

Załącznik 2

**Rozwój i zastosowanie diagnostyk spektroskopowych w badaniach
zanieczyszczeń plazmy oraz oddziaływaniach plazma-ściana
w kontekście przyszłego reaktora termojądrowego**

dr Monika Kubkowska
Autoreferat

WARSZAWA 2019

Spis treści

1.	Dane osobowe	3
2.	Uzyskane tytuły i stopnie naukowe	3
3.	Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu.....	3
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 w zakresie sztuki (Dz. U. 2017 r. poz. 1789) stanowiącego podstawę postępowania habilitacyjnego	3
4.1.	Tytuł osiągnięcia naukowego	3
4.2.	Wykaz publikacji stanowiących podstawę wszczęcia postępowania habilitacyjnego (wymienione w kolejności omawiania)	3
4.3.	Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich wykorzystania	5
4.3.1.	Diagnostyki spektroskopowe w badaniach oddziaływania plazmy ze ścianą urządzenia ..	8
4.3.2.	Rozwój i zastosowanie diagnostyk miękkiego promieniowania rentgenowskiego dla stellaratora Wendelstein 7-X	15
4.3.3.	Podsumowanie osiągnięć prowadzonych badań w ramach rozprawy habilitacyjnej	21
4.4.	Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych	22
4.4.1.	Informacje o pracy naukowej przed otrzymaniem stopnia doktora	22
4.4.2.	Badania po doktoracie niewchodzące w skład rozprawy habilitacyjnej.....	23
4.4.3.	Osiągnięcia organizacyjne i dydaktyczne	27
4.5.	Plany badawcze	28
	Literatura	29

1. Dane osobowe

Monika Katarzyna Kubkowska
ORCID ID: 0000-0003-1320-7468

2. Uzyskane tytuły i stopnie naukowe

Doktora: 2007 r. Uniwersytet Warszawski, Wydział Fizyki

temat pracy: Badania wybranych stanów elektronowych cząsteczek Na₂, Li₂, Zn₂ i ZnKr metodami spektroskopii laserowej i klasycznej
promotor: prof. dr hab. Paweł Kowalczyk

Magistra: 2003 r. Uniwersytet Warszawski, Wydział Fizyki

temat pracy: Badania doświadczalne i teoretyczne skrzydeł linii rezonansowej cynku ($\lambda = 213.8$ nm) zaburzonej przez krypton
promotor: dr hab. Teresa Grycuk

Licencjata: 2001 r. Uniwersytet Warszawski, Wydział Fizyki

tytuł pracy: Spektroskopia oddziaływań van der Waalsa
promotor: dr hab. Teresa Grycuk

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu

Od 1.04.2011 – Kierownik Zakładu Fuzji Jądrowej i Spektroskopii Plazmy w IFPiLM

1.10.2010 -31.03.2011 – p.o. kierownika Zakładu Fizyki i Technologii Termojądrowych Plazmy Laserowej w Oddziale Plazmy Laserowej IFPiLM

Od 1.01.2008 r. – adiunkt, Oddział Plazmy Laserowej, IFPiLM

1.06-31.10.2007 r. – asystent w Instytucie Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy (IFPiLM), Oddział Plazmy Laserowej

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 w zakresie sztuki (Dz. U. 2017 r. poz. 1789) stanowiącego podstawę postępowania habilitacyjnego

4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego

Rozwój i zastosowanie diagnostyk spektroskopowych w badaniach zanieczyszczeń plazmy oraz oddziaływaniach plazma-ściana w kontekście przyszłego reaktora termojądrowego

4.2. Wykaz publikacji stanowiących podstawę wszczęcia postępowania habilitacyjnego (wymienione w kolejności omawiania)

- [H1] **M. Kubkowska**, P. Gasiór, M. Rosinski, J. Wołowski, M.J. Sadowski, K. Malinowski, E. Składnik-Sadowska, Characterisation of laser-produced tungsten plasma using optical spectroscopy method, European Physical Journal D 54, 463 (2009)
- [H2] **M. Kubkowska**, E. Składnik-Sadowska, K. Malinowski, M. J. Sadowski, M. Rosinski, P. Gasiór, Research on laser-removal of a deuterium deposit from a graphite sample, Journal of Physics: Conference Series 508, 012015 (2014)
- [H3] **M. Kubkowska**, P. Gasiór, E. Kowalska-Strzęciwilk, E. Fortuna-Zalesna, J. Grzonka, L. Ciupinski, Investigation of the irradiation effects on laser-removal and surface morphology of mixed material sample, Journal of Nuclear Materials, 438, S750 (2013)
- [H4] P. Gasiór, M. Bieda, **M. Kubkowska**, R. Neu, J. Wołowski, ASDEXUpgrade Team, Laser induced breakdown spectroscopy as diagnostics for fuel retention and removal and

- wall composition in fusion reactors with mixed-material components, *Fusion Engineering and Design* 86, 1239 (2011)
- [H5] S. Almaviva, L. Caneve, F. Colao, P. Gąsior, **M. Kubkowska**, M. Łeppek, G. Maddaluno, Double pulse Laser Induced Breakdown Spectroscopy measurements on ITER-like samples, *Fusion Engineering and Design* 96-97, 848-851 (2015)
- [H6] S. Almaviva, L. Caneve, F. Colao, G. Maddaluno, N. Krawczyk, A. Czarnecka, P. Gąsior, **M. Kubkowska** and M. Lepek, Measurements of deuterium retention and surface elemental composition with double pulse laser induced breakdown spectroscopy, *Physica Scripta* T167, 014043 (2016)
- [H7] **M. Kubkowska**, E. Składnik-Sadowska, R. Kwiatkowski, K. Malinowski, E. Kowalska-Strzęciwilk, M. Paduch, M.J. Sadowski, T. Pisarczyk, T. Chodukowski, Z. Kalinowska, E. Zielinska, M. Scholz, M., Investigation of interactions of intense plasma streams with tungsten and carbon fibre composite targets in the PF-1000 facility, *Physica Scripta*, T161, 014038 (2014)
- [H8] **M. Kubkowska**, "Study of plasma-wall interactions using pulsed lasers," *Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018*, 108084A
- [H9] N. Krawczyk, J. Kaczmarczyk, **M. Kubkowska**, L. Ryć, Comparison of silicon drift detectors made by Amptek and PNDetectors in application to the PHA system for W7-X, *Nukleonika* 61(4), 409-412 (2016)
- [H10] **M. Kubkowska**, A. Czarnecka, W. Figacz, S. Jabłoński, J. Kaczmarczyk, N. Krawczyk, L. Ryć, Ch. Biedermann, R. Koenig, H. Thomsen, A. Weller and W7-X team, Laboratory tests of the Pulse Height Analysis system for Wendelstein 7-X, *Journal of Instrumentation* 10, P10016 (2015)
- [H11] N. Krawczyk, Ch. Biedermann, A. Czarnecka, T. Fornal, S. Jablonski, J. Kaczmarczyk, **M. Kubkowska**, F. Kunkel, K. J. McCarthy, L. Ryć, H. Thomsen, A. Weller and the W7-X team, Commissioning and first operation of the pulse-height analysis diagnostic on Wendelstein 7-X stellarator, *Fusion Engineering and Design* 123, 1006-1010 (2017)
- [H12] **M. Kubkowska**, A. Czarnecka, T. Fornal, M. Gruca, N. Krawczyk, S. Jabłoński, L. Ryć, H. Thomsen, K. J. McCarthy, Ch. Biedermann, B. Buttenschön, A. Alonso, R. Burhenn, W7-X team, First Results from the Soft X-ray Pulse Height Analysis System on Wendelstein 7-X stellarator, *Fusion Engineering and Design* 136, 58-62 (2018)
- [H13] N. Krawczyk, **M. Kubkowska**, A. Czarnecka, S. Jablonski, M. Gruca, T. Fornal, L. Ryć, H. Thomsen, G. Fuchert and the W7-X team, Electron temperature estimation using the Pulse Height Analysis system at Wendelstein 7-X stellarator, *Fusion Engineering and Design* 136, 1291-1294 (2018)
- [H14] **M. Kubkowska**, A. Czarnecka, T. Fornal, M. Gruca, S. Jabłoński, N. Krawczyk, L. Ryć, R. Burhenn, B. Buttenschön, B. Geiger, O. Grulke, A. Langenberg, O. Marchuk, K. J. McCarthy, U. Neuner, D. Nicolai, N. Pablant, B. Schweer, H. Thomsen, Th. Wegner, P. Drews, K.-P. Hollfeld, C. Killer, Th. Krings, G. Offermanns, G. Satheeswaran, F. Kunkel, and W7-X team, Plasma impurities observed by a pulse height analysis diagnostic during the divertor campaign of the Wendelstein 7-X stellarator, *Review of Scientific Instruments* 89, 10F111 (2018)

- [H15] **M. Kubkowska**, B. Buttenschön, A. Langenberg and the W7-X team, W7-X plasma diagnostics for impurity transport studies, Problems of Atomic Science and Technology, No. 6, Series: Plasma Physics (118), 312 (2018)
- [H16] **M. Kubkowska**, T. Fornal, J. Kaczmarczyk, H. Thomsen, U. Neuner, A. Weller and the W7-X team, Conceptual design of the multi-foil system for the stellarator W7-X, Fusion Engineering and Design 123, 811-815 (2017)

Większość wymienionych przeze mnie prac stanowiących podstawę do wszczęcia postępowania habilitacyjnego powstała we współpracy krajowej i międzynarodowej w ramach europejskiego programu fuzji jądrowej Wspólnoty EUROATOM, w latach 2009-2013 w ramach porozumienia EFDA (European Fusion Development Agreement), natomiast w latach 2014-2019 w ramach konsorcjum EUROfusion (www.euro-fusion.org). Program realizowany jest we współpracy 30 jednostek naukowych reprezentujących 26 krajów Unii Europejskiej oraz Szwajcarię i Ukrainę.

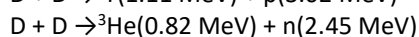
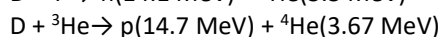
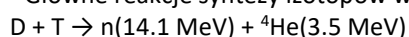
Wykaz wszystkich opublikowanych prac naukowych, których jestem autorem lub współautorem oraz informacje o moich osiągnięciach dydaktycznych, współpracy naukowej i popularyzacji nauki znajdują się w Załączniku 6 do Wniosku.

4.3. Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich wykorzystania

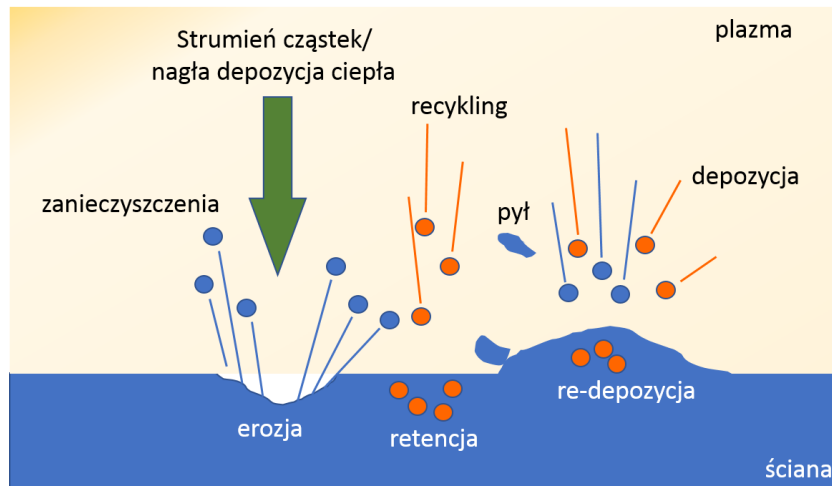
W obecnych czasach istnieje bardzo duże zapotrzebowanie na nisko-emisyjne źródła energii elektrycznej, a energetyka termojądrowa jest jedną z niewielu technologii, która może sprostać tej potrzebie. Wyzwania naukowe, jak i technologiczne wciąż są ogromne, niemniej jednak prowadzony w Europie i na świecie program fuzyjny z każdym rokiem przybliża nas do uruchomienia pierwszej elektrowni termojądrowej. W takim urządzeniu, energia pozyskiwana jest z ogromnej ilości ciepła powstającego z reakcji syntezy, która polega na łączeniu się lekkich pierwiastków w wyniku czego powstają cięższe atomy i wysokoenergetyczne cząstki¹. W warunkach ziemskich fuzja jądrowa rozwijana jest w dwóch wariantach: z magnetycznym i inercyjnym (wykorzystując impulsy laserowe) utrzymaniem plazmy. W obu przypadkach dobór odpowiednich materiałów na ścianę urządzenia, które utrzymywałyby plazmę, jest bardzo istotną kwestią determinującą czas pracy reaktora oraz jakość wyładowania.

Badania oddziaływań plazmy ze ścianą urządzenia termojądrowego (z ang. plasma-wall interaction, PWI) są jednym z najważniejszych zadań programu fuzji jądrowej, w szczególności w wersji z magnetycznym utrzymaniem plazmy [1]. Podstawowe procesy oddziaływania plazmy ze ścianą wewnętrzną zilustrowane są na rys.1. Oddziaływania prowadzą do erozji powierzchni elementów wewnętrznych urządzenia i re-depozycji materiału oraz do zatrzymania paliwa tzw. retencji izotopów wodoru w ścianie reaktora. Ponadto, w wyniku kontaktu plazmy z materiałem ściany tokamaka czy stellaratora (urządzeń fuzyjnych z magnetycznym utrzymaniem plazmy) do plazmy uwolnione mogą zostać zanieczyszczenia, stwarzające ryzyko zerwania sznura plazmowego czy też nawet uszkodzenia elementów

¹ Główne reakcje syntezy izotopów wodoru:



urządzenia. Warto dodać, że proces wraz z czasem staje się bardziej skomplikowany, ponieważ oddziaływaniu podlega zmodyfikowana wcześniej powierzchnia. Ze względu na limit zawartości trytu w komorach urządzeń fuzyjnych, określony ze względów bezpieczeństwa, bardzo istotne jest monitorowanie zanieczyszczeń w plazmie, jak również opracowanie metod usuwania paliwa z wewnętrznych powierzchni tych urządzeń [2]. Badania PWI są kluczowe dla poprawnego działania budowanego obecnie tokamaka ITER – pierwszego eksperymentalnego reaktora termojądrowego, którego celem jest demonstracja zysku energetycznego z reakcji syntezy, czy też projektowanego układu DEMO – pierwszej demonstracyjnej elektrowni bazującej na fuzji jądrowej. O doniosłości tych badań świadczyć może chociażby wyodrębnienie tego tematu w dokumencie opisującym europejską mapę drogową fuzji, tzw. Fusion Roadmap [3-4]. Obecnie prace skupiają się nad opracowaniem diagnostyk do monitorowania składu i usuwania (oczyszczania) zanieczyszczeń z pierwszej ściany wewnętrznej tokamaków i stellaratorów, jak również nad opracowaniem materiałów odpornych na duże obciążenia termiczne i jednocześnie charakteryzujących się niewielką erozją. Zgłębienie tego problemu wymaga dodatkowych prac badawczo-rozwojowych jednocześnie w kilku obszarach, zwłaszcza w tematyce oczyszczania urządzenia z nagromadzonego paliwa (trytu), łagodzenie procesu zatrzymania paliwa w ścianie urządzenia poprzez odpowiedni dobór materiałów i scenariuszy operacyjnych, a także opracowanie metod określających ilość i lokalizacje nagromadzonego paliwa wewnątrz reaktora. Opracowując program dla ITERa, największy obecnie działający eksperymentalny tokamak JET (Joint European Tokamak) z siedzibą w Culham w Anglii został zmodernizowany o nową ścianę podobną do tej, która będzie w ITERze (tzw. ITER-like wall, ILW), w której główne elementy, wykonane wcześniej z węgla (C), zostały zastąpione przez beryl (Be) w głównej komorze i wolfram (W) w obszarze diwertora. Przewiduje się, że ilość odkładanego trytu z tak dobranymi materiałami, będzie odbywać się przy jednoczesnym osadzaniu berylu i pozostałym w urządzeniu węglu, z niewielkim udziałem retencji paliwa w płytach wolframowych. Eksperymenty przeprowadzone podczas ostatnich kampanii pokazują, że długoterminowy wskaźnik retencji paliwa w przypadku ILW wykazuje znaczny spadek w porównaniu z wynikami uzyskanymi dla ścian węglowych. Niemniej jednak wymagane są dalsze badania długoterminowej retencji dla różnych scenariuszach wyładowań plazmy. Osadzanie materiału determinuje nie tylko długotrwałą retencję paliwa, ale także generację pyłu i drobin przez rozpad osadzonych na ścianie warstw. Tryt może być transportowany do odległych obszarów reaktora, gdzie techniki jego usuwania mogą nie być skuteczne. Zatem charakterystyka zdeponowanych warstw *in situ* (ilość trytu i rozkład powierzchni, grubość, skład) i identyfikacja zdeponowanej warstwy mają zasadnicze znaczenie dla poprawnego działania urządzenia fuzyjnego. W tym temacie, metody laserowe w połączeniu ze spektroskopią optyczną podczas i między wyładowaniami są bardzo obiecujące i mogą dostarczyć informacji na temat ilości osadzonego materiału i retencji paliwa.



Rys. 1. Schemat podstawowych procesów towarzyszących oddziaływaniu plazmy ze ścianą w urządzeniach fuzyjnych.

Kolejnym ważnym aspektem w badaniach nad kontrolowaną syntezą termojądrową są badania zanieczyszczeń plazmy i ich zachowania w różnych obszarach urządzenia oraz w różnych warunkach eksperymentalnych. Transport zanieczyszczeń ma ogromne znaczenie, jeśli chodzi o reżim pracy reaktora i jest istotny przy opracowywaniu różnych modeli numerycznych do symulowania zjawisk zachodzących w urządzeniu. W związku z powyższym wymagane jest, aby moc docierająca do płyty diwertora, była odpowiednio niska i nie powodowała przenikania zanieczyszczeń do centrum plazmy. Obecnie opracowywane są różne scenariusze mające na celu zmniejszenie ilości zanieczyszczeń pochodzących z elementów komory urządzenia (np. poprzez wstrzykiwanie dodatkowego gazu), jednak wciąż wymagają one testów i sprawdzania w funkcjonujących układach. Ważne są w tym zagadnieniu współczynniki dyfuzji i konwekcji, które świadczą o zachowaniu się cząstek oraz o jakości wyładowania i jego stabilności.

W dwóch rozwijanych obecnie kierunkach badań: na układach typu tokamak oraz stellarator, zgłębiane są oba wymienione zagadnienia, a więc zarówno prowadzone są badania PWI, jak i badania transportu zanieczyszczeń. W tym celu rozwijane są również różne diagnostyki, z których metody spektroskopowe dostarczają wielu cennych informacji i przybliżają nas do dnia uruchomienia pierwszej elektrowni termojądrowej.

Opis swojego osiągnięcia naukowego, będącego podstawą do wszczęcia postępowania habilitacyjnego, podzieliłam na dwa rozdziały skorelowane z głównymi obszarami badań, którymi zajmowałam się po doktoracie:

- rozdział dotyczący prac związanych z tematyką PWI oraz rozwojem diagnostyk spektroskopowych, które umożliwiają monitoring składu powierzchni ściany w reaktorze, oraz
- rozdział dotyczący rozwoju diagnostyki miękkiego promieniowania rentgenowskiego do badań zanieczyszczeń plazmy i ich transportu.

4.3.1. Diagnostyki spektroskopowe w badaniach oddziaływania plazmy ze ścianą urządzenia

Badania oddziaływań impulsów laserowych czy też strumieni plazmy generowanych przez urządzenia liniowe (takie jak np. plasma-focus) z materiałami są bardzo istotne i pomocne w badaniach PWI w warunkach laboratoryjnych. Jedną z metod, które zastosowałam w swoich badaniach i rozwijałam przez ostatnie lata była laserowo indukowana spektroskopia emisyjna, z ang. laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS), która jest metodą uniwersalną przy określaniu składu pierwiastkowego różnego rodzaju materiałów [5]. W metodzie tej w wyniku oddziaływania impulsu laserowego z powierzchnią badanego elementu następuje najpierw nagrzewanie, topnienie, potem odparowanie i jonizacja materiału. Analiza powstałej w ten sposób plazmy umożliwia, na podstawie charakterystycznego dla danego materiału promieniowania, identyfikację pierwiastków wchodzących w skład badanej próbki.

W pracy [H1] zaprezentowałam zastosowanie spektroskopii optycznej w połączeniu z diagnostykami jonowymi i badaniami materiałowymi do określenia składu plazmy i zmian powierzchniowych materiału w wyniku oddziaływania impulsu laserowego o danej gęstości mocy. Tego typu oddziaływania symulują efekty niestabilności w tokamakach, które prowadzą do nagłej depozycji gorącej plazmy na pierwszej ścianie urządzenia. Obecnie znane jest kilka rodzajów niestabilności, m.in. tzw. dysrupcje (z ang. disruption), które ze względu na przekroczenie wartości granicznej pewnych parametrów (np. gęstości elektronowej) powodują ochłodzenie plazmy brzegowej, zerwanie sznura plazmowego, a w wyniku tego uwolnienia energii (oraz zanieczyszczeń) do ściany tokamaka [6]. Każda z tych niestabilności charakteryzuje się czasem trwania i gęstością energii/mocy odkładanej na ścianie urządzenia. Zastosowanie impulsów laserowych czy też strumieni plazmy, dzięki szerokiemu zakresowi parametrów, znalazło zastosowanie w badaniach laboratoryjnych mających na celu symulowanie tych zjawisk. Artykuł [H1] przedstawia badania laboratoryjne oddziaływania impulsów laserowych z wolframem, tj. materiałem, który ze względu na swoje właściwości (dużą odporność termiczną i mechaniczną, a w szczególności wysoki próg rozpylania (z ang. sputtering), niską retencję paliwa, i brak ko-depozycji) jest przewidziany jako materiał konstrukcyjny elementów wewnętrznych (np. diwertora) przyszłego tokamaka ITER. W eksperymencie zastosowałam laser impulsowy Nd:YAG o energii 0.5 J (dla pierwszej harmonicznej 1063 nm) i czasie trwania impulsu 3 ns, który umożliwił zdeponowanie na powierzchni badanej próbki strumienia mocy o gęstości rzędu $10^9 - 10^{10} \text{ W/cm}^2$. Na podstawie sygnałów z diagnostyk jonowych (tj. kolektora i elektrostatycznego analizatora jonów) możliwe było określenie stanu jonizacji plazmy generowanej laserem oraz określenie średniej energii powstałych jonów wolframu. Takie informacje mają duże znaczenie dla analizy pracy reaktora, ponieważ w urządzeniu fuzyjnym, jony (generowane w wyniku nagłej depozycji ciepła na ściankach) zaburzają plazmę i wpływają na transport zanieczyszczeń. Dodatkowo, badania materiałowe pokazały, że w przypadku dużego obciążenia termicznego następuje znaczne nadtopienie wolframu. Przy mniejszej gęstości mocy materiał ulega tylko zmianom morfologii powierzchni, co znów jest istotne z punktu widzenia pracy reaktora, ponieważ w wyniku nadtopienia do plazmy mogą przedostać się krople materiału, które stają się niebezpieczne i mogą prowadzić do zerwania sznura plazmy i do uszkodzenia elementów wewnętrznych komory.

W artykule [H2] przedstawiłam zastosowanie impulsów laserowych do usuwania kodoepozytu z elementów wewnętrznych komory tokamaka TEXTOR (skrót od Tokamak EXperiment for Technology Oriented Research). Urządzenie to znajdowało się w FZJ Juelich w Niemczech i zostało zamknięte pod koniec 2013 r. W opisanym w [H2] eksperymencie badaniu poddana została grafitowa część elementu limitera tokamaka TEXTOR, która charakteryzowała się dużą zawartością deuteru. Układ TEXTOR początkowo był maszyną o ścianach metalowych (wykonanych ze stali nierdzewnej), jednak ze względu na erozję i uwalnianie do plazmy zanieczyszczeń o dużej liczbie atomowej Z, później zaczęto stosować materiały o niskim Z, głównie grafit i kompozyty węglowe, m.in. do budowy tzw. ogranicznika plazmy (limitera). Kompozyty węglowe mają duże zalety, ponieważ dobrze przewodzą ciepło, a w wyniku obciążeń termicznych nie ulegają topnieniu - tylko sublimacji. Powoduje to mniejsze straty radiacyjne, dzięki niskiej liczbie atomowej Z. Niemniej jednak, materiały te ulegają erozji chemicznej, w skutek której może nastąpić akumulacja paliwa. Poza tym są stosunkowo kruche i mogą być źródłem dużej ilości pyłów dostających się do plazmy. Zalety omawianych materiałów sprawiły, że w początkowej fazie projektowania tokamaka ITER, węgiel rozważany był jako materiał do budowy diwertora tego urządzenia. Dlatego bardzo istotne były jego badania.

W pracy [H2] wykazano, że zastosowanie nanosekundowego lasera Nd:YAG (3.5 ns, 0.5J@1065nm) umożliwia badanie retencji paliwa i jego usuwania z próbki, jednak zależy to od zastosowanej gęstości mocy i długości fali lasera. W analizowanym przypadku wykazałam, że w wyniku oddziaływania plazmy deuterowej w tokamaku ze ścianą urządzenia wykonaną z kompozytów węglowych, paliwo zatrzymywane jest w materiale i wnika do pewnej głębokości. W konkretnym eksperymencie deuter rejestrowany był w widmach uzyskanych z około 50 impulsów laserowych o gęstości mocy $0.7-1 \times 10^9$ W/cm². Deuter wnikał na głębokość do 150 μm, co potwierdziły badania materiałowe. Jediną wadą lasera nanosekundowego o dużej energii w impulsie ($E > 0.1$ J), jako narzędzia do usuwania kodoepozytu, są ewentualne uszkodzenia podłoża. W wyniku oddziaływania impulsów laserowych z materiałami powstają krater, a więc zastosowanie tej metody w tokamaku lub stellaratorze nie byłoby właściwe, ponieważ naruszone zostałyby elementy wewnętrzne urządzenia. Wyniki eksperymentu ujawniły problem z usuwaniem paliwa, jak również z usuwaniem warstw zanieczyszczeń, odkładających się na elementach wewnętrznych reaktora. Przeprowadzone przeze mnie badania pokazały, że zastosowanie laserów jest jak najbardziej wskazane do monitorowania występowania paliwa zgromadzonego wewnątrz ściany tokamaka i może być zastosowane jako diagnostyka do usuwania odkładających się warstw zanieczyszczeń, np. aby uniknąć nagłego oderwania i zerwania sznura plazmowego. Wnioski z tych badań przyczyniły się do powstania kolejnej pracy [H3], w której do usuwania warstw zastosowałam laser światłowodowy (Yb: fiber) o znacznie mniejszej energii (1 mJ) i dłuższym czasie trwania impulsu (100-150 ns), ale o wysokiej częstotliwości repetycji (wynoszącej do 100kHz) w porównaniu do lasera nanosekundowego. W tym przypadku badaną próbką była próbka aluminiowa (Al) z warstwą aluminium, węgla (C) i wolframu (W), wykonana przez ITME (Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych). Symulowała ona odkładane warstwy zanieczyszczeń w tokamaku o znanym składzie. Aluminium zostało tu zastosowane w celu symulacji ściany

berylowej (Be), która przewidziana jest w układzie ITER². Przeprowadzony eksperyment wykazał, że można dobrać odpowiednią gęstość mocy lasera światłowodowego i usunąć warstwę ko-depozytu (w tym przypadku W-Al-C), minimalizując proces niszczenia podłoża. Wyniki zaprezentowane przeze mnie w pracy [H3] pokazują, że laser światłowodowy jest dobrym kandydatem do usuwania warstw ko-depozytu w tokamakach.

W celu doboru odpowiednich parametrów wiązki lasera do oczyszczania powierzchni ścian urządzenia termojądrowego (tj. usuwania warstwy powierzchniowej) bardzo istotna jest informacja o składzie chemicznym określonego elementu. Zajmując się tą tematyką, wspólnie ze współpracownikami zastosowałam metodę LIBS do diagnostyki retencji paliwa, jak również do wyznaczania składu badanych materiałów, tym razem w próbkach metalicznych. Praca [H4] przedstawia wyniki analiz dwóch rodzajów próbek: elementu z tokamaka ASDEX (Axially Symmetric Divertor Experiment) Upgrade, znajdującego się w Garching w Niemczech oraz wykalibrowanych (tj. o znanym składzie) próbek przygotowanych przez ITME. W pierwszym przypadku, badanymi próbkami były dwie płyty grafitowe z warstwą wolframu, odpowiednio o grubości 4 μm i 200 μm , które pochodziły z obszaru diwertora urządzenia ASDEX Upgrade. Urządzenie to stanowi tokamak, którego ściany wewnętrzne są wolframowe, a program badawczy poświęcony jest m.in. badaniom oddziaływania plazmy ze ścianą, głównie w celu określenia roli materiału o wysokiej liczbie atomowej Z (np. wolframu $Z = 74$) na utrzymanie i zachowanie plazmy. W porównaniu do próbki z TEXTORA opisanej w [H2], warstwa z paliwem w próbkach z układu ASDEX Upgrade okazała się znacznie cieńsza i bez względu na grubość warstwy wolframu wynosiła jedynie ok. 1 μm . W eksperymencie zaobserwowano emisję linii Balmer-alfa deuteru (656.11 nm) tylko po zastosowaniu dwóch pierwszych impulsów lasera. Po kolejnych impulsach laserowych w rejestrowanym widmie przeważały linie wolframu, co wskazywałoby na usunięcie paliwa. Jako dodatkową diagnostykę w omawianych badaniach zastosowano również elektrostatyczny analizator jonów, którego sygnały potwierdziły poprzednie obserwacje.

Drugim rodzajem badanych materiałów w pracy [H4] były próbki zawierające warstwy wolframu, węgla i aluminium w różnym składzie procentowym. W celu sprawdzenia zdolności metody LIBS do ilościowej charakteryzacji zawartości pierwiastków tworzących warstwy tzw. mixed materiale, tj. materiałów mieszanych (adekwatnych do przyszłego składu ściany reaktora termojądrowego), płytki aluminiowe pokryto w ITME za pomocą epitaksji domieszkowanymi wodorem warstwami z wolframu i aluminium (symulującego beryl w prawdziwym reaktorze) oraz węgla, który wówczas był przewidywany do budowy elementów diwertora. Na podstawie widm optycznych, zmierzonych za pomocą metody LIBS, zaproponowano syntetyczny współczynnik zawartości, który wyrażał stosunek sumy natężeń charakterystycznych (w danych warunkach eksperymentalnych) linii widmowych rozpatrywanego pierwiastka do sumy natężeń linii wszystkich zidentyfikowanych pierwiastków. Współczynnik ten wykazał dobrą korelację z zawartością pierwiastków w

² Przewodność cieplna Al i Be jest stosunkowo bliska (18,5% większa dla Al), zwłaszcza w porównaniu z innymi metalami, np. magnezem, żelazem, miedzią, galem, itp., które również mogłyby być potencjalnymi kandydatami na zastąpienie berylu w badaniach laboratoryjnych. Twardość i moduł Younga są znacznie wyższe dla Be niż Al, natomiast oba pierwiastki mają podobne właściwości chemiczne i wykazują zdolność do tworzenia tlenków. Biorąc pod uwagę fakt, że różnice nie są w rażący sposób większe niż różnice między innymi metalami, Al został wykorzystany jako zamiennik dla Be w pracach PWI w warunkach laboratoryjnych.

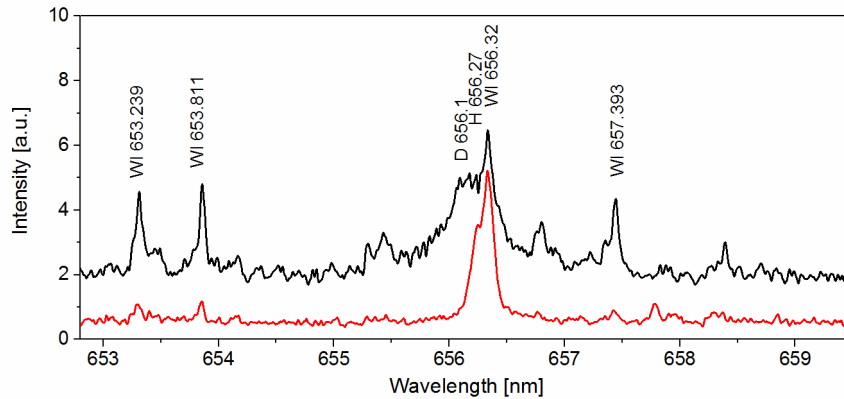
warstwach o różnych proporcjach składników, co przedstawia rysunek nr 4 w pracy [H4]. Kolejnym istotnym celem badań przedstawionych w omawianej pracy było sprawdzenie zależności między retencją paliwa i efektywnością jego usuwania, a procentową zawartością pierwiastków tworzących warstwy. Jak przedstawiono na rysunku nr 5 pracy [H4], nie stwierdzono istotnych różnic między początkową zawartością wodoru, a ilością impulsów laserowych koniecznych do usunięcia paliwa, co było istotnym wynikiem z punktu widzenia opracowania technik de-trytacji dla przyszłych urządzeń fuzyjnych. Warto podkreślić, że badane warstwy mieszane (zawierające węgiel) są interesujące również ze względu na uruchomiony w 2015 r. stellarator Wendelstein 7-X w Niemczech, który w pierwszej fazie operacyjnej wyposażony był w węglowy limiter, a obecnie - węglowy diwertor.

Analiza i zrozumienie erozji wewnętrznych ścian reaktora, transportu zanieczyszczeń w plazmie i retencji paliwa, jak już podkreślałam wcześniej, należą do najważniejszych tematów w programie badań fuzyjnych, a w szczególności są kluczowe dla programu stellaratora W7-X, czy też budowanego obecnie reaktora ITER. Rozwiązanie tych zagadnień w dużej mierze zdeterminuje czas pracy urządzeń fuzyjnych i jakość syntezy jądrowej. Należy zauważyć, że badania PWI prowadzone były na próbkach wyjętych z prawdziwych urządzeń (tzw. analizy post-mortem), lub też na wybranych próbkach kalibracyjnych. W miarę rozwoju badań prace te zaczęły skupiać się na opracowywaniu diagnostyk umożliwiających pomiary w samym reaktorze [2, 7]. Wynika to z faktu, że dostęp do próbek „post-mortem” będzie w przyszłości ograniczony ze względu na stosowanie aktywnie chłodzonych komponentów oraz wymogów bezpieczeństwa. Wobec powyższego, metoda LIBS została zaproponowana jako diagnostyka do monitorowania składu powierzchni diwertora w urządzeniach fuzyjnych i obecnie jest testowana w ramach międzynarodowego projektu konsorcjum EUROfusion „WP18-MST2-A: Implementation of Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) using the Multi-Purpose Deployer”, który ma na celu demonstrację metody w tokamaku FTU, znajdującym się we Frascati we Włoszech. O ile zastosowanie samej techniki w warunkach laboratoryjnych nie jest bardzo skomplikowane, to w konkretnym urządzeniu fuzyjnym należy zaprojektować cały układ eksperymentalny na ruchomym ramieniu, zdalnie kontrolowanym. Dodatkowo, bardzo istotna jest optyka, która musi dostarczyć impuls laserowy we wskazane miejsce, a następnie zebrać widmo i przekazać je do spektrometru.

W celu poprawy czułości w metodzie spektroskopii plazmy wzbudzonej laserem, jako diagnostyki przeznaczonej do analizy *in-situ* składu wewnętrznych ścian urządzenia fuzyjnego, w pracach [H5-H6] wspólnie ze współautorami zaproponowałam metodę z podwójnym impulsem, tzw. „dual-pulse LIBS” (DP LIBS). Jest to wariant, w którym stosowane są dwa współliniowe impulsy laserowe, oddzielone czasowo od 100 ns do nawet kilku ms, w zależności od warunków eksperymentalnych. Taka metoda znacznie poprawia granicę wykrywalności i czułości sygnału, w porównaniu do standardowej konfiguracji LIBS z pojedynczym impulsem. Wzmocnienie sygnału pochodzącego od elementu materiału, którego jest niewiele i w metodzie standardowej nie zostałby wykryty, następuje poprzez ponowne wzbudzenie materiału - uwolnionego na skutek ablacji po pierwszym impulsie laserowym - przez drugi impuls, co w konsekwencji prowadzi do uzyskania wyższej temperatury plazmy i gęstości elektronowej. W eksperymentach opisanych w pracach [H5-H6] wykorzystano próbki symulujące wewnętrzne elementy ścian urządzeń fuzyjnych, w szczególności z obszaru diwertora, gdzie oczekiwana jest największa erozja elementów reaktora.

Eksperyment opisany w [H5] został przeprowadzony w laboratorium w IFPiLM we współpracy z naukowcami z ENEA (National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development, Frascati, Włochy). Badanymi elementami były okrągłe próbki wolframowe o średnicy 25 mm, pokryte ok. 3- μm warstwą mieszaniny wolframu-węgla-aluminium z dodatkową zawartością deuteru. W badaniach z zastosowaniem dwóch impulsów laserowych istotnym parametrem było dobranie odpowiednich czasów między impulsami, a także czasu rozpoczęcia akwizycji danych. W celu znalezienia optymalnego sygnału przeprowadzono próbną serię impulsów laserowych dla różnych czasów. Analiza uzyskanych w ten sposób widm pozwoliła na wyznaczenie okna czasowego, w którym można było założyć warunki lokalnej równowagi termodynamicznej (LRT). W konkretnym przypadku, dla warunków eksperymentalnych opisanych w pracy [H5], jako czas opóźnienia między impulsami wybrano 300 ns; natomiast akwizycję widma rozpoczynano 450 ns po pierwszym impulsie i prowadzono ją przez 500 ns. W celu wyznaczenia zawartości poszczególnych elementów w warstwie zastosowano metodę bez-kalibracyjną (z ang. CF – „calibration free”), która umożliwia analizę ilościową bez konieczności stosowania próbek o znanym składzie. Na podstawie intensywności obserwowanej linii widmowej, która jest funkcją gęstości elementów emitujących promieniowanie i temperatury plazmy, można wyznaczyć względne koncentracje poszczególnych pierwiastków, wchodzących w skład badanej próbki. Zastosowanie omawianej metody było możliwe przy założeniu występowania LRT i istnienia optycznie cienkiej plazmy, a także przy zagwarantowaniu (przez dobór odpowiedniej gęstości mocy lasera - w opisywanym przypadku ok. 3 GW/cm²) warunków do stechiometrycznej ablacji powierzchni próbki. W celu wyznaczenia parametrów plazmy zastosowano wykres Boltzmanną, z którego wyznaczono temperaturę. Określono też poszerzenie Starka dla linii aluminium, z którego wyznaczono koncentrację elektronową. Na podstawie uzyskanych wyników uzyskano procentowe stężenia atomowe wolframu, węgla i aluminium, które były zgodne z wynikami pomiarów wykonanych niezależnie metodą mikroanalizy rentgenowskiej (z ang. EDX - Energy Dispersive X-ray).

W celu oszacowania zawartości w próbce deuteru (i wodoru, który zawsze występuje obok swoich izotopów) - szczegółowej analizie poddano wąski przedział długości fali od 655 do 659 nm, w którym występują linie wodoru i deuteru serii Balmer-alfa oraz linie pochodzące od jednokrotnie zjonizowanych jonów węgla (CII). Stosowany w eksperymencie spektrometr nie miał na tyle dużej zdolności rozdzielczej, aby dobrze rozdzielić linie wodoru i deuteru, ale stosując metodę bez-kalibracyjną - udało się oszacować zawartość izotopów wodoru na poziomie ok. 1.8 %, a deuteru na poziomie 0.95 %. Warto dodać, że odstęp czasu między produkcją a pomiarami próbek w opisywanym eksperymencie wynosił około 2 lat. Oszacowano, że początkowa ilość deuteru była na poziomie kilku procent, co odpowiadało powierzchniowej gęstości deuteru < 10¹⁸ atomów D/cm². W momencie przeprowadzania eksperymentu stężenie deuteru znacząco zmniejszyło się w wyniku spontanicznego uwalniania gazu z cienkich warstw. Niemniej jednak, opisana w [H5] procedura pokazała, że zastosowanie metody LIBS z podwójnym impulsem pozwoliła nie tylko na określenie składu badanej próbki, ale również na wyznaczenie składników na poziomie 1%.

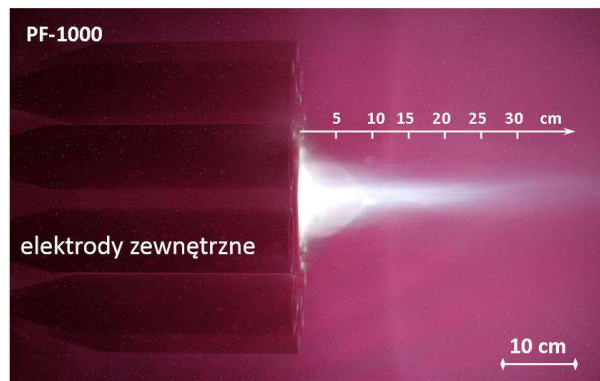


Rys. 2. Widmo dla próbki Mo z warstwą wolframu i aluminium zawierającą deuter i wodór uzyskane w wariancie z pojedynczym impulsem (—) (SP LIBS) i w metodzie dwuimpulsowej (—) (DP LIBS) [H6-H7].

Przeprowadzone eksperymenty pokazały, że w celu potwierdzenia otrzymanych wyników i stosowności metody bez-kalibracyjnej, dobrze byłoby wykonać podobny eksperyment z zastosowaniem spektrometru o wyższej zdolności rozdzielczej. Wyniki tych prac zostały przedstawione w artykule [H6], w którym analizowanym materiałem były okrągłe próbki molibdenowe o średnicy 25 mm, tym razem z warstwą wolframu i aluminium wraz z deuterem, który był współosadzony metodą depozycji w wyładowaniu łukowym. Obok spektrometru o zdolności rozdzielczej rzędu $\lambda/\Delta\lambda = 4000$ (spektrometr Me5000) zastosowano spektrometr o dużo wyższej rozdzielczości $\lambda/\Delta\lambda = 50\,000$ (ISA 550 Jobin–Ivon), co umożliwiło dużo lepsze rozdzielenie linii wodoru i deuteru. Przykład zarejestrowanego widma w porównaniu z metodą z pojedynczym i podwójnym impulsem laserowym, pokazany został na rys. 2. Podobnie, jak w przypadku wyników zaprezentowanych w pracy [H5] i tym razem zastosowanie metody bez-kalibracyjnej pozwoliło na wyznaczenie zawartości poszczególnych elementów w próbce, które były zgodne (uwzględniając błędy eksperymentalne) z wynikami uzyskanymi metodą RBS (z ang. Rutherford Back Scattering). W przypadku deuteru, po odpowiednim dopasowaniu i rozdzieleniu linii w widmie, obliczono, że jego zawartość wynosiła ok. 1.5 % (atomowych). Warto dodać, że w opisanym metodzie bez-kalibracyjnej bardzo ważne jest zidentyfikowanie wszystkich składników chemicznych badanej próbki, a więc zastosowanie spektrometru o szerokim zakresie długości fali, który umożliwia obserwację linii pochodzących od wszystkich pierwiastków. Tylko w takim przypadku można z dobrą dokładnością wyznaczyć zawartość procentową poszczególnych elementów. Zawartość wolframu oraz aluminium, wyznaczona w pierwszej fazie badań, pozwoliła następnie na wyznaczenie zawartości deuteru, przez badania widma w węższym przedziale długości fali i z większą rozdzielczością. Zastosowanie metody bez-kalibracyjnej umożliwia następnie wyznaczyć procentowy skład poszczególnych składników w badanym obszarze materiału, co w połączeniu z wynikami innych badań laboratoryjnych (retencji paliwa w wolframie/berylu(aluminium)) pozwala na oszacowanie zawartości docelowo trytu we wnętrzu urządzenia.

Opis zastosowania impulsów laserowych do badań oddziaływania PWI został zamieszczony przeze mnie w artykule [H7], gdzie przedstawiłam problem oddziaływań plazmy ze ścianą w urządzeniach fuzyjnych. Opisałam tam również zastosowanie laserów jako metody

diagnostycznej w połączeniu ze spektroskopią optyczną, przydatnej do wyznaczenia składu powierzchni ściany (diwertora) lub do usuwania zanieczyszczeń osadzających się (na ściankach komory) w trakcie wyładowań.



Rys. 3. Zdjęcie wyładowania w układzie plasma focus PF-1000 obrazujące zasięg strumieni plazmy wzdłuż osi urządzenia.

Oprócz laserów, innymi urządzeniami do badań PWI są układy plasma-focus (PF), które są źródłami intensywnych strumieni plazmy oraz wysokoenergetycznych deuteronów i neutronów [8-9]. W pracy [H8] wykazałam, że układ plasma-focus PF-1000 może być z powodzeniem stosowany do badań oddziaływania PWI w programie fuzyjnym. Rysunek 3 przedstawia zdjęcie wyładowania w urządzeniu, na którym pokazane jest jak daleko sięgają te strumienie. W zależności od lokalizacji badanej próbki wzdłuż osi PF-1000, materiały mogą być poddawane różnym obciążeniom termicznym, włącznie z deponowaniem materiału elektrod na powierzchni. W pracy [H8] pokazałam także różnice w oddziaływaniu strumieni plazmy z układu PF-1000 z próbkami wolframu i węgla typu CFC (z ang. carbon-fiber-composite). Ze względu na planowane zastosowanie wolframu jako materiału konstrukcyjnego, z którego ma być wykonany diwertor w układzie ITER, w urządzeniu PF-1000 w środku zakończenia elektrody wewnętrznej umocowano płytkę wolframową, w celu generacji strumieni plazmy (zawierających jony wolframu) mających skład zbliżony do plazmy, która ma być generowana w przyszłych urządzeniach fuzyjnych. Eksperyment pokazał, że strumienie generowane w tak przygotowanym układzie PF-1000 rzeczywiście zawierały liczne jony wolframu. Ponadto, w trakcie badań oddziaływań takich strumieni z próbką wolframową, zastosowane diagnostyki pozwoliły stwierdzić, że generowane w opisywanym eksperymencie strumienie plazmy miały parametry wystarczające, aby dokonać ablacji materiału badanej próbki. Szczególnie istotne było to w badaniach oddziaływań z wolframem, gdzie na podstawie widm spektralnych trudno było stwierdzić, czy występowanie określonych linii wolframu jest wynikiem oddziaływania strumieni plazmy z próbką, czy też pochodzi z płytki wolframowej umieszczonej na elektrodzie. Pomocna okazała się w tym wypadku wielo-kadrowa interferometria laserowa, na podstawie której określono wartość gęstości energii strumieni plazmy (na poziomie 1-3 MJ/m²) i pokazano, że mogła ona prowadzić do ablacji materiału tarczy. W wypadku próbki wykonanej z węgla zaobserwowana całkowita liczba elektronów obliczona z obszaru przy powierzchni próbki była znacznie większa niż dla wolframu, co świadczyło o znacznie większej podatności węgla na erozję. Obserwacja ta była m. in. przyczyną tego, że na etapie projektowania reaktora ITER, zrezygnowano w pewnym momencie z węgla jako materiału konstrukcyjnego

przewidzianego na diwertor, ponieważ wykazywał on bardzo dużą erozję. Prace mające na celu badania oddziaływania strumieni plazmy z materiałami przewidzianymi na elementy wewnętrzne reaktorów termojądrowych prowadziłam m.in. w ramach zadania badawczego nr 2 pt.: „Badania i rozwój technologii dla kontrolowanej fuzji termojądrowej”, realizowanego w ramach strategicznego projektu badawczego NCBiR pt.: „Technologie wspomagające rozwój bezpiecznej energetyki jądrowej”, w którym byłam koordynatorem celu szczegółowego nr 1. Podsumowanie wszystkich zrealizowanych w ramach zadania prac znajduje się w monografii [10].

W związku z prowadzonymi przeze mnie pracami, w 2017 r. zostałam zaproszona do wygłoszenia referatu plenarnego na międzynarodowej konferencji PLASMA-2017 - International Conference on Research and Applications of Plasmas (<http://plasma2017.ipplm.pl/2013-01-02-07-40-52>), która odbyła się w Warszawie (tytuł wystąpienia: Study of Plasma-Wall Interactions using pulsed lasers and plasma focus device).

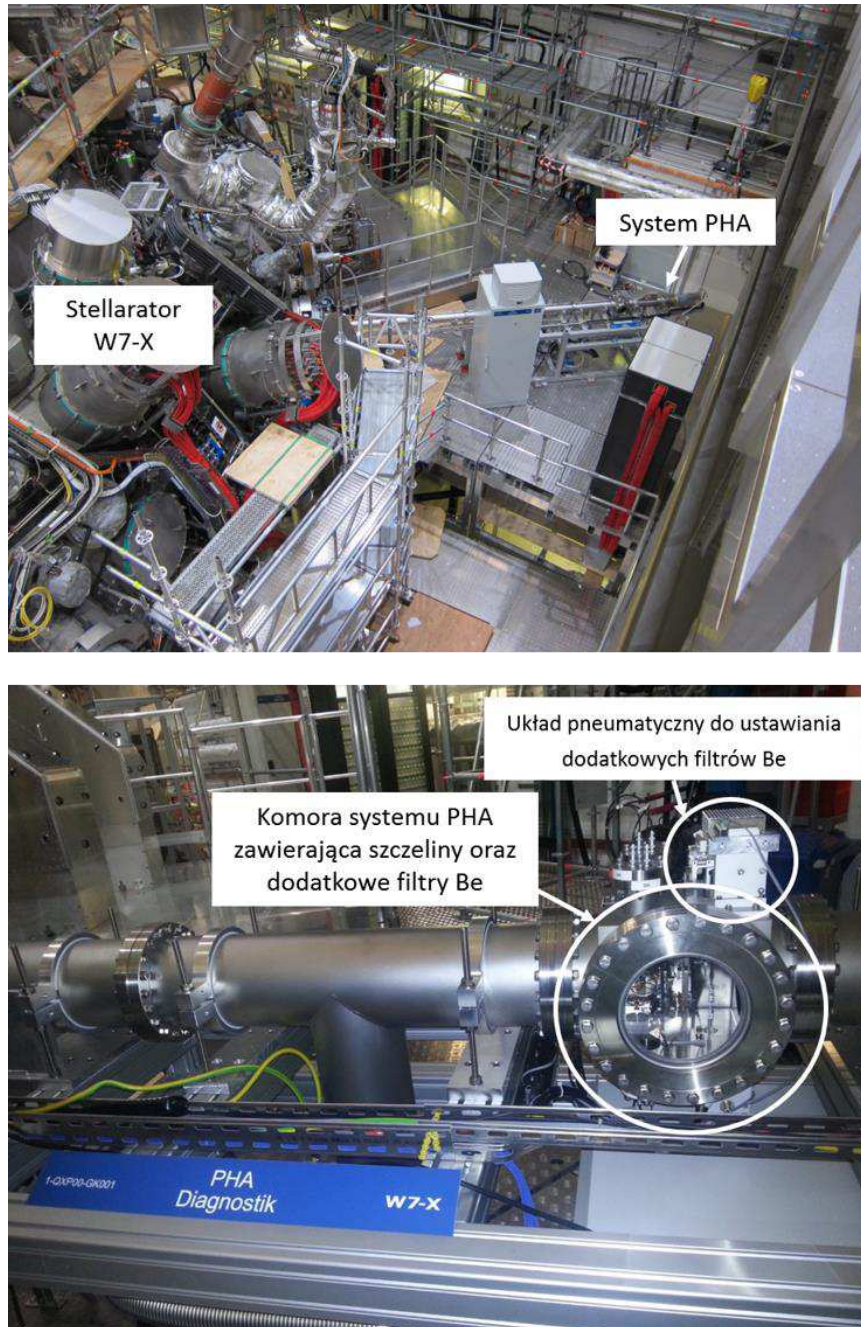
4.3.2. Rozwój i zastosowanie diagnostyk miękkiego promieniowania rentgenowskiego dla stellaratora Wendelstein 7-X

Równoległe do prac związanych z zagadnieniami PWI, prowadziłam prace nad rozwojem diagnostyk spektroskopowych dla stellaratora Wendelstein 7-X (W7-X), znajdującego się w Greifswaldzie w Niemczech. Stellarator w porównaniu do tokamaków jest urządzeniem o znacznie bardziej skomplikowanej budowie, która wynika z wymagań, aby plazma stabilizowana była przez zewnętrzne pole magnetyczne formowane przez specjalne cewki. Ze względu na kształt pola magnetycznego wyróżnia się różne rodzaje konfiguracji stellaratorów, np. heliotron, heliac czy helias. W odróżnieniu od stellaratorów, w tokamakach plazma charakteryzuje się symetrią osiową i stabilizowana jest przez pole magnetyczne wytwarzane przez toroidalny prąd generowany przez transformator (pierścień plazmy stanowi w tym wypadku uzwojenie wtórne transformatora), a także dodatkowe cewki rozmieszczone na torusie. Należy zauważyć, że stellaratory znajdują się również w dokumencie przedstawiającym europejską mapę drogową dla badań fuzyjnych [3-4], ponieważ dają one możliwość pracy ciągłej urządzenia, co dla przyszłej elektrowni termojądrowej ma ogromne znaczenie. Obecnie największym działającym na świecie stellaratorem jest układ W7-X w Niemczech, który został uruchomiony w 2015 r. Program badawczy na tym urządzeniu ukierunkowany jest na optymalizację jego parametrów i badanie zachowania plazmy w różnych warunkach eksperymentalnych. W układzie W7-X została zastosowana konfiguracja pola magnetycznego typu HELIAS (z ang. HELIcal-axis Advanced Stellarator), która obecnie jest najbardziej obiecująca z punktu widzenia przyszłej elektrowni termojądrowej opartej na koncepcji stellaratora [11]. Na początku urządzenie pracowało w wersji z limiterem węglowym, a potem zostało przebudowane i wyposażone w diwertor wykonany także z płyt węglowych.

Od rozpoczęcia mojej pracy w Instytucie Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy zaangażowana byłam w projekt, który miał na celu przygotowanie dwóch diagnostyk spektroskopowych dla układu W7-X: systemu analizy amplitudy sygnału tzw. PHA (z ang. pulse height analysis) oraz systemu wielokanałowego, tzw. MFS (z ang. multi-foil system). Początkowo prace prowadzone były w ramach współpracy bilateralnej pomiędzy IFPiLM oraz IPP-Greifswald (Max Planck Institute for Plasma Physics) i polegały na rozważaniach

teoretycznych i studiowaniu literatury. W 2011 r., już jako kierownik projektu dotyczącego diagnostyk dla W7-X, podjęłam prace nad rozpoznaniem aparatury, która spełniałaby wymagania stawiane przez IPP-Greifswald. Opracowania koncepcyjne powstały w oparciu o symulacje komputerowe, które wykonałam za pomocą prostego kodu 1D RayX, bazującego na modelu koronowym plazmy [12]. Istotną trudnością w projekcie był dobór odpowiednich detektorów, które mogłyby rejestrować widma w szerokim zakresie energetycznym, umożliwiającym identyfikację zarówno lekkich (których linie spektralne znajdują się poniżej 1 keV), jak i cięższych zanieczyszczeń plazmy oraz wyznaczenie temperatury elektronowej z promieniowania ciągłego występującego przy wyższych energiach (powyżej 4-5 keV). W tym celu, system PHA dedykowany dla układu W7-X, został podzielony na 3 kanały, które mogą rejestrować widma zintegrowane wzdłuż linii obserwacji przechodzącej przez centrum plazmy. W czasie pierwszego uruchomienia urządzenia W7-X, elementami wewnętrznymi w tym układzie miały być płyty wykonane z elementów węglowych, najpierw w konfiguracji limitera, a potem diwerta. Spodziewano się występowania cięższych zanieczyszczeń plazmy, a mianowicie jonów żelaza, chromu, niklu, pochodzących ze stalowych elementów konstrukcyjnych komory stellaratora. Biorąc pod uwagę powyższe wymagania, do rejestracji linii rentgenowskich wybrano detektory krzemowe typu SDD (z ang. Silicon Drift Detector).

W pracy [H9] zaprezentowane zostało porównanie rozpatrywanych detektorów i ich testy laboratoryjne. Oba detektory wyposażone były w system chłodzenia typu Peltier (jedno- lub dwu-stopniowy) oraz tranzystor polowy (z ang. FET field-effect transistor) z różnym umiejscowieniem go wewnątrz głowicy. Zaprezentowane wyniki pokazały podobną zdolność energetyczną obu detektorów, ale w przypadku detektorów z PNDetectors, zależność szerokości połówkowej linii - FWHM (od ang. full width at half maximum) od energii kwantów promieniowania była bardziej liniowa. Ostatecznie, po szczegółowej analizie - wybrano detektory krzemowe firmy PNDetector, ponieważ w owym czasie firma ta jako jedyna oferowała detektory pokryte cienkim filtrem polimerowym, który umożliwia rejestrację widma już od energii 350 eV, a więc w obszarze występowania linii węgla i tlenu.



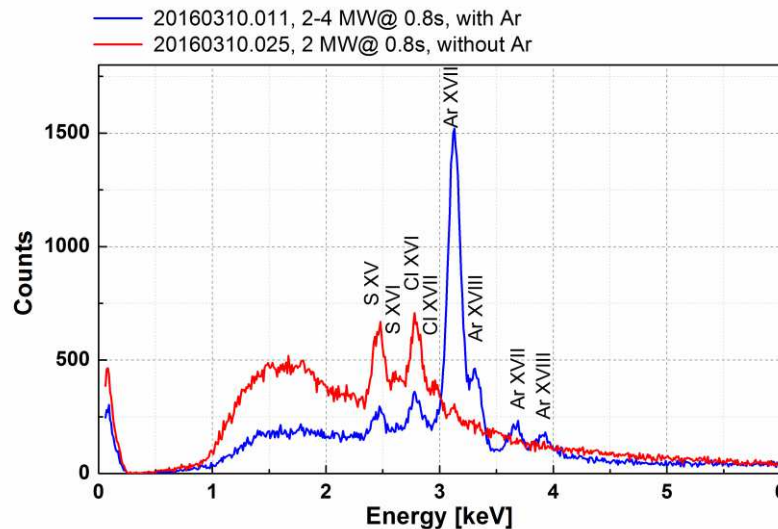
Rys. 4. Zdjęcie zainstalowanej diagnostyki PHA na stellaratorze W7-X.

Praca [H10] przedstawia wyniki testów laboratoryjnych całego systemu PHA, który w 2015 r. został zamontowany na stellaratorze W7-X w Greifswaldzie. Biorąc pod uwagę główne zadania diagnostyki PHA, tj. identyfikację zanieczyszczeń plazmy i badanie ich zachowania w różnych warunkach eksperymentalnych, wyznaczenie ich koncentracji, temperatury elektronowej oraz określenie efektywnego ładunku plazmy Z_{eff} (w połączeniu z odpowiednim modelowaniem), system PHA należało wyposażyć w szczeliny o regulowanej szerokości. Umożliwiają one sterowanie strumieniem fotonów docierających do detektorów, tzw. ICR (z ang. input count rate). Parametr ten ma ogromny wpływ na jakość rejestrowanego widma, po pierwsze ze względu na fakt, że wraz ze wzrostem ilości padających fotonów - pogarsza się zdolność energetyczna systemu, a po drugie z uwagi na tzw. pile-up, tj. nakładanie się

impulsów o tej samej energii, które ze względu na elektronikę nie mogą być rozdzielone w czasie. W artykule [H10] przedstawiłam koncepcję całej diagnostyki PHA wraz ze szczegółami dotyczącymi jej głównych komponentów. Omawiany system składał się z 3 kanałów, z których każdy dedykowany był pomiarom widma w różnym zakresie energetycznym. W celu wybrania interesującego zakresu obserwacji, do systemu wprowadzona została konstrukcja umożliwiająca zastosowanie dodatkowych filtrów berylowych o różnej grubości, definiujących obszar energetyczny rejestrowanego widma. Ponadto, diagnostyka została wyposażona w lampę rentgenowską służącą do kalibracji energetycznej detektorów, wykonywanej na podstawie rejestracji widma fluorescencji takich elementów jak chrom, żelazo, nikiel oraz miedź. Przygotowany w ten sposób system PHA został uruchomiony podczas pierwszej kampanii eksperymentalnej na stellaratorze W7-X pod koniec 2015 r., a ja zostałam powołana na stanowisko osoby odpowiedzialnej za tę diagnostykę, tj. PHA Responsible Officer (RO). Rysunek 4 przedstawia zdjęcie zainstalowanej na stellaratorze W7-X diagnostyki PHA. Warto dodać, że diagnostyka PHA była jedną z pierwszych diagnostyk, które uruchomiono w pierwszej fazie działania układu W7-X. Przed kolekcjonowaniem dobrej jakości widm rentgenowskich (tj. widm o dobrej statystyce) przeprowadzono szereg testów opracowanej diagnostyki, których wyniki zostały zaprezentowane w pracy [H11]. Okazało się, że istotny wpływ na jakość rejestrowanego widma miały: parametr czasu kształtowania impulsu we wzmacniaczu (tzw. peaking time), rozmiar szczelin definiujący ilość fotonów docierających do detektora oraz wymieniony wyżej efekt „pile-up”. Po wielu próbach, udało się pod koniec kampanii eksperymentalnej zoptymalizować ustawienia pierwszego kanału PHA i zaobserwować widma promieniowania emitowanego z plazmy w układzie W7-X. Wciąż jednak dwa pozostałe kanały nie były zoptymalizowane.

Pierwsze wyniki fizyczne i przykłady zastosowania diagnostyki PHA zostały zaprezentowane w dwóch pracach [H12] i [H13]. W pierwszej z nich, zaprezentowałam przykładowe widma wraz ze zidentyfikowanymi zanieczyszczeniami plazmy. Najmniej oczekiwanymi elementami okazały się siarka i chlor, których obecność została również potwierdzona przez inne diagnostyki, m.in. spektrometr promieniowania VUV HEXOS. Najbardziej prawdopodobnym źródłem tych elementów był polichlorek winylu, który stosowano jako osłony śrubek. Ponadto, w zarejestrowanym widmie widoczne były linie pochodzące do wstrzykiwanych dodatkowo zanieczyszczeń gazowych (Ar, Ne), których celem było badanie czasu utrzymania plazmy. Przykład zarejestrowanych widm PHA z pierwszej kampanii eksperymentalnej na W7-X wraz ze zidentyfikowanymi zanieczyszczeniami przedstawiony jest na rys. 5. Należy podkreślić, że możliwość obserwacji w rejestrowanym widmie linii helowo- i wodoro-podobnych - ma ogromne znaczenie w badaniach transportu zanieczyszczeń, a w szczególności dla modelowania procesów zachodzących w plazmie. Poza informacją o składzie plazmy, diagnostyka PHA dostarcza również informacje o temperaturze elektronowej (T_e). W pracach [H12] i [H13] przedstawiono wyniki uzyskane na podstawie analiz widm PHA. Należy zwrócić uwagę, że otrzymane wartości odpowiadają temperaturze elektronowej uśrednionej wzdłuż linii patrzenia diagnostyki. Dlatego, w celu porównania uzyskanych wyników z wartościami dostarczonymi przez diagnostyki dedykowane do określania profilu temperatur, np. na podstawie rozpraszania Thomsona (TS, z ang. Thomson Scattering), należy odpowiednio skorygować wynik o pewien czynnik, lub też dokonać symulacji widm PHA. W pracy [H13] widmo promieniowania Bremsstrahlung zostało obliczone

na podstawie eksperymentalnych profili koncentracji i temperatury elektronowej (określonych z TS), a następnie z obliczonego widma została wyznaczona T_e (metodą, jak z widm eksperymentalnych PHA). Uzyskane w ten sposób wyniki pokazały dość dobrą zgodność, a niewielkie różnice mogły wynikać z symulowanego widma, które zostało obliczone przy założeniu modelu koronowego (bez transportu), a także z dokładności wyznaczonych profili TS. Diagnostyka PHA i obliczone z widm wartości T_e służą zatem do weryfikacji wartości temperatury centralnej, ponieważ nie powinna ona być wyższa niż wartość określona za pomocą systemu PHA.



Rys.5. Zarejestrowane widma w pierwszej kampanii eksperymentalnej z plazmy W7-X na przykładzie dwóch wyładowań: bez napszczania Ar (—) i z napszczeniem Ar (—) [44].

Pierwsza kampania operacyjna układu W7-X miała głównie na celu sprawdzenie działania samego urządzenia, a więc uruchomienie grzania plazmy metodą ECRH (z ang. electron cyclotron resonance heating), sprawdzenie podstawowych diagnostyk (zwłaszcza systemu wyzwalania i akwizycji), demonstracja stabilnej pracy układu, a także przeprowadzenie badań fizycznych, w tym ocenę bilansu mocy i czasu utrzymania plazmy. Należy zauważyć, że ze względu na złożoną konfigurację pola magnetycznego w stellaratorach mamy do czynienia z różnymi rodzajami transportu zanieczyszczeń (neoklasyczny, turbulentny) [13-14]. Zrozumienie procesów oddziaływania cząstek w plazmie ma kluczowe znaczenie dla poprawnego działania całego stellaratora, dlatego bardzo istotny jest tu wybór diagnostyk do monitorowania zanieczyszczeń w plazmie. System PHA od początku działania układu W7-X był jedną z najważniejszych diagnostyk, zaliczanych do tzw. monitorów zanieczyszczeń plamy centralnej (ponieważ rejestracja widm obejmuje obszar miękkiego promieniowania rentgenowskiego).

W kolejnej kampanii eksperymentalnej OP1.2 na układzie W7-X udało się zoptymalizować pozostałe dwa kanały PHA, a dodatkowo (dzięki zastosowaniu odpowiednich dodatkowych filtrów berylowych) - dobrać tak obszary rejestracji widm, że każdy z kanałów rejestrował inne zanieczyszczenia. W pracy [H14] zaprezentowałam proces optymalizacji detektorów PHA oraz przykładowe widma otrzymane w czasie kampanii „diwertorowej”. Poza tym, w pracy została opisana metoda przeliczania zarejestrowanych zliczeń (fotonów) na

wartość emisyjności, wyrażoną w $[W/m^3eV]$. Metoda ta bazuje na czynniku geometrycznym, krzywej wydajności detektorów oraz efekcie „pile-up”, który uwzględniany jest przez zależność teoretyczną. Pozwala to następnie określić koncentracje obserwowanych zanieczyszczeń oraz umożliwia dokonanie kalibracji innych diagnostyk, obserwujących te same linie spektralne (tzw. cross calibration). Podczas kampanii eksperymentalnej OP1.2 po raz pierwszy uruchomiono diagnostykę tzw. laser blow-off (LBO), która wykorzystywała laserową ablację wybranego materiału, utrzymywanego przez specjalny manipulator (z ang. multi-purpose manipulator). Powodowało to wprowadzenie do plazmy wybranych zanieczyszczeń. Miało to bardzo duże znaczenie dla całego eksperymentu, ponieważ wstrzykiwanie domieszek umożliwiało badania transportu zanieczyszczeń w plazmie. Diagnostyka PHA, jako jedna z pierwszych, zarejestrowała widma pochodzące z diagnostyki LBO, co potwierdziło jej poprawne działanie. Ponadto, pomimo mniejszej (w porównaniu z innymi diagnostykami) rozdzielczości czasowej systemu PHA, udało się zaobserwować eksponencyjny czas zaniku wprowadzonych zanieczyszczeń (rysunek 7 w pracy [H14]), który determinował czas utrzymania zanieczyszczeń, a więc i parametry ich transportu. Chciałabym dodać, że podczas ostatniej kampanii eksperymentalnej w układzie W7-X udało się również poprawić zdolność rozdzielczą przez dobranie odpowiednich parametrów diagnostyki. Zebrane wyniki (zarejestrowane z czasem 60 ms) umożliwiają jeszcze dokładniejsze studiowanie czasów zaniku różnych domieszek. Wyniki te są nadal analizowane.

Po sukcesach związanych z uruchomieniem i uzyskaniem pierwszych wyników z diagnostyki PHA na układzie W7-X, w 2018 r. zostałam zaproszona do wygłoszenia referatu pt. „W7-X plasma diagnostics for impurity transport studies” na międzynarodowej konferencji International Conference and School on Plasma Physics and Controlled Fusion (ICPPCF-2018), która odbyła się w dn. 10-13 września w Charkowie na Ukrainie. W pracy [H15] przedstawiłam opis problemów transportu zanieczyszczeń w plazmie, a także omówienie głównych diagnostyk służących do takich badań. W szczególności opisałam system PHA, spektrometr promieniowania w obszarze VUV (z ang. High-Efficiency XUV Overview Spectrometer, HEXOS) oraz spektrometr obrazowania promieniowania rentgenowskiego oparty na wykorzystaniu kryształu Bragga (z ang. X-ray imaging spectrometers, XICS). Diagnostyki te uzupełniają się nawzajem i umożliwiają weryfikację wyników. Badając czas zaniku zanieczyszczeń w zależności od liczby atomowej Z , spektrometr PHA wraz ze spektrometrem HEXOS są w stanie rejestrować linie pochodzące od różnych pierwiastków w czasie jednego wyładowania, a więc w tych samych warunkach eksperymentalnych. Badając ten sam parametr dla wybranego elementu, ale dla linii pochodzących od jonów o różnym stopniu jonizacji, oba spektrometry uzupełniają się nawzajem; diagnostyka PHA obserwuje w większości przypadków linie helowo-zjonizowane, podczas gdy HEXOS linie o niższej krotności jonizacji.

Inną diagnostyką dla stellaratora W7-X, przy której opracowywaniu pełnię rolę kierownika i „RO”, jest system wielo-filtrowy, tzw. MFS (z ang. multi-filter system), który bazuje na absorpcji filtrów o różnej grubości i służy do wyznaczania temperatury elektronowej na podstawie rejestrowanej intensywności promieniowania [15]. Diagnostyka ta jest obecnie w fazie koncepcyjnej i przeszła już fazę tzw. przeglądu koncepcji (z ang. conceptual design review), a szczegóły zostały przedstawione w pracy [H16]. Projektowany system będzie pracował w modzie prądowym i oparty będzie o matrycę detektorów krzemowych o powierzchni czynnej $4.6 \times 4.6 \text{ mm}^2$. Biorąc pod uwagę przypisany tej diagnostyce port

diagnostyczny układu W7-X (jego rozmiary oraz lokalizację w polu magnetycznym), razem ze współpracownikami opracowałam geometrię układu pomiarowego, wraz z rozmieszczeniem jego poszczególnych elementów. Promieniowanie rentgenowskie w omawianym systemie MFS będzie monitorowane przez 40 detektorów umieszczonych w 5 rzędach i 8 kolumnach. Każdy detektor w rzędzie będzie obserwował inny obszar plazmy, natomiast 8 detektorów w każdej kolumnie - będzie obserwowało ten sam obszar, ale w różnym przedziale energetycznym, dzięki zastosowaniu 8 filtrów berylowych o różnej grubości. Planowane zastosowanie dekonwolucji widm ma umożliwić następnie uzyskanie informacji o temperaturze elektronowej w plazmie. W pracy [H16] przedstawiłam koncepcję diagnostyki MFS wraz z propozycją konstrukcyjnego rozwiązania systemu próżniowego, a także zaproponowałam metody dekonwolucji rejestrowanych sygnałów w celu uzyskania szukanych wartości temperatur plazmy.

4.3.3. Podsumowanie osiągnięć prowadzonych badań w ramach rozprawy habilitacyjnej

Rozwój i zastosowanie metod spektroskopowych do badań oddziaływań plazmy ze ścianą oraz badań zanieczyszczeń i ich zachowania w plazmie, w kontekście przyszłego reaktora termojądrowego, zaprezentowałam na podstawie cyklu prac [H1-H16]. Są to artykuły wybrane z całego mojego dorobku naukowego, w których swój wkład oceniam jako bardzo istotny. Uważam, że artykuły te przedstawiają najważniejsze wyniki prowadzonych przeze mnie badań, które przyczyniły się do rozwoju prac nad syntezą termojądrową.

W zakresie tematyki badań oddziaływania plazmy ze ścianą pokazałam możliwości zastosowania impulsów laserowych przez odpowiedni dobór ich parametrów, zarówno w procesie usuwania paliwa, jak i warstwy zanieczyszczeń [H2-H4], a także do symulowania w laboratorium oddziaływań PWI [H1-H4, H7-H8]. Ponadto, wykazałam możliwość zastosowania laserowo indukowanej spektroskopii emisyjnej (LIBS) jako diagnostyki do monitorowania składu powierzchni elementów wewnętrznych reaktora plazmowego [H4-H6]. Zaproponowana diagnostyka LIBS z podwójnym impulsem jest obecnie testowana na makiecie tokamaka FTU we Włoszech, aby potem móc ją zastosować być może w tokamaku JET oraz w reaktorze ITER. Oddziaływania plazmy ze ścianami urządzenia mają ogromny wpływ na zachowanie plazmy, ponieważ w wyniku tych oddziaływań do plazmy przedostają się liczne zanieczyszczenia, które mogą spowodować zerwanie sznura plazmowego i przerwanie reakcji syntezy. Wiedza o zachowaniu takich zanieczyszczeń jest bardzo istotna do określenia reżimów pracy różnych urządzeń fuzyjnych i rozwijania nowych modeli fizycznych, na podstawie których można optymalizować pracę reaktorów termojądrowych.

Zbiór prac [H9-H16] przedstawia cykl artykułów dotyczących rozwoju diagnostyki PHA desygnowanej dla stellaratora W7-X, od momentu powstania koncepcji, poprzez wybór detektorów i komponentów systemu pomiarowego [H9], testy laboratoryjne [H10], aż do instalacji aparatury w urządzeniu plazmowym [H11], jej uruchomienie i uzyskanie pierwszych fizycznych wyników, potwierdzonych później również przez inne diagnostyki [H12-H15]. Uzupełnieniem diagnostyki przeznaczonej dla największego obecnie działającego na świecie stellaratora w konfiguracji magnetycznej helias, jakim jest układ W7-X, będzie system wielofiltrowy, który dostarczy informacji o rozkładzie temperatury elektronowej w plazmie. Parametr ten jest bardzo istotny z punktu widzenia badań transportu domieszek w plazmie.

Koncepcja tej diagnostyki, uwzględniająca wszystkie wymagania stawiane przez naszych niemieckich partnerów (IPP), została przedstawiona w pracy [H16]. Zainstalowanie i uruchomienie diagnostyki PHA na stellaratorze W7-X w Greifswaldzie, która była jedną z nielicznych diagnostyk działających już w pierwszej kampanii eksperymentalnej w 2015 r. uważam za swoje duże osiągnięcie. Obecnie diagnostyka ta działa rutynowo, jest obsługiwana przez naukowców z IFPiLM i dostarcza wielu interesujących danych, czego odzwierciedleniem jest liczba prac naukowych z ostatnich 3 lat.

4.4. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych

4.4.1. Informacje o pracy naukowej przed otrzymaniem stopnia doktora

W 1998 r. rozpoczęłam studia na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, gdzie po dwóch latach dostałam się na specjalizację Optyka. W 2001 r. pod kierunkiem dr hab. Teresy Grycuk obroniłam pracę licencjacką, która dotyczyła spektroskopii oddziaływań van der Waalsa. Po obronie pracy, kontynuowałam badania i dalej zajmowałam się spektroskopią oddziaływań międzycząsteczkowych. W pracy magisterskiej skupiłam się na wyznaczeniu daleko-zasięgowych części potencjału oddziaływania cząsteczki ZnKr. Było to możliwe dzięki zastosowaniu metody klasycznej spektroskopii absorpcyjnej, przy użyciu spektrometru optycznego o wysokiej zdolności rozdzielczej.

W latach akademickich 2001/2002 i 2002/2003 otrzymywałam stypendia za osiągnięcia naukowe. W czerwcu 2003 r. ukończyłam studia z oceną końcową bardzo dobrą i po obronie pracy pt. „Badania doświadczalne i teoretyczne skrzydeł linii rezonansowej cynku ($\lambda = 213.8$ nm) zaburzonej przez krypton” uzyskałam tytuł magistra fizyki.

W październiku 2003 r. rozpoczęłam studia doktoranckie pod kierunkiem prof. dr hab. Pawła Kowalczyka. Zajęłam się wówczas zastosowaniem dwóch metod spektroskopowych: metody znakowania polaryzacyjnego i metody spektroskopii klasycznej -do badania szeregu stanów elektronowych, zarówno cząsteczek homojądrowych, jak i heterojądrowych. Celem pracy było wyznaczenie dla badanych stanów krzywych energii potencjalnej.

Metodą spektroskopii laserowej z wykorzystaniem metody znakowania polaryzacyjnego poziomów zbadałam stan $6^1\Pi_u$ w cząsteczce Na_2 , który jest skorelowany z asymptotą atomową 3^2S+4^2F . Stan ten został po raz pierwszy zbadany doświadczalnie w mojej pracy doktorskiej i stał się podstawą do weryfikacji istniejących obliczeń teoretycznych.

Kolejnym badanym przeze mnie stanem był stan $C^1\Pi_u$ cząsteczki Li_2 skorelowany z asymptotą atomową $2^2P_{1/2} + 2^2P_{3/2}$. W tym przypadku w eksperymencie po raz pierwszy zaobserwowano poziomy oscylacyjno-rotacyjne o oscylacyjnej liczbie kwantowej z przedziału od $v' = 0$ do $v' = 21$ oraz rotacyjnej liczbie kwantowej - zawierającej się w przedziale od $J' = 1$ do $J' = 47$. Umożliwiło to wyznaczenie krzywej energii potencjalnej, która odtwarza 57% głębokości całej studni potencjału. Ponadto, dla wymienionego stanu udało się zaobserwować niewielki efekt załamania przybliżenia Borna-Oppenheimera. W stanie $2^1\Sigma^+_u$ cząsteczki Li_2 skorelowanym z asymptotą atomową $2^2S_{1/2} + 3^2S_{1/2}$, który jest stanem nieregularnym, posiadającym dwie jamy potencjału, badałam poziomy oscylacyjne znajdujące się ponad wewnętrzną barierą potencjału aż do $v' = 50$, ponieważ obszar niskich poziomów oscylacyjnych (odpowiadający dwóm rozłącznym studniom potencjału) był już wcześniej

zbadany. Ze względu na kształt krzywej energii potencjalnej badanego stanu, potencjał ten wyznaczyłam w pełni kwantową metodą tzw. odwrotnego podejścia perturbacyjnego IPA (z ang. Inverted Perturbation Approach).

Druga zastosowana przeze mnie metoda spektroskopii polegała na analizie kształtu skrzydeł linii atomowej badanej cząsteczki, co umożliwiało wyznaczenie lub weryfikację krzywych energii potencjalnej zaangażowanych w rozpatrywane przejście. W przypadku badanych przeze mnie dimerów Zn_2 wyznaczyłam daleko-zasięgowe części potencjałów w stanach molekularnych 11_u i $^10^+_u$ skorelowanych z asymptotą atomową $Zn(4^1P_1) + Zn(4^1S_0)$. Zbadałam również zależność siły oscylatora od odległości międzyatomowej w obszarze dużych R oraz zweryfikowałam potencjał teoretyczny w stanie 11_u (na podstawie zaobserwowanego pasma satelickiego linii Zn 213.856 nm). Ponadto, obserwacja skrzydeł tej linii zaburzonej przez Kr umożliwiła mi wyznaczenie różnicowych stałych van der Waalsa dla dwóch stanów molekularnych zaangażowanych w przejście $^10^+_u - X$ i $^11_u - X$, jak również poprawę kształtu potencjału w stanie $^10^+_u$ dla bliskich odległości międzyatomowych. Główną motywacją prowadzonych przeze mnie badań spektroskopowych były nie zweryfikowane doświadczalnie prace teoretyczne, a także fakt, że badane cząsteczki nie były poprzednio badane eksperymentalnie stosowaną przeze mnie metodą.

Wyniki prowadzonych przeze mnie prac badawczych zostały przedstawione w 7 artykułach naukowych [16-22]. Dodatkowo, wyniki te były prezentowane na międzynarodowych konferencjach, m.in. na 17th International Conference on Spectral Line Shape w Paryżu (2004), International Conference on Laser Probing w Argonne (2004) i warsztatach FAMO w Juracie (2004). Ponadto, wyniki swoich badań przedstawiałam na XXXVII (2003) i XXXIX (2005) Zjeździe Fizyków Polskich. W trakcie studiów doktoranckich prowadziłam także zajęcia dydaktyczne ze studentami Wydziału Fizyki UW.

W październiku 2007 r. obroniłam pracę doktorską pt.: „Badania wybranych stanów elektronowych cząsteczek Na_2 , Li_2 , Zn_2 i $ZnKr$ metodami spektroskopii laserowej i klasycznej”.

4.4.2. Badania po doktoracie niewchodzące w skład rozprawy habilitacyjnej

W 2007 r. podjęłam pracę w Instytucie Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy (IFPiLM), gdzie od początku zajęłam się badaniami plazmy generowanej impulsami laserowymi, stosując głównie metody spektroskopowe. Prowadzone przeze mnie badania dotyczyły symulacji oddziaływań strumieni plazmy w urządzeniach fuzyjnych z materiałami pierwszej ściany i miały na celu zarówno badanie plazmy generowanej w wyniku tych oddziaływań (jej składu, parametrów), jak również badanie zmian powierzchni i struktury w kontekście badań materiałów przewidzianych dla przyszłych reaktorów. Zasadnicze zadanie prowadzonych przeze mnie prac można ogólnie podsumować jako optymalizacja procesu laserowego usuwania warstw zdeponowanych na elementach wewnętrznych reaktorów termojądrowych i zawierających cząsteczki paliwa jądrowego. Szczegółowe badania miały znacznie szerszy charakter, co wynikało ze złożoności zagadnienia oraz z zaawansowanego stanu badań plazmowych, i wymagało prowadzenia wielo-parametrycznych eksperymentów pozwalających na wielo-aspektową analizę zjawisk zachodzących podczas oddziaływań laser-tarcza.

Prace rozwijane w IFPiLM były przeze mnie realizowane głównie w ramach programu badań fuzyjnych wspólnoty EURATOM, najpierw w ramach EFDA, a później w ramach

konsorcjum EUROfusion. Część prac realizowałam również w granie NCBiR w ramach strategicznego projektu badawczego „Technologie wspomagające rozwój bezpiecznej energetyki jądrowej”. Realizowane przeze mnie prace badawcze w dużej części prowadzone były we współpracy z innymi jednostkami, zarówno krajowymi jak i zagranicznymi. Większość prowadzonych prac na urządzeniu plasma-focus PF-1000 zostało wykonanych we współpracy z badaczami z Instytutu Problemów Jądrowych (IPJ), a później Narodowego Centrum Badań Jądrowych (NCBJ), głównie z grupą prof. dr hab. Marka Sadowskiego. Dzięki tej współpracy miałam możliwość wzięcia udziału w eksperymencie przeprowadzonym na urządzeniu RPI-IBIS w NCBJ [23]. Prace prowadzone na urządzeniu PF-1000 dotyczyły głównie badań parametrów strumieni plazmy generowanych przez to urządzenia i zachowania tych strumieni w różnych warunkach eksperymentalnych oraz badań oddziaływania tych strumieni z różnymi materiałami [24-28] pod kątem ich aplikacji w przyszłych reaktorach.

Jeżeli chodzi o badanie oddziaływań impulsów laserowych z materiałami, to uczestniczyłam również w licznych eksperymentach z wykorzystaniem różnych materiałów konstrukcyjnych [29-33].

W 2012 r. realizowałam badania nad generacją pyłów za pomocą impulsów z lasera Nd:YAG, które polegały na obserwacji procesów za pomocą szybkiej kamery oraz zbierania pyłu za pomocą kolektorów, które wykonano z aerożelu (przy współpracy z Alvfén Lab w Szwecji). Prace realizowane były w ramach projektu EFDA WP12-IPH-A03-2-08. Jako tarczę wykorzystano element konstrukcyjny z tokamaka TEXTOR, a konkretnie - część limitera składającą się z grafitu, który posiadał warstwę powierzchniową zawierającą paliwo termojądrowe w postaci deuteru. Pierwsze eksperymenty przeprowadzono bez zastosowania aerożelu, głównie w celu sprawdzenia rozrzutu pyłu powstającego w wyniku oddziaływania impulsów laserowych z tarczą. W ten sposób zobrazowany został proces transportu cząsteczek pyłu, który pokazał, że pył ten uwalniany jest po (20-50) μs po impulsie laserowym, a wyrzucone cząsteczki poruszają się z prędkością rzędu 100 m/s. Głównym celem projektu było „złapanie” uwalnianego z próbki pyłu w aerożel umieszczony przed badaną tarczą [34-35]. Wyniki pokazały, że taki aerożel może z powodzeniem służyć do diagnostyki monitorującej większe cząsteczki w różnych urządzeniach fuzyjnych. Sam materiał aerożelu wymaga jednak dalszych badań odpornościowych oraz testów w temperaturach i warunkach zbliżonych do tych, które występują w tokamakach czy stellaratorach.

W ramach projektów EFDA (WP09-DTM-01-WP 1.1, Divertor Erosion Monitor study, WP09-DTM-01-WP 1.3, Review of the spectroscopic diagnostics foreseen in ITER, WP09-DTM-01-WP 2.1, Study of periodic dust mobilization from hot surfaces with the use of laser scanning method) uczestniczyłam również w analizach stosowania laserowych i spektroskopowych układów diagnostycznych i użytkowych na potrzeby tokamaka ITER. Badania te wykazały m.in., że zasadne jest stosowanie wielo-częstotliwościowej interferometrii plamkowej (z ang. speckle interferometry), np. w celu monitorowania erozji w obszarze divertora. Wykonane badania pozwoliły na zaplanowanie harmonogramu i środków w celu realizacji projektu mającego na celu budowę takiego urządzenia diagnostycznego. Analizy diagnozowania erozji metodami spektroskopowymi wykazały nieprzydatność tych metod do zastosowań w obszarze divertora, głównie z uwagi na silny wpływ zjawisk przejściowych oraz występowanie w tym obszarze silnej re-depozycji materiałów. Uznano jednak, że metody te mogą przynieść pozytywne wyniki przy wykorzystaniu ich w obszarze głównej ściany komory.

Bardzo istotne były również badania efektów starzeniowych retencji izotopów wodoru w materiałach mieszanych (W:Al:C). Badania tego typu były poprzednio przeprowadzone jedynie dla depozytów węglowych. Dlatego w 2013 r. wspólnie ze współpracownikami zbadalam również ten temat. Eksperymenty z wykorzystaniem próbek pokrytych warstwami mieszanymi (W:Al:C), zostały ponownie przeprowadzone po około 8 miesiącach i zostały poddane badaniom metodą LIBS w wariacie jedno-impulsowym oraz w wariacie dwu-impulsowym. Drugi z wymienionych eksperymentów przeprowadzony został przy współuczestnictwie zespołu badaczy z ENEA Frascati. Eksperymenty porównawcze przeprowadzone dla próbek pokrytych warstwą W:Al:C i litych próbek wolframowych wykazały znaczną różnicę zachowań starzeniowych tych materiałów. Dla litych próbek wolframowych poziom natężenia linii odpowiadających izotopom wodoru praktycznie się nie zmienił. Natomiast, w próbkach W:Al:C linie te stały się praktycznie niewidoczne (miały natężenie zbliżone do średniej amplitudy szumu), co świadczyło o bardzo niskiej zawartości badanych izotopów, praktycznie poniżej granicy detekcji, która w innych eksperymentach wyznaczona została na co najmniej 10^{16} at/cm². Zachowanie próbek W:Al:C świadczy o tym, że warstwa wpływa na retencję, przyspiesza uwalnianie uwięzionych pod powierzchnią gazów i zapobiega akumulacji gazów z atmosfery (głównie pary wodnej, będącej głównym źródłem wodoru). Można to wytłumaczyć małą podatnością warstwy W:Al:C na adsorpcję cząsteczek wody i wodoru, co zapobiega penetracji tych cząsteczek przez warstwę i ich wydostawaniu się z materiału podłoża. Jeżeli obecne w podłożu cząsteczki docierają (na skutek dyfuzji) do materiału warstwy, prawdopodobieństwo ich uwolnienia jest większe niż ich powrotu do podłoża. Ponadto, paliwo termojądrowe (tj. deuter) z warstwy W:Al:C może być usunięte (przez ewaporację/desorpcję) jeszcze przed usunięciem samej warstwy, co zostało potwierdzone przez pomiary metodami inżynierii materiałowej. Może to mieć bardzo istotne konsekwencje dla rozwoju metod usuwania paliwa ze ścian reaktora termojądrowego. Pojawia się możliwość niepełnego usuwania warstwy powierzchniowej, która może następnie pełnić rolę ekranu przed wnikaniem paliwa do wnętrza litego materiału podłoża. W eksperymencie przeprowadzonym wspólnie z grupą z ENEA-Frascati zbadano również próbki, które uprzednio poddane zostały oddziaływaniom plazmy w tokamaku COMPASS (eksploatowanym w IPP w Pradze, Czechy), co spowodowało pewną retencję paliwa termojądrowego. Cechą charakterystyczną tych próbek była cienka warstwa wolframu/stali nierdzewnej (o grubości ok. 100 nm) naniesiona wcześniej na grafitowe podłożo metodą PVD (Plasma Vapour Deposition). Za pomocą metody LIBS stwierdzono, że warstwa taka (wraz z uwięzionym wewnątrz niej deuterem) jest usuwana po zastosowaniu pojedynczego impulsu laserowego o fluencji rzędu 25 J/cm². Badając próbki tego typu wykazano również, że metoda dwu-impulsowa (DP-LIBS) umożliwia uzyskanie lepszego stosunku sygnału do szumu SNR (z ang. Signal to Noise Ratio) niż metoda jedno-impulsowa. Ponadto, metoda DP-LIBS pozwala na precyzyjne dostrojenie się do obserwacji linii widmowych, które odpowiadają różnym pierwiastkom (obecny w badanej próbce) i jonom o różnym stopniu jonizacji.

Chciałabym wspomnieć, że na początku pracy w IFPILM uczestniczyłam w analizie wyników eksperymentów, które miały na celu generację szybkich protonów z tarcz poddanych oddziaływaniu intensywnych impulsów laserowych. Eksperymenty te zostały przeprowadzone na 100-Tera-Watowym laserze w LULI we Francji [36-37]. Głównym celem tych badań było

zbadanie mechanizmów przyspieszania protonów oraz określenie wpływu intensywności impulsów laserowych na generację cząstek.

Prowadzone przeze mnie w ramach doktoratu eksperymenty dostarczyły tylu wyników, że nawet po obronie pracy doktorskiej, kontynuowałam dalszą ich analizę. W ten sposób powstały prace [38-39], w których wyznaczono m.in. zależność siły oscylatora od odległości międzyatomowej $f(R)$ dla Zn_2 oraz dokonano korekcji współczynników potencjału oddziaływania dla samozaburzonych linii Zn (213.8 nm) i Cd (228.8 nm).

Równolegle do badań dotyczących PWI, zaangażowana byłam w prace związane z programem stellaratora Wendelstein 7-X [40-43]. W ramach prac dotyczących rozwoju systemów diagnostycznych - angażowałam się również w dyskusje dotyczące analizy danych, które miały ogromne znaczenie po uruchomieniu urządzenia i przeprowadzeniu pierwszych eksperymentów [44-45]. Uważam, że jednym z moich osiągnięć w tej dziedzinie był wkład do artykułu opublikowanego w *Nature Physics* [14] w 2018 r., w którym przedstawiony został wpływ pola magnetycznego na pracę układu W7-X, w tym - na transport zanieczyszczeń. W omawianej pracy znalazły się również wyniki dostarczone przez diagnostykę PHA, a mianowicie oszacowane na podstawie widma promieniowania ciągłego, przy uwzględnieniu przyczynku od promieniowania rekombinacyjnego, wartości średniego efektywnego ładunku plazmy przedstawione na rys. 5 w artykule [14].

Jeśli chodzi o inne diagnostyki rozwijane dla W7-X, chciałabym dodać, że jestem również członkiem grupy, która opracowuje spektrometr do monitorowania lekkich zanieczyszczeń w plazmie. Projekt ten realizowany jest we współpracy z Uniwersytetem Opolskim, który od lat jest liderem omawianego programu. Projektowany spektrometr, historycznie nazwany „C/O Monitor” dedykowany jest pomiarom miękkiego promieniowania rentgenowskiego w stellaratorze W7-X w celu rejestracji pojedynczych linii spektralnych z rozdzielczością czasową 1 ms. System ten składać się będzie z 4 niezależnych kanałów pomiarowych, którym odpowiadać będzie pomiar Lymanowskich linii boru (4.9 nm), węgla (3.4 nm), azotu (2.5 nm) i tlenu (1.9 nm) [46]. Obecnie projekt jest w fazie aktywnej realizacji, konstruowane są poszczególne elementy całego systemu pomiarowego, a instalacja i pierwsze testy tego systemu na układzie W7-X planowane są pod koniec 2020 r.

Z racji pełnienia funkcji kierownika Zakładu Fuzji i Spektroskopii Plazmy w IFPiLM miałam również okazję uczestniczyć w pierwszych dyskusjach dotyczących opracowania diagnostyki tomograficznej dla tokamaka WEST (znajdującego się w Cadarache, we Francji). Diagnostyka ta ma bazować na detektorach gazowych typu GEM (z ang. gas electron multiplier) [47-48].

Reasumując powyższe, przez wszystkie lata pracy po doktoracie prowadziłam w większości badania, które związane były z tematyką osiągnięcia naukowego, które wskazałam jako podstawę do wszczęcia mojego postępowania habilitacyjnego. Zaplecze laboratoryjne IFPiLM pozwoliło mi na pełne opanowanie techniki LIBS i poznanie procesów fizycznych zachodzących w wyniku oddziaływania nanosekundowych impulsów laserowych z różnymi materiałami. W rezultacie - mogłam wspólnie ze współpracownikami zaproponować opanowaną metodę do wykorzystania jako diagnostykę przydatną do monitorowania składu powierzchni elementów wewnętrznych w wybranym urządzeniu fuzyjnym. Ponadto, mój udział w opracowaniu projektu, budowie, instalacji i uruchomieniu, a obecnie obsłudze i

wykorzystaniu diagnostyki PHA w układzie W7-X - sprawił, że zdobyłam duże doświadczenie i zbudowałam zespół badawczy, który umożliwi realizację postawionych celów.

4.4.3. Osiągnięcia organizacyjne i dydaktyczne

Jeśli chodzi o mój dorobek dydaktyczny to w 2011r. prowadziłam na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej 10h wykład „Energetyka termojądrowa”, natomiast w 2012 r. miałam już przyjemność prowadzić 30h przedmiot pt. „Wstęp do fizyki plazmy i energetyki termojądrowej”. W obu przypadkach opracowałam skrypty do wykładów, aby ułatwić studentom zagadnienia omawiane na zajęciach. W 2013 r. prowadziłam na wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej 30h wykład w języku angielskim dedykowany energetyce termojądrowej. W ciągu wieloletniej pracy w IFPiLM prowadziłam również praktyki studenckie

W czerwcu 2008 r. zostałam wybrana na członka Rady Naukowej (RN) Instytutu Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy, gdzie na pierwszym posiedzeniu nowo wybranej rady zostałam wybrana na Sekretarza Rady i pełniłam tę funkcję do 2013 r. W tym roku zostałam ponownie wybrana na członka RN IFPiLM, gdzie zostałam wybrana na Zastępcę Przewodniczącego RN i pełnię tę funkcję do dziś. Na początku 2009 r. stałam się również członkiem Sekcji Fizyki Plazmy Komitetu Fizyki PAN, gdzie zostałam wybrana Sekretarzem tej Sekcji i pełniłam tę funkcję do 2013 r. W tym samym roku zostałam wybrana na członka Zarządu Sekcji Fizyki Plazmy, tym razem pod auspicjami Polskiego Towarzystwa Fizycznego. Jeżeli chodzi o działalność organizacyjną to w 2007 r. byłam członkiem Lokalnego Komitetu Organizacyjnego międzynarodowej konferencji „34th European Physical Society Conference on Plasma Physics”, 2-6.07.2007, która odbywała się w Warszawie. W 2008 r. brałam udział i reprezentowałam IFPiLM w XXII Pikniku Naukowym Polskiego Radia i Centrum Nauki Kopernik, 14.06.2008, w Warszawie. W 2009 r. byłam współorganizatorem 8th Annual Meeting of the EU-PWI Task Force, 4-6.11.2009, Warszawa. W 2011 i 2013 r. byłam Sekretarzem Lokalnego Komitetu Organizacyjnego międzynarodowej konferencji „International Conference on Research and Applications of Plasmas” PLASMA-2011 i PLASMA-2013, natomiast w 2015 r. byłam Przewodniczącą Lokalnego Komitetu Organizacyjnego tej konferencji. W 2018 r. zostałam powołana na członka Komitetu Naukowego szkoły fizyki plazmy 14th Kudowa Summer School "Towards fusion energy" organizowanej co 2 lata w Kudowie Zdroju. Ponadto, wraz z nową strukturą programu badań nad energetyką termojądrową w Europie, w 2014 r. zostałam wybrana na Przewodniczącą Rady Nadzorczej projektu WPS1: Preparation and Exploitation of W7-X Campaigns, konsorcjum EUROfusion który dotyczy eksploatacji stellaratora W7-X w Greifswaldzie, jak również na członka rady projektu WPPFC: Preparation of efficient PFC operation for ITER and DEMO, dotyczącego badań PWI. W 2018r zostałam powołana na członka panelu ekspertów w konsorcjum EUROfusion, który dokonywał wstępnej oceny składanych projektów w ramach tzw. 'enabling research projects'. Od 2017 r. jestem członkiem „Zespołu do spraw pracowników naukowych i badawczo-technicznych w IFPiLM”, do zadań którego należy m.in. przeprowadzanie konkursów na stanowiska naukowe, opiniowanie wniosków o przyznanie stypendium doktorskiego dyrektora czy ocena kwalifikacji kandydatów na stanowiska badawczo-techniczne w IFPiLM. Jestem również recenzentem publikacji naukowych w czasopiśmie z listy filadelfijskiej, jak również współautorką ekspertyz

w zakresie stanu prawnego i politycznego dotyczącego badanego obszaru fuzji termojądrowej jak również w zakresie mocnych i słabych stron badań nad energetyką termojądrową w Polsce. Szczegóły mojego dorobku naukowego, dydaktycznego, współpracy naukowej i popularyzacji nauki znajdują się w Załączniku 6.

4.5. Plany badawcze

Kontynuację badań będących tematem prac [H1-H8] stanowi obecnie realizowany przeze mnie projekt EUROfusion, który ma na celu demonstrację przydatności diagnostyki LIBS na tokamaku FTU we Włoszech. Zadania badawcze będą kontynuacją (przeprowadzonej z sukcesem w 2018 r.) instalacji diagnostyki dwu-impulsowej LIBS (DP-LIBS) na makiecie tokamaka FTU w laboratorium ENEA. W roku 2019 omawiany układ pomiarowy zostanie przeniesiony z makiety do oryginalnego urządzenia FTU i przeprowadzone zostaną eksperymenty, których zadaniem będzie ostateczne potwierdzenie możliwości zastosowania metody DP-LIBS w reaktorze fuzyjnym. Układ eksperymentalny będzie się składać ze zdalnie sterowanego ramienia (umożliwiającego dotarcie do wybranych punktów wewnątrz komory FTU) oraz specjalnie skonstruowanego układu optycznego, który ma jednocześnie dostarczać wzbudzające impulsy laserowych i doprowadzać pomiarowy sygnał optyczny do dwóch spektrometrów. Aparatura ta ma umożliwiać szerokopasmową obserwację widma, jak i wąskopasmową obserwację różnych linii izotopów wodoru - z odpowiednio wysoką rozdzielczością. Ponadto, system wyposażony będzie w specjalną dyszę służącą do prowadzenia badań w atmosferze azotu, helu lub argonu (o regulowanym ciśnieniu). Warto podkreślić, że układ ten został specjalnie przystosowany do jednoczesnych pomiarów dwoma spektrometrami, aby w jednakowych warunkach można było na podstawie widma (rejestrowanego w szerokim zakresie) wyznaczyć podstawowe parametry plazmy, takie jak temperatura czy koncentracja elektronowa. Pomiar spektrometrem o dużej rozdzielczości umożliwią rozdzielenie linii izotopów wodoru, najpierw linii wodoru i deuteru, a docelowo (np. w układzie ITER) - również trytu. Wyniki pomiarów, które zostaną uzyskane w trakcie zaplanowanego na 2-3 tygodnie eksperymentu, będą następnie poddane szczegółowej analizie. Liczę, że pomyślne przeprowadzenie eksperymentu otworzy możliwości dalszego rozwoju metod LIBS na większych urządzeniach termojądrowych (WEST i W7-X) oraz w projekcie ITER.

W kolejnych latach będę kontynuowała również tematykę opisaną w pracach [H9-H16], która dotyczy rozwoju diagnostyk spektroskopowych dla stellaratora W7-X. Obecnie zajmuję się analizą danych eksperymentalnych uzyskanych z ostatnich eksperymentów na tym urządzeniu. Ma ona na celu zbadanie zachowania zanieczyszczeń plazmy w różnych warunkach eksperymentalnych, wyznaczenie czasu zaniku (utrzymania) różnych domieszek w plazmie, a co za tym idzie ważnych parametrów transportu (dyfuzji i konwekcji). Najnowsze wyniki uzyskane w eksperymencie ze wstrzykiwaniem specjalnych kulek z wybranymi zanieczyszczeniami, tzw. TESPEL (z ang. tracer-encapsulated solid pellet) zaprezentuję na międzynarodowej konferencji 3rd European Conference on Plasma Diagnostics, która odbędzie się w 2019 r. w maju w Lizbonie. W ramach badań prowadzonych na stellaratorach, w 2019 r. wezmę również udział w kampanii eksperymentalnej na urządzeniu LHD (z ang. Large Helical Device) w Japonii. Będę tam uczestniczyć m.in. w sesji poświęconej badaniu transportu

zanieczyszczeń plazmy przy użyciu próbek TESPEL. Planowane badania mają na celu porównanie oczekiwanych wyników z układu LHD z wynikami uzyskanymi już w układzie W7-X, jak również zaplanowanie nowych eksperymentów plazmowych w stellaratorze W7-X.

Pod koniec 2018 r. zostałam zaproszona przez Międzynarodowy Komitet Naukowy konferencji PLASMA-2019 (International Conference on Research and Applications of Plasmas) do wygłoszenia referatu pt.: „Pulse Height Analysis diagnostic for impurity behaviour studies at W7-X”. Referat ten będzie dotyczył możliwości, ograniczeń, budowy i wykorzystania diagnostyki PHA do badań na stellaratorze W7-X. Potwierdzenie można znaleźć na stronie internetowej <http://plasma2019.wmfi.uni.opole.pl/invited-speakers/>.

Jako promotor pomocniczy w przewodzie doktorskim mgr Natalii Krawczyk, planuję również finalizację (najpóźniej w 2020 r.) jej pracy doktorskiej, która poświęcona będzie badaniom plazmy w stellaratorze W7-X przy użyciu systemu diagnostycznego PHA.

Literatura

- [1] S. Brezinsek, ... M. Kubkowska, et al., Nuclear Fusion, (2017) 57 (11), art. no. 116041
- [2] A. Malaquias, ... M. Kubkowska, et al., Journal of Nuclear Materials, (2013) 438, pp. S936-S939
- [3] F. Romanelli P. Barabaschi, D. Borba, G. Federici, L. Horton, R. Neu, D. Stork and H. Zohm, Fusion Electricity: a roadmap to the realisation of fusion energy, EFDA, 2012 ISBN 978-3-00-040720-8
- [4] T. Donne, W. Morris, et al. European Research Roadmap to the Realisation of Fusion Energy, EUROfusion, 2018, ISBN 978-3-00-061152-0
- [5] D. A. Cremers and L. J. Radziemski, 2013, Handbook of Laser-Induced Breakdown Spectroscopy 2nd edn (New York:Wiley)
- [6] J. Roth, et al., Journal of Nuclear Materials 390–391 (2009) 1–9.
- [7] V. Philipps, ... M. Kubkowska, et al., Nuclear Fusion 53 (2013) 093002
- [8] M. Scholz et al. Nukleonika 51 (2006) 79
- [9] F. Dabrowski, Ł. Ciupiński, M. Kubkowska, et al., International Journal of Materials Research (2016) 107 (8), pp. 729-734
- [10] ‘Badania i rozwój technologii dla kontrolowanej fuzji termojądrowej. Główne osiągnięcia projektu realizowanego w latach 2011 – 2014 w ramach strategicznego projektu badawczego NCBiR: „Technologie wspomagające rozwój bezpiecznej energetyki jądrowej”, Red. U. Woźnicka, ISBN 978-83-63542-28-3, wydano nakładem IFJ PAN
- [11] F. Warmer et al., Fusion Engineering and Design (2017) 123 p. 47-53
- [12] S. Jabłoński, A. Czarnecka, M. Kubkowska, et al., Journal of Instrumentation 10, P10021 (2015)
- [13] C.D. Beidler et al., Nuclear Fusion (2011) 5 p. 1076001
- [14] A. Dinklage, ..., M. Kubkowska, et al., (2018) Nature Physics, 14 (8), p. 855-860
- [15] T.P. Donaldson, Plasma Phys. 20 (1978) P1279
- [16] M.K. Kubkowska, et al., (2007) Chemical Physics, 333 (2-3), pp. 214-218
- [17] M.K. Kubkowska, T. Grycuk, Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics (2007) 40 (2), art. no. 009, pp. 361-370
- [18] T. Grycuk, T. Kłoda, M.K. Kubkowska, T. Kutner, Optica Applicata, 36 (4), pp. 505-510
- [19] A. Grochola, M.K. Kubkowska, W. Jastrzębski, P. Kowalczyk, Optica Applicata, 36 (4), pp. 469-473
- [20] T. Kutner, M.K. Kubkowska, T. Grycuk, Journal of Molecular Spectroscopy, (2005) 233 (1), pp. 149-156
- [21] M.K. Kubkowska, K. Moczadłowska, T. Grycuk, T.M. Szcześniak, Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics, (2005) 38 (8), pp. 1279-1289
- [22] M.K. Kubkowska, T.M. Szcześniak, T. Grycuk, Long-Range Interactions and the Oscillator Strength for the $11u, 10+u \leftarrow X10+g$ Transitions in Zn^{2+} , (2004) Acta Physica Polonica A, 105 (4), pp. 317-328
- [23] E. Składnik-Sadowska, K. Malinowski, M.J. Sadowski, K. Czaus, M. Kubkowska, et al. Problems of Atomic Science and Technology (2008) (6), pp. 95-97

- [24] E. Składnik-Sadowska, R. Kwiatkowski, K. Malinowski, M.J. Sadowski, V.A. Gribkov, M. Kubkowska, et al. Physica Scripta (2014) T161, art. no. 014039
- [25] M. Chernyshova, V.A. Gribkov, E. Kowalska-Strzeciwiłk, M. Kubkowska et al. (2016) Fusion Engineering and Design, 113, pp. 109-118
- [26] K. Jakubowska, M. Kubkowska, et al. (2011) Nukleonika, 56 (2), pp. 125-129
- [27] E. Składnik-Sadowska, K. Malinowski, M.J. Sadowski, M. Kubkowska, et al. (2011) Contributions to Plasma Physics, 51 (2-3), pp. 288-292
- [28] M. Kubkowska, et al. (2010) Problems of Atomic Science and Technology, (6), pp. 202-204
- [29] E. Składnik-Sadowska, K. Malinowski, M.J. Sadowski, J. Wolowski, P. Gasiór, M. Kubkowska, et al. (2009) Journal of Nuclear Materials, 390-391 (1), pp. 847-851
- [30] E. Składnik-Sadowska, K. Malinowski, M.J. Sadowski, J. Wolowski, M. Kubkowska, et al. (2010) Radiation Effects and Defects in Solids, 165 (6-10), pp. 412-418
- [31] M. Kubkowska, et al. Nukleonika 57(2), 163–166 (2012)
- [32] A. Czarnecka, M. Kubkowska, et al. (2013) Problems of Atomic Science and Technology, (1), pp. 258-260
- [33] K. Jakubowska, M. Kubkowska, et al. (2014) Physica Scripta, T161, art. no. 014029
- [34] D. Alegre, H. Bergsäter, I. Bykov, P. Gasiór, M. Kubkowska, et al. (2014) Physica Scripta, T161, art. no. 014010
- [35] D. Alegre, P. Gasiór, M. Kubkowska, F.L. Tabares, (2015) Fusion Engineering and Design, 100, pp. 646-651
- [36] A. Szydłowski, J. Badziak, J. Fuchs, M. Kubkowska, et al. (2009) Radiation Measurements, 44 (9-10), pp. 881-884
- [37] J. Badziak, S. Jabłoński, M. Kubkowska, et al. (2010) Radiation Effects and Defects in Solids, 165 (6-10), pp. 760-766
- [38] T. Grycuk, M. Kubkowska, (2010) Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics, 43 (12), art. no. 125204
- [39] T. Grycuk, M. Kubkowska, T. Szczesniak, (2012) Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics, 45 (24), art. no. 245005
- [40] H.-S. Bosch, ... M. Kubkowska, et al. (2013) Nuclear Fusion, 53 (12), art. no. 126001
- [41] R. König, ... M. Kubkowska, et al. (2014) Review of Scientific Instruments, 85 (11), art. no. 11D818
- [42] H. Thomsen, ..., M. Kubkowska, et al. (2015) Journal of Instrumentation, 10 (10), art. no. P10015
- [43] R. König, ...M. Kubkowska et al. (2015) Journal of Instrumentation, 10 (10), art. no. P10002
- [44] M. Krychowiak, ... M. Kubkowska, et al. (2016) Review of Scientific Instruments, 87 (11), art. no. 11D304
- [45] R. C. Wolf, ..., M. Kubkowska, et al. (2017) Nuclear Fusion, 57 (10), art. no. 102020
- [46] T. Fornal, I. Książek, M. Kubkowska, et al. Fusion Engineering and Design (2019) in press <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.03.015>
- [47] P. Moreau, ...M. Kubkowska et al. (2017) Fusion Engineering and Design, 123, pp. 1029-1032
- [48] D. Mazon, ..., M. Kubkowska, et al. (2015) Fusion Engineering and Design, 96-97, pp. 856-860

Autoreferat zawiera 30 ponumerowanych stron.
24 kwietnia 2019 r.

