

Autoreferat

dr inż. Mariusz Zdrojek

Spis treści

1. CURRICULUM VITAE	2
1.1. Dane osobowe	2
1.2. Wykształcenie	2
1.3. Zatrudnienie	2
2. DZIAŁALNOŚĆ DYDAKTYCZNA I ORGANIZACYJNA	3
2.1. Konferencje i wystąpienia	3
2.2. Projekty krajowe i międzynarodowe	4
2.3. Opieka naukowa nad studentami i doktorantami	5
2.4. Staże w zagranicznych ośrodkach naukowych	5
2.5. Recenzje i ekspertyzy	5
2.6. Inna działalność organizacyjna	6
2.7. Inna działalność dydaktyczna	6
3. DZIAŁALNOŚĆ NAUKOWO-BADAWCZA	7
3.1. Nagrody i wyróżnienia	7
3.2. Publikacje – podsumowanie	7
3.3. Patenty i wdrożenia	7
3.4. Osiągnięcia naukowe nie stanowiące podstawy postępowania habilitacyjnego - przed uzyskaniem stopnia doktora	7
3.5. Osiągnięcia naukowe nie stanowiące podstawy postępowania habilitacyjnego - po uzyskaniu stopnia doktora	8
3.6. Spis wszystkich publikacji nie stanowiących podstawę do ubiegania się o habilitację i inne opracowania	10
4. OSIĄGNIĘCIA NAUKOWE STANOWIĄCE PODSTAWĘ POSTĘPOWANIA HABILITACYJNEGO	13
4.1. Spis publikacji stanowiących podstawę do ubiegania się o habilitację	13
4.2. Omówienie osiągniętych wyników	14
4.3. Literatura	21

Warszawa, listopad 2014

1. CURRICULUM VITAE

1.1. Dane osobowe

Imię i nazwisko: Mariusz Zdrojek
Data urodzenia: 7.04.1978
Email: zdrojek@if.pw.edu.pl

1.2. Wykształcenie

- Grudzień 2006 stopień doktora nauk fizycznych w zakresie fizyki uzyskany na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej; tytuł rozprawy doktorskiej „ Properties of carbonnanotubes probed by Electrostatic Force Microscopy and Raman spectroscopy”; rozprawa doktorska uznana za wyróżniającą się
- Grudzień 2006 stopień doktora nauk fizycznych w zakresie badań materiałowych uzyskany na Uniwersytecie w Lille (Francja) we współpracy z IEMN w Lille, w ramach umowy co-tuttele; tytuł rozprawy doktorskiej „Etude des propriétés électroniques de nanotubes de carbone par Microscopie à Force Electrostatique et Spectroscopie Raman”; rozprawa doktorska uznana za wyróżniającą się; nagroda za najlepszy doktorat obroniony w 2006r. (2007)
- Październik 2002 stopień magistra nauk fizycznych w zakresie fizyki technicznej uzyskany z wyróżnieniem na Wydziale Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej Politechniki Warszawskiej; praca pt. „Badania ramanowskie nadprzewodników wysokotemperaturowych typu R123”

1.3. Zatrudnienie

- 2007-obecnie adiunkt na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej; kierownik pracowni nanostruktur
- 2007-2008 Instytut CNM (Centro Nacional de Microelectrónica) w Barcelonie (Hiszpania); postdoc
- 2008-2010 ICN (Instituto Catalán de Nanociencia y Nanotecnología) w Barcelonie (Hiszpania); postdoc Marie-Curie

2. DZIAŁALNOŚĆ DYDAKTYCZNA I ORGANIZACYJNA

2.1. Konferencje i wystąpienia

Udział w 37 konferencjach i wystąpieniach tematycznych o charakterze międzynarodowym (25) i krajowym (12), w tym **29 po uzyskaniu stopnia doktora**.

- Liczba referatów: **23**, w tym 13 zaproszonych
- Liczba prezentacji plakatowych: **14**

Pełen wykaz prezentacji konferencyjnych i wystąpień znajduje się poniżej. Wykaz wyklucza prezentacje, w których jestem współautorem ale nie jestem osobą prezentującą.

- 1) Poster – Graphene Week, Gothenburg (Szwecja), lipiec 2014
- 2) Referat – Krajowa Konferencja Elektroniki, Darłówko, czerwiec 2014
- 3) Referat zaproszony – Uniwersytet III wieku, PW, Warszawa, styczeń 2014
- 4) Referat – Zjazd Fizyków Polskich, Poznań, wrzesień 2013
- 5) Poster – DRIP 2013, Warszawa, wrzesień 2013
- 6) Referat zaproszony – wykład dla laureatów olimpiady fizycznej, Warszawa, kwiecień 2013
- 7) Referat zaproszony – UPK PW, Warszawa, kwiecień 2013
- 8) Referat – Graphel, Mykonos (Grecja), wrzesień 2012
- 9) Referat – EMRS Fall Meeting, Warszawa, wrzesień 2012
- 10) Referat – TNT2012, Madryt (Hiszpania), wrzesień 2012
- 11) Referat zaproszony – panel dyskusyjny, XV Festiwal nauki, Warszawa, wrzesień 2011
- 12) Referat zaproszony – Hybrid Nanostructures, Toruń, sierpień 2011
- 13) Poster – NT11, Cambridge (UK), lipiec 2011
- 14) Referat zaproszony – Akademia Umysłów Ściśłych – Szukając Einsteina, czerwiec 2011
- 15) Referat zaproszony – CSZ PW, Warszawa, maj 2011
- 16) Referat zaproszony – IF UMK, Toruń (prof. W. Jaskólski), grudzień 2010
- 17) Referat zaproszony – WIM PW, Warszawa (prof. J. Kurzydłowski), grudzień 2010
- 18) Referat zaproszony – WEiTI PW, Warszawa (prof. J. Szmidt), listopad 2010
- 19) Poster – NT2010, Montreal (Kanada), Czerwiec 2010
- 20) Referat – MRS Fall meeting, Boston (USA), Grudzień 2009
- 21) Poster - TNT2009, Barcelona (Hiszpania), Wrzesień 2009
- 22) Referat - Nano 2009, Warszawa, Czerwiec 2009
- 23) Referat - ElecMol08, Grenoble (Francja), Grudzień 2008
- 24) Referat - Trends in Nanotechnology (TNT2008), Oviedo (Hiszpania), Wrzesień 2008
- 25) Poster - International Conference on the Science and Application of Nanotubes (NT08), Montpellier (Francja), nagroda za najlepszy poster, Czerwiec 2008
- 26) Poster - Science and Application of Nanotubes (NT07), Ouro Preto (Brazylia), Czerwiec 2007
- 27) Referat zaproszony - EPFL, Lozanne (Szwajcaria), prof. L. Forro, Maj 2007
- 28) Referat zaproszony - ICN Barcelona (Hiszpania), A.Bachtold, Maj 2007
- 29) Referat zaproszony - IEMN, Lille (Francja), T. Melin, Styczeń 2007
- 30) Poster - Trends in Nanotechnology (TNT2006), Grenoble (Francja), nagroda za najlepszy poster, Wrzesień 2006

- 31) Poster - International summer school on nanotubes, Cargès (Korsyka, Francja), Lipiec 2006
- 32) Poster - GDR-E/Nano-E meeting, Houffalize (Belgia), Październik 2005
- 33) Poster - TNT, Oviedo (Hiszpania), nagroda za najlepszy poster, Sierpień 2005
- 34) Referat - Scanning Probe Microscopy forum, Anglet (Francja), Kwiecień 2005
- 35) Poster - Trends in Nanotechnology (TNT2004), Segovia (Hiszpania), Wrzesień 2004
- 36) Poster - Nanospectra meeting, Porquerolles (Francja), Czerwiec 2004
- 37) Poster - EMRS Fall Meeting, Warszawa, Październik 2003

2.2. Projekty krajowe i międzynarodowe

Wymienione poniżej projekty, (1-12) dotyczą okresu po uzyskaniu stopnia doktora a pozostałe (13-18) dotyczą okresu przed uzyskaniem doktoratu.

- 1) Projekt Graf-Tech, „Ultraszybkie fotodetektory grafenowe”, NCBR; 2013-2016. **Kierownik projektu.**
- 2) Projekt Graf-Tech, „Innowacyjne grafenowo-tytanowe zaworysilnikowe o podwyższonych właściwościach użytkowych”, NCBR; 2013-2016. **Główny wykonawca.**
- 3) Diamentowy grant, „Badania nowych dwuwymiarowych nanostruktur dla zastosowań w nano i optoelektronice”, MNiSW, 0025/DIA/2013/42, 2013-2016. **Opiekun i koordynator projektu.**
- 4) Projekt inwestycyjny w ramach FNiTP, „Aparatura do wytwarzania nanourządzeń i nanostruktur” DPN-WI-531-10167-3/MK/12; 2012-2013. **Kierownik projektu.**
- 5) Diamentowy grant, MNiSW, „Szerokopasmowy efekt antenowy w wielościennych nanorurkach węglowych”, 0294/DIA/2012/41, 2012-2015. **Opiekun i koordynator projektu.**
- 6) Projekt Lider, NCBIR „Nowe nanourządzenia do zastosowań w fotowoltaice”, 2010-2014. **Kierownik projektu.**
- 7) Program Polonium, współpraca dwustronna – Francja, (DMU-WWM-183-782-7/MBA/10); 2011-2012. **Koordynator projektu.**
- 8) Grant Fundacji na rzecz Nauki Polskiej – Homing Plus: Single electron manipulation in nanostructures, 2010-2012. **Kierownik projektu.**
- 9) Projekt Europejski FP7 - Marie Curie Reintegration Grant (GA 268293); 2010-2013; **Kierownik projektu.**
- 10) Program Ministra MNiSW - "Wsparcie międzynarodowej mobilności naukowców"; (211/MOB/2008/0); 2008-2010. **Główny beneficjent.**
- 11) Projekt Europejski FP 7- Quantum Devices based on Carbon Nanotubes: Marie Curie Actions IEF (PIEF-GA-2008-220074); 2008-2010. **Kierownik projektu.**
- 12) Grant uczelniany (dziekański) - Zaawansowane metody spektroskopii ramanowskiej w zastosowaniu do jednowymiarowych nanoobjektów; 2007. **Kierownik projektu.**
- 13) Grant promotorski (2777/H03/2006/31) - Charakterystyka nanorurek węglowych przy użyciu spektroskopii ramanowskiej oraz mikroskopii sił atomowych i elektrostatycznych.; 2006-2007. **Główny wykonawca.**
- 14) Projekt Europejski - Nanospectra - European RTN network; 2002-2007. **Uczestnik**
- 15) Projekt Polsko-Francuski - Electrostatic and optical properties of carbon nanotubes and semiconductor nanowires: Program Polonium; 2006-2007. **Uczestnik**

- 16) Stypendium doktoranckie rządku francuskiego (co-tutelle); 2004-2005. **Główny beneficjent.**
- 17) Projekt Europejski - Centre for Photonics and Materials for Prospective Applications: Center of Excellence (ENK5-CT-2002-8066); 2002-2005. **Uczestnik.**
- 18) Grant KBN - New materials for spintronics including oxides and magnetic semiconductors with Curie temperature above 300K (PBZ/KBN/044/P03/2001); 2001-2005. **Uczestnik.**

2.3. Opieka naukowa nad studentami i doktorantami (od 2010)

Opieka i promocja 7 prac magisterskich oraz 6 prac inżynierskich.

Dwóch moich dyplomantów (A. Taube, M. Wąsik) zostali uhonorowani Diamentowym Grantem fundowanym przez MNiSW, w którym pełnię funkcję opiekuna naukowego.

Pomocniczy opiekun naukowy czterech prac doktorskich:

- E. Zbydniewska (IV rok, otwarcie przewodu - 2015). Temat pracy: „Electronic properties of couples semiconducting nanocrystals and carbon nanotubes”. Doktorat międzynarodowy, polsko-francuski. Podpisana umowa bilateralna co-tutele.
- Dużyńska (III rok, otwarcie przewodu - 2015). Temat pracy: „Badania właściwość cienkich warstw nanorurek węglowych”
- A. Łapińska (II rok, otwarcie przewodu - 2016). Temat pracy: „Własności optyczne materiałów dwuwymiarowych”
- J. Sobieski (I rok). Przewidywana tematyka pracy: „Wytwarzanie i charakterystyka dwuwymiarowego disiarczku molibdenu MoS₂”

2.4. Staże w zagranicznych ośrodkach naukowych

2003-2006	staże naukowe w ramach umowy bilateralnej, Instytut Elektroniki, Mikroelektroniki i Nanotechnologii, Lille (Francja)
2007-2008	staż podoktorski w instytucie CNM (Centro Nacional de Microelectrónica) w Barcelonie (Hiszpania)
2008-2010	staż podoktorski w ramach programu Marie-Curie IEF w instytucie ICN (Institut Catalán de Nanociencia y Nanotecnología) w Barcelonie (Hiszpania)

2.5. Recenzje i ekspertyzy

- Recenzent projektów badawczych i rozwojowych: NCBR (7), NCN (1), MNiSW (1)
- Recenzent czasopism naukowych: App. Phys. Lett. (1), J. App. Phys. (2), Phys. Stat. Soli. (4), Solid State Comm. (1), JBCS (1)
- Ekspertyza dotycząca realizacji projektu w ramach programu Innowacyjna Gospodarka (POIG, działanie 2.2); rok wykonania 2012
- Udział w panelu eksperckim na konferencji „Biznes, Nauka i Innowacja” pod patronatem Urzędu Marszałkowskiego Woj. Mazowieckiego w ramach projektu MSODI współfinansowanego przez EFS - Wrzesień 2014

2.6. Inna działalność organizacyjna

- Członek rady Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej, od 2012
- Przewodniczący komisji finansowej Wydziału Fizyki PW, od 2013
- Członek komisji ds. programowych na Wydziale Fizyki PW, od 2013
- Współkoordynator wymiany naukowej z jednym z największych ośrodków badawczych na północy Francji, (IEMN, Lille) w ramach projektów Polonium oraz wspólnych doktoratów typu co-tutelle; od 2005
- Koordynator i autor projektu budowy laboratorium nanostruktur na Wydziale Fizyki
- Koordynator i autor projektu budowy laboratorium elektrono-litografii na Wydziale Fizyki
- Współorganizator drzwi otwartych na Wydziale Fizyki PW
- Kierownik grupy badawczej na Wydziale Fizyki PW od 2011
- Organizator praktyk studenckich w laboratorium nanostruktur na Wydziale Fizyki PW
- Udział w tworzeniu Księgi Jubileuszowej PW – 100lecie odnowienia tradycji.

2.7. Inna działalność dydaktyczna

- Prowadzenie wykładów autorskich (30h) na Wydziale Fizyki PW dla studentów II i III stopnia: „Carbon nanostructures” (w języku angielskim, 2013); Grafen – własności i zastosowania (w języku polskim, 2014)
- Prowadzenie ćwiczeń rachunkowych z podstaw fizyki; od 2010
- Wykład na XV Festiwalu Nauki (Warszawa 2011) promujący badania dotyczące nanorurek węglowych
- Wykład dla kandydatów na studia w ramach projektu „Akademia Umysłów Ścisłych – Szukając Einsteina, czerwiec 2011”, mający na celu pokazanie zastosowań nanotechnologii w życiu codziennym. Wykład ten był rozpowszechniany w formie nagrania w szkołach ponadgimnazjalnych w województwie mazowieckim. Patronat projektu: Kuratorium Oświaty w Warszawie oraz PW.
- Referat dla laureatów olimpiady fizycznej, Warszawa, kwiecień 2013
- Referat dla uczestników Uniwersytetu III wieku dotyczący zastosowań nanostruktur w życiu codziennym; Politechnika Warszawska; styczeń 2014
- Promocja polskich badań dotyczących grafenu: artykuły w prasie (Focus, Gazeta Wyborcza, Przegląd), wywiady telewizyjne (Polsat News, TVN 24, TVN BiŚ); 2010-2014

3. DZIAŁALNOŚĆ NAUKOWO-BADAWCZA

3.1. Nagrody i wyróżnienia

2006	Wyróżnienie rozprawy doktorskiej wykonanej na Wydziale Fizyki PW
2007	Nagroda za najlepszą pracę doktorską w IEMN (Lille, Francja) obronioną w 2006r.
2007	Nagroda Indywidualna stopnia II za osiągnięcia naukowe w roku 2006 przyznana przez Rektora PW
2011	Stypendium Ministra dla wybitnych młodych naukowców
2012	Stypendium Ministra dla wybitnych młodych naukowców
2013	Nagroda Rektora PW (zespołowa I stopnia) za osiągnięcia naukowe

3.2. Publikacje - podsumowanie

- Całkowita liczba publikacji naukowych: **32**, w tym artykułów w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports (JCR): **27**.
- Sumaryczny *impact factor* (IF) zgodny z rokiem opublikowania : **108,6**
- Całkowita liczba cytowań (wg Web of Science): **360**, w tym cytowań obcych: **336**
- Index Hirsha: **10**
- Wskaźnik średniego cytowania na publikację: **13.33**

3.3. Patenty i wdrożenia

- Patent nr PL397442-A1, (24.06.2013) pt. „Sposób grzania laserowego nanoobjektów o istotnej anizotropii absorpcji optycznej ze sterowaniem przyrostu temperatury i układ do sterowanie tego sposobu”, Autorzy: J. Judek, M. Zdrojek, M. Wąsik.
- Opracowanie i wdrożenie technologii produkcji nanostruktur węglowych metodą chemicznego naparowania z fazy gazowej (2013 r.). Autorzy: M. Zdrojek, J. Judek, W. Strupiński, J. Sobieski.
- Zgłoszenie patentowe nr. P.410021 (31.11.2014) pt. „Sposób wytwarzania jednościennych nanorurek węglowych”. Autorzy: M. Zdrojek, A. Dużyńska, J. Sobieski, J. Judek

3.4. Osiągnięcia naukowe nie stanowiące podstawy postępowania habilitacyjnego - Przed uzyskaniem stopnia doktora (najważniejsze osiągnięcia w odniesieniu do niżej zamieszczonego wykazu publikacji i innych opracowań nie będących podstawą do ubiegania się o habilitację)

1. Badałem własności magneto-elektryczne w domieszkowanym manganem (Mn) azotku galu (GaN). Wykonane zostały pomiary zjawisko magnetorezystancji oraz efekt Halla w funkcji temperatury (4-300 K) oraz pola magnetycznego (< 7T). Zaobserwowano ujemną magnetorezystancję jako rezultat słabej lokalizacji nośników prądu. Brałem udział w pomiarach oraz dyskusji wyników. [ref. b-1]

2. Przeprowadziłem badania wielościennych nanorurek węglowych metodą spektroskopii ramanowskiej i mikroskopii sił atomowych (AFM). Były to pierwsze tego typu badania w Polsce. Opracowano metodę dyspersji nanorurek na podłoże SiO₂/Si oraz wykonano pomiary AFM. Wykonałem pomiary ramanowskie małych skupisk nanorurek wielościennych w funkcji temperatury (4K – 300K). Brałem udział w interpretacji i dyskusji wyników oraz byłem głównym autorem manuskryptu. [ref. b-2]
3. Po raz pierwszy na świecie zastosowałem technikę mikroskopii sił elektrostatycznych do badań nad nanorurkami węglowymi. Opracowałem metodę separacji i lokalizacji nanorurek, co pozwoliło na prowadzenie badań na poziomie pojedynczego nanoobektu. Opracowałem metodę wstrzykiwania elektronów do pojedynczych nanorurek. Celem tych eksperymentów było zbadanie własności elektrostatycznych nanorurek węglowych, w szczególności, zbadanie zachowania się elektronów po wstrzyknięciu do nanorurki oraz oszacowania ilości wstrzykniętych elektronów. Pokazałem równomierną delokalizację ładunków wzdłuż całej nanorurki węglowej oraz zaobserwowano efekt emisji polowej elektronów z końca nanorurki. Brałem udział w planowaniu i wykonaniu całego eksperymentu, analizie wyników oraz dyskusji. Byłem głównym autorem manuskryptu. [ref. b-3]
4. Badałem własności elektrostatyczne nanorurek węglowych a w szczególności efekty ładowania i rozładowywania się pojedynczych nanoobektów (zarówno jedno- jak i wielościenne nanorurki). Opracowałem model pozwalający określać liczbę wstrzykniętych do pojedynczego nanoobektu elektronów. Badania te mają istotne znaczenie w zastosowaniach nanorurek do budowy tranzystorów polowych czy elektronowych emiterów polowych. Ponadto praca ta pokazała, iż elektrony mogą być pułapkowane wewnątrz nanorurek przez wiele godzin w temperaturze pokojowej, co może otworzyć drogę do opracowania nowego typu pamięci w skali nano. Zaprojektowałem i wykonałem doświadczenia. Uczestniczyłem w dyskusji wyników i jestem głównym autorem manuskryptu [ref. b-5, b-6]

3.5. Osiągnięcia naukowe nie stanowiące 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)

1. Badałem własności elektrostatyczne grafenu. W ramach tej pracy udało się pracować metodą wstrzykiwania ładunków do grafenu leżącego na podłożu izolatora przy pomocy elektrostatycznego modu pracy mikroskopu atomowego. Zaobserwowaną różną dynamikę rozładowywania się grafenu w zależności o warunków środowiskowych. Pełne rozładowanie zajmowało czas rzędu dziesiątek minut. Brałem udział w opracowywaniu metodologii eksperymentu, dyskusji wyników oraz pisaniu manuskryptu. [ref. b-9]
2. Zbadano efektów temperaturowych skupisk wielościennych nanorurek węglowych przy pomocy spektroskopii ramanowskiej. Pokazano zmiany położenia pików ramanowskich dla nanorurek czystych i utlenianych oraz omówiono wpływ zanieczyszczeń na mierzone efekty. Zaprezentowana możliwość oczyszczania skupisk nanorurek poprzez kontrolowane ich grzanie

wiązką lasera. Brałem udział w dyskusji i analizie wyników oraz w pisaniu manuskryptu. [ref. b-13]

3. Użyłem spektroskopii ramanowskiej do badań grafenu chemicznego oraz jego pochodnych pod kątem zastosowania jako materiału w nieliniowych absorberach światła. Pod kątem tego zastosowania pokazano różnice strukturalne między tlenkiem grafenu oraz zredukowanym tlenkiem grafenu. Pokazano poziom redukcji tlenu grafenu. Ponadto zbadano własności grafenowego kompozytu bazującego na nowej metodzie eksfoliacji chemicznej przy użyciu chityny oraz porównano materiał wyjściowy dla różnych rozpuszczalników. Byłem autorem badań ramanowskich oraz współautorem badań AFM. Brałem udział w dyskusji i analizie wyników. Jestem współautorem tekstu oraz części ilustracji. [ref. b-14 b-15, b-24, b-25]
4. Zaprojektowałem i uruchomiłem unikalny układ badawczy do bezkontaktowych pomiarów przewodnictwa mikrofalowego w szerokim zakresie temperatur (2K-300K) oraz w polu magnetycznym (do 7 T). Układ ten został użyty do zbadania magnetorezystancji monowarstwy grafenu wyhodowanej na izolacyjnym podłożu węgliku krzemu (SiC). Bezkontaktowe pomiary porównano ze standardową metodą van der Pauw'a pokazując dużą zbieżność obu metod. Ponadto metodę bezkontaktową zastosowałem do badań cienkowarstwowych nadprzewodników wysoko temperaturowych. Brałem udział w opracowaniu koncepcji i uruchomieniu nowego układu badawczego. Przeprowadzałem pomiary, brałem udział w dyskusji wyników oraz jestem współautorem manuskryptu. [b-17, b-18]
5. Opracowałem metodę produkcji monowarstw disiarczku molibdenu (MoS_2). Wykonano pomiary ramanowskie monowarstwy na podłożu SiO_2 w funkcji temperatury (4-300 K). Pokazano nieliniowości w przesunięciu głównych pików ramanowskich MoS_2 w funkcji temperatury, spowodowane procesem rozpadu fononów optycznych w niskich temperaturach (poniżej 150 K). Ponadto wyznaczono lokalną temperaturę grzania monowarstwy laserem w funkcji temperatury otoczenia. Ta zależność również wykazała nieliniowość sugerująca, że przewodnictwo cieplne monowarstwy w niskich temperaturach również jest nieliniowe. Byłem współautorem koncepcji pracy. Uczestniczyłem w budowie układu pomiarowego i przeprowadzeniu badań. Jestem współautorem manuskryptu. [b-21]
6. Opracowałem i wdrożyłem technologię produkcji nanostruktur węglowych metodą chemicznego naparowania z fazy gazowej. Technologia bazuje na piecu Lindberg/Blue M, do którego zainstalowano układ pozwalający na pracę w niskich ciśnieniach (mbar) oraz układ do podawania różnych prekursorów węgla (metan, propan, acetylen). Technologia pozwala na hodowlę grafenu na miedzi oraz nanorurek węglowych na dowolnym podłożu. Byłem autorem koncepcji oraz współautorem instalacji i wdrożenia technologii. [wdrożenie]
7. Prowadziłem temperaturowe badania ramanowskie cienkich warstwa nanorurek węglowych o wysokiej gęstości. Do tych badań opracowano technologię produkcji cienkich warstw. Badania pokazały liniową zmianę pozycji pików ramanowskich wraz ze wzrostem temperatury powyżej 270 K. Poniżej tej temperatury zmiana pozycji pików wykazuje charakter nieliniowy, który ma swoje źródło w efekcie rozpadu fononu optycznego z uwagi na anharmoniczność potencjału w strukturze warstwy nanorurek. Dodatkowo, zbadano lokalną zmianę temperatury warstwy rurek pod wpływem grzania laserowego w funkcji temperatury globalnej. Byłem pomysłodawcą tych badań. Uczestniczyłem w budowie stanowiska pomiarowego oraz pomiarach, dyskusji wyników oraz ich interpretacji. Współtworzyłem manuskrypt. [b-25]

8. Pokazałem po raz pierwszy możliwość wytwarzania wysokiej jakości pojedynczych nanorurek jednościennej używając propanu (C_3H_8) jako prekursora węgla w metodzie CVD (ang. Chemical Vapour Deposition). Nanorurki wytwarzane były bezpośrednio na podłożu docelowym. W szczególności pokazałem, że jednościenne nanorurki węglowe można produkować już przy temperaturze $800\text{ }^\circ C$ o bardzo małej gęstości rozmieszczenia i zarówno metaliczny jak i półprzewodnikowy charakter przewodnictwa. Ciekawym efektem, który udało się zaobserwować była zależność struktury nanorurek od temperatury wzrostu. Generalnie w metodzie CVD dla większości węglowodorów, niższa temperatura ($600 - 900\text{ }^\circ C$) pozwala otrzymywać nanorurki wielościenne a wyższa ($900 - 1000\text{ }^\circ C$) jednościenne. W przypadku zaprezentowanym w mojej pracy ta tendencja jest odwrotna i najlepszej jakości rurki jednościenne otrzymuje się dla temperatury ok. $800\text{ }^\circ C$. Wyniki tej pracy mogą rzucić nowe światło na procesy wytwarzania nanorurek węglowych przy użyciu innych prekursorów węgla i pokazać tanią alternatywę źródła węgla (propan) w procesach CVD. [b-26] I wreszcie wyniki tej pracy były podstawą do przygotowania i złożenia aplikacji patentowej (nr. P.410021, 2014-10-31).

3.6. Spis wszystkich publikacji nie stanowiących podstawy do ubiegania się o habilitację.

Przed uzyskaniem stopnia doktora

b-1 C. Jastrzebski, W. Gebicki, M. Zdrojek, M. Bockowski, B. Strojek, T. Szyszko, S. Podsiadlo, *Magnetotransport studies of Ga(Mn,Fe)N bulk crystals*, Physica Status Solidi (c) Vol. 1-2, 198 (2004). IF: 0.550.

Wkład habilitanta: uczestniczyłem w pomiarach oraz dyskusji wyników. Mój wkład procentowy oceniam na 15%.

b-2 M. Zdrojek, W. Gebicki, C. Jastrzebski, T. Melin, A. Huczko, *Studies of multiwalled carbon nanotubes using Raman spectroscopy and atomic force microscopy*, Solid State Phenomena 99, 265 (2004). IF: 0.51

Wkład habilitanta: byłem współpomysłodawcą pracy, wykonałem próbki, przeprowadziłem pomiary oraz brałem udział dyskusji wyników i tworzeniu manuskryptu. Mój wkład procentowy oceniam na 75%.

b-3 M. Zdrojek, T. Melin, C. Boyaval, B. Jouault, M. Wozniak, W. Gebicki, A. Huczko, D. Stievenard, and L. Adamowicz, *Charging and emission properties of multiwalled carbon nanotubes probed by Electric Force Microscopy*; Appl. Phys. Lett. 86, 213114 (2005). IF₂₀₀₅: 4.13.

Wkład habilitanta: byłem pomysłodawcą pracy, wykonałem próbki, przeprowadziłem pomiary oraz brałem udział dyskusji wyników. Jestem głównym autorem manuskryptu. Mój wkład procentowy oceniam na 65%.

b-4 M. Woźniak, M. Bystrzejewski, A. Huczko, W. Kaszuwara, J. Kozubowski, H. Lange, M. Leonowicz, and M. Zdrojek, *Magnetic Encapsulates Nd-Fe-B-C and Fe-C for drug delivery systems*, materiały konferencyjne E-MRS Fall Meeting (2005)

Wkład habilitanta: brałem udział w pomiarach oraz w dyskusji wyników. Mój wkład procentowy oceniam na 10%.

b-5 M. Zdrojek, T. Melin, W. Gebicki, H. Desienger, D. Stievenard, L. Adamowicz, *Charging and discharging processes of carbon nanotubes probed by Electrostatic Force Microscopy*, J. Appl. Phys.

100, 114326 (2006). IF₂₀₀₆: 2.320.

Wkład habilitanta: byłem pomysłodawcą pracy, wykonałem próbki, przeprowadziłem pomiary oraz brałem udział w dyskusji wyników. Jestem głównym autorem manuskryptu. Mój wkład procentowy oceniam na 75%.

b-6 M. Zdrojek, T. Melin, W. Gebicki, H. Desienger, D. Stievenard, L. Adamowicz, *Comment on Electrostatics of Individual Single-Walled Carbon Nanotubes Investigated by Electrostatic Force Microscopy*, Phys. Rev. Lett. 96, 039703 (2006). IF₂₀₀₆: 7.07

Wkład habilitanta: byłem pomysłodawcą pracy, wykonałem próbki, przeprowadziłem pomiary oraz brałem udział w dyskusji wyników. Jestem głównym autorem manuskryptu. Mój wkład procentowy oceniam na 65%.

b-7 M. Woźniak, W. Kaszuwara, J. A. Kozubowski, M. Leonowicz, M. Bystrzejewski, A. Huczko, H. Lange, M. Zdrojek, Rozdział w książce – *Encapsulates: Nd-Fe-B-C and Fe-C for Drug Delivery Systems and Contrast Elements, Study of Structure, Chemical Composition and Magnetic Properties*, ed. R. Kassing et al. Functional Properties of Nanostructured Materials, p.399-402, (2006)

Wkład habilitanta: brałem udział w pomiarach oraz w dyskusji wyników. Mój wkład procentowy oceniam na 10%.

Po uzyskaniu stopnia doktora

b-8 G. Allan, S. Barbet, Y. Coffinier, C. Delerue, D. Deresmes, M. Diarra, H. Diesinger, B. Grandidier, L. Marcon and T. Mélin, O. Melnyk, D. Stiévenard, L. Wirtz and M. Zdrojek, *Fundamental studies in nanosciences at the Institute of Electronics, Microelectronics, and Nanotechnology (IEMN)*, Int. J. Nanotechnol., 5, 631, (2008). IF₂₀₀₈: 0.75

Wkład habilitanta: brałem udział w dyskusji wyników oraz przy tworzeniu manuskryptu. Mój wkład procentowy oceniam na 15%.

b-9 A. Verdaguer, M. Cardellach, J.J. Segura, G.M. Sacha, J. Moser, M. Zdrojek, A. Bachtold, J. Fraxedas, *Charging and discharging of graphene in ambient conditions studied with scanning probe microscopy*, Appl. Phys. Lett., 94, 233105 (2009). IF₂₀₀₉: 3.596

Wkład habilitanta: brałem udział w dyskusji wyników i tworzeniu manuskryptu. Mój wkład procentowy oceniam na 20%.

b-10 J. Judek, D. Brunel, T. Mélin, M. Marczak, M. Zdrojek, W. Gebicki, L. Adamowicz, *Light polarized resonant Raman spectra from individual single- and double-wall carbon nanotubes*, Physica Status Solidi (c) 6, 2056 (2009). IF₂₀₀₉: 0.550

Wkład habilitanta: brałem udział w dyskusji wyników i tworzeniu manuskryptu. Mój wkład procentowy oceniam na 20%.

b-11 T. Melin, M. Zdrojek, D. Brunel, Rozdział w książce – *Electrostatic force microscopy and Kelvin force microscopy as a probe of the electrostatic and electronic properties of carbon nanotubes*, Scanning Probe Microscopy in Nanoscience and Nanotechnology, Vol. 14-16, Edited by B. Bhushan, Springer-Verlag, Heidelberg, 2010.

Wkład habilitanta: byłem współpomysłodawcą pracy, brałem udział w dyskusji i tworzeniu manuskryptu. Mój wkład procentowy oceniam na 35%.

b-12 D. Brunel, D. Troadec, D. Hourlier, D. Deresmes, M. Zdrojek, T. Mélin, *Characterization of ion/electron beam induced deposition of electrical contacts at the sub- μ m scale*, Microelectronic Engineering 88, 1569 (2011). IF₂₀₁₁: 1.224

Wkład habilitanta: wykonałem część próbek i pomiarów oraz brałem udział dyskusji wyników i tworzeniu manuskryptu. Mój wkład procentowy oceniam na 25%.

b-13 J. Judek, C. Jastrzebski, A. Malolepszy, M. Mazurkiewicz, L. Stobinski, M. Zdrojek, *Laser induced temperature effects in multi-walled carbon nanotubes probed by Raman spectroscopy*, Physica Status Solidi (a) 209, 313 (2012). IF: 1.469

Wkład habilitanta: brałem udział dyskusji wyników i tworzeniu manuskryptu. Mój wkład procentowy oceniam na 25%.

b-14 G. Sobon, J. Sotor, J. Jagiello, R. Kozinski, M. Zdrojek, M. Holdynski, P. Paletko, J. Boguslawski, L. Lipinska, and K. M. Abramski, *Graphene Oxide vs. Reduced Graphene Oxide as saturable absorbers for Er-doped passively mode-locked fiber laser*, Optics Express 20, 19463 (2012). IF₂₀₁₂: 3.546

Wkład habilitanta: przeprowadziłem badania ramanowskie oraz ich analizę, brałem udział dyskusji wyników i tworzeniu manuskryptu. Mój wkład procentowy oceniam na 15%.

b-15 G. Sobon, J. Sotor, Joanna J., R. Kozinski, K. Librant, M. Zdrojek, L. Lipinska, K. M. Abramski, *Linearly polarized, Q-switched Er-doped fiber laser based on reduced graphene oxide saturable absorber*, Appl. Phys. Lett., 101, 241106 (2012). IF₂₀₁₂: 3.794

Wkład habilitanta: przeprowadziłem badania ramanowskie oraz ich analizę, brałem udział dyskusji wyników i tworzeniu manuskryptu. Mój wkład procentowy oceniam na 15%.

b-16 M. Zdrojek, M. Wąsik, M.J. Esplandiu and A. Bachtold, *Novel Approach for Energy Spectrum Probing in Semiconducting Quantum Dots*, Acta Physica Polonica A, 122, 321 (2012). IF₂₀₁₂: 0.531

Wkład habilitanta: byłem pomysłodawcą koncepcji pracy, wykonałem próbki, przeprowadziłem pomiary oraz brałem udział dyskusji wyników. Jestem głównym autorem manuskryptu. Mój wkład procentowy oceniam na 85%.

b-17 T. Ciuk, J. Krupka, C. Jastrzębski, J. Judek, W. Strupiński, S. Butun, E. Ozbay, M. Zdrojek, *Contactless magnetoresistance in large area CVD graphene grown on SiC substrates*, Journal of Materials Science and Engineering 2, 489 (2012)

Wkład habilitanta: byłem współpomysłodawcą koncepcji pracy, przeprowadziłem pomiary oraz brałem udział dyskusji wyników. Jestem współautorem manuskryptu. Mój wkład procentowy oceniam na 35%.

b-18 J. Krupka, J. Wosik, C. Jastrzebski, T. Ciuk, J. Mazierska, M. Zdrojek, *Complex Conductivity of YBCO Films in Normal and Superconducting States Probed by Microwave Measurements*, IEEE TAS 23, 1501011 (2013). IF: 1.199

Wkład habilitanta: przeprowadziłem pomiary oraz brałem udział dyskusji wyników. Jestem współautorem manuskryptu. Mój wkład procentowy oceniam na 25%.

b-19 M. Wąsik, J. Judek, M. Zdrojek, *Polarization-dependent optical reflection from vertically aligned multiwalled carbon nanotube arrays*, Carbon 64, 550 (2013). IF: 5.868

Wkład habilitanta: byłem współpomysłodawcą koncepcji pracy, przeprowadziłem pomiary oraz brałem udział dyskusji wyników. Jestem współautorem manuskryptu. Mój wkład procentowy oceniam na 35%.

b-20 J. Krupka, J. Judek, C. Jastrzębski, T. Ciuk, J. Wosik, M. Zdrojek, *Microwave complex conductivity of the YBCO thin films as a function of static external magnetic field*, Appl. Phys. Lett. 104, 102603 (2014). IF: 3.794. Wkład habilitanta: brałem udział w pomiarach oraz dyskusji wyników. Jestem współautorem manuskryptu. Mój wkład procentowy oceniam na 25%.

b-21 A. Taube, J. Judek, C. Jastrzębski, A. Duzynska, K. Świtkowski and M. Zdrojek, *Temperature-Dependent Nonlinear Phonon Shifts in a Supported MoS₂ Monolayer*, ACS Appl. Mater. Interfaces 6, 8959 (2014). IF: 5.008

Wkład habilitanta: byłem pomysłodawcą koncepcji pracy, nadzorowałem pomiary oraz brałem udział dyskusji wyników. Jestem współautorem manuskryptu. Mój wkład procentowy oceniam na 40%.

b-22 M. Wąsik, J. Judek, M. Zdrojek, A.M. Witowski, *Limitations of blackbody behavior of vertically aligned multi-walled carbon nanotubes arrays*, Materials Letters 137, 85 (2014) IF: 2.28

Wkład habilitanta: byłem współpomysłodawcą koncepcji pracy, brałem udział dyskusji wyników. Jestem współautorem manuskryptu. Mój wkład procentowy oceniam na 20%.

b-23 J. Tarka, G. Sobon, J. Boguslawski, J. Sotor, J. Jagiello, M. Aksienionek, L. Lipinska, M. Zdrojek, J. Judek, and K. M. Abramski, *168 fs pulse generation from graphene-chitosan mode-locked fiber laser*, Optical Materials Express 4, 1981 (2014). IF: 2.923

Wkład habilitanta: przeprowadziłem pomiary ramanowskie oraz brałem udział dyskusji wyników. Jestem współautorem manuskryptu. Mój wkład procentowy oceniam na 20%.

b-24 J. Jagiello, J. Judek, M. Zdrojek, M. Aksienionek, L. Lipinska, *Production of Graphene Composite by Direct Graphite Exfoliation with Chitosan*, Materials Chemistry and Physics 148, 507 (2014) IF: 2.129

Wkład habilitanta: byłem współpomysłodawcą koncepcji pracy, przeprowadziłem pomiary oraz brałem udział dyskusji wyników. Jestem współautorem manuskryptu. Mój wkład procentowy oceniam na 35%.

b-25 A. Duzynska, J. Judek, M. Zdrojek, *Temperature-Dependent Nonlinear Phonon Behavior in High-Density Carbon Nanotube Thin Films*, Appl. Phys. Lett. 105, 213105 (2014). IF: 3.794

Wkład habilitanta: byłem pomysłodawcą koncepcji pracy, nadzorowałem pomiary oraz brałem udział dyskusji wyników. Jestem współautorem manuskryptu. Mój wkład procentowy oceniam na 40%.

b-26 M. Zdrojek, J. Sobieski, A. Duzynska, E. Zbydniewska, W. Strupinski, J. Judek, *Synthesis of carbon nanotubes from propane*, Chem. Vapor. Depos., u edytora, (2014). IF₂₀₁₄=1.371

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

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 6 publikacji i jednego wzoru patentowego pod wspólnym tytułem:

Badania własności pojedynczych nanorurek węglowych

4.1. Spis publikacji stanowiących podstawę do ubiegania się o habilitację

a-1 M. Zdrojek, T. Heim, D. Brunel, A. Mayer and T. Melin, *Inner-shell charging of multiwalled carbon nanotubes*, Phys. Rev. B 77, 033404 (2008). IF₂₀₀₈=3.322

Wkład habilitanta: Byłem pomysłodawcą eksperymentu. Przygotowałem próbki i wykonałem cały eksperyment. Brałem znaczący udział w dyskusji i interpretacji wyników. Byłem głównym autorem tekstu oraz ilustracji. Mój udział procentowy oceniam na 70%.

a-2 Z. Wang, M. Zdrojek, T. Melin, M. Devel, *Electric charge enhancements in carbon nanotubes: Theory and experiments*, Phys. Rev. B 78, 085425 (2008). IF₂₀₀₈=3.322

Wkład habilitanta: Byłem współautorem koncepcji pracy. Zaprojektowałem układ i wykonałem cały eksperyment. Wykonałem pełną analizę i interpretację wyników eksperymentalnych. Brałem udział w dyskusji modelu oraz konfrontowałem wyniki obliczeń z danymi eksperymentalnymi. Byłem współautorem tekstu oraz części ilustracji. Mój udział procentowy oceniam na 45%.

a-3 M. Zdrojek, M. J. Esplandiu, A. Barreiro, A. Bachtold, *Electron counting spectroscopy of CdSe quantum dots*, Phys. Rev. Lett., 102, 228604 (2009). IF₂₀₀₉=7.18

Wkład habilitanta: Byłem współautorem koncepcji pracy. Zaprojektowałem układ badawczy i przeprowadziłem wszystkie eksperymenty. Opracowałem technologię produkcji nanourządzeń wykorzystanych w eksperymencie. Brałem znaczący udział w dyskusji i analizie wyników eksperymentu. Jestem autorem ilustracji i tekstu. Mój udział procentowy oceniam na 80%.

a-4 A. Eichler, J. Moser, J. Chaste, M. Zdrojek, I. Wilson-Rae, A. Bachtold, *Nonlinear damping in mechanical resonators made from carbon nanotubes and graphene*, Nature Nanotechnology 6, 339 (2011). IF₂₀₁₁=27.27

Wkład habilitanta: Opracowałem technologię produkcji nanourządzeń. Wykonałem próbki, które umożliwiły przeprowadzenie eksperymentu. Uczestniczyłem w dyskusjach dotyczących eksperymentu oraz wyników. Mój wkład opisany jest również w publikacji. Mój udział procentowy oceniam na 10%.

a-5 J. Chaste, M. Sledzinska, M. Zdrojek, J. Moser, A. Bachtold, *High-frequency nanotube mechanical resonators*, Appl. Phys. Lett., 99, 213502 (2011). IF₂₀₁₁=3.844

Wkład habilitanta: Opracowałem technologię produkcji nanourządzeń bazujących na nanorurkach węglowych oraz wykonałem próbki, które umożliwiły przeprowadzenie eksperymentu. Brałem

udział w dyskusjach dotyczących eksperymentu oraz wyników. Mój udział procentowy oceniam na 10%.

a-6 M. Zdrojek, J. Judek, M. Wąsik, *Laser heating control with polarized light in isolated multi-walled carbon nanotubes*, Phys. Rev. Let. 108, 225501 (2012). IF₂₀₁₂=7.943

Wkład habilitanta: Byłem pomysłodawcą koncepcji pracy. Opracowałem technologię separacji nanorurek. Wykonałem próbki. Uczestniczyłem w przeprowadzaniu eksperymentu. Brałem znaczący udział w dyskusji wyników. Jestem współautorem tekstu oraz ilustracji. Mój udział procentowy oceniam na 60%.

a-7 J. Judek, M. Zdrojek, M. Wąsik, Patent nr PL397442-A1, (24.06.2013) pt. „Sposób grzania laserowego nanoobjektów o istotnej anizotropii absorpcji optycznej ze sterowaniem przyrostu temperatury i układ do sterowanie tego sposobu”,

Wkład habilitanta: Byłem współautorem koncepcji pracy. Uczestniczyłem w pisaniu patentu i procedurach patentowych. Mój wkład oceniam na 40%. (wg wniosku patentowego).

Sumaryczny *impact factor* powyższych prac wynosi: **52.9**

Suma cytowań powyższych prac: **180**

4.2. Omówienie osiągniętych wyników

Głównym celem badawczym w przedstawionym w powyższym zbiorze prac było podejście do problemu badań pojedynczych nanorurek węglowych, czyli warstw grafenowych zwiniętych w cylinder. Od momentu odkrycia [1] materiał ten przyciągała niezwykle duże zainteresowanie, głównie dzięki wielu ciekawym własnościom fizyko-chemicznym [2] nie obserwowanym w innych materiałach. Pomimo tego, nawet dziś prowadzenie badań podstawowych na indywidualnych nanorurkach jest ciągle dużym wyzwaniem. Dzieje się tak dlatego, że większość obecnie stosowanych metod produkcji nanorurek daje duże ich skupiska, i aby uzyskać dostęp do pojedynczego obiektu potrzebne są, często dość skomplikowane metody ich separacji. Ponadto, z uwagi na ich rozmiar (stosunek długość/średnica sięgający nawet 10^7) wiele metod eksperymentalnych należy znaczenie modyfikować aby umożliwić przeprowadzenie badań. Co więcej, dotychczasowe badania pokazują, że pojedyncze nanorurki węglowe mają często inne własności niż ich różnego rodzaju aglomeraty.

Z uwagi na często unikalne i jedno-wymiarowe właściwości nanorurek węglowych zaproponowano już wiele potencjalnych aplikacji [3], włączając w to np. urządzenia nanoelektroniczne i nanoelektromechaniczne [4-6], źródła emisji polowej i promieniowania [7-9], sensory [10], kompozyty [11]. Jednakże, aby w pełni wykorzystać potencjał nanorurek węglowych, kluczowe jest zrozumienie własności pojedynczych obiektów. Powyższe stwierdzenie było myślą przewodnią moich prac stanowiących podstawę do ubiegania się o habilitację. W przedstawionych pracach skupiłem się głównie na własnościach elektrostatycznych, elektrycznych i optycznych pojedynczych nanorurek węglowych.

W pracy [a-1] przedmiotem badań były własności elektrostatyczne naładowanych pojedynczych wielościennych nanorurek węglowych. Aby umożliwić przeprowadzenie badań na pojedynczych

nanoobjektach opracowałem procedurę separacji i dyspersji nanorurek węglowych. Ponadto opracowałem metodę wstrzykiwania i detekcji ładunków za pomocą igły mikroskopu sił atomowych (*ang.* AFM) do pojedynczej nanorurki. Proces ładowania odbywa się w modzie kontaktowym, w którym koniec igły (z napięciem V_{inj} w stosunku do podłoża) jest przyłożony lokalnie do pojedynczej nanorurki i z uwagi na różnice potencjałów między igłą a rurką, ładunki przepływają do tej ostatniej. W pracy pokazałem efekt delokalizacji ładunków w nanorurce, tzn. ładunki wstrzyknięte lokalnie „rozprzyskują” się wzdłuż całej jej długości. Proces detekcji odbywa się w modzie EFM (*ang.* Electrostatic Force Microscopy) [12], w którym to oddziaływania elektrostatyczne między igłą a naładowaną nanorurką wpływają na zmiany częstotliwości drgań oscylującej igły i poruszającej się na pewnej wysokości nad skanowaną powierzchnią. Gradient sił tych oddziaływań jest proporcjonalny do zmian częstotliwości drgań igły, które są monitorowane w modzie EFM.

Głównym celem mojej pracy były pomiary liniowej gęstości ładunku λ (w jednostkach $e/\mu\text{m}$) wstrzykniętego do nanorurek węglowych o różnej liczbie ścian. Przykładowo, dla nanorurki o zewnętrznej i wewnętrznej średnicy równej odpowiednio 10 i 6 nm λ wynosiła ok $30 e/\mu\text{m}$. Z uwagi na fakt, iż wielościenną nanorurkę węglową uważano za nanostrukturę o charakterze metalicznym to spodziewanym wynikiem byłoby zachowanie podobne jak dla klasycznego kondensatora cylindrycznego, czyli ładunek powinien znajdować się na powierzchni. W swoich badaniach pokazałem jednak, iż zmierzone wartości λ odbiegają od klasycznego modelu o więcej niż rząd wielkości. Głębsza analiza liniowej gęstości ładunku w funkcji średnicy rurki (ilość ścian) dowodzi tego, że nanorurki węglowe reagują na przyłożone zewnętrzne pole elektryczne i wykazują własność ładowania się ich wewnętrznych ścian. Jest to rezultat skończonej polaryzowalności poprzecznej rurki oraz możliwości występowania ścian nanorurki mających charakter półprzewodnikowy a nie tylko metaliczny.

Zaobserwowane przeze mnie po raz pierwszy zjawisko ładowania się wewnętrznych ścian nanorurki mogłoby być użyte do budowy pamięci lub sensorów w skali nano [12-14]. W tym celu istotną byłaby kontrola wzajemnej interakcji ścian nanorurki z punktu widzenia strukturalnego, czyli możliwość kontrolowanej syntezy rurek o zadanej liczbie ścian i charakterze ich przewodnictwa.

W pracy [a-2] kontynuowałem badania własności elektrostatycznych pojedynczych nanorurek węglowych, których celem było pokazanie nierównomiernego rozmieszczenia nadmiarowych ładunków elektrycznych wzdłuż nanorurki. Motywacją tej pracy były teoretyczne rozważania dotyczące elektrostatyki materiałów jednowymiarowych, w których sugeruje się iż ładunki elektryczne w nanorurce węglowej powinny się akumulować na jej końcach, z uwagi na efekt oddziaływania kulombowskiego [15-16]. Rozważania te dotyczyły jednak rurek o długościach mniejszych niż 100 nm, które z poziomu eksperymentu są niezwykle trudno dostępne. Moje badania pozwoliły na zweryfikowanie tej teorii dla nanorurek o długościach rzędu mikrometra. W tym celu wykorzystałem wcześniej opracowaną metodę wstrzykiwania i detekcji ładunków elektrycznych dla pojedynczych nanorurek węglowych. Eksperyment polegał na monitorowaniu rozkładu nadmiarowego ładunku w naładowanej nanorurce wzdłuż całej jej długości. Udało mi się pokazać, że dla nanorurek o długościach kilku mikrometrów gęstość akumulowanych ładunków na końcach jest nieznacznie większa w stosunku do reszty nanorurki. Współczynnik wzmocnienia wahał się od 10 do 30% w zależności od średnicy nanorurki. Dla nanorurek o długości powyżej 1 mikrometra nie

zaobserwowałem zależności od jej długości. Powyższe wyniki zgadzają się w sposób ilościowy z modelem i obliczeniami wykonanymi na potrzeby eksperymentu.

Oczekuję, iż mapowanie rozkładu ładunku w jednowymiarowych nanostrukturach węglowych oraz zrozumienie efektów akumulacji ładunków na końcach nanobiektów może być istotne w projektowaniu różnych urządzeń nanoelektronicznych (np. tranzystor) [17] lub urządzeń bazujących na emisji polowej [7]. Pokazana przeze mnie odpowiedź elektrostatyczna nanorurek wykazuje też silne zależności od środowiska zewnętrznego, co jest niezwykle istotne w przypadku sensorów chemicznych [10]. Ponadto przewiduje, że powyższa praca może mieć implikacje w dziedzinie badań nad urządzeniami nanoelektromechanicznymi (z ang. *NEMS*) [6] oraz dla urządzeń do magazynowania ładunków elektrycznych [18].

Badania opisane w publikacji [a-3] były w pewnym sensie umotywowane wynikami poprzednich prac. Wyniki badań własności elektrostatycznych nanorurek, w których pokazałem możliwość mapowania niewielkiej ilości/gęstości ładunków w pojedynczych nanoobjektach, były podstawą do postawienia pytania o możliwość manipulacji indywidualnymi elektronami w nanorurkach. Niniejszą tezę zweryfikowałem dla jednościennych metalicznych nanorurek węglowych, stosując pomiary elektryczne jako główną metodę badawczą. Głównym celem pracy było pokazanie, że nanorurka węglowa może pełnić funkcję detektora pojedynczych elektronów.

Do tego celu zaproponowałem innowacyjne podejście projektując urządzenie składające się z pojedynczej nanorurki podłączonej do dwóch nanokontaktów oraz z pojedynczej kropki kwantowej, która dołączona jest tylko do jednej elektrody - do nanorurki. Nanourządzenie zaprojektowane było w geometrii tranzystora z bramką dolną (na podłożu Si/SiO₂) i wykonane przy pomocy standardowych technik nanofabrykacji używając metody CVD do hodowli nanorurek, elektronolitografii i napyłania termicznego w celu stworzenia kontaktów do rurki oraz metody dyspersji nanokryształów z roztworu koloidalnego. Nanorurka węglowa spełnia w tym urządzeniu dwojaką rolę: jest rezerwuarem ładunków elektrycznych oraz umożliwia detekcję indywidualnych ładunków. Kropka kwantowa jest tutaj obiektem testowym, w którym, w sposób kontrolowany można zmieniać ilość elektronów i jednocześnie badać te zmiany za pomocą nanorurki.

Niezwykle istotny jest tutaj fakt, że badany nanoobiekt oddziałuje z nanorurką poprzez bardzo wysoką barierę tunelową o rezystancji 10¹⁹ Ω, co odpowiada niskiej szybkości transferu ładunków poprzez barierę (~1 ms). Ciekawe, że wartość ta jest o kilka rzędów wielkości większa niż ta, którą można mierzyć w przy użyciu konwencjonalnej elektroniki.

Pomiar polegał na monitorowaniu konduktancji ($G_{tube} = I_{tube}/V_{sd}$) nanorurki w funkcji napięcia przyłożonego na bramkę (V_g). Efekt przeskoku elektronu między nanorurką a kropką kwantową manifestuje się jako nagły skok i przesunięcie krzywej $G_{tube}(V_g)$ wzdłuż osi V_g (w stronę wartości dodatnich). Dzieje się tak dlatego, że nanorurka węglowa jest niezwykle czuła na wszelkie zmiany środowiska elektrostatycznego (nawet jeden elektron pojawiający się w pobliżu), które z kolei wpływają na zmienianą gęstość ładunków płynących w rurce co widać przy pomiarze $G_{tube}(V_g)$. Metoda ta, poza możliwością detekcji pojedynczych ładunków elektrycznych, pozwala na badania przerwy energetycznej próbkowanego nanoobjektu. Dla przykładu, w pracy [a-3] użyłem półprzewodnikowej kropki selenku kadmu (w której dzięki zmianom V_G można zmieniać poziom Fermiego) i pokazałem, że gdy potencjał w nanorurce (definiowany poprzez przyłożenie napięcia na

źródle i drenie) znajduje się w przerwie energetycznej kropki to nie zachodzi transfer ładunku między tymi obiektami, z uwagi na brak wolnych stanów. Ponadto zaproponowany detektor nanorurkowy jest w stanie ładować próbkowany nanoobiekt, poprzez kontrolowany transfer zarówno elektronów jak i dziur.

Warto wspomnieć, iż własności detekcyjne nanorurki zaprezentowane w pracy [a-3] testowałem w niskich temperaturach, w zakresie 4K – 200K. Obecnie kończę pracę nad możliwością zastosowania nanorurki jako detektora elektronów w temperaturze pokojowej.

Wyniki pracy mogą mieć znaczenie elektroniki molekularnej [19], gdzie manipulacja pojedynczymi elektronami jest kluczowa, a nanorurka węglowa okazuje się być idealnym kandydatem na narzędzie do próbkowania transportu jednoelektronowego w bardziej skomplikowanych układach molekularnych takich jak np. biomolekuły, czy hybrydowe półprzewodnikowe nanokryształy.

W pracach [a-4] i [a-5] tematem przewodnim były własności mechaniczne nanorurek węglowych, a w szczególności zbadanie możliwości wykorzystania nanorurki węglowej jako oscylatora harmonicznego. W systemach mikro- i nanomechanicznych odpowiednikiem oscylatora harmonicznego jest rezonator – elastyczny materiał (tutaj nanorurka) zawieszony swobodnie między dwoma stałymi punktami, który oscyluje pod wpływem przyłożonej siły zewnętrznej. Ponieważ, parametry rezonatora mechanicznego polepszają się wraz ze wzrostem częstotliwości rezonansowej i wraz z obniżaniem się jego masy, to nanorurka węglowa okazała się idealnym kandydatem do budowy takiego nanourządzenia, co jest niemniej jednak dużym wyzwaniem technologicznym [20-22].

Pierwszym etapem prac było więc zaprojektowanie i budowa urządzenia nanorurkowego. W tym celu wykorzystałem wcześniej opracowaną przeze mnie technologię produkcji indywidualnych nanorurek jednościennych bezpośrednio na podłożu, na którym konstruuje się urządzenie. Kluczem do budowy dobrego nanourządzenia jest wybór rurki (lub jej fragmentu), która jest idealnie prosta. Można tego dokonać używając mikroskopii sił atomowych, korelując lokalizację wybranej rurki z miejscem nałożenia kontaktów metalicznych, które służą jako wsporniki. Następnie podłoże pod rurką (ale nie pod kontaktem) jest częściowo usuwane (w procesie trawienia) co powoduje, że w końcowym efekcie nanorurka zawieszona jest nad powierzchnią pozostałego podłoża i umocowana jest tylko do kontaktów metalicznych. Warto zaznaczyć, że opracowana przeze mnie metoda dawała nie 90% szans na ostatnim etapie produkcji nanourządzeń (trawienie podłoża) podczas gdy poprzednie standardy dawały ok. 15%. Odpowiedni dobór nanorurki daje możliwość produkcji rezonatora o dużym naprężeniu, co ma niezwykle istotne znaczenie dla jego parametrów (częstotliwość rezonansowa f_0 , zależność f_0 od temperatury). Innym istotnym elementem urządzenia jest tzw. bramka (boczna lub spodnia) do której przykłada się stałe napięcie V_G (podobnie jak w przypadku tranzystora). Nanorurka wprawiana jest w oscylacje poprzez przyłożenie modulowanego napięcia V_{FM} do nanorurki i w reakcji na oddziaływanie z polem elektrycznym generowanym przez V_G . Detekcja oscylacji odbywa się przy użyciu standardowej metody mieszania prądu modulowanego częstotliwościowo [23].

Jednym z ważnych parametrów rezonatora jest jego dobroć Q , która opisuje stopień w jakim rezonator wytraca energię. Parametr ten stosuje się na przykład do opisu własności powszechnie używanych igieł do mikroskopu siła atomowych. W przypadku rezonatora nanorurkowego dobroć

zdefiniowana jest jako stosunek częstości drgań do szerokości połówkowej piku rezonansowego ($f_0/\Delta f$). Im wyższe Q tym rezonator jest lepszy.

W pracy [a-4] pokazałem, że zawieszona rurka o długości zaledwie 300 nm oscyluje z częstotliwością 4.2 GHz dla podstawowego modu drgań (11 GHz dla wyższego modu). Osiągnięcie tak dużych częstotliwości przy zadanej długości było możliwe dzięki zaproponowanej przeze mnie metody produkcji tego typu urządzeń z nanorurką z uwzględnieniem dużego jej naprężenia. W przypadku tego urządzenia udało się zademonstrować dobroć układu sięgającą 1500 w temperaturze 4K. Dalsze badania pokazały, że zależność f_0 od temperatury dla tego typu rezonatora (silny spadek wraz ze wzrostem T) znacznie różni się od rezonatorów z rurką bez naprężenia (brak zależności od T). Ponadto, zaproponowane przeze mnie urządzenie umożliwiło zbadanie współczynnika rozszerzalności cieplnej dla pojedynczej nanorurki jednościennej, który wynosi $-0.7 * 10^{-5} 1/K$ w temperaturze pokojowej.

W pracy [a-5] wyżej opisane urządzenie zostało wykorzystane do pokazania nieliniowych własności drgań nanorurki węglowej. W „idealnym” świecie, gdzie nie byłoby dyssypacji energii, oscylacje w rezonatorze raz wprowadzonym w ruch trwałyby nieskończenie. W realnym świecie, energia jest wysysana z takiego urządzenia, co prowadzi do zahamowania i ewentualnego zatrzymania drgań oscylatora. W wielu przypadkach ta siła hamująca jest liniowo proporcjonalna do prędkości i niezależna od amplitudy drgań (co opisuje teoria Newton’a). Tak dzieje się np. w przypadku wahadła Foucault, detektorów fal grawitacyjnych czy submikronowych rezonatorach mechanicznych. Okazuje się, że w przypadku rezonatorów nanorurkowych ta ostateczna zależność nie jest jednak prawdziwa a siła hamująca drgania nanorurki silnie zależy od amplitudy tych drgań w sposób nieliniowy. To prowadzi do niezwykle pożądanej własności rezonatorów – możliwości kontrolowanej zmiany jego dobroci.

Rezultaty obu powyższych prac mogą mieć znaczenie w wielu naukowych i technologicznych aplikacjach takich jak detekcja masy [28], eksperymenty w reżimie kwantowym [29,30] czy przetwarzanie sygnałów o częstotliwościach radiowych [31].

Praca [a-6] dotyczyła badań własności optycznych pojedynczych wielościennych nanorurek węglowych. W szczególności były to badania ramanowskie przy użyciu monochromatycznego światła ($\lambda = 514$ nm) spolaryzowanym liniowo. W badaniach tych użyłem nanorurek wielościennych (średnice: 15-30 nm), do których opracowałem metodę separacji i dyspersji na powierzchnię SiO₂, tak były można było swobodnie przeprowadzać pomiary na pojedynczych obiektach.

Pierwszym etapem pracy była identyfikacja efekty antenowego w izolowanej nanorurce wielościennej. Efekt antenowy w przypadku nanorurek związany jest z anizotropią absorpcji światła przez nanorurkę w zależności od polaryzacji padającego na nią światła. Gdy światło spolaryzowane liniowo pada na nią wzdłuż osi nanorurki, można zaobserwować silniejszą absorpcją niż w przypadku spolaryzowanego światła padającego w kierunku prostopadłym do rurki. Dzieje się tak dlatego, że światło spolaryzowane prostopadle do rurki indukuje oscylację ograniczonych średnicą rurki elektronów powodując ekranowanie zewnętrznego pola elektrycznego, co skutkuje obniżeniem absorpcji światła oraz co za tym idzie emisji światła rozproszonego. Wydajność absorpcji i emisji światła można obserwować dzięki spektroskopii ramanowskiej. Udowodniłem to dla nanorurki wielościennej pokazując ten efekt poprzez analizując relatywnej intensywności oraz położenia dwóch głównych modów ramanowskich (G i 2D) w funkcji kąta (φ) pomiędzy osią nanorurki a kierunkiem

polaryzacji światła padającego. Były to pierwsze tego typu badania dla izolowanej nanorurki wielościennej. Badania odbyły się w dwóch różnych konfiguracjach spektrometru (VV i VH). W skrócie, w przypadku konfiguracji VV wektor pola elektrycznego światła padającego e_s jest równoległy do wektora e_i światła rozproszonego (innymi słowy nanorurka "widzi" taką samą polaryzację jak detektor światła), natomiast w przypadku konfiguracji VH mamy $e_s \perp e_i$. W pracy [a-6] pokazałem, że dla każdej z tych konfiguracji zależności znormalizowanej intensywności (I) pików G i 2D od kąta φ jest różna i zmienia się jak $\cos^4\varphi$ i $\sin^2\varphi$, odpowiednio dla VV i VH.

Dla prostoty w dalszych rozważaniach wezmę pod uwagę jedynie rezultaty dla konfiguracji VV. Minimum zależności $I(\varphi)$ dla obu badanych modów ramanowskich (G i 2D) obserwuje dla $\varphi = 90^\circ$, czyli w przypadku gdy światło spolaryzowane jest prostopadle osi nanorurki. Oznacza to, że nieelastyczne rozpraszanie światła w nanorurce węglowej jest najefektywniejsze dla przypadku światła spolaryzowanego wzdłuż jej osi, zupełnie podobnie jak dla anteny bipolarnej. Efekt ten spowodowany jest silnym tłumieniem absorpcji światła padającego w kierunku prostopadłym do osi nanorurki. Były to pierwsze tego typu badania na świecie. Ciekawe jest porównanie tego wyniku z badaniami polaryzacyjnymi lin (skupisk) nanorurek, gdzie tego typu efekt obserwowany był dla $\varphi = 55^\circ$, co potwierdza teorię, że efekt tłumienia absorpcji zachodzi tylko w obiektach izolowanych o średnicy dużo mniejszej od długości fali światła pobudzającego [24].

Kolejnym nowym efektem, który zaobserwowałem w pracy [a-6] była zależność pozycji pików (czyli energii fononów) od polaryzacji światła, czyli $\hbar\omega(\varphi)$, która zmieniała się w funkcji kąta jak $\hbar\omega(90^\circ) - A\cos^2(\varphi)$. Aby wyjaśnić otrzymaną zależność, należy pamiętać, że wraz ze wzrostem temperatury T pozycja ω_{RS} pików przesuwają się w kierunku niższych wartości, a można to opisać za pomocą prostej relacji $\omega_{RS}(T) = \omega_{RS}^0 - \chi_T * T$, gdzie ω_{RS}^0 to pozycja pików w zerowej temperaturze, a χ_T to współczynnik temperaturowy w jednostkach cm^{-1}/K . W przypadku badanej nanorurki największą zmianę przesunięcia zaobserwowano dla φ równego 0° i 180° , czyli wtedy gdy światło spolaryzowane jest wzdłuż nanorurki. Jest to sytuacja, w której obserwuje się najsilniejsze spektrum ramanowskie co także oznacza, że mamy największą absorpcję światła padającego, które powoduje grzanie nanorurki. Istotne jest tutaj, że zmiana temperatury nanorurki jest spowodowana tylko i wyłącznie zmianą polaryzacji światła przy stałej mocy światła padającego. Jest to pierwszy tego typu efekt zaobserwowany dla nanorurki węglowej i może być on również prawdziwy dla wielu innych nanoobjektów o podobnej geometrii.

Badając dalej polaryzacyjne zależności natężenia widma ramanowskiego w funkcji mocy światła padającego udało się zaobserwować różnice przesunięć pozycji (ω_{RS}) pików G i 2D. Maksymalną zaobserwowaną wartością przesunięcia było $24 cm^{-1}$, co biorąc pod uwagę $\chi_T = -0.028 cm^{-1}/K$, odpowiada temperaturze $860^\circ C$. Czyli nanorurka lokalnie była podgrzana o ponad $800^\circ C$, zachowując przy tym stabilność strukturalną (brak pików D po podgrzaniu). Jest to temperatura dość wysoka i fakt, że nanorurka przetrwała taki eksperyment może wynikać z jej bardzo dużego przewodnictwa cieplnego [25].

Ponadto wyniki pracy [a-6] stanowiły podstawę do zgłoszenia patentowego [a-7] dotyczącego metody grzania laserowego nanoobjektów o znaczącej anizotropii absorpcji optycznej. Metoda ta była opracowana i przetestowana na pojedynczych nanorurkach węglowych ale może być również zastosowana dla innych obiektów jednowymiarowych, takich jak różnego rodzaju nanorurki czy nanodrutów kwantowe. Istotą metody jest możliwość zmiany i kontroli temperatury np. w nanorurkach tylko i wyłącznie poprzez sterowanie polaryzacją światła padającego ale bez potrzeby

zmiany jego mocy. Tego typu efekty termiczne mogą znaleźć zastosowanie w przypadkach gdy pożądanym jest lokalny wzrost temperatury pod wpływem światła zewnętrznego przy utrzymaniu minimalnej mocy tak jak w przypadku laserowego niszczenia komórek nowotworowych w żywym organizmie [26]. Ponadto istnieje możliwość selektywnego niszczenia jedno-wymiarowych obiektów ułożonych w określonym kierunku. Inne potencjalne zastosowanie wyników pracy to kontrola pracy wyjścia w urządzeniach działających jako emiterzy polowe, poprzez kontrolę ich temperatury [27].

Reasumując, celem badawczym w przedstawionym powyżej zbiorze prac było zbadanie wybranych własności pojedynczych nanorurek węglowych. W szczególności:

- pokazałem metodę wstrzykiwania ładunków elektrycznych do pojedynczej nanorurki węglowej oraz opracowałem model obliczania liniowej gęstości ładunku w nanorurkach.
- pokazałem, że wielościenna nanorurka węglowa nie powinna być opisywana, z elektrostatycznego punktu widzenia, jako klasyczny kondensator cylindryczny, wykazując własność ładowania się wewnętrznych ścian nanorurki.
- eksperymentalnie zweryfikowałem teorię, mówiącą iż nadmiarowe ładunki elektryczne w nanorurce węglowej akumulują się na jej końcach powodując nierównomierny rozkład ładunków wzdłuż całej jej długości.
- opracowałem i wykonałem detektor o jednoelektronowej czułości bazujący na pojedynczej nanorurce węglowej.
- opracowałem metodę kontrolowanego wystrzykiwania ładunków elektrycznych do półprzewodnikowych nanokryształów CdSe za pomocą pojedynczej nanorurki.
- opracowałem i wdrożyłem sposób wytwarzania rezonatorów nanomechanicznych, w których nanorurka jest zawieszona nad podłożem na dwóch metalicznych nanokontaktach i charakteryzuje się dużym naprężeniem, co umożliwiło ich dalsze badania własności mechanicznych.
- zidentyfikowałem efekt antenowy w pojedynczych wielościennych nanorurkach węglowych przy użyciu spektroskopii Ramana
- zbadałem zależności polaryzacyjne widma ramanowskiego indywidualnych nanorurek wielościennych
- zademonstrowałem metodę kontroli lokalnego grzania laserowego pojedynczych nanorurek, sterując wyłącznie jego polaryzacją (praca ta była podwaliną do stworzenia zgłoszenia patentowego).

Powyższe rezultaty znalazły już zainteresowanie w środowisku naukowym co pokazują cytowania obce moich prac i oczekuję, iż moje wyniki będą w przyszłości wykorzystywane z uwagi na wciąż ogromne zainteresowanie tematyką nanorurek węglowych.

4.3. Literatura

1. S. Iijima, *et al.*, *Nature* 354, 56 (1991)
2. S. Reich, C. Thomsen and J. Maultzsch "Carbon nanotubes – Basic Concepts and Physical Properties" WILEY-CHH Verlag GmbH & Co.KGAA (2004), ISBN 3- 527-40386-8
3. M. F. L. Volder, *et al.*, *Science* 339, 535 (2013)
4. S. J. Tans, A. R. M. Verschueren and C. Dekker, *Nature* 393, 49 (1998)
5. M.S. Fuhrer *et al.*, *Science* 288, 494 (2000)
6. V. Sazonova *et al.*, *Nature* 431 284 (2004)
7. J. A. Misewich, *et al.*, *Science* 300, 783 (2003)
8. J. Chen *et al.* , *Science* 310, 1171 (2005)
9. H. Sugie *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* 78, 2578 (2001)
10. S. Ghosh, A. K. Sood, N. Kumar, *Science* 299, 1042 (2003)
11. A. B. Dalton *et al.* *Nature* 423, 703 (1999)
12. T. Mélin, D. Deresmes, and D. Stiévenard, *Appl. Phys. Lett.* 81, 5054 (2002)
13. E. Snow *et al.*, *Science* 307, 1942 (2005)
14. J. Robinson *et al.*, *Nano Lett.* 6, 1747 (2006)
15. P. Keblinski *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 89, 255503 (2002)
16. C. Li, T.-W. Chou, *Appl. Phys. Lett.* 89, 063103 (2006)
17. A. Bachtold *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 84, 6082 (2000)
18. A. Nikitin *et al.*, *Nano Lett.* 8, 162 (2008)
19. P. Avouris *Acc. Chem. Res.* 35, 1026 (2002)
20. B. Lassagne *et al.*, *Nano Lett.* 8, 3735 (2008)
21. K. Jensen *et al.*, *Nature Nano.* 3, 533 (2008)
22. A. Eichler *et al.*, *Nature Comms.* 4, 2843 (2013)
23. V. Gouttenoire *et al.*, *Small* 6, 1060 (2010)
24. A. M. Rao *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 84, 1820 (2000)
25. F. Huang *et al.*, *J. Appl. Phys.* 84, 4022 (1998)
26. A. R. Burke *et al.*, *Biomaterials* 33, 2691 (2011)
27. C. M. Tan *et al.*, *App. Phys. Lett.* 86, 263104 (2005)
28. B. Lassagne *et al.*, *Nano Lett.* 8, 3735 (2008)
29. J. Moser *et al.*, *Nature Nanot.* 8, 493 (2013)
30. A. Eichler *et al.*, *Nature Commun.* 4, 2843 (2013)
31. P. Weber *et al.*, *Nano Lett.* 14, 2854 (2014)
32. M. Kumar *et al.*, *J. Nanosc. and Nanotech.* 10, 3739 (2010)

