potwierdzono, że proces redukcji karbotermicznej SiO₂ do SiC został również zaobserwowany w badaniach teoretycznych, gdzie nanocząstki SiO₂ wysycane były węglem uzyskanym z metanu¹¹. Proces ten można przyspieszyć dodając do atmosfery reakcyjnej tlenek boru, który powoduje obniżenie temperatury topnienia SiO₂¹². Zjawisko to wykorzystałam w procesie otrzymywania włókien węglowych na podłożach kwarcowych dodając boran trietylu do alkoholu etylowego. Taki roztwór stosowałam jako źródło węgla w procesie CVD z wykorzystaniem dozowania aerozolowego (*aerosol assisted CVD* – AACVD), pod ciśnieniem atmosferycznym. Po dodaniu boranu trietylu można było zauważyć znaczny wzrost wydajności tworzenia się włókien węglowych. Zaobserwowano również, że ponowne użycie podłoży kwarcowych po procesie bez dodatku i z dodatkiem tlenku boru prowadzi do wzrostu wydajności i szybkości wytwarzania materiału węglowego [**H1**, **H2**]. Metodą spektroskopii w podczerwieni wykazano, że przyspieszony wzrost spowodowany jest powstawaniem związków przejściowych na podłożach kwarcowych Si-O-H bez dodatku boru, oraz dodatkowo Si-O-B gdy zostało użyte źródło boru. Podczas procesu CVD obydwa związki przejściowe w szybki sposób ulegają transformacji do węgla krzemowego, następnie ulegają wysyceniu węglem, co powoduje wytrącanie materiału węglowego. Na rysunku 2 przedstawiono zdjęcia ze skaningowego

¹¹ Page A.J., Chandrakumar K. R. S., Irle S., Morokuma K. (2011): *SWNT Nucleation from Carbon-Coated SiO₂ Nanoparticles via a Vapor-Solid-Solid Mechanism*. J. Am. Chem. Soc. 133, 621–628.

¹² Hlavac J. (1983): *Glass Science and Technology, The Technology of Glass and Ceramics*; Elsevier: Czechoslovakia, 12–13.

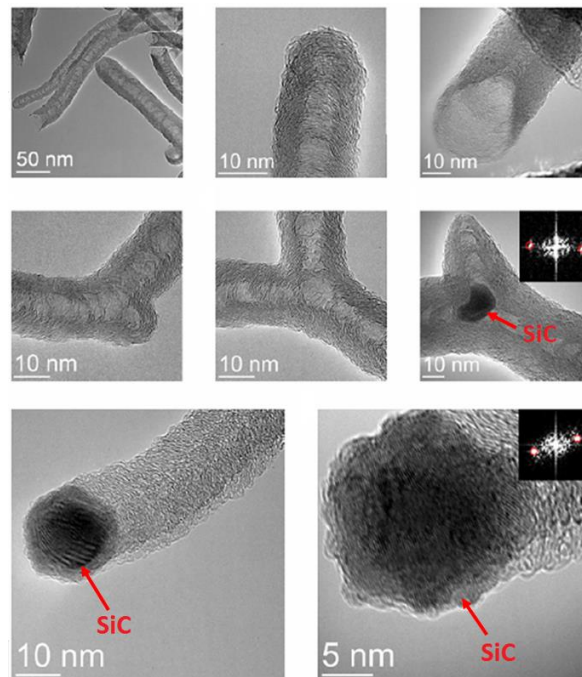
mikroskopu elektronowego pokazujące ilość wytworzonego materiału węglowego na powierzchni nośników kwarcowych przy wykorzystaniu etanolu i boranu trietylu jako źródeł węgla.



Rys. 2. Zdjęcia materiałów węglowych otrzymanych na powierzchniach kwarcowych przy wykorzystaniu etanolu i boranu trietylu jako źródeł węgla (a, b), oraz otrzymanych z wykorzystaniem etanolu na ponownie wykorzystanych podłożach (c, d) (wyniki z pracy **H1**).

Przy wykorzystaniu tylko etanolu jako źródła węgla na świeżym podłożu kwarcowym (Rys. 2. a) uzyskano tylko warstwy węglowe o budowie amorficznej z niewielkimi zaczątkami grafityzacji. Następnie usunięto materiał węglowy z powierzchni nośnika poprzez wypalenie go w atmosferze powietrza. Ponowne użycie nośnika do procesu CVD z wykorzystaniem etanolu powoduje wytworzenie materiału węglowego w postaci włókien (Rys. 2 c). W przypadku procesu z wykorzystaniem mieszaniny etanolu z dodatkiem boranu trietylu otrzymano materiał węglowy w postaci włókien na świeżym podłożu kwarcowym (Rys. 2 b). Ponowne wykorzystanie nośnika (po usunięciu węgla poprzez wypalenie w powietrzu) w reakcji CVD z wykorzystaniem tylko etanolu jako źródła węgla skutkowało wytworzeniem większej ilości materiału węglowego w postaci włókien (Rys 2. d). Eksperymenty te dowiodły, że dla wytworzenia materiału węglowego w postaci włókien na powierzchni kwarcu kluczowa jest modyfikacja powierzchni nośnika prowadząca do powstania związków przejściowych, które przekształcając się w węglík krzemu, przyspieszają i katalizują tworzenie się zgrafityzowanego materiału węglowego w postaci włókien [**H1**, **H2**]. Analizując budowę

otrzymanych włóknistych materiałów węglowych metodą transmisyjnej mikroskopii elektronowej stwierdzono, że materiałem tym są nanorurki. Okazało się jednak, że ich struktura nie przypomina struktury typowych nanorurek węglowych gdzie występują homogenicznie ułożone warstwy węgla, lecz zbliżona jest bardziej do nanorurek o budowie bambusowej (Rys. 3). Zdjęcia TEM wykazały także, że na końcach włókien lub w ich wnętrzu znajdują się kryształy potwierdzające tworzenie się węgla krzemu podczas syntezy materiałów węglowych na powierzchniach kwarcowych (Rys. 3). [H1, H2].



Rys. 3. Przykładowe zdjęcia TEM materiałów węglowych otrzymanych na powierzchniach kwarcowych przy wykorzystaniu etanolu i boranu trietylu jako źródeł węgla (wyniki z pracy H1).

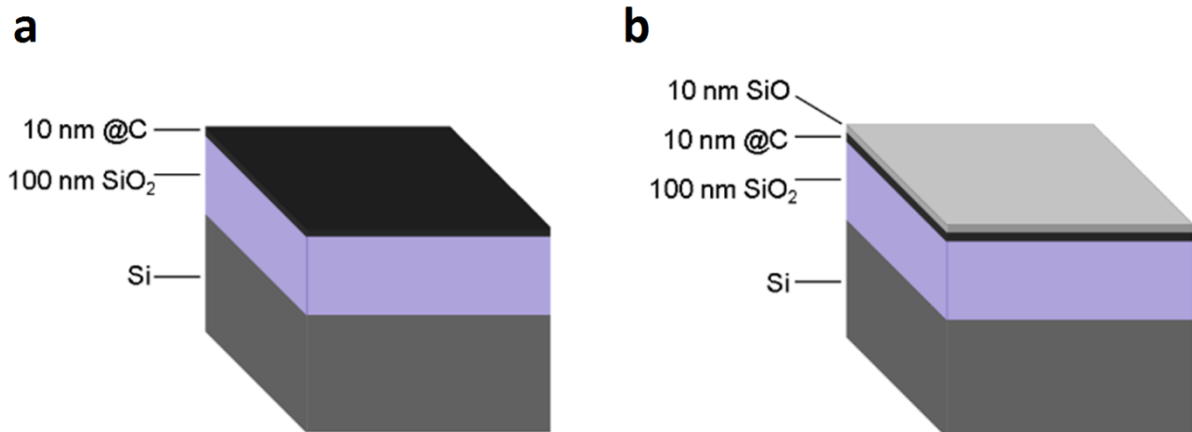
W celu uzyskania materiałów węglowych o bardziej uporządkowanej strukturze, postanowiłam zmodyfikować proces syntezy nanowłókien dodając do mieszaniny reakcyjnej wodór. Zauważyłam, że dodatek wodoru podczas syntezy AACVD na podłożu kwarcowym prowadzi do tworzenia się struktur bardziej skomplikowanych – charakterystycznych spirali.

Wykazałam, że obecność rodników wodorowych prowadzi do wytrawiania powierzchni włókien tworząc wiązania nienasycone, które łączą się z wiązaniami sąsiednich włókien prowadząc do powstania charakterystycznych spirali składających się z kilku nanowłókien [H5]. Wykazałam, że na powierzchni kwarcu można otrzymać zgrafityzowany materiał węglowy (w tym przypadku nanorurki węglowe) z wykorzystaniem procesu karbotermicznej redukcji, w stosunkowo niskiej jak dla tego procesu temperaturze (900 °C).

Wytwarzanie grafenu na nośnikach krzemowych (H10)

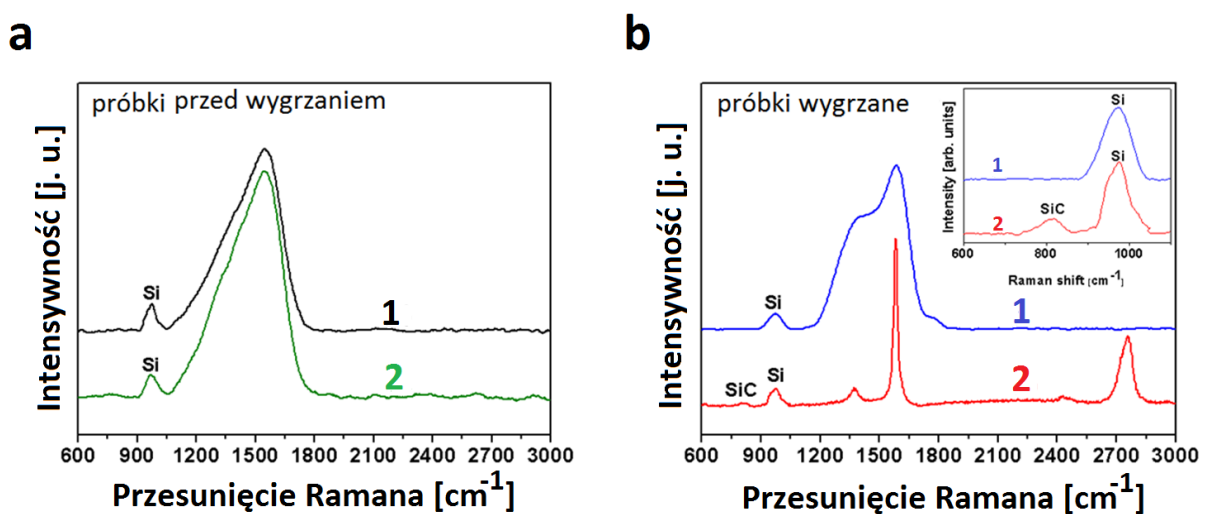
Wykorzystując obserwacje dotyczące wzrostu włókien węglowych na niehomogenicznych podłożach kwarcowych podjęłam próbę wytworzenia grafenu bezpośrednio na komercyjnie dostępnym, płaskim nośniku krzemowym z warstwą SiO₂ o grubości 100 nm. Na nośniku tym

napyłałam węgiel amorficzny (@C) o grubości 10 nm (Rys. 4a) lub pokrywałam napyloną warstwę węglową dodatkowo tlenkiem krzemu (SiO) o grubości 10 nm (Rys. 4b).



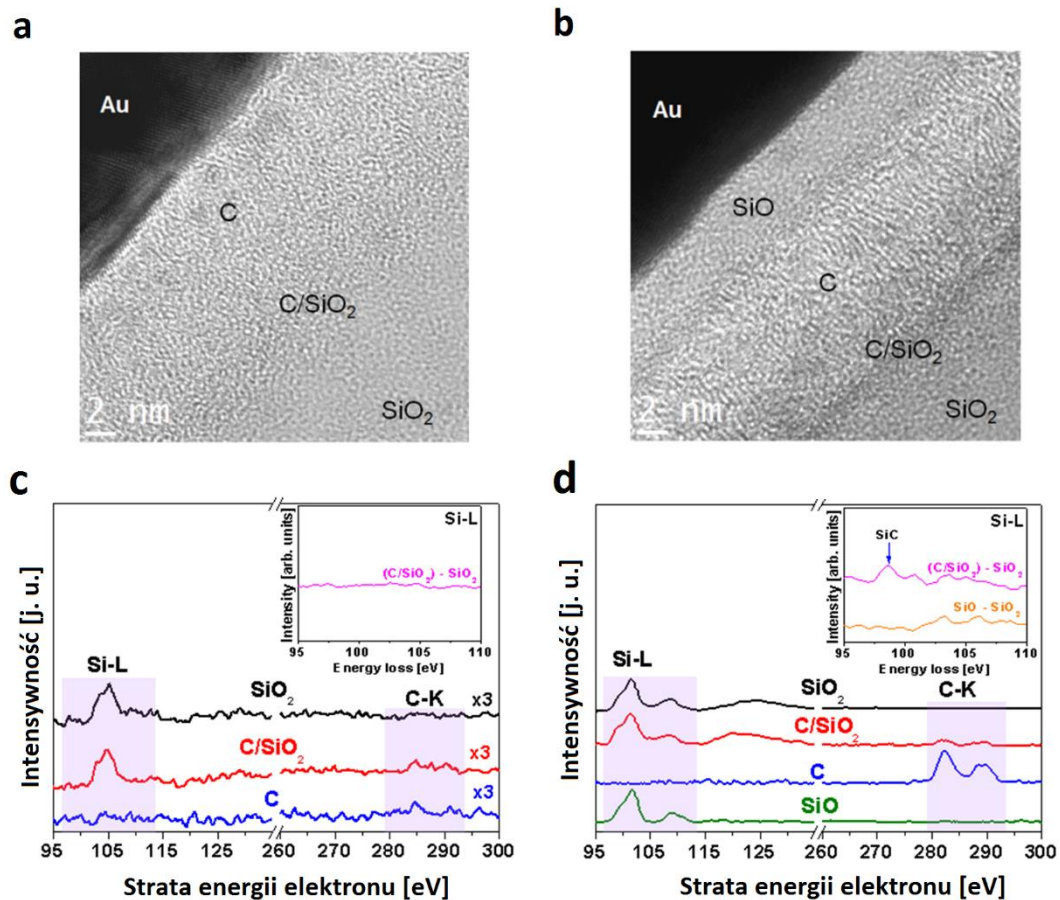
Rys. 4. Schematy nośników krzemowych z warstwą SiO₂ o grubości 100 nm z napyloną warstwą węgla amorficznego – 10 nm (a) i warstwa węgla amorficznego – 10 nm i tlenku krzemu – 10 nm (b) (wyniki z pracy H10).

Warstwy węgla amorficznego zostały w procesie grafityzacji przeprowadzone w warstwy grafenowe w stosunkowo niskiej jak dla tego procesu temperaturze (1000 °C). Proces był prowadzony w próżni $\sim 10^{-7}$ mbar, przez 72 godziny. Przebiegał bez dodatku katalizatora metalicznego. Uzyskane w ten sposób schłodzone próbki zostały zbadane z wykorzystaniem technik spektroskopowych i mikroskopowych. Widma ramanowskie (Rys. 5) przedstawiają zmiany w strukturze próbek przed i po wygrzaniu. Różnice pomiędzy pasmami D i G widoczne w próbkach wygrzanych wskazują na lepszą grafityzację węgla w przypadku próbki pokrytej dodatkowo warstwą 10 nm SiO. W tej samej próbce pojawia się również pasmo świadczące o obecności węgla krzemowego ($\sim 800 \text{ cm}^{-1}$).



Rys. 5. Widma ramanowskie próbek przed wygrzaniem (a) i po wygrzaniu (b); (1) 10 nm @C, (2) 10 nm @C i 10 nm SiO (wyniki z pracy H10).

Dodatkowych informacji o strukturze otrzymanych materiałów dostarczyły badania metodą wysokorozdzielczej transmisyjnej mikroskopii elektronowej i spektroskopii strat energii elektronów (EELS) (Rys. 6).



Rys. 6. Zdjęcia TEM próbek po wygrzaniu: 10 nm @C (a) i 10 nm @C, 10 nm SiO (b) oraz widma EELS próbek po wygrzaniu: 10 nm @C (c) i 10 nm @C, 10 nm SiO (d) (wyniki z pracy **H10**).

Badania TEM dowiodły, że do przeprowadzenia procesu grafityzacji węgla amorficznego bez udziału katalizatora metalicznego i przy użyciu niskiej jak dla tego procesu temperatury konieczne jest wykorzystanie dodatkowo pokrywającej go warstwy SiO, która umożliwia zatrzymywanie gazowych produktów SiO i CO, odpowiadających za proces karbotermicznej redukcji. Wykazano, że na granicy warstw SiO₂ i węgla amorficznego utworzyła się cienka warstwa węglika krzemu (Rys. 6b), co zostało potwierdzone badaniami EELS (Rys. 6d). Powstała warstwa SiC wskazuje na zachodzenie procesu karbotermicznej redukcji SiO₂, ułatwiającej proces grafityzacji. Z niewyjaśnionych do tej pory przyczyn węgiel amorficzny wygrafityzował w kierunku prostopadłym do podłoża [**H10**]. Dodatkowe badania [**B70**] wykazały, że gazy utleniające (CO i H₂O) pomagają w postępie grafityzacji przyspieszając tworzenie wiązań C-C^{13,14}. Opisane w pracy **H10** badania stanowią podstawę do

¹³ Noda T., Inagaki M. (1964): *Effect of Gas Phase on Graphitization of Carbon*. Carbon 2, 127–130.

planowanych obecnie prac nad zastosowaniem gazów utleniających bezpośrednio w procesie grafityzacji warstw węglowych w celu zwiększenia wydajności procesów. Wykazałam, że na powierzchni komercyjnie dostępnych nośników krzemowych można otrzymać zgrafityzowany materiał węglowy (w tym przypadku grafen) z wykorzystaniem procesu karbotermicznej redukcji.

Opracowane procedury wykorzystujące węgiel amorficzny naniesiony na podłoża krzemowe i pokryty warstwą tlenkową są w pełni kompatybilne z obecnymi technologiami półprzewodnikowymi. Dzięki wyeliminowaniu zanieczyszczeń metalicznych właściwości tworzonych z nich potencjalnie układów nie są w żaden sposób zakłócone.

Wykorzystanie innych katalizatorów tlenkowych do syntezy materiałów węglowych (H3, H4, H7, H8)

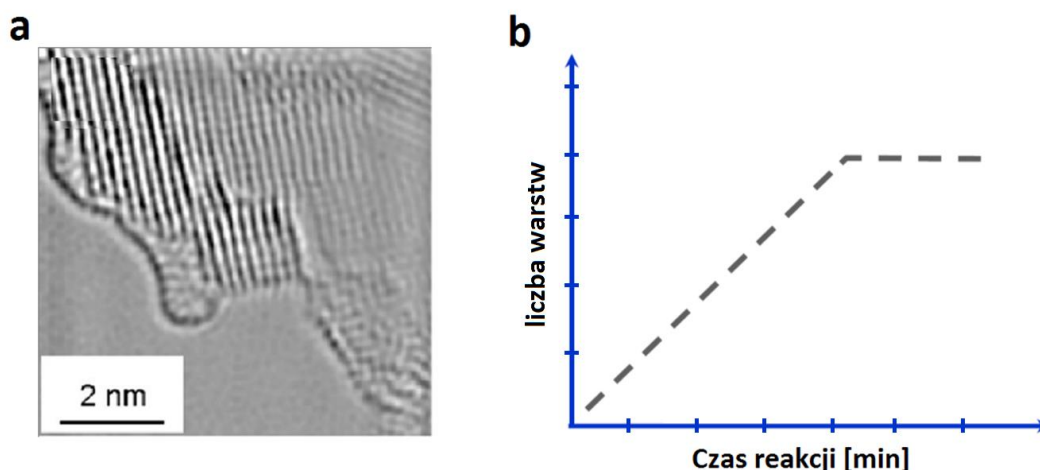
Procedury otrzymania czystych materiałów węglowych bez dalszej potrzeby ich oddzielania od podłoża rozszerzyłam na badania sposobów wytwarzania materiałów węglowych z wykorzystaniem innych niż krzemowe podłoża ceramicznych. Badania te dotyczyły wykorzystania tlenku magnezu, tlenku cyrkonu, tlenku glinu i dwutlenku tytanu jako podłoża oraz cykloheksanu, etanolu i acetylenu jako źródeł węgla [H3, H4, H7, H8]. Wszystkie użyte w badaniach tlenki były w postaci proszkowej. Ułatwiło to późniejsze analizy z metodą transmisyjnej mikroskopii elektronowej, gdzie odpowiednią transparentnością próbki dla elektronów uzyskuje się dla grubości poniżej 100 nm. Procesy otrzymywania materiałów węglowych na powierzchni proszków zachodziły w reaktorze próżniowym, w zakresie temperatur 325 - 800 °C, w czasie od 30 sekund do 10 minut.

Badania dotyczące powstawania materiału grafenowego na powierzchni tlenku magnezu i tlenku cyrkonu ujawniły, że otrzymane płatki grafenowe są różnej wielkości, a ich wzrost zapoczątkowany zostaje na krawędziach kryształów^{15,16}. Proces ten zachodzi atom po atomie zgodnie z mechanizmem typu „*bottom up*” [H3, H4, H8]. W celu potwierdzenia tego mechanizmu zostały przeprowadzone procesy na tlenku magnezu, w niższej temperaturze ~325 °C, z wykorzystaniem acetylenu jako źródła węgla, co pozwoliło na spowolnienie reakcji i uchwycenie początkowego etapu wzrostu materiału grafenowego (Rys. 7 a). Liczba warstw otrzymanego grafenu jest zawsze związana z liczbą dostępnych krawędzi katalitycznych w różnych temperaturach. Na tworzenie warstw nie ma znaczącego wpływu czas, zwłaszcza dla reakcji w wysokich jak dla tego procesu temperaturach ~800 °C, gdzie tworzenie warstw grafenowych następuje niemal natychmiastowo (Rys. 7 b) [H3, H4]. Zwiększanie czasu reakcji po wykorzystaniu dostępnych krawędzi katalitycznych nie wpływa na liczbę tworzących się warstw materiału grafenowego. Obserwacje te odnoszą się do wszystkich przebadanych tlenków w tej części badań (MgO, TiO₂, Al₂O₃, ZrO₂).

¹⁴ Noda T., Inagaki M., Sekiya T. (1965): *Kinetic Studies of the Graphitization Process-I Effect of Ambient Gas Phase on the Rate of Graphitization*. Carbon 3, 175–180.

¹⁵ Rummeli M. H., Kramberger C., Gruneis A., Ayala P., Gemming T., Buchner B., Pichler, T. (2007): *On the Graphitization Nature of Oxides for the Formation of Carbon Nanostructures*. Chem. Mater. 19, 4105–4107.

¹⁶ Kusunoki M., Rokkaku M., Suzuki T. (1997): *Epitaxial Carbon Nanotube Film Self-Organized by Sublimation Decomposition of Silicon Carbide*. Appl. Phys. Lett. 71, 2620–2622.



Rys. 7.a) Przykładowe zdjęcie TEM krawędzi kryształu MgO z warstwą grafenową na powierzchni, b) wykres zależności czasu reakcji od ilości otrzymywanych warstw grafenowych na powierzchniach tlenkowych (wyniki z pracy **H3** i **H4**).

Prace, stanowiące przedmiot niniejszej rozprawy, były zorientowane głównie na optymalizację metod syntezy materiałów grafenowych. Już jednak w trakcie syntez okazało się, że otwierają one drogę do otrzymywania materiałów o nieoczekiwanych, najprawdopodobniej istotnych właściwościach. Prace te są kontynuowane. Poniżej zostaną jedynie zasygnalizowane otrzymane już, obiecujące wyniki.

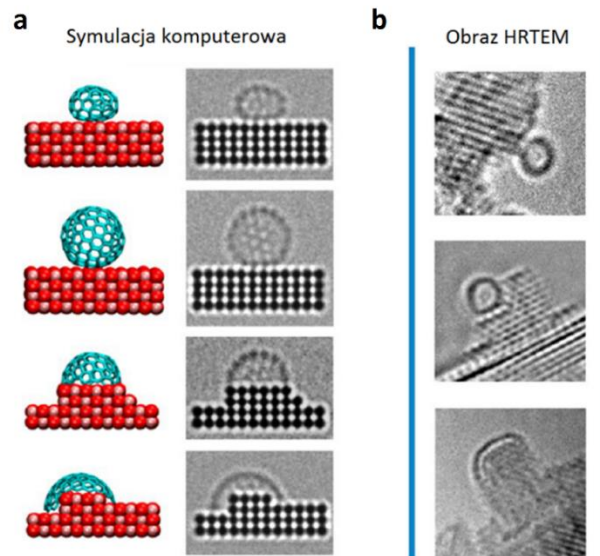
Istnieje wiele rodzajów grafenowych cząstek 3D¹⁷, a badania nad nimi wskazują, że dla wielu zastosowań mogą one być obiecującą alternatywą dla grafenu i nanorurek węglowych, przede wszystkim ze względu na łatwość ich wytwarzania.

Jak przedstawiłam w publikacji **H7**, materiał grafenowy 3D można łatwo sfunkcjonalizować na przykład grupami hydroksylowymi i tiolowymi. Dzięki temu można go udekorować dodatkowo cząstkami metali np. miedzi, w celu ich dalszego wykorzystania w kompozytach z metalami. Łatwość funkcjonalizacji otwiera szerokie możliwości wykorzystania grafenowych struktur 3D w takich zastosowaniach jak kompozyty, czujniki gazu, magazynowanie energii oraz w aplikacjach biomedycznych. W pracach **H7** i **H8** zbadana została możliwość wykorzystania warstw grafenowych pokrywających powierzchnie proszków tlenkowych.

Dodatkowo poprzez zakapsułkowanie nanocząstek będących izolatorami w tym przypadku materiałem grafenowym prowadzi do wytworzenia swoistej ścieżki dla ich badań wykorzystujących efekty przewodzenia. Ten fakt znalazł zastosowanie podczas obserwacji z wykorzystaniem transmisyjnej mikroskopii elektronowej, gdzie konieczne stało się odprowadzanie nagromadzonego ładunku elektrycznego celem ułatwienia obserwacji i zmniejszenie ryzyka niszczenia próbki poprzez wpływ energii elektronów [**H8**]. Dodatkowo, powłoka grafenowa nie wpływa w żadnym stopniu na transparentność próbki dla pomiarów TEM, przez co nie zakłóca otrzymanych obrazów.

¹⁷ Cao X., Yin Z., Zhang H. (2014): *Three-dimensional graphene materials: preparation, structures and application in supercapacitors*. Energy Environ. Sci. 7, 1850–1865.

Podczas tych badań zaobserwowałam, że bardzo małe płatki grafenowe powstałe na powierzchni MgO można w łatwy sposób przekształcać w fulereny lub połówki fulerenów dzięki wykorzystaniu energii wiązki elektronowej (Rys. 8).

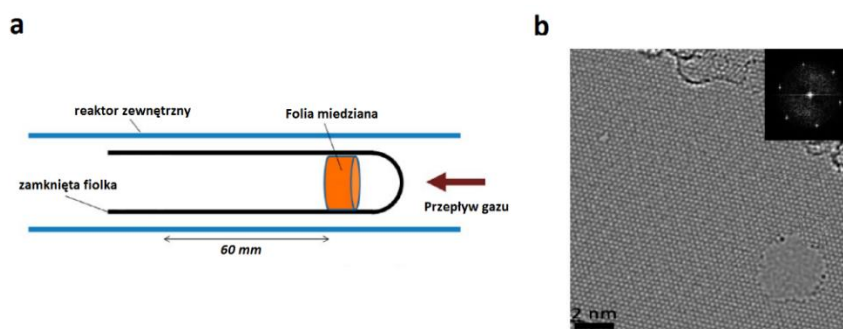


Rys. 8. Przykładowe symulacje komputerowe struktur fulerenowych powstałych na powierzchni MgO (a), oraz rzeczywiste obrazy powstałe w wyniku obserwacji HRTEM (b) (wyniki z pracy **H8**).

Takie tworzenie się struktur węgla jest warunkiem wstępnym dla zarodkowania nanorurek węglowych i sugeruje, że nanorurki węglowe mogą powstawać bezpośrednio na powierzchni tlenkowej bez udziału cząstek katalizatora.

Wytwarzanie grafenu na nośnikach miedzianych (H6, H9, H11)

Miedź jest bardzo cennym nośnikiem dla wytwarzania materiałów grafenowych ze względu na jej ograniczoną zdolność rozpuszczania węgla, dzięki czemu można na jej powierzchni wytwarzać materiał grafenowy o kontrolowanej liczbie warstw, zwłaszcza materiał jednowarstwowy. Celem prac **H6**, **H9**, **H11** było zbadanie wpływu parametrów procesów (m.in.: przepływu gazów, temperatury procesu, źródła węgla czy czystości nośników używanych do syntezy) na jakość otrzymywanego na nośnikach miedzianych materiału grafenowego. Wykazano, że przepływ gazu i jego stężenie ma znaczący wpływ na rodzaj otrzymywanego materiału grafenowego. W przypadku burzliwego przepływu wytworzony grafen zawierał od 1 do 3 warstw, natomiast gdy przepływ był bardziej laminarny (w przypadku zastosowania wewnątrz reaktora specjalnej zamkniętej fiolki kontrolującej szybkość i dostęp źródła węgla (Rys. 9 a), wytworzony materiał grafenowy był homogeniczny i zawierał tylko jedną warstwę (Rys. 9 b) [**H6**].



Rys. 9. a) Schemat systemu do syntezy grafenu jednowarstwowego z wykorzystaniem fiolki wewnętrznej, b) zdjęcie HRTEM jednowarstwowego grafenu otrzymanego na folii miedzianej (wyniki z pracy **H6**).

Przeprowadzone badania wskazują, że dla homogeniczności materiału grafenowego istotne znaczenie ma usuwanie zanieczyszczeń z powierzchni nośnika przed przeprowadzeniem właściwego procesu CVD. Zanieczyszczeniami tymi mogą być związki organiczne zawierające węgiel (np. oleje, smary) wykorzystywane do procesów walcowania folii czy też ich czyszczenia (rozpuszczalniki organiczne). Pokazano, że najlepszą metodą usunięcia tych zanieczyszczeń z nośników wyjściowych jest wygrzewanie folii w atmosferze powietrza, w wysokich temperaturach (~ 600 °C), co powoduje spalenie węglowych zanieczyszczeń mogących tworzyć dodatkowe warstwy grafenowe podczas właściwego procesu CVD [**H9**, **H11**]. Obserwacje zdobyte podczas badań z wykorzystaniem katalizatora miedzianego stanowią punkt wyjścia do dalszej optymalizacji wytwarzania materiałów grafenowych na podłożach tlenkowych, gdzie równie ważne jest odpowiednie przygotowanie podłoży jak również sposób przeprowadzania procesów wzrostu.

5.5. Podsumowanie i ewentualne wykorzystanie wyników

Przedstawione badania opisują wpływ metod otrzymywania materiałów węglowych o różnej morfologii takich jak nanorurki węglowe o budowie bambusowej, nanowłókna, grafen (w postaci dwu- i trójwymiarowej), a także fulereny, na ich strukturę i właściwości. Materiały wytwarzane były w wyniku procesów chemicznego osadzania par z fazy gazowej na katalizatorach tlenkowych i foliach miedzianych przy wykorzystaniu różnych źródeł węgla, różnych atmosfer reakcyjnych i różnych temperatur. Wykorzystanie katalizatora metalicznego opisane zostało w celu pokazania łatwości syntezy materiałów węglowych na tych podłożach, jak również w celu pokazania wpływu warunków procesu na rodzaj powstającego materiału. Wykorzystanie podłoży metalicznych prowadzi do otrzymania materiału zanieczyszczonego metalami, co wymaga złożonych etapów oczyszczania i preparatyki, aby możliwe było jego dalsze zastosowanie. W związku z obecnością zanieczyszczeń metalicznych utrudnione jest bowiem późniejsze wykorzystanie takiego materiału w aplikacjach związanych z elektroniką czy energią (zanieczyszczenia metaliczne skracają czas życia baterii czy też układów elektrycznych).

Bardzo ważne staje się zatem zoptymalizowanie procesów otrzymywania dobrej jakości materiałów węglowych na czystych podłożach niemetalicznych (w tym przypadku ceramicznych), których skład nie wpłynie na jakość i właściwości otrzymanych materiałów węglowych. Podjęłam badania, które pokazały, że istnieje możliwość wykorzystania kombinacji odpowiedniego źródła węgla i możliwie niskiej temperatury, co istotnie poprawia ekonomiczny aspekt otrzymywania pożądanego materiału węglowego na podłożach ceramicznych. Jako pierwsza przeprowadziłam prace nad wykorzystaniem podłoży kwarcowych do wywarzania materiałów węglowych bez dodatku katalizatorów metalicznych. Wykazałam, że wykorzystanie dwóch rodzajów materiałów katalizujących (tlenkowych i metalicznych) pozwala ustalić różnicę w rodzaju, czystości i jakości otrzymywanego materiału węglowego. Zbadałam także, które z parametrów stosowanych do otrzymywania dobrze zdefiniowanych materiałów węglowych są kluczowe dla ich budowy. W tym celu ustaliłam różnice w rodzaju otrzymywanego materiału węglowego przy zmianie tylko jednego parametru procesu (np. dodatek wodoru, zmiana stopnia utlenienia materiału katalizującego, zastosowanie atmosfery próżniowej, czy też odpowiednie wygrzanie podłoża katalizującego).

Udowodniłam, że otrzymane przeze mnie materiały węglowe na katalizatorach niemetalicznych mają dobre właściwości do magazynowania energii i jako materiały odprowadzające nagromadzony ładunek elektryczny charakteryzują się odpowiednim przewodnictwem dla badań z wykorzystaniem transmisyjnej mikroskopii elektronowej. Przeprowadziłam także procesy funkcjonalizacji materiałów grafenowych 3D, gdzie obecność grup funkcyjnych jest niezbędna do ich dalszych zastosowań. Badania dotyczące toksyczności otrzymanych przeze mnie materiałów grafenowych 3D ujawniły, że materiał ten jest bezpieczny i nie wpływa niekorzystnie na komórki żywe.

Materiały dla medycyny i biologii

Przeprowadzono testy ewentualnej toksyczności biologicznej na liniach komórkowych [H7, H8]. Badania cytotoxyczności grafenowych struktur 3D [H7] wskazały, że nie stanowią one poważnego zagrożenia dla zdrowia ludzi pracujących czy użytkujących takie nanostruktury. W połączeniu z łatwą funkcjonalizacją otrzymanych struktur otwiera to drogę do badań nad ich biomedycznym zastosowaniem.

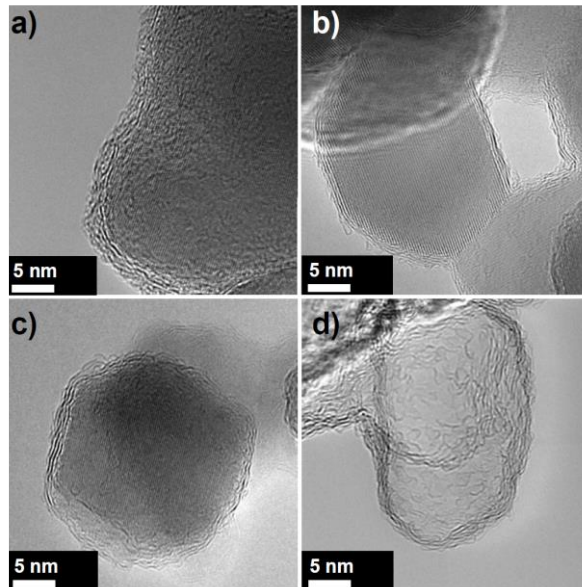
Elektrochemiczne źródła prądu

Wykorzystanie otrzymanych materiałów do elektrochemicznych badań nad bateriami [H7] pokazuje, że jest to niezwykle obiecujący, stabilny materiał, ulepszający wydajność oraz długość życia baterii.

Enkapsulacja i puste nanosfery (H7)

Nanoproszki tlenków są atrakcyjnymi kandydatami do ich kapsułkowania za pomocą warstw grafenu, dzięki czemu powstają trójwymiarowe struktury grafenowe (3D). Moje badania

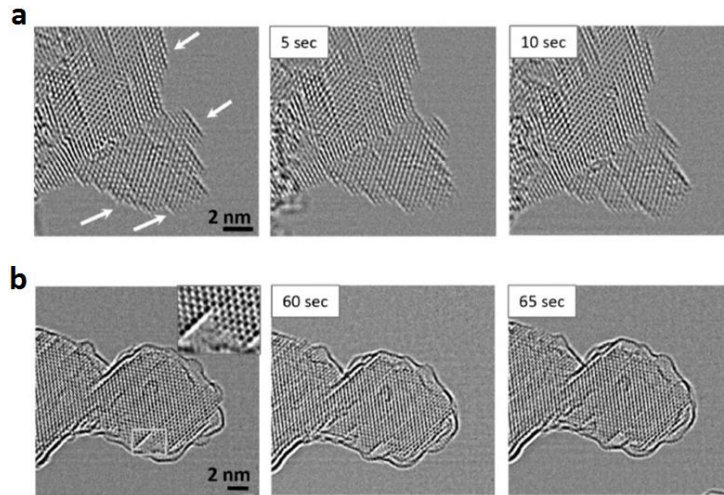
dowodły, że wytwarzanie takich struktur jest niezwykle proste, tanie i może być łatwo realizowane na większą skalę. W przypadku wykorzystania proszku tlenku magnezu do wytworzenia grafenowej struktury 3D, potwierdziłam również, że tlenek magnezu może być łatwo usuwany z wnętrza struktury kwasem chlorowodorowym podczas ogrzewania w roztworze, bez naruszenia sferycznych struktur grafenu trójwymiarowego. Rysunek 10 przedstawia przykłady grafenu 3D otrzymanego na różnych matrycach tlenkowych.



Rys. 10. Przykładowe zdjęcia TEM materiałów grafenowych 3D otrzymanych na proszkowych powierzchniach tlenkowych (a) na tlenku glinu, b) na ditlenku tytanu, c) na tlenku magnezu, d) na tlenku magnezu po usunięciu wypełnienia) przy wykorzystaniu etanolu jako źródła węgla (wyniki z pracy H7).

Materiały pomocnicze dla spektroskopii i mikroskopii elektronowej (H8)

Zakapsułkowanie materiałem grafenowym nanoproszków tlenkowych będących izolatorami prowadzi do wytworzenia swoistej ścieżki przewodzącej pomocnej dla ich badań wykorzystujących techniki spektroskopowe (np. XPS) i mikroskopowe (np. TEM). Fakt ten znalazł zastosowanie w obserwacjach metodą transmisyjnej mikroskopii elektronowej, gdzie podczas badań konieczne staje się odprowadzanie nagromadzonego ładunku elektrycznego celem ułatwienia obserwacji i zmniejszenie ryzyka niszczenia próbki [H8]. Rysunek 11 przedstawia dwie serie zdjęć HR-TEM **a)** tlenku magnezu i **b)** tlenku magnezu z powierzchniową warstwą grafenu. Podczas obserwacji czystego tlenku magnezu bez powłoki grafenowej, materiał ulegał szybkiemu rozpadowi związanemu z oddziaływaniem elektronów z wiązki pomiarowej z próbką. Natomiast w przypadku tlenku magnezu z powłoką grafenową badany materiał był stabilny i nie ulegał niszcącym wpływom wiązki elektronowej. Ponadto, powłoka grafenowa nie wpływa w żadnym stopniu na transparentność próbki dla pomiarów TEM, przez co nie zakłóca otrzymanych wyników badań.



Rys. 11. Zdjęcia HR-TEM **a)** tlenku magnezu i **b)** tlenku magnezu powleczonego warstwą materiału grafenowego (wyniki z pracy **H8**).

Badania TEM wykazały, że bardzo małe płatki grafenowe powstałe na powierzchni MgO można w łatwy sposób przekształcać w fulereny lub półowki fulerenów sterując odpowiednio energią wiązki elektronowej (Rys. 8b). Tworzenie się tego typu struktur węgla (struktur fulerenowych) jest jak wiadomo warunkiem wstępnym dla zarodkowania nanorurek węglowych i wskazuje, że nanorurki węglowe mogą powstawać bezpośrednio na powierzchni tlenkowej bez udziału cząstek katalizatora. Dzięki tej technice mogą być wytwarzane wolne od zanieczyszczeń metalicznych struktury węglowe, ale skala ich powstawania jest ograniczona ze względu na dostęp odpowiedniej ilości węgla do wytworzenia pożądanego materiału węglowego.

6. Przyszłe cele badawcze

Dotychczasowe wyniki skłaniają mnie do kontynuowania tematyki związanej z materiałami węglowymi o strukturze sp^2 . Obecnie skupiłam się na badaniu dwuwymiarowych struktur węglowych, tj. grafenu i tlenku grafenu oraz innych dwuwymiarowych struktur jak dichalkogenki metali przejściowych, azotek boru, fosforen, oraz hybrydy grafenu 2D z innymi materiałami dwuwymiarowymi. Opracowuję warunki procesów CVD, w wyniku których powstają te materiały, tak aby pozwalały na lepszą kontrolę ich struktury. Badam możliwość kontroli struktury grafenu 2D do separacji gazów oraz tlenku grafenu do separacji cieczy. Kontynuuję badania nad procesami CVD do wytwarzania dichalkogenków metali przejściowych, azotku boru oraz ich hybryd z grafenem 2D. Oprócz optymalizacji wytwarzania wiele uwagi poświęcam badaniom zjawisk zachodzących w otrzymanych materiałach podczas obserwacji wewnątrz transmisyjnego mikroskopu elektronowego o wysokiej rozdzielczości. Dzięki wykorzystaniu energii wiązki elektronowej, która może być odpowiednio kontrolowana poprzez zmianę napięcia przyspieszającego elektrony, badam wpływ energii na zmiany w strukturze i właściwościach materiałów również na poziomie atomowym. Obecnie kieruję projektem (Sonata 7 z NCN 2015-2018) dotyczącym wytworzenia materiałów grafenowych o odpowiedniej porowatości do celów filtracyjnych.

7. Współpraca z jednostkami naukowymi

W trakcie moich badań współpracowałam głównie z zagranicznymi grupami badawczymi, co związane jest z długim okresem pracy poza Polską. Instytucje te to: IFW Dresden, Niemcy; Wuhan University, Chiny; Technical University w Dreźnie, Niemcy; Technical University w Ostrawie, Czechy; Sungkyunkwan University, Suwon, Korea Południowa; Oxford University, Anglia; Soochow University, Chiny; Peking University, Chiny; AirForce Research Laboratories, Dayton, Stany Zjednoczone; Empa, St. Gallen, Szwajcaria; Heidelberg University, Niemcy. W Polsce współpracowałam i współpracuję obecnie z: Politechniką Śląską w Gliwicach, Wydziałem Chemicznym i Wydziałem Mechanicznym Technologicznym; Uniwersytetem Warszawskim, Wydziałem Chemii oraz Instytutem Metalurgii Żelaza w Gliwicach. Obecnie poza pracą adiunkta w Centrum Materiałów Polimerowych i Węglowych Polskiej Akademii Nauk w Zabrze pracuję również we Wrocławskim Centrum Badań EIT+, w którym mam dostęp do wysokorozdzielczej transmisyjnej mikroskopii elektronowej z podwójną korekcją aberracji sferycznej, co pozwala mi na wykonywanie obserwacji materiałów w skali atomowej.

8. Doświadczenie naukowe zdobyte w kraju i zagranicą

- | | |
|---------------------|---|
| 02. 2008 – 01. 2010 | Asystent naukowy na Zachodniopomorskim Uniwersytecie Technologicznym w Szczecinie. <i>Synteza i funkcjonalizacja nanorurek węglowych.</i> |
| 02. 2009 – 11. 2012 | Staż doktorski w Leibniz Institute for Solid State and Materials Research (IFW Dresden), Niemcy; stypendysta RTN Marie Curie i Fundacji Alexandra von Humboldta. <i>Synteza i charakteryzacja materiałów węglowych, transmisyjna mikroskopia elektronowa, spektroskopia ramanowska.</i> |
| 09. 2012 – 06. 2013 | Kierownik laboratorium mikroskopii elektronowej, Wrocławskie Centrum Badań EIT+. <i>Wysokorozdzielcza transmisyjna mikroskopia elektronowa z korekcją aberracji sferycznej.</i> |
| 07. 2013 – 12. 2014 | Research Professor na Sungkyunkwan University, Suwon, Korea Południowa. <i>Synteza grafenu oraz dichalkogenków metali przejściowych, wysokorozdzielcza transmisyjna mikroskopia elektronowa z korekcją aberracji sferycznej.</i> |
| 08. 2013 – do teraz | Adiunkt, Centrum Materiałów Polimerowych i Węglowych PAN, Zabrze. <i>Synteza i charakteryzacja materiałów grafenowych, spektroskopia ramanowska.</i> |

08. 2015 – do teraz Kierownik laboratorium mikroskopii elektronowej,
Wrocławskie Centrum Badań EIT+. *Wysokorozdzielcza
transmisyjna mikroskopia elektronowa z korekcją aberracji
sferycznej.*

9. Działalność dydaktyczna

W trakcie mojej pracy na stanowisku asystenta na Zachodniopomorskim Uniwersytecie Technologicznym prowadziłam zajęcia dla studentów 1 roku Technologii Chemicznej z technologii informatycznej (190 godzin rocznie). W trakcie stażu w IFW Dresden przeprowadzałam szkolenia z obsługi wysokorozdzielczego transmisyjnego mikroskopu elektronowego. Szkolenia objęły 32 osoby.

Obecnie nie prowadzę zajęć dydaktycznych, ponieważ Centrum Materiałów Polimerowych i Węglowych PAN, w którym pracuję nie prowadzi zajęć ze studentami. W roku 2015 sprawowałam opiekę merytoryczną nad trzema pracami magisterskimi wykonywanymi w CMPW PAN przez studentów z Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej. Byłam współpromotorem tych prac, z których dwie powstały podczas realizowania przeze mnie grantu Homing Plus z Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej: Katarzyna Bauman "*Bezpośrednia synteza grafenu i grafenowych struktur 2D na podłożach tlenkowych*" i Aleksander Foryś "*Synteza i funkcjonalizacja grafenu 3D na nośnikach tlenkowych*" oraz Michał Włodarski "*Optymalizacja procesu wytwarzania grafenu polikrystalicznego na podłożach miedzianych metodami chemicznego osadzania z fazy gazowej*".

Prace dotyczyły otrzymywania różnych form grafenu na podłożach tlenkowych i metalicznych. Obecnie w ramach kierowanego przeze mnie projektu Sonata sprawuję opiekę nad dwoma doktorantami, których prace związane są z wytwarzaniem i modyfikacją materiałów grafenowych do procesów filtracyjnych: Paweł Wróbel „*Otrzymywanie i funkcjonalizacja materiałów grafenowych do procesów separacji*” i Michał Włodarski „*Otrzymywanie grafenu 2D oraz jego heterostruktur z dichalkogenkami metali przejściowych*”.

10. Działalność organizacyjna i na rzecz środowiska naukowego

Przygotowanie doświadczeń i demonstracji dla zabrzańskiej *Industriady* 2015.

11. Dorobek naukowy obejmujący lata 2006-2016 – zestawienie

Liczba publikacji z listy filadelfijskiej:	102 (w ośmiu autor korespondencyjny)
Sumaryczny IF publikacji:	548,287 (z roku publikacji); 623,190 (z 2014 r.)
Cytowania niezależne:	1285 (wg WoS)
Cytowania z autocytowaniami współautorów:	1610

Indeks Hirscha:	23
Wystąpienia konferencyjne:	8 (w tym krajowe i międzynarodowe), w tym 5 na zaproszenie
Inne wykłady na zaproszenie:	6

Prowadzone przeze mnie badania finansowane były przez:

2009: Marie Curie Research Training Networks (RTN): *Carbio – Multi-functional carbon nanotubes for biomedical applications*. **Postdoctoral researcher**

2010-2011: Stypendium Fundacji Alexandra von Humboldta; *Graphene growth via CVD carbothermal reduction of oxides with in-situ Raman Spectroscopic Monitoring*. **Kierownik**

2013-2015: Stypendium Fundacji na rzecz Nauki Polskiej, Homing Plus FNP, 2013-7/2: *Direct synthesis of graphene and 3D-graphene structures over metal oxide supports*. **Kierownik**

2015: Projekt Air Force Office of Scientific Research (AFSOR), BAA-AFOSR-2014-0001: *Investigation of electron hole puddles in free-standing and supported graphene and carbon nanotubes through EBIC technique*. **Wykonawca**

2015-2017: Projekt Narodowego Centrum Nauki, Sonata 7, Nr 2014/13/D/ST5/02853: *Materiały grafenowe do procesów separacji*. **Kierownik**

11.1. Przed uzyskaniem stopnia doktora

Liczba publikacji z listy filadelfijskiej:	17 (A1-A17)
Sumaryczny IF publikacji	(z roku publikacji): 27,821 ; (z 2014): 40,197
Wystąpienia konferencyjne:	2 krajowe
Patenty	4 krajowe

11.2. Po uzyskaniu stopnia doktora

Liczba publikacji z listy filadelfijskiej:	85 (B1-B93)
--	--------------------

Spośród tych prac 11 stanowi cykl publikacji powiązanych tematycznie (**H1-H11**), który przedstawiam jako osiągnięcie naukowe w celu otrzymania stopnia doktora habilitowanego, powołując się na 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 zmianami). W trzech z tych publikacji jestem autorem korespondencyjnym.

Sumaryczny IF publikacji:	520,466 (z roku publikacji); 582,993 (z 2014 r.)
---------------------------	---

Wystąpienia konferencyjne:	6 (w tym krajowe i międzynarodowe), w tym 5 na zaproszenie
Inne wykłady na zaproszenie:	6

12. Publikacje stanowiące dorobek naukowy – lista

Prace zamieszczone w kolejności chronologicznej. Dodatkowo prace stanowiące cykl publikacji powiązanych tematycznie są oznaczone pogrubioną czcionką.

12.1. Przed uzyskaniem stopnia doktora

- A1 Borowiak-Palen E., Mendoza E., Bachmatiuk A., Rummeli M. H., Gemming T., Nogues J., Skumryev V., Kalenczuk R.J., Pichler T., Silva. S.R.P. (2006): *Iron filled single-wall carbon nanotubes – A novel ferromagnetic medium*. Chemical Physics Letters 421, 129-133.
- A2 Bachmatiuk A., Borowiak-Palen E., Jedrzejewski R., Rummeli M.H., Gemming T., Pichler T., Kalenczuk R.J. (2006): *Study on hydrogen uptake of functionalized carbon nanotubes*. Physica Status Solidi (b) 243, 3226-3229.
- A3 Borowiak-Palen E., Bachmatiuk A., Rummeli M.H., Gemming T., Pichler T., Kalenczuk R.J. (2006): *Iron filled singlewalled carbon nanotubes – synthesis and characteristic properties*. Physica Status Solidi (b) 243, 3277-3280.
- A4 Bachmatiuk A., Rummeli M. H., Borowiak-Palen E. (2007): *Synthesis and spectroscopic characterization of nitrogen-doped multiwalled carbon nanotubes*. Chemical Industry 86, 898-900.
- A5 Vyalikh A., Klingeler R., Hampel S., Hasse D., Ritschel M., Leonhardt A., Borowiak-Palen E., Rummeli M.H., Bachmatiuk A., Kalenczuk R.J., Grafe H.J., Büchner B. (2007): *A nanoscaled contactless thermometer for biological systems*. Physica Status Solidi (b) 244, 4092-4096.
- A6 Costa S., Kalenczuk R.J., Bachmatiuk A., Rummeli M.H., Gemming T., Borowiak-Palen E. (2007): *Filling of Carbon nanotubes for bio-applications*. Physica Status Solidi (b) 244, 4315-4318.
- A7 Bachmatiuk A., Borowiak-Palen E., Rummeli M.H., Gemming T., Kalenczuk R.J. (2007): *Influence of the substrate loading on the quality and diameter distribution of SWCNT in alcohol-CVD*. Physica Status Solidi (b) 244, 3925-3929.
- A8 Borowiak-Palen E., Bachmatiuk A., Rummeli M. H., Gemming T., Kruszynska M., Kalenczuk, R.J. (2008): *Modifying CVD synthesised carbon nanotubes via the carbon feed rate*. Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures 40, 2227-2230.

- A9 Rümmeli M.H., Schäffel F., Kramberger C., Gemming T., Bachmatiuk A., Kalenczuk R.J., Rellinghaus B., Büchner B., Pichler T. (2007): *Oxide-Driven Carbon Nanotube Growth in Supported Catalyst CVD*. J. Am. Chem. Soc.; (Communication) 129, 15772-15773.
- A10 Bachmatiuk A., Borowiak-Palen E., Rümmeli M.H., Kramberger C., Hübers H-W., Gemming T., Pichler T., Kalenczuk R.J. (2007): *Facilitating the CVD synthesis of seamless double-walled carbon nanotubes*. Nanotechnology 18, 275610/1-5.
- A11 Costa S., Borowiak-Palen E., Kruszynska M., Bachmatiuk A., Kalenczuk R.J. (2008): *Characterization of Carbon Nanotubes by Raman spectroscopy*. Materials Science 26, 433-441.
- A12 Costa S., Bachmatiuk A., Borowiak-Palen E., Kalenczuk R.J. (2008): *Reversible electron charge transfer in singlewall carbon nanotubes*. Polish Journal of Chemical Technology 10, 34-37.
- A13 Bachmatiuk A., Kalenczuk R.J., Rümmeli M.H., Gemming T., Borowiak-Palen E. (2008): *Preparation of ultra-large-scale catalysts for catalytic vapour deposition of carbon nanotubes*. Materials Science 26, 105-111.
- A14 Costa S., Borowiak-Palen E., Bachmatiuk A., Rümmeli M.,H., Gemming T., Kalenczuk R.J. (2008): *Iron filled carbon nanostructures from different precursors*. Energy Conversion and Management 49, 2483-2486.
- A15 Rümmeli M.H., Schäffel F., de los Arcos T., Haberer D., Bachmatiuk A., Kramberger C., Ayala P., Borowiak-Palen E., Adebimpe D., Gemming T., Leonhardt A., Rellinghaus B., Schultz L., Pichler T., Büchner B. (2008): *On the graphitisation role of oxide supports in carbon nanotube CVD synthesis*. Physica Status Solidi (b) 245, 1939-1942.
- A16 Bachmatiuk A., Steplewska A, Borowiak-Palen E., Kalenczuk R.J. (2008): *"In situ" measurements of carbon nanotubes generation in CVD-cell coupled to spectrometers*. Physica Status Solidi (b) 245, 1931-1934.
- A17 Bachmatiuk A., Borowiak-Palen E., Kalenczuk R.J. (2008): *Advances in engineering of diameter and number of walls distributions of carbon nanotubes in alcohol-CVD*. Nanotechnology 19, 365605/1-5.

Patenty:

- P1 Kalenczuk R.J., Borowiak-Palen E., Bachmatiuk A. (2014): *Method for the functionalization of single-walled carbon nanotubes with the use of titanium compounds*. PL215778-B1.
- P2 Kalenczuk R.J., Borowiak-Palen E., Bachmatiuk A. (2013): *The manner of filling single-wall carbon nanotubes with cobalt*. PL215122-B1.
- P3 Kalenczuk R.J., Borowiak-Palen E., Bachmatiuk A. (2013): *Method for filling single-walled carbon nanotubes with nickel*. PL215123-B1.

- P4 Kalenczuk R.J., Borowiak-Palen E., Bachmatiuk A. (2012): *The manner of filling of single-wall carbon nanotubes with silver chloride*. PL209382-B1.

12.2. Po uzyskaniu stopnia doktora

- B1 Bystrzejewski M., Bachmatiuk A., Thomas J., Ayala P., Hübers H-W., Gemming T., Borowiak-Palen E., Pichler T., Kalenczuk R.J., Büchner B., Rümmeli M.H. (2009): *Boron doped carbon nanotubes via ceramic catalysts*. Rapid Research Letters 3, 193-195.
- B2 Schäffel F., Warner J.H., Bachmatiuk A., Rellinghaus B., Büchner B., Schultz L., Rümmeli, M.H. (2009): *Shedding Light on the Crystallographic Etching of Multi-Layer Graphene at the Atomic Scale*. Nano Research 2, 695-705.
- B3 Schäffel F., Warner J. H., Bachmatiuk A., Rellinghaus B., Büchner B., Schultz L., Rümmeli M.H. (2009): *On the catalytic hydrogenation of graphite for graphene nanoribbon fabrication*. Physica Status Solidi (b) 246, 2540-2544.
- B4 Rümmeli M.H., Schäffel F., Bachmatiuk A., Trotter G., Adebimpe D., Simha Martynková G., Plachá D., Rellinghaus B., McCormick P., G., Borowiak-Palen E., Ayala P., Pichler T., Klingeler R., Knupfer M., Büchner B. (2009): *Oxide catalysts for carbon nanotubes and few layer graphene formation*. Physica Status Solidi (b) 246, 2530-2533.
- B5 Bachmatiuk A., Bystrzejewski M., Schäffel F., Ayala P., Wolff U., Mickel C., Gemming T., Pichler T., Borowiak-Palen E., Klingeler R., Hübers H-W., Ulbrich M., Knupfer M., Haberer D., Büchner B., Rümmeli M.H. (2009): *Carbon nanotubes synthesis via ceramic catalysts*. Physica Status Solidi (b) 246, 2486-2489.
- B6 **Bachmatiuk A., Börrnert F., Grobosch M., Schäffel F., Wolff U., Scott A., Zaka M., (H1) Warner J. H., Klingeler R., Knupfer M., Büchner B., Rümmeli M.H. (2009): *Investigating the Graphitization Mechanism of SiO₂ Nanoparticles in Chemical Vapor Deposition*. ACS Nano 3, 4098-4104.**
- B7 Tetali S., Zaka M., Schönfelder R., Bachmatiuk A., Börrnert F., Ibrahim I., Lin J.H., Cuniberti G., Warner J.H., Büchner B., Rümmeli M.H. (2009): *Unravelling the Mechanisms Behind Mixed Catalysts for the High Yield Production of Single-Walled Carbon Nanotubes*. ACS Nano 3, 3839-3844.
- B8 Bachmatiuk A., Schäffel, F., Plachá D., Simha Martynková G., Ioannides N., Gemming T., Pichler T., Kalenczuk R.J., Borowiak-Palen E., Rümmeli M. H. (2010): *Tuning carbon nanotubes through poor metal addition to iron catalysts in CVD*. Fullerenes, Nanotubes, and Carbon Nanostructures 18, 37-44.

- B9 Warner J. H., Rmmeli M.H., Bachmatiuk A., Wilson M., Bchner B. (2010): *Examining Co-Based Nanocrystals on Graphene Using Low-Voltage Abberation-Corrected Transmission Electron Microscopy*. ACS Nano 4, 470-476.
- B10 Brrnert F., Bergner C., Gorantla S., Liu X., Bachmatiuk A., Joswig J.O., Wagner F.R., Schäffel F., Warner J.H., Schönfelder R., Rellinghaus B., Gemming T., Thomas J., Knupfer M., Bchner B., Rmmeli M.H. (2009): *Single-Wall-Carbon-Nanotube/Single-Carbon-Chain Molecular Junctions*. Phys. Rev. B 81, 85439/1-5.
- B11 Gorantla S., Avdoshenko S., Brrnert F., Bachmatiuk A., Dimitrakopoulou M., Schaffel F., Schonfelder R., Thomas J., Gemming T., Warner J.H., Cuniberti G., Eckert J., Bchner B., Rmmeli M.H. (2010): *Enhanced pi-pi interactions between a C-60 fullerene and a buckle bend on a double-walled carbon nanotube*. Nano Research 3, 92-97.
- B12 **Bachmatiuk A., Brrnert F., Schäffel F., Zaka M., Simha Martynkova G., Placha D., (H2) Schoenfelder R., Costa P.M.F.J., Ioannides N., Warner J. H., Klingeler R., Bchner B., Rmmeli, M.H. (2010): *Investigating the Graphitization Mechanism of SiO₂ Nanoparticles in Chemical Vapor Deposition*. Carbon 48, 3175-3181.**
- B13 Brrnert F., Gorantla S., Bachmatiuk A., Warner J.H., Ibrahim I., Thomas J., Gemming T., Eckert J., Cuniberti G., Bchner B., Rmmeli M.H. (2010): *In situ observations of self-repairing single-walled carbon nanotubes*. Phys. Rev. B 81, 20140(R)/1-4.
- B14 Warner J. H., Rmmeli M. H., Bachmatiuk A., Bchner B. (2010): *Atomic Resolution Imaging and Topography of Boron Nitride Sheets Produced by Chemical Exfoliation*. ACS Nano 4, 1299-1304.
- B15 Warner J. H., Rmmeli M. H., Bachmatiuk A., Bchner B. (2010): *Structural transformation of carbon chains inside nanotubes*. Phys. Rev. B 81, 155419/1-5.
- B16 Rmmeli M.H., Schäffel F., Bachmatiuk A., Adebimpe D., Trotter G., Brrnert F., Scott A., Coric E., Sparing M., Rellinghaus B., McCormick P.G., Cuniberti G., Knupfer M., Schultz L., Bchner B. (2010): *Investigating the Outskirts of Fe and Co Catalyst Particles in Alumina-Supported Catalytic CVD Carbon Nanotube Growth*. ACS Nano 4, 1146-1152.
- B17 Warner J. H., Rmmeli M. H., Bachmatiuk A., Bchner B. (2010): *Examining the stability of folded graphene edges against electron beam induced sputtering with atomic resolution*. Nanotechnology 4, 325702/1-6.
- B18 Bachmatiuk A., Rmmeli M.H. (2010): *Synthesis and formation of carbon nanotubes*. Przemysl Chemiczny w Polsce (Chemical Industry in Poland) 89, 1037.
- B19 Arlt M., Haase D., Hampel S., Oswald S., Bachmatiuk A., Klingeler R., Schulze R., Ritschel M., Leonhardt A., Fuessel S., Bchner B., Kraemer K., Wirth M.P. (2010): *Delivery of carboplatin by carbon-based nanocontainers mediates increased cancer cell death*. Nanotechnology 21, 335101/1-9.

- B20 Zakharova G.S., Hellmann I., Volkov V.L., Täschner Ch., Bachmatiuk A., Leonhardt A., Klingeler R., Büchner B. (2010): *Vanadium dioxide nanobelts: Hydrothermal synthesis and magnetic properties*. Materials Research Bulletin 45, 1118-1121.
- B21 **Rümmeli M.H., Bachmatiuk A., Scott A., Börrnert F., Warner J.H., Hoffmann V., (H3) Lin J.H., Cuniberti G., Büchner B. (2010): *Direct low-temperature nanographene CVD synthesis over a dielectric insulator*. ACS Nano 4, 4206-4210.**
- B22 Gorantla S., Börrnert F., Bachmatiuk A., Dimitrakopoulou M., Schönfelder R., Schäffel F., Thomas J., Gemming T., Borowiak-Palen E., Warner J.H., Yakobson B.I., Eckert J., Büchner B., Rümmeli M.H. (2010): *In-situ observations of fullerene fusion and ejection in carbon nanotubes*. Nanoscale 2, 2077-2079.
- B23 **Scott A., Dianat A., Börrnert F., Bachmatiuk A., Zhang S., Warner J.H., Borowiak- (H4) Palen E., Knupfer M., Büchner B., Cuniberti G., Rümmeli M.H. (2011): *The catalytic potential of high K dielectrics for graphene formation*. Applied Physics Letters. 98, 073110/1-3.**
- B24 Schäffel F., Wilson M., Bachmatiuk A., Rümmeli M.H., Queitsch U., Rellinghaus B., Briggs G.A.D., Warner J.H. (2011): *Atomic resolution imaging of the edges of catalytically etched suspended few layer graphene*. ACS Nano 5, 1975-1983.
- B25 Rümmeli M.H., Bachmatiuk A., Borrnert F., Schaeffel F., Ibrahim I., Cendrowski K., Simha-Martynková G., Plachá D., Borowiak-Palen E., Cuniberti G., Büchner B. (2011): *Synthesis of carbon nanotubes with and without catalyst particles*. Nanoscale Research Letters 6, 303/1-9.
- B26 Lin J.H., Chen C., Rümmeli M.H., Bachmatiuk A., Zeng Z.Y., Ma H.L., Büchner B., Chen H.W. (2011): *Catalyst-particle-free Growth of Carbon Nanotubes on Defect-rich Graphite Surfaces*. Chemistry of Materials 23, 1637-1639.
- B27 **Bachmatiuk A., Börrnert F., Hoffmann V., Lindackers D., Lin J.H., Büchner B., (H5) Rümmeli M. H. (2011): *Hydrogen induced self-assembly of helical carbon nanostructures from ethanol over SiO₂ catalysts*. Journal of Applied Physics 109, 94317/1-4.**
- B28 Robertson A.W., Bachmatiuk A., Wu Y.A., Schäffel F., Rellinghaus B., Büchner B., Rümmeli M.H., Warner J.H. (2011): *Atomic Structure of Interconnected Few-Layer Graphene Domains*. ACS Nano 5, 6610-6618.
- B29 Korkmaz N., Börrnert F., Köhler D., Mendes R., Bachmatiuk A., Rümmeli M.H., Büchner B., Eng L.M., Rödel G. (2011): *Metallization and Investigation of Electrical Properties of in vitro Recrystallized mSbsC-eGFP Assemblies*. Nanotechnology 22, 375606/1-8.
- B30 Rümmeli M.H., Rocha C.G., Ortman F., Ibrahim I., Sevincli H., Boernert F., Kunstmann J., Bachmatiuk A., Poetschke M., Shiraishi M., Meyyappan M., Büchner B.,

- Roche S., Cuniberti G. (2011): *Graphene: Piecing it together*. *Advanced Materials* 23, 4471-4490.
- B31 Costa S.D., Fantini C., Righi A., Bachmatiuk A., Rmmeli M.H., Saito R., Pimenta M.A. (2011): *Resonant Raman spectroscopy on enriched ¹³C carbon nanotubes*. *Carbon* 49, 4719-4723.
- B32 Ibrahim I., Bachmatiuk A., Brrnert F., Blher J., Wolff U., Warner J.H., Bchner B., Cuniberti G., Rmmeli M.H. (2011): *Optimizing substrate surface and catalyst conditions for high yield chemical vapor deposition grown epitaxially aligned single-walled carbon nanotubes*. *Carbon* 49, 5029-5037.
- B33 Schuenemann C., Schaeffel F., Bachmatiuk A., Queitsch U., Sparing M., Rellinghaus B., Lafdi K., Schultz L., Bchner B., Rmmeli M.H. (2011): *Catalyst poisoning by amorphous carbon during carbon nanotube growth: Fact or fiction?* *ACS Nano* 5, 8928-8934.
- B34 Ibrahim I., Bachmatiuk A., Rmmeli M.H., Wolff U., Popov A., Boltalina O., Bchner B., Cuniberti G. (2011): *Growth of catalyst-assisted and catalyst-free horizontally aligned single wall carbon nanotubes*. *Physica Status Solidi B* 248, 2467-2470.
- B35 Huczko A., Dabrowska A., Soszynski M., Maryan N., Bystrzejewski M., Baranowski P., Lange H., Gemming T., Bachmatiuk A., Rmmeli M.H. (2011): *Ultrafast self-catalytic growth of silicon carbide nanowires*. *Journal of Materials Research* 26, 3065-3071.
- B36 Robertson A.W., Bachmatiuk A., Wu Y.A., Schaeffel F., Buechner B., Rmmeli M.H., Warner J.H. (2011): *Structural distortions in few-layer graphene creases*. *ACS Nano* 5, 9984-9991.
- B37 Schoenfelder R., Aviles F., Bachmatiuk A., Cauich-Rodriguez J.V., Knupfer M., Bchner B., Rmmeli M.H. (2012): *On the merits of Raman spectroscopy and thermogravimetric analysis to asses carbon nanotube structural modifications*. *Applied Physics A* 106, 843-852.
- B38 Borchardt L., Hasche F., Lohe M.R., Oschatz M., Schmidt F., Kockrick E., Ziegler C., Lescouet T., Bachmatiuk A., Buchner B., Farrusseng D., Strasser P., Kaskel S. (2012): *Transition metal loaded silicon carbide-derived carbons with enhanced catalytic properties*. *Carbon* 50, 1861-1870.
- B39 Khavrus V.O., Ibrahim E.M.M., Bachmatiuk A., Rmmeli M.H., Wolter A.U.B., Hampel S., Leonhardt A. (2012): *High-pressure catalytic chemical vapor deposition of ferromagnetic ruthenium-containing carbon nanostructures*. *Journal of Nanoparticle Research* 14, 914/1-10.
- B40 Ibrahim I., Bachmatiuk A., Warner J.H., Bchner B., Cuniberti G., Rmmeli M.H. (2012): *CVD-grown horizontally aligned single-walled carbon nanotubes: Synthesis routes and growth mechanisms*. *Small* 8, 1973-1992.

- B41 Gonzalez-Martinez I., Bachmatiuk A., Gorantla S., Kunstmann J., Bezugly V., Gemming T., Břchner B., Cuniberti G., Rřmmeli M.H. (2012): *Defect assisted thermal synthesis of crystalline aluminum borate nanowires*. Journal of Applied Physics 112, 24308/1-6.
- B42 Kruszynska M., Borchert H., Bachmatiuk A., Rřmmeli M.H., Břchner B., Parisi J., Kolny-Olesiak J. (2012): *Size and shape control of colloidal copper(I) sulfide nanorods*. ACS Nano 6, 5889-5896.
- B43 Břrrnert F., Avdoshenko S.M., Bachmatiuk A., Ibrahim I., Břchner B., Cuniberti G., Rřmmeli M.H. (2012): *Amorphous carbon under 80 kV electron irradiation: A means to make or break graphene*. Advanced Materials 24, 5630-5635.
- B44 Mendes R., Bachmatiuk A., El-Gendy A., Melkhanova S., Klingeler R., Buechner B., Rřmmeli M.H. (2012): *A Facile Route to Coat Iron Oxide Nanoparticles with Few-layer Graphene*. The Journal of Physical Chemistry C 116, 3749–23756.
- B45 Chernov A., Havlicek M., Jantsch W., Rřmmeli M.H., Bachmatiuk A., Yanagi K., Peterlik H., Kataura H., Sauerzopf F., Resel R., Simon F., Kuzmany H. (2012): *Ferromagnetic decoration in metal–semiconductor separated and ferrocene functionalized single-walled carbon nanotubes*. Physica Status Solidi (b) 249, 2323–2327.
- B46 Kosub T., Bachmatiuk A., Makarov D., Baunack S., Neu V, Wolter A., Rřmmeli M.H., Schmidt O.G. (2012): *Exchange bias related coercivity enhancement as a characterization tool*. J. Appl. Phys. 112, 123917/1-5.
- B47 Ibrahim I., Bachmatiuk A., Grimm D., Popov A., Makharza S., Knupfer M., Břchner B., Cuniberti G., Rřmmeli M.H. (2012): *Understanding High-Yield Catalyst-Free Growth of Horizontally Aligned Single-Walled Carbon Nanotubes Nucleated by Activated C₆₀ Species*. ACS Nano 6, 10825–10834.
- B48 Jedrzejewska A., Bachmatiuk A., Ibrahim I., řrekov H., Nganou C., Schřchner F., Borowiak-Palen E., Gemming T., Cuniberti G., Břchner B., Rřmmeli M.H. (2013): *A Systematic and Comparative Study of Binary Metal Catalysts for Carbon Nanotube Fabrication Using CVD and Laser Evaporation*. Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures 21, 273-285.
- B49 Mendes R.G., Bachmatiuk A., Cuniberti G., Břchner B., Rřmmeli M.H. (2013): *Carbon nanostructures as multi-functional drug delivery platforms*. J. Mater. Chem B., 1, 401-428.
- B50 Makharza S., Cirillo, G., Bachmatiuk A., Vittorio O., Mendes R.G., Oswald S., Hampel S., Rřmmeli M.H. (2013): *Size-dependent nanographene oxide as a platform for efficient carboplatin release*. Journal of Materials Chemistry B 1, 6107-6114.
- B51 Grimm D., Bof Bufon C.C., Deneke C., Atkinson P., Thurmer D.J., Schffel F., Gorantla S., Bachmatiuk A., Schmidt O.G. (2013): *Rolled-up nanomembranes as*

- compact 3D architectures for field effect transistors and fluidic sensing applications.* Nano Letters 13, 213–218.
- B52 B6rrnert F, Bachmatiuk A., Gorantla S., Wolf D., Lubk A., B6chner B., R6mmeli M.H. (2013): *Retro-fitting an older (S)TEM with two Cs aberration correctors for 80 kV and 60 kV operation.* Journal of Microscopy 249, 87-92.
- B53 Wang M., Fu L., Gan L., Zhang C., R6mmeli M.H., Bachmatiuk A., Huang K., Fang Y., Liu Z. (2013): *CVD Growth of Large Area Smooth-edged Graphene Nanomesh by Nanosphere Lithography.* Scientific Reports 3, 1238.
- B54 Shiozawa H., Bachmatiuk A., Stangl A., Cox D.C., Silva S.R.P, R6mmeli M.H., Pichler T. (2013): *Microscopic insight into the bilateral formation of carbon spirals from a symmetric iron core.* Scientific Reports 3, 1840.
- B55 R6mmeli M. H., Zeng M., Melkhanova S., Gorantla S., Bachmatiuk A., Fu L., Yan C., Oswald S., Mendes R. G., Makarov D., Schmidt O., Eckert J. (2013): *Insights into the Early Growth of Homogeneous Single-Layer Graphene over Ni–Mo Binary Substrates.* Chemistry of Materials 25, 3880–3887.
- B56 Makharza S., Cirillo G., Bachmatiuk A., Ibrahim I., Ioannides N., Trzebicka B., Hampel S., R6mmeli M. H. (2013): *Graphene oxide-based drug delivery vehicles: Functionalization, characterization, and cytotoxicity evaluation.* Journal of Nanoparticle Research 15, 2099.
- B57 Bautista-Quijano J.R., Avil6s F., Cauich-Rodr6guez J.V., Sch6nfelder R., Bachmatiuk A., Gemming T., R6mmeli M.H.(2013): *Tensile piezoresistivity and disruption of percolation in singlewall and multiwall carbon nanotube/polyurethane composites.* Synthetic Metals 185-186, 96-102.
- B58 Uc-Cayetano E. G., Avil6s F. , Cauich-Rodr6guez J. V., Sch6nfelder R., Bachmatiuk A., R6mmeli M. H., Rubio F., Guti6rrez-Amador M. P., Cruz G. J. (2014): *Influence of nanotube physicochemical properties on the decoration of multiwall carbon nanotubes with magnetic particles.* Journal of Nanoparticle Research 16, 2192.
- B59 **R6mmeli M. H., Gorantla S., Bachmatiuk A., Phieler J., Gei6bler N., Ibrahim I., Pang J., (H6) Eckert J. (2013): *On the Role of Vapor Trapping for Chemical Vapor Deposition (CVD) Grown Graphene over Copper.* Chemistry of Materials 25, 4861–4866.**
- B60 **Bachmatiuk A., Mendes R. G., Hirsch C., J6hne C., Lohe M. R., Grothe J., Kaskel S., (H7) Fu L., Klingeler R., Eckert J., Wick P., R6mmeli M. H. (2014): *Few-Layer Graphene Shells and Nonmagnetic Encapsulates: A Versatile and Nontoxic Carbon Nanomaterial.* ACS Nano 7, 10552–10562.**
- B61 Mondin G., Lohe M. R., Wisser F.M., Grothe J., Mohamed-Noriega N., Leifert A., D6rfler S., Bachmatiuk A., R6mmeli M.H., Kaskel S. (2013): *Electroless copper*

- deposition on (3-mercaptopropyl)triethoxysilane-coated silica and alumina nanoparticles*. *Electrochimica Acta* 114, 521-526.
- B62 Mendes R. G., Koch B., Bachmatiuk A., El-Gendy A. A., Krupskaya Y., Springer A., Klingeler R., Schmidt O., Břchner B., Sanchez S., Rřmmeli M. H. (2014): *Synthesis and toxicity characterization of carbon coated iron oxide nanoparticles with highly defined size distributions*. *Biochimica et Biophysica Acta - General Subjects* 1840, 160-169.
- B63 Cichocka M. O., Zhao J., Bachmatiuk A., Quang H. T., Gorantla S. M., Gonzalez-Martinez I. G., Fu L., Eckert J., Warner J. H., Rřmmeli M. H. (2014): *In situ observations of Pt nanoparticles coalescing inside carbon nanotubes*. *RSC Advances* 4, 49442-49445.
- B64 Gorantla S., Bachmatiuk A., Hwang J., Alsalman H. A., Kwak J. .Y, Seyller T., Eckert J., Spencer M. G., Rřmmeli M. H. (2014): *A universal transfer route for graphene*. *Nanoscale* 6, 889-896.
- B65 Gonzalez-Martinez I. G., Gorantla S. M., Bachmatiuk A., Bezugly V., Zhao J., Gemming T., Kunstmann J., Eckert J., Cuniberti G., Rřmmeli M. H. (2014): *Room temperature in situ growth of B/BOx nanowires and BO x Nanotubes*. *Nano Letters* 14, 799-805.
- B66 Zhao J., Deng Q., Bachmatiuk A., Gorantla S., Popov A., Eckert J., Rřmmeli M. H. (2014): *Free-Standing Single-Atom-Thick Iron Membranes Suspended in Graphene Pores*. *Science* 343, 1228.
- B67 Plach D., Simha Martynkov G., Bachmatiuk A., Peikertov P., Seidlerov J., Rřmmeli M. H. (2014): *The influence of pH on organovermiculite structure stability*. *Applied Clay Science* 93-94, 17-22.
- B68 **Bachmatiuk A., Dianat A., Ortmann F., Quang H. T., Cichocka M. O., Gonzalez-Martinez I., Fu L., Rellinghaus B., Eckert J., Cuniberti G., Rřmmeli M. H. (2014): *Graphene Coatings for the Mitigation of Electron Stimulated Desorption and Fullerene Cap Formation*. *Chemistry of Materials* 26, 4998.**
- B69 Bachmatiuk A., Abelin R. F., Quang H. T., Trzebicka B., Eckert J., Rummeli M. H (2014): *Chemical vapor deposition of twisted bilayer and few-layer MoSe₂ over SiO_x substrates*. *Nanotechnology* 25, 365603.
- B70 Son I.H., Song H.J., Kwon S., Bachmatiuk A., Lee S.J., Benayad A., Park J.H., Choi J.Y., Chang H., Rřmmeli M.H. (2015): *CO₂ Enhanced Chemical Vapor Deposition Growth of Few-Layer Graphene over NiO_x*. *ACS Nano* 8, 9224-9232.
- B71 Fogarassy Z., Rřmmeli M. H., Gorantla S., Bachmatiuk A., Dobrik G., Kamars K., Pter Bir L., Havancsk K., Lbr J. L. (2014): *Dominantly epitaxial growth of graphene on Ni (1 1 1) substrate*. *Applied Surface Science* 314, 490-499.

- B72 Mendes R.G., Koch B., Bachmatiuk A., Ma X., Sanchez S., Damm C., Schmidt O.G., Gemming T., Eckert J., Rmmeli M.H. (2015): *A size dependent evaluation of the cytotoxicity and uptake of nanographene oxide*. Journal of Materials Chemistry B 3, 2522-2529.
- B73 Sun J., Chen Y., Priydarshi M.K., Chen Z., Bachmatiuk A., Zou Z., Chen Z., Song X., Gao Y., Rmmeli M.H., Zhang Y., Liu Z. (2015): *Direct Chemical Vapor Deposition-Derived Graphene Glasses Targeting Wide Ranged Applications*. Nano Letters, 15, 5846-5854.
- B74 Bachmatiuk A., Zhao J., Gorantla S. M., Gonzalez Martinez I. G., Eckert J., Rmmeli M. H. (2015): *Low voltage transmission electron microscopy of graphene: A review*. Small, 11, 515-542.
- B75 Son I.H., Park J.H., Kwon S., Park S., Rmmeli M.H., Bachmatiuk A., Song H.J., Ku J., Choi J.W., Choi J.M., Doo S.G., Chang H. (2015): *Silicon carbide-free graphene growth on silicon for lithium-ion battery with high volumetric energy density*. Nature Communications 6, 7393.
- B76 **Pang J., Bachmatiuk A., Fu L., Yan C., Zeng, M., Wang J., Trzebicka B., Gemming T., (H9) Eckert J., Rmmeli, M.H. (2015): *Oxidation as A Means to Remove Surface Contaminants on Cu Foil Prior to Graphene Growth by Chemical Vapor Deposition*. Journal of Physical Chemistry C 119, 13363-13368.**
- B77 Bachmatiuk A., Boeckl J., Smith H., Ibrahim I., Gemming T., Oswald S.; (H10) Kazmierczak W., Makarov D., Schmidt O., Eckert J., Fu L., Rmmeli, M. H. (2015): *Vertical Graphene Growth from Amorphous Carbon Films using Oxidizing Gases*. Journal of Physical Chemistry C, 119, 17965-17970.
- B78 **Pang J., Bachmatiuk A., Fu L., Mendes R.G., Libera M., Placha D., Martynkova G.S., (H11) Trzebicka B., Gemming T., Eckert J., Rmmeli, M.H. (2015): *Direct synthesis of graphene from adsorbed organic solvent molecules over copper*. RSC Advances 5, 60884-60891.**
- B79 Song X., Gao J., Nie Y., Gao T., Sun J., Ma D., Li Q., Chen Y., Jin C., Bachmatiuk A., Rmmeli M.H., Ding F., Zhang Y., Liu Z. (2015): *Chemical vapor deposition growth of large-scale hexagonal boron nitride with controllable orientation*. Nano Research, 8, 3164-3176.
- B80 Oh M., Na S., Woo C.-S., Jeong J.-H., Kim S.-S., Bachmatiuk A., Rmmeli M.H., Hyun S., Lee H.-J. (2015): *Observation of Electrochemically Driven Elemental Segregation in a Si Alloy Thin-Film Anode and its Effects on Cyclic Stability for Li-Ion Batteries*. Advanced Energy Materials, DOI: 10.1002/aenm.201501136.
- B81 Quang H.T., Bachmatiuk A., Dianat A., Ortmann F., Warner J.H., Eckert J., Cuniberti G., Rmmeli, M.H. (2015): *In Situ Observations of Free-Standing Graphene-like Mono- and Bilayer ZnO Membranes*. ACS Nano, 9, 11408-11413.

- B82 Hao G.-P., Sahraie N.R., Zhang Q., Krause S., Oschatz M., Bachmatiuk A., Strasser P., Kaskel S. (2015): *Hydrophilic non-precious metal nitrogen-doped carbon electrocatalysts for enhanced efficiency in oxygen reduction reaction*. Chem. Comm., 51, 17285-17288.
- B83 Pang J., Bachmatiuk A., Ibrahim I., Fu L., Placha D., Martynkova G.S., Trzebicka B., Gemming T., Eckert J., Rummeli, M.H. (2016): *CVD growth of 1D and 2D sp² carbon nanomaterials*. Journal of Materials Science, 51, 640-667.
- B84 Chen Y., Sun J., Gao J., Du F., Han Q., Nie Y., Chen Z., Bachmatiuk A., Priyadarshi M.K., Ma D., Song X., Wu X., Xiong C., Rummeli M.H., Ding F., Zhang Y., Liu Z. (2015): *Growing Uniform Graphene Disks and Films on Molten Glass for Heating Devices and Cell Culture*. Advanced Materials, DOI: 10.1002/adma.201504229.
- B85 Shi L., Chen K., Du R., Bachmatiuk A., Rummeli M.H., Priyadarshi M.K., Zhang Y., Manivannan A., Liu Z. (2015): *Direct Synthesis of Few-Layer Graphene on NaCl Crystals*. Small, 11, 6302-6308.

13. Wystąpienia konferencyjne stanowiące dorobek naukowy – lista

Prace przedstawione są w kolejności chronologicznej. Wszystkie wymienione wystąpienia zostały przedstawione przeze mnie osobiście. Tytuły prac powiązanych tematycznie z cyklem publikacji stanowiących dzieło w myśl ustawy zostały zaznaczone pogrubioną czcionką.

13.1. Przed uzyskaniem stopnia doktora

- K1 Bachmatiuk A., Kaleńczuk R.J., Borowiak-Paleń E. (2007): *Study on the formation process of different carbon nanotubes types upon different carbon feedstocks*, I Krajowa Konferencja Nanotechnologii, 26.04. -28.04., Wrocław, Polska.
- K2 Bachmatiuk A., Kaleńczuk R.J., Borowiak-Paleń E. (2008), *Diameter and Density Control in the CVD Synthesis of Carbon Nanotubes*, II Krajowa Konferencja Nanotechnologii, 25.06.-28.06., Kraków, Polska.

13.2. Po uzyskaniu stopnia doktora

- W1 Bachmatiuk A. (2010): ***Understanding graphitization via Si_xO_y catalyst Systems in CVD***, EMPA St. Gallen/ Szwajcaria, 13-14.12. (wykład na zaproszenie)
- W2 Bachmatiuk A. (2010): ***On the carbo-thermal reduction of silica for carbon nano-fiber formation via CVD***. Fundamentals of low-dimensional carbon nanomaterials, MRS, Boston, USA, 29.11-03.12.
- W3 Bachmatiuk A. (2010): ***Investigating the graphitisation mechanism with the use of SiO₂ nanoparticles in chemical vapor deposition***, Uniwersytet Warszawski, Warszawa, 04.11. (wykład na zaproszenie)

- W4 Bachmatiuk A. (2011): ***Understanding irreducible and reducible oxides as catalysts for carbon nanotubes and graphene formation***, 7th International Conference Diffusion in Solids and Liquids, Algarve/ Portugalia, 26-30.06. (wykřad na zaproszenie)
- W5 Bachmatiuk A. (2011): ***Early steps in understanding irreducible and reducible oxides as catalysts for carbon nanotubes and graphene***, Wright-Patterson Air Force Base, Dayton/ USA, 05.25. (wykřad na zaproszenie)
- W6 Bachmatiuk A. (2011): ***Synthesizing carbon nanotubes and graphene from oxide catalysts***, Merida, Yucatan/ Meksyk, 05.09. (wykřad na zaproszenie)
- W7 Bachmatiuk A. (2011): ***Synthesizing carbon nanotubes and graphene from oxide catalysts***, Konferencja NANO Ostrava 2011, Ostrava/ Czechy, 27-29.04. (wykřad na zaproszenie)
- W8 Bachmatiuk A. (2013): ***Size and cluster dependence of graphene iron oxide nanoparticles on cell viability***, Second International Advanced Materials Science Networking (Amasing) Workshop, Da Nang, Vietnam, 18-23.03. (wykřad na zaproszenie)
- W9 Bachmatiuk A. (2013): ***Mechanizm powstawania nanorurek węgłowych i grafenu przy wykorzystaniu katalizatorów tlenkowych***, CMPW PAN, Zabrze, Polska, 3.07.
- W10 Bachmatiuk A. (2015): ***On the synthesis and characterization of nanomaterials synthesized over oxides***, Soochow University, Suzhou, Chiny, 17.03. (wykřad na zaproszenie)
- W11 Bachmatiuk A. (2015): ***Exploitation of reducible and irreducible oxides for graphitization process and their potential applications***, Konferencja NANO Ostrava, Ostrawa, Czechy, 20.05. (wykřad na zaproszenie)
- W12 Bachmatiuk A. (2015): ***On the graphitization of reducible and irreducible oxides and their potential applications***, Konferencja DSL 2015, Monachium, Niemcy, 24.06. (wykřad na zaproszenie)

Alicja Bachmatiuk
Zabrze, 30.04.2016 r.
Bachmatiuk Alicja