

Warszawa, 26 maja 2017 r.

dr Piotr Konarski
Instytut Tele- i Radiotechniczny
Ratuszowa 11, 03-450 Warszawa

AUTOREFERAT

1. Imię i Nazwisko:

Piotr Konarski

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

- Dyplom magistra chemii – 1976 r., Wydział Chemii Uniwersytetu Warszawskiego. Tytuł pracy: „Badanie przenikalności dielektrycznej dwuhexyloxyazoksybenzenu w stałym polu elektrycznym”, promotor doc. dr hab. Teodor Krupkowski.
- Stopień naukowy doktora nauk technicznych – 1997 r., Instytut Technologii Elektronowej, Warszawa. Tytuł pracy: „Rzeźba jonowa w analizie profilowej heterostruktur warstwowych”, promotor doc. dr hab. Marian A. Herman.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

Bezpośrednio po ukończeniu studiów w roku 1976, zostałem zatrudniony w Ośrodku Badawczo – Rozwojowym Elektroniki Próżniowej (OBREP) w Warszawie. Instytucja ta kolejno zmieniała nazwy: w roku 1977 na Ośrodek Badawczo – Rozwojowy Techniki Telewizyjnej (OBRTT), w roku 1980 na Ośrodek Badawczo – Rozwojowy Przetworników Obrazu (OBRPO), w roku 1984 ponownie na OBREP, następnie w roku 1993 na Instytut Technologii Próżniowej (ITP). W roku 2005 ITP został włączony do Przemysłowego Instytutu Elektroniki (PIE) a w roku 2007 PIE został włączony do Instytutu Tele- i Radiotechnicznego (ITR). Tak więc pracuję w jednej instytucji, która w ciągu 30 lat miała okazję sześciokrotnie zmieniać nazwę.

W latach 1985 – 1986 odbyłem roczny staż w ramach stypendium Fulbrighta w Laboratory for Research on the Structure of Matter, University of Pennsylvania.

4. Wskazanie osiągnięcia* wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311.):

a) tytuł osiągnięcia naukowego/artystycznego,

Rozwinięcie technik spektrometrii mas jonów wtórnych (SIMS) i spektrometrii mas wyładowania jarzeniowego (GDMS) oraz zastosowanie tych technik do badania mikrocząstek, nanocząstek oraz struktur cienkowarstwowych

b) lista publikacji (autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa, recenzenci wydawniczy):

H1. Konarski, P., Kaufman, E., & Ignaciuk, R. (1999). Próżniowy kolektor pyłów. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Elektronika*, (123), 161–164.

H2. Konarski, P., Iwanejko, I., Mierzejewska, A., & Wymysłowski, A. (2001). Ion sputtering of microparticles in SIMS depth profile analysis. *Vacuum*, 63(4), 685–689.

- H3. Konarski, P.,** Iwanejko, I., Mierzejewska, A., & Diduszko, R. (2001). Morphology of working environment microparticles. *Vacuum*, 63(4), 679–683.
- H4. Konarski, P.,** & Mierzejewska, A. (2003). B₄C/Mo/Si and Ta₂O₅/Ta nanostructures analysed by ultra-low energy argon ion beams. *Applied Surface Science*, 203–204, 354–358.
- H5. Konarski, P.,** Iwanejko, I., & Mierzejewska, A. (2003). SIMS depth profiling of working environment nanoparticles. *Applied Surface Science*, 203–204, 757–761.
- H6. Konarski, P.,** Iwanejko, I., & Ćwil, M. (2003). Core–shell morphology of welding fume micro- and nanoparticles. *Vacuum*, 70, (2-3), 385–389.
- H7. Konarski, P.,** Ćwil, M., Iwanejko, I., Mierzejewska, A., & Diduszko, R. (2004). Morphology of micro- and nanoparticles emitted by copper plants in Western Poland. *Thin Solid Films*, 459(1), 86–89.
- H8. Konarski, P.,** Hałuszka, J., Ćwil, M., Iwanejko, I., Kaczorek, K., Gawęł, J., Pisiewicz, K., Lesiak-Bednarek, A., & Strugała-Stawik, H. (2005). Ion beam analysis of urban aerosol micro and nanoparticles compared with environmentally related children diseases in two Polish towns. *Vacuum*, 78(2), 297–301.
- H9. Konarski, P.,** Hałuszka, J., & Ćwil, M. (2006). Comparison of urban and rural particulate air pollution characteristics obtained by SIMS and SSMS. *Applied Surface Science*, 252(19), 7010–7013.
- H10. Konarski, P.,** Kaczorek, K., Ćwil, M., & Marks, J. (2007). Quadrupole-based glow discharge mass spectrometer: Design and results compared to secondary ion mass spectrometry analyses. *Vacuum*, 81(10), 1323–1327.
- H11. Konarski, P.,** Kaczorek, K., Ćwil, M., & Marks, J. (2008). SIMS and GDMS depth profile analysis of hard coatings. *Vacuum*, 82(10), 1133–1136.
- H12. Konarski, P.,** Kaczorek, K., Balcerzak, B., Hałuszka, J., Ścibor, M., Iwanejko, I., & Zawada, A. (2011). SIMS depth profile analysis of particles collected in an urban environment. *Surface and Interface Analysis*, 43,(1-2), 470–474.
- H13. Konarski, P.,** Kaczorek, K., & Senkara, J. (2011). Effects of vacuum heating in AISI 410 and AISI 321 stainless steels' surface layer revealed by SIMS/GDMS depth profile analysis. *Surface and Interface Analysis*, 43(1-2), 217–220.
- H14. Konarski, P.,** Zawada, A., Kowalczyk, D., & Juda-Rezler, K. (2013). Core-shell structure of fly ash particles: SIMS depth profile analysis. *Surface and Interface Analysis*, 45(1), 592–595.
- H15. Konarski, P.,** Kaczorek, K., Kaliński, D., Chmielewski, M., Pietrzak, K., & Barlak, M. (2013). Ion implanted inconel alloy–SIMS and GDMS depth profile analysis. *Surface and Interface Analysis*, 45(1), 494–497.
- H16. Konarski, P.,** Miśnik, M., Zawada, A., & Brongersma, H. H. (2014). Storing matter technique performed in the analytical chamber of a quadrupole SIMS analyser. *Surface and Interface Analysis*, 46(S1), 360–363.
- H17. Konarski, P.,** Miśnik, M., Zawada, A., Olszewska-Czopik, K., Iwanejko, I., Ścibor, M., Balcerzak, B., & Hałuszka, J. (2014). Development of characterization procedure of particulate matter pollution collected in immediate vicinity of urban residents. *Surface and Interface Analysis*, 46(S1), 389–392.

H18. Miśnik, M., **Konarski, P.**, & Zawada, A. (2016). Metal oxide collectors for storing matter technique applied in secondary ion mass spectrometry. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B – Beam Interactions with Materials and Atoms*, 371, 199–204.

H19. **Konarski, P.**, Miśnik, M., & Zawada, A. (2016). Two-dimensional elemental mapping using glow discharge mass spectrometry. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 31, 2192–2197.

c) omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.

Moim celem naukowym było rozwinięcie technik badawczych spektrometrii mas jonów wtórnych (SIMS) i spektrometrii mas wyładowania jarzeniowego (GDMS) a także zastosowanie tych technik do badań takich materiałów jak drobiny pyłów (mikrocząstki i nanocząstki) oraz materiały cienkowarstwowe.

Technika SIMS jest jedną z klasycznych technik analizy powierzchni ciała stałego, znaną od ponad sześćdziesięciu lat. Badana próbka umieszczona jest w wysokiej próżni i bombardowana jest przez niskoenergetyczną wiązkę jonów pierwotnych. Na skutek zjawiska rozpylania jonowego powstają jony wtórne, które rejestrowane są przez spektrometr mas. W zależności od konstrukcji aparatury badawczej, technika ta umożliwia analizę składu powierzchni, analizę profilową w głąb materiału a także mapowanie powierzchni lub analizę trójwymiarową. Analiza ilościowa w technice SIMS jest utrudniona poprzez tzw. efekty matrycy¹. Zwykle, aby uzyskać precyzyjne wyniki analizy ilościowej należy posługiwać się wzorcami koncentracji danych pierwiastków w danych matrycach.

Technika analityczna GDMS jest techniką stosowaną do analizy materiałów od ok. czterdziestu lat. Technika ta także wykorzystuje zjawisko rozpylania jonowego, jednak badana próbka nie jest umieszczona w otoczeniu wysokiej próżni. Próbka jest katodą w komorze wyładowania jarzeniowego, które odbywa się w rozrzedzonym argonie. Powstające jony ekstrahowane są przez diafragmę do spektrometru mas umieszczonego w komorze wysokiej próżni. Efekty matrycy w tej technice są niewielkie w porównaniu z techniką SIMS. Do tej pory technika GDMS nie była stosowana do mapowania powierzchni.

Przedstawiona powyżej lista zawiera 19 prac powiązanych tematycznie uszeregowanych w porządku chronologicznym. Prace te stanowią trzy grupy opisane w tabeli 1.

Tabela 1. Opis trzech grup publikacji.

Numer grupy	Numery prac	Prace dotyczą:
1	H1, H2, H4, H10, H16, H18 i H19	konstrukcji aparatury badawczej a także opracowania procedur badawczych.
2	H2, H3, H5, H6, H7 H8, H9, H12, H14 i H17	badania drobin pyłów *)
3	H4, H11, H13 i H15	badania płaskich układów warstwowych (cienkich warstw) *)
*) Wyniki uzyskane dzięki zastosowaniu aparatury i rozwiązań konstrukcyjnych przedstawionych w pracach pierwszej grupy.		

¹ Zalm, P. C. (1994). Secondary ion mass spectrometry. *Vacuum*, 45(6-7), 753-772.

c1) Omówienie prac pierwszej grupy

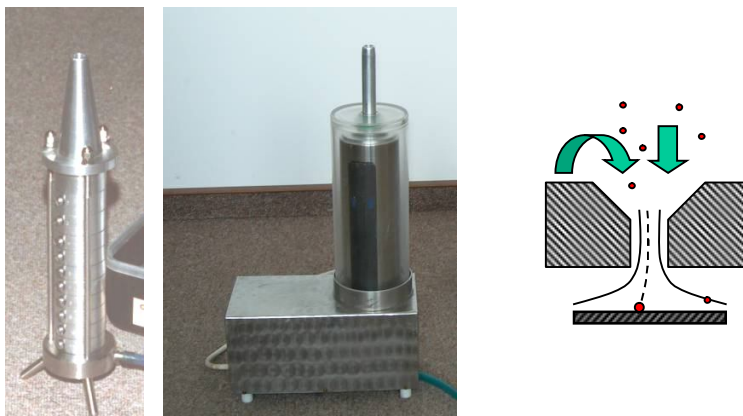
Prace te dotyczą:

- opracowania próżniowego kolektora pyłów (praca **H1**)
- opracowania procedury badania mikrocząstek i nanocząstek pyłów wykorzystującej ciągły obrót podłoża z badanymi drobinami względem wiązki trawiącej (praca **H2**)
- opracowania aparatury SIMS o nazwie SAJW-05 przeznaczonej zarówno do badania cienkich warstw jak i mikrocząstek i nanocząstek (praca **H4**)
- opracowania aparatury badawczej GDMS o nazwie SMWJ-01 (praca **H10**)
- opracowania procedury badawczej gromadzenia materiału rozpylonego (storing matter) w technice analitycznej SIMS (praca **H16**)
- zastosowania kolektorów tlenkowych przeznaczonych do procedury gromadzenia materiału rozpylonego w technice SIMS (praca **H18**)
- opracowania modyfikacji techniki analitycznej GDMS umożliwiającej dwuwymiarowe obrazowanie badanej powierzchni (praca **H19**)

Pierwsza grupa publikacji zawiera wyniki prac będące główną częścią składanej rozprawy. Moim celem naukowym było opracowanie konstrukcji i budowa aparatury badawczej przeznaczonej do badania mikrocząstek i nanocząstek a także płaskich układów warstwowych.

Moim celem było także opracowanie szeregu nowych procedur badawczych, w tym procedury analizy ilościowej 'storing matter' w technice SIMS, a także procedury umożliwiającej mapowanie powierzchni techniką GDMS.

W pracy **H1** opisałem konstrukcję oraz wyniki przeprowadzonych przeze mnie testów próżniowego kolektora pyłów tzw. impaktora kaskadowego (rys. 1). Urządzenie to, a także jego zmodyfikowana wersja z obrotowymi płytkami podłożowymi, pełniło bardzo ważną funkcję w moich dalszych pracach dotyczących badań drobin pyłów. Przy jego pomocy pobierałem drobinę pyłów zanieczyszczających powietrze w środowisku naturalnym oraz w środowisku pracy.



Rys. 1. Próżniowy kolektor pyłów, wersja z nieruchomymi podłożami, opisana w pracy **H1** widoczna jest z lewej strony. Wersja z obracającymi się podłożami (nie została opisana w publikacji) widoczna jest z prawej strony. Przedstawiono też schemat działania kolektora wychwytyjącego ze strumienia powietrza drobinę o większej bezwładności a przepuszczającą drobinę o mniejszej bezwładności.

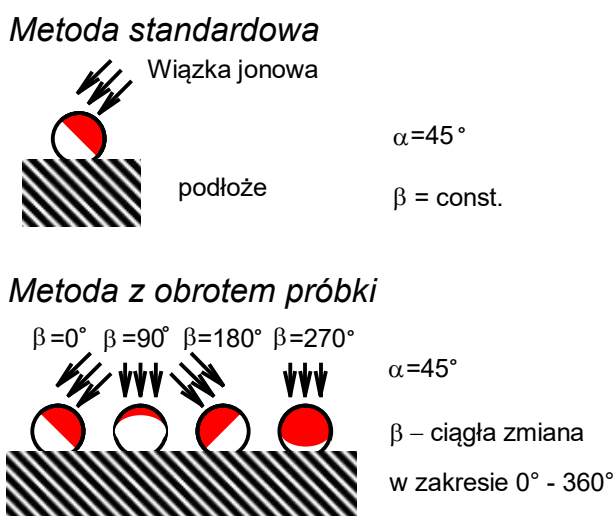
Próżniowy kolektor pyłów służył do gromadzenia mikrocząstek na podłożach i oznaczania rozkładów wielkości tych mikrocząstek. W kolektorze tym drobinę pyłów gromadzą się na płytkach podłożowych w dziewięciu klasach średnic aerodynamicznych, podanych w μm : 0,19 – 0,22; 0,22 – 0,29; 0,29 – 0,42; 0,42 – 0,70; 0,70 – 1,3; 1,3 – 2,7; 2,7 – 4,5; 4,5 – 8; 8 – 15.

Zmodyfikowana wersja kolektora próżniowego opisanego w publikacji **H1** została wyposażona w układ płytek podłożowych obracających się wokół osi kolektora. Modyfikacja ta

umożliwiła równomierną depozycję drobin pyłów na tych płytkach, co było szczególnie istotne przy prowadzeniu badań materiałów pyłowych techniką SIMS.

Na rys. 1 przedstawiam zdjęcia podstawowej i zmodyfikowanej wersji próżniowego kolektora pyłów a także schemat zasady działania kolektora. Drobinę o danej bezwładności (średnicy aerodynamicznej) zatrzymywane są na podłożu umieszczonym pod dyszą, a drobinę o mniejszej bezwładności przemieszczają się w strumieniu gazu do następnego stopnia kolektora.

Następna publikacja (**H2**) dotyczy opracowania przez mnie procedury badawczej przeznaczonej do stosowania w spektrometrii mas jonów wtórnych SIMS do analizy drobin pyłów. Procedura ta polega na zastosowaniu ciągłego obrotu podłoża z badanymi drobinami w czasie prowadzenia procesu trawienia jonowego tych drobin pyłów. Typową metodą badania drobin cząstek pyłów w technice SIMS jest metoda trawienia jonowego drobin umieszczonych na stacjonarnym podłożu, podczas gdy wiązka jonowa pada pod kątem 60° do tego podłoża z drobinami pyłów². W pracy **H2** przedstawiam nowe opracowanie, gdyż podłoże z umieszczonymi na nim drobinami pyłów obraca się wokół osi prostopadłej do tego podłoża (rys. 2). W ten sposób ograniczony zostaje efekt zasłaniania. Trawienie powierzchni mikrocząstek przy zmiennym kącie azymutalnym jest bardziej równomierne niż w przypadku trawienia cząstek umieszczonych na nieruchomym podłożu, kiedy maksymalnie $\frac{1}{2}$ powierzchni cząstek jest bombardowana poprzez wiązkę skierowaną z jednego kierunku. W przypadku zastosowania obracającego się podłoża z mikrocząstkami, drobinę te bombardowane są z wielu stron i proces trawienia jonowego przebiega znacznie bardziej równomiernie niż w przypadku stosowania stałego kąta azymutalnego wiązki trawiącej. Wpływa to korzystnie na dokładność analizy profilowej mikrocząstek.



Rys. 2. Schematyczne przedstawienie procedury badawczej drobin pyłów polegającej na trawieniu jonowym i ciągłym obrocie podłoża z umieszczonymi na nim drobinami pyłów. Podłoże znajduje się w pozycji poziomej, oś jego obrotu w osi pionowej a kąt padania wiązki jonowej wynosi 45° .

W pracy nr **H2** opisałem także procedurę przygotowywania próbek do analizy. Otóż mikrocząstki do analizy umieszcza się na podłożach stanowiących stępione końcówki igieł wykonanych z indu. Podłoża te mają średnicę od 0,2 mm do 0,6 mm, przy czym pole przemytania wiązki jonowej, np. 1,5 mm x 1,5 mm, jest większe niż pole trawionej powierzchni.

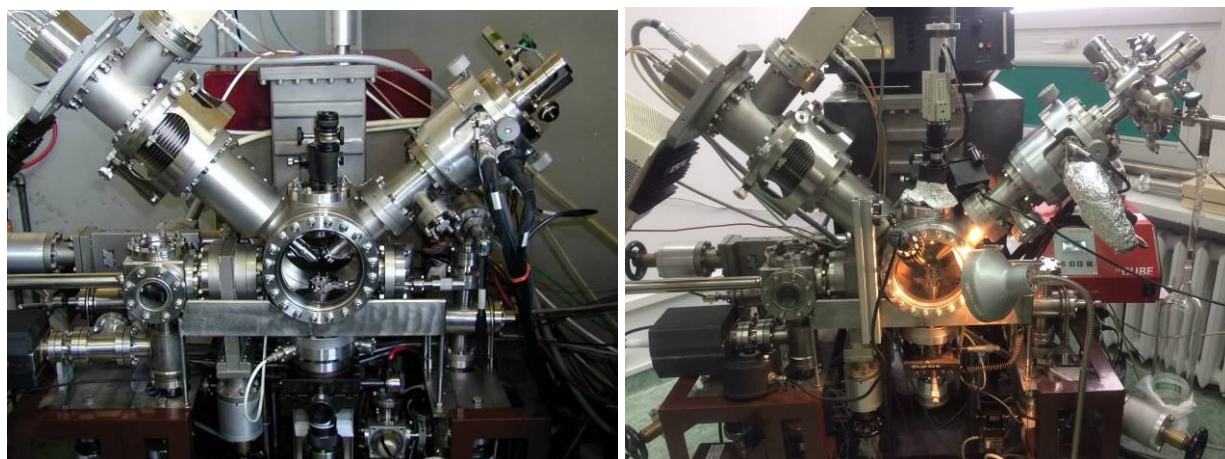
Wyniki analiz profilowych modelowych drobin typu „rdzeń – warstwa”, które uzyskałem w pracy nr **H2** pokazują wyraźne korzyści zastosowania techniki z obrotem próbki do badania modelowych drobin typu „rdzeń – warstwa”. Głębokościowa zdolność rozdzielcza jest lepsza, a

² Goschnick, J., Fichtner, M., Lipp, M., Schuricht, J., & Ache, H. J. (1993). Depth-resolved chemical analysis of environmental microparticles by secondary mass spectrometry. *Applied surface science*, 70, 63-67.

co za tym idzie, parametr Δz jest mniejszy niż w przypadku stosowania techniki ze stacjonarnym podłożem.

Kolejną pracą pierwszej grupy prac jest publikacja **H4**. Pokazuję w niej pierwsze wyniki badań płaskich układów warstwowych, które uzyskałem na opracowanej pod moim kierunkiem aparaturze SIMS przeznaczonych zarówno do badania cienkich warstw jak i mikrocząstek oraz nanocząstek. Po opublikowaniu pracy **H4**, powstałej aparaturze nadałem nazwę: Spektrometryczny analizator jonów wtórnych – SAJW-05, gdyż był to już piaty z kolei spektrometr SIMS opracowany i wykonany przy moim udziale w instytucji.

Poprzednie analizatory SIMS wykorzystywały kwadrupolowe spektrometry mas QSM-500 a także działa jonowe opracowane i wykonane w Ośrodku Badawczo Rozwojowym Elektroniki Próżniowej (OBREP). Rozwiązania konstrukcyjne mojego autorstwa dotyczące dwóch dział jonowych: ze źródłem z bombardowaniem elektronowym oraz ze źródłem duoplasmatronowym zostały przedstawione wcześniej w mojej pracy doktorskiej. Wszystkie poprzednie analizatory SIMS stosowały manipulatory próbek, które utrzymywały badaną próbkę tak, że jej powierzchnia była płaszczyzną pionową. Natomiast analizator SAJW-05 został wyposażony w komorę próżniową i manipulator próżniowy ze stolikiem próbek, które znajdują się w położeniu poziomym. Manipulator umożliwia także ciągły obrót próbek wokół osi pionowej. Urządzenie SAJW-05 wyposażone jest, w odróżnieniu od poprzednich urządzeń SAJW, w elementy aparatury zakupione za granicą. Są to: wyrzutnia jonów Physical Electronics, kwadrupolowy spektrometr mas QMA-410 Balzers oraz pompy turbomolekularne i membranowe. Pozostałe elementy wyposażenia jak manipulator próbek, dwu-stopniowa śluza próżniowa oraz zestaw pomp jonowych i sublimacyjnych, są naszej własnej konstrukcji. Zdjęcie tej aparatury z roku 2000 oraz zdjęcie aktualne przedstawiam na rys. 3.



Rys. 3. Zdjęcie aparatury SAJW-05 z roku 2000 (z lewej) i z roku 2017 (z prawej).

W pracy **H4** nie przedstawiam szczegółowo konstrukcji aparatury, jednak podaję jej najważniejsze parametry:

- * Energia wiązki pierwotnej: od 5 keV do 0.25 keV
- * Rodzaj jonów: Ar^+
- * Głębokościowa zdolność rozdzielcza: $\Delta z = 0.6 \text{ nm}$, dla układu $10 \text{ nmTa}_2\text{O}_5/\text{Ta}$

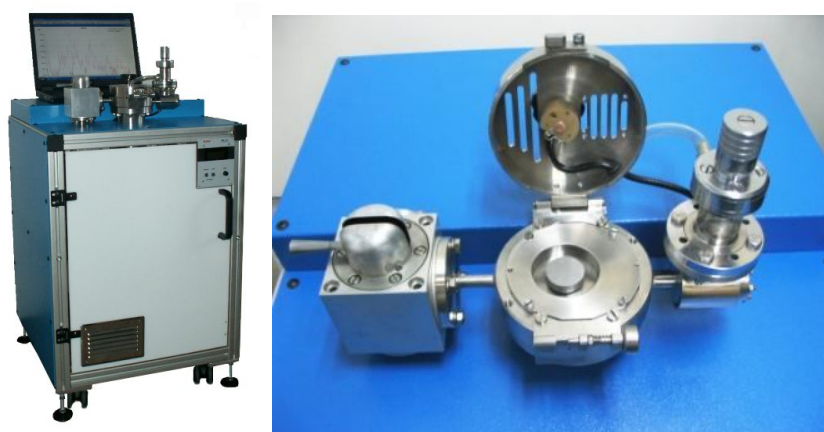
Aparatura SAJW-05 opisana w pracy **H4** została szeroko wykorzystana. Prowadziłem na niej wiele badań zarówno drobin pyłów jak i struktur warstwowych. Dzięki tej aparaturze powstało szereg publikacji takich jak: prace od **H2** – **H18** oraz ponad 50 innych prac zawartych w spisie moich publikacji.

Kolejną publikacją dotyczącą budowy aparatury badawczej jest praca nr **H10**, dotyczy ona opracowania konstrukcji analizatora GDMS model SMWJ-01 (rys. 4) i przeprowadzenia jego podstawowych testów.

Analizator GDMS – spektrometr mas wyładowania jarzeniowego wykorzystuje zjawisko wyładowania jarzeniowego w argonie pod ciśnieniem ok. 0,7 mbar. Wyładowanie jarzeniowe występuje pomiędzy katodą (próbką) na potencjale do 3 kV a anodą na potencjale zerowym. W wyniku tego wyładowania powierzchnia próbki ulega trawieniu jonowemu. Rozpylone atomy badanej próbki są jonizowane w plazmie a następnie ekstrahowane do obszaru wysokiej próżni gdzie podlegają analizie w kwadrupolowym filtrze mas. W aparaturze tej wykorzystano analizator SRS-300 z prętami o średnicy 6 mm.

W pracy przedstawiłem wyniki badania techniką GDMS składu pierwiastkowego stali nierdzewnej, stali chromowo-wanadowej, stopu Al-Mg-Cu (PA-6) a także stopu Armco. Wyniki te porównałem z wynikami uzyskanymi techniką SIMS. Porównanie to pozwoliło na wyznaczenie względnych współczynników czułości (RSF) w technice SIMS dla badanych materiałów.

Opracowanie analizatora GDMS opisanego w pracy **H10** bardzo rozszerzyło zakres możliwych badań laboratorium, gdyż pozwoliło na badania porównawcze dwiema technikami badawczymi SIMS i GDMS. W efekcie napisałem szereg prac, między innymi **H11**, **H13** i **H15**.



Rys. 4. Zdjęcie aparatury SMWJ-01. Z lewej widok ogólny a z prawej widok komórki wyładowania jarzeniowego z próbką.

Następną pracą z pierwszej grupy prac jest praca **H16**, która dotyczy opracowania nowej wersji procedury badawczej gromadzenia materiału rozpylonego (ang. storing matter) w technice SIMS. Procedura ta umożliwia prowadzenie analizy ilościowej techniką SIMS.

Procedura 'storing matter' została zaproponowana w celu ograniczenia tzw. efektów matrycy w technice SIMS¹, tzn. wpływu obecności sąsiadujących atomów na powierzchni badanej próbki na wydajność jonizacji w czasie procesu trawienia jonowego. Ideę rozdzielenia tych dwóch procesów, czyli rozpylania i jonizacji, zaproponował G. Slodzian³. Zasugerował on aby materiał rozpylany w czasie trawienia jonowego badanej powierzchni gromadzić na obracającym się kolektorze, a następnie badać sub-monowarstwowy depozyt techniką analityczną SIMS. Procedura ta została zastosowana przez grupę badaczy z Centre de Recherche Public - Gabriel Lippmann w Luksemburgu⁴ ⁵. Rozwiązanie zaproponowane w pracach badaczy tej grupy dotyczy gromadzenia materiału rozpylonego, które odbywa się w jednej komorze próżniowej oraz analizy zdeponowanego materiału, która odbywa się w oddziel-

³ Enveloppe Soleau No. 13852 deposited by Cameca on 04/05/1998 on behalf of G. Slodzian

⁴ Wirtz, T., & Migeon, H. N. (2008). Storing Matter: A new quantitative and sensitive analytical technique. *Applied Surface Science*, 255(4), 1498-1500.

⁵ Mansilla, C., & Wirtz, T. (2012). Oxidation effect on the SIMS analysis of samples sputtered and deposited by the Storing Matter technique. *Applied Surface Science*, 258(15), 5698-5702.

nej komorze próżniowej. Procedura ta wymaga więc stosowania tzw. walizki próżniowej⁶ stosowanej do przenoszenia kolektorów z naniesionym depozytem, z jednej aparatury badawczej do innej aparatury badawczej.

W pracy nr **H16** przedstawiam procedurę 'storing matter', która pozwala na przeprowadzenie obu procesów, tzn. nanoszenia depozytu i analizy depozytu w jednej komorze próżniowej analizatora SIMS. W celu zastosowania tej procedury zmodyfikowałem manipulator próbek, tak aby umieścić na nim mechanizm napędowy umożliwiający ciągły obrót tarczy kolektora w czasie procesu nanoszenia materiału rozpylonego a także w czasie analizy SIMS zgromadzonego na nim depozytu. Zbudowałem też dodatkowy specjalny manipulator umożliwiający przekładanie tarczy kolektora z pozycji przeznaczonej do nanoszenia materiału do pozycji przeznaczonej do analizy tego materiału. Procedurę tę przetestowałem na próbkach czystego chromu a także na próbkach stopu inconel implantowanego jonami 120 keV Cr²⁺ oraz 145 keV Y²⁺. Uzyskane wyniki analizy profilowej z użyciem techniki 'storing matter' pokazują, że efekt matrycy jest w znacznym stopniu ograniczony, w porównaniu do wyników uzyskiwanych standardową techniką SIMS.

Kolejną pracą dotyczącą procedury gromadzenia materiału („storing matter”) jest praca **H18**. W tej pracy pokazuję zastosowanie kolektorów pokrytych warstwą tlenkową. Dobór podłoża przeznaczonego do gromadzenia materiału rozpylonego ma istotny wpływ na efektywność zjawiska jonizacji w trakcie analizy SIMS tego materiału. Otrzymane rezultaty wskazują, że tlenek molibdenu oraz tlenek tytanu stosowane jako powierzchnia kolektora pozwalają zwiększyć „użyteczną wydajność” o dwa rzędy wielkości względem kolektorów z czystych metali takich jak miedź i tytan.

Tutaj „użyteczną wydajność” definiuję jako stosunek ilości wykrytych jonów wtórnych danego pierwiastka w czasie analizy SIMS do ilości rozpylonych atomów tego pierwiastka. W tej pracy prowadzę także dyskusję dotyczącą zależności wartości „użytecznej wydajności jonizacji” od gęstości atomów tlenu w badanych matrycach: ITO, In₂O₃, MoO₃ i TiO₂ oraz od wartości energii wiązania tlenu z poszczególnymi metalami w danym tlenku.

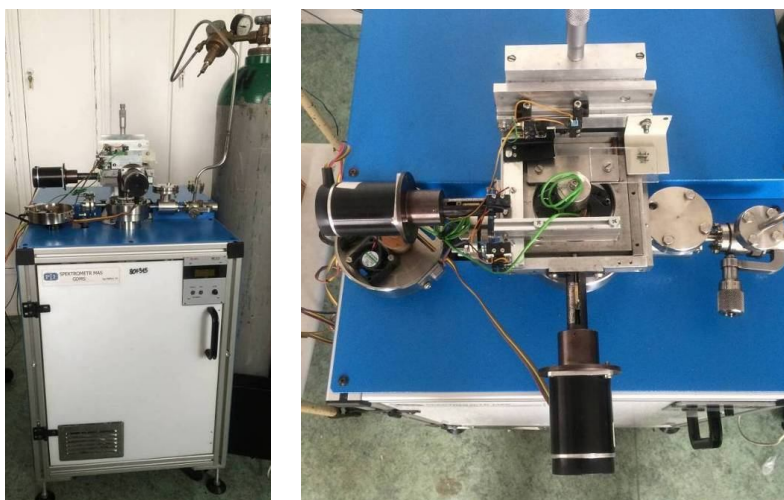
Oceniając opracowaną przeze mnie procedurę gromadzenia rozpylonego materiału - 'storing matter' (prace **H16** i **H18**) należy zauważyć jednak, że zarówno czułość techniki SIMS jak i głębokościowa zdolność rozdzielcza w tej technice są wyraźnie niższe niż w standardowej wersji techniki SIMS. Tak więc akurat te dwa parametry, wyróżniające technikę SIMS od innych technik badawczych, w przypadku zastosowania procedury 'storing matter' są niezadowolające. Z drugiej jednak strony, głównym mankamentem techniki SIMS są właśnie trudności w analizie ilościowej. A w tym zakresie procedura 'storing matter' jest wyraźnym krokiem naprzód i rzeczywiście rozwiązuje ten problem.

Ostatnią moją pracą z grupy prac dotyczących konstrukcji aparatury badawczej jest praca **H19**, w której opisałem zastosowanie specjalistycznego manipulatora próżniowego w aparaturze GDMS (rys. 5). Umożliwia on wykonywanie dwuwymiarowych map powierzchni. Moje rozwiązanie jest oryginalne, gdyż jak do tej pory, spośród technik wyładowania jarzeniowego, do obrazowania badanej powierzchni stosowano jedynie spektroskopię optyczną wyładowania jarzeniowego (GD-OES)^{7 8}.

⁶ Bendler, B., Barahma, R., Philipp, P., & Wirtz, T. (2011). New neutral cesium evaporation chamber and UHV suitcase. *Surface and Interface Analysis*, 43(1-2), 514-517.

⁷ Hoffmann, V., & Ehrlich, G. (1995). Investigations on the lateral distribution of the emission line intensities in the plasma of a Grimm-type glow discharge source. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 50(4-7), 607-616.

⁸ Webb, M. R., Hoffmann, V., & Hieftje, G. M. (2006). Surface elemental mapping using glow discharge—optical emission spectrometry. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 61(12), 1279-1284.



Rys. 5. Zdjęcie aparatury SMWJ-01 wraz z manipulatorem x, y, z umożliwiającym wykonywanie map powierzchni. Z lewej strony widok ogólny aparatury, a z prawej widok samego manipulatora x, y, z.

Mój sposób polega na przemieszczaniu badanej powierzchni ponad nieruchomą komórką wyładowania jarzeniowego. Dzięki umieszczeniu diafragmy pomiędzy próbką a anodą komórki wyładowania oraz zastosowaniu stolików x, y napędzanych silnikami krokowymi, możliwe jest rejestrowanie prądów jonowych w czasie przemieszczania się próbki w obrębie wybranego pola ponad diafragmą. Uzyskane parametry to liniowa zdolność rozdzielcza (w kierunku x), która wynosi 0.16 – 0.42 mm, analizowane pole to: 7 mm x 5 mm oraz czas analizy pojedynczego punktu mapy to 0,5 s.

c2) Omówienie prac drugiej grupy

Prace te dotyczą badań mikrocząstek i nanocząstek:

- Praca **H3** dotyczy badań mikrocząstek pyłów. Drobin pyłów o zakresie średnic 0,2 μm – 15 μm pobrałem w środowisku pracy huty Sendzimira w Krakowie i huty szkła Thomson Polkolor w Piasecznie koło Warszawy przy pomocy dziewięciostopniowego impaktora opisanego w pracy **H1**.
- Prace **H5** i **H6** dotyczą badania pyłów spawalniczych zanieczyszczających środowisko pracy
- Prace **H7** i **H8** dotyczą badań drobin pyłów zanieczyszczających środowisko. Próbki pyłów pobierano w Zagłębiu Miedziowym (w środowisku miejskim w Legnicy) a także w Starachowicach.
- Praca **H9** porównuje wyniki badań pyłów pobieranych w środowisku miejskim (w Legnicy) i w środowisku wiejskim (w Grajowie koło Wieliczki).
- Praca **H12** dotyczy badania drobin pyłów zanieczyszczających środowisko. Badano próbki pyłów pobranych w środowisku miejskim w Krakowie. Próbki pobierane były w mieszkaniach (indoor) oraz w środowisku zewnętrznym (outdoor).
- Praca **H14** opisuje wyniki badań drobin popiołu powstającego w czasie spalania węgla kamiennego w elektrociepłowni.
- Praca **H17** opisuje wyniki badań drobin pyłów zanieczyszczających środowisko. Próbki pyłów były pobierane z wewnętrznych części obudów zużytych aparatów telefonii komórkowej.

Praca nr **H3** przedstawia wyniki badania drobin pyłów pobranych przeze mnie w środowisku pracy w hucie stali a także w hucie szkła. Przeprowadzone badania SIMS wykazały, że submikrometrowe drobin pyłów posiadają strukturę typu „rdzeń – warstwa”. Otóż drobin pyłów pobrane na stanowiskach pracy w hucie stali posiadają rdzenie wzbogacone w żelazo i mangan, podczas gdy otaczające je warstwy są wzbogacone w związki ołowiu, chloru i fluoru. Drobin pyłów pobrane w hucie szkła kineskopowego mają rdzenie ze szkła ołowiowo-cyrkonowego a otaczające je warstwy są wzbogacone w węgiel i miedź. Wyniki, które zamieściłem w tej pracy pokazują, że zastosowana technika może służyć do charakteryzacji drobin pyłów zanieczyszczających środowisko.

Następne dwie prace **H5** i **H6** dotyczą zastosowania aparatury SIMS oraz opracowanych przeze mnie procedur badawczych do badania drobin pyłów spawalniczych. W pracach tych przedstawiłem wyniki badań SIMS modelowych drobin pyłów o strukturze „rdzeń – warstwa” oraz drobin pyłów powstających w trakcie procesu spawania stali. Praca **H5** zawiera wyniki pyłów powstałych przy spawaniu stali miękkiej oraz stali nierdzewnej metodą spawania nietopliwą elektrodą wolframową w osłonie gazów obojętnych oraz metodą spawania elektrodą otuloną. Praca **H6** dotyczy badania tych samych pyłów i dodatkowo porównuje wyniki uzyskane dla pyłów powstałych w trakcie spawania stali wiązką elektronów. Do analizy profilowej SIMS przeznaczyłem frakcje pyłów o średnicach aerodynamicznych w granicach 300 – 400 nm wyselekcjonowane przy pomocy kaskadowego impaktora 9-cio stopniowego opisanego w pracy **H1**. Badania pokazały, że struktura drobin silnie zależy od zastosowanej techniki spawania. Struktura „rdzeń - warstwa” jest wyraźnie widoczna. Powierzchnia drobin jest bardziej utleniona niż rdzenie drobin. Powierzchnia jest wzbogacona także w chlorki i fluorki, podczas gdy rdzenie drobin wzbogacone są w żelazo, chrom i mangan.

Praca **H7** przedstawia z kolei wyniki moich badań dotyczących drobin pyłów emitowanych przez zakłady przetwórstwa miedzi w Legnicy. Badałem zawartość poszczególnych pierwiastków w materiale pyłowym, a moim celem także było zbadanie struktury tych drobin. Badania „objętościowe” wykonane zostały techniką spektrometrii mas ze źródłem iskrowym (SSMS), a strukturę drobin zanieczyszczających środowisko miejskie w Legnicy badałem stosując trawienie jonowe w trakcie analizy składu powierzchni techniką SIMS. Wzbogacenie warstwy wierzchniej tych drobin w chrom, miedź i ołów badałem dla poszczególnych klas drobin o średnicach w przedziale od 300 nm do 15 μm .

Praca **H8** dotyczy porównania składu pierwiastkowego, a także struktury drobin zanieczyszczających środowisko miejskie w dwóch miastach, w Legnicy i w Starachowicach. Wyniki pokazały, że wierzchnie warstwy drobin o średnicach poniżej 2,5 μm z Legnicy zawierają wielokrotnie więcej chromu, miedzi i ołowiu niż wierzchnie warstwy takich drobin pobranych w Starachowicach. W pracy tej wyjaśniam też, czym różni się mechanizm trawienia drobin pyłów umieszczonych na stacjonarnym podłożu od mechanizmu trawienia drobin umieszczonych na obracającym się podłożu.

W pracy **H9** podjąłem próbę wyjaśnienia różnic w składzie pierwiastkowym i strukturze drobin pobranych w środowisku miejskim i wiejskim. Zauważyłem istotną różnicę w składzie pierwiastkowym tych dwóch rodzajów pyłów. Okazuje się, że koncentracja badanych 19 pierwiastków jest wyższa w pyłu miejskim w porównaniu do pyłu wiejskiego, w tym koncentracja chromu, arsenu, strontu i ołowiu jest ponad 10-cio krotnie większa w pyłu miejskim. Także struktura drobin pyłów okazała się różna dla tych dwóch środowisk. Warstwy wierzchnie drobin miejskich o średnicach poniżej 2,5 mikrometra są wzbogacone w chrom i miedź, podczas gdy w przypadku drobin wiejskich są one wzbogacone w mangan i żelazo.

W pracy **H12** opisane jest badanie drobin pyłów zanieczyszczających środowisko miejskie w Krakowie. Moim celem było porównanie cech pyłów pobieranych w mieszkaniach (indoor) oraz w środowisku zewnętrznym (outdoor). Do poboru pyłów zastosowano kolektory stacjonarne a także przenośny kolektor osobisty SKC⁹, który umożliwił gromadzenie drobin o czterech klasach średnic: 0,25-0,5 μm , 0,5-1 μm , 1-2,5 μm i 2,5-10 μm . Zbadany został skład

⁹ Misra, C., Singh, M., Shen, S., Sioutas, C., & Hall, P. M. (2002). Development and evaluation of a personal cascade impactor sampler (PCIS). *Journal of Aerosol Science*, 33(7), 1027-1047.

pierwiastkowy drobin pyłów metodą spektrometrii mas ze źródłem iskrowym (SSMS) a celem badań wykonanych przeze mnie na aparaturze SIMS było określenie rozkładu koncentracji wybranych sześciu pierwiastków (Na, Mg, P, K, Ca i Fe) w warstwach wierzchnich drobin o czterech klasach średnic. Badałem warstwy wierzchnie tych drobin w czasie trawienia jonowego odpowiadającego usunięciu warstwy o grubości ok. 100 nm z powierzchni tych drobin.

Uzyskane wyniki pokazują, że badane drobiny mają strukturę typu „rdzeń – warstwa”. Wyniki te jednocześnie wskazują na zróżnicowany charakter rozkładu koncentracji wybranych pierwiastków w zależności od średnic badanych drobin.

W pracy **H14** pokazałem z kolei wyniki badań drobin lotnego popiołu powstającego w czasie spalania węgla kamiennego w elektrociepłowni. Moim celem było opracowanie procedury badania tego materiału pyłowego i zbadanie rozkładów koncentracji wybranych pierwiastków w drobinach tych pyłów. Wykonane przeze mnie analizy profilowe SIMS pozwoliły na określenie koncentracji wybranych dziewięciu pierwiastków w przedziale głębokości do 1/2 mikrometra, tzn. licząc od powierzchni drobin w kierunku ich rdzeni. Analizę ilościową SIMS opracowałem dzięki wcześniejszemu zbadaniu całkowitej koncentracji badanych pierwiastków techniką spektroskopii absorpcji atomowej (AAS). Wyniki SIMS pokazują, że struktura typu „rdzeń – warstwa” tych drobin charakteryzuje się wzbogaceniem warstwy powierzchniowej np. w węgiel, wapń i chrom, podczas gdy rdzenie drobin wzbogacone są w takie pierwiastki jak np. sód i glin.

Ostatnią pracą z grupy prac dotyczących badań drobin pyłów jest praca **H17**. Opisuję w niej wyniki badań drobin pyłów zanieczyszczających środowisko, przy czym do poboru tych drobin zastosowałem całkowicie oryginalną metodę. Mianowicie próbki były pobierane z wewnętrznych części obudów zużytych aparatów telefonii komórkowej. Ten sposób poboru próbek zanieczyszczeń pyłowych obarczony jest dużym wpływem zanieczyszczeń pochodzących od odzieży użytkownika telefonu i innych zanieczyszczeń jak pot, resztki jedzenia itp. Jednakże ten sposób posiada jedną istotną zaletę względem innych sposobów wykorzystujących typowe urządzenia do poboru pyłów umieszczone w stacjach monitoringu jakości powietrza. Mianowicie, opisana przeze mnie metoda umożliwia pobór pyłów, który odbywa się z reguły w bezpośredniej bliskości posiadacza aparatu komórkowego. W efekcie zbierany materiał dobrze charakteryzuje zanieczyszczenia pyłowe obecne w bezpośrednim otoczeniu danej osoby.

W pracy **H17** opisałem zarys procedury badawczej przeznaczonej do badań tak zebranego materiału pyłowego. Opisałem też wstępne wyniki analizy objętościowej wykonanej techniką SSMS i porównałem je z wynikami SSMS dla pyłów zbieranych tradycyjnymi metodami. Wyniki pokazały duże podobieństwo. Przedstawiłem także wstępne wyniki SIMS próbek naniesionych na podłoże z indu. Moim celem było opracowanie parametrów analitycznych poprzez wybór mas jonów wtórnych dodatnich i ujemnych oraz określenie warunków dozowania tlenu do komory pomiarowej SIMS.

Podsumowując wyniki prac drugiej grupy można ocenić, że przedstawiają one pewien zakres możliwości techniki analitycznej SIMS w odniesieniu do badania drobin pyłów. W przypadku stosowania wiązki jonów Ar^+ o energii do 5 keV oraz kwadrupolowego spektrometru mas możliwa jest detekcja wybranych pierwiastków z określoną czułością. Czułość ta jest gorsza w porównaniu z analizami próbek o płaskiej powierzchni. Z kolei zaletą opisanych przeze mnie badań SIMS jest możliwość określenia struktury badanych drobin, gdyż przedstawione procedury pozwalają na rejestrację zmian koncentracji w trakcie usuwania kolejnych warstw atomowych z powierzchni trawionych drobin pyłów. W celu wykonania ilościowej analizy, wyniki SIMS interpretowałem w oparciu o wyniki analizy objętościowej uzyskanej przy zastosowaniu techniki spektrometrii mas ze źródłem iskrowym (SSMS) lub spektroskopii absorpcji atomowej (AAS).

c3) Omówienie prac trzeciej grupy

Trzecią grupę prac stanowią publikacje dotyczące badania płaskich układów warstwowych (cienkich warstw). Wyniki tych prac uzyskałem także stosując opracowane przeze mnie i zbudowane w instytucie analizatory SIMS i GDMS.

- Praca **H4** dotyczy badań nanometrycznych struktur warstwowych Ta_2O_5/Ta oraz multiwarstw Mo/B_4C .
- Praca **H11** dotyczy układów warstwowych twardych pokryć: warstwy podwójnej TiN/CrN , warstwy gradientowej $Ti_xCr_{1-x}N$ oraz układu wielowarstwowego $(TiN/CrN)_n$
- Praca **H13** dotyczy badania efektów wygrzewania próbek stali nierdzewnych AISI 410 i AISI 321 w warunkach próżniowych.
- Praca **H15** dotyczy badania przypowierzchniowych warstw stopu inconel po implantacji jonowej.

W pracy **H4** przedstawiam wyniki badań podstawowych jakie przeprowadziłem w odniesieniu do zjawiska rozpylania jonowego stosowanego w analizie profilowej SIMS nanostruktur warstwowych $B_4C/Mo/Si$ oraz Ta_2O_5/Ta . Moim celem była ocena możliwości stosowania niskoenergetycznej wiązki jonów argonu do analizy profilowej SIMS wybranych nanostruktur oraz podanie parametrów umożliwiających uzyskanie optymalnej głębokościowej zdolności rozdzielczej. Chodziło mi o odpowiedź na pytanie, jak niska jest optymalna wartość energii wiązki jonów pierwotnych przy wysokorozdzielczej analizie profilowej poszczególnych struktur. W pracy **H4** przedstawiłem zarówno wyniki symulacji Monte Carlo (MC) zjawiska oddziaływania wiązki jonów z badanymi materiałami jak i wyniki eksperymentalne trawienia jonowego badanych struktur. Symulacje MC dotyczyły wyznaczenia zależności współczynników rozpylania, koncentracji implantowanych jonów argonu a także przemieszczonych atomów poszczególnych matryc od energii bombardujących jonów argonu. Celem pracy był dobór głównego parametru wiązki trawiącej, a mianowicie energii wiązki, tak aby efekt uszkodzenia badanej matrycy był jak najmniejszy. Parametr uszkodzenia matrycy zdefiniowałem jako ilość przemieszczonych atomów w trawionej matrycy przypadających na jeden rozpylony atom z tej matrycy. W symulacjach MC badałem zależność tego parametru od energii jonów argonu dla matryc: B_4C , Si, Mo, Ta oraz Ta_2O_5 .

Wyniki te pokazały, że wraz ze zmniejszaniem energii jonów argonu zmniejsza się też parametr uszkodzenia matrycy. Jednak krzywa dla matrycy B_4C posiada szerokie zagłębienie z minimum pomiędzy energią 800 i 550 eV, z kolei krzywa Si posiada także szerokie minimum pomiędzy 200 a 400eV. Natomiast krzywa dla matrycy Ta_2O_5 posiada charakterystyczne plateau poniżej 600 eV. Tak więc, wyniki te pokazują, że rozpylanie matryc B_4C i Si jonami Ar^+ o energiach niższych niż odpowiednio 550 i 200 eV nie powoduje ograniczenia efektów przemieszczeń względem ilości rozpylanych atomów. Czyli obniżanie energii poniżej tych wartości jest niekorzystne, gdyż badane matryce stają się bardziej zniszczone niż przy stosowaniu wyższych energii. W przypadku matrycy Ta_2O_5 obniżanie energii poniżej 600 eV nie zmniejsza ilości przemieszczanych atomów przypadających na jeden rozpylony atom. Natomiast krzywe dla molibdenu i tantalu opadają monotonicznie i możemy wnioskować, że w przypadku tych matryc korzystne jest stosowanie jak najniższych energii wiązki jonów argonu. Uzyskane przeze mnie eksperymentalnie wartości parametru głębokościowej zdolności rozdzielczej Δz dla granic międzyfazowych dwóch układów Mo/Si oraz Ta_2O_5/Ta dobrze korelują z opisanymi wyżej wynikami MC.

Publikacja **H11** dotyczy zbadania układów warstwowych twardych pokryć nanoszonych technikami plazmowymi na powierzchnię stali. Pokazałem rozkłady koncentracji pierwiastków w warstwie podwójnej TiN/CrN , warstwie gradientowej $Ti_xCr_{1-x}N$ oraz w układzie wielowarstwowym $(TiN/CrN)_n$. Ten zestaw układów warstwowych badałem dwiema technikami SIMS i GDMS a badanie przeprowadziłem głównie w celu porównania tych dwóch technik analizy profilowej. Była to także pierwsza okazja do testu nowo opracowanej aparatury GDMS w zakresie analizy profilowej. Wyniki, które uzyskałem pokazują dużą zgodność, z tym że wyniki GDMS cechują się nieco lepszą głębokościową zdolnością rozdzielczą. Pewną rolę gra tutaj efekt mieszania jonowego, większy w przypadku analizy SIMS, bowiem stosowano wiązkę jonów pierwotnych Ar^+ o energii 5 keV, podczas gdy w czasie analizy GDMS stosowano napięcie wyładowania

jarzeniowego 1,5 kV. Należy zauważyć też, że czas analizy GDMS jest znacznie krótszy niż analizy SIMS.

Pracę **H13** napisałem także opisując wyniki dwóch technik badawczych SIMS i GDMS. Tutaj moim celem było zbadanie efektów próżniowego wygrzewania stali nierdzewnych AISI 410 i AISI 321 w temperaturach 750°C i 950°C. W warstwach przypowierzchniowych (do głębokości kilkuset nanometrów) stwierdziłem efekt segregacji chromu, tytanu, manganu oraz niklu. Co ciekawe, wygrzewanie próbek stali w temperaturze 950°C spowodowało mniejsze efekty segregacji w 70 nm warstwie przypowierzchniowej niż wygrzewanie tych samych próbek w temperaturze 750°C. Podobnie jak w pracy **H11**, stwierdziłem lepszą rozdzielczość głębokościową analizy GDMS.

Ostatnia z prac trzeciej grupy - publikacja **H15** dotyczy badania przypowierzchniowych warstw stopu inconel po implantacji jonowej azotem, tytanem, chromem i itrem. Analizy profilowe wykonałem do głębokości 500 nm dwiema technikami analitycznymi SIMS i GDMS. Wyniki dotyczące rozkładu koncentracji azotu, tytanu i itru pokazują dużą zgodność dla obu tych technik. Natomiast rozkłady koncentracji głównych składników stopu inconel, tj. niklu, chromu i żelaza wykazują duże rozbieżności dla tych dwóch technik badawczych. Jeśli założyć, że stosunki prądów jonowych odpowiadają koncentracji pierwiastków w zakresie od powierzchni stopu do głębokości 100 nm, to wyniki SIMS dla próbki nieimplantowanej wskazywałyby, że warstwa przypowierzchniowa byłaby zubożona w nikiel i jednocześnie wzbogacona w chrom i żelazo. Z kolei jednak wyniki GDMS wskazują na równomierny rozkład tych trzech pierwiastków w 100 nm warstwie przypowierzchniowej (**H15**, fig. 2). Tak więc należy wysnuć wniosek, że wynik dotyczący rozkładu koncentracji głównych składników stopu uzyskany techniką SIMS obciążony jest silnymi efektami matrycy.

W celu potwierdzenia tego wniosku przeprowadziłem kolejne badania stopu inconel techniką SIMS stosując tym razem dodatkowo procedurę gromadzenia rozpylonego materiału ('storing matter'). Wyniki przedstawiłem w publikacji **H16** (fig. 4). Pokazują one, że procedura gromadzenia materiału pozwala w istocie na wydajne ograniczenie efektów matrycy i wynik 'storing matter' SIMS dla próbki odniesienia stopu inconel pokazuje równomierny rozkład koncentracji wspomnianych trzech składników: niklu, chromu i żelaza. Tak więc wynik ten jest odmienny w stosunku do wyniku uzyskanego tradycyjną techniką SIMS przedstawionego w pracy **H15** i jednocześnie zgodny z wynikiem GDMS z pracy **H15**.

c4) Podsumowanie

Przedstawiony cykl prac powiązanych tematycznie pokazuje kierunek prowadzonych przeze mnie badań. Moim głównym celem było rozwinięcie dwóch technik badawczych SIMS i GDMS. Najważniejszymi wynikami uzyskanymi w pracy habilitacyjnej są opracowania aparatów badawczych i procedur pomiarowych:

1. Próżniowego kolektora pyłów (**H1**).
2. Spektrometru mas jonów wtórnych SIMS (model SAJW-05) (**H4**)
3. Spektrometru mas wyładowania jarzeniowego GDMS model SMWJ-01 (**H10**).
4. Procedury badawczej mikrocząstek i nanocząstek pyłów polegającej na zastosowaniu ciągłego obrotu podłoża z drobinami pyłów w trakcie procesu trawienia jonowego (**H2**).
5. Procedury gromadzenia rozpylonego materiału ('storing matter') w trakcie analizy SIMS w jednej komorze próżniowej (**H16** i **H18**)
6. Modyfikacji aparatury badawczej GDMS w celu umożliwienia mapowania badanej powierzchni (**H19**).

Najważniejszymi wynikami badań uzyskanymi w pracy habilitacyjnej są:

1. Określenie składu pierwiastkowego i struktury drobin pyłów zanieczyszczających powietrze w środowisku pracy: m.in. w hucie szkła, w hucie stali, w zakładach miedziowych i na stanowisku spawacza (**H3, H5 - H7**).
2. Charakteryzacja drobin pyłów zanieczyszczających powietrze w środowisku miejskim i wiejskim (**H7 - H9, H12, H14, H17**).
3. Określenie parametrów głębokościowej zdolności rozdzielczej w analizie profilowej SIMS dla wybranych nanostruktur warstwowych (**H4**).
4. Eliminacja tzw. efektów matrycy dzięki zastosowaniu procedury gromadzenia materiału (storing matter) w technice SIMS (**H16 i H18**).

Należy podkreślić, że opracowane i zbudowane aparaty SIMS i GDMS zostały szeroko wykorzystane do różnorodnych badań materiałowych we współpracy z wieloma instytucjami badawczymi. Łącznie powstało ok. **70** publikacji zawierających otrzymane na nich wyniki.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych

Ciekawszymi moimi pracami opublikowanymi przed obroną doktoratu były:

- a. Praca dotycząca zjawiska porządkowania molekuł w ciekłym kryształ¹⁰ zawierająca wyniki mojej pracy magisterskiej.
- b. Praca dotycząca początkowych stadiów utleniania powierzchni żelaza (100) wykonana techniką rozpraszania jonów o średniej energii (MEIS)¹¹. Praca ta zawiera wyniki uzyskane przeze mnie w czasie stypendium Fulbrighta na Uniwersytecie Pensylwanii.
- c. Prace dotyczące konstrukcji duoplasmatronowego działka jonowego¹² oraz manipulatora próbek¹³ do spektrometru mas jonów wtórnych SIMS. Prace te stanowiły część mojej rozprawy doktorskiej w Instytucie Technologii Elektronowej w Warszawie.
- d. Praca dotycząca mechanizmu powstawania chropowatości na powierzchni heterostruktur warstwowych w trakcie trawienia jonowego SIMS¹⁴. Praca ta zawiera główną część mojej rozprawy doktorskiej.

Ciekawszymi pracami opublikowanymi już po obronie doktoratu, ale nie będącymi częścią rozprawy habilitacyjnej są:

- a. Praca dotycząca badania związku nadprzewodzącego MgB₂ otrzymywanego poprzez implantację jonową oraz traktowanie impulsami plazmy¹⁵. Praca napisana była wspólnie z prof. Jerzym Piekoszewskim z Narodowego Centrum badań Jądrowych w Świerku.
- b. Prace dotyczące określenia zawartości wodoru w warstwach przypowierzchniowych

¹⁰ **Konarski, P.**, Pyżuk, W., & Krupkowski, T. (1978). Dielectric Studies of the Ordering Due to an External DC Electric Field in Nematic 4, 4'-di-n-hexyloxyazoxybenzene. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 47(1-2), 105–114.

¹¹ Headrick, R.L., **Konarski, P.**, Yalisove, S.M., & Graham, W.R. (1989). Medium-energy ion scattering study of the initial stage of oxidation of Fe(001). *Physical Review B*, 39, 5713–5718.

¹² **Konarski, P.**, Kalczuk, M., & Kościński, J. (1992). Bakeable duoplasmatron ion gun for SIMS microanalysis. *Review of Scientific Instruments*, 63(4), 2397–2399.

¹³ **Konarski, P.** (1995). Ultrahigh vacuum manipulator for sample rotation in secondary ion mass spectrometry depth profile analysis. *Review of Scientific Instruments*, 66(9), 4713–4715.

¹⁴ **Konarski, P.**, & Hautala, M. (1996). Surface roughening at the ZnTe/GaAs interface in stationary and sample rotation SIMS depth profiling. *Vacuum*, 47(9), 1111–1115.

¹⁵ **Konarski, P.**, Ćwil, M., Piekoszewski, J., & Stanisławski, J. (2006). SIMS characterisation of superconductive MgB₂ layers prepared by ion implantation and pulsed plasma treatment. *Applied Surface Science*, 252(19), pp. 7078–7081.

elektropolerowanych i magnetoelektropolerowanych próbkach stali¹⁶, tytanu¹⁷ oraz niobu¹⁸ Są to prace napisane wspólnie z prof. Tadeuszem Hryniewiczem z Politechniki Koszalińskiej.

- c. Praca dotycząca określenia wpływu zawartości wodoru na własności trybologiczne twardych pokryć typu nc-WC/a-C:H¹⁹. Jest to praca opublikowana z prof. Bogdanem Wendlerem z Politechniki Łódzkiej.
- d. Prace dotyczące analiz profilowych ultracienkich warstw domieszkowanych fosforem²⁰⁻²² oraz struktur 4H-SiC z warstwami SiOxNy/HfOx²³. Prace te zostały opublikowane z grupą prof. Jana Szmidta z Politechniki Warszawskiej.

Ponadto zajmowałem się także budową różnorodnej aparatury badawczej. Należy tu wymienić kilka konstrukcji opracowanych pod moim kierunkiem:

- Działo jonowe DJ-5 przeznaczone do analizatora elektronów Augera. Działo jonowe wykonano w r. 2006 na zamówienie Politechniki Poznańskiej, Wydział Maszyn Roboczych i Pojazdów.
- Układ ciśnieniowo – próżniowy przeznaczony do hiperpolaryzacji mieszanin gazów. Aparatura została zbudowana w r. 2012 na zamówienie Instytutu Radio Elektroniki Politechnika Warszawska.
- Linia puryfikacji gazów szlachetnych przeznaczonych do badań izotopowych minerałów ilastych. Aparatura wykonana została w 2013 r. na zamówienie firmy COMEF Aparatura Naukowo-Badawcza w Katowicach dla Instytutu Badań Geologicznych PAN, oddział w Krakowie.

¹⁶ Hryniewicz, T., **Konarski, P.**, Rokosz, K., & Rokicki, R. (2011). SIMS analysis of hydrogen content in near surface layers of AISI 316L SS after electrolytic polishing under different conditions. *Surface and Coatings Technology*, 205, 17-18, 4228-4236.

¹⁷ Hryniewicz, T., **Konarski, P.**, Rokicki, R., & Valíček, J. (2012). SIMS studies of titanium biomaterial hydrogenation after magneto-electropolishing. *Surface and Coatings Technology*, 206, 4027–4031.

¹⁸ Rokicki, R., Hryniewicz, T., **Konarski, P.**, & Rokosz, K. (2017) The alternative, novel technology for improvement of surface finish of SRF niobium cavities, *World Scientific News*, 74, 152-163.

¹⁹ Makówka, M., Pawlak, W., **Konarski, P.**, & Wendler, B. (2016). Hydrogen content influence on tribological properties of nc-WC/a-C:H coatings. *Diamond and Related Materials*, 67, 16 – 25.

²⁰ Król, K., **Konarski, P.**, Miśnik, M., Sochacki, M., & Szmidt, J. (2014). The Effect of Phosphorus Incorporation into SiO₂/4H-SiC (0001) Interface on Electro-Physical Properties of MOS structure. *Acta Physica Polonica A*, 126(5), 1100 – 1103.

²¹ **Konarski, P.**, Król, K., Miśnik, M., Sochacki, M., Szmidt, J., Turek, M., & Żuk, J. (2015). Depth Profile Analysis of Phosphorus Implanted SiC Structures. *Acta Physica Polonica A*, 128(5), 864–866.

²² Król, K., Sochacki, M., Strupiński, W., Racka, K., Guzewicz, M., **Konarski, P.**, Miśnik, M., Szmidt, J. (2015). Chlorine-enhanced thermal oxides growth and significant trap density reduction at SiO₂/SiC interface by incorporation of phosphorus. *Thin Solid Films*, 591(Part A), 86–89.

²³ Mroczyński, R., Kwietniewski, N., & **Konarski, P.** (2017). Effects of ultra-shallow ion implantation from RF plasma onto electrical properties of 4H-SiC MIS structures with SiOx/HfOx and SiOxNy/HfOx double-gate dielectric stacks. *Microelectronic Engineering*, 178, 116–121.

6. Podsumowanie osiągnięć naukowo-badawczych

Poniżej przedstawiam skrótowe podsumowanie moich osiągnięć naukowo-badawczych (pełna informacja znajduje się w Załączniku nr 4 do Wniosku):

- Jestem współautorem lub autorem **63** publikacji naukowych w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports (w tym **54** prac opublikowanych po doktoracie)
- Jestem także współautorem lub autorem **61** publikacji naukowych w czasopismach innych niż znajdujące się w bazie JCR (w tym **52** prac opublikowanych po doktoracie)
- Jestem współautorem lub autorem **12** patentów udzielonych przez Urząd Patentowy RP
- Liczba cytowań według bazy Web of Science (stan na 25 maja 2017 r.): **280**
Liczba cytowań bez autocytowań: **202**
Indeks Hirscha według bazy Web of Science: **10**
- Napisałem **25** recenzji dla międzynarodowych czasopism naukowych w latach 2004 – 2017, w tym m. in. dla *Vacuum* (7 recenzji), *Analytical and Bioanalytical Chemistry* (5), *Surface and Interface Analysis* (4), *Analyst* (1), *Applied Surface Science* (1).
- Od roku 1999 uczestniczyłem w **12** projektach badawczych. W wymienionych poniżej pełniłem rolę kierownika:
 1. Strategiczny program rządowy nr 1 pn. Bezpieczeństwo i ochrona zdrowia człowieka w środowisku pracy, zadanie 02.4.5 "Opracowanie metody spektrometrycznej analizy mikrocząstek pyłów zanieczyszczających środowisko". Okres realizacji: lata 1998 - 2000.
 2. Projekt badawczy KBN nr: 6 P05D 016 21, tytuł: Ocena swoistego zagrożenia środowiskowego dla zdrowia dzieci z Zagłębia Miedziowego zanieczyszczeniami powietrza ze szczególnym uwzględnieniem składu chemicznego i morfologii mikrocząstek pyłów - lata 2000 - 2003.
 3. Projekt badawczy nr PW 004/ITE/02/2004, tytuł: Rozwój produktów i urządzeń wysokiej techniki, zadanie pt. Wykorzystanie kwadrupolowego spektrometru mas do analizy metali i izolatorów metodą spektrometrii mas wyładowania jarzeniowego (GDMS). Okres realizacji: 2005 – 2007.
 4. Projekt badawczy nr R13 008 01, tytuł: Opracowanie technologii poboru oraz procedur badania struktury i morfologii mikro- i nanocząstek pyłów emitowanych przez elektrociepłownię w powiązaniu z ewaluacją skutków zanieczyszczenia środowiska dla zdrowia mieszkańców aglomeracji miejskich, okres realizacji: 2006-2009.
 5. Projekt badawczy nr R15 0057 06, tytuł: Analizator profilowy GDMS, okres realizacji: 2009 – 2011.
 6. Projekt badawczy stosowany PBS ID 180435, tytuł: Opracowanie metody charakteryzacji pyłowych zanieczyszczeń środowiska w bezpośrednim otoczeniu człowieka, okres realizacji: 2012 – 2015.
- Wygłosiłem
 - ok. **20** referatów na międzynarodowych konferencjach, w tym m. in.:

- International Conference on Secondary Ion Mass Spectrometry SIMS - 7 referatów
- International Conference Ion implantation and other applications of ions and electrons ION - 5 referatów
- **3** referaty zaproszone na konferencjach zagranicznych:
 - International Conference Ion Interaction of Radiation with Solids, IRS-2013, Minsk, Białoruś
 - SciX 2015; Conference of the Federation of Analytical Chemistry and Spectroscopy Societies, Providence, RI, USA
 - SciX 2016, Minneapolis, MN, USA
- **3** seminaria zaproszone w ośrodkach zagranicznych:
 - TU Berlin, Institut für Festkörperphysik, Niemcy, 1992
 - EMPA Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, Thun, Szwajcaria, 2009
 - Univesidad de Oviedo, Facultad de Química, Hiszpania, 2017

Piotr Konarski