

Autoreferat
informujący o zainteresowaniach i osiągnięciach w działalności naukowo-badawczej,
dydaktycznej i organizacyjnej

1. Imię i Nazwisko.

Marcin Słoma

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/ artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

Doktor nauk technicznych w zakresie budowy i eksploatacji maszyn nadany uchwałą Rady Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej z dnia 23.02.2011 r., na podstawie rozprawy pt. „Opracowanie technologii i badania właściwości kompozytów polimerowych z nanorurkami węglowymi i ich zastosowania”.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/artystycznych.

2009 – obecnie: Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki, Zakład Mikrotechnologii i Nanotechnologii.

2011 – 2017: Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, Zakład Materiałów Grubowarstwowych.

4. Działalność naukowo-badawcza

Dziedzina moich zainteresowań naukowych obejmuje obszar technologii elektroniki, ze szczególnym naciskiem na materiały elektroniczne i techniki wytwarzania układów elektroniki drukowanej. Przez większość mojej pracy zawodowej w jednostkach naukowych zajmowałem się problematyką związaną z opracowaniem, wytworzeniem i badaniem właściwości materiałów kompozytowych z dodatkiem fazy funkcjonalnej w postaci nanorurek węglowych, płatek grafenowych, oraz proszków metali, ceramiki, luminoforów, katalizatorów i innych rodzajów wypełniaczy funkcjonalnych. Ważnym zagadnieniem w pracach nad tymi materiałami jest określenie zależności pomiędzy doбором rodzaju i stopniem napełnienia fazy funkcjonalnej w osnowie polimerowej i właściwościami elektrycznymi, optycznymi, mechanicznymi, termicznymi i innymi ważnymi z punktu widzenia zastosowań w układach elektronicznych.

4.1 Przebieg pracy naukowo-badawczej przed uzyskaniem stopnia doktora nauk technicznych

W 1997r. ukończyłem pięcioletnie Technikum Elektroniczne w zespole szkół nr.1 im. Baonu Zośka w Warszawie, w specjalności miernictwo elektryczne i elektroniczne, i rozpocząłem pięcioletnie studia na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej. Studia te ukończyłem w 2003r. na specjalności Technologia Sprzętu Precyzyjnego i Elektronicznego, broniąc pracę magisterską pt. „Zastosowanie adhezyjnych substancji przewodzących w technologii elektronicznego montażu bezpośredniego” z wynikiem bardzo dobrym, napisaną pod kierunkiem dr inż. Ryszarda Jeziora. Jeszcze przed zakończeniem studiów podjąłem pracę zawodową w firmie Selmar w Warszawie na stanowisku projektanta-konstruktora w dziale badawczo-rozwojowym. Efektem mojej pracy był m.in. komputer przemysłowy „Fortrack”, który został wyróżniony w 2005r. w ramach konkursu „Najlepszy produkt dla logistyki, transportu, produkcji”.

W 2004r. zostałem uczestnikiem Studium Doktoranckiego na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej. Opiekunem naukowym i promotorem mojej pracy doktorskiej zatytułowanej „Opracowanie technologii i badania właściwości kompozytów polimerowych z nanorurkami węglowymi i ich zastosowania” była prof. dr hab. inż. Małgorzata Jakubowska. Celem mojej pracy doktorskiej było opracowanie oryginalnej technologii wytwarzania materiałów kompozytowych złożonych z osnowy polimerowej termo- lub fotoutwardzalnej oraz nanorurek węglowych jako fazy przewodzącej, nanoszonych techniką sitodruku, wraz z charakteryzacją ich właściwości. Otrzymane warstwy charakteryzują się przewodnictwem elektrycznym, transparentnością optyczną i podwyższoną elastycznością. Opracowane materiały kompozytowe przeznaczone są do zastosowania w elektronice drukowanej, w wytwarzaniu układów elektronicznych na podłożach elastycznych. Osiągnięcie celu wymagało doboru odpowiedniego rodzaju nanorurek węglowych, przeprowadzonego na podstawie wyników badań ich właściwości, opracowania metod ich dyspersji w nośnikach polimerowych, doboru parametrów nanoszenia past i utwardzania warstw oraz wyznaczenia zależności między właściwościami warstw (elektrycznymi, optycznymi, elektromechanicznymi, temperaturowymi i innymi) a kompozycją past z nanorurkami. Badania były finansowane z grantu promotorskiego 0814/B/T02/2009/37 „Badania właściwości i możliwości zastosowania polimerowych warstw grubych z nanorurkami węglowymi”. Efektem badań jest również wniosek patentowy złożony w 2008r. którego postępowanie zakończyło się w 2013r. przyznaniem patentu pt. „Pasta przewodząca” nr PL215126-B1. Pracę doktorską obroniłem w 2011r. na Wydziale Mechatroniki, Politechniki Warszawskiej. Recenzentami pracy byli prof. dr hab. inż. Andrzej Dziejcz z Politechniki Wrocławskiej i dr hab. inż. Dionizy Biało z Politechniki Warszawskiej. W latach 2009-2011 byłem zatrudniony na stanowisku asystenta na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej.

4.2 Przebieg pracy naukowo-badawczej po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych

Uzyskanie stopnia doktora nauk technicznych pozwoliło na zatrudnienie mnie na stanowisku adiunkta na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej, gdzie pracuję od 2011r. W tym samym roku zostałem pracownikiem w Zakładzie Materiałów Grubowarstwowych w Instytucie Technologii Materiałów Elektronicznych w Warszawie.

Po obronie pracy doktorskiej tematyka moich zainteresowań nadal skierowana była na kompozyty z dodatkiem nanomateriałów do zastosowania w technologii elektroniki drukowanej. W ostatnim rozdziale rozprawy doktorskiej, jak również w monografii z 2012r. pt. „Thick Films: Properties, Technology and Applications”, w rozdziale mojego autorstwa „Screen Printed Polymer Paste with Carbon Nanotubes for Printed Electronics Applications” [1], zidentyfikowałem dalsze kierunki badań nad kompozytami z nanorurkami węglowymi do wytwarzania układów elektronicznych. Dodatkowo był to okres, w którym rozwijały się badania nad zastosowaniem grafenu w elektronice, w tym płatek grafenowych, które doskonale nadają się do zastosowania w technologii elektroniki drukowanej [2], [3]. Inne materiały i nowe, potencjalne obszary zastosowań również weszły w krąg badań, np. nanoproszki ceramiczne do warstw dielektrycznych, nanoproszki ferrytyczne dla zastosowań mikrofalowych, proszki katalityczne dla powłok oczyszczających, zastosowanie nanomateriałów w ogniwach fotowoltaicznych, w czujnikach biochemicznych i fizycznych, a także w dziedzinie biologii.

Główny obszar badań związanych z zastosowaniem nanorurek węglowych i płatków grafenowych jest związany z realizacją czterech projektów badawczych w latach 2011-2016, w które byłem aktywnie zaangażowany:

- Grafenowe pasty i atramenty do drukowania ścieżek i warstw przewodzących w zastosowaniu do zabezpieczenia dokumentów – GRAFINKS, NCBiR GRAFTECH/NCBR/09/07/2013 – Politechnika Warszawska, Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, Polska Wytwórnia Papierów Wartościowych,
- Transparentna elektroda emiterowa do aplikacji fotowoltaicznych, wykonana na bazie nanorurek węglowych, 2011/01/B/ST7/0657 – Politechnika Łódzka, Politechnika Warszawska, Instytut Maszyn Przepływowych PAN,
- Stypendium na badania własne, Centrum Studiów Zaawansowanych Politechniki Warszawskiej, CAS/28/POKL,
- Metody i sposoby ochrony i obrony przed impulsami HPM, DOB-1-3/1/PS/2014 - Wojskowa Akademia Techniczna, Politechnika Warszawska, Politechnika Wrocławska, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, PIT – Radwar S.A., Radiotechnika Marketing Sp. z o.o., Pol-Spec-Tech-Service.

W ramach realizacji projektów opracowano szereg rozwiązań materiałów elektronicznych i struktur wykonanych technikami druku. Duży nacisk położony został na opracowanie elektrod transparentnych dla drukowanych struktur elektroluminescencyjnych, na bazie nanorurek węglowych i płatków grafenowych, przeznaczonych do nakładania technikami sitodruku i natrysku [4]. Opracowane elektrody pozwoliły na wytworzenie funkcjonalnych struktur emitujących światło niebieskie, zielone i pomarańczowe, choć parametry ich pracy (natężenie emitowanego oświetlenia) było niższe niż dla analogicznych rozwiązań bazujących na elektrodach ITO. Jednak znaczącą przewagę opracowanych elektrod można zaobserwować przy wpływie czynników mechanicznych (cykliczne zginanie), kiedy to po ponad 75 000 cykli zginania elektrody na bazie nanorurek węglowych i płatków grafenowych zachowują rezystywność powierzchniową na niemal niezmiennym poziomie, a elektrody ITO już po 20 cyklach zginania odnotowały ponad dziesięciokrotny wzrost rezystancji powierzchniowej, ostatecznie charakteryzując się rezystancją wyższą od elektrod z nanomateriałami węglowymi. Także podczas termicznych cykli przyspieszonego starzenia, zaobserwowano negatywne zjawiska delaminacji w strukturach z elektrodami ITO, które nie występują dla elektrod drukowanych z nanomateriałów węglowych.

Ten sam rodzaj elektrod posłużył do opracowania struktur elektroluminescencyjnych drukowanych na podłożach papierowych i tkaninach [5], co nie jest możliwe w przypadku stosowania elektrod ITO nanoszonych technikami próżniowymi, wymagających stosowania folii polimerowych lub podłoży szklanych. W badaniach wytworzono struktury w „konfiguracji odwrotnej”, czyli z elektrodą transparentną drukowaną jako ostatnią, na trzech rodzajach podłoży papierowych oraz na dwóch rodzajach tkanin. Podobnie jak we wcześniejszych badaniach, struktury odznaczały się niższą luminancją niż analogiczne struktury nanoszone na folie polimerowe z elektrodą ITO. Jednak w tym wypadku wydajność struktur nie była aż tak istotna jak możliwość naniesienia ich na dowolne podłoże – pokazane zostały możliwości rozszerzenia zakresu stosowania tego rodzaju struktur, co jest możliwe głównie dzięki zastosowaniu opracowanej drukowanej elektrody transparentnej na bazie nanomateriałów węglowych.

W toku tych badań zdecydowano się również na podjęcie próby analizy wpływu różnych rodzajów nanomateriałów węglowych na jakość otrzymywanych warstw, która przekłada się na uzyskiwane właściwości optoelektroniczne [6]. Przebadano cztery rodzaje wypełniacza: dwuścienne nanorurki węglowe, nanowłókna węglowe, płatki grafenowe i mikropłatki grafitowe. Częstki wypełniacza zostały zdyspergowane w osnowie polimerowej na bazie polimetakrylanu metylu, z reologią dostosowaną do techniki sitodruku i powlekania natryskowego. W zależności od zastosowanego materiału i techniki nanoszenia, zawartość wypełniacza węglowego była w przedziale od 0,24 % wag. dla nanorurek aż do ponad 20 % wag. dla nanowłókien i płatków grafitowych. Otrzymane warstwy odznaczały się doskonałą wytrzymałością mechaniczną w badaniach cyklicznego zginania. Badano również zależność transmitancji optycznej od rodzaju materiału i techniki nanoszenia, które bezpośrednio wpływają na grubość warstw. W tym wypadku elektrody otrzymane techniką powlekania natryskowego odznaczały się znacznie wyższymi wartościami transmitancji (aż do 75 % dla nanorurek węglowych), ze względu na znacznie mniejszą grubość. Warstwy nanoszone natryskiem odznaczały się też znacznie niższą rezystancją powierzchniową (poniżej 10 k Ω) ze względu na niższą zawartość dielektrycznej osnowy polimerowej. W tym przypadku również uzyskiwano niższe chropowatości warstw (często w zakresie 0,5 μm) co ma zasadnicze znaczenie w wytwarzaniu struktur elektronicznych cienkowarstwowych, gdzie chropowatość może wpływać na występowanie przebiegów elektrycznych między poszczególnymi warstwami. Idea przebadania określonych rodzajów nanomateriałów przyświecała również przeprowadzonym badaniom nad separacją nanorurek węglowych w polu elektrycznym, w celu odseparowania nanorurek o wyższej przewodności od tych wykazujących właściwości półprzewodnikowe [7]. Otrzymany materiał posłużył do wytworzenia elektrod transparentnych techniką natrysku, które odznaczały się ponad pięciokrotnie niższą rezystancją powierzchniową od analogicznych struktur wykonanych z materiału niesegregowanego.

Drukowane warstwy na bazie nanomateriałów węglowych posłużyły również jako elektrody transparentne w ogniwach fotowoltaicznych [8]. Celem tych badań było porównanie parametrów elektrod transparentnych wykonanych z zastosowaniem różnych materiałów (ITO, ZnO i CNT). przeznaczonych dla elastycznych ogniw fotowoltaicznych. Podobnie jak w przypadku struktur elektroluminescencyjnych, również w tych badaniach okazało się, że stosując elektrody drukowane na bazie nanorurek węglowych jesteśmy w stanie uzyskać nieporównywalnie większą odporność na czynniki mechaniczne występujące przy elastycznych ogniwach (zginanie) w porównaniu do elektrod tlenkowych. Dodatkowy obszar badań powiązany z ogniwami fotowoltaicznym, w którym zastosowano opracowane materiały, to warstwy katalityczne w ogniwach barwnikowych [9]. Stosując dwuścienne nanorurki węglowe nakładane powlekaniami natryskowymi i wygrzewane w 300°C, wytworzono ogniwo barwnikowe o sprawności ponad 4,5 %, czyli nie gorszej niż porównawcze ogniwo z klasycznie stosowaną elektrodą platynową.

Poza elektrodami transparentnymi prowadzono również badania nad otrzymaniem warstw o niskiej rezystywności, do zastosowania jako ścieżki przewodzące, anteny, grzałki i czujniki. Duża zawartość wypełniacza w postaci nanorurek węglowych lub płatków grafenowych skutkuje całkowitym blokowaniem światła, ale jednocześnie pozwala znacząco obniżyć rezystancję warstw. Jest to szczególnie istotne w takich zastosowaniach jak anteny nadawczo-odbiorcze w układach komunikacji radiowej, czy ekrany i absorbery promieniowania elektromagnetycznego. Pierwsze próby zastosowania opracowanych kompozytów z nanorurkami węglowymi zostały podjęte w

pierwszym roku po obronie pracy doktorskiej, gdy we współpracy z Uniwersytetem w Surrey w Wielkiej Brytanii, badano charakterystykę przenoszenia sygnałów wysokoczęstotliwościowych dla opracowanych ścieżek [10]. W trakcie tych badań przeprowadzono charakterystykę pracy warstw kompozytowych PMMA-CNT w częstotliwościach do 220 GHz. Zaobserwowano, że w przeciwieństwie do przewodników metalicznych, straty sygnałów w drukowanych ścieżkach kompozytowych maleją wraz ze wzrostem częstotliwości, aż do ustabilizowanego poziomu 0,28 dB/mm w przedziale częstotliwości 140÷220 GHz. Wyniki tych badań zainspirowały w dalszych latach do podjęcia próby zastosowania ścieżek i warstw kompozytowych z nanomateriałami węglowymi w układach radiowych. Badania nad drukowanymi kompozytami z dodatkiem 5÷15 % wag. płatków grafenowych i 3 % wag. wielościennych nanorurek węglowych prowadzono w zakresie częstotliwości do 20 THz [11]. W badaniach zaobserwowano, że rezystancja stałoprądowa warstw nie zmienia się w sposób liniowy wraz ze wzrostem liczby warstw, tak jak sugerowało by zastosowanie modelu połączeń równoległych, na co wpływ ma chropowatość warstw. Stosując pomiary w wysokich częstotliwościach z zastosowaniem technik spektroskopii terahercowej w domenie czasowej (THz-TDS) i spektroskopii fourierowskiej w podczerwieni (FTIR), zaobserwowano wzrost rezystancji warstw z początkowych wartości ok 10 Ω aż do 300 Ω przy częstotliwości 2 THz, powyżej której wartość się stabilizuje. Dla badanych warstw zaproponowano modele przewodnictwa bazujące na modelu Drudego, a dla kompozytów o zawartości wypełniacza poniżej progu perkolacji stałoprądowej, zaproponowano modele bazujące na modelu oscylatorów Lorentza. Warstwy o niskiej rezystancji zastosowano również do wytworzenia anten pracujących w zakresie częstotliwości UHF, przeznaczonych dla etykiet identyfikujących RFID [12]. Stosując pasty do sitodruku z zawartością 10 % wag. płatków grafenowych w roztworze PMMA, nadrukowano anteny dipolowe na podłożu kaptonowym, pracujące w zakresie częstotliwości 860÷960 MHz. Otrzymane etykiety RFID z zamontowanymi chipami były w pełni funkcjonalne. W porównaniu do analogicznej anteny z folii miedzianej, zaobserwowano znacznie mniejszą odległość odczytu dla etykiet z antenami grafenowymi, co jest związane z ich wyższą rezystancją. Ideą zbadania tego rodzaju materiałów w produkcji anten RFID było wskazanie, że może on stanowić tańszy zamiennik dla drukowanych warstw srebrowych, w zastosowaniach gdzie odległość odczytu nie jest kluczowa.

Drukowane materiały kompozytowe z nanostrukturami węglowymi zostały zastosowane do wykonania czujników nacisku, oraz czujników biochemicznych. Drukowane czujniki nacisku na bazie płatków grafenowych i nanorurek węglowych, bazujące na efekcie zmiennej rezystancji kontaktowej między elektrodami, wykonano techniką sitodruku na podłożach elastycznych [13]. Otrzymane wyniki bezpośrednio wskazują, że czułość tego rodzaju czujników jest zależna od zawartości fazy funkcjonalnej w warstwie – im niższa zawartość i wyższa rezystancja, tym czułość jest większa. Dodatkowo zaobserwowano, że wyższą czułość mają czujniki na bazie płatków grafenowych, co może mieć związek z większą powierzchnią aktywną tych struktur. Podobnie jak w przypadku elektrod transparentnych, wytrzymałość mechaniczna na cykliczne zginanie i naprężenia ściskające jest wysoka i czynniki te nie mają znaczącego wpływu na zmianę rezystancji warstw. Podobne materiały zastosowano do wytworzenia elektrod czujników biochemicznych [14]. Celem tych badań było zweryfikowanie przydatności czujników z warstwą aktywną grafenową do pomiarów techniką woltamperometryczną. Badanym czynnikiem był roztwór o składzie zbliżonym do ludzkich łez, a substancją czułą naniesioną na elektrodę grafenową było H₂O₂. Badano stężenie

glukozy w zakresie od 0 do 30 $\mu\text{M/L}$. Dzięki zastosowaniu tanich technik druku możliwe jest łatwe wytwarzanie czujników jednorazowych.

Wśród badań z obszaru biologii należy również wspomnieć o zastosowaniu atramentów wodnych na bazie płatków grafenowych do druku strumieniowego [15]. Atramenty te przebadano pod kątem otrzymania stabilnych zawiesin płatków grafenowych w roztworach glikolu polietylenowego, argininy, poloxameru i poli(alkoholu winylowego). Otrzymane atramenty nie wykazywały cytotoksyczności, a niektóre z nich okazały się doskonałym podłożem do proliferacji komórek.

Drukowane warstwy z nanorurkami węglowymi i nanowłóknami węglowymi przebadano również pod kątem zastosowania jako elementy grzejne i w układach wysokiej mocy [16]. Warstwy nadrukowano na podłoża polimerowe i ceramikę Al_2O_3 , a następnie obciążono napięciami indukującymi wysokie natężenia prądu i obserwowano zmiany temperatury za pomocą kamery termowizyjnej. Warstwy rozgrzane do 200°C spowodowały uszkodzenie podłoża polimerowego, a warstwy rozgrzane do ponad 350°C spowodowały uszkodzenie podłoża ceramicznego, przez wywołanie naprężeń mechanicznych, wynikających z dużego gradientu temperatury w obszarze rezystora drukowanego. W badaniach tych testowano również elektrody transparentne, które mogą posłużyć jako grzałki i emitery promieniowania IR, jednocześnie zachowując transmitancję optyczną w zakresie światła widzialnego.

W ramach współpracy z Katedrą Technologii Środowiska Uniwersytetu Gdańskiego opracowano również warstwy fotokatalityczne z zastosowaniem płatków grafenowych i struktur perowskitowych, przeznaczone do oczyszczania powietrza i wody [17]. Otrzymane techniką solwotermalną cząstki rGO-KTaO_3 i wytworzone z nich warstwy wykazywały wyższą aktywność fotokatalityczną niż same cząstki KTaO_3 , przy oświetleniu światłem widzialnym, co przypisywane jest występowaniu złącza p-n pomiędzy płatkami grafenowymi a KTaO_3 , a także zwiększoną absorpcją światła przez płatki grafenowe. Najwyższą aktywność (43 % w czasie 60 min.) uzyskano przy zawartości 30 % wag. płatków grafenowych w warstwie.

Powiązane z badaniami nad zastosowaniem nanomateriałów węglowych w elektronice drukowanej, są również wyniki badań nad zastosowaniem nanorurek węglowych w lutowniach bezołowiowych [18]. W badaniach tych istotne było określenie wpływu dodatku wielościennych nanorurek węglowych na właściwości mechaniczne połączenia, zwilżania podłoża w procesie lutowania i drukowalności past przy nanoszeniu na płytki obwodów drukowanych.

Ważnym elementem moich prac nad materiałami, technikami i elementami elektroniki drukowanej, choć nie bezpośrednio związane z nanomateriałami węglowymi, są badania nad zastosowaniem innych rodzajów materiałów fazy funkcjonalnej. Badania te prowadzone były w trakcie mojego stażu doktorskiego jaki odbyłem na Uniwersytecie w Oulu, Finlandia, finansowanego z grantu „Materiały kompozytowe z nanocząstkami dla elektroniki drukowanej”, Centrum Studiów Zaawansowanych Politechniki Warszawskiej, CAS/21/POKL, oraz w ramach międzynarodowego projektu badawczego (w którym uczestniczyłem jako członek komitetu sterującego) „Novel organic-inorganic inks for hybrid printed electronic demonstrators – INNOINKS”, NCBiR/ERA-NET-MATERA/02/2011, prowadzonego we współpracy z Uniwersytetem w Oulu, Instytutem Josefa Stefana na Słowenii, oraz trzema partnerami przemysłowymi: Sachtleben Pigments i Pulse Finland z Finlandii oraz NOF Corporation z Japonii.

Główne dokonania jakie są wynikiem tych projektów to opracowanie drukowanej komórki pamięci memrezystywnej wykonanej techniką druku strumieniowego [19], warstwy ferrytyczne do zastosowań mikrofalowych [20], [21] oraz drukowane planarne cewki i kondensatory do obwodów rezonansowych [22].

W efekcie prowadzonych badań w obszarze zastosowania nanomateriałów węglowych w technologii elektroniki, w szczególności elektroniki drukowanej, powstało 6 zgłoszeń patentowych, które uzyskały już ochronę prawną w postaci patentów krajowych i międzynarodowych.

- K. Bukat, M. Kościelski, J. Sitek, S. Karolewski, L. Rafalik, M. Jakubowska, **M. Słoma**, A. Młodziak, W. Niedźwiedz, 'Bezołowiowa, kompozytowa pasta lutownicza do montażu powierzchniowego', PL217779-B1, 08.03.2010.

- K. Janeczek, G. Kozioł, M. Jakubowska, **M. Słoma**, 'Czujnik temperatury zintegrowany z etykietą RFID', PL218991-B1, 12.06.2011.

- M. Jakubowska, **M. Słoma**, A. Młodziak, 'Method of producing graphene layers and paste comprising graphene nanoplatelets', EP 12184435.1, 03.05.2017. - 'Sposób otrzymywania warstw grafenowych i pasta zawierająca nanopłatki grafenowe', PL222519-B1, 31.08.2016.

- M. Jakubowska, D. Janczak, **M. Słoma**, A. Młodziak, G. Wróblewski, 'Drukowany czujnik sił nacisku', PL222974-B1, 30.09.2016.

- M. Olszewska, B. Salski, D. Janczak, W. Gwarek, M. Jakubowska, G. Wróblewski, A. Młodziak, **M. Słoma**, 'Panel pochłaniający promieniowanie elektromagnetyczne', PL223793-B1, 30.11.2016.

- G. Wróblewski, D. Janczak, M. Jakubowska, **M. Słoma**, A. Młodziak, 'Sposób wytwarzania warstw grafenowych', PL224415-B1, 30.12.2016.

4.3 Obecne i przyszłe kierunki pracy naukowo-badawczej

Moje zainteresowania naukowe pozostają w obszarze technologii elektroniki i zastosowania nowoczesnych materiałów oraz technik wytwarzania. Obecnie rozwijam nową gałąź badawczą, jaką jest zastosowanie technik wytwarzania przyrostowego (potocznie nazywanego drukiem 3D) do wytwarzania obwodów elektronicznych, podstawowych komponentów czy prostych układów. Badania te realizuję w ramach grantu Fundacji na rzecz Nauki Polskiej, przyznanego w pierwszej edycji konkursu First-Team, pt. „Functional heterophase materials for structural electronics”, First TEAM/2016-1/7, w którym pełnię rolę kierownika. Głównym celem projektu jest opracowanie i charakterystyka grupy materiałów kompozytowych, dostosowanych właściwościami do druku 3D elektroniki strukturalnej. Elektronika strukturalna to elementy i obwody elektroniczne będące częścią budowli, obudów i podobnych pasywnych elementów konstrukcyjnych (np. karoserie samochodów, mosty), zintegrowane w objętości elementu lub umieszczone na jego powierzchni. Ze względu na możliwość zwiększenia funkcjonalności wyrobów, obniżenie kosztów produkcji czy umożliwienie łatwej modyfikacji wyrobu pod klienta, elektronika strukturalna staje się interesującą nową dziedziną technologii. Obecny wybór materiałów dla elektroniki strukturalnej jest mocno ograniczony, a z analizy literaturowej wynika, że żaden z zespołów nie podjął wyzwania przeprowadzenia badań podstawowych na tak szeroką skalę. Z tego względu zdecydowałem się podjąć interdyscyplinarne badania pokrywające obszary elektroniki, inżynierii materiałowej, chemii, technik formowania i nanotechnologii, pozwalające stawić czoła wyzwaniu. W toku realizacji projektu zostaną opracowane i przebadane kompozyty polimerowe z metalami, węglem,

ceramiką, półprzewodnikami – w tym również w formie nanomateriałów. Mimo iż farby i pasty przewodzące nie są nowym rozwiązaniem, to ich zastosowanie jest ograniczone do płaskich wydruków na folii lub papierze. Dlatego dla 3D drukowanej elektroniki strukturalnej konieczne jest opracowanie nowej grupy materiałów. Wdrożenie nowoczesnych technologii jak druk 3D pozwala firmom i użytkownikom zmienić podejście do produkcji i prototypownia. Dzięki nim możliwe jest szybkie sprawdzenie koncepcji lub produkcja krótkich serii, bez konieczności posiadania rozbudowanego zaplecza sprzętowego. Podobnych efektów możemy oczekiwać w przypadku technologii elektroniki strukturalnej, która pozwoli na wytworzenie nowych, lepszych rozwiązań, ale jednocześnie pozwoli na redukcję kosztów produkcji, czy zmniejszenie odpadów produkcyjnych. Ostatecznie technologia ta pozwoli na produkcję większości obecnych rozwiązań elektrycznych i elektronicznych jak sprzęt AGD, samochody, urządzenia multimedialne, komputery i sterowniki, czy sprzęt medyczny. Pozwoli na integrację w obudowie nie tylko układów elektronicznych, ale także ogniw i wyświetlaczy. Aby zademonstrować potencjał tej technologii w wymienionych dziedzinach w ramach projektu planowane jest wytworzenie serii demonstratorów takich jak silnik elektryczny, ogniwa lub kondensatory, struktury świecące oraz przestrzenny obwód elektroniczny z mikrokontrolerem.

* * *

Zwieńczeniem przeprowadzonego szerokiego frontu badań w dziedzinie technologii elektroniki, z naciskiem na elektronikę drukowaną stosującą nanomateriały węglowe, jest opracowanie pt. „Nanomateriały węglowe w technologii elektroniki drukowanej”, wydane przez Oficynę Wydawniczą Politechniki Warszawskiej, w 2017r. Książka powstała z potrzeby przedstawienia w prosty i zrozumiały sposób aspektu zastosowania nanomateriałów węglowych w elektronice i zestawienia rozproszonych wyników dorobku zespołów naukowych z całego świata. Konieczność stworzenia takiego opracowania wynika z braku tak obszernie zredagowanej w języku polskim literatury dotyczącej zastosowania nanomateriałów węglowych w elektronice drukowanej, a nawet w literaturze zagranicznej możemy trafić jedynie na bardzo szczegółowe opracowania dotyczące specyficznych rozwiązań, jak zastosowania biomedyczne, optoelektroniczne czy sensorowe. Dodatkowo, czytelnik zainteresowany szerszym spojrzeniem na prace prowadzone w zakresie zastosowania nanomateriałów węglowych w elektronice drukowanej, znajdzie tu wiele odnośników do już opublikowanych opracowań w literaturze krajowej i zagranicznej. W książce przedstawiony jest także dorobek autora związany z opracowaniem drukowanych warstw rezystywnych, elektrod transparentnych, struktur elektroluminescencyjnych, ogniw fotowoltaicznych, czujników wielkości fizycznych i chemicznych, warstw i ścieżek do zastosowań elektroniki wysokich częstotliwości i grzałek. Opisane są szczegółowe badania nad opracowanymi materiałami i strukturami elektronicznymi, obejmujące szereg badań nad właściwościami elektromechanicznymi warstw z nanomateriałami węglowymi, zależności między parametrami procesu nanoszenia a rezystywnością otrzymywanych warstw kompozytowych, oraz charakterystyka mechanizmów przewodnictwa elektrycznego obserwowanych w warstwach kompozytowych z nanomateriałami węglowymi.

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. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311.):

5.1 Jako główne osiągnięcie naukowe wskazuję monografię:

Marcin Słoma, *Nanomateriały węglowe w technologii elektroniki drukowanej*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2017, ISBN 978-83-7814-611-7.

Recenzenci wydawniczy:

Dr hab. inż. Andrzej Huczko, prof. Uniwersytetu Warszawskiego,

Dr hab. Agnieszka Iwan, prof. Instytutu Elektrotechniki, o. Wrocław.

5.2 Omówienie celu naukowego ww. pracy.

Monografia, którą wskazuję jako główne osiągnięcie naukowe, stanowi pogłębione studium rosnącego znaczenia nanomateriałów w technologii elementów i układów elektronicznych. Praca jest zwieńczeniem moich ponad sześcioletnich prac badawczy i dociekań naukowych w tym zakresie, a równocześnie jest podkreśleniem mojego wkładu w rozwój tej dyscypliny naukowej, w dotychczasowym rozwoju kariery akademickiej.

Monografia składa się z pięciu głównych rozdziałów, sukcesywnie wprowadzających czytelnika w tematykę z obszaru zastosowania nanomateriałów węglowych w elektronice drukowanej. Pierwszy rozdział przybliży problematykę nanomateriałów oraz przedstawia charakterystykę elektroniki drukowanej. Drugi rozdział zawiera szczegółowe informacje dotyczące rodzajów nanomateriałów węglowych, opis metod ich otrzymywania i przetwarzania, charakterystykę właściwości fizycznych, kończąc na problemie oddziaływania nanomateriałów węglowych na organizmy żywe. Trzeci rozdział poświęcony jest wykorzystaniu ponadprzeciętnych właściwości nanomateriałów węglowych w zastosowaniach elektronicznych, wraz z opisem metod otrzymywania elementów i układów elektronicznych na nich bazujących. Najobszerniejszy, czwarty rozdział, zawiera główne informacje o rozwiązaniach elektroniki drukowanej stosującej nanomateriały węglowe. Rozpoczyna się on opisem procesów stosowanych do formowania drukowanych warstw elektronicznych, zebraniem najważniejszych właściwości fizycznych otrzymywanych warstw pod kątem zastosowań elektronicznych, a w dalszej części zawiera charakterystykę przykładowych elementów otrzymywanych w tech technologii, jak drukowane tranzystory, elektrody transparentne, czujniki i warstwy aktywne, kończąc na opisie innych zastosowań nanomateriałów węglowych w elektronice drukowanej. Piąty rozdział dotyczy perspektyw rozwoju technologii elektroniki drukowanej z zastosowaniem nanomateriałów węglowych, poruszając problemy wydajności tego rodzaju układów elektronicznych, możliwość wytwarzania urządzeń elastycznych i rozciągliwych, zastosowania technik wytwarzania przyrostowego (druk 3D) i wytwarzania układów przestrzennych, a także możliwość druku układów elektronicznych na podłożach papierowych i tekstylnych. Ostatni rozdział zawiera podsumowanie przedstawionych zagadnień. Praca zawiera 941 odnośników do pozycji literaturowych w opisywanej problematyce, które pozwolą czytelnikowi na głębsze zapoznanie się z konkretnymi, opisywanymi i porównywanymi w pracy problemami naukowymi i przemysłowymi.

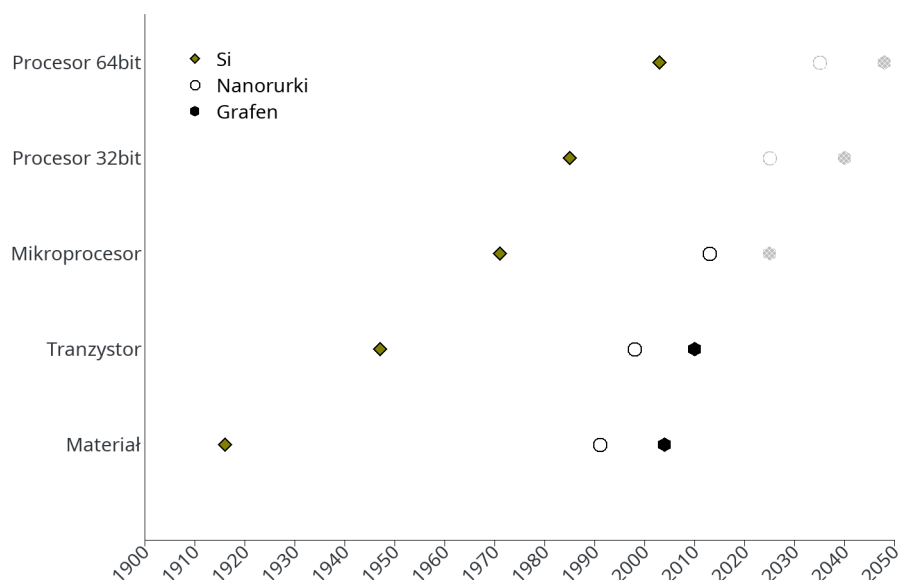
Wprowadzenie i cel podjęcia tematyki

Badania naukowe i rozwój technologii w obszarze nanomateriałów w ciągu ostatnich lat wzbudziły płomienne zainteresowanie i eksplozję oczekiwań względem nich. Specyfika tej tematyki przyciągnęła rzesze naukowców zainteresowanych zagadnieniem nanoskali, co wpłynęło w krótkim czasie na przyspieszony rozwój metod syntezy i technik charakterystyki, stymulując potencjał do praktycznych aplikacji w wielu branżach technologicznych. Podłoże dla rozwoju nanotechnologii wskazujące na wagę trendu do miniaturyzacji otaczających nas rozwiązań, zostało zapoczątkowane na przełomie lat 50/60 ubiegłego wieku, kiedy to Richard Feynman wygłosił swoje słynne wystąpienie na Kalifornijskim Instytucie Technologicznym – Caltech, zatytułowane „There’s Plenty of Room at the Bottom”. Rozwój badań nad nanomateriałami przyspieszył znacząco na początku lat dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku. Początkowo obszar ten był zdominowany przez naukowców pracujących nad zjawiskami syntezy i metodami otrzymywania zróżnicowanych struktur. Nowe rodzaje nanomateriałów pojawiały się w doniesieniach szybciej niż naukowcy byli w stanie opracować metody skutecznej i szybkiej charakterystyki, czego następstwem była w kolejnych latach niezliczona liczba doniesień literaturowych o nowych metodach charakterystyki oraz propozycje modeli opisujących zjawiska związane z nanostrukturami. Dopiero po połączeniu tych trzech frontów naukowych (synteza materiałów, metody charakterystyki, opis zjawisk) możliwe było przejście do pełnego opisu tych nowych, fascynujących form materii. Równoległe do badań podstawowych rozbudziło się zainteresowanie nad wykorzystaniem nanomateriałów do celów praktycznych i komercyjnych. Potencjał nanotechnologii stał się zauważalny dla branży przemysłowej wysokiego rozwoju (np. elektronika), ale także dla dziedzin przemysłu kojarzonych dotychczas z bardziej tradycyjnymi formami produkcji (np. branża poligraficzna czy tekstylna).

Mimo tak rozbudowanego zaplecza związanego z syntezą, charakterystyką, czy manipulacją nanomateriałami, doniesienia o praktycznym ich zastosowaniu w rozwiązaniach codziennego życia ciągle są jeszcze mało zauważalne. Wydaje się, że naukowcy i technologowie traktują te materiały jako ciekawostkę, a nie jako jedno z dostępnych na rynku rozwiązań, oferujących nieograniczony potencjał do przełomowych osiągnięć technologicznych. Z tego względu zdecydowałem się na przedstawienie osiągnięć naukowych oferujących najwyższy potencjał wdrożeniowy dla przemysłu, skupiając się na rozwiązaniach elektronicznych i im pokrewnych. Wydaje się, że wystąpiła potrzeba wyjaśnienia skąd wynika tak duże zainteresowanie nanomateriałami i jak wypracować na podstawie już istniejących osiągnięć drogę do aplikacji praktycznych lub do nowych obszarów badawczych.

Rozwój nanotechnologii jest bezpośrednio związany z węglem i to głównie z tym pierwiastkiem wiążemy pierwszy przełom w myśleniu nad opisem struktury materii nas otaczającej. Po odkryciu i scharakteryzowaniu fulerenów C_{60} i C_{70} , i fali dalszych odkryć, w których nanorurki węglowe odgrywają kluczową rolę, środowisko naukowe przywykło do faktu, że *węgiel* nie zawsze jest równy *węglowi*. To pociągnęło za sobą dalszą rewolucję, bo wkrótce okazało się, że żadne ze znanych materiałów nie są takie same, jeżeli przyjrzymy się im dokładnie w skali nanometrowej – zauważymy, że złoto nie zachowuje się jak metal, a aluminium może konkurować ze stalą. Do rozwoju nanotechnologii przyczynia się lepsze poznanie zależności związanych ze zmianą właściwości materiałów w funkcji rozmiaru cząstek przez nie tworzonych, w takich aspektach jak elektronika, optyka, magnetyzm czy chemia, zacierając pod wieloma względami granice pomiędzy znanymi obecnie podziałami na dielektryki, półprzewodniki i przewodniki.

Jak w przypadku każdej nowej i obiecującej technologii, tak i w przypadku nanotechnologii i nanomateriałów budzą się wielkie nadzieje co do ich potencjalnego wykorzystania do budowy zupełnie nowych rozwiązań, przyczyniających się do rozwoju naszej cywilizacji, poprawy jakości życia społeczeństwa czy opracowania nowych produktów powszechnego zastosowania. Szczególnie w odniesieniu do grafenu można zaobserwować w obecnych latach galopujący wzrost oczekiwań co do opracowania jak największej liczby praktycznych rozwiązań z jego wykorzystaniem. W tym miejscu jednak należy spojrzeć ze spokojem na historię rozwoju układów elektronicznych powszechnie stosowanych obecnie i na rozwój badań nad zastosowaniem innych rodzajów materiałów, jak chociażby nanorurek węglowych. Rozwój technologii półprzewodnikowej jest datowany od opracowanej w roku 1916 metody Jana Czochralskiego wyciągania monokryształów, będącej podstawą technologii obecnej elektroniki. Dopiero po ponad 30 latach w laboratoriach Bell Telephone Laboratories w roku 1947 John Bardeen oraz Walter Houser Brattain opracowali pierwszy tranzystor ostrzowy, a w roku 1950 William Bradford Shockley opracował tranzystor polowy, za co cała trójka została uhonorowana Nagrodą Nobla z fizyki w roku 1956. Kolejnym istotnym krokiem było opracowanie mikroprocesora zawierającego setki a nawet tysiące tranzystorów zintegrowanych na jednym podłożu półprzewodnikowym. Przyjmuje się, że pierwsze komercyjne rozwiązania tego rodzaju zostały zaprezentowane w roku 1971 przez firmę Intel (układ 4004) i Teksas Instruments (układ TMS 1000). Analizując rozwój badań nad nanomateriałami węglowymi i próby ich praktycznego zastosowania w elektronice, można posłużyć się analogią do wyżej wymienionej ścieżki rozwoju układów krzemowych. W tym wypadku można przyjąć, że podstawą badań nad nanorurkami węglowymi jest rok 1991 w którym Sumio Iijima opublikował jako pierwszy artykuł szczegółowo opisujący ten rodzaj nanostruktury węglowej. Kolejnym krokiem jest opracowanie tranzystora polowego z nanorurek węglowych w 1998 roku przez zespoły z Uniwersytetu z Delft oraz IBM. Ostatecznie w roku 2013 zespół z Uniwersytetu Stanforda zaprezentował metodę otrzymywania układów scalonych z tranzystorami polowymi z nanorurek węglowych, wykorzystującą strukturę MIPS, która to metoda może być zastosowana na skalę masową. Analizując dokonania związane z badaniami nad grafenem widać, że do praktycznych rozwiązań, jak w przypadku krzemu czy nanorurek węglowych, jest jeszcze daleko. Jako pierwsze poważne doniesienie opisujące jednowarstwową strukturę grafenową uważa się publikację Andre Geima i Konstantina Novoselova z 2004 roku, za którą zostali uhonorowani w 2010 roku Nagrodą Nobla. W tym samym roku ukazała się pierwsza poważna publikacja autorstwa Franka Schwierza dotycząca możliwości zastosowania grafenu do produkcji tranzystorów polowych. Do dziś jednak możliwość wytworzenia tranzystora o wysokiej wydajności z materiału, który nie posiada przerwy energetycznej, pozostaje dyskusyjna. Obecnie znajdujemy się na etapie intensywnej pracy nad stworzeniem procesów do masowej produkcji tego materiału, co ma pozwolić na jego praktyczne zastosowanie w produktach codziennego użytku. Na rysunku 1 zobrazowane są kluczowe etapy w rozwoju technologii krzemowej oraz analogiczne do nich dotychczasowe osiągnięcia z zastosowaniem nanomateriałów węglowych. Przyjmując prosty sposób aproksymacji krzywych rozwoju tych dwóch technologii nanomateriałów, możemy przewidzieć że praktyczne zastosowania na skalę masową zostaną opracowane w horyzoncie najbliższych 15 do nawet 35 lat, a nie kilku lat jak jest to prezentowane w mediach.



Rysunek 1. Rozwój technologii krzemowej i nanomateriałów węglowych w zastosowaniach elektronicznych wraz z przewidywanymi kolejnymi osiągnięciami w tej dziedzinie.

Potrzeba prowadzenia badań na nanomateriałami, które w ostatnich latach zdominowały wiele dziedzin nauki i branży przemysłowych, wynika z chęci uzyskania nowych bardziej wydajnych rozwiązań jak np. szybsze układy elektroniczne czy bardziej wydajne pozyskiwanie energii ze źródeł odnawialnych. Wśród różnych rodzajów nanomateriałów, najczęściej i najwcześniej badaną grupą są nanomateriały węglowe. Będące wynikiem różnego układu wiązań typu sp^2 , czyli podstawowych wiązań płaszczyzn grafitowych, tworzą rozbudowaną grupę o różnych kształtach, wymiarach i właściwościach, poczynając od zero wymiarowych fulerenów, przez jednowymiarowe nanorurki po dwuwymiarowy grafen. Odpowiednio prowadzone procesy syntezy i funkcjonalizacji pozwalają na uzyskanie różnorodnych właściwości fizycznych i chemicznych bazując jedynie na jednym rodzaju pierwiastka – węglu. Aby możliwe było wykorzystanie ich ponadprzeciętnych właściwości prowadzi się na szeroką skalę badania i opracowania technologiczne nad wielkoskalową syntezą konkretnych rodzajów nanomateriałów węglowych, oraz opracowuje się techniki wytwarzania układów mikro- i makroskopowych z ich udziałem, korzystających z ich właściwości.

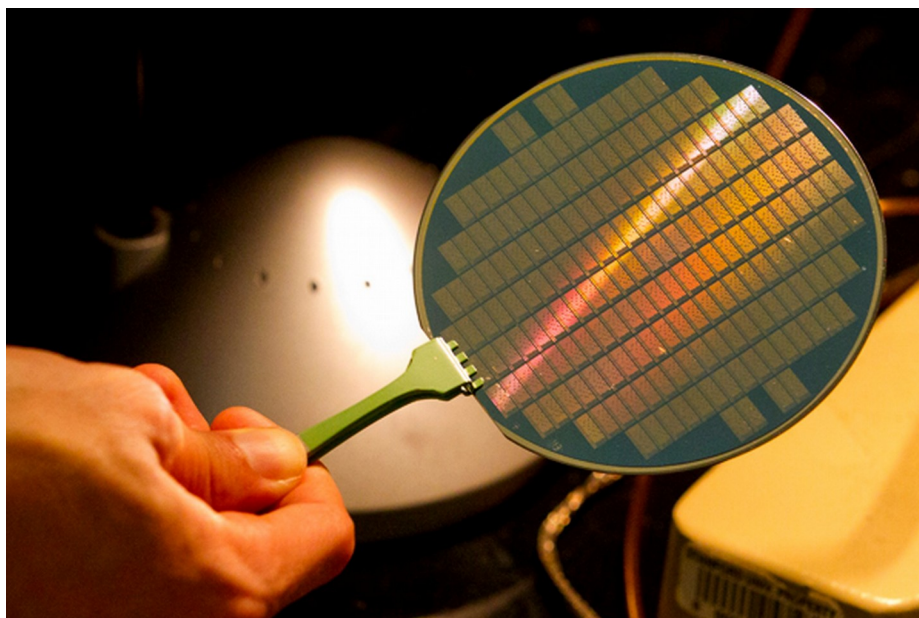
Niesamowite właściwości mechaniczne i elektryczne nanorurek węglowych i grafenu wynikają z ich struktury krystalicznej o wiązaniach w hybrydyzacji sp^2 , a także są związane z ich jedno- i dwuwymiarową morfologią. Wczesne badania właściwości elektrycznych nanorurek jednowarstwowych wykazały, że mogą być one albo przewodzące albo półprzewodnikowe, zależnie od kąta chiralności struktury. Z dokładniejszej analizy pasm s i p wynika, że nanorurki o charakterze metalicznym są w rzeczywistości półprzewodnikami o bardzo małej przerwie energetycznej. W przypadku nanorurek wielowarstwowych lub agregatów nanorurek jednowarstwowych wzajemny układ sieci krystalicznych prowadzi do powstania lub zanikania przerw energetycznych. Nanorurki węglowe odznaczają się wysoką ruchliwością nośników na poziomie $100\ 000\ \text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ w temperaturze pokojowej. Pomiary przewodności elektrycznej pojedynczych nanorurek jednowarstwowych wykazały, że nanorurki niezależnie od długości wykazują stałą rezystancję rzędu pojedynczych kiloomów, związaną ze zjawiskiem transportu balistycznego nośników, jednak na kontakcie z metalicznymi elektrodami tworzy się znaczna

rezystancja rzędu megaomów. Jednocześnie wykazano, że trójelektrodowa konstrukcja z nanorurką jednowarstwową pozwala na wytworzenie tranzystora polowego o bardzo dużej wartości stosunku prądu włączenia do prądu wyłączenia tranzystora (z ang. *on-off ratio*), od wartości izolatora do przewodnika metalicznego. Przewodność cieplna w nanorurkach jest zdominowana przez transport fononów i wg różnych obserwacji wynosi do $6600 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Właściwości mechaniczne nanorurek węglowych rozbudzają wyobraźnię naukowców już od dawna, ze względu na dużą wytrzymałość wiązań sp^2 . Moduł Younga wyznaczony eksperymentalnie wynosi od 1,2 do 1,8 TPa, a wytrzymałość na rozciąganie w granicach 11 do 63 GPa, a dla arkuszy czy włókien moduł Younga wynosi od 320 do 1470 GPa. Przez analogię do wymienionych właściwości nanorurek węglowych można odnieść się do właściwości grafenu, jak wysoka ruchliwość nośników ($200\,000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$), wysoka wartość modułu Younga ($\sim 1.0 \text{ TPa}$) i przewodność termiczna do $5000 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, przy jednoczesnej transmitancji optycznej na poziomie 97.7%. Objętościowe struktury, jak chociażby arkusze papieru grafenowego, wykazywały wartość modułu Younga na poziomie 32 GPa a wytrzymałość na rozciąganie zbliżoną do aluminium, czyli 120 MPa. Właściwości optyczne grafenu są bardzo interesujące z punktu widzenia aplikacji optoelektronicznych. Niska wartość tłumienia dla jednej warstwy (2.3 %) zmieniająca się liniowo wraz ze wzrostem liczby warstw, w połączeniu z wysoką przewodnością elektryczną czyni ten materiał doskonały do zastosowania na elektrody transparentne. Dodatkowo wartość tłumienia jest niezmienna w zakresie światła widzialnego a także w regionach poza nim, co wynika ze struktury i właściwości elektronicznych grafenu.

Zastosowanie nanomateriałów węglowych w elektronice

Trendy w rozwoju nowoczesnych rozwiązań elektronicznych wskazują, że w zasadzie wszystkie z dotychczas odkrytych i scharakteryzowanych nanostruktur węgla, mają bardzo duży potencjał do zastosowania w dziedzinach elektroniki, optoelektroniki, inżynierii biomedycznej czy energetyki. Na czele tej grupy stoją nanorurki węglowe i grafen, czego dowodzą doskonale opracowane techniki otrzymywania superkondensatorów z elektrodami nanorurkowymi czy urządzenia optoelektroniczne z transparentnymi elektrodami grafenowymi. Fulereny znajdują zastosowanie w produkcji organicznych ogniw fotowoltaicznych jako akceptory elektronów. Możliwość sterowania szerokością przerwy energetycznej w nanorurkach poprzez zmianę ich średnicy, czy zmianę charakteru przewodnictwa w grafenie w wyniku generowania pofałdowań w jego strukturze, prowadzą do konkluzji przytaczanych w literaturze, które sugerują, że nanomateriały węglowe w wielu aspektach produkcji układów elektronicznych mogą zastąpić klasyczne układy półprzewodnikowe. Należy mieć na uwadze, że poza fulerenami stosowanymi w fotowoltaice i nanorurkami węglowymi stosowanymi w produkcji superkondensatorów, nanomateriały węglowe dopiero zaczynają być wprowadzane do technologii elektroniki i jeszcze przez długi czas będą stanowić niewielki wycinek obszaru praktycznych zastosowań nanomateriałów węglowych. Obecnie główne zastosowania praktyczne tych nowych materiałów odnajdziemy w elementach konstrukcyjnych czy rozwiązaniach przetwarzających i magazynujących energię. Przedstawione w książce kilkadziesiąt rozwiązań prototypowych i potencjalnych zastosowań nanomateriałów w elektronice to i tak tylko niewielka część doniesień o możliwościach tego rodzaju materiałów. Znakomita większość publikacji naukowych dotyczy badania właściwości fizycznych lub podstawowych parametrów pracy prototypowych układów elektronicznych, nie przedstawiając gotowych rozwiązań technologicznych, a jedynie wskazując obszary potencjalnych zastosowań.

Pierwsze doniesienia literaturowe o opracowaniu tranzystora polowego z zastosowaniem nanorurek węglowych pochodzą z 1998 r. i dotyczą zastosowania zarówno jednościennych jak i wielościennych nanorurek węglowych. W najprostszym rozwiązaniu jest to pojedyncza nanorurka węglowa podłączona do dwóch elektrod (źródła i drenu), leżąca na trzeciej izolowanej elektrodzie – bramce. W kolejnych latach zaprezentowano wyniki badań nad wytworzeniem tranzystorów z nanorurek półprzewodnikowych rodzaju *n* i *p*. W większości opracowań znajdziemy informacje o wysokich wartościach stosunku prądu włączenia do prądu wyłączenia tranzystora (zwanego dalej współczynnikiem przełączenia) na poziomie 10^4 – 10^8 i niskich wartościach natężenia prądu w stanie zatkania gdy tranzystor nie przewodzi. Duży nacisk kładzie się na zwiększenie wydajności tranzystorów z nanomateriałów węglowych, poprzez zmniejszenie długości kanału, obecnie jest to już poniżej 10 nm. Wytworzenie na dużą skalę analogowych i cyfrowych urządzeń elektronicznych bazujących na nanorurkach węglowych wymaga opracowania technologii wytwarzania tranzystorów na dużych powierzchniach z dużą wydajnością i powtarzalnością. Tranzystory nanorurkowe dorównują parametrom elektrycznym tranzystorów z krzemu amorficznego stosowanym w wyświetlaczach wielkopowierzchniowych. Najbardziej spektakularne osiągnięcie w tej dziedzinie zaprezentowano w 2013 r. kiedy to zespół z Uniwersytetu Stanforda wykorzystał szereg technik do wytworzenia funkcjonalnego układu scalonego bazującego na tranzystorach nanorurkowych. W toku badań udało im się syntezować techniką CVD nanorurki półprzewodnikowe ułożone anizotropowo na podłożu szafirowym, które następnie zostały przetransferowane na docelowe podłoże w celu domieszkowania części nanorurek na typ *n* i wytworzenia elektrod. Tym sposobem wytworzono układy CMOS, a z nich bramki NAND i NOR (rysunek 2). Dodatkowo opracowano technikę usuwania nanorurek metalicznych w układach wysokiej skali integracji. Wytworzony układ scalony pracuje z częstotliwością 1 kHz i realizuje cały zestaw instrukcji architektury MIPS.



Rysunek 2. Podłoże krzemowe zawierające mikroprocesory, w których jako kanał zastosowane są nanorurki węglowe [źródło: Uniwersytet Stanforda, Stanford School of Engineering]

W ślad za odkryciem nanorurek węglowych i szeregiem badań nad ich właściwościami, pojawiła się znacząca liczba zespołów badawczych pracujących nad otrzymaniem i charakterystyką grafenu. Wysoka ruchliwość nośników w grafenie zainspirowała wiele zespołów naukowych do

zbadania jego przydatności dla elektroniki cyfrowej, ze względu na możliwość wytworzenia układów o wysokich częstotliwościach przełączania. Jednak mimo znakomitych właściwości elektrycznych grafen nie odznacza się dobrymi właściwościami elektronicznymi, głównie poprzez brak przerwy energetycznej i ambipolarność. To ogranicza stosowanie tego materiału w budowie tranzystorów polowych. Z tego względu pierwotnym wyzwaniem stało się opracowanie metod kontrolowanego zwiększenia przerwy energetycznej w grafenie i od dekady w literaturze publikowane są doniesienia o próbach zrealizowania tego wyzwania, stosując funkcjonalizację wodorem, tlenem i fluorem, wytwarzając wstążki grafenowe, wprowadzając nieciągłości i pofałdowania. Na dzień dzisiejszy brak doniesień na temat wytworzenia funkcjonalnej struktury tranzystora grafenowego o parametrach zbliżonych lub przewyższających istniejące rozwiązanie półprzewodnikowe w zastosowaniach elektroniki cyfrowej. Oba materiały węglowe (nanorurki i grafen) są badane pod kątem zastosowań w analogowych układach elektronicznych, gdzie bariery występujące przy zastosowaniu w elektronice cyfrowej często nie stanowią problemu.

W zastosowaniach optoelektronicznych nanorurki węglowe oraz grafen mogą znaleźć swoje zastosowanie w detektorach i źródłach światła, oraz ogniwach fotowoltaicznych, jako transparentne elektrody. Badania skierowane są głównie na wykorzystanie wysokiej przewodności elektrycznej, wysokiej wytrzymałości mechanicznej i dobrych właściwości optycznych, do wytworzenia elastycznych elektrod transparentnych, jako alternatywy dla ITO w wyświetlaczach lub ogniwach fotowoltaicznych. Stosując tego rodzaju materiały uzyskuje się sprawności ogniw fotowoltaicznych i parametry pracy wyświetlaczy OLED, porównywalne do analogicznych struktur stosujących ITO, uzyskując dodatkowo wysoką elastyczność mechaniczną i odporność na warunki środowiskowe.

Elektronika drukowana bazująca na nanomateriałach węglowych

Zainteresowanie nanomateriałami węglowymi w zastosowaniach elektronicznych przekłada się bezpośrednio na wzrost produkcji tych materiałów, która wynosi obecnie kilka tysięcy ton rocznie w ujęciu światowym. Rozwój technik syntezy, oczyszczania i funkcjonalizacji pozwala już dzisiaj wdrażać nanomateriały węglowe w zastosowaniach wielkopowierzchniowej elektroniki z wykorzystaniem technik druku i powlekania. Parametry elektryczne uzyskiwane dla tego rodzaju urządzeń powoli dorównują istniejącym produktom elektronicznym, lecz wprowadzają nową funkcjonalność jak wysoka wytrzymałość mechaniczna czy możliwość nanoszenia technikami do wdrożenia. W ten sposób stają się nadchodzącą alternatywą, która wprowadzi zasadnicze zmiany na rynku urządzeń elektronicznych. Właśnie w zastosowaniu technik druku upatruje się największe możliwości do zmiany w produkcji układów elektronicznych, szczególnie w połączeniu z nanomateriałami. Wysoki potencjał i praktyczne możliwości zastosowania można potwierdzić przykładowymi rozwiązaniami jak chociażby drukowany tranzystor nanorurkowy wytworzony drukiem strumieniowym czy w pełni funkcjonalna etykieta RFID naniesiona drukiem zwojowym. Wysoki stopień zainteresowania zastosowaniem technik druku w nanoszeniu nanomateriałów został zasygnalizowany już na początku badań nad grafenem, kiedy to zespół Jang i Zhamu [2] wskazywał, że praktyczne zastosowanie grafenu w elektronice prawdopodobnie nie nastąpi wcześniej niż przed 2020 rokiem, ale znacznie wcześniej możemy spodziewać się urządzeń elektronicznych o wymaganej niższej wydajności, wytwarzanych technikami drukarskimi, co potwierdził zespół Novoselova [3]. Zasługą tego jest fakt, iż zawiesiny z nanomateriałami węglowymi przy zachowaniu odpowiedniej reologii, doskonale nadają się jako farby i pasty do

stosowania w technologii elektroniki drukowanej. Mimo, iż obecnie na rynku są dostępne alternatywne materiały do wytwarzania układów elektronicznych technikami poligraficznymi, jak polimery przewodzące czy polimerowe kompozycje węglowe lub srebrowe, to pod wieloma względami analogiczne materiały zawierające fazę funkcjonalną w postaci nanorurek węglowych czy płatków grafenowych pozwalają na uzyskanie lepszych właściwości materiałowych i parametrów elektronicznych, lub pozwalają na uzyskanie układów o podobnych parametrach, ale z zastosowaniem znacznie tańszych materiałów. Dodatkowo stosując materiały węglowe jesteśmy w stanie wytworzyć układy elektroniczne, które można poddać recydingowi, utylizacji w procesie spalania, lub nawet wytworzyć materiały biodegradowalne przyjazne środowisku.

Znakomita część prac naukowych opisująca zastosowanie nanomateriałów węglowych dotyczy wytwarzania zawiesin i kompozytów polimerowych z ich udziałem. W większości badania te są prowadzone pod kątem kompozytów z nanorurkami węglowymi, co jest związane z dużo większym doświadczeniem w pracy z tym materiałem. Jednak liczba publikacji odnoszących się do kompozytów z płatkami grafenowymi ciągle rośnie. Głównym problemem przy efektywnym zastosowaniu tych materiałów jest uzyskanie ich jednorodnej dyspersji w osnowach polimerowych. W większości wypadków nie jest możliwe przeniesienie tych samych metod dyspersji, które do tej pory stosowane były przy klasycznych wypełniaczach sferycznych czy włóknistych o rozmiarach mikrometrowych, ze względu na znacznie większy współczynnik kształtu (ponad 1000) i wynikającą z tego rozbudowaną powierzchnię właściwą. Poza tym, nanomateriały w postaci proszków są mocno zaglomerowane i nie jest łatwo rozbić wiązania pomiędzy nanocząstkami. Mieszanie nanocząstek w roztworach i zawiesinach jest najbardziej rozpowszechnioną metodą wytwarzania nanokompozytów, doskonale dostosowaną do wymogów technologii elektroniki drukowanej. Typowy proces mieszania zawiesin przebiega w kilku etapach, z których dwa występują zawsze: dyspersja nanomateriałów w rozpuszczalniku (np. ultradźwiękowo) i mieszanie z osnową polimerową w postaci cieczy o niskiej lub średniej lepkości (np. ucieranie lub mieszanie magnetyczne). Dodatkowo mogą być wprowadzane procesy pośredniego mieszania lub dodawania środków powierzchniowo czynnych. Wpływ składu past i atramentów elektronicznych w zależności od rodzaju i zawartości fazy funkcjonalnej oraz zastosowanych środków dyspergujących był przedmiotem prac badawczych prowadzonych z moim udziałem [23], [24]. W wyniku tych prac zaobserwowano znaczący wpływ zawartości płatków grafenowych na lepkość past, który szczególnie widoczny jest przy niskich prędkościach ścinania (typowych dla sitodruku). Podobnie duży wpływ ma zastosowanie środków dyspergujących, których dodatek obniża lepkość past o ponad 60 %, tak samo jak zastosowanie różnych nośników polimerowych.

Zawiesiny z nanomateriałami węglowymi są doskonałym materiałem do tworzenia warstwowych urządzeń elektronicznych. W literaturze można znaleźć wiele odnośników dotyczących wytwarzania elementów elektronicznych z nanomateriałów węglowych techniką powlekania zanurzeniowego, budowania układów warstwowych techniką warstwową Langmuira-Blodgetta, z wykorzystaniem zjawisk na granicy ciecz-gaz, przez osadzanie na filtrach, czy powlekania wirowego, a także techniką dielektroforezy. Mimo, iż wytworzenie w ten sposób struktur elektronicznych nie jest skomplikowane, to nie zapewnia wysokiej wydajności w produkcji masowej. Nie wykorzystuje się w ten sposób jednej z podstawowych cech nanomateriałów, jaką jest możliwość wytwarzania zawiesin o parametrach dostosowanych do szerokiej gamy technik

drukarskich, umożliwiających produkcję z dużą wydajnością seryjną, a także pokrywanie wielkich powierzchni podłoży. Dodatkowo zastosowanie technik addytywnych (czyli druku) pozwala uniknąć nadmiernych strat materiału i odpadów oraz zanieczyszczeń, co prowadzi do znacznej redukcji kosztów produkcji. Wśród opisanych technik drukarskich najczęściej stosowane są: techniki bezkontaktowe druku strumieniowego i nowoczesna technika selektywnego druku aerozolowego; kontaktowa technika sitodruku, najbardziej rozpowszechniona w technologii obwodów grubowarstwowych; techniki druku kontaktowego i transferowego, takie jak grawiura czy fleksografia. W literaturze opisane są próby wytworzenia m.in.: pojedynczych tranzystorów, bramek NAND, NOT, NOR, oscylatorów pierścieniowych, sumatorów cyfrowych, przerzutników typu D, etykiet RFID, aktuatorów, superkondensatorów, czujników wilgoci i innych rozwiązań. W dorobku autora znajdują się opracowania drukowanych warstw rezystywnych, elektrod transparentnych, struktur elektroluminescencyjnych, ogniw fotowoltaicznych, czujników wielkości fizycznych i chemicznych oraz warstw i ścieżek do zastosowań elektroniki wysokich częstotliwości i grzałek, wytworzone z zastosowaniem technik sitodruku, druku strumieniowego, powlekania natryskowego, z zastosowaniem nanorurek węglowych, płatków grafenowych i ich mieszanin.

Jednym z najważniejszych elementów układów elektronicznych jest tranzystor i z tego względu wytworzenie drukowanych tranzystorów jest kluczowym wyzwaniem, jakie jest podejmowane przez wiele zespołów naukowych pracujących w dziedzinie elektroniki drukowanej. W przypadku tranzystorów najważniejsze parametry opisujące ich wydajność to ruchliwość nośników ładunku oraz współczynnik przełączenia. Wartości ruchliwości nośników uzyskiwane dla drukowanych tranzystorów są ciągle niższe niż dla analogicznych rozwiązań na krzemie amorficznym i osiągają $157 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ dla tranzystorów nanorurkowych drukowanych z zastosowaniem fleksografii i typografii. Mniejsze wartości ruchliwości nośników ($46 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$) przy współczynniku przełączenia 10^5 uzyskano dla tranzystorów drukowanych techniką druku aerozolowego z nanorurek węglowych. Technika druku strumieniowego została zastosowana do wytworzenia tranzystorów z nanorurek węglowych o ruchliwości nośników dochodzącej do $90 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, a dla tranzystorów z płatków grafenowych do $95 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ przy współczynnikach przełączenia rzędu 10^5 w obu wypadkach.

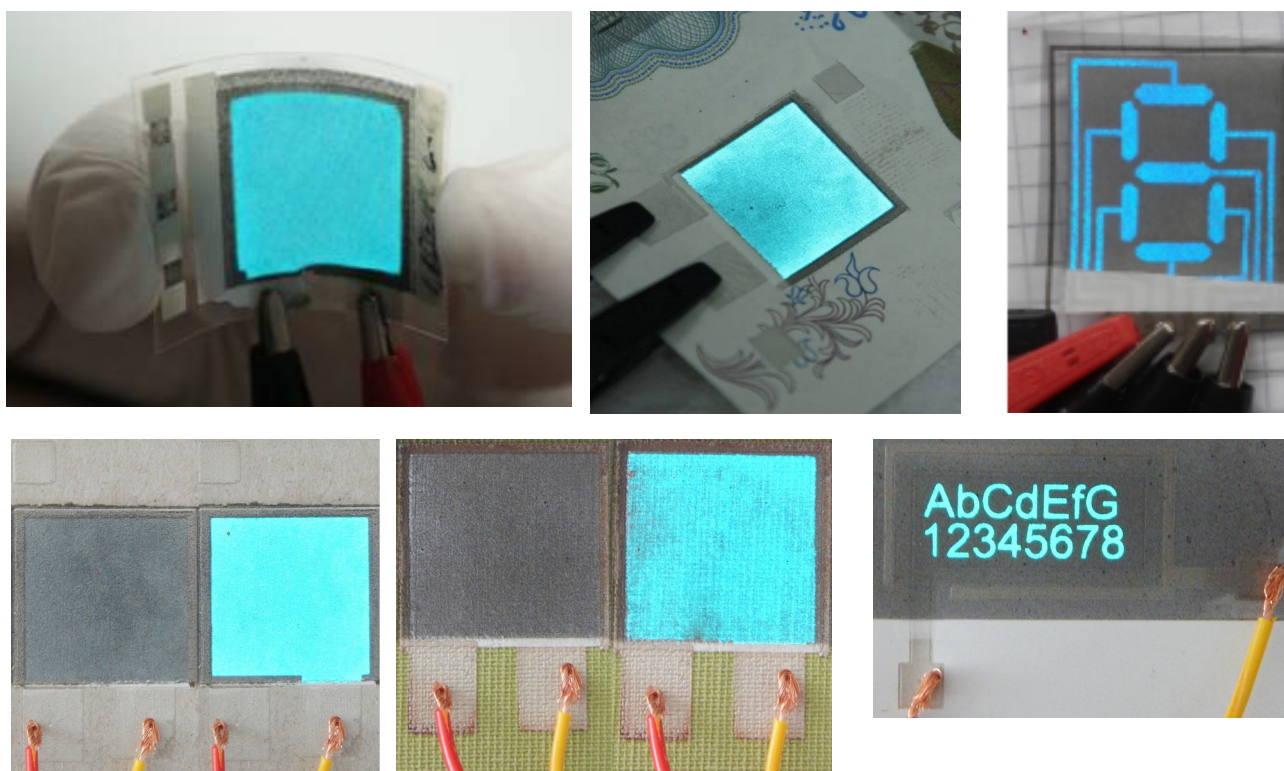
Innym ważnym obszarem zastosowań nanomateriałów węglowych są drukowane elektrody transparentne. Aby uzyskać jak najniższą rezystancję i jak najwyższą transmitancję konieczne jest zastosowanie nanorurek o jak największej długości i jak najwyższym współczynniku kształtu. Pozwoli to na wytworzenie dużej liczby połączeń między nanorurkami, a więc niską rezystancję, bez konieczności używania dużej ilości materiału blokującego światło. Również wysoki stopień dyspersji zapewnia wytworzenie dużej liczby ścieżek przewodzących i uzyskanie niskiej rezystancji. Jeżeli dyspersja nie będzie wysoka, to w warstwie będą występować aglomeraty nanocząstek, które nie przyczyniają się w znaczący sposób do tworzenia ścieżek przewodnictwa, ale skutecznie blokują transmisję światła przez warstwę. Zjawisko to występuje szczególnie dla nanocząstek o małym współczynniku kształtu, które łatwiej aglomerują i są trudniejsze do rozproszenia niż cząstki o większych wymiarach, co zostało zaobserwowane w badaniach prowadzonych z moim udziałem, dotyczących rozkładu powierzchniowej transmitancji optycznej warstw zawierające płatki grafenowe o różnej średnicy [25]. Zaobserwowano, że płatki o mniejszych średnicach tworzą aglomeraty wpływające negatywnie na sumaryczną wartość transmitancji na określonej powierzchni warstw.

Dla łatwiejszego porównania różnych rodzajów elektrod transparentnych stosuje się współczynnik dobroci (z ang. *figure-of-merit*, FOM), pozwalający na powiązanie parametrów rezystancji powierzchniowej warstwy R_s i transmitancji optycznej T , wzorem:

$$FOM = \frac{\sigma_{DC}}{\sigma_{OP}} = \frac{188,5}{R_s \left(\frac{1}{\sqrt{T}} - 1 \right)} \quad (1)$$

Minimalne wymogi dla elektrod transparentnych $100 \Omega/\square$ i 90 % mogą być w tym wypadku zapisane jako $FOM > 35$, a dla ITO stosowanego w przemyśle wartości FOM są z reguły w zakresie $35 \div 260$. W przypadku warstw drukowanych mamy do czynienia z wyższą rezystancją i niższą transmitancją niż dla monowarstwy grafenu. Wysoka wartość rezystancji warstw kompozytowych z nanocząstkami węgla wynika z występowania dużej liczby cząstek i ich aglomeratów nieuczestniczących efektywnie w tworzeniu ścieżek przewodnictwa, a wpływających negatywnie na właściwości optyczne. Technika natrysku wytworzyła elektrody transparentne z nanorurek węglowych o wartościach FOM 35 nanoszone na PET i poddane obróbce kwasami oraz FOM 24 i 28 dla elektrod nanoszonych natryskiem na folie polimerowe i suszonych, a także FOM 64 dla elektrod z jednościennych nanorurek węglowych otrzymanych techniką odfiltrowania.

W moim dorobku i zespołów z którymi współpracuję, również znajdują się badania nad opracowaniem drukowanych elektrod transparentnych, zawierających nanorurki węglowe, płatki grafenowe i ich mieszaniny, wykorzystane przy otrzymaniu w pełni drukowanych struktur elektroluminescencyjnych [4]–[8]. Wybrane demonstratory przedstawione są na rysunku 3.



Rysunek 3. Przykłady struktur elektroluminescencyjnych wykonanych w całości technikami druku, z zastosowaniem elektrod transparentnych z nanorurek węglowych i płatek grafenowych nanoszonych natryskiem, wykonane na podłożach: folia PET (GNP), papier banknotowy (CNT+GNP), tektura (CNT), tkanina impregnowana (CNT), folia PC (CNT+GNP).

Właściwości elektroniczne nanorurek węglowych sprawiają, że są one doskonałym materiałem do budowy czujników elektrochemicznych, wrażliwych na czynniki chemiczne i substancje biologiczne. Najprostszym rodzajem czujnika jest rezystor, w którym wartość rezystancji zależy od molekuł zaadsorbowanych na powierzchni nanorurek węglowych, szczególnie w miejscach defektów. Pomiar pojemności w układzie, w którym jedną okładką czujnika jest warstwa nanomateriałów, wskazują na zmiany wynikające ze zmian kwantowej pojemności nanorurki węglowej związanej z przesunięciem poziomu Fermiego (zmiana ładunku molekuly), a także mogą być wynikiem zmian w ośrodku dielektrycznym wokół nanorurki. Dodatkowym sposobem na zwiększenie czułości jest funkcjonalizacja powierzchni nanorurek węglowych odpowiednimi receptorami wrażliwymi na wybrane związki, np. dekorowanie palladem zwiększa poziom detekcji wodoru. Biomolekuły takie jak DNA i białka mogą przyczepiać się na powierzchni nanorurek węglowych zmieniając przewodnictwo, ale także występując jako próbniki mogą wchodzić w reakcję ze zgodnymi z nimi molekułami, np. reakcję antygeny z przeciwciałami. Pozwala to na uzyskanie czułości na poziomie piko-, a nawet femtomolowym w czujnikach z funkcjonalizowanymi kanałami tranzystorów cienkowarstwowych. Wśród czujników tego rodzaju można wymienić sitodrukowane czujniki do wykrywania oksydazy glukozowej, czujniki wilgoci nanoszonych techniką powlekania natryskowego i druku strumieniowego z nanorurek węglowych, drukowany grawiurą czujnik z zredukowanego tlenku grafenu modyfikowanego grupami SO_3H i nanocząstkami srebra do wykrywania niskich stężeń NO_2 , czy czujnik NH_3 z kompozytu grafenu i PEDOT:PSS, nadrukowany fabryczną drukarką strumieniową HP DeskJet 2000 i podobne rozwiązanie do pomiaru stężenia salbutamolu. Jednym z elementów moich badań były pasty z płatkami grafenowymi zastosowane do wytworzenia elektrod w czujnikach biochemicznych [14]. Substancją czułą naniesioną na elektrodę grafenową było H_2O_2 . Badano stężenie glukozy w zakresie od 0 do 30 $\mu\text{M/L}$, w aplikowanym czynniku którym był roztwór o składzie zbliżonym do ludzkich łez. Wśród doniesień literaturowych znajdziemy również opisy otrzymywania czujników natężenia oświetlenia (fotorezystor) drukowane strumieniowo z kompozytów grafen-perylen i nanorurki-CdTe, oraz czujniki na bazie MoS_2 z elektrodami grafenowymi. Wśród opisów znajdziemy również opracowania czujników wielkości fizycznych, takich jak naprężenia, nacisk czy temperatura. Jedno z nich opisuje zastosowanie technik druku warstw grafenowych w celu wytworzenia czujników odkształceń w zastosowaniach tekstronicznych jako rękawica monitorująca ruch dłoni. Kolejne dotyczy sitodrukowanego czujnika nacisku, w którym utworzono strukturę o rozwiniętej powierzchni stosując technikę grawerowania laserowego. Technika sitodruku wytworzono również czujniki temperatury zastosowane w rozwiązaniach tzw. „inteligentnego bandaża”, czy wyniki opisane w mojej rozprawie doktorskiej dotyczące czujników temperatury do zastosowań tekstronicznych, sitodrukowanych i nanoszonych na włókna tkanin. W moim dorobku znajdują się również doniesienia dotyczące opracowania w pełni sitodrukowanych czujników nacisku wykorzystujących zjawisko zmiennej rezystancji kontaktowej z zastosowaniem płatków grafenowych i nanorurek węglowych [13].

Poza wymienionymi specjalnymi rozwiązaniami elektronicznymi jak tranzystory, elektrody transparentne czy czujniki, nanomateriały węglowe znajdują wiele innych zastosowań w rozwiązaniach elektrycznych czy w energetyce. Przykładem takich rozwiązań są warstwy grzejne, warstwy antyelektrostatyczne, ekrany elektromagnetyczne czy elektrody superkondensatorów i ogniw elektrochemicznych o rozwiniętej powierzchni. W porównaniu do stosowanych powszechnie

grzałek niklowo-chromowych (także złotych, platynowych i chromowych), grzałki z nanorurek węglowych wymagają znacznie niższych mocy do uzyskania tych samych temperatur, co związane jest z niewielką pojemnością cieplną. Model dystrybucji ciepła w warstwie grafenowej wraz z odmiennym mechanizmem transferu ciepła niż ma to miejsce w warstwach metalicznych tłumaczy uzyskiwanie wyższych temperatur przy tych samych mocach zasilania. Dodatkowo z powodzeniem zademonstrowano grzałki transparentne, osiągające wartości transmitancji optycznej ponad 90%, a także drukowane aktuatory termo-bimorficzne pracujące z częstotliwością 30 Hz. Także w moim dorobku opisuję drukowane warstwy z nanorurkami węglowymi i nanowłóknami węglowymi, nadrukowane na podłoża polimerowe i ceramikę Al_2O_3 , pod kątem zastosowania jako elementy grzejne i w układach wysokiej mocy [16]. Innym zastosowaniem warstw przewodzących są powłoki antyelektrostatyczne, a także ekrany i absorbery promieniowania elektromagnetycznego, potrzebne w wielu rozwiązaniach elektrycznych i elektronicznych takich jak obudowy komputerów, części samochodowe czy samolotowe. W moim dorobku znajdują się prace nad tego rodzaju strukturami przeznaczonymi do ochrony statków powietrznych, ograniczenia niepowołanego dostępu w komunikacji bezprzewodowej i klasycznych obudów elektroniki, drukowane z kompozytów polimerowych wypełnionych płatkami grafenowymi [26]. Ostatnim opisywanym w książce obszarem zastosowań nanomateriałów w elektronice drukowanej jest obszar zastosowań energetycznych, jak superkondensatory i ogniwa elektrochemiczne, paliwowe, fotowoltaiczne. W tym obszarze również uczestniczyłem w badaniach nad wytworzeniem warstw natryskiwanych z nanorurek węglowych, które mogą zastąpić katalityczne elektrody platynowe w fotowoltaicznych ogniwach barwnikowych [9].

5.3 Podsumowanie wyników opisywanych w pracy, ocena możliwości ich wykorzystania oraz kierunki rozwoju

Zawarta w monografii analiza wybranych zagadnień z kręgu zastosowania nanomateriałów węglowych w technologii elektroniki drukowanej pokazuje bogate spektrum potencjalnych praktycznych rozwiązań w elektronice, które bezpośrednio wywodzą się z wyjątkowych właściwości fizycznych tych nanomateriałów. Opracowanie technologii masowej produkcji drukowanego tranzystora o parametrach zbliżonych do obecnie stosowanych tranzystorów z krzemu amorficznego, czy osiągnięcie wymagań stawianych elektrodom transparentnym do wielu zastosowaniach elektronicznych i energetycznych, wpłynie w istotny sposób na zmianę podejścia do procesów produkcyjnych popularnych urządzeń elektronicznych jak wyświetlacze, drukowane etykiety, czujniki biochemiczne czy ogniwa fotowoltaiczne. Parametry pracy i parametry technologiczne elementów i urządzeń elektronicznych opisane w monografii, często podlegają wielu ograniczeniom, które należy rozwiązać, aby możliwe było ich pełne wprowadzenie do masowej produkcji. Dodatkowo, uzyskane parametry elementów mogą być zaadaptowane do innych rozwiązań niż tylko płaskie, drukowane układy elektroniczne. Te i inne zagadnienia są wyzwaniem stawianymi obecnej nauce i technologii.

W monografii przedstawione są również proponowane kierunki rozwoju technologii nanomateriałów węglowych w zastosowaniach elektroniki drukowanej. Opisane są również poruszane w literaturze sposoby eliminacji wymienionych ograniczeń w wydajności pracy układów elektronicznych. Poruszone są również aspekty rozwoju zupełnie nowych gałęzi badawczych, pokrewnych elektronice drukowanej. Wymieniono i opisano wyniki prac nad wytworzeniem

nanomateriałów dla elektroniki elastycznej i rozciągliwej, gdzie istotne jest utrzymywanie stałych parametrów elektrycznych przy zmiennych czynnikach mechanicznych. Przedstawiono kierunki rozwoju z dwuwymiarowych układów drukowanych do trójwymiarowej elektroniki strukturalnej, wytwarzanej technikami przyrostowymi (drukem 3D). Przedstawiono wyniki prac nad poprawieniem parametrów elektrycznych układów drukowanych na tanich podłożach niskotemperaturowych jak papier lub folie polimerowe, stosowanych w produkcji wielkoskalowej. Na koniec opisano rozwiązania układów drukowanych na podłożach tekstylnych i rozwiązania dla elektroniki osobistej, między innymi w rozwiązaniach elastycznych superkondensatorów oraz czujników. Obecne prace badawcze w prowadzonym przeze mnie projekcie „Functional heterophase materials for structural electronics” finansowanym przez Fundację na rzecz Nauki Polskiej, dotyczą opracowania materiałów i technik do wytwarzania technikami przyrostowymi przestrzennych obwodów i elementów elektronicznych.

6. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych (artystycznych).

W trakcie mojego rozwoju naukowego, związanego z Politechniką Warszawską, oraz do 2017r. z Instytutem Technologii Materiałów Elektronicznych w Warszawie, byłem autorem i współautorem ponad 40 publikacji międzynarodowych i krajowych oraz podobnej liczby materiałów i wystąpień konferencyjnych. Poza pracami opisanymi wyżej w zakresie zastosowania nanomateriałów węglowych w elektronice, prowadziłem szerokie badania również w innych obszarach.

Najważniejszym z nich jest realizacja dwóch projektów badawczo-rozwojowych, dotyczących zastosowania nanoproszków srebra w elektronice i elektroenergetyce, w których występowałem w roli koordynatora zadań od strony Politechniki Warszawskiej: Nowa generacja past opartych na nanoproszkach srebra do zastosowań w elektronice, NCBiR 02-0088-10/2011 (2011–2013); Pasty na bazie nanoproszków srebra do zastosowań w elektronice i elektroenergetyce, NCBiR UOD-DEM-1-215/001 (2014–2016). Efektem tych projektów jest opracowana technologia syntezy nanoproszków srebra, przygotowania past i atramentów, oraz dostosowana technologia druku i powlekania, stosowana głównie do wytwarzania powłok srebrowych na kontaktach aluminiowych w elektroenergetyce. Od 2014r. materiały te są dostępne pod handlową nazwą „SilverCon” przez firmę Helioenergia, partnera w projektach. Rozwiązanie zaprezentowałem podczas Polsko-Amerykańskiego Tygodnia Innowacji (Los Angeles, San Francisco) w 2014r.

W kolejnym projekcie, który realizowałem w latach 2012-2013 „Naukowcy dla Gospodarki Mazowska”, zajmowałem się analizą wdrożenia produkcji elektroniki drukowanej w przedsiębiorstwach poligraficznych na terenie Mazowsza, a także analizą śladu węglowego związanego z produkcją urządzeń elektrycznych i elektronicznych. Rezultatem tych prac jest prezentacja na konferencji ELTE 2013, trzy publikacje naukowe (Proc. SPIE 8902, Acta Innovations, Acta Poligraphica) oraz narzędzie informatyczne do obliczania śladu węglowego urządzeń elektrycznych i elektronicznych, dostępne bezpłatnie na stronie projektu. Powiązane z tą tematyką było opracowanie w 2016r. analizy środowiskowej (ekologicznej) polegającej na symulacji kosztów ekologicznych inwestycji infrastruktury sieciowej oraz systemu dynamicznego zarządzania zdolnościami przesyłowymi (SDZP) z uwzględnieniem śladu węglowego obu rozwiązań oraz 10-letniego okresu eksploatacji. Analiza przygotowana została na potrzeby projektu „Dynamiczne zarządzanie zdolnościami przesyłowymi sieci elektroenergetycznych przy wykorzystaniu innowacyjnych technik pomiarowych”, NCBiR/NFOŚ – GEKON.

We współpracy z krajowymi partnerami Dekorglass S.A. i Dekorplastics Sp. z o.o. w 2015r. brałem udział w testach wdrożeniowych związanych z opracowaniem procesu technologicznego wytwarzania drukowanych struktur elektroluminescencyjnych na niepłaskich podłożach szklanych, z wykorzystaniem przemysłowej linii technologicznej. Celem było zwiększenie funkcjonalności opakowań. W efekcie otrzymano kilka demonstratorów butelek z nadrukowanymi świecącymi wzorami, co potwierdziło możliwość wdrożenia tego rozwiązania na skalę masową. W trakcie innych badań zleconych przez Centralny Instytut Ochrony Pracy - Państwowy Instytut Badawczy w latach 2014 i 2016, przeprowadziłem serię testów związaną z wytworzenie elastycznych ścieżek przewodzących nanoszonych sitodrukiem na podłoża tekstylne do zastosowań tekstronicznych. W wyniku badań przetestowano różne rodzaje past przewodzących na bazie srebra, nanorurek węglowych i grafenu, naniesione na szereg tkanin dostarczonych przez CIOP-PIB, oraz przeprowadzono pomiary rezystancji ścieżek, testy obciążalności prądowej, a także badano wytrzymałość na zginanie i zmianę parametrów elektrycznych w tych warunkach. Podobny rodzaj współpracy razem z Instytutem Energetyki prowadzony był w 2014r. pod kątem opracowania materiałów i wytworzenia drukowanych powłok na płytkach elektrod stosowanych w stosach ogniw paliwowych. Dzięki zastosowaniu techniki sitodruku do nanoszenia warstw tlenkowych, udało się uzyskać wysoką jednorodność powłok, co poprawiło parametry pracy ogniwa i jego trwałość.

Obecnie prowadzone są rozmowy dotyczące współpracy, oraz przygotowywania wspólnych wniosków na finansowanie badań, z krajowym partnerem CL-Digital na temat opracowania autorskiej drukarki i zestawu materiałów dla elektroniki drukowanej, oraz z niemieckim przedsiębiorstwem KOB odnośnie opracowania rozwiązań tzw. „inteligentnego opatrunku”.

W 2012r. uczestniczyłem w stażu naukowym na Uniwersytecie Stanforda w ramach programu MNiSW „Top500 Innovators”, w trakcie którego odbyłem staż w firmie KLA Tencor, gdzie na zlecenie przygotowałem analizę zastosowania niskotemperaturowych technik montażu elektronicznego alternatywnych dla procesu lutowania, pozwalających na montaż matryc „zwierciadeł elektronowych” w opracowywanym urządzeniu do elektrolitonografii - Reflective Electron Beam Lithography (REBL). W 2016r. uczestniczyłem w programie „Leadership Academy for Poland”, dotyczącym promowania i stosowania przywództwa dla rozwoju społeczeństwa na różnych płaszczyznach (także edukacji i nauki), w efekcie którego nawiązałem współpracę z prof. Cezarym Wójcikiem ze Szkoły Głównej Handlowej i prof. Ronaldem Heifetzem z Uniwersytetu Harvarda, i przygotowuję podrozdział opracowania naukowego „A Theoretical Framework for the Practice of Public Leadership: A Theory of Leadership in Government”.

7. Bibliografia

- [1] **M. Słoma**, M. Jakubowska, ‘Screen Printed Polymer Paste with Carbon Nanotubes for Printed Electronics Applications’, in *Thick films: properties, technology, and applications*, M. I. Panzini, Ed. New York: Nova Science Publishers, 2012.
- [2] B. Z. Jang, A. Zhamu, ‘Processing of nanographene platelets (NGPs) and NGP nanocomposites: a review’, *Journal of Materials Science*, vol. 43, no. 15, pp. 5092–5101, 2008.
- [3] A. C. Ferrari, F. Bonaccorso, V. Fal’ko, K. S. Novoselov, i inni, ‘Science and technology roadmap for graphene, related two-dimensional crystals, and hybrid systems’, *Nanoscale*, vol. 7, no. 11, pp. 4598–4810, 2015.

- [4] **M. Słoma**, G. Wróblewski, D. Janczak, M. Jakubowska, ‘Transparent electrodes with nanotubes and graphene for printed optoelectronic applications’, *Journal of Nanomaterials*, vol. 2014, p. 17, 01 2014.
- [5] **M. Słoma**, D. Janczak, G. Wroblewski, A. Mlozniak, M. Jakubowska, ‘Electroluminescent structures printed on paper and textile elastic substrates’, *Circuit World*, vol. 40, no. 1, pp. 13–16, 2014.
- [6] G. Wróblewski, **M. Słoma**, D. Janczak, A. Mložniak, M. Jakubowska, ‘Influence of carbon nanoparticles morphology on physical properties of polymer composites’, *Acta Physica Polonica A*, vol. 125, no. 4, pp. 861–863, 2014.
- [7] G. Wroblewski, **M. Słoma**, D. Janczak, M. Jakubowska, ‘Influence of electric field on separation and orientation of carbon nanotubes in spray coated layers’, *Circuit World*, vol. 41, no. 3, pp. 107–111, 08 2015.
- [8] M. Sibiński, K. Znajdek, S. Walczak, **M. Słoma**, M. Górski, A. Cenian, ‘Comparison of ZnO:Al, ITO and carbon nanotube transparent conductive layers in flexible solar cells applications’, *Materials Science and Engineering: B*, vol. 177, no. 15, pp. 1292–1298, 09 2012.
- [9] K. Siuzdak, M. Klein, M. Sawczak, G. Wróblewski, **M. Słoma**, M. Jakubowska, A. Cenian, ‘Spray-deposited carbon-nanotube counter-electrodes for dye-sensitized solar cells’, *Physica Status Solidi (a)*, vol. 213, no. 5, pp. 1157–1164, 05 2016.
- [10] A. H. Alshehri, M. Jakubowska, **M. Słoma**, M. Horaczek, D. Rudka, C. Free, J. David Carey, ‘Electrical performance of carbon nanotube-polymer composites at frequencies up to 220 GHz’, *Applied Physics Letters*, vol. 99, no. 15, p. 153109, 2011.
- [11] P. Kopyt, B. Salski, P. Zagrajek, D. Janczak, **M. Słoma**, M. Jakubowska, M. Olszewska-Placha, W. Gwarek, ‘Electric Properties of Graphene-Based Conductive Layers from DC Up To Terahertz Range’, *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 6, no. 3, pp. 480–490, 05 2016.
- [12] P. Kopyt, B. Salski, M. Olszewska-Placha, D. Janczak, **M. Słoma**, T. Kurkus, M. Jakubowska, W. Gwarek, ‘Graphene-Based Dipole Antenna for a UHF RFID Tag’, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, no. 7, pp. 2862–2868, 07 2016.
- [13] D. Janczak, **M. Słoma**, G. Wróblewski, A. Mložniak, M. Jakubowska, ‘Screen-printed resistive pressure sensors containing graphene nanoplatelets and carbon nanotubes’, *Sensors*, vol. 14, no. 9, pp. 17304–17312, 2014.
- [14] A. Peplowski, D. Janczak, G. Wróblewski, **M. Słoma**, L. Górski, E. Malinowska, T. Palko, M. Jakubowska, ‘Graphene electrodes for voltammetric measurements in biological fluids’, *Circuit World*, vol. 41, no. 3, pp. 112–115, 2015.
- [15] Ł. Dybowska-Sarapuk, S. Rumiński, G. Wróblewski, **M. Słoma**, A. Mložniak, I. Kalaszczyńska, M. Lewandowska-Szumieł, M. Jakubowska, ‘Aqueous biological graphene based formulations for ink-jet printing’, *Polish Journal of Chemical Technology*, vol. 18, no. 2, 01 2016.
- [16] **M. Słoma**, M. Jakubowska, J. Szalatkiewicz, ‘Influence of electrical stress on printed polymer resistors filled with carbon nanomaterials’, *Materials Science-Poland*, vol. 31, no. 4, pp. 548–554, 2013.
- [17] B. Bajorowicz, J. Reszczyńska, W. Lisowski, T. Klimczuk, M. Winiarski, **M. Słoma**, A. Zaleska-Medynska, ‘Perovskite-type KTaO_3 -reduced graphene oxide hybrid with improved visible light photocatalytic activity’, *RSC Advances*, vol. 5, no. 111, pp. 91315–91325, 2015.
- [18] K. Bukat, J. Sitek, M. Koscielski, M. Jakubowska, **M. Słoma**, A. Mložniak, W. Niedzwiedz, ‘SAC 305 solder paste with carbon nanotubes-part I: investigation of the influence of the carbon nanotubes on the SAC solder paste properties’, *Soldering & Surface Mount Technology*, vol. 24, no. 4, pp. 267–279, 2012.
- [19] M. Nelo, **M. Słoma**, J. Kelloniemi, J. Puustinen, T. Saikkonen, J. Juuti, J. Häkkinen, M. Jakubowska, H. Jantunen, ‘Inkjet-Printed Memristor: Printing Process Development’, *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 52, no. 5S1, p. 05DB21, 2013.

- [20] O. Gbotemi, S. Myllymaki, J. Juuti, M. Teirikangas, H. Jantunen, M. Macek, D. Suvorov, **M. Słoma**, M. Jakubowska, ‘Microwave Characterization of Printed Inductors With Ferrimagnetic BaFe₁₂O₁₉ Composite Layers’, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 53, no. 2, pp. 1–6, 02 2017.
- [21] S. Myllymäki, M. Maček Kržmanc, **M. Słoma**, J. Juuti, M. Nelo, M. Teirikangas, M. Jakubowska, D. Suvorov, H. Jantunen, ‘Microwave properties of sphere-, flake-, and disc-shaped BaFe₁₂O₁₉ nanoparticle inks for high-frequency applications on printed electronics’, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 419, pp. 218–224, 12 2016.
- [22] S. Myllymaki, M. Teirikangas, M. Nelo, J. Tulppo, M. Sobociński, J. Juuti, H. Jantunen, **M. Słoma**, M. Jakubowska, ‘Radio Frequency Characteristics of Printed Meander Inductors and Interdigital Capacitors’, *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 52, no. 5S1, p. 05DC08, 2013.
- [23] Ł. Dybowska-Sarapuk, J. Szałapak, G. Wróblewski, I. Wyżkiewicz, **M. Słoma**, M. Jakubowska, ‘Rheology of inks for various techniques of printed electronics’, in *Advanced Mechatronics Solutions*, vol. 393, R. Jabłoński, T. Brezina, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 447–451.
- [24] Ł. Dybowska-Sarapuk, D. Janczak, G. Wróblewski, **M. Słoma**, M. Jakubowska, ‘The influence of graphene screen printing paste’s composition on its viscosity’, in *XXXVI Symposium on Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*, 2015, p. 966242.
- [25] Z. Lorenc, S. Tomczewski, A. Pakula, **M. Słoma**, G. Wroblewski, L. Salbut, M. Jakubowska, ‘Simple optical method for recognizing physical parameters of graphene nanoplatelets materials’, in *Proc. SPIE 9662, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2015*, Wilga, 2015, p. 96624R.
- [26] M. Olszewska-Placha, B. Salski, W. Gwarek, M. Jakubowska, D. Janczak, **M. Słoma**, ‘Wideband and thin microwave absorber with inhomogeneous resistive sheet made of ink with graphene nanoplatelets’, presented at the Microwave Materials and Their Applications 2014 (MMA 2014), Boise, USA, 01-06-2014.