

1. **Imię i Nazwisko:** Robert Mroczyński
2. **Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej**

Czerwiec 2008 doktor nauk technicznych, dyscyplina: elektronika, tytuł rozprawy: *Chemiczne osadzanie z fazy lotnej wspomagane plazmą (PECVD) jako metoda wytwarzania ultracienkich warstw tlenko-azotków krzemu dla technologii CMOS-ULSI*, Politechnika Warszawska

Wrzesień 2003 magister inżynier, specjalność: mikroelektronika, Politechnika Warszawska

Marzec 2002 inżynier, specjalność: mikroelektronika, Politechnika Warszawska

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

Październik 2008 – obecnie Adiunkt, Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych, Politechnika Warszawska

Październik 2011 – Kwiecień 2012 Visiting Assistant Research Scientist, Department of Electrical Engineering and Computer Science, University of Michigan (USA)

Październik 2007 – Wrzesień 2008 Asystent, Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych, Politechnika Warszawska

Październik 2007 – Czerwiec 2008 Inżynier, Instytut Technologii Elektronowej, Warszawa (oddz. w Piasecznie)

4. **Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.):**

A) Tytuł osiągnięcia naukowego/artystycznego

Jako „osiągnięcie naukowe uzyskane po otrzymaniu stopnia doktora stanowiące znaczący wkład autora w rozwój określonej dyscypliny naukowej” wskazuję **jednotematyczny cykl publikacji** pod zbiorczym tytułem „**Technologia i charakteryzacja warstw dielektrycznych o podwyższonej wartości przenikalności elektrycznej ($\epsilon_r > 3.9$) dla zaawansowanych przyrządów półprzewodnikowych**”.

B) Wykaz wybranego cyklu publikacji

Publikacje w czasopismach indeksowanych w bazie ISI JCR (9):

- [1] **Mroczyński, R.**, Kwietniewski, N., Ćwil, M., Hoffmann, P., Beck, R.B., Jakubowski, A., *Improvement of electro-physical properties of ultra-thin PECVD silicon oxynitride layers by high-temperature annealing*, (2008) *Vacuum*, 82 (10), pp. 1013-1019.
- [2] **Mroczyński, R.**, Beck, R.B., *Application of plasma enhanced chemical vapor deposition silicon oxynitride layers in nonvolatile semiconductor memory devices*, (2009) *Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 27 (1), pp. 494-497.
- [3] **Mroczyński, R.**, Beck, R.B., *Reliability issues of double gate dielectric stacks based on hafnium dioxide (HfO₂) layers for non-volatile semiconductor memory (NVSM) applications*, (2012) *Microelectronics Reliability*, 52 (1), pp. 107-111.
- [4] **Mroczyński, R.**, Taube, A., Gieraltowska, S., Guziewicz, E., Godlewski, M., *Application of deposited by ALD HfO₂ and Al₂O₃ layers in double-gate dielectric stacks for non-volatile semiconductor memory (NVSM) devices*, (2012) *Applied Surface Science*, 258 (21), pp. 8366-8370.
- [5] Taube, A., **Mroczyński, R.**, Korwin-Mikke, K., Gieraltowska, S., Szmidt, J., Piotrowska, A., *Effect of the post-deposition annealing on electrical characteristics of MIS structures with HfO₂/SiO₂ gate dielectric stacks*, (2012) *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*, 177 (15), pp. 1281-1285.
- [6] **Mroczyński, R.**, Jasiński, J., Gottlob, H., Schmidt, M., *Double gate dielectric stacks with Gd₂O₃ layer for application in NVSM devices*, (2014) *Microelectronic Engineering*, 115, pp. 61-65.
- [7] Szymańska, M., Gieraltowska, S., Wachnicki, Ł., Grobelny, M., Makowska, K., **Mroczyński, R.**, *Effect of reactive magnetron sputtering parameters on structural and electrical properties of hafnium oxide thin films*, (2014) *Applied Surface Science*, 301, pp. 28-33.
- [8] Gieraltowska, S., Wachnicki, Ł., Witkowski, B.S., **Mroczyński, R.**, Dłużewski, P., Godlewski, M., *Characterization of dielectric layers grown at low temperature by atomic layer deposition*, (2015) *Thin Solid Films* 577, pp. 97-102.
- [9] **Mroczyński, R.**, Szymańska M., Głuszewski, W., *Reactive magnetron sputtered hafnium oxide layers (HfO_x) for non-volatile semiconductor memory (NVSM) devices*, (2015) *Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 33 (1), art. No 01A113.

Publikacje w czasopismach recenzowanych po uzyskaniu stopnia doktora (6):

- [10] **Mroczyński, R.**, Beck, R.B., *Silicon oxynitride layers fabricated by Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD) for CMOS devices*, (2009) *ECS Transactions*, 25 (8 PART 2), pp. 797-804.

- [11] Kalisz, M., **Mroczyński, R.**, Beck, R.B., *Ultrapłytkowa implantacja fluoru z plazmy w.cz. jako metoda poprawy właściwości elektro-fizycznych struktur MIS z dielektrykami bramkowymi wytwarzanymi metodą PEVCD*, (2011) Elektronika 2, pp. 20-26.
- [12] Taube, A., Korwin-Mikke, K., Gutt, T., Małachowski, T., Pasternak, I., Wzorek, M., Łaszcz, A., Płuska, M., Rzodkiewicz, W., Piotrowska, A., Gieraltowska, S., Sochacki, M., **Mroczyński, R.**, Dynowska, E., Szmidt, J.: *Wytwarzanie i charakteryzacja cienkich warstw tlenku hafnu dla zastosowań w technologii MOSFET w węglu krzemu*, (2011) Elektronika, 9 pp. 117-120.
- [13] Kalisz, M., **Mroczyński, R.**, Szymańska, M., *Ultra-shallow fluorine and nitrogen implantation from r.f. plasma and its effect on electro-physical parameters of Al/HfO₂/Si MOS structures*, (2013) Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, 8902, art. No 89020E.
- [14] Gryglewicz, J., Firek, P., Jasiński, J., **Mroczyński, R.**, Szmidt, J., *Characterization of thin Gd₂O₃ magnetron sputtered layers*, (2013) Proceedings of SPIE Electron Technology Conference, 8902, art. No 89022M.
- [15] Tasneem, G., Tomastik, C., **Mroczyński, R.**, Werner, W.S.M., *SiON metrology using angular and energy distributions of photoelectrons*, (2013) Journal of Physics: Conference Series, 439 (1), art. No 012005.

Dane parametryczne (bibliograficzne) zestawionych publikacji, w tym ich Impact Factor, liczbę punktów wg. listy czasopism punktowanych MNiSW oraz liczbę cytowań, a także dokładny opis mojego wkładu własnego, zamieściłem w Załączniku 4a.

C) Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

Moją działalność naukowo-badawczą podjąłem już na etapie studiów pierwszego i drugiego stopnia na Wydziale Elektroniki Techniki Informacyjnych Politechniki Warszawskiej w trakcie realizacji prac dyplomowych inżynierskiej i magisterskiej. Prace dyplomowe dotyczyły optymalizacji trawienia typu RIE (ang. *Reactive Ion Etching*) warstw dielektrycznych wytwarzanych metodą PECVD (ang. *Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition*). Prace te były w rzeczywistości fragmentem znacznie większego programu badawczego realizowanego w Instytucie Mikroelektroniki i Optoelektroniki Politechniki Warszawskiej (IMiO PW). Dlatego też, już na etapie przygotowań do ich realizacji, wprowadzany byłem stopniowo i systematycznie w arkana technologii i metod charakteryzacji materiałów [G.5,G.6,G.7]. Na tym etapie przygotowań przechodziłem szkolenia z zakresu obsługi wszystkich urządzeń technologicznych, jakie miały być mi potrzebne w trakcie wykonywania swojej pracy dyplomowej. Posiadane przeze mnie umiejętności z tego zakresu zapoczątkowały potem na etapie wykonywania badań zmierzających do pracy doktorskiej (w trakcie studiów III stopnia) i pozwoliły na aktywne uczestniczenie w procesie dydaktycznym realizowanym w Zakładzie.

Chcąc poszerzać wiedzę i jeszcze aktywniej uczestniczyć w działalności naukowo-badawczej w 2000 roku wstąpiłem do Koła Naukowego Mikroelektroniki i Nanoelektroniki prowadzonego przez prof. dr hab. inż. Jana Szmida. W ramach działalności tego koła dwukrotnie uczestniczyłem w Letniej Szkole Mikroelektroniki w Łodzi, a także dwukrotnie w Studenckim Seminarium Naukowym w Konopnicy, na którym wygłosiłem referat [G.8,K.12]. Wyrazem mojej działalności w Kole było także wykonanie (jako główny wykonawca) i obrona pierwszego poważnego projektu naukowego – Grantu Rektorskiego [I.13].

Moje zainteresowania naukowo-badawcze związane są z technologią i badaniami materiałów dla zaawansowanych przyrządów półprzewodnikowych, w szczególności: technologią i charakterystyką warstw dielektrycznych o wysokiej (wyższej, niż dla dwutlenku krzemu – 3.9) przenikalności elektrycznej. Do pewnego momentu technologii komercyjnych przyrządów półprzewodnikowych właściwie jedynym wykorzystywanym materiałem na dielektryki bramkowe był dwutlenek krzemu (SiO_2), zwany potocznie tlenkiem krzemu. Jednak niektóre jego właściwości, w związku z tak szybkim rozwojem technologii, zaczęły stwarzać problemy. Problemy te dotyczyły, w szczególności, radykalnego wzrostu gęstości prądu upływu w strukturze bramki tranzystora MOSFET spowodowanego ultra-cienkimi grubościami warstw dielektrycznych. Aby utrzymać wymaganą pojemność bramki przy zachowaniu grubości dielektryka bramkowego na poziomie niestwarzającym

problemów technologicznych, należało zwiększyć przenikalność elektryczną warstwy dielektrycznej. Oczywistym rozwiązaniem tego problemu, jak przewidywał 'ITRS Roadmap', wydawała się możliwość zastosowania innych materiałów o przenikalności elektrycznej dużo większej, niż ta dla tlenku krzemu, tzw. *high-k dielectric*. Od początku lat 90-tych zaczęto poszukiwać kandydata, który zastąpiłby tlenek krzemu w najbardziej zaawansowanych przyrządach półprzewodnikowych. Ostatecznie, po licznych zapowiedziach i opóźnieniach, dopiero w 2007 roku *INTEL*, jako pierwsza firma, wprowadziła do technologii komercyjnych mikroprocesorów z serii *Penryn*[®] materiały dielektryczne typu *high-k*, bazujące na związkach hafnu. Pomimo to wciąż trwają prowadzone na bardzo szeroką skalę badania związane z optymalizacją technologii warstw typu *high-k* dla zastosowań w zaawansowanych przyrządach półprzewodnikowych.

W ramach realizacji mojej pracy doktorskiej głównym tematem rozważań były plazmowe technologie (PECVD) wytwarzania ultra-cienkich (~5nm) warstw tlenko-azotków krzemu (SiO_xN_y). Tlenko-azotek krzemu był 'naturalnym' następcą tlenku krzemu, jako dielektryk bramkowy i, z punktu widzenia historii technologii, był pierwszą warstwą dielektryczną charakteryzującą się wyższą wartością przenikalności elektrycznej, która wykorzystywana była jako dielektryk bramkowy w zaawansowanych przyrządach typu CMOS-VLSI. Wszystkie badania, które przeprowadziłem w ramach realizacji zadań pracy doktorskiej, pozwoliły mi na pozytywne rozliczenie projektu badawczego promotorskiego [H.11]. Tematyka mojej pracy doktorskiej i uzyskiwane wyniki, okazały się interesujące dla realizowanego w IMiO PW Projektu Komisji Europejskiej 6 PR – NoE *Silicon-based Nanodevices – SINANO*, skupiającego 40 ośrodków naukowych oraz przemysłowych w całej Europie m.in. *CEA LETI, IMEC, Infineon, STMicroelectronics, KTH czy UCL* [H.4]. Kontynuacją projektu *SINANO* były działania konsorcjum *NANOSIL (Silicon-based nanostructures and nanodevices for long term microelectronics applications)*, w których także zdobywałem doświadczenie poprzez prowadzenie międzynarodowych badań [H.2]. Uczestniczyłem również w pracach technologicznych innego Konsorcjum 6 PR *Pulling the Limits of NanoCMOS electronics – PULLNANO* [H.3]. Celem prac, do których zostałem zaangażowany, było zbadanie, czy istnieje możliwość wykorzystania technologii PECVD do wytworzenia struktur półprzewodnikowych o rozmiarach nanometrycznych, w których uwidocznia się efekty kwantowe. Wyniki tych prac przedstawiane były na wielu konferencjach krajowych [87,88,89,93] i zagranicznych [59,61,62], a także prezentowane w formie referatów [L.10,L.11,L.12].

Moje pierwsze prace opublikowane po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych były rozwinięciem oraz istotnym pogłębieniem prac zapoczątkowanych w ramach doktoratu i dotyczyły technologii i charakterystyki warstw tlenko-azotków krzemu wytwarzanych metodą PECVD. Warto

podkreślić fakt, że metoda ta nie jest predestynowana do wytwarzania warstw, które mogłyby pełnić funkcję dielektryków bramkowych w strukturach MOS, a tym bardziej, nie nadaje się do wytwarzania warstw o grubościach w zakresie kilku nanometrów. Jednak moje prace badawcze i eksperymenty technologiczne wykazały, że uważna i racjonalna optymalizacja metody PECVD pozwala na kontrolowane i powtarzalne wytwarzanie ultra-cienkich warstw SiO_xN_y (od 3 do 6nm). Ze względu na najlepszą jakość powstałych układów półprzewodnik/dielektryk, materiały na dielektryki bramkowe wytwarzane były przede wszystkim metodami wysokotemperaturowymi. Jednak rozwój technologii półprzewodnikowej wiąże się z wprowadzaniem coraz większych ograniczeń budżetu termicznego technologii, co wiąże się ze zmniejszeniem czasów oddziaływania wysokich temperatur. W związku z tym, niskotemperaturowe techniki wytwarzania warstw dielektrycznych nabierają coraz większego znaczenia. Optymalizacja technologii warstw dielektrycznych wytwarzanych taką metodą nie jest zadaniem łatwym. Celem optymalizacji było wykonanie jak najcieńszych warstw SiO_xN_y przy zachowaniu dobrych właściwości elektro-fizycznych, akceptowalnych dla technologii CMOS. Proces chemicznego osadzania z fazy lotnej wspomaganego plazmą, jak każdy proces plazmowy, jest procesem wieloparametrycznym. Podstawowymi parametrami procesu są m.in. parametry plazmy, takie jak: koncentracja i rodzaje cząstek obecnych w plazmie, temperatura tych cząstek czy rozkłady potencjałów w plazmie. Takie parametry można charakteryzować za pomocą urządzeń badających rozkład widmowy. Jednakże na linii technologicznej układów scalonych trudno wyobrazić sobie tego typu wielkowymiarowe przyrządy do wykonywania pomiarów spektroskopowych, dlatego do sterowania procesem wprowadza się tzw. zastępcze parametry plazmy, za pomocą których w łatwy sposób można kontrolować przebieg procesu. Do głównych parametrów procesu należą: moc dostarczona do obszaru plazmy, ciśnienie panujące w komorze reaktora, skład i przepływy gazów roboczych czy czas trwania procesu. Aby zbadać wzajemne zależności pomiędzy tymi parametrami, należałoby zaplanować i przeprowadzić bardzo dużą liczbę eksperymentów, co okazuje się niepraktyczne ze względów zarówno finansowych, jak i niezbędnego czasu przeznaczanego na realizację prac badawczych. Dlatego w ramach moich badań wykorzystywałem do planowania eksperymentów metodę tablic ortogonalnych Taguchi'ego [10,33]. Jest to metoda znana w dostępnej literaturze i pozwalająca na znaczną redukcję liczby eksperymentów niezbędnych do zbadania zależności pomiędzy parametrami wejściowymi, a wyjściowymi procesu PECVD, np. w przypadku badań wpływu siedmiu parametrów procesu, każdego o dwóch wartościach, zgodnie z metodą redukcji należy wykonać tylko 8 prób; bez zastosowanej metody redukcji – aż 128 prób.

Wieloetapowa optymalizacja parametrów procesu PECVD pozwoliła na wyselekcjonowanie zestawów parametrów pozwalających na powtarzalne wytwarzanie warstw tlenko-azotków krzemu w ultra-cienkim zakresie grubości [m.in. 10]. W pracy [1] parametry te zostały wykorzystane do

przygotowania struktur testowych typu MOS z pojedynczą warstwą dielektryczną (5-6nm). Celem tej pracy była identyfikacja zmian właściwości elektro-fizycznych oraz strukturalnych warstw SiO_xN_y pod wpływem wysokotemperaturowego wygrzewania. Warto zaznaczyć, że współczesne technologie półprzewodnikowe wymagają na wielu etapach cyklu technologicznego procesu wygrzewania, np. w trakcie elektrycznej aktywacji implantowanych domieszek. Proces ten występuje zwykle już po wykonaniu dielektryka bramkowego i w istotny sposób może wpływać na właściwości warstw dielektrycznych (szczególnie dielektryków bramkowych), a tym samym na jakość i parametry struktur półprzewodnikowych. Wykonane w ramach niniejszej pracy warstwy tlenko-azotków zostały wszechstronnie scharakteryzowane strukturalnie i elektrycznie. Do badań stabilności termicznej wykorzystano wygrzewanie wysokotemperaturowe przeprowadzone zarówno w standardowych piecach kwarcowych, jak i w reaktorach typu RTP (ang. *Rapid Thermal Processing*) w różnych atmosferach gazów formujących. W celu identyfikacji zmian składu chemicznego, budowy fazowej, grubości i parametrów optycznych, a także profili pierwiastków w objętości badanych warstw SiO_xN_y , zostały przeprowadzone pomiary spektroskopii fotoelektronów wzbudzonych promieniowaniem Roentgena – XPS (ang. *X-Ray Photoelectron Spectroscopy*), spektroskopii mas jonów wtórnych – SIMS (ang. *Secondary Ion Mass Spectroscopy*) oraz pomiary wykonane za pomocą elipsometrii spektroskopowej (ang. *Spectroscopic Ellipsometry*). Natomiast do analizy zmian parametrów elektro-fizycznych badanych warstw dielektrycznych oraz struktur MIS/MISFET z SiO_xN_y jako dielektrykami bramkowymi, wykorzystane zostały pomiary wysokoczęstotliwościowych charakterystyk pojemnościowo-napięciowych (C-V), prądowo-napięciowych (I-V) oraz unikatowe pomiary prądu pompowania ładunku – CP (ang. *Charge-Pumping*).

Głównym wnioskiem z przeprowadzonych badań było potwierdzenie stabilności termicznej badanych warstw, co jest bardzo istotne z punktu widzenia wykorzystania tlenko-azotków krzemu do technologii struktur półprzewodnikowych. Wygrzewanie wysokotemperaturowe powoduje szereg zmian w budowie i właściwościach elektrycznych struktur MIS/MISFET. W pracy wykazano poprawę parametrów elektrycznych struktur testowych pod wpływem wygrzewania wysokotemperaturowego; jedynie wygrzewanie w piecu typu RTP w atmosferze azotu powodowało wzrost gęstości prądu upływu, najprawdopodobniej wskutek lokalizacji zbyt dużej ilości azotu w obszarze przejściowym półprzewodnik/dielektryk, co potwierdzają inne doniesienia literaturowe. Stopień poprawy parametrów elektrycznych warstw dielektrycznych skorelowano z zawartością mieszanej fazy 'SiON' w objętości warstw tlenko-azotków krzemu, co jednoznacznie wykazały badania przeprowadzone w ramach niniejszej pracy; im większa zawartość mieszanej fazy 'SiON', tym lepsze właściwości elektryczne struktur MIS/MISFET z SiO_xN_y jako dielektrykiem bramkowym. Przyrost mieszanej fazy odbywał się wskutek wysycania pozrywanych wiązań krzemowych, które

zidentyfikowano w warstwach referencyjnych (bez wygrzewania). W przypadku obu typów wygrzewania zaobserwowano podobne trendy zmian zawartości tlenu oraz azotu, natomiast odmienny charakter zmian rozkładu profili obu głównych pierwiastków w badanych warstwach SiO_xN_y w zależności od typu procesu wygrzewania, co można wykorzystać w przyszłości, w zależności od funkcji, jakie miałyby pełnić warstwy dielektryczne w przyrządach półprzewodnikowych.

Charakteryzacja strukturalna ultra-cienkich warstw tlenko-azotków krzemu została w istotny sposób rozszerzona później w pracy [15]. Celem tej pracy było znalezienie nowego algorytmu do charakteryzacji strukturalnej warstw dielektrycznych w ultra-cienkim zakresie grubości. Algorytm ten został zaimplementowany do subtelnej metody pomiaru warstw za pomocą spektroskopii fotoelektronów wzbudzonych za pomocą promieniowania Roentgena padającym pod różnym kątem – AR-XPS (ang. *Angle-Resolved X-Ray Photoelectron Spectroscopy*). Jest to szczególna metoda charakteryzacji warstw i struktur półprzewodnikowych, gdyż nie jest niszcząca oraz charakteryzuje się dużą czułością, nawet w przypadku pomiarów materiałów charakteryzujących się grubościami w skali atomowej. Problemem w tej metodzie jest to, że 'rekonstrukcja' intensywności odpowiedzi od poszczególnych pierwiastków budujących warstwę jest czysto matematycznym zagadnieniem. Do charakteryzacji warstw zostały wykonane dwa zestawy ultra-cienkich warstw dielektrycznych wytwarzanych metodą PECVD: tlenku oraz tlenko-azotku krzemu (tlenku krzemu z dużą zawartością fazy azotkowej, co umożliwia sterowanie parametrami procesu PECVD) o grubościach, odpowiednio, 4nm i 8nm. Oryginalnym osiągnięciem tej pracy było potwierdzenie poprawności opracowanego modelu, który z powodzeniem może być wykorzystany do badania innych typów materiałów stosowanych w dzisiejszych technologiach przyrządów półprzewodnikowych.

Eksperymentalną weryfikacją tezy, że warstwy tlenko-azotków krzemu można zastosować w zaawansowanych przyrządach półprzewodnikowych, było rozszerzenie rozpoczętych przeze mnie w ramach doktoratu badań o wykorzystanie SiO_xN_y jako warstwy podkładowej (pasywującej) powierzchnię krzemu w układzie z podwójną warstwą dielektryka bramkowego (wraz z dielektrykiem o wysokiej wartości przenikalności elektrycznej). Moje badania i próby technologiczne, jako pierwsze w literaturze, pokazały potencjalne możliwości zastosowania ultra-cienkich warstw tlenko-azotków krzemu wytwarzanych metodą PECVD w zaawansowanych strukturach MOS/MIS. Tematyka technologii i charakteryzacji struktur z podwójną warstwą dielektryka bramkowego była (i jest) niezwykle aktualna i interesująca z punktu widzenia zastosowania takich struktur nie tylko jako struktura bramki tranzystora MOSFET (tzw. *gate-stack*), ale i w innych przyrządach, m.in. w nieulotnych pamięciach półprzewodnikowych typu NVSM (ang. *Non-Volatile Semiconductor Memories*) – pamięciach *flash* (pamięci stosowane w każdym urządzeniu mobilnym, a od niedawna w

komputerowych twardych dyskach typu SSD – ang. *Solid-State Devices*). Do dziś nie zastosowano komercyjnie dielektryka typu *high-k* w tego typu pamięciach nieulotnych. Warto podkreślić fakt, że część przedstawionych poniżej wyników badań związanych z technologią i charakteryzacją struktur dla pamięci nieulotnych została, z powodzeniem, wykorzystana do rozliczenia projektu badawczego-własnego, którego byłem kierownikiem [I.11]. Moje plany naukowe w tej dziedzinie wiedzy zostały również dostrzeżone i wyróżnione na Politechnice Warszawskiej, gdyż w 2009 roku w pierwszym konkursie organizowanym dla młodych naukowców przez Centrum Studiów Zaawansowanych PW zostałem wyróżniony dwuletnim stypendium naukowym [J.6].

Podstawową komórką w pamięci *flash* jest tranzystor wykonany w technologii MOS, którego bramka składa się z dwóch (lub więcej) cienkich warstw dielektrycznych. W zależności od struktury bramki, każda z warstw pełni odrębne funkcje. Np. w strukturze ONO (ang. *Oxide-Nitride-Oxide*) która jest jedną z najczęściej wykorzystywanych do konstrukcji bramki tranzystora przeznaczonego dla technologii NVSM, dielektryk podkładowy (ang. *bottom/pedestal oxide*) pełni funkcje dielektryka, przez który tunelują nośniki do warstwy z dużą gęstością stanów pułpkowych przechowującej ładunek (w tym przypadku azotek krzemu – Si_3N_4), natomiast dielektryk górny (ang. *top oxide*) pełni funkcję dielektryka blokującego odpływ nośników pod wpływem zmian polaryzacji bramki. W technologii bramek ONO funkcję *top oxide* pełni zwykle warstwa tlenku krzemu. Jednakże jego niska przenikalność elektryczna w porównaniu z azotkiem krzemu powoduje, że przy podobnych grubościach użytych warstw dielektrycznych pojawia się dwukrotnie wyższe pole elektryczne w warstwie SiO_2 , niż w warstwie Si_3N_4 . Tak więc znaczna część przyłożonego napięcia do bramki jest 'tracona' w warstwie *top oxide*. Zastosowanie nowej konstrukcji *gate stack*, np. z dielektrykiem o wysokiej przenikalności elektrycznej, pozwoli na wyeliminowanie tego problemu [16].

Z uwagi na brak możliwości technologicznych w laboratorium IMiO PW pierwsze struktury z warstwą podwójnego dielektryka bramkowego powstały w ramach współpracy naukowej z laboratorium AMO w Aachen, Niemcy (Zespół prof. Maxa Lemme). Struktura dielektryka bramkowego składała się z warstwy podkładowej – tlenko-azotku krzemu oraz warstwy 'górnej' – tlenku hafnu (HfO_x), wytwarzanego metodą reaktywnego rozpylania magnetronowego. Badania tego typu struktur MIS/MISFET były tematem rozważań w pracach [2,3,10] oraz prezentowane na konferencjach międzynarodowych [m.in.: 53,57,58].

W pracy [2], po raz pierwszy w literaturze, pokazano potencjalne możliwości wykorzystania takiej konstrukcji bramki w pamięciach nieulotnych. W ramach podjętych przeze mnie badań zostały wykonane struktury MOS wraz z referencyjnymi strukturami bazującymi na dwutlenku krzemu. Analiza uzyskanych charakterystyk elektrycznych struktur testowych udowodniła, że struktury

bazujące na układzie $\text{SiO}_x\text{N}_y/\text{HfO}_x$ ($\sim 15\text{nm}$) są znacznie korzystniejsze z punktu widzenia aplikacji w pamięciach nieulotnych, m.in. uzyskano niskie wartości prądu upływu, co wpływa na czas magazynowania ładunku (tzw. *retention time*) oraz stabilne i znacznie szersze tzw. okna pamięciowe – w tym przypadku – zmiany napięcia płaskich pasm (U_{fb}) pod wpływem napięcia polaryzującego bramkę, w porównaniu do struktur referencyjnych (z wykorzystaniem ‘klasycznego’ SiO_2). Napięcie płaskich pasm, jako charakterystyczne dla struktury MOS, można porównać do napięcia progowego (U_t) tranzystora MOS, natomiast napięcie polaryzujące bramkę można uznać za napięcie kasujące/programujące ($U_{p/e}$) strukturę pamięciową. Wielkość magazynowanego ładunku okazała się również istotnie wyższa dla struktur $\text{SiO}_x\text{N}_y/\text{HfO}_x$ w porównaniu do struktur referencyjnych.

W pracy [10] po raz pierwszy zaprezentowano wyniki charakteryzacji struktur tranzystorów MISFET z bramką w postaci podwójnego układu dwóch warstw typu *high-k* oraz udowodniono możliwość sterowania napięciem progowym za pomocą napięć polaryzujących bramkę. Uzyskano zakres sterowania U_t na poziomie $\sim 0.4\text{V}$, co wymagało dalszej optymalizacji technologii struktur MIS. Przedstawiono także pierwsze wyniki testów niezawodnościowych struktur z podwójną warstwą dielektryczną. Diagnostyka i analiza stabilności charakterystyk elektrycznych struktur testowych jest bardzo ważna z punktu widzenia potencjalnego wykorzystania w realnych przyrządach półprzewodnikowych. Uzyskane wyniki pokazały, że struktury $\text{SiO}_x\text{N}_y/\text{HfO}_2$ charakteryzują się znacznie wyższymi wartościami napięć przebicia (U_{br}) oraz niższymi prądami upływu w porównaniu do struktur referencyjnych. Indukowane pole elektryczne wskutek polaryzacji bramki wartościami U_{br} niszczy izolacyjne właściwości warstw dielektryków bramkowych, a tym samym ogranicza czas magazynowania ładunku. Badania statystyki przebiegów niszczących strukturę dielektryka bramkowego wykazały również dużo większą jednorodność wartości U_{br} w strukturach $\text{SiO}_x\text{N}_y/\text{HfO}_2$.

Wszelkonna diagnostyka i testy niezawodnościowe struktur MOS zostały przeprowadzone w pracy [3]. Oprócz pomiarów wysokoczęstotliwościowych charakterystyk C-V oraz I-V, statystyki napięć przebicia, zostały wykonane także stropy stałonapięciowe CVS (ang. *Constant-Voltage Stress*) oraz stałoprądowe CCS (ang. *Constant-Current Stress*). Analiza wyników jednoznacznie potwierdziła dużo bardziej jednorodny rozkład przebiegów niszczących strukturę $\text{SiO}_x\text{N}_y/\text{HfO}_2$ w porównaniu do struktur z $\text{SiO}_2/\text{HfO}_2$, o czym przekonują zaprezentowane w publikacji ‘mapy’ przebiegów oraz tzw. rozkłady Weibull’a. Biorąc pod uwagę struktury z podkładowym tlenko-azotkiem krzemu, dużo lepsze właściwości elektro-fizyczne są charakterystyczne dla struktur z SiO_xN_y wygrzewanym w wysokiej temperaturze, co potwierdza wnioski wcześniejszych prac [m.in. 1]. Wynika to z mniejszej ilości niewysyconych wiązań pomiędzy atomami budującymi warstwę dielektryczną po przeprowadzonym procesie wygrzewania, a tym samym zmniejszonej wielkości prądu upływu. Wskazuje na to także

analiza stresów napięciowych, gdzie w strukturach dla warstwy niewygrzewanego SiO_xN_y uwidaczniają się efekty pasożytnicze zwane *SILC* – wzrost prądu upływu spowodowany stresem napięciowym (ang. *Stress-Induced Leakage Current*). Podobnie charakterystyki prądowo-napięciowe po przeprowadzonych stresach prądowych uwidaczniają niejednorodność gęstości prądu upływu w szerokim zakresie napięć polaryzujących (szczególnie widoczne dla wyższych wartości prądów) oraz znacznie wcześniejsze przebicia warstwy dielektryka bramkowego, który nie był wygrzewany w wysokiej temperaturze. Praca [3] zakończyła się konkluzją o konieczności optymalizacji technologii układu warstw dielektrycznych, bowiem przedstawione wielkości okien pamięciowych i czas magazynowania ładunku w strukturze pamięciowej były relatywnie duże (w porównaniu do wyników uzyskiwanych przez inne grupy), jednak parametry te mogłyby okazać się niewystarczające dla aplikacji w strukturach NVSM.

Prowadzona współpraca naukowa z laboratorium AMO w Niemczech była kontynuowana, jednak możliwości optymalizacji struktur testowych, szczególnie z punktu widzenia technologii warstw dielektrycznych typu *high-k*, które pełniłyby funkcję warstwy ‘górnjej’ w układzie podwójnego dielektryka, były mocno ograniczone. Spowodowane to było tym, że nie było dostępnych odpowiednich urządzeń technologicznych ‘na miejscu’ – w laboratorium technologicznym IMiO PW. Po pewnym czasie infrastruktura badawcza-pomiarowa Instytutu znacząco się powiększyła. Wskutek uzyskania dofinansowania z funduszy unijnych (m.in. program ‘Warsaw Labs’ POIG.02.01.00-14-138/08) zakupionych zostało szereg urządzeń technologicznych do Laboratorium Zaawansowanych Technologii Półprzewodnikowych typu ‘*clean-room*’, m.in. urządzenie do prowadzenia procesu reaktywnego rozpylania magnetronowego w plazmie w.cz. – PlasmaLab Oxford System 400. W związku z tym uzyskałem możliwość samodzielnego prowadzenia prac eksperymentalnych związanych z wytwarzaniem struktur testowych MIS/MISFET oraz optymalizacją i charakteryzacją technologii. Jednocześnie nawiązałem współpracę naukową z Instytutem Fizyki Polskiej Akademii Nauk – IFPAN (Zespół prof. Marka Godlewskiego) oraz Instytutem Technologii Elektronowej (Zespół prof. Anny Piotrowskiej). Oba te Zespoły dysponowały zaawansowanymi urządzeniami do wytwarzania warstw dielektrycznych typu *high-k* za pomocą metody osadzania warstw atomowych – ALD (ang. *Atomic Layer Deposition*). Metoda ta predestynowana jest do wytwarzania warstw dielektrycznych o precyzyjnie kontrolowanej grubości (z dokładnością do pojedynczych monowarstw atomowych). Od tej chwili moje prace naukowe zaczęły biec dwutorowo – w trakcie badań struktur z podwójną warstwą dielektryka bramkowego wykorzystywałem dwie zupełnie odmienne metody wytwarzania warstw dielektrycznych typu *high-k (top oxide)*: reaktywnego rozpylania magnetronowego oraz metody ALD. Natomiast do wytwarzania warstw podkładowych w postaci

tlenko-azotków krzemu lub tlenków-krzemu (*pedestal/bottom layer*) wykorzystywałem dobrze opanowane i zoptymalizowane procesy PECVD.

Opracowanie i optymalizacja technologii reaktywnego rozpylania magnetonowego warstw dielektrycznych typu *high-k* przy wykorzystaniu niedawno zakupionego do IMiO PW reaktora zajęło trochę czasu, dlatego kolejne prace eksperymentalne związane ze strukturami MIS/MISFET z podwójną warstwą dielektryczną powstały przy wykorzystaniu metody ALD [4,5,8,12]. Warto również wspomnieć, że część wyników prac dotyczących tej tematyki prezentowana była na wielu konferencjach krajowych i międzynarodowych [m.in.: 47,49,59,78]. W pracy [4] wykonane zostały struktury z podwójną warstwą dielektryka bramkowego $\text{SiO}_x\text{N}_y/\text{HfO}_2$ oraz $\text{SiO}_x\text{N}_y/\text{Al}_2\text{O}_3$ (obie struktury o grubości $\sim 20\text{nm}$). W momencie publikacji rezultatów badań były to pierwsze notowane w literaturze struktury typu MIS dla zastosowań w przyrządach NVSM, gdzie wykorzystano do budowy stosu dielektryka bramkowego dwie niskotemperaturowe metody – PECVD (max. temp. 350°C) oraz ALD (w przypadku warstwy tlenku hafnu temperatura procesu wynosiła 85°C , natomiast w przypadku tlenku aluminium – 200°C). W ramach tej pracy dokonano wszechstronnej charakteryzacji elektrycznej wykonanych warstw i bazujących na nich struktur MIS. Struktury MIS charakteryzowały się niskim napięciem płaskich pasm, niską wartością ładunku efektywnego oraz relatywnie wysokimi wartościami natężenia pola elektrycznego powodującego przebicie – ok. $6\text{MV}/\text{cm}$ i $8\text{MV}/\text{cm}$ – dla porównania, najlepszej jakości tlenki termiczne wytwarzane metodami wysokotemperaturowymi charakteryzują się wartością pola ok. $10\text{MV}/\text{cm}$. W pracy dokonano również identyfikacji mechanizmów przewodnictwa ładunku, a tym samym mechanizmów ładowania/rozładowania struktury pamięciowej. W tym celu dokonano charakteryzacji elektrycznej struktur MIS w szerokim zakresie temperaturowym. Pozwoliło to na jednoznaczne wskazanie, że dominującym mechanizmem przepływu ładunku jest mechanizm Fowlera-Nordheim'a. To bardzo ważna obserwacja z punktu widzenia modelowania teoretycznego działania struktury MIS. W wyniku porównania uzyskiwanych okien pamięciowych okazało się, że aplikacja warstw wytwarzanych metodą ALD pozwala na wykonanie struktur charakteryzujących się ok. 3-krotnie szerszymi oknami pamięciowymi oraz 10-krotnie dłuższym czasem magazynowania ładunku w porównaniu do struktur wykonanych z wykorzystaniem warstw HfO_x wytwarzanych metodą reaktywnego rozpylania magnetonowego. W pracy tej przeprowadzono również testy niezawodnościowe polegające na badaniach stabilności magazynowania ładunku (a tym samym stabilność uzyskiwanych okien pamięciowych) w warunkach, w których testowane są komercyjne pamięci nieulotne (tj. 10 letni czas magazynowania ładunku w temperaturze 85°C). Okazało się, że analizowane struktury MIS z podwójną warstwą dielektryka bramkowego charakteryzują się bardzo szerokimi oknami pamięciowymi (2.6V dla HfO_2 , 4.55V dla Al_2O_3).

W kolejnej pracy [5] dokonano badań stabilności termicznej oraz przeprowadzono próby identyfikacji zmian we właściwościach strukturalnych i elektrycznych struktur MIS z podwójną warstwą dielektryka bramkowego pod wpływem wygrzewania w podwyższonych temperaturach. Wykonano struktury MIS z układem dielektryka bramkowego w postaci $\text{SiO}_2/\text{HfO}_2$ o grubości $\sim 50\text{nm}$ (podkładowy tlenek krzemu osadzony był metodą PECVD), a następnie przeprowadzono wygrzewanie warstw dielektrycznych w temperaturach: 400°C , 600°C i 800°C . Zmiany we właściwościach układu podwójnego dielektryka bramkowego identyfikowane były na podstawie analizy charakterystyk elektrycznych oraz subtelnych pomiarów strukturalnych, takich jak wysokorozdzielczej mikroskopii transmisyjnej – HR-TEM (ang. *High-Resolution Transmission Electron Microscopy*) oraz mikroskopii sił atomowych – AFM (ang. *Atomic Force Microscopy*). Najważniejszym spostrzeżeniem wynikającym z badań przeprowadzonych w ramach tej pracy jest to, że istnieje graniczna temperatura wygrzewania warstwy tlenku hafnu (w tym przypadku 400°C), której przekroczenie wiąże się z znacznym pogorszeniem właściwości izolacyjnych dielektryka bramkowego. W ramach pracy wykazano, że pogorszenie właściwości elektro-fizycznych układu $\text{SiO}_2/\text{HfO}_2$ wiąże się z nie tylko z powstaniem w obszarze przejściowym warstw dielektrycznych tzw. *interfacial layer* (IL), czyli niestechiometrycznej warstwy przejściowej o słabej jakości, na co wskazywały liczne prace dostępne w literaturze, ale i istotnemu zwiększeniu zawartości fazy krystalicznej w objętości warstwy HfO_2 , która powstaje wskutek oddziaływania wysokiej temperatury. Obecność krystalitów w objętości warstwy dielektryka typu *high-k* powodowała zwiększenie prawdopodobieństwa upływu na granicy ziaren, a tym samym na zmniejszeniu wartości napięć przebicia, co wykazały wyniki charakteryzacji elektrycznej. Zidentyfikowano również mechanizmy przewodnictwa ładunku w badanych strukturach MIS. W przeciwieństwie do wyników przedstawionych w pracy [4], gdzie analizowane były struktury o grubości fizycznej $\sim 20\text{nm}$, badane struktury MIS z dielektrykiem bramkowym w postaci $\text{SiO}_2/\text{HfO}_2$ wykazywały dominujący mechanizm przewodnictwa Poole-Frenkel'a. Oznacza to, że proces ładowania/rozładowania ew. pamięci *flash* wymagałby wyższych napięć zasilających w porównaniu do struktur z cieńszymi dielektrykami bramkowymi.

W pracy [8] przeprowadzono systematyczną analizę budowy i właściwości fizycznych warstw dielektrycznych wytwarzanych metodą ALD, które mogą pełnić różne funkcje we współczesnych przyrządach półprzewodnikowych. Analizowane były warstwy dwutlenku hafnu (HfO_2), tlenku aluminium (Al_2O_3), dwutlenku cyrkonu (ZrO_2), dwutlenku tytanu (TiO_2) oraz warstwy kompozytowe składającej się z układu $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{HfO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$. Wszystkie typy warstw *high-k* wytwarzane były w zakresie bardzo niskich temperatur (od 85°C do 350°C) w celu charakteryzacji wpływu temperatury wytwarzania na uzyskiwane właściwości strukturalne. Warstwy dielektryczne charakteryzowane były elektrycznie poprzez analizę charakterystyk prądowo-napięciowych struktur MIS oraz strukturalnie za

pomocą metod, takich jak: AFM, elektronowa mikroskopia skaningowa – SEM (ang. *Scanning Electron Microscopy*), TEM oraz elipsometrii spektroskopowej. Do głównych osiągnięć i wniosków wynikających z rezultatów uzyskanych w ramach realizacji tej pracy można uznać korelację właściwości elektrycznych badanych warstw z budową strukturalną. Okazało się, że im wyższa temperatura wytwarzanych warstw dielektrycznych, tym większy stopień budowy krystalicznej, co powoduje, z kolei, pogorszenie właściwości elektrycznych struktur MIS z dielektrykami bramkowymi w postaci warstw *high-k*. Wynik ten potwierdza rezultaty uzyskane w ramach pracy [5]. Jednocześnie, należy stwierdzić, że wyższe temperatury wytwarzania warstw dielektrycznych powodują wzrost przenikalności elektrycznej warstw, co jest korzystne z punktu widzenia zastosowania w zaawansowanych strukturach MIS/MISFET. W pierwszym przybliżeniu można stwierdzić, że im wyższa przenikalność elektryczna, tym można wykonać grubszą (fizycznie) warstwę dielektryczną, przy jednoczesnym zachowaniu pojemności bramki struktury MOS, jak dla dużo cieńszej warstwy tlenku krzemu. Stąd też wzięła się pojęcie grubości ekwiwalentnej, tzw. *EOT* (ang. *Equivalent Oxide Thickness*), która informuje, jaką grubość miałaby warstwa SiO₂, gdyby charakteryzowała się wartością przenikalności elektrycznej warstwy *high-k*. Z pracy tej wynika więc ważny wniosek dla możliwości wykorzystania warstw *high-k* wytwarzanych metodą ALD do struktur MIS/MISFET w przyszłości – należy zachować pewien kompromis oczekiwań, co do parametrów elektrycznych uzyskiwanych warstw *high-k* oraz technologicznych parametrów wytwarzania (temperatury) samej warstwy. Badane warstwy zostały także scharakteryzowane optycznie w kierunku zastosowań w przyrządach dla elektroniki transparentnej i elastycznej. Należy podkreślić, że tego typu dielektryki charakteryzują się dużymi szerokościami pasma energii zabronionej (od 3.9eV dla TiO₂ do 6.3eV dla Al₂O₃), wysokimi wartościami współczynnika załamania (od 1.6 dla Al₂O₃ do 2.35 dla TiO₂ – obie wartości dla długości fali 635nm). Uzyskane wyniki jednoznacznie pokazały, że względna przenikalność elektryczna wytwarzanych warstw zależy od grubości (i dlatego też nie można mówić o ‘stałej dielektrycznej’, gdyż parametr ten nie jest stały) i może zawierać się w przedziale, np. dla warstwy HfO₂ – od 14 (warstwa o grubości 20nm) do 22 (warstwa o grubości 200nm). W przypadku pozostałych badanych warstw *high-k* uzyskano następujące wartości względnej przenikalności elektrycznej, i tak dla ZrO₂: $k=23\pm 3$, TiO₂: $k=40\pm 3$ oraz dla Al₂O₃: $k=10\pm 3$. Szerokie spektrum parametrów optycznych i elektrycznych pozwala na dobór odpowiedniej warstwy *high-k* jako warstw antyrefleksyjnych, np. w ogniwach fotowoltaicznych, lub jako dielektryków bramkowych w przyrządach typu TFT (ang. *Thin-Film Transistor*). Tranzystory tego typu pełnią rolę podstawowych elementów sterujących (przełączających) w dzisiejszej technologii komercyjnych wyświetlaczy LCD/LED/AMOLED. Szczególnie interesujące wydaje się być zastosowanie warstw *high-k*, które wykazują dużą transparentność w zakresie widzialnym w technologii wyświetlaczy wytwarzanych na

podłożach przezroczystych. Technologia wyświetlaczy rozwija się bardzo szybko i wraz z rosnącymi wymiarami oraz rozdzielczością produkowanych wyświetlaczy, rosną również wymagania stawiane tranzystorom TFT. Wymagania te odnoszą się przede wszystkim do parametrów elektrycznych warstw półprzewodnikowych takich, jak choćby ruchliwości nośników oraz do jakości i niezawodności interfejsu półprzewodnik/dielektryk. Stan obszaru przejściowego determinowana jest przez właściwości warstwy dielektryka bramkowego. Warto podkreślić fakt, że organizatorzy prestiżowej międzynarodowej konferencji naukowej *EMRS Fall Meeting* w Warszawie zaprosili mnie do wygłoszenia referatu nt. zastosowania warstw dielektrycznych typu *high-k* w przyrządach TFT [42]. Warto zaznaczyć, że w tej tematyce zrealizowałem także, jako kierownik projektu, dwa projekty dziekańskie finansowane ze źródeł wewnętrznych PW [C.3,C.6].

Struktura bramki w postaci układu podwójnego dielektryka bramkowego może zostać z powodzeniem wykorzystana do technologii struktur bazujących na innych półprzewodnikach, niż krzem. Problem wyboru dielektryka bramkowego dla struktur bazujących na SiC do dziś jest tematem wielu badań. Związane jest to z tym, że w przeciwieństwie do doskonałej jakości obszaru przejściowego krzem-dwutlenek krzemu, jakość interfejsu pomiędzy tlenkiem krzemu a węglikiem krzemu, z uwagi na obecność węgla, jest istotnie słabsza. Dlatego prowadzone są badania związane z wytwarzaniem i charakteryzacją alternatywnych materiałów dielektrycznych, które do dziś nie przyniosły całkowicie satysfakcjonujących rezultatów. Bardzo ciekawą propozycją jest wykonanie bramki tranzystora MOSFET przy wykorzystaniu właśnie układu podwójnego dielektryka bramkowego z dielektrykiem typu *high-k*.

Praca [12] dotyczy technologii struktur MIS z układem dielektryków w postaci $\text{SiO}_2/\text{HfO}_2$ (~50nm) oraz $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{HfO}_2$ na węgliku krzemu (SiC). Wykonano również struktury referencyjne na krzemie oraz struktury bez obecności warstwy podkładowej w postaci SiO_2 . Przeprowadzono badania stabilności termicznej wykonanych struktur MIS oraz wszechstronną charakteryzację strukturalną i elektryczną. Do najważniejszych rezultatów należy jednoznaczne wykazanie, że zastosowanie warstwy podkładowej znacznie zredukowało prąd upływu struktur MIS w porównaniu do warstw z pojedynczą warstwą dielektryczną w postaci dielektryka typu *high-k* oraz zwiększyło krytyczne pole przebicia. W przypadku struktur na węgliku krzemu zastosowanie warstwy podkładowej wydaje się być nieodzowne dla technologii struktur MIS/MISFET, gdyż analiza charakterystyk elektrycznych struktur na SiC z pojedynczą warstwą dielektryczną wykazała istotne pogorszenie właściwości oraz bardzo dużą upływność. Zastosowanie warstwy podkładowej poprawiło również niezawodność wskutek znacznego ograniczenia rozrzutu wartości krytycznego pola przebicia. Wygrzewanie warstw, ale podobnie, jak w pracy [5], tylko do temperatury 400°C, powoduje zmniejszenie gęstości pułapek

powierzchniowych w obszarze przejściowym półprzewodnik/dielektryk. Wprowadzenie cienkiej warstwy SiO₂ spowodowało zmniejszenie prądu upływu o kilka rzędów wielkości oraz zwiększyło krytyczne natężenie pola przebicia do imponującej wartości 7.2MV/cm. Najmniejszymi wartościami natężenia krytycznego pola przebicia, gęstości pułapek powierzchniowych oraz gęstości ładunku efektywnego w dielektryku przy jednoczesnym najmniejszym rozrzucie wartości pola przebicia, uzyskano dla struktur MIS z SiO₂ o grubości ~5 nm. Zastosowanie warstwy Al₂O₃ jako warstwy podkładowej nie poprawiło w istotny sposób właściwości elektro-fizycznych badanych warstw i struktur półprzewodnikowych. Z tej analizy wypływa bardzo ważny wniosek, że dla technologii struktur MIS/MISFET na Si/SiC, w przypadku wykorzystania warstw dielektrycznych o wysokiej wartości przenikalności elektrycznej, najkorzystniejsze jest wykorzystanie podkładowej warstwy w postaci SiO₂/SiO_xN_y.

Badania i analiza struktur półprzewodnikowych z wykorzystaniem nowoczesnego reaktora do prowadzenia procesu reaktywnego rozpylania magnetronowego rozpoczęła się od optymalizacji technologii warstw bazujących na związkach hafnu: tlenku hafnu (HfO_x) oraz tlenko-azotku hafnu (HfO_xN_y). Struktura i wyniki pracy [7] stanowią swojego rodzaju przewodnik – od optymalizacji technologii warstw *high-k*, poprzez badania strukturalne i materiałowe uzyskanych warstw, aż po aplikację w strukturach MIS. Do planowania eksperymentów technologicznych i badań ponownie wykorzystano metodę redukcji eksperymentów za pomocą tablic ortogonalnych Taguchi'ego. W ramach pracy przeprowadzono szereg badań strukturalnych, m.in. dyfraktometrię za pomocą promieniowania Roentgena – XRD (ang. *X-Ray Diffraction*), mikroskopię sił atomowych, elipsometrię spektroskopową oraz charakteryzację elektryczną struktur testowych. Określono trendy zależności parametrów wejściowych procesu rozpylania magnetronowego (w modzie reaktywnym) na uzyskiwane właściwości elektro-fizyczne warstw dielektrycznych i bazujących na nich strukturach MIS. W wyniku przeprowadzonych eksperymentów technologicznych uzyskano warstwy *high-k* w szerokim zakresie grubości – od ~8nm do 70nm, co po analizie charakterystyk elektrycznych odpowiadało wartościom względnej przenikalności elektrycznej od 5, aż do 25, co jest jednym z najlepszych wyników zaprezentowanych do dziś w literaturze. Elektryczne grubości warstw tlenku hafnu (*EOT*) zawierały się w ultra-cienkim zakresie – od ok. 3nm do 12nm. Wszystkie warstwy charakteryzowały się bardzo dobrą jednorodnością. Dość zaskakująca była obserwacja, że warstwy dielektryczne charakteryzujące się najwyższymi wartościami przenikalności podobnie, jak miało to miejsce w przypadku warstw wytwarzanych metodą ALD, zawierały w sobie dużą objętość fazy krystalicznej. Wyselekcjonowane zestawy parametrów procesu warstw HfO_x oraz HfO_xN_y wykorzystane zostały do technologii struktur MIS i zbadana została stabilność termiczna wykonanych struktur. Rezultaty były ponownie dość podobne do tych zaobserwowanych w pracy [4], gdyż okazało

się, że powyżej temperatury, w tym wypadku – 300°C, właściwości elektro-fizyczne struktur MIS ulegają znacznemu pogorszeniu. Wyniki te były o tyle zaskakujące, że mechanizm powstawania warstwy HfO_x w trakcie reaktywnego rozpylania magnetronowego różni się istotnie od czysto chemicznego mechanizmu narastania warstw w trakcie metody ALD. Skorelowano zwiększenie gęstości stanów powierzchniowych, gęstości ładunku efektywnego oraz zmniejszenie wartości napięć przebicia struktur po przeprowadzonym wygrzewaniu ze wzrostem zawartości fazy krystalicznej, co wykazały badania XRD. Podobne trendy zmian zaobserwowano w przypadku warstw tlenko-azotków hafnu, choć budowa i zmiany w strukturze tych warstw były dużo bardziej skomplikowane z uwagi na obecność dodatkowego pierwiastka w składzie chemicznym. Bardzo znaczącym wynikiem było uzyskanie wartości względnej przenikalności elektrycznej warstwy tlenku hafnu po wygrzewaniu w temperaturze 300°C na poziomie 36. Jest to jeden z najlepszych wyników zanotowanych w literaturze dla warstwy *high-k* wytwarzanej za pomocą tej metody, znacznie lepszy od warstw wytwarzanych metodą ALD (dla tego samego zakresu grubości).

Zoptymalizowany zestaw parametrów procesu wytwarzania warstwy tlenku hafnu został wykorzystany do przygotowania przyrządów MIS dla kolejnego eksperymentu, który miał zbadać możliwości wykorzystania struktur z podwójną warstwą dielektryka bramkowego w nieulotnych pamięciach półprzewodnikowych wraz z badaniami odporności radiacyjnej tego typu struktur. W pracy [9] zostały wykonane struktury z dielektrykiem bramkowym w postaci $\text{SiO}_x\text{N}_y/\text{HfO}_x$. Fizyczna grubość tlenko-azotku krzemu wynosiła 3.5nm lub 9nm, natomiast tlenku hafnu 50nm, co w rezultacie dawało efektywną grubość elektryczną (*EOT*) całego układu *gate stack*, odpowiednio 11.2nm oraz 9.4nm oraz efektywne wartości względnej przenikalności 20 oraz 26. Wykonane w ramach tej pracy przyrządy półprzewodnikowe zostały scharakteryzowane elektrycznie z punktu widzenia wykorzystania w pamięciach NVSM. Okazało się, że uzyskano bardzo duże okna pamięciowe – zmiany U_{fb} w szerokim zakresie napięć polaryzujących wynosiły od 3.5V do 5.6V, w zależności od grubości warstwy podkładowego tlenko-azotku krzemu. Były to wartości porównywalne (a czasem lepsze) z wynikami uzyskanymi dla struktur z wykorzystaniem dielektryków typu *high-k* wytwarzanych metodą ALD, co było oryginalnym osiągnięciem tej pracy. Wskazywało to również na fakt, że zoptymalizowane w ramach mojej pracy badawczej procesy reaktywnego rozpylania magnetronowego w plazmie w.cz. pozwalają na wytwarzanie warstw tlenku hafnu o podobnych właściwościach elektro-fizycznych do tych otrzymywanych przy wykorzystaniu metody ALD. W ten sposób uzyskałem również pośredni dowód na to, że uważana optymalizacja parametrów procesów technologicznych przy wykorzystaniu metody redukcji liczby eksperymentów za pomocą tablic ortogonalnych Taguchi’ego, przynosi dobre rezultaty. W ramach pracy dokonano także charakteryzacji wpływu promieniowania jonizującego na stabilność charakterystyk elektrycznych

struktur testowych MIS. Diagnostyka ta jest bardzo istotna z punktu widzenia wykorzystania struktur półprzewodnikowych w pamięciach pracujących w realnych warunkach, m.in. w zastosowaniach kosmicznych czy w nieprzyjaznych warunkach środowiskowych (tzw. *radiation hard*). Wykonane struktury z podwójną warstwą dielektryka bramkowego zostały napromieniowane promieniowaniem gamma (dwie różne dawki – 5/50kGy) oraz wiązką wysokoenergetycznych elektronów. Okazało się, że struktura podwójnej warstwy dielektryka bramkowego jest wyjątkowo odporna, niezależnie od typu promieniowania, choć charakterystyki pojemnościowo-napięciowe uwidaczniają efekt indukowania się ładunku w warstwach dielektrycznych. Jednak jest to związane z wysyceniem stanów pułapkowych, co nie wpływa negatywnie na jakość wykonanych struktur MIS, szczególnie w perspektywie aplikacji w strukturach pamięciowych. Świadczy o tym stabilność charakterystyk elektrycznych struktur testowych MIS, m.in. powtarzalne przebiegi zależności gęstości prądu upływu od napięcia polaryzującego, brak zmian wartości napięcia przebicia oraz stabilne zmiany napięcia płaskich pasm pod wpływem napięć polaryzujących. W rezultacie, uzyskaliśmy bardzo długie czasu magazynowania ładunku (ekstrapolowane do 10 lat – standard dla pamięci typu *flash*) na poziomie od 4V do 6V, w zależności od typu napromieniowania. To bardzo dobre i istotne wyniki dla ewentualnego wykorzystania takiej struktury bramki w przyszłości do technologii nieulotnych pamięci półprzewodnikowych.

W ramach mojej pracy naukowej przeprowadzałem badania w kierunku wykorzystania struktur z dielektrykiem bramkowym w postaci warstwy typu *high-k* przy wykorzystaniu innych typów warstw, m.in. warstw bazujących na związkach gadolinu. Jest to metal z grupy pierwiastków często badanych w kierunku zastosowań w zaawansowanych przyrządach półprzewodnikowych. Pierwsze prace powstałe jeszcze w ramach współpracy z laboratorium AMO. W pracy [6] dokonane zostało porównanie właściwości elektro-fizycznych struktur MISFET z $\text{SiO}_2/\text{Gd}_2\text{O}_3$ (4nm + 10nm) ze strukturami MIS bazującymi na warstwach wytwarzanych metodą ALD [4,5,12]. Warstwy tlenku gadolinu zostały wykonane za pomocą reaktywnego rozpylania magnetronowego. Badane struktury MIS zostały scharakteryzowane elektrycznie. Z uwagi na brak standardowych kondensatorów MIS, do charakteryzacji układu podwójnej warstwy dielektrycznej $\text{SiO}_2/\text{Gd}_2\text{O}_3$ została wykorzystana nowoczesna metoda *split-CV*. W pracy wykazano typową zależność ruchliwości nośników, która to decyduje o sprawności przełączania struktury tranzystora, w zależności od rozmiarów geometrycznych kanału. Moje badania wykazały, że zaskakująco niska ruchliwość nośników wynika z niedopracowanej technologii struktur testowych w laboratorium AMO. Prądy upływu przez strukturę bramki był jednak akceptowalny dla technologii MOS i porównywalny z dużo grubszymi (*EOT*) warstwami wytwarzanymi metodą ALD. Badane struktury MISFET charakteryzowały się małymi oknami pamięciowymi, na poziomie 1V, co w porównaniu do struktur otrzymanych przy

wykorzystaniu metody ALD było słabszym wynikiem. Jednak stabilność utrzymywania napięcia płaskich pasm/napięcia progowego tranzystora okazała się bardzo dobra. Badania struktur MISFET przeprowadzone w temperaturach 25°C i 85°C wykazały, że uzyskane okna pamięciowe wynoszą odpowiednio ~1.67V i ~0.86V, co rokuje w perspektywie wykorzystania takich strukturach w pamięciach NVSM.

W pracy [14] przedstawiono optymalizację technologii warstw tlenku gadolinu (GdO_x) wytwarzanego w laboratorium IMiO PW za pomocą reaktywnego rozpylania magnetronowego. Zbadano wpływ parametrów wejściowych procesów wytwarzania warstwy na uzyskiwane parametry elektryczne i materiałowe warstw dielektrycznych. Uzyskano warstwy tlenkowe bardzo gładkie o dobrej jednorodności i małym współczynniku chropowatości (parametr RMS – ang. *Root Mean Square* – na poziomie od 0.5nm do 2nm). Zaobserwowano silną zależność mocy dostarczonej do obszaru plazmy i wartości efektywnej przenikalności elektrycznej warstw GdO_x – dla mocy 1300W uzyskano maksymalną wartość $k \sim 11$. Oryginalnym osiągnięciem tej pracy było to, że dobierając parametry procesów rozpylania warstw dielektrycznych możemy relatywnie prosto ‘sterować’ właściwościami warstw i dobierać je pod konkretne zastosowania. Wyniki tej pracy potwierdziły, podobnie jak w pracy [6], że technologia warstw bazujących na tlenku gadolinu wymaga dalszej optymalizacji, aby można było wykorzystać te warstwy w strukturach MIS/MISFET. Warto zaznaczyć, że prace związane z technologią i diagnostyką struktur bazujących na warstwach *high-k* wytwarzanych za pomocą reaktywnego rozpylania magnetronowego były prezentowane na szeregu krajowych i międzynarodowych konferencjach naukowych [m.in.: 38,39,41,45,53,57,69,73,74,76].

W mojej pracy naukowej, oprócz badań i poszukiwań najkorzystniejszych struktur dielektryka bramkowego do zastosowań w przyrządach półprzewodnikowych, uczestniczyłem w pracach zmierzających do poprawy jakości struktur MIS/MISFET za pomocą ‘niestandardowych’ technologii. W trakcie realizacji prac związanych z technikami plazmowymi okazało się, że intencjonalne wprowadzenie jonów azotu i fluoru w przypowierzchniowy obszar półprzewodnika, powoduje poprawę właściwości elektrofizycznych układu półprzewodnik/dielektryk. Do tej pory zaproponowano szereg metod implantacji jonów do obszaru półprzewodnika. Do metod tych można zaliczyć m.in. klasyczną wysokoenergetyczną implantację jonów, osadzanie z fazy ciekłej LPD (z ang. *Liquid Phase Deposition*), czy utlenianie w atmosferze zawierającej tlen (O_2) i trójfluorek azotu (NF_3). Jednak każda z tych technologii posiada swoje ograniczenia technologiczno-konstrukcyjne. Zaproponowana przez nas metoda realizowana jest w klasycznych reaktorach do prowadzenia procesów PECVD oraz RIE i charakteryzuje się niską temperaturą procesu oraz relatywnie dużymi koncentracjami implantowanych jonów. Warto podkreślić także fakt, że w ramach pierwszego

konkursu Narodowego Centrum Nauki na finansowanie projektów badawczych projekt mojego współautorstwa, pt.: *Ultra-płytką plazmowa implantacja jonów na potrzeby technologii zaawansowanych struktur MOS/MOSFET wytwarzanych na krzemie i węglu krzemu – charakterystyka zjawiska, próby optymalizacji technologicznej* uzyskał finansowanie na lata 2012-2016 [1.6].

W ramach moich prac badawczych podjąłem próby wykorzystania tej technologii do poprawy jakości układu półprzewodnik/dielektryk typu *high-k*. W pracy [11] zostały wykonane m.in. struktury MIS z pojedynczą warstwą dielektryczną w postaci tlenko-azotku krzemu o grubości 7nm. Struktury te zostały wykonane na podłożach krzemowych z uprzednio implantowanymi jonami fluoru z plazmy opartej na czterofluorek węgla (CF_4). Jony fluoru implantowane były przy wykorzystaniu dwóch typów reaktorów, tj. do prowadzenia procesu PECVD oraz RIE. W tym miejscu warto podkreślić, że budowa obu reaktorów plazmowych jest zasadniczo odmienna. Najważniejszą różnicą jest inna geometria elektrod, która ma istotny wpływ na energię i gęstość jonów w plazmie w.cz. W celu zbadania stabilności termicznej implantowanych jonów oraz zmian we właściwościach elektrycznych struktur MIS przeprowadzono również dodatkowe procesy wysokotemperaturowego wygrzewania w atmosferze argonu. W celu identyfikacji rozkładu i koncentracji implantowanego fluoru układy półprzewodnik/dielektryk charakteryzowane były za pomocą spektroskopii mas jonów wtórnych (SIMS).

Realizacja tej pracy przyniosła szereg istotnych wniosków. Maksymalne koncentracje fluoru w zlokalizowane są bardzo blisko interfejsu półprzewodnik/warstwa pasywująca (bogata we fluor). Jedynie w przypadku modyfikacji powierzchni krzemu w reaktorze do RIE można było zauważyć zwiększoną koncentrację fluoru w objętości warstwy dielektryka bramkowego w stosunku do koncentracji fluoru w warstwie modyfikowanej w reaktorze do PECVD. Kolejnym wnioskiem było to, że uzyskane koncentracje jonów fluoru w obszarze przypowierzchniowym półprzewodnika są podobne, niezależnie od typu reaktora, w którym realizowana była implantacja. Bardzo ważnym wnioskiem było także to, że w przeciwieństwie do wyników spotykanych w literaturze, fluor implantowany z plazmy w.cz. jest stabilny termicznie, co wykazały pomiary przeprowadzone za pomocą metody SIMS. Analiza charakterystyk pojemnościowo-napięciowych (C-V) oraz prądowo-napięciowych (I-V) badanych struktur testowych MIS wykazała, że układy półprzewodnik/warstwa pasywująca/dielektryk bramkowy wykonane na zmodyfikowanych podłożach krzemowych, charakteryzują się mniejszymi (co do wartości bezwzględnej) wartościami napięcia płaskich pasm oraz ładunku efektywnego w porównaniu do struktur referencyjnych. Natomiast cechą negatywną

prezentowanej technologii jest to, że maleje przenikalność elektryczna wykonanych dielektryków bramkowych.

W pracy [13] technologia ultra-płytkiej implantacji fluoru i azotu została wykorzystana do analizy zmian właściwości elektro-fizycznych struktur MIS z pojedynczym dielektrykiem bramkowym w postaci tlenku hafnu. W ramach tej pracy eksperymenty technologiczne zostały podzielone na dwa etapy: w pierwszym oceniono wpływ parametrów procesu na koncentrację jonów fluoru i azotu zgodnie z analizą trendów zależności w zastosowanej metodzie Taguchi'ego, natomiast w drugim etapie wybrano dwa zestawy parametrów procesu, które pozwalają na płytką oraz głęboką implantację jonów. Po przeprowadzeniu implantacji plazmowej zostały wykonane struktury MIS w celu charakteryzacji elektrycznej. Dodatkowo, zostały wykonane struktury, gdzie implantacja była prowadzona przez cienką warstwę dielektryka (SiO_2) zabezpieczającego powierzchnię podłoża półprzewodnikowego. W pracy tej uzyskano szereg interesujących rezultatów, które wnoszą duży wkład w technologię tego typu struktur półprzewodnikowych. Po pierwsze, wykorzystując precyzyjne sterowanie parametrami procesów plazmowych (PECVD i RIE) możemy sterować koncentracją implantowanych jonów, która jest zaskakująco wysoka (nawet 10^{19} atomów/ cm^2), jak na tę metodę implantacji. Po drugie, w przeciwieństwie do innych technik implantacji, implantacja plazmowa powoduje powstanie maksimum koncentracji w przypowierzchniowym obszarze półprzewodnika. Potwierdzają to badania wykonane techniką SIMS. Zgodnie z założeniami, wykorzystanie cienkiej warstwy dielektrycznej w trakcie procesu powoduje zmniejszenie koncentracji w objętości półprzewodnika, ale w istotny sposób wpływa na jakość otrzymanego układu półprzewodnik/dielektryk. Okazuje się, że gęstość stanów powierzchniowych w obszarze przejściowym maleje, a więc zastosowanie warstwy zabezpieczającej przyniosło zamierzony cel – jest to bardzo ważna obserwacja z punktu widzenia projektowania technologii przyrządów półprzewodnikowych z wykorzystaniem plazmowej implantacji jonów. Analiza charakterystyk elektrycznych wykazała również, że na tym etapie prowadzonych badań dużo większą poprawę właściwości elektrofizycznych struktur MIS z dielektrykiem w postaci warstwy *high-k* uzyskano dla struktur wykonanych na podłożach implantowanych azotem, na co wskazuje prawie trzykrotny wzrost wartości napięć przebicia w stosunku do struktur referencyjnych. W tej chwili trwają prace badawcze i eksperymenty technologiczne z wykorzystaniem ultra-płytkiej plazmowej implantacji jonów do technologii struktur z podwójną warstwą dielektryka bramkowego, wytwarzanych zarówno na podłożach krzemowych, jak i węgliko-krzemowych.

Podsumowując, do najważniejszych elementów mojego wkładu w rozwój technologii i charakteryzacji warstw dielektrycznych o wysokiej wartości przenikalności elektrycznej, należy zaliczyć:

- Opracowanie technologii chemicznego osadzania z fazy lotnej wspomaganego plazmą (PECVD) i optymalizacja właściwości elektro-fizycznych ultra-cienkich (do 6nm) warstw tlenko-azotku krzemu (SiO_xN_y) w kierunku zastosowań w przyrządach MIS/MISFET z podwójną warstwą dielektryka bramkowego
 - Wszechstronna charakteryzacja strukturalna, optyczna i elektryczna oraz zbadanie stabilności termicznej wytwarzanych warstw
 - Korelacja parametrów procesu PECVD i uzyskiwanych właściwości elektro-fizycznych warstw tlenko-azotków krzemu; identyfikacja najkorzystniejszych zestawów parametrów procesu PECVD w celu otrzymania dobrej jakości warstw dielektrycznych
- Opracowanie technologii reaktywnego rozpylania magnetronowego warstw tlenku hafnu (HfO_x) i tlenko-azotku hafnu (HfO_xN_y) w kierunku zastosowań w przyrządach MIS/MISFET z podwójną warstwą dielektryka bramkowego
 - Wszechstronna charakteryzacja strukturalna, optyczna i elektryczna oraz zbadanie stabilności termicznej wytwarzanych warstw
 - Korelacja parametrów procesu reaktywnego rozpylania magnetronowego i uzyskiwanych właściwości elektro-fizycznych warstw dielektrycznych
 - Uzyskanie parametrów elektrycznych o najlepszych wartościach spotykanych w literaturze (dla tej metody wytwarzania)
- Opracowanie technologii struktur MIS/MISFET z podwójną warstwą dielektryka bramkowego z wykorzystaniem dielektryków podkładowych wytwarzanych metodą PECVD (SiO_2 , SiO_xN_y) oraz 'klasycznych' dielektryków typu *high-k* (HfO_2 , HfO_x , HfO_xN_y , Al_2O_3 , GdO_x , Gd_2O_3) wytwarzanych za pomocą metody osadzania warstw atomowych i reaktywnego rozpylania magnetronowego w plazmie w.cz.
 - Eksperymentalna weryfikacja i potwierdzenie możliwości (jako pierwsza w literaturze) wykorzystania metody PECVD i układów z podwójną warstwą dielektryka bramkowego w strukturach dla nieulotnych pamięci półprzewodnikowych (NVSM), a także technologii przyrządów MIS/MISFET na węglu krzemu (SiC) oraz strukturach cienkowarstwowych (TFT)
 - Zbadanie stabilności termicznej wykonanych układów warstw dielektrycznych i struktur półprzewodnikowych; korelacja parametrów procesu wygrzewania i parametrów materiałowych warstw i bazujących na nich struktur półprzewodnikowych

- Wszechstronna charakteryzacja elektryczna i niezawodnościowa struktur MIS/MISFET w perspektywie wykorzystania w strukturach typu NVSM
- Identyfikacja mechanizmów transportu ładunków w strukturach z podwójną warstwą dielektryka bramkowego dla opisu fizyki działania przyrządów MIS/MISFET
- Zbadanie wpływu promieniowania oraz odporności na radiację (gamma oraz wysokoenergetycznych elektronów) na właściwości i stabilność charakterystyk elektrycznych struktur MIS/MISFET
- Analiza właściwości strukturalnych oraz optycznych cienkich warstw dielektrycznych dla zastosowań w przyrządach półprzewodnikowych poprzez zaawansowane badania strukturalne (AFM, TEM, XPS, SIMS, SEM, elipsometria spektroskopowa)
- Opracowanie metody plazmowej implantacji jonów (fluoru i azotu) w celu wykonania struktury półprzewodnik/dielektryk o polepszonych parametrach elektrycznych
 - Potwierdzenie możliwości wykorzystania 'klasycznych' reaktorów do prowadzenia procesów PECVD i RIE do ultra-płytkiej w celu wykonania struktury bramki $\text{Si/SiO}_x\text{N}_y$ i Si/HfO_x o korzystniejszych właściwościach elektro-fizycznych
 - Zbadanie wzajemnych zależności parametrów procesu plazmowej implantacji w reaktorach do PECVD i RIE oraz uzyskiwanych parametrów wyjściowych (strukturalnych i elektrycznych wykonanych warstw i struktur MIS) oraz optymalizacja procesu

D) Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

Technologia i charakteryzacja materiałów, struktur i przyrządów półprzewodnikowych jest bardzo interdyscyplinarna. Zawiera w sobie elementy inżynierii materiałowej, chemii, fizyki zjawisk uwidaczniających się skali mikro- i nanometrycznej, mikromechaniki oraz elektroniki. Wiedzę z zakresu technologii półprzewodnikowej można wykorzystać w wielu obszarach i taki charakter mają prowadzone przeze mnie prace naukowo-badawcze. Od wielu lat uczestniczę w szeregu przedsięwzięć naukowych. Poza jednotematycznym cyklem 15 publikacji, moje osiągnięcia naukowo-badawcze obejmują 18 innych publikacji, w tym 6 z list ISI JCR [16-21]. Większość z nich dotyczy technologii i charakteryzacji warstw dielektrycznych i struktur MIS/MISFET [16,22-26], optymalizacji plazmowej implantacji jonów dla technologii MIS, ale i dla powłok antykorozyjnych [18,19,29,30,33], wykorzystaniu warstw dielektrycznych w ogniwach fotowoltaicznych [17], technologii czujników

światłowodowych [20,32], zaawansowanemu modelowaniu struktur i przyrządów MIS [21], czy technologii przyrządów TFT [27] oraz MOEMS [28].

Wyniki moich prac były prezentowane ~60 razy podczas konferencji naukowych zarówno z zakresu elektroniki, jak i inżynierii materiałowej oraz fotoniki. W przypadku znaczącej większości ze wspomnianych prezentacji ustnych (13 referatów [K.1-K.13], w tym 5 zaproszonych [K.1,K.2,K.3,K.4,K.6]) i plakatowych byłem pierwszym i prezentującym autorem. Kilka moich prac zostało również wyróżnionych w konkursach dla młodych badaczy [J.4,J.7,J.8,J.9]. W przypadku kilku konferencji międzynarodowych i krajowych byłem członkiem komitetu organizacyjnego [C.2,C.3,C.4,C.5]. Należy podkreślić, że w trakcie organizacji jednej z najbardziej prestiżowych międzynarodowych konferencji *International Conference on Insulating Films on Semiconductors – INFOS 2013*, poświęconej technologii, charakteryzacji i modelowaniu zaawansowanych struktur i materiałów półprzewodnikowych, pełniłem rolę vice-przewodniczącego komitetu organizacyjnego oraz *vice-chair* konferencji.

Uzyskanie wielu z omawianych osiągnięć nie byłoby możliwe bez pozyskania finansowania na przeprowadzenie kosztownych badań technologicznych. Uczestniczę lub uczestniczyłem w wielu projektach badawczych finansowanych zarówno z UE [H.2,H.3,H.4], jak i funduszy krajowych [H.1,I.1-I.13].

Ostatni mój sukces to koordynowanie prac (ze strony PW) związanych z przygotowaniem wniosku projektowego, pt.: *Nanophotonics with metal – group-IV-semiconductor nanocomposites: From single nanoobjects to functional ensembles* [H.1]. W ramach pierwszego konkursu realizacji projektów międzynarodowych organizowanego przez NCBiR, wniosek ten uzyskał finansowanie na lata 2016 – 2019. Projekt ten obejmuje współpracę państw Grupy Wyszehradzkiej i Japonii. Naszymi partnerami w tym projekcie są renomowane na świecie jednostki naukowe: *Charles University in Prague, Faculty of Mathematics and Physics* (Czechy), *Kobe University, Graduate School of Engineering* (Japonia), *Wigner Research Centre for Physics, Hungarian Academy of Sciences & Budapest University of Technology and Economics, Department of Atomic Physics* (Węgry) oraz *Institute of Physics, Slovak Academy of Science* (Słowacja). Celem niniejszego projektu są badania nanostruktur bazujących na materiałach półprzewodnikowych z grupy IV dla zastosowań fonicznych. W ramach projektu dokonane zostaną próby pokonania przeszkód w wykorzystaniu tych materiałów w fotonice (mały przekrój absorpcji oraz niska emisja spowodowana skośną przerwą energetyczną) poprzez wytwarzanie nanostruktur kompozytowych metal-półprzewodnik (SiGe, silnie domieszkowany krzem Si: B, P, etc.). Zwiększenie wydajności optycznej uzyskane zostanie dzięki sprzężeniu ekscytron-plazmon, efektowi Purcella oraz modyfikacji sieci krystalograficznej wskutek wprowadzenia

naprężenia. Nanostruktury kompozytowe zostaną wszechstronnie zbadane i scharakteryzowane – od pojedynczych nano-objektów, poprzez nano-klastry, aż po funkcjonalne nano-struktury półprzewodnikowe. Moje zadania w ramach tej pracy skupiają się na opracowaniu technologii struktur testowych funkcjonalizowanych nanokrystalitami krzemowymi (niedomieszkowanymi oraz domieszkowanymi borem i fosforem), które wytwarzane są nieklasycznymi metodami chemicznymi.

Jako główny wykonawca realizuję wspomniany już wcześniej projekt dotyczący badań specyficznej technologii ultra-płytkiej plazmowej implantacji jonów do podłoży krzemowych (Si) i węgliko-krzemowych (SiC) [I.6]. Tematyka tego projektu jest bardzo rozległa i wiąże się z badaniami nowej metody poprawy właściwości elektro-fizycznych układu półprzewodnik/dielektryk, co w przyszłości może przełożyć się na istotne zastosowania praktyczne w technologii układów scalonych – mikroprocesorów, pamięci itp.

W zakresie prac związanych również z technologią przyrządów na węglu krzemu uczestniczyłem także w pracach technologicznych projektu zamawianego (PBZ-MEiN-6/2/2006), pt.: *Nowe technologie na bazie węgla krzemu i ich zastosowanie w elektronice wielkich częstotliwości, dużych mocy i wysokich temperatur*, które zakończyły się demonstracją pierwszego w Polsce (i jednego z pierwszych na świecie) tranzystora MISFET wykonanego na tym półprzewodniku. W ramach tego projektu moje zadania związane były z opracowaniem technologii wykonania najważniejszego elementu z punktu widzenia działania takiego tranzystora – dielektryka bramkowego. Do opracowania struktury bramki tego tranzystora wykorzystano zoptymalizowane przeze mnie parametry procesu PECVD warstw tlenku (SiO_2) i tlenko-azotku krzemu (SiO_xN_y). Wyniki tego projektu prezentowane były na kilku konferencjach [54,56,86].

Na początku sierpnia 2011 roku udało mi się uzyskać stypendium Fundacji im. Dr. Anatola i Pameli Dekaban (*Dekaban Foundation*) Uniwersytetu Michigan. Stypendium i zaproszenie pozwoliło mi na wyjazd do Stanów Zjednoczonych w celu odbycia półrocznego stażu naukowego na *Department of Electrical Engineering and Computer Science* jako *Visiting Research Assistant Scientist* (od października 2011 do kwietnia 2012 roku) [G.2]. W trakcie pobytu naukowego w USA zajmowałem się badaniem i optymalizacją struktur tranzystorów cienkowarstwowych (TFT) z nowymi typami warstw półprzewodnikowych i dielektrycznych, które potencjalnie w przyszłości mogą zostać wykorzystane komercyjnie (Zespół prof. Jerzego Kanickiego). Prace te finansowane były przez firmę prywatną (*Guardian Industries*). Przedstawiając moje plany naukowe uzyskałem jednocześnie dodatkowe stypendium naukowe-wyjazdowe ufundowane przez Centrum Studiów Zaawansowanych PW [J.2]. Zdobyte kompetencji i gruntownej wiedzy w tej dziedzinie pozwoliło mi już niedługo po powrocie na rozpoczęcie interdyscyplinarnych prac badawczych z zakresu tej pasjonującej i niezwykle

przyszłościowej tematyki na Politechnice Warszawskiej. W czerwcu 2012 i 2013 uzyskałem Granty Dziekańskie z zakresu tematyki badań i charakteryzacji struktur TFT dla aplikacji w przyrządach optoelektronicznych wytwarzanych na podłożach elastycznych i transparentnych [I.4,I.5]. Były to pierwsze projekty badawcze realizowane na PW w tej dyscyplinie naukowej. Byłem także opiekunem naukowym dwóch prac dyplomowych, które dotyczą wykorzystania struktur TFT w wyświetlaczach LCD. Uzyskane wyniki po pierwszym półroczu pracy zostały już zaprezentowane na kilku konferencjach naukowych [66,78,81], a także powstały pierwsze publikacje [27]. Prace te będą kontynuowane już w ramach projektu CEZAMAT realizowanego przez Konsorcjum Naukowe, którego liderem jest Politechnika Warszawska.

Swoje kompetencje rozszerzam także w zakresie krzemowych przyrządów fonicznych i optoelektronicznych. Byłem wykonawcą projektu własnego, pt.: *Badania nad źródłami promieniowania koherentnego dla fonicznych układów zintegrowanych wykonanych w technologii krzemowej* [I.9]. Celem tego projektu było stworzenie oryginalnych, zweryfikowanych doświadczalnie, modeli opisujących pracę źródeł promieniowania wykonanych w technologii krzemowej i realizowanych na potrzeby zintegrowanych układów fonicznych. Moje zadania dotyczyły opracowania i przygotowania technologii do wykonania struktur optoelektronicznych, w których będzie następowała generacja ramanowska promieniowania w strukturze falowodowej SOI (typu „rib”) z diodą PIN. Należy podkreślić, że do tej pory tylko grupie naukowców z laboratorium R&D INTEL udało się w 2005 roku wykonać podobnego typu struktury krzemowe. Aktualnie, wykonane w ramach zrealizowanego projektu struktury testowe są charakteryzowane optycznie w profesjonalnych laboratoriach PW. W ramach tej tematyki powstało kilka publikacji i komunikatów konferencyjnych [31,71,72].

Prace i nawiązana współpraca naukowa w ramach powyższego projektu doprowadziła do rozpoczęcia badań i rozwoju technologii nowych jakościowo optoelektronicznych struktur hybrydowych na bazie matryc polimerowych modyfikowanych grafenem oraz na badaniu zjawisk optycznych wynikających z połączenia unikatowych właściwości grafenu i optycznie transparentnych materiałów polimerowych. Jako wykonawca uczestniczę w strategicznym projekcie finansowanym ze środków wewnętrznych PW, pt.: *Funkcjonalizowane grafenem zintegrowane układy fotoniki polimerowej – badania hybrydowych źródeł promieniowania pod kątem uzyskania pracy impulsowej* [I.1]. Zaplanowane badania, w których aktywnie uczestniczę, obejmują zarówno podstawowe eksperymenty technologiczne, jak też wszechstronną charakteryzację właściwości strukturalnych, elektrycznych i optycznych kompozytów grafenowo-polimerowych, uzupełnioną modelowaniem nieliniowych efektów optycznych. W wyniku realizacji tych prac spodziewamy się wnieść duży wkład w rozwój

technologii hybrydowych struktur optoelektronicznych dla zastosowań w nowoczesnej fotonice zintegrowanej. Oczekiwane rezultaty długofalowe mogą potencjalnie prowadzić do znaczącego postępu w dziedzinie elementów optycznych dla aplikacji w superszybkiej komunikacji optycznej, informatyce i dziedzinach pokrewnych.

W zakresie technologii struktur optoelektronicznych wykorzystujących grafen jestem wykonawcą projektu, pt.: *Photograph – Ultra-fast Photodetector based on Graphene* [I.2]. W ramach tego projektu jestem odpowiedzialny za opracowanie technologii struktur fotodetektorów. Realizacja badań przyniosła już pierwsze rokujące wyniki [35,37]. Do tej pory został opracowany projekt masek technologicznych oraz wykonane działające struktury detektorów, które charakteryzowane są w laboratoriach IMiO PW.

Odrębną grupę mojej aktywności stanowią zagadnienia związane z zarządzaniem infrastrukturą badawczą, co jest bardzo ważne z punktu widzenia planowania i prowadzenia skomplikowanych, kosztownych i subtelnych prac technologicznych, szczególnie w dziedzinie technologii materiałów i struktur półprzewodnikowych. Na początku 2014 roku uczestniczyłem w prestiżowym programie organizowanym przez NCBiR – *Wsparcie zarządzania infrastrukturą badawczą (Science Infrastructure Management Support – SIMS)* [G.1]. W ramach tego stażu brałem udział w licznych szkoleniach, wykładach i ćwiczeniach w renomowanych światowych ośrodkach naukowych, takich jak: *Fraunhofer Institute* w Lipsku, *Dresden Technical University* w Dreźnie (Niemcy) czy *IBM Thomas J. Watson Center* w *Yorktown Heights* oraz *Sommers* (USA). Wiedza i doświadczenie wyniesione z tego stażu pozwoliły mi na przeniesienie dobrych rozwiązań do działalności naukowo-badawczej w mojej macierzystej jednostce naukowej oraz na sprawne realizowanie i koordynowanie prac badawczych w projektach, w których uczestniczę. W celu poszerzenia wiedzy, uzyskałem certyfikaty i uczestniczyłem w szkoleniach organizowanych przez firmę *Gamma* [K.3].

Moja kompetencje zostały dostrzeżone również poza jednostką macierzystą. Jestem recenzentem publikacji w wysokonotowanych na ISI Master Journal List periodykach naukowych: *Materials Science and Engineering (B)*, *Journal of Vacuum Science and Technology (A/B)*, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, *Applied Surface Science*, *Thin Solid Films*, *Journal of Applied Physics* oraz *Vacuum*. Od 2012 jestem również ekspertem oceniającym wnioski badawcze składane do Narodowego Centrum Badań i Rozwoju.

W zakresie działalności dydaktycznej chciałbym wyróżnić moją nominację i uczestnictwo jako *Visiting Professor* w Międzynarodowej Letniej Szkole organizowanej przez renomowany *KyungPook National University* (Korea Południowa) [E.1]. W ramach tej szkoły opracowałem autorski cykl wykładów dla studentów studiów I-stopnia, pt.: *Fundamentals of Semiconductor Technologies*. Wykład miał wymiar

45 jednostek ECTS i prowadzony był po angielsku. Warto podkreślić fakt, że *Dziekan School of Electronics Engineering* zaprosił mnie do wygłoszenia cyklu pięciu seminariów dla studentów studiów II stopnia oraz doktorantów. Seminaria te poświęcone były zaawansowanym aspektom technologii materiałów i struktur półprzewodnikowych, a także okazją do zaprezentowania mojej działalności naukowo-badawczej w IMiO PW.

Staram się także aktywnie zachęcać młodzież do zdobywania wiedzy z zakresu szeroko pojętej Naneoelktroniki i Nanotechnologii. Prowadzę zajęcia w ramach Wszechnicy Wydziału Elektroniki i Technik Informacyjnych PW, która organizuje wykłady popularnonaukowe dla uczniów szkół średnich i innych zainteresowanych osób [E.3]. Wielokrotnie (od 2011 roku) wygłaszałem także wykłady i lekcje festiwalowe na Warszawskim Festiwalu Nauki [E.2].

Robert Mroczyński

Szczegółowe zestawienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych zawarto w Załączniku 4a, pt.: „Wykaz opublikowanych prac naukowych lub twórczych prac zawodowych oraz informacja o osiągnięciach dydaktycznych, współpracy naukowej i popularyzacji nauki”.