

Załącznik nr 2

AUTOREFERAT
w języku polskim

*Przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych,
w szczególności określonych w art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r.*

Dr Maryna Chernyshova

Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy (IFPiLM)
Warszawa, 2019

Spis treści

I.	Dane osobowe	3
II.	Posiadane dyplomy i stopnie naukowe.....	3
III.	Dotychczasowe zatrudnienie w jednostkach naukowych oraz zdobyte doświadczenie naukowe	3
IV.	Wskaźniki bibliometryczne według bazy Web of Science	4
V.	Osiągnięcie naukowe będące podstawą postępowania habilitacyjnego.....	4
	<i>V.i. Tytuł osiągnięcia naukowego.....</i>	<i>4</i>
	<i>V.ii. Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego.....</i>	<i>4</i>
	<i>V.iii. Omówienie celu naukowego i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich wykorzystania</i>	<i>6</i>
	V.iii.1. Wprowadzenie	6
	V.iii.2. Opracowanie i zastosowanie detektorów gazowych typu GEM na spektrometrze na tokamaku JET.....	10
	V.iii.3. Opracowanie i przygotowanie detektorów typu GEM do bezpośredniej rejestracji promieniowania plazmy w trudnych warunkach tokamakowych	15
	V.iii.4. Praca nad detektorami obrazującymi promieniowanie rentgenowskie z plazmy tokamakowej	26
	V.iii.5. Podsumowanie pracy	33
VI.	Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych	35
	<i>VI.i. Działalność prowadzona przed uzyskaniem stopnia doktora.....</i>	<i>35</i>
	<i>VI.ii. Działalność prowadzona po uzyskaniu stopnia doktora</i>	<i>38</i>
	<i>VI.iii. Praca dydaktyczna oraz inne osiągnięcia.....</i>	<i>44</i>
	Bibliografia	46

I. Dane osobowe

Imię i nazwisko: Maryna CHERNYSHOVA
Miejsce zatrudnienia: Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy
Zakład Fuzji Jądrowej i Spektroskopii Plazmy
ul. Hery 23,
01-497 Warszawa, Polska

II. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe

2005 doktor nauk fizycznych
specjalność: Fizyka Ciała Stałego
Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk, Warszawa
tytuł rozprawy doktorskiej „Magnetyczne i magnetoptyczne własności półprzewodnikowych ferromagnetycznych struktur EuS-PbS”
promotor naukowy: dr hab. Tomasz Story

1996 magister fizyk-inżynier
kierunek: Fizyka, specjalizacja: Fizyka Teoretyczna
Wydział Fizyki, Doniecki Uniwersytet Państwowy, Donieck, Ukraina
tytuł pracy magisterskiej: „Amplituda rozpraszania fal spinowych w formalizmie gęstości spinowej”
promotor naukowy: dr Andrej Kuchko

III. Dotychczasowe zatrudnienie w jednostkach naukowych oraz zdobyte doświadczenie naukowe

01.01.2016– opiekun pracowni rentgenowskiej oraz czystego pomieszczenia
obecnie (*cleanroom*) IFPiLM, służącego do montażu detektorów gazowych

01.01.2014– kierownik Laboratorium Diagnostyki Promieniowania
obecnie Rentgenowskiego IFPiLM

01.01.2013– kierownik 5-osobowego Zespołu w IFPiLM, zajmującego się rozwojem
obecnie detektorów gazowych w kontekście diagnostyk plazmy

2013–obecnie liczny udział w sesjach eksperymentalnych na tokamaku JET, Culham,
Wielka Brytania

2014–2016 wizyty w ośrodku CERN (Genewa, Szwajcaria), w ramach kolaboracji
RD51, wymiana doświadczeń i wiedzy z zakresu detektorów
gazowych, sumarycznie półtoramiesięczna wizyta

2005–2006 sumarycznie trzymiesięczny staż naukowy na Wydziale Fizyki
Uniwersytetu w Ferrarze, Włochy

- 1.03.2005–obecnie adiunkt, Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy, Warszawa, Zakład Fuzji Jądrowej i Spektroskopii Plazmy
- 2003–obecnie udział w licznych sesjach pomiarowych w ośrodkach synchrotronowych w Niemczech, Francji, Szwecji, Hiszpanii, Włoszech
- 2000–2005 studia doktoranckie, Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk, Warszawa

IV. Wskaźniki bibliometryczne według bazy Web of Science

- całkowita liczba publikacji – 122
- sumaryczny impact factor publikacji naukowych według listy Journal Citation Reports (JCR) – 136.105
- liczba cytowań publikacji – 874
- bez autocytowań – 544
- indeks Hirscha opublikowanych publikacji – 14

V. Osiągnięcie naukowe będące podstawą postępowania habilitacyjnego

V.i. Tytuł osiągnięcia naukowego

Jako osiągnięcie, w rozumieniu art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595 ze zm.), przedstawiam jednotematyczny cykl niżej wymienionych publikacji zatytułowany:

Badania i rozwój detektorów gazowych typu GEM (*ang. Gas Electron Multiplier*) oraz ich zastosowanie w diagnostyce promieniowania rentgenowskiego emitowanego przez plazmę tokamakową

V.ii. Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego

- H-1. **M. Chernyshova**, T. Czarski, W. Dominik, K. Jakubowska, J. Rzakiewicz, M. Scholz, K. Poźniak, G. Kasproicz, W. Zabołotny, „Development of GEM gas detectors for X-ray crystal spectrometry”, *Journal of Instrumentation* 9 (2014) C03003.
- H-2. T. Czarski, **M. Chernyshova**, K.T. Poźniak, G. Kasproicz, A. Byszuk, B. Juszczyk, A. Wojeński, W. Zabołotny, P. Zienkiewicz, „Data processing for soft X-ray diagnostics based on GEM detector measurements for fusion plasma imaging”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B* 364 (2015) 54-59.
- H-3. T. Czarski, **M. Chernyshova**, K.T. Poźniak, G. Kasproicz, W. Zabołotny, P. Kolasiński, R. Krawczyk, A. Wojeński, P. Zienkiewicz, „Serial data acquisition for

- the X-ray plasma diagnostics with selected GEM detector structures”, *Journal of Instrumentation* 10 (2015) P10013.
- H-4. **M. Chernyshova**, T. Czarski, K. Malinowski, E. Kowalska-Strzęciwilk, K. Poźniak, G. Kasprowicz, W. Zabołotny, A. Wojeński, P. Kolasiński, D. Mazon, P. Malard, „Conceptual design and development of GEM based detecting system for tomographic tungsten focused transport monitoring”, *Journal of Instrumentation* 10 (2015) P10022.
- H-5. **M. Chernyshova**, K. Malinowski, T. Czarski, A. Wojeński, D. Vezinet, K.T. Poźniak, G. Kasprowicz, D. Mazon, A. Jardin, A. Herrmann, ASDEX Upgrade Team, Eurofusion MST1 Team, „Gaseous electron multiplier-based soft X-ray plasma diagnostics development: Preliminary tests at ASDEX Upgrade”, *Review of Scientific Instruments* 87(11) (2016) 11E325.
- H-6. **M. Chernyshova**, S. Jednoróg, K. Malinowski, T. Czarski, A. Ziółkowski, B. Bieńkowska, R. Prokopowicz, E. Łaszyńska, E. Kowalska-Strzęciwilk, K.T. Poźniak, G. Kasprowicz, W. Zabołotny, A. Wojeński, R.D. Krawczyk, P. Linczuk, P. Potrykus, B. Bajdel, „GEM detectors development for radiation environment: neutron tests and simulations”, *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments, Proc. SPIE* 10031 (2016) 100313X.
- H-7. **M. Chernyshova**, T. Czarski, K. Malinowski, E. Kowalska-Strzęciwilk, J. Król, K.T. Poźniak, G. Kasprowicz, W. Zabołotny, A. Wojeński, R.D. Krawczyk, P. Kolasiński, I.N. Demchenko, Y. Melikhov, „Development of GEM detector for tokamak SXR tomography system: Preliminary laboratory tests”, *Fusion Engineering and Design* 123 (2017) 877-881.
- H-8. **M. Chernyshova**, K. Malinowski, Y. Melikhov, E. Kowalska-Strzęciwilk, T. Czarski, A. Wojeński, P. Linczuk, R.D. Krawczyk, „Study of the optimal configuration for a Gas Electron Multiplier aimed at plasma impurity radiation monitoring”, *Fusion Engineering and Design* 136 (2018) 592-596.
- H-9. **M. Chernyshova**, K. Malinowski, E. Kowalska-Strzęciwilk, T. Czarski, P. Linczuk, A. Wojeński, R.D. Krawczyk, „Development of GEM detector for plasma diagnostics application: simulations addressing optimization of its performance”, *Journal of Instrumentation* 12 (2017) C12034.
- H-10. K. Malinowski, **M. Chernyshova**, T. Czarski, E. Kowalska-Strzęciwilk, P. Linczuk, A. Wojeński, R. Krawczyk, M. Gąska, „Simulation of energy spectrum of GEM detector from an x-ray quantum”, *Journal of Instrumentation* 13 (2018) C01018.

- H-11. **M. Chernyshova**, T. Czarski, K. Malinowski, Y. Melikhov, G. Kasprowicz, E. Kowalska-Strzęciwilk, P. Linczuk, A. Wojeński, R.D. Krawczyk, „2D GEM based imaging detector readout capabilities from perspective of intense soft X-ray plasma radiation”, *Review of Scientific Instruments* 89 (2018) 10G106.
- H-12. T. Czarski, **M. Chernyshova**, K. Malinowski, K.T. Poźniak, G. Kasprowicz, P. Kolasinski, R. Krawczyk, A. Wojeński, P. Linczuk, W. Zabołotny, A. Jardin, D. Mazon, K. Jakubowska, G. Boutoux, F. Burgy, S. Hulind, D. Batani, „Measuring issues in the GEM detector system for fusion plasma imaging”, *Journal of Instrumentation* 13 (2018) C08001.
- H-13. **M. Chernyshova**, K. Malinowski, T. Czarski, E. Kowalska-Strzęciwilk, P. Linczuk, A. Wojeński, R.D. Krawczyk, Y. Melikhov, „Advantages of Al based GEM detector aimed at plasma soft–semi hard X-ray radiation imaging”, *Fusion Engineering and Design* (2019) <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.01.153>.

V.iii. Omówienie celu naukowego i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich wykorzystania

V.iii.1. Wprowadzenie

Obecne metody wytwarzania energii nie są w stanie zaspokoić długoterminowych globalnych potrzeb [1], a zanieczyszczenie środowiska przez spalanie paliw kopalnych i odpady promieniotwórcze z energetyki jądrowej komplikują trudną już sytuację ekologiczną na świecie. W związku z tym, jednym z najważniejszych zadań współczesnej cywilizacji jest opracowanie i rozwój nowych „czystych” źródeł energii.

Jedną z takich alternatywnych metod pozyskiwania energii bazuje na fuzji termojądrowej, tj. reakcji fuzji lekkich jąder, w zakresie której obecnie trwają prace nad stworzeniem reaktora termojądrowego, w którym oczekuje się, że energia jądrowa na skalę przemysłową zostanie uzyskana dzięki kontrolowanej syntezie termojądrowej.

Jednakże bardzo trudno jest wdrożyć kontrolowaną syntezę termojądrową w warunkach ziemskich i jak dotąd nie udało się tego dokonać. Wiadomo, że w tym celu konieczne jest stworzenie konstrukcji, w której nagrzaną do ogromnych temperatur ($\approx 10^8$ K), a zatem stanowiącą wysokotemperaturową plazmę, paliwo jądrowe będzie utrzymywane przez długi czas w stanie wysokiej gęstości (jak to ma miejsce w przypadku Słońca i innych gwiazd będących naturalnymi reaktorami fuzyjnymi). W gwiazdach, wysokotemperaturowa plazma jest utrzymywana przez potężne siły grawitacyjne, natomiast na Ziemi najbardziej obiecujące są dwa kierunki: tak zwane inercyjne oraz magnetyczne utrzymanie. W przypadku inercyjnego

utrzymania, intensywne wiązki promieniowania laserowego lub strumienie naładowanych cząstek sferycznie oddziałują na powierzchnię kapsułki wypełnionej paliwem termojądrowym (mieszaniną deuteru i trytu). W wyniku implozji kapsułki paliwo jest kompresowane i podgrzewane do temperatur wymaganych do zajścia reakcji syntezy. Przy magnetycznym utrzymaniu, wykorzystując dobre przewodnictwo plazmowe, pole magnetyczne służy jako pułapka, aby zapobiec ucieczce gorącej plazmy z zamkniętej, kontrolowanej objętości.

Pomimo długotrwałych i kosztownych badań, stworzenie efektywnego reaktora termojądrowego okazało się o wiele bardziej skomplikowanym zadaniem niż stworzenie reaktora wykorzystującego rozszczepienie jądrowe. Obecnie najbardziej obiecującym rozwiązaniem jest reaktor bazujący na magnetycznym utrzymaniu plazmy, a największym projektem na dzień dzisiejszy jest ITER (*ang. International Thermonuclear Experimental Reactor*), budowany w Cadarache (Francja). Główne wysiłki naukowców zmierzają teraz do zbadania interakcji plazmy ze ścianą komory, opracowania materiałów o niskiej indukowanej aktywności, jak również do stworzenia technologii, które sprawią, że reaktor będzie opłacalny.

Jednym z zadań związanych z badaniem oddziaływania plazmy z powierzchnią ścianek komory, znajdujących się w kontakcie z plazmą, jest badanie procesu powstawania i zachowania się zanieczyszczeń plazmy. Należy mieć na uwadze, że zanieczyszczenia plazmy mogą powodować liczne niestabilności, a nawet doprowadzić do zerwania sznura plazmowego. Wobec tego, problemem jest nie tylko utrzymanie wysokotemperaturowej plazmy, ale również zapobieganie i kontrola zanieczyszczeń. Od rozwiązania tych problemów zależy sukces w opanowaniu kontrolowanej syntezy termojądrowej.

W odniesieniu do eksperymentalnych reaktorów, tokamaków, współcześnie i w bliskiej przyszłości wybór materiału ścianek komory jest ograniczony do materiałów opartych na węglu, berylu i wolframie. Materiały te mają różnorodne struktury, co pozwala na ich optymalną selekcję, biorąc pod uwagę charakterystyki reaktora i warunki pracy konkretnego komponentu pierwszej ścianki. Szczególnym zainteresowaniem cieszy się tu wolfram, który przewidziany jest jako materiał divertora w reaktorze ITER.

Podstawowe informacje o zanieczyszczeniach uzyskuje się badając liniową emisję domieszek. Rozwiązanie większości problemów w zakresie zanieczyszczeń w decydującym stopniu zależy od znajomości dynamiki emisji domieszek w czasie i przestrzeni (w przekroju sznura plazmy). Prowadzi to do zrozumienia wpływu zanieczyszczeń na utrzymanie plazmy i scenariusze wyładowania. Wiedza ta powinna umożliwić lepszą ocenę stanu plazmy i optymalizację parametrów wyładowania dla przyszłych reaktorów fuzyjnych.

Stosowana w tym celu spektroskopia rentgenowska jest uznanym, skutecznym i potężnym narzędziem w diagnostyce plazmy. Pomiar takiego promieniowania (w obszarze 0.1-20 keV) jest standardowym sposobem uzyskiwania cennych informacji na temat transportu cząstek i zjawisk MHD (*ang. MagnetoHydroDynamics*).

Niniejsza praca habilitacyjna przedstawia rozwój opracowanej technologii obrazowania plazmowego w obszarze miękkiego promieniowania rentgenowskiego SXR (ang. Soft X-Ray), przeznaczonej do monitorowania promieniowania zanieczyszczeń.

Poszukiwanie nowych technologii w dziedzinie diagnostyki plazmy wiąże się z rosnącymi wymaganiami dotyczącymi radiacyjnej stabilności wykorzystywanych materiałów w związku z rozwojem i wykorzystaniem obiektów termojądrowych, gdzie szczególnego znaczenia nabrały badania procesów zachodzących podczas oddziaływania promieniowania z materią. Problem ten dotyczy również elementów diagnostyk, których materiały są ekspozowane na produkty reakcji termojądrowej. Na dzień dzisiejszy wymagane jest opracowanie nowej technologii detekcji do obrazowania w obszarze rentgenowskim przeznaczonej dla takich tokamaków jak ITER. Detektory rentgenowskie stosowane w istniejących urządzeniach mogą ulec szybkiej degradacji ze względu na duże strumienie neutronów charakterystyczne dla środowiska tokamaka, jak zaobserwowano podczas testów fuzyjnych na urządzeniu TFTR w USA w trakcie kampanii eksperymentalnej na mieszance deuter-tryt [2].

Pomimo stosunkowo szerokiego zastosowania detektorów półprzewodnikowych do rejestrowania promieniowania SXR (ogólnie promieniowania jonizującego), detektory gazowe są obiecującymi kandydatami, znacznie lepiej przystosowanymi do wykorzystania w warunkach przyszłych reaktorów termojądrowych, biorąc pod uwagę ich odporność na promieniowanie neutronowe. Obecnie w tej dziedzinie odkryto i opracowano kilka nowych detektorów gazowych, tzw. mikropaskowych detektorów gazowych (MPGD (*ang. MicroPattern Gaseous Detectors*)). Najbardziej obiecującym przedstawicielem tej klasy jest detektor zwany gazowym powielaczem elektronowym (GEM (*ang. Gas Electron Multiplier*)) [3], [4], który charakteryzuje się wysokim współczynnikiem amplifikacji pierwotnego ładunku pochodzącego z absorpcji fotonu. W związku z tym zainteresowanie detektorami opartymi na technologii GEM stale rośnie, a możliwe wykorzystanie detektorów typu GEM wykracza aktualnie poza obszar fizyki wysokich energii. Główne zalety technologii GEM to kompaktowość konstrukcji detektora, dobra rozdzielczość czasowa i przestrzenna, możliwość dyskryminacji energii fotonów oraz lepsza odporność na neutrony w porównaniu do istniejących systemów. Wszystko to sprawia, że taki system detekcyjny jest potencjalnie

lepszym kandydatem do pomiaru miękkiego promieniowania rentgenowskiego w reaktorach ITER oraz DEMO.

W ramach tej pracy do pomiarów w obszarze SXR w badaniach zorientowanych na reaktor ITER zaproponowano nowy typ systemu detekcji oparty na technologii GEM. *Prace badawcze i rozwojowe nad diagnostykami wykorzystującymi ten typ detektorów są podstawą niniejszej pracy opisującej dorobek habilitantki.* Wraz z pracą badawczą, rozwojem i doskonaleniem samych detektorów w oparciu o technologię GEM, celem było również rozwiązanie szeregu problemów naukowych i technologicznych związanych z wykorzystaniem takich detektorów w badaniach przeprowadzanych na nowoczesnych układach fuzyjnych. Detektory tego typu planuje się zastosować do monitorowania zanieczyszczeń plazmy w programach mających na celu wspieranie budowy eksperymentalnego reaktora ITER i uzyskanie ostatecznie skutecznej reakcji termojądrowej.

Prezentowana rozprawa habilitacyjna obejmuje ważne przykłady rozwoju, badań i implementacji detektorów gazowych i oparta jest na zestawie wybranych publikacji opisujących różne etapy zarówno badań, jak i praktycznego zastosowania w ośrodkach badawczych, opracowanych detektorów opartych na technologii GEM i jest zorganizowana w następujący sposób: Rozdział V.iii.2 podsumowuje osiągnięcia w opracowaniu i zastosowaniu detektorów opartych na technologii GEM dla wysokorozdzielczego spektrometru bazującego na geometrii Johanna na tokamaku JET w Culham (Wielka Brytania); Rozdział V.iii.3 omawia wyniki badań, projektu i budowy systemu dwóch detektorów do bezpośredniej rejestracji promieniowania plazmowego (tzw. tomografii poloidalnej), oraz jego przyszłe zastosowanie na tokamaku WEST w Cadarache (Francja); Rozdział V.iii.4 koncentruje się na postępach w opracowywaniu detektorów do dwuwymiarowego obrazowania promieniowania plazmowego, przedstawiając kompleksowe badania różnych czynników naukowych i technologicznych.

Przed opisem głównej części rozprawy pragnę zaznaczyć, że wszystkie aspekty przedstawianej pracy badawczej dotyczące detektorów gazowych, będących przedmiotem moich badań od roku 2010, zostały opracowane przeze mnie, tzn. określenie celu i metodologii badań, opracowanie koncepcji i konstrukcji detektorów, organizacja oraz realizacja pomiarów laboratoryjnych bądź tokamakowych, interpretacja uzyskanych wyników badań doświadczalnych wspieranych symulacjami numerycznymi oraz przygotowanie publikacji. Habilitantka podkreśla, że uzyskane wyniki badań przyczyniły się do postępu w dziedzinie detektorów MPGD oraz w badaniach tokamakowych z wykorzystaniem promieniowania rentgenowskiego i stanowią istotny wkład w rozwój dyscypliny naukowej. Ponadto

prorowadzone badania umożliwiły pozyskiwanie finansowania dla nowych tematów badawczych w obszarze fizyki plazmy.

V.iii.2. Opracowanie i zastosowanie detektorów gazowych typu GEM na spektrometrze na tokamaku JET (dotyczy prac [H-1, H-2, H-3])

Widma rentgenowskie plazmy tokamakowej pochodzą z promieniowania ciągłego (np. bremsstrahlung) i promieniowania liniowego. W szczególności na tokamaku JET, oprócz promieniowania ciągłego, intensywne promieniowanie liniowe jest emitowane przez wysoce zjonizowane zanieczyszczenia wolframu i niklu wydostające się z materiałów konstrukcyjnych podczas wyładowań plazmy. Wobec tego, głównym celem takiego systemu detekcji jest pomiar widm promieniowania rentgenowskiego, z wysoką rozdzielczością, pochodzących od charakterystycznych linii zanieczyszczeń obecnych w plazmie tokamaka i zapewnienie monitorowania tego promieniowania. Taki pomiar jest bardzo ważny, ponieważ może dostarczyć dokładnych informacji o kluczowych parametrach plazmy, takich jak stężenie zanieczyszczeń, temperatura jonów i toroidalna prędkość obrotowa [5], [6].

W urządzeniach fuzyjnych z magnetycznym utrzymaniem plazmy wysokorozdzielcza diagnostyka promieniowania SXR stosowana jest w określonych zakresach energii fotonów. Stąd, na tokamaku JET zostały przygotowane dwa niezależne tory pomiarowe do monitorowania widm emisji plazmy dla wysokorozdzielczego spektrometru KX1 opartego o gięte kryształy i bazującego na geometrii Johanna. Każdy z torów pomiarowych miał na celu monitorowanie widm emisji plazmy w pewnych zakresach energii fotonów, które odpowiadają określonym rzędom dyfrakcji zastosowanych kryształów [H-1].

Pierwszy kanał diagnostyczny został przeznaczony do monitorowania promieniowania emitowanego przez jony wolframu, głównie W^{46+} o energii około 2.4 keV, obserwowanego w pierwszym rzędzie dyfrakcji (strefy najbardziej intensywnego promieniowania W znajdują się w zakresach energii fotonów ~ 250 eV i ~ 2.5 keV [7], [8]). Ten tor pomiarowy umożliwia jednoczesną rejestrację promieniowania ciągłego emitowanego w wąskich obszarach energii, zdefiniowanych przez geometrię spektrometru i odpowiadających pierwszym trzem rzędom dyfrakcji.

Drugi tor pomiarowy był dedykowany do monitorowania promieniowania emitowanego przez jony niklu Ni^{26+} o energii około 7.8 keV obserwowanego w drugim rzędzie dyfrakcyjnym. Ten kanał detekcyjny również umożliwia rejestrację promieniowania ciągłego o energiach fotonów odpowiednich dla pierwszego, drugiego i trzeciego rzędu dyfrakcji, oraz intensywnościach określonych przez temperaturę elektronową plazmy.

W celu rejestracji charakterystycznych linii emisyjnych zanieczyszczeń i promieniowania ciągłego w szerokim zakresie energii w ramach tego spektrometru wymagane były dwa niezależne systemy detekcji o dużej szybkości zliczania i bardzo dobrej rozdzielczości przestrzennej w jednym wymiarze, odpowiedniej do parametrów spektrometru. Oprócz tego istotnym było uzyskanie rozdzielczości energetycznej stosowanej techniki detekcji, która by pozwoliła na zidentyfikowanie fotonów pochodzących od różnych rzędów odbicia. Należy podkreślić, że nie było to możliwe dla poprzedniego systemu detekcji na spektrometrze KX1. Informacje wyodrębnione ze wszystkich spektralnych rzędów dyfrakcji (widmo promieniowania ciągłego) pozwoliły na lepsze oszacowanie stanu plazmy.

W ramach tego programu badań, zorientowanych na przyszły reaktor ITER, w szczególności dotyczących materiałów przeznaczonych na wewnętrzne ściany oraz divertor reaktora (*ang. ITER-Like Wall*), a przez to związanych też z obserwacją poziomu zanieczyszczeń wolframu, zaproponowana została nowa technika detekcji zanieczyszczeń. Technika ta została opracowana przez zespół badaczy, którego habilitantka była członkiem, czynnie uczestnicząc w jego pracach nad zaprojektowaniem, skonstruowaniem, przetestowaniem i zastosowaniem dwóch detektorów gazowych opartych o technologię potrójnej kaskady GEM (*ang. Triple-GEM*) [9], [10], [H-1], ponadto habilitantka koordynowała pracę zespołu naukowców z IFPiLM.

Moduły detekcyjne bazujące na konstrukcji Triple-GEM zostały zaprojektowane i skonstruowane w celu spełnienia wymagań dotyczących monitorowania promieniowania SXR na tokamaku JET [6], [11]. Prace polegały na uwzględnieniu następujących założeń: duży obszar detekcji (odpowiedni dla dużych objętości plazmy i geometrii spektrometru), wysoki współczynnik konwersji fotonów SXR w obszarze dryftu/konwersji detektora, dobry stosunek sygnału do szumu zapewniany przez wysokie wzmocnienie ładunku detektora i korzystna rozdzielczość energetyczna (20-30%). Monitorowanie promieniowania rentgenowskiego wymagało również dobrej rozdzielczości przestrzennej (odpowiedniej do charakterystyk spektrometru), rozdzielczości czasowej odpowiadającej dynamice plazmy oraz wysokiej powtarzalności i stabilności pomiaru przy wysokich natężeniach promieniowania. Te prace wymagały udziału habilitantki w opracowaniu koncepcji detektorów, symulacjach mieszanek gazowych do określenia wydajności detektora, planowaniu i prowadzeniu testów laboratoryjnych, optymalizacji konstrukcji mechanicznej detektora, uczestniczeniu w wielu dyskusjach na temat doboru parametrów modułu elektroniki, itd.

Technika GEM umożliwia separację struktury amplifikacji gazowej i elektrody odczytu [12]. Dodatkową zaletą takiej struktury jest to, że tylko szybka elektronowa komponenta lawin

w gazie dryfuje w kierunku pasków elektrody odczytu, przez co znacznie zmniejszony jest efekt ładunku przestrzennego spowodowany dodatnimi jonami. Po etapie amplifikacji gazowej kolejną strukturą jest elektroda odczytująca sygnał z pasków w celu pozycjo- i energo-czułego pomiaru profilu dyfrakcji odpowiedniego dla określonego zakresu energii SXR. Każdy pasek jest przyporządkowany do kanału elektroniki akwizycji, razem tworzących system elektroniki.

Sygnały generowane na paskowej elektrodzie odczytu zawierają całkowitą informację niezbędną do oceny energii i rekonstrukcji położenia zaabsorbowanych fotonów [H-2, H-3]. Ze względu na dyfuzję ładunku podczas etapów dryfu i amplifikacji, końcowa chmura elektronowa w przerwie indukcyjnej obejmuje już kilka pasków odczytu. Taka grupa tworzy klaster dla danego pojedynczego zdarzenia absorpcji kwantu padającego promieniowania. Zatem, ważną kwestią związaną z pomiarem jest określenie ładunku i pozycji klastra (tzn. energii i pozycji fotonu), poprzez jego identyfikację za pomocą opracowanego algorytmu przetwarzania danych.

W ramach tej pracy habilitantka brała udział w przygotowaniu procedury akwizycji i przetwarzania danych, opracowania algorytmów określających energię i pozycję fotonu, które są kluczowe dla otrzymania poprawnych wyników fizycznych. Należy nadmienić, iż przygotowanie odpowiednich algorytmów do uzyskiwania parametrów fizycznych oraz sprawdzenie wyników produkowanych przez moduł elektroniki jest niezbędne podczas opracowania narzędzia diagnostycznego. Wobec tego, czynnie uczestniczyłam również w następnym etapie rozwoju systemu akwizycji, a mianowicie w przygotowaniu i weryfikacji poprawności fizycznej wyników tzw. serialnej akwizycji danych, która została opracowana dla potrzeb badawczych laboratorium [H-3] i w ramach której wszystkie próbki sygnałowe przekraczające poziom wyzwalania były niezależnie rejestrowane dla każdego kanału pomiarowego. Pozwoliło to na zwiększenie przepustowości systemu, co się wiązało ze zwiększeniem wydajności pomiarowej detektora. Ponadto efektem opracowanej procedury akwizycji było uzyskanie poprawnego rozkładu wartości ładunku klastra, który odpowiada bezpośrednio widmom energetycznym źródła promieniowania rentgenowskiego.

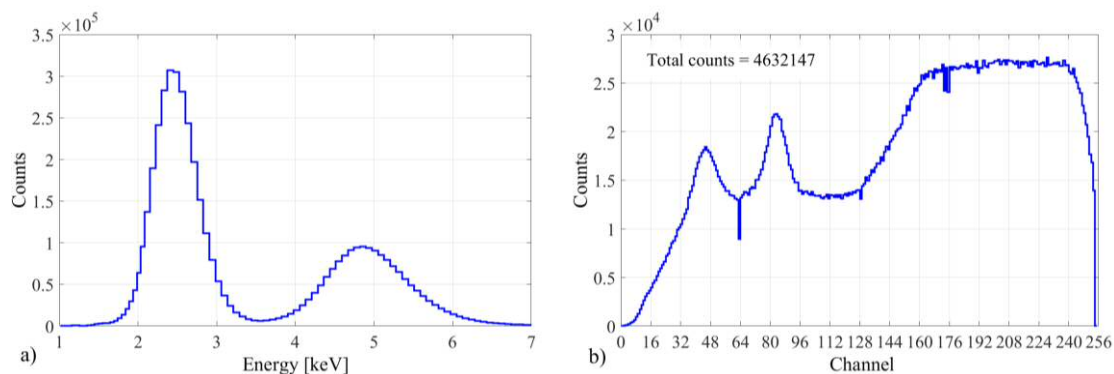
W ramach tej pracy podczas testów laboratoryjnych habilitantka badała działanie detektorów ze źródłem promieniowania ^{55}Fe . Otrzymano typowe rozkłady energii dla całego detektora działającego przy gazowym wzmocnieniu ładunku powyżej 10^3 z rozdzielczością energetyczną (FWHM) na poziomie 23%. Potwierdziłam liniową zależność ładunku klastrowego od energii fotonu w zakresie energii odpowiadającym linii źródła izotopu żelaza o energii około 5.9 keV oraz w zakresie promieniowania plazmy wyselekcjonowanego przez dyfrakcję na sieci krystalicznej o szerokości ~ 20 eV za pomocą spektrometru KX1.

Zweryfikowałam również stabilność działania detektora podczas krótkotrwałych ekspozycji na szybkie zmiany natężenia strumienia promieniowania rentgenowskiego za pomocą generatora promieniowania rentgenowskiego. W tym celu zastosowałam sekwencję 20-sekundowych ekspozycji oddzielonych kilkuminutowym odstępem czasu. Taka struktura czasowa odpowiadała sekwencji czasowej funkcjonowania detektora na tokamaku JET. Testy te były podyktowane zależnością wzmocnienia detektora GEM od ładunku zgromadzonego na dielektryku w otworkach folii GEM, ponieważ stała czasowa ładowania się Kaptonu zależy silnie od gęstości prądu przepływającego lokalnie przez folie GEM. Zmniejszenie wzmocnienia przy niskich natężeniach, zmierzonego w kierunku malejącego natężenia promieniowania, wskazywało na to, że procesy ładowania folii GEM spowodowane przez prąd lawinowy w gazie określają podatność detektora na zmienność natężenia promieniowania. Uzyskane przeze mnie wyniki przeprowadzonych pomiarów ewolucji wzmocnienia ładunku detektora wykazały stosunkowo dobrą stabilność wzmocnienia w zakresie natężenia promieniowania spektrometru.

Po testach laboratoryjnych i wstępnych wynikach tokamakowych, oraz optymalizacji finalnej konstrukcji mechanicznej detektorów, zostały one zainstalowane na spektrometrze KX1 na tokamaku JET (w roku 2013 kierowałam oraz sprawowałam nadzór nad instalacją obu finalnych detektorów). Celem przetwarzania sygnałów uzyskanych z detektorów był pomiar energii i rozkładu pozycji fotonów dla czasu ekspozycji 10 ms. Opracowane, z dużym udziałem habilitantki, detektory GEM do tej pory są aktywnie wykorzystywane w akwizycji danych i pomiarach promieniowania zanieczyszczeń plazmy oraz określenia jej parametrów na tokamaku JET.

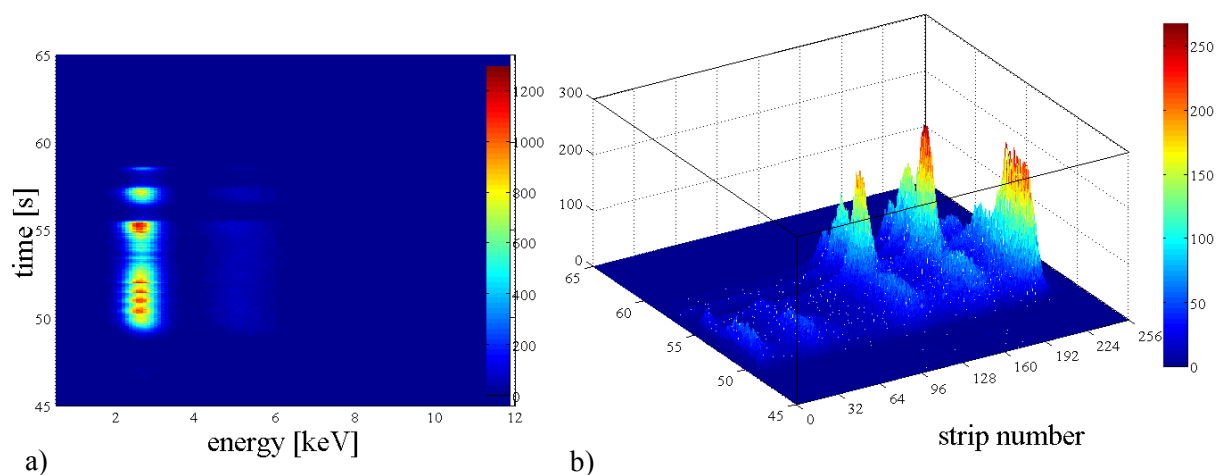
Uzyskane wyniki dla wyładowania plazmy zarejestrowane przez detektor w pierwszym torze pomiarowym (linie W) przedstawione są na Rysunku 1. Ponieważ w przypadku spektrometru bazującego na giętych kryształach, rozkład pozycji ładunku klastra odpowiadał także energii zdefiniowanej przez dyfrakcję na kryształach, kluczowe było wykorzystanie zdolności rozdzielczości energetycznej zastosowanych detektorów w celu rozróżnienia pierwszego i drugiego rzędu dyfrakcji dla diagnostyki plazmy tokamakowej [13], [14].

Wydajność finalnych systemów detekcji została przetestowana przez zespół, z dużym udziałem habilitantki, na tokamaku JET w standardowym trybie pracy. Wykazano, że system w trybie *on-line* rozdziela rentgenowskie promieniowanie ciągłe oraz liniowe pochodzące od różnych rzędów dyfrakcji i dostarcza widm energetycznych dla każdego kanału odczytu. Ta innowacyjna funkcjonalność opracowanej diagnostyki rentgenowskiej umożliwiła precyzyjną analizę widm odpowiadających różnym jonom zanieczyszczeń plazmy.



Rysunek 1. Charakterystyki obrazowania promieniowania plazmy dla wyładowania na tokamaku JET: (a) skumulowane w czasie widma energii, (b) skumulowany w czasie rozkład pozycji.

Rysunek 2 ilustruje działanie w czasie systemu monitorowania wolframu podczas wyładowania plazmy na tokamaku JET. Zależność czasowa widma energetycznego promieniowania jest skumulowana dla wszystkich pasków odczytu/kanałów detektora dla 10 ms czasu ekspozycji (Rysunek 2 (a)). Dwie linie są wyraźnie widoczne przy 2.4 keV i 4.8 keV, odnoszące się odpowiednio do pierwszego (linie promieniowania charakterystycznego jonu W^{46+} i jonów W o zbliżonym stopniu zjonizowania oraz promieniowanie ciągłe) i drugiego



Rysunek 2. Zależność czasowa rozkładu energii fotonów dla wszystkich kanałów (a) i odpowiadająca im zależność czasowa natężenia fotonów (b) dla poszczególnych kanałów detektora podczas wyładowania na tokamaku JET z rozdzielczością czasową 10 ms (czas ekspozycji). Obie części rysunku przedstawiają całkowite widmo rentgenowskie ze wszystkich rzędów dyfrakcji.

rzędu dyfrakcji kryształu (promieniowanie ciągłe). Rysunek 2 (b) przedstawia ewolucję czasową ilości fotonów dla każdego kanału pomiarowego w trakcie trwania 20 s wyładowania plazmy. Należy podkreślić, że dane te zostały przetworzone w trybie rzeczywistym w ramach indywidualnego histogramowania (rozkłady energii i pozycji zarejestrowanych fotonów) dla każdego kanału.

Dane uzyskane za pomocą opracowanych detektorów dobrze korelowały z procesem plazmowym. Dostarczony system detekcji po raz pierwszy pozwolił na identyfikację profili dyfrakcyjnych odpowiadających różnym spektralnym rzędom odbicia kryształu dla diagnostyki KX1, a tym samym na uzyskanie precyzyjnych informacji o emisji promieniowania ciągłego oraz charakterystycznego, pochodzącego od zanieczyszczeń plazmy. Wyniki te wskazują, że opracowane detektory Triple-GEM są innowacyjnym narzędziem naukowo-badawczym o dużej użyteczności i znaczeniu dla pomiarów promieniowania plazmy w zakresie SXR. Potwierdziły to też uzyskane wyniki przedstawione w pracy [14]. Rozwinięcie diskutowanych powyżej zagadnień znajduje się w publikacjach [H-1, H-2, H-3], a także w publikacjach [13], [9], [10], [15].

Praca habilitantki nad detektorami dla diagnostyki KX1 została doceniona przez dyrektora Instytutu Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy i uzyskała nagrodę II stopnia w konkursie na wyróżniające się osiągnięcia naukowe za „Znaczący udział w uruchomieniu diagnostyki KX1 na JET i dostarczenie istotnych dla rozwoju fuzji jądrowej danych, na podstawie których możliwe jest określenie koncentracji wolframu i niklu w plazmie”.

V.iii.3. Opracowanie i przygotowanie detektorów typu GEM do bezpośredniej rejestracji promieniowania plazmy w trudnych warunkach tokamakowych (dotyczy prac [H-4, H-5, H-6, H-7, H-8, H-9, H-10])

Celem tej części pracy habilitacyjnej jest przedstawienie zaprojektowanej i skonstruowanej, pod kierownictwem habilitantki, diagnostyki dla tomografii poloidalnej dedykowanej do monitorowania promieniowania SXR zanieczyszczeń pochodzących z metali (emisji wolframu) w warunkach stacjonarnych/długich wyładowań.

Problem domieszek metalowych dotyczy również projektu WEST [16], w którym wdrażany jest aktywnie chłodzony divertor wolframowy. Z powodu sprzężenia transportu zanieczyszczeń i aktywności MHD, mogącego doprowadzić do kumulacji zanieczyszczeń w plazmie [17], jest to szczególnie niebezpieczne w przypadku długotrwałych impulsów tokamakowych (docelowych wyładowań na tokamaku WEST). Wobec tego, wymagane jest odpowiednie narzędzie diagnostyczne do monitorowania poziomu domieszek oraz rekonstrukcji ich dystrybucji.

W ramach niniejszej rozprawy habilitacyjnej, dla tokamaka WEST, zorientowanego na reaktor ITER, zaproponowano system detekcji oparty na technologii GEM jako dedykowany system tomograficzny w obszarze promieniowania SXR z możliwością rozróżniania energii. Przygotowywana diagnostyka jest w fazie finalizacji przez zespół badawczy pod

kierownictwem habilitantki [H-4-H-10], [18-21]. Detektory oparte na tej technologii zaprojektowano tak, aby spełniały wymagania dotyczące ograniczeń wymiarowych, były czułe na przestrzenne położenie promieniowania rentgenowskiego i jego energię - podstawowe cechy wymagane od jakiegokolwiek detektora promieniowania rentgenowskiego plazmy tokamakowej, oferowały odpowiednio duży obszar detekcji, dopasowany do dedykowanego portu diagnostycznego, miały dobrą rozdzielczość przestrzenną, wysoki stosunek sygnału do szumu, możliwość estymacji energii fotonów i wytrzymałość na promieniowanie neutronowe. Należy podkreślić, że opracowywany system tomografii pozwoli na rozróżnianie energii fotonów, informacja taka była niedostępna dla byłego systemu tomograficznego na tokamaku WEST. Łączenie informacji spektralnych o promieniowaniu plazmy z dobrą rozdzielczością przestrzenną detekcji umożliwi uzyskanie podstawowych informacji o stanie plazmy.

Zaproponowana tomografia oparta na detektorach GEM będzie zastosowana do badań zanieczyszczeń, w szczególności wolframu. Kontrola tego elementu będzie miała kluczowe znaczenie dla uzyskania odpowiednich parametrów pracy całego urządzenia. Kontrolowanie zanieczyszczeń wolframu w plazmie centralnej powinno opierać się na analizie charakterystycznego promieniowania linii L/M emitowanych przez wolfram (najbardziej intensywne promieniowanie z plazmy centralnej). Wobec tego, głównym celem nowej diagnostyki rentgenowskiej było zapewnienie monitorowania promieniowania emitowanego przez wysoko zjonizowane zanieczyszczenia metali, koncentrując się na emisji w zakresie 2-4 keV (linia M).

Oczekuje się, że układ dwóch detektorów GEM, umieszczonych w porcie pionowym i poziomym [H-4], będzie rejestrował energię fotonów SXR wraz z rekonstrukcją ich położenia, tzn. umożliwiając poloidalną tomografię plazmową z rozdzielczością energii. Detektory zostały rozmieszczone w taki sposób, aby pokryć jak największy całkowity kąt widzenia dostępny dla każdego portu w celu uzyskania zarówno optymalnej rozdzielczości przestrzennej, jak i optymalnej struktury wewnętrznej komory detekcyjnej. Liczne zagadnienia fizyczne, techniczne i logistyczne należało rozwiązać, biorąc pod uwagę ograniczenia przestrzenne i warunki pracy systemu detekcji, takie jak wysoka temperatura otoczenia, oczekiwane rozkłady pola magnetycznego, etc. Dodatkowo, ponieważ kąt widzenia dla obu portów jest dość duży ($\sim 25^\circ$ i $\sim 32^\circ$) należało uwzględnić efekt paralaksy. Wobec tego habilitantka dokonała optymalizacji przerwy dryfu wewnętrznej komory detektora, aby zminimalizować przesunięcie w widocznym położeniu promieniowania plazmowego obserwowanego dla dwóch różnych linii patrzenia (linii tomograficznych) [21]. W ramach tej pracy zaprojektowałam konstrukcje detektorów, w szczególności detektora poziomego

o zakrzywionej powierzchni detekcji w celu uwzględnienia efektu paralaksy. Z powodu bardzo ograniczonej przestrzeni wewnątrz portu pionowego zdecydowano, że detektor pionowy pozostanie jednak o płaskiej powierzchni detekcji.

Ponieważ system przeznaczony jest do badań zanieczyszczeń wolframu i aktywności MHD, ustalono następujące wymagania dotyczące rozdzielczości czasowej: system detekcji powinien być w stanie osiągnąć zakres transportu zanieczyszczeń z rozdzielczością co najmniej 1 kHz i powinien rejestrować najwolniejszą aktywność MHD na poziomie 10 kHz. W odniesieniu do skali przestrzennej oszacowałam, że rozdzielczość 1 cm dla całej objętości plazmy jest zadowalająca, aby uzyskać dobry obraz tomograficzny, który będzie zawierał dokładne informacje o osi magnetycznej, promieniu inwersji *sawteeth* i rozkładach gradientów domieszek.

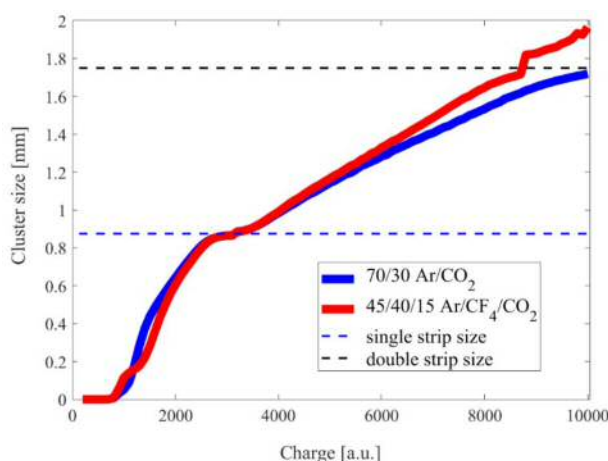
Zgodnie z tymi wymogami habilitantka opracowała projekt koncepcyjny komory detekcyjnej detektora. Wybrana konstrukcja potrójnej kaskady GEM pozwoliła osiągnąć wysokie całkowite powielenie gazowe przy bardzo niskim prawdopodobieństwie wyładowań spontanicznych. Ze względu na silnie zmniejszony efekt ładunków przestrzennych w sekwencyjnym procesie amplifikacji, można było osiągnąć też wysoką wydajność. Wydajność kwantowa detekcji została dostosowana do interesującej nas energii za pomocą symulacji wydajności absorpcji fotonów dla różnych mieszanek gazów i materiałów okna. Oczekiwana efektywność detekcji linii M promieniowania rentgenowskiego W (~ 2.4 keV) wynosiła $\sim 20\%$.

W międzyczasie, aby wesprzeć prace nad trwającym etapem projektowym i konstrukcyjnym, a także zaprojektowaniem i rozwojem elektroniki przetwarzającej oraz ostatecznym ukończeniem finalnego systemu detekcji dla tomografii poloidalnej, duży nakład prac habilitantki poświęcono badaniom podstawowych charakterystyk detektora i końcowym przygotowaniom detektora do przewidzianych warunków eksperymentalnych za pomocą testów z wykorzystaniem modelowego detektora (o podobnej konfiguracji) i symulacji sygnałów detektora. W ten sposób wielopłaszczyznowo zbadałam działanie detektora.

Tak na przykład, sprawdzono czas potrzebny do osiągnięcia stabilnych warunków pracy detektora GEM dla różnych mieszanin gazów [H-7]. Po osiągnięciu tych warunków, monitorowano podstawowe parametry detektora GEM, takie jak efektywne wzmocnienie (powielenie elektronów) i rozdzielczość energii w funkcji wartości wysokiego napięcia przyłożonego do każdej folii GEM, HV_{GEM} . Wykładnicza zależność wzmocnienia została spełniona dla prawie całego zakresu HV_{GEM} , z wyłączeniem najwyższych wartości stosowanych w przypadku mieszaniny gazów zawierających CF_4 , gdzie działanie detektora

wychodzi poza tryb proporcjonalny. W pracy [H-4] habilitantka potwierdziła dobrą liniowość odpowiedzi detektora dla emisji źródła ^{55}Fe oraz linii fluorescencji Zr i Cu. Osiągnięto niezawodne działanie detektora z rozdzielczością energetyczną różniącą się dla zastosowanych mieszanek: wyższa zawartość składnika Ar prowadzi do gorszej rozdzielczości, podobnie się to ma dla mniejszego przepływu gazu.

Aby spełnić wymóg zapewnienia dobrej rozdzielczości przestrzennej obrazu plazmowego (tj. pracować jako właściwa diagnostyka tomograficzna), należało nałożyć specyficzne wymagania na strukturę anody odczytowej detektora. W tym celu, aby dopasować rozmiar anody odczytowej do wielkości klastra generowanego ładunku pochodzącego z absorpcji fotonu, habilitantka prowadziła pomiary wielkości klastra oszacowanej za pomocą modelowego jednowymiarowego detektora paskowego Triple-GEM [H-7]. Odpowiedni rozmiar klastra oszacowano na nie więcej niż 2 mm dla obu mieszanin gazów (Rysunek 3). Wynik ten pomógł mi określić rozmiar paska dla końcowego detektora optymalizując liczbę niezależnych kanałów elektronicznych i spełniając jednocześnie wymagania dotyczące dobrej rozdzielczości przestrzennej plazmy.



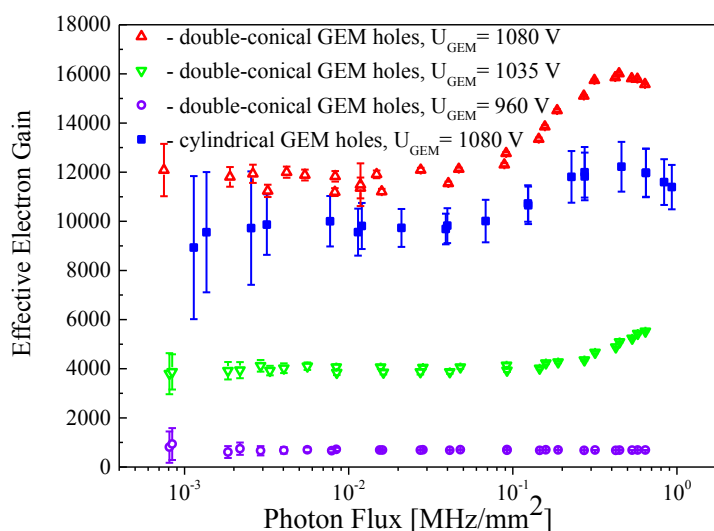
Rysunek 3. Zależność wielkości klastra od wygenerowanego ładunku dla pasków o szerokości 0.8 mm.

Oprócz różnych gazów i badania wydajności detektora przy różnych wartościach HV_{GEM} podjęłam się również zbadania geometrii otworków folii GEM i jej wpływu na wydajność detektora [H-8]. Dodatkowo, przeprowadziłam pomiary efektywnego wzmocnienia elektronowego w celu znalezienia optymalnego rozkładu pola elektrycznego, dla którego wzmocnienie jest zmaksymalizowane. W tym celu skonstruowano, z moim dużym udziałem, prototypowe detektory o podwójnie stożkowym i cylindrycznym kształcie otworków folii GEM, które były przedmiotem moich obszernych testów w celu uzyskania optymalnego pola elektrycznego w przerwach między foliami GEM. Wyniki wykazały, że optymalny rozkład pola elektrycznego umożliwia maksymalizację wytworzonego ładunku dla każdej geometrii

otworu GEM. Niemniej jednak innym czynnikiem definiującym ostateczny wybór rozkładu pola elektrycznego jest względna rozdzielczość energetyczna: musi ona również być zoptymalizowana. Można było wykazać, że optymalne wzmocnienie i rozdzielczość występują przy różnych wartościach napięć. Dla rozdzielczości energetycznej zarówno jej optymalna wartość, jak i regularny kształt widma zostały osiągnięte, gdy pola elektryczne pomiędzy elektrodami detektora były bardzo podobne, w przeciwieństwie do zależności wzmocnienia. W tej sytuacji, optymalna wydajność ekstrakcji i zbierania powodowała lepszy kształt i liniowość widma. Sytuacja detektora z cylindrycznymi otworami była podobna, lecz mniej przejrzysta. Tę tendencję wzięłam pod uwagę przy wyborze dalszych parametrów pracy detektora.

Technologia GEM pozwala na zbudowanie detektora gazowego ze stosunkowo wysokim wzmocnieniem pracującym stabilnie przy strumieniach promieniowania do $10^{11} \text{ cps}^{-1} \text{ m}^{-2}$. Jednak ze względu na wymóg dyskryminacji energetycznej w zastosowaniach tokamakowych, detektor powinien działać w trybie proporcjonalnym ze stabilnym, względnie niskim, wzmocnieniem gazowym ($\sim 10^3$) w szerokim zakresie dynamicznym, aby zapobiec wyładowaniom i nasyceniu ładunku przestrzennego. Aby zweryfikować te ograniczenia, habilitantka zbadała zdolność detekcji dla dwóch geometrii otworków folii GEM za pomocą lampy rentgenowskiej z anodą miedzianą, emitującej fotony o energii $\sim 8 \text{ keV}$ (linia $K \text{ Cu}$). Detektor został naświetlony skolimowaną wiązką padającą prostopadle do jego okna i zostało określone efektywne wzmocnienie elektronowe w funkcji pochłoniętego strumienia fotonów (Rysunek 4).

W rezultacie tych testów został uzyskany dosyć istotny wynik dla detektora GEM w kwestii jego zastosowania w zakresie fizyki plazmy. W przypadku otworów podwójnie stożkowych stwierdzono, że efektywne wzmocnienie jest stabilne w szerokim zakresie strumienia fotonów, co jest zgodne z [22]. Wysokie napięcie HV_{GEM} skutkujące wysokim wzmocnieniem detektora $\sim 10^4$ daje niemal stałe efektywne wzmocnienie dla strumieni o natężeniu poniżej 0.1 MHz/mm^2 . Podczas gdy zmniejszenie napięcia, a zatem również amplifikacji gazowej, znacznie zwiększa stabilny zakres efektywnego wzmocnienia. Przy niskim powieleniu elektronowym, $\sim 10^3$, ten parametr pozostaje stały prawie do 1 MHz/mm^2 . To zachowanie jest ściśle związane z ilością ładunku przestrzennego zgromadzonego w torze jego powielenia. Dla poziomu wydajności jonów powyżej ~ 20 (powyżej $\sim 10^3 \text{ fC/cm}^3$) [23] jonów dryfujących z powrotem na przybywający elektron, zewnętrzne pole elektryczne zaczyna znacznie się zniekształcać.



Rysunek 4. Efektywne wzmocnienie elektronowe w funkcji intensywności strumienia fotonów dla otworów podwójnie stożkowych i cylindrycznych.

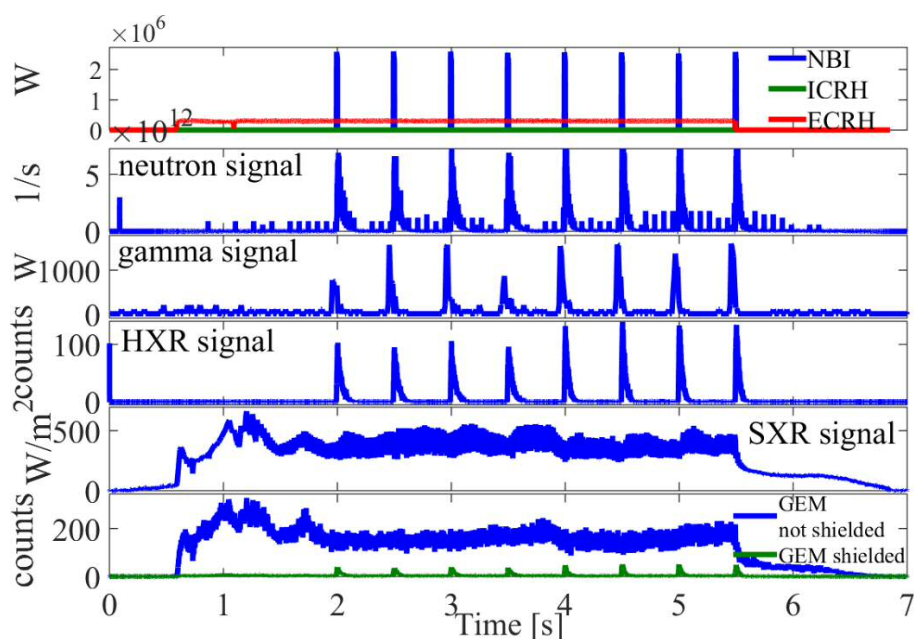
W przypadku otworów cylindrycznych, efektywne wzmocnienie waha się w granicach błędów do 0.07 MHz/mm², a następnie się zwiększa, lecz nie tak gwałtownie, jak w przypadku otworów podwójnie stożkowych. Dlatego taka geometria może być bardziej odpowiednia dla rejestracji intensywnego promieniowania plazmy charakteryzującego się wysoką dynamiką. Ze względu na zastosowanie detektora w warunkach plazmowych, funkcjonowanie detektora przy możliwie jak najmniejszej amplifikacji gazowej może być korzystne w celu poszerzenia stabilnego zakresu działania.

Poza testami laboratoryjnymi, habilitantka zaplanowała i przeprowadziła testy tokamakowe modelowego detektora, który został wprowadzony do warunków doświadczalnych panujących na działającym urządzeniu ASDEX Upgrade (AUG) dla pierwszych wstępnych testów diagnostyki na bazie GEM. Miało to na celu uwzględnienie wyzwań związanych z eksploatacją detektora w uciążliwym środowisku radiacyjnym [H-5].

Eksperymenty przeprowadzono w dwóch fazach. W pierwszej fazie system detekcji był narażony tylko na promieniowanie tła (neutronowe, gamma i twarde promieniowanie X (HXR (*ang. Hard X-Ray*))). W tej fazie detektor nie miał bezpośredniego widoku na plazmę i został umieszczony w pobliżu diagnostyki HXR. Był on testowany zarówno bez osłony jak i z osłoną ekranującą neutrony. Następnie, w drugiej fazie, system został przestawiony do SXR, gdzie dodatkowo jego powierzchnia detekcji była wystawiona na działanie fotonów SXR, poprzez bezpośredni widok na plazmę centralną.

W pierwszej fazie zaobserwowano rozsądną zgodność między sygnałem z detektora GEM a promieniowaniem HXR. Dla większości wyładowań zachowanie detektora w tej pozycji było zgodne z danymi HXR z najbliższej diagnostyki. Następnie wykonano pomiary

SXR dla wielu wyładowań tokamaka AUG dla różnych scenariuszy plazmy. Ponieważ sygnał na powierzchni aktywnej detektora GEM był niezmienny w kierunku toroidalnym plazmy (z powodu toroidalnej symetrii tokamaka), postanowiłam podzielić aktywną powierzchnię detektora w tym kierunku na trzy równe części. Tylko środkowa część miała bezpośredni widok na plazmę przez filtr berylowy. Dwie pozostałe części były chronione albo przed promieniowaniem SXR, albo jednocześnie przed SXR i neutronami. Sygnał z dwóch osłoniętych obszarów był następnie wykorzystywany do wyznaczenia tła dla sygnału z centralnej nieosłoniętej części. Na Rysunku 5 przedstawiono dane dla wyładowania w modzie L , dla którego sygnał z detektora GEM zasadniczo różni się od silnego promieniowania tła.



Rysunek 5. Sygnały z detektora GEM (na dole) zebrane dla wyładowania #33464 na tokamaku AUG i przedstawione z wybranymi profilami promieniowania i grzaniem plazmy. Sygnał dla odsłoniętej części detektora został znormalizowany przez odjęcie promieniowania tła (zależności od części osłoniętej).

Podobnie jak w pierwszej fazie, identyczne zachowanie sygnału GEM zaobserwowano dla obszarów z osłoną przed neutronami jak i bez niej. Sygnały zarówno z nieosłoniętych, jak i osłoniętych części powierzchni detekcyjnej, są przedstawione na dolnym wykresie na Rysunku 5. Zgodnie z oczekiwaniami, wykres czasowy centralnej niepokrytej części z odejmowanym tłem był podobny do przebiegu konwencjonalnej diagnostyki promieniowania SXR na AUG, podczas gdy sygnał z obszarów chronionych przed SXR i neutronami wykazywał podobieństwo do czasowych zależności HXR/gamma. Obserwacja ta była zgodna z innymi wyładowaniami dla małej mocy grzania.

Uzyskane wyniki spektralne wskazywały na to, że obserwowane niskoenergetyczne ramię w widmie detektora można interpretować jako wkład od wysokoenergetycznych

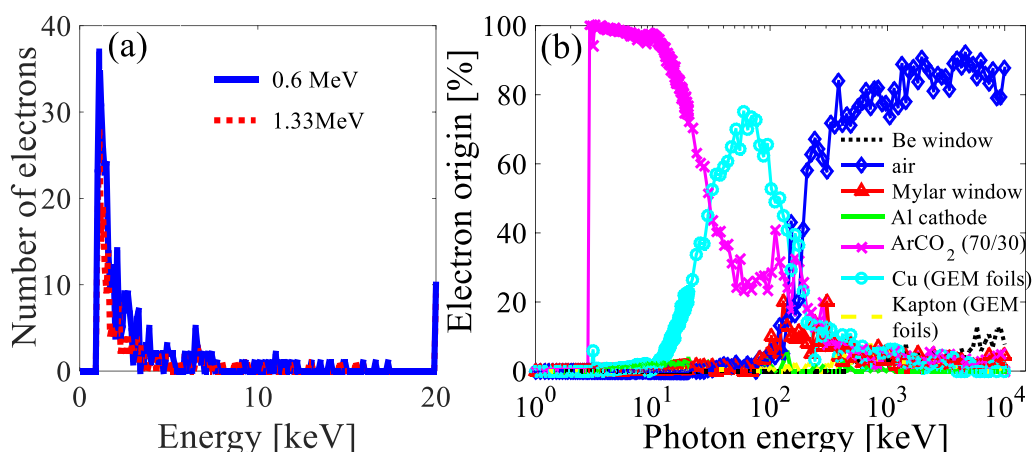
fotonów. Takie fotony o wysokiej energii mogą również wzbudzać emisję z niektórych pierwiastków obecnych w elementach gazowej komory detekcyjnej lub w jej bezpośrednim sąsiedztwie, powodując charakterystyczne linie fluorescencji będące przyczynkiem do obserwowanego widma. W obszarze SXR głównym kandydatem, wśród materiałów komory detektora, może być miedź w foliach GEM z linią $K_{\alpha 1}$ o energii 8.05 keV (linia przy 8 keV była obserwowana w widmie dla całego obszaru detekcji na samym początku wyładowania przy niższym strumieniu fotonów SXR).

Ponieważ wiązki neutronowe z plazmy powodują mieszane pole promieniowania, które towarzyszy transmisji neutronów przez środowisko, habilitantka zaplanowała i przeprowadziła dodatkowe testy laboratoryjne działania detektora pod wpływem strumieni neutronów ze źródła $^{241}\text{Am-Be}$ [H-6]. Celem ich było sprawdzenie elementów systemu detekcji, które w wyniku oddziaływania neutronów, mogły stać się źródłem promieniowania elektromagnetycznego różnorodnego pochodzenia, takiego jak gamma, promieniowanie rentgenowskie, etc. Zatem umieszczając źródło neutronów przy oknie detektora, zmierzone zostało widmo nieosłoniętego (z nieusuwalną obudową) źródła radioaktywnego, które wykazało osobliwość powstałą pod wpływem naświetlania przy około 8 keV, nakładającą się z monotonicznie malejącym „ogonem” (obserwowanym też dla danych z tokamaka AUG). W celu udowodnienia pochodzenia tego pikę przeprowadzono rozmaite testy, wyniki których potwierdziły, że pik pochodził od fluorescencji Cu obecnej w komorze detektora i został najprawdopodobniej spowodowany przez promieniowanie gamma pochodzące z indukowanej neutronowo reakcji aktywacji aluminium ($^{27}\text{Al}(n,\gamma)^{28}\text{Al}$), materiału obudowy źródła. Całkowite tłumienie tych promieni gamma za pomocą ołowianej osłony skutecznie usunęło obserwowany pik, wskazując na jego nie neutronowe pochodzenie w komorze detektora.

Warto nadmienić, że przed i po napromieniowaniu detektora zostało zarejestrowane promieniowanie tła bez żadnego źródła promieniotwórczego w celu sprawdzenia jego ewentualnych zmian. Intensywność tła po napromieniowaniu okazała się być około czterokrotnie większa niż na początku testów. Liczba ta stosunkowo charakteryzowała radioaktywność materiałów detektora indukowaną neutronami, co nie było znaczące w porównaniu z natężeniem sygnału detektora podczas naświetlania na całej powierzchni detekcyjnej. Z drugiej jednak strony, w trakcie napromieniowania, sygnał tła może pochodzić także z własnych promieni gamma emitowanych przez źródło promieniotwórcze. Zatem wtórne produkty pochodzące od reakcji z neutronami mogą być istotne, przyczyniając się do sygnału detektora działającego pod wpływem strumieni neutronów.

W celu oszacowania możliwego wpływu strumienia neutronów na regularny sygnał detektora GEM i zrozumienia mechanizmu oddziaływania neutronów z materiałami detektora zainicjowałam i opracowałam metodykę symulacji przy użyciu zestawu narzędzi GEANT4 [24]. W wyniku przeprowadzonych symulacji uzyskano intensywności najbardziej powszechnego powstającego promieniowania w funkcji energii neutronowej, które towarzyszy oddziaływaniom neutronowym. Stwierdzono, że najczęstsze reakcje jądrowe indukowane przez neutrony są następujące (n,γ) , (n,p) , (n,d) , (n,α) , (n,n') . Zasadniczo, dla wszystkich cząstek ich liczba rośnie wraz z energią neutronową, przy czym wyraźna interakcja rozpoczyna się przy około 0.1 MeV energii neutronu. Ponieważ wygenerowane cząstki mogą dalej oddziaływać z materiałami detektora i gazem, mogą one ostatecznie wytworzyć wysokoenergetyczne elektrony wewnątrz detektora, zanim opuszczą detektor lub zostaną pochłonięte w jego komorze. Przy tym mogą one być dodatkowo rozpraszane przez materiały detektora i gaz, jonizując neutralne atomy i tracąc energię. W wyniku takich oddziaływań powstają elektrony o niskiej energii ($\sim 1-10$ keV), które mogą zostać uwięzione w detektorze i zarejestrowane jako regularny sygnał, co jest niepożądane w przypadku zastosowań detektorów GEM w diagnostyce SXR.

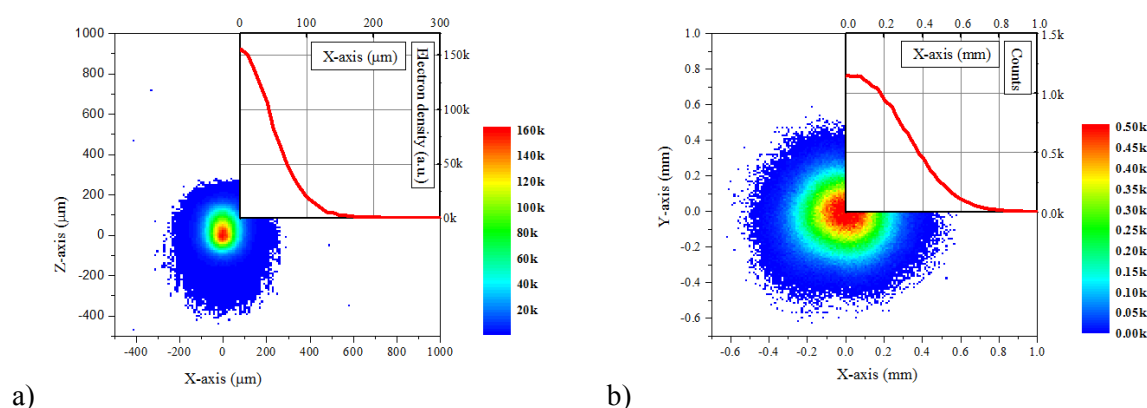
Wobec powyższego, przeprowadzono dalszą symulację ewolucji produktów reakcji i obliczono widma energii powstałych cząstek dla neutronów o energii 2.45 MeV, nieodłącznie związanych z działaniem plazmy deuterowej [H-6]. Jeśli chodzi o cząstki naładowane, oczekiwana odpowiedź detektora jest dość przewidywalna, dlatego symulacje końcowego sygnału detektora, który może być zarejestrowany, przeprowadzono dla promieni gamma, dla dwóch energii – 0.6 i 1.33 MeV i trzech interakcji będących przedmiotem zainteresowania dla działania detektora GEM: efekt fotoelektryczny, rozpraszanie Comptona i efekt kreacji par elektron-pozyton. Wszystkie efekty produkują wysokoenergetyczne elektrony wewnątrz detektora. Śledząc wszystkie interakcje w detektorze, które powodują pojawienie się elektronu ostatecznie w przerwie dryftu/konwersji, uzyskano rozkłady energii elektronów i przedstawiono je na Rysunku 6 (a). Elektrony prezentowanego rozkładu energii mogą być całkowicie uwięzione w przerwie dryftu detektora i zarejestrowane jako regularny sygnał, który może być błędnie uważany za fotony SXR o różnych energiach. Pochodzenie elektronów pierwotnych dla użytego układu eksperymentalnego na tokamaku AUG zilustrowano na Rysunku 6 (b) w funkcji energii zaabsorbowanego fotonu. Oprócz obszaru powietrza przed oknem detektora, głównymi materiałami przyczyniającymi się do sygnału były miedź oraz gaz roboczy detektora.



Rysunek 6. (a) Symulowane widma wytworzonych elektronów, które pojawiły się w obszarze dryfu detektora dla fotonów o energiach 0.6 i 1.33 MeV. (b) Udział różnych podstawowych materiałów/gazów obecnych podczas eksperymentu na tokamaku AUG w powstaniu elektronu w przerwie dryftowej w funkcji energii zaabsorbowanego fotonu.

Koordinowane przeze mnie symulacje zostały wykorzystane nie tylko do rozważenia interakcji padającego promieniowania z elementami detektora, ale również miały na celu optymalizację projektu wewnętrznej komory detektora i jego wydajności [H-9]. Tak, na przykład, badanie wpływu rozmieszczenia elektrod pozwoliło mi na dobranie dystansów pomiędzy nimi, które maksymalizują transmisję elektronów i pozwalają na dobór optymalnych wielkości zastosowanych pól elektrycznych. Na podstawie uzyskanych wyników numerycznych wybrano optymalne wartości pól elektrycznych dla średniej wartości przyłożonego napięcia na folii GEM i przeprowadzono symulacje lawin elektronowych potrójnego detektora GEM dla różnych geometrii elektrod detektora. Z otrzymanych zestawów danych wyodrębniono podstawowe parametry detektora: współczynnik mnożenia elektronów, rozkład energii elektronów, rozkład czasu przelotu elektronów i rozkład radialny sygnału elektronowego w płaszczyźnie odczytu.

Została zasymulowana całkowita ewolucja ładunków elektrycznych w detektorze GEM, od obszaru dryftu do elektrody odczytowej. Pierwotna chmura elektronowa, reprezentująca elektrony powstałe w przerwie dryftowej, tworzy asymetryczny kształt przypominający kroplę podczas przesuwania się w kierunku pierwszej folii GEM, jak pokazano na Rysunku 7 (a). Jest to związane z faktem, że rozkład całkowitego ładunku tworzą szybko poruszające się elektrony z przodu i wolniejsze jony z tyłu. Przykład uzyskanego rozkładu chmur elektronowych w płaszczyźnie odczytu, tj. po przejściu przez cały potrójny detektor GEM, pokazano na Rysunku 7 (b). Na podstawie tego wyniku oraz wyników eksperymentalnych wybrałam odpowiednią szerokość elektrody odczytowej dla finalnego detektora.



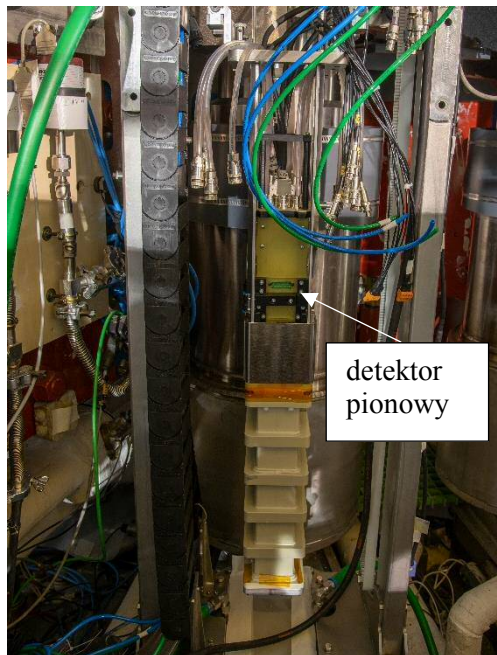
Rysunek 7. (a) Przekrój poprzeczny chmury elektronów pierwotnych tworzących kształt kropli, gdzie dodatnie wartości osi Z wskazują na pierwszą folię GEM. Wstawka pokazuje gęstość elektronów w funkcji X dla $Z=0$. (b) Widok z góry chmury elektronowej w płaszczyźnie odczytu. Wstawka pokazuje liczbę elektronów powstałych w 100 lawin elektronowych w funkcji odległości od środka chmury.

Jednym z ważnych parametrów działania detektora jest jego rozdzielczość energetyczna. Pod moim kierownictwem, w ramach pracy [H-10] przeprowadzono badania symulacyjne i uzyskano wyniki symulacji rozdzielczości energetycznej potrójnego detektora GEM dla kwantu promieniowania rentgenowskiego o energii 5.9 keV. Obliczenia wykonano za pomocą numerycznego narzędzia Garfield++ w dwóch etapach. W pierwszym etapie, za pomocą programu Heed [25], zasymulowano konwersję fotonów w obszarze dryftu na wiele elektronów pierwotnych (elektronów δ), które są źródłem lawin elektronowych w detektorze GEM, co pozwoliło otrzymać rozkład ilości elektronów pierwotnych wygenerowanych w obszarze dryftu przez kwant X.

W drugim etapie elektrony pierwotne z powstałego rozkładu ilościowego stały się źródłem lawin elektronowych propagowanych przez cały obszar detektora GEM. Rozkład uzyskanych sygnałów wytworzył widmo odpowiadające pikowi o energii 5.9 keV, co pozwoliło wyznaczyć teoretyczną rozdzielczość energetyczną detektora na poziomie 16.77%. Dla porównania przeprowadzono również eksperymentalne pomiary sygnałów z modelowego detektora GEM. Stwierdzono, że wyniki obliczeń dobrze się zgadzają z danymi eksperymentalnymi.

W ten sposób mogłam zbadać wpływ poszczególnych elementów komory detektora na jego zdolność energetyczną. Zdobyta wiedza pozwoliła na lepsze zrozumienie obserwacji eksperymentalnych, a także ich wpływu na pogorszenie się rejestrowanej rozdzielczości energetycznej, towarzyszące procesowi rejestracji i przetwarzania sygnałów.

Opracowane detektory w ramach tej pracy habilitacyjnej są na dzień dzisiejszy ukończone i gotowe do pomiarów. Bardzo wstępne i krótkie testy detektora pionowego



(Rysunek 8) zostały przeprowadzone podczas ostatniej kampanii eksperymentalnej na tokamaku WEST w grudniu 2018 r. Obecnie planujemy udział w następnej kampanii eksperymentalnej na tokamaku WEST w celu kompleksowej weryfikacji pracy detektora pionowego w środowisku plazmowym. Po przeprowadzonej weryfikacji drugi detektor systemu poloidalnej tomografii zostanie przewieziony na urządzenie w celu instalacji w porcie horyzontalnym, tym samym kompletując układ diagnostyczny poloidalnej tomografii do monitorowania miękkiego promieniowania rentgenowskiego. W dalszym etapie

Rysunek 8. Zdjęcie układu diagnostycznego wraz z detektorem GEM przez opuszczeniem do portu na tokamaku WEST.

funkcjonowania diagnostyki będzie kontynuowana współpraca międzynarodowa, dostarczająca tematów do badań naukowych oraz umożliwiającą zaangażowanie się w prowadzony eksperyment naukowców z różnych krajów. Dalsze badania w zakresie plazmy wytwarzanej w układach typu tokamak będą realizowane w ramach konsorcjum EUROfusion, którego częścią jest tokamak WEST.

Postępy prac badawczych oraz wyniki badań omówionych powyżej zagadnień można znaleźć w następujących opracowaniach naukowych [H-4]-[H-10], a także w publikacjach [18-20, 26-31].

V.iii.4. Praca nad detektorami obrazującymi promieniowanie rentgenowskie z plazmy tokamakowej (dotyczy prac [H-2], [H-3], [H-11], [H-12], [H-13])

Doskonałe możliwości obrazowania detektorów opartych na technologii MPGD [32], które przez swoje szerokie zastosowanie podbijają różne dziedziny (np. [33], [34]), mogą być również stosowane do bezpośredniego obrazowania promieniowania plazmy. Na przykład, zastosowanie możliwości obrazowania 2D detektora GEM w widoku toroidalnym i połączenie go z tomografią poloidalną opartą na detektorach GEM umożliwia uzyskanie informacji 3D, która powinna być dostępna do badania wzajemnego oddziaływania zanieczyszczeń wolframu i aktywności MHD. W połączeniu z zaawansowaną elektroniką takie detektory oferują doskonałą rozdzielczość przestrzenną i czasową, a także pozwalają uzyskać widmo

rejestrowanego ładunku, z którego można odtworzyć widmo fotonów. W ten sposób dodatkowe informacje 3D można wykorzystać dla określenia warunków granicznych tomografii 2D, bezpośredniego obrazowania, testowania symulacji MHD (syntetycznej diagnostyki) lub do użycia tomografii 3D. Rozdzielczość spektralna zapewniona przez system może być wykorzystana do ustalenia warunków granicznych kodów transportowych wolframu.

Jak wiadomo, transport jonów wolframu oddziałuje z aktywnością MHD i ta interakcja jest pełnym zjawiskiem trójwymiarowym (np. 3D redystrybucja wolframu w modach NTM, (*ang. Neoclassical Tearing Mode*) lub niestabilności typu „*internal kink modes*” z powodu, na przykład, rotacji plazmy lub pozaosiowego grzania ICRH (*ang. Ion Cyclotron Resonance Heating*)). Właściwa identyfikacja modu i jego lokalizacja, oraz przestrzenny rozkład wolframu byłyby dokładniejsze dzięki diagnostyce, która gwarantuje uzyskanie takich efektów 3D. Pod tym względem omawiana diagnostyka mogłaby przynieść korzyści, ponieważ trzeci detektor, który byłby dwuwymiarowym detektorem obserwującym przekrój poloidalny, zapewniłby dostęp do wymaganych informacji 3D, i byłaby komplementarna w stosunku do standardowej tomografii poloidalnej. Można jej użyć zarówno do skutecznego stawiania warunków granicznych dla tomografii 2D w prostych przypadkach z osiowosymetryczną emisyjnością SXR, jak i do sprawdzania poprawności efektów 3D w syntetycznym podejściu diagnostycznym lub do bezpośredniej tomografii 3D. Trzeba powiedzieć, że aktywność W i MHD nie może być uważana za niezależną, dlatego rozdzielczość spektralna i informacje 3D są komplementarne, jeśli trzeba przeprowadzić szczegółowe badania fizyczne. Co więcej, oczekuje się, że elektrony przyspieszone podczas procesów rekoneksji magnetycznej, tzw. *sawtooth*, lub podczas zerwania wyładowania wywołanego poprzez masywną iniekcję gazu powinny wytworzyć silnie anizotropowy sygnał, najlepiej mierzony poprzez toroidalną kamerę. W związku z tym wspólne wykorzystanie detektora toroidalnego z detektorami poloidalnymi pozwoliłoby na lepszą kwantyfikację anizotropii promieniowania, a co za tym idzie, zarówno lepszą kwantyfikację odpowiedzialnego za to pola elektrycznego, jak i lepszą przestrzenną lokalizację przyspieszonych elektronów. Oczywiście takie promieniowanie byłoby widoczne przy wyższej energii, ale wczesne obserwacje sugerują, że powinno być widoczne na sygnałach SXR.

Należy podkreślić, że detektory gazowe oparte na technologii GEM, które są rozwijane przez grupę badawczą pod kierunkiem habilitantki, mają dodatkowe zalety, które są ważne dla obecnego zadania, jak, np., kompaktowość, ale jednocześnie duża powierzchnia detekcji, oraz operacyjna i elastyczna geometria, co jest bardzo ważne ze względu na ograniczoną dostępną przestrzeń wokół komory tokamaka. Ponadto warunki zewnętrzne, takie jak pole magnetyczne,

nie zapobiegną skutecznemu działaniu detektora [35], [21]. Inne zalety to ~ 20 ns czas pomiaru pojedynczego fotonu (rozsądna rozdzielczość czasowa pozwoli rozwiązać problem dynamiki plazmy ($\sim 100 \mu\text{s}$)), stosunkowo niski koszt, oraz jak już było wspomniane, przestrzenne rozdzielanie procesów transferu/amplifikacji ładunku i jego gromadzenia (tj. odczytywania sygnału), co pozwala na dobrą rozdzielczość 2D (do $50 \mu\text{m}$ [36]).

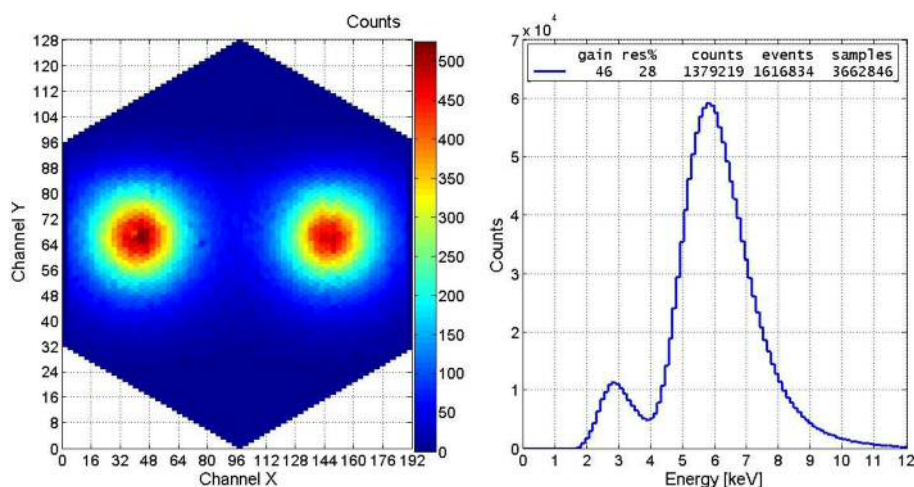
Dotychczas przeprowadziłam obszerne badania mające na celu optymalizację odpowiedzi detektora GEM. Do takich badań zaliczyć można badania konfiguracji elektrod, wybór materiałów komory detekcyjnej, geometrii otworów folii, przyłożonych napięć w celu uzyskania optymalnego rozkładu pola elektrycznego oraz składu i szybkości przepływu roboczej mieszaniny gazów. Odczyt typu micropattern jest kolejnym ważnym elementem detektora GEM. Jest on odpowiedzialny za efektywne wydobycie zgromadzonego ładunku z chmury elektronowej i jego prawidłowy transfer do toru elektroniki. Wybór geometrii płaszczyzny odczytu ma duże znaczenie dla rozdzielczości przestrzennej detektora. W tym rozdziale przedstawiono wyniki badań habilitantki prowadzonych pod kątem limitów możliwości zastosowania kilku struktur odczytowych, zarówno przy intensywnych strumieniach fotonów, jak i przy maksymalnej osiągalnej rozdzielczości przestrzennej, mającej na celu określenie ich przydatności do obrazowania promieniowania plazmy za pomocą detektora GEM [H-11].

Do powyższych badań zastosowałam modelowy potrójny detektor GEM wypełniony mieszaniną gazów Ar/CO₂. Pikselowa struktura odczytu (anoda) została połączona z elektroniką odczytową [28-30], która była w stanie zapewnić wydajność sygnału do 2.5 MHz na pojedynczy kanał.

Ponieważ struktura odczytu narzuca pewną liczbę kanałów elektroniki, w przypadku dużej powierzchni detekcyjnej (typowej dla aplikacji tokamakowych) poszukiwany jest kompromis między dobrą rozdzielczością przestrzenną a jednoznacznością rekonstrukcji położenia fotonów i minimalizacją liczby kanałów elektroniki. Dlatego w tej pracy rozważałam różne układy o łącznej powierzchni detekcji $\sim 100 \times 100 \text{ mm}^2$, aby zoptymalizować oba parametry. Przetestowałam cztery geometrie odczytu, aby zbadać ich rozdzielczość przestrzenną i zdolność przetwarzania intensywnego strumienia fotonów, które są kluczowe dla diagnostyki obrazowania plazmy tokamaka.

Obrazowanie sygnału detektora przygotowano, z udziałem habilitantki, przy założeniu, że ładunek pikselu odczytu, zebrany dla absorpcji pojedynczego fotonu, odnosi się do prawdopodobieństwa absorpcji fotonu na powiązanej powierzchni detekcyjnej [H-2, H-3].

Dlatego położenie klastra ładunków było zdefiniowane przez względne wartości ładunków pikseli tworzących dany klaster (przykład dwóch źródeł ^{55}Fe pokazany jest na Rysunku 9).

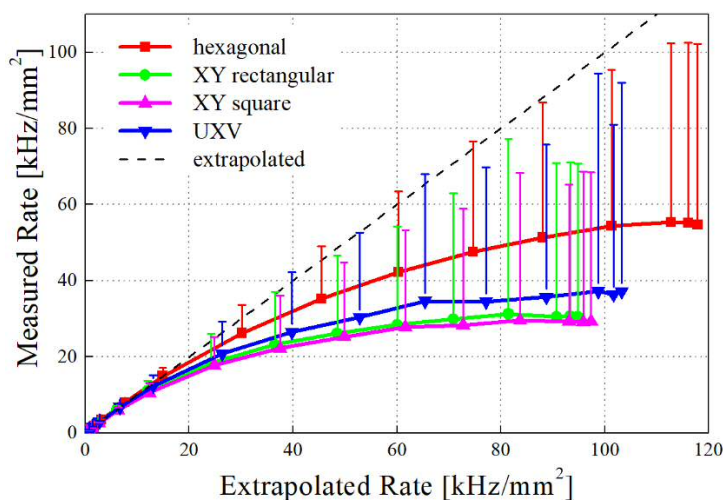


Rysunek 9. Charakterystyka detektora GEM dla dwóch źródeł referencyjnych ^{55}Fe dla struktury odczytu UXV: rozkład planarny (po lewej), widma energii (po prawej).

W przypadku intensywnego źródła promieniowania, takiego jak plazma tokamakowa, występują zdarzenia z wieloma fotonami jednocześnie, które są traczone podczas histogramowania. Wynika to z faktu, że równoczesne fotony mogą trafić na ten sam tor elektroniki, wspólny dla grupy połączonych pikseli, nawet będąc rejestrowane w różnych miejscach na płaszczyźnie odczytu. Wiąże się to z niejednoznacznością przetwarzania takiego zdarzenia typu *multi-hit*. Potencjalnym rozwiązaniem byłoby posiadać mniejsze i niezależne piksele dla jednoznacznej rekonstrukcji pozycji i energii rejestrowanych fotonów. To jednak może nie być praktyczne, ponieważ tysiące pikseli są potrzebne do dobrej rozdzielczości przestrzennej nawet dla stosunkowo małej powierzchni detekcyjnej.

W celu wyznaczenia granicznych wartości dla rozpatrywanych struktur odczytu względem jednoznacznego określenia klastra ładunku wytworzonego przez foton i jego pozycji na płaszczyźnie anodowej, ten typ pomiarów przeprowadziłam dla wszystkich struktur odczytu [H-11]. Wyniki przedstawiono na Rysunku 10 wraz z ekstrapolowaną intensywnością generatora rentgenowskiego. Wszystkie struktury odczytu były testowane przy tych samych ustawieniach generatora promieniowania rentgenowskiego. Jak widać, pewna frakcja wszystkich zarejestrowanych zdarzeń zostanie odrzucona z dalszego przetwarzania danych. Obejmuje ona niejednoznaczne zdarzenia, takie jak nieregularne klastry ładunków, gdy sygnały z sąsiednich pikseli pokrywają się w czasie lub w przestrzeni, albo zdarzenia, których nie można jednoznacznie rozstrzygnąć (wykorzystanie co najmniej jednej wspólnej współrzędnej/kanału dla osobnych zdarzeń). Dla niezależnych heksagonalnych pikseli (bez wzajemnego połączenia)

gromadzenie informacji z większą wydajnością zostało uzyskane kosztem gorszej rozdzielczości przestrzennej (inny ważny parametr decydujący o możliwościach obrazowania detektorów, który zbadalam w ramach tej pracy).



Rysunek 10. Odchylenie mierzonego przez detektor GEM strumienia fotonów od ekstrapolowanego natężenia promieniowania dla wszystkich struktur odczytu. Całkowita liczba nierozróżnialnych zdarzeń jest oznaczona jako słupki błędów. Ekstrapolowany strumień (szara linia przerywana) uzyskano z niezależnej weryfikacji liniowości generatora promieniowania rentgenowskiego.

Porównanie wyników dla pozostałych struktur (UXV, XY z pikselami prostokątnymi i kwadratowymi) wykazało, że wszystkie w dużym stopniu (powyżej 50%) cierpią na utratę informacji dla strumieni promieniowania powyżej 60 kHz/mm². Niemniej, nieco bardziej skuteczną detekcję w zakresie mierzonego strumienia fotonów zapewniał odczyt UXV, który potrafił obsłużyć wyższą przepustowość przy dobrej rozdzielczości przestrzennej pomiaru.

Ponieważ plazma tokamakowa jest bardzo jasnym źródłem promieniowania SXR, może ona wytworzyć bardzo intensywny strumień fotonów na powierzchni detektora, który osiąga ponad 10⁵-10⁷ cps mm⁻² w zależności od mocy grzania, zanieczyszczeń obecnych w plazmie i układu detektora. Biorąc pod uwagę, że obrazowanie plazmy tokamakowej o wysokiej rozdzielczości przestrzennej wymagałoby ogromnej liczby pikseli podłączonych bezpośrednio do kanałów elektroniki odczytu, bardziej odpowiednie byłoby opracowanie struktury odczytu przy zredukowanych niezależnych torach elektroniki. Dlatego do celów obrazowania plazmowego struktura odczytu UXV, biorąc pod uwagę jej dalszy rozwój i optymalizację, może być uważana za dość obiecującą konfigurację podstawową do budowy elektrod anodowych o wymaganej charakterystyce.

Przy wysokich strumieniach promieniowania wspomnianych powyżej istnieje duże prawdopodobieństwo nakładania się sygnałów w czasie i przestrzeni, co może uniemożliwić identyfikację klastrów ładunku z sygnałów detektora, a to oznacza utratę informacji o energii

i liczbie fotonów. Aby poprawić wydajność detektora, opracowano, z udziałem habilitantki, procedurę separacji nakładających się w czasie impulsów dla tego samego kanału elektronicznego, aby można ją było wdrożyć w przetwarzanie danych w czasie rzeczywistym [H-12]. Opracowany algorytm dokonuje separacji nakładających się sygnałów spowodowanych stosunkowo powolnym układem elektronicznym. Rozdzielenie nakładających się impulsów zostało pomyślnie wprowadzone i zweryfikowane dla eksperymentów symulacyjnych. Procedura separacji jest skuteczna w przypadku, gdy pierwotne impulsy detektora GEM nie pokrywają się. Oczekiwana poprawa rozdzielczości czasowej wynosi około ~ 50 ns w porównaniu z ~ 500 ns osiągniętymi wcześniej dla ukształtowanych sygnałów detektora. Poprawi to znacznie wydajność detektora GEM po wdrożeniu algorytmu w module FPGA lub podczas procesowania sygnałów w trybie *quasi online*.

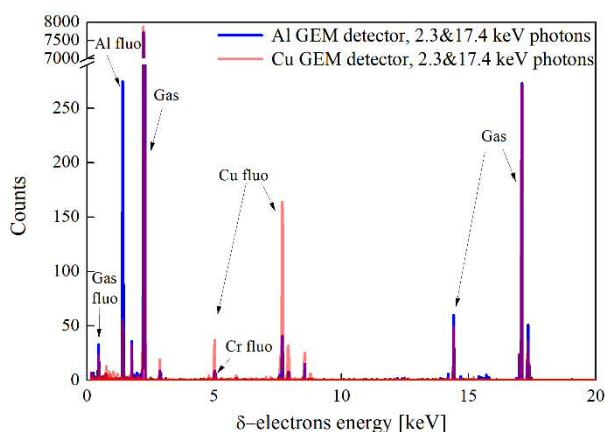
Ponieważ promieniowanie z plazmy charakteryzuje się wyjątkową intensywnością i szerokim zakresem, część detekcyjna opracowanej diagnostyki musi być dostosowana do warunków środowiska doświadczalnego. Powinna ona nie tylko dokładnie badać promieniowanie, ale także w idealnym przypadku nie powinna dostarczać żadnych dodatkowych pasożytniczych sygnałów pochodzących z interakcji elementów detektora z padającym promieniowaniem, np. emisji fluorescencji z czułych na fotony elementów komory. Zatem elementy detektora muszą być zaprojektowane tak, aby nie zakłócać oryginalnego sygnału.

Widmo rentgenowskie pochodzące od plazmy w obszarze miękkiego-pół twardego (S-SH (*ang. Soft-Semi Hard*)) promieniowania składa się z szerokiej części promieniowania ciągłego wymieszanej z emisją ciężkich domieszek. Takie widmo rozciąga się zwykle powyżej krawędzi absorpcji miedzi (~ 9 keV), w szczególności dla reaktora ITER, podstawowego materiału używanego dotychczas do produkcji folii GEM, co prowadzi do pasożytniczego sygnału fluorescencyjnego. Niedawno rozpoczęto bardzo wstępne badania adaptacji folii GEM ze zmniejszoną ilością miedzi [37] na bazie warstwy adhezyjnej chromu. Jednak energia linii $Cr K_{\alpha}$ wynosi 5.411 keV, trafiając do docelowego zakresu energii fotonów. Ponadto, wydajność fluorescencji warstw Cr jest również wysoka z powodu względnie wysokiego Z , wynosząca ~ 0.35 dla Cr i ~ 0.5 dla Cu [38], jak również efektu absorpcji fotonów.

Wobec powyższego, w tej pracy habilitantka zaproponowała aluminium na okładki metalowych folii GEM w celu zastosowania ich do obrazowania plazmy tokamakowej w zakresie S-SH promieniowania rentgenowskiego. Niższy współczynnik absorpcji Al w porównaniu do Cu powyżej 2 keV prowadzi do mniejszego efektu radiacyjnego dla folii Al, a ponadto wydajność fluorescencji Al jest mniejsza niż 0.05 [38]. W jednej z wykonanych

ostatnio prac [H-13], po raz pierwszy, zgodnie z najlepszą wiedzą autorów, zaproponowane przez habilitantkę nowo opracowane folie aluminiowe GEM (z warstwą adhezyjną Cr) zostały wstępnie przetestowane w celu zastosowania do obrazowania promieniowania rentgenowskiego z plazmy w zakresie S-SH.

W celu porównania wpływu różnych materiałów na obrazowanie promieniowania, zainicjowałam przeprowadzenie symulacji odpowiedzi detektora GEM za pomocą programu GEANT4 (Rysunek 11). Pokazano, że natężenie pasożytniczych linii fluorescencyjnych zmienia się silnie w zależności od materiałów użytych w komorze detekcyjnej. Pomimo nieznacznie wyższej bezwzględnej intensywności linii fluorescencji Al w porównaniu do linii Cu, natężenie linii Al wynosi tylko około 3% linii gazowej przy 2.3 keV w porównaniu do stosunku 60% linii Cu do linii gazowej przy 17.4 keV.

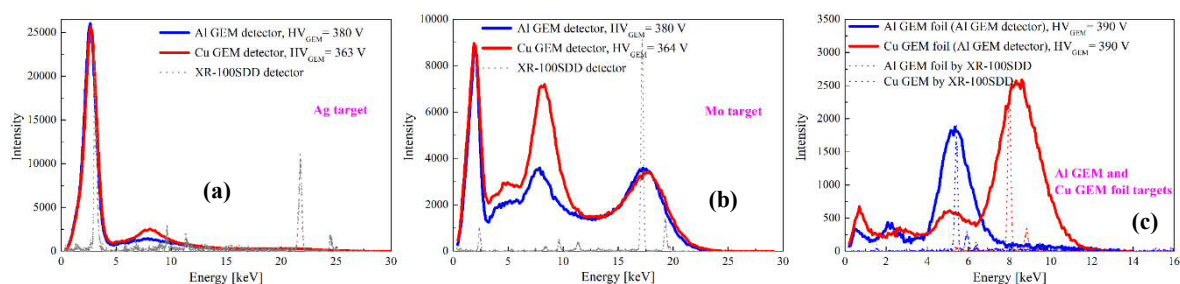


Rysunek 11. Symulacje widm elektronów δ dla padających fotonów o energii 2.3 i 17.4 keV (L , K krawędzie Mo) dla Al i Cu folii GEM.

Ponieważ obrazowanie bezpośrednio narzuca kierunek prostopadły promieniowania padającego, wymaga to zminimalizowania wkładu wszystkich niepożądanych sygnałów pochodzących z interakcji materiałów detektora z padającym promieniowaniem. Wobec tego, zaplanowałam testy detektorów dla różnych źródeł promieniowania (linii fluorescencyjnych), aby zweryfikować spektralną wydajność dwóch detektorów różniących się jedynie materiałem folii GEM. Wyniki testów, przeprowadzonych z moim znaczącym udziałem, przedstawione są na Rysunku 12.

Prezentowane zależności (Rysunek 12 (a-b)) wykazują niepożądany wpływ materiału Cu. Nawet w przypadku detektora opartego na aluminiowych foliach GEM, który ma miedź wyłącznie na płycie odczytowej, Cu przyczynia się do ogólnego sygnału (pik przy ~ 8 keV na obu rysunkach). Wyniki napromienienia folii GEM przedstawiono na Rysunku 12 (c). Widmo pochodzące od folii Cu GEM wykazuje linie serii K miedzi (szeroki pik przy ~ 8 keV z pikiem

ucieczki Ar przy ~ 5 keV). Zmierzone widma były zgodne z wynikami symulacji. Dostarczyły to ważnych informacji o pochodzeniu sygnału detektora, zarówno materiał jak i rodzaj interakcji zostały wyjaśnione i potwierdzają wniosek, że Al jest bardziej odpowiednim materiałem do zastosowania w detektorze do obrazowania plazmy.



Rysunek 12. Mierzone widma dla następujących tarcz materiałów: (a) Ag, (b) Mo, i (c) folii Cu GEM i Al GEM.

Ponadto należy wziąć pod uwagę aspekt oddziaływania neutronów z materiałem komory detekcyjnej oraz z otaczającymi materiałami w eksperymencie fuzyjnym, jako źródła promieniowania tła, który jest oddzielnym i szerokim zagadnieniem ([H-5], [H-6]). Nie odbiegając od tematu i porównując aktywację Al oraz Cu przez pełne widmo neutronów wytwarzanych w urządzeniach fuzyjnych, okazuje się, że materiał Al jest bardziej odpowiedni do zastosowań fuzyjnych również pod względem interakcji z neutronami, ponieważ jego przekrój czynny na aktywację jest kilkunastokrotnie mniejszy niż w przypadku Cu. Rozprasza również kilka razy mniej neutronów niż Cu prawie w całym zakresie neutronów, z wyjątkiem 1-3 MeV, gdzie ten wskaźnik jest stosunkowo wyższy (o 30-40%) niż dla Cu. Dodatkowo, przekroje wychwytu radiacyjnego (n,γ), który jest bardzo intensywną reakcją dla neutronów termicznych, jest około 10 razy mniejszy w przypadku Al niż w przypadku atomów Cu.

Warto nadmienić, że w ramach niniejszej pracy innowacja w dziedzinie elektroniki, stosowana zwłaszcza do detekcji miękkiego promieniowania X, pt. „Sposób i układ do separacji nakładających się impulsów”, której jestem współautorką, uzyskała patent NR 229625 od 07.06.2016, udzielony przez Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej.

V.iii.5. Podsumowanie pracy

Prezentowana praca habilitacyjna podsumowuje osiągnięcia habilitantki w opracowywaniu nowego globalnego systemu pomiarowego SXR opartego na detektorach gazowych GEM. Prace badawcze w tym zakresie zostały zainicjowane i obecnie trwają, aby wesprzeć zorientowany na ITER program badawczy w zakresie przygotowania przydatnego i skutecznego detektora do badań w zakresie fizyki plazmy poprzez pomiar promieniowania

rentgenowskiego. Głównym celem tej pracy było opracowanie, budowa oraz badania nowych detektorów opartych na technologii GEM, wykorzystywanych w wysokorozdzielczym spektrometrze bazującym na geometrii Johanna, badaniach tomograficznych transportu wolframu w tokamakach zorientowanych na ITER oraz w obrazowaniu promieniowania plazmy.

Przedstawione w niniejszej pracy osiągnięcia pokazują, że zaproponowana diagnostyka może być stosowana do pomiaru SXR w warunkach plazmy tokamakowej. Diagnostyka taka jest przewidziana do pracy przyszłych reaktorów termojądrowych, uwzględnia ona surowość warunków pracy i eliminuje dotychczasową słabą wytrzymałość stosowanych obecnie detektorów półprzewodnikowych do badań SXR w takim środowisku.

Efektom przeprowadzonych prac badawczych było zaprojektowanie i wykonanie detektorów dedykowanych i zoptymalizowanych do ciągłego monitorowania promieniowania plazmowego emitowanego przez wysoko zjonizowane zanieczyszczenia metali obecne na tokamaku JET, W^{46+} (~2.4 keV) i Ni^{26+} (~7.8 keV). W rezultacie dwa moduły detekcyjne umożliwiające szybkie dynamiczne obrazowanie plazmowe z rozdzielczością energii w obszarze SXR i rozdzielczością czasową 10 ms zostały zainstalowane na spektrometrze KX1. Wysoka zdolność zliczania modułów detekcyjnych została osiągnięta przy dobrej rozdzielczości pozycji. Ponadto osiągnięto rozdzielenie w trybie *on-line* profili dyfrakcyjnych odpowiadających trzem rzędom dyfrakcji na kryształach, co nie było możliwe dla poprzednich detektorów dla diagnostyki KX1.

Następnie, opracowano system detekcji oparty na technologii GEM do tomograficznej i obrazowej diagnostyki plazmowej z dyskryminacją energetyczną promieniowania plazmowego, która jest niezwykle cennym narzędziem do monitorowania transportu zanieczyszczeń i zrozumienia jego fizyki. W ramach tej pracy przeprowadzono liczne testy i badania wydajności detektora, zarówno eksperymentalne jak i numeryczne, wraz z dokładnym projektowaniem i budową detektorów. Celem tych prac były rozwój i optymalizacja diagnostyki w odniesieniu do wymagań narzuconych przez warunki promieniowania plazmy i środowiska tokamakowego. Ostatecznie, jeden z detektorów systemu został zainstalowany na tokamaku WEST w celu weryfikacji jego funkcjonowania, po której nastąpi instalacja drugiego detektora do kompletnej tomografii poloidalnej.

Rozwijano również dwuwymiarowe detektory GEM w celu uzyskania informacji 3D o zjawiskach zachodzących w plazmie poprzez obserwacje przekroju poloidalnego. Przeprowadzono testy i wdrożono innowacyjne rozwiązania w celu stworzenia nowego narzędzia diagnostycznego odpowiedniego dla zakresu fizyki plazmy. Projekt i konstrukcja

elementów komory detekcyjnej, a także eksploracja wyników naukowych opracowanego narzędzia diagnostycznego zostały przeprowadzone przy znaczącym udziale habilitantki zarówno naukowca, jak i kierownika zespołu badawczego.

Do najważniejszych moich osiągnięć jako kandydatki do stopnia doktora habilitowanego można zaliczyć dość istotny wkład w doskonalenie samej techniki diagnostyki promieniowania w zakresie fizyki plazmy, a także we wzrost wiedzy naukowej w zakresie detektorów GEM poprzez wielopłaszczyznowe badania ich pracy w różnych warunkach i zastosowaniach. Badania takie wymagały przeprowadzenia zarówno eksperymentu, jak i symulacji w celu zrozumienia mechanizmu powstawania sygnałów w detektorze, optymalizacji ich wydajności, opracowania i zbadania elementów komory detekcyjnej w celu spełnienia wymagań eksperymentów na reaktorach fuzyjnych. Ponadto, przeprowadzono badania eksperymentalne i numeryczne wpływu środowiska radiacyjnego na zachowanie detektora oraz efektu różnych geometrii otworów folii GEM, mające na celu lepszą stabilność detektora pod wpływem intensywnych strumieni promieniowania. Ostatecznie, zaproponowano i zbadano nowy materiał do produkcji folii GEM, w wyniku czego poprawiono możliwości bezpośredniego obrazowania oraz zaobserwowano spadek sygnałów pasożytniczych. Na różnych etapach pracy badawczej habilitantka musiała wykazać się efektywnym planowaniem prac eksperymentalnych zarówno w lokalnym laboratorium, jak i na tokamakach JET, AUG, WEST, i być równocześnie wartościowym współpracownikiem w rozwiązywaniu różnorodnych zagadnień dotyczących samych detektorów gazowych jak i w opracowywaniu algorytmów procesowania sygnałów zarówno od strony merytorycznej jak i metodycznej. Na podstawie powyższych prac można stwierdzić, że detektor oparty na technologii GEM przyczynił się do przybliżenia kontrolowanej syntezy termojądrowej w warunkach ziemskich.

VI. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

VI.i. Działalność prowadzona przed uzyskaniem stopnia doktora

Studia wyższe ukończyłam z wyróżnieniem na Wydziale Fizyki Donieckiego Uniwersytetu Państwowego w Doniecku (Ukraina) na kierunku Fizyka ze specjalizacją Fizyka Teoretyczna w czerwcu 1996 roku. Moją pracę magisterską pt. „Amplituda rozpraszania fal spinowych w formalizmie gęstości spinowej” obroniłam w maju 1996 roku i uzyskałam stopień magistra. Uzyskane wyniki zawarte w przygotowanej pracy magisterskiej opublikowano w recenzowanym czasopiśmie o zasięgu międzynarodowym: „Scattering of spin waves by a

rectilinear edge dislocation”, A.N. Kuchko, M.V. Chernyshëva, *Physics of the Solid State* 40(11) (1998) 1861.

W roku 1996 podjęłam dalszą naukę na dziennych studiach doktoranckich na Wydziale Fizyki Donieckiego Uniwersytetu Państwowego na kierunku Fizyka Teoretyczna. Studia doktoranckie ukończyłam w roku 2000, gdzie zdałam wszystkie wymagane egzaminy uzyskując bardzo dobre wyniki ocen, jednakże z powodów geopolitycznych zostałam zmuszona do zawieszenia obrony pracy doktorskiej. Brak środków na utrzymanie w niełatwej sytuacji politycznej jak również ekonomicznej na Ukrainie w tym okresie, wymusił na mnie podjęcie pracy w firmie prywatnej na pełen etat, co przyczyniło się do znacznego ograniczenia czasu, który mogłam poświęcić na ukończenie i obronę doktoratu. Ogólna, bardzo trudna sytuacja gospodarcza, która skutecznie utrudniała dostęp do niezbędnych narzędzi pracy, tak oczywistych choćby jak komputer niezbędny do sfinalizowania pracy doktorskiej, przyczyniła się do całkowitej rezygnacji i wyjazdu z kraju. W związku z tym nie doszło do ukończenia pracy doktorskiej i jej obrony. Jednakże potrzeba samodoskonalenia i wrodzona postawa finalizowania podjętych wcześniej wyzwań, nie pozwoliła mi na pozostawienie tej kwestii otwartej.

Dlatego po zdaniu egzaminu kwalifikującego, w kwietniu 2000 roku podjęłamienne studia doktoranckie w Instytucie Fizyki, Polskiej Akademii Nauk, (IF PAN), w zakładzie ON1.2, Zespół Fizyki i Technologii Warstw Epitaksjalnych. W latach 2000-2005 zajmowałam się pomiarami temperaturowej i polowej zależności namagnesowania półprzewodnikowych trój- i wielowarstwowych struktur magnetycznych. Prowadziłam badania doświadczalne oraz analizę modeli fizycznych dotyczących magnetycznych i optycznych własności półprzewodnikowych struktur ferromagnetycznych EuS-PbS. Przeprowadzane badania naukowe stały się podstawą mojej pracy doktorskiej.

Podstawowe cele pracy dotyczyły: doświadczalnego zbadania mechanizmów antyferromagnetycznych oddziaływań pomiędzy warstwami EuS poprzez niemagnetyczne półprzewodnikowe warstwy PbS oraz eksperymentalnej weryfikacji wpływu ferromagnetycznych barier EuS na strukturę elektronową i własności magnetoptyczne wielowarstw EuS-PbS w różnych obszarach spektralnych. Szereg zadań podjętych w pracy doktorskiej dotyczył badań własności optycznych struktur EuS-PbS. Dla wykonania ilościowej analizy wyników doświadczalnych niezbędnym okazało się opracowanie modelu fizycznego uwzględniającego podstawowe cechy namagnesowania trójwarstw sprzężonych antyferromagnetycznie.

Zasadnicze znaczenie miały badania własności optycznych i struktury elektronowej studni PbS z ferromagnetycznymi barierami EuS. Zadanie to zrealizowano metodą pomiarów fotoluminescencji w funkcji temperatury i pola magnetycznego. W rozprawie podjęto szczególnie trudnego zadania, a mianowicie doświadczalnej weryfikacji możliwości wykorzystania ferromagnetycznych własności wielowarstw EuS-PbS do kontrolowania własności optycznych studni PbS. Dla uzyskania pełnego obrazu struktury elektronowej i własności optycznych struktur EuS-PbS wykonana została także analiza spektralnej zależności efektu Kerra w obszarze krawędzi absorpcji EuS i synchrotronowe pomiary fotoemisji pozwalające na wyznaczenie gęstości stanów elektronowych warstw EuS. Duża część prac doświadczalnych została wykonana w IF PAN we współpracy z różnymi Oddziałami Instytutu. Aktywnie korzystano także z możliwości współpracy z Uniwersytetem w Eindhoven oraz laboratorium HASYLAB w Hamburgu.

Uzyskane przeze mnie wyniki badań eksperymentalnych oraz wykonane obliczenia numeryczne weszły w skład rozprawy doktorskiej pod tytułem „Magnetyczne i magnetoptyczne własności półprzewodnikowych ferromagnetycznych struktur EuS-PbS” napisanej pod kierunkiem doc. dr. hab. Tomasza Storego. Stopień naukowy doktora nauk fizycznych z zakresu fizyki ciała stałego został mi nadany uchwałą z dnia 23 czerwca 2005 roku przez Radę Naukową IF PAN.

W ramach współpracy z naukowcami z IF PAN w trakcie studiów doktoranckich zapoznałam się z technikami PES (*ang. PhotoEmission Spectroscopy*), absorpcji rentgenowskiej XANES (*ang. X-ray Absorption Near Edge Structure*), EXAFS (*ang. Extended X-Ray Absorption Fine Structure*), RIXS (*ang. Resonant Inelastic X-ray Scattering*) i czynnie uczestniczyłam w licznych pomiarach synchrotronowych (w ramach projektów “Ge atoms buried in silicon matrix”, “XAFS studies of the local structure of Mn doped dilute magnetic semiconductors”, “Ge atom surrounding in Ge/Si heterostructures”, “Study of strains of Ge atoms bonds in Ge(n)/Si(m) superlattice by XAFS exploring polarization effects of SR”, oraz “New materials for spintronic”) w europejskich ośrodkach badawczych: HASYLAB w Hamburgu oraz LURE w Orsay.

Uzyskane w omawianym okresie (2000-2005) wyniki badań były przedmiotem prac naukowych, które zostały opublikowane w ilości 14 pozycji (w tym 3 pozycje, jako pierwszy autor) w recenzowanych czasopismach z listy filadelfijskiej oraz w raportach rocznych (w ilości 3 pozycji) na synchrotronie DESY. Wyniki były również prezentowane na konferencjach o zasięgu międzynarodowym, seminariach oraz posiedzeniach doktoranckich.

VI.ii. Działalność prowadzona po uzyskaniu stopnia doktora

Krótko przed uzyskaniem stopnia doktora (od 1 marca 2005 roku) zostałam zatrudniona w Instytucie Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy na stanowisku adiunkta. W związku z powyższym obszar badań naukowych z fizyki ciała stałego został zmieniony na znacząco odmienny kierunek - fizykę plazmy.

W IFPiLM celem mojej pracy naukowej po uzyskaniu stopnia doktora nauk fizycznych było aktywne uczestniczenie w eksperymentach na urządzeniu Plasma Focus 1000 kJ (PF-1000) i dwóch mniejszych urządzeniach PF (o energii 6 i 8 kJ). Głównym celem eksperymentów było zapoznanie się z fizyką procesów zachodzących w tych urządzeniach, których podstawowy projekt wywodzi się z koncepcji *Z-pinch*, jak również z zastosowaniem tego typu urządzeń w rozmaitych aplikacjach, badaniach i procesach technologicznych. Badania oddziaływania strumieni plazmy i promieniowania z plazmy z powierzchnią różnych materiałów mogą zostać wykorzystane do napyłania cienkich warstw metalu na różnych podłożach. Będąc efektywnym impulsowym źródłem strumienia jonów, urządzenie PF jest stosowane do depozycji węgla i fulerenów, osadzania ziaren tytanianu cyrkonu, powierzchniowego azotowania lub implantacji węgla. Ten zakres badań przyczynił się do zawarcia międzynarodowej współpracy z Koreańskim Instytutem Nauki i Technologii w Seulu (Korea). Na potrzeby tego zagadnienia urządzenie PF zostało zaadaptowane do wyhodowania cienkich warstw Cr na podłożach krzemowych. Materiał ten jest bardzo obiecujący dla przemysłu elektronicznego ze względu na jego potencjalne zastosowanie jako domieszki cienkich warstw SrTiO₃. Zakłada się, że wytworzony materiał powinien mieć pewne parametry, np. określoną czystość. Z tego powodu głównym problemem, który należało rozwiązać przy osadzaniu cienkich warstw za pomocą urządzenia PF (o zmagazynowanej energii 1 kJ), było wyeliminowanie zanieczyszczeń wynikających z materiału elektrod. W ramach tego zagadnienia zbadano wpływ struktury elektrody na czystość warstwy chromu dla próbek, które zostały wytworzone w tych samych warunkach osadzania. W rezultacie pozwoliło to na uzyskanie warstw chromu wolnych od zanieczyszczeń z izolatora i materiału katody.

Niezależnie brałam udział w innych licznych eksperymentach na urządzeniu PF-6 w IFPiLM, związanych z produkcją promieni rentgenowskich i neutronów dla szerokiego zakresu zastosowań. W zastosowaniach neutronowych planowano wykorzystać intensywne rozpraszanie neutronów na lekkich pierwiastkach (głównie na wodorze), do wykrywania materiałów nielegalnych, np. bojowych środków chemicznych, materiałów wybuchowych, wykorzystując urządzenie PF jako mobilne źródło neutronów. Metoda ta wykorzystuje bardzo

intensywne impulsy neutronowe o czasie trwania rzędu 10 ns, które są generowane przez urządzenia o gęstej plazmie jak DPF (*ang. Dense Plasma Focus*), wypełnione gazem roboczym w postaci czystego deuteru lub mieszanki deuteru z trytem. Mały przestrzenny rozmiar wiązki neutronów, wysoka liczba neutronów na pojedynczy impuls oraz monochromatyczność ($\Delta E/E \sim 1\%$) widma neutronowego zapewnia możliwość wykorzystania techniki czasu przelotu TOF (*ang. time-of-flight*) ze zmiennymi bazami około kilku metrów w ramach tej metody. Wykazano, że krótkie bazy TOF i stosunkowo niskie wyjścia neutronów wystarczają do rozróżnienia jąder pochodzących z różnych elementów tworzących badaną substancję i do charakteryzowania geometrii długich obiektów w niektórych przypadkach.

Będąc też efektywnym źródłem wiązek promieniowania rentgenowskiego generowanych podczas fazy kompresji w takim urządzeniu, układ ten może zostać swobodnie wykorzystany do przeprowadzenia szybkich testów defektoskopowych. Za przykład mogą posłużyć testy opon samochodowych w celów wykrywania defektów produkcyjnych w trakcie procesu produkcyjnego w celu selektywnej kontroli jakości. Uzyskane wyniki można z pewnością potraktować jako pierwszy kamień milowy na drodze do potwierdzenia, że radiografia za pomocą urządzenia PF ma szereg zalet w porównaniu z tradycyjną radiografią rentgenowską i jako taka może być z powodzeniem zastosowana, na przykład, w celu rozpoznania delikatnej struktury opony.

W latach 2005-2006 odbyłam sumarycznie trzymiesięczny staż naukowy na Wydziale Fizyki na Uniwersytecie w Ferrarze (Włochy), w ramach programów stypendialnych POL/07001 i POL/06002 agencji IAEA „Laboratory for material testing based on Plasma-Focus”. W trakcie tego stażu zostało praktycznie ukończone bardzo nowoczesne urządzenie PF oraz przeprowadzono pierwsze testy z jego wykorzystaniem. Dawało to wyjątkową okazję do doskonalenia się, podnoszenia swoich kwalifikacji oraz szybkiego startu w nowej dziedzinie fizyki, ponieważ wszystkie ważne aspekty funkcjonowania i weryfikacji urządzenia PF zostały zbadane w dość krótkim i zwartym czasie..

Ta praca była kontynuowana we współpracy z Multidyscyplinarnym Laboratorium (MLab) Międzynarodowego Centrum Fizyki Teoretycznej im. Abdus Salam w Trieście (Włochy), gdzie odbyłam liczne wizyty naukowe biorąc czynny udział w badaniach eksperymentalnych w laboratorium wyposażonym w urządzenie PF (8 kJ) oraz uczestniczyłam w działalności związanej z organizacją i przeprowadzeniem zajęć praktycznych na urządzeniu PF w MLab dla uczestników międzynarodowych warsztatów (Załącznik nr 4 III(C) 1-4).

Zasadniczo moja praca z urządzeniami typu PF dotyczy podstawowych badań w dziedzinie fizyki wyładowań wysokoprądowych; eksperymentów osadzania cienkich warstw

Cr na podłożach Si, optymalizacji warunków wzrostu warstwy Cr dla uzyskania ultra cienkich i czystych warstw chromu; opracowania implantacji Re; udziału w eksperymentach dotyczących zastosowania urządzenia PF jako impulsowego źródła promieniowania rentgenowskiego do wykonania jakościowych radiogramów badanych materiałów; optymalizacji pracy PF w celu uzyskania efektywnej wydajności rentgenowskiej; aplikacji tego układu jako efektywnego źródła neutronów; diagnostyki neutronów. Byłam zaangażowana w pomiary neutronów z reakcji termojądrowych w urządzeniu PF oraz przygotowanie diagnostyki interferometrii holograficznej do pomiarów rozkładów gęstości plazmy w obszarze kompresji i strumieniach plazmy. Brałam aktywny udział również w testach materiałowych - interakcji szybkich strumieni plazmy z powierzchnią różnych materiałów związanych z syntezą jądrową, takich jak stale o niskiej aktywacji, wolfram, kompozyty węglowe, itp. Przeprowadzana była, między innymi, ocena modyfikacji powierzchni, mikrostruktury i fazy na różnej klasy próbkach wolframu wywołanych impulsowym obciążeniem plazmowym. Te i inne prace dotyczące układów PF były prowadzone w ramach projektów w składzie programów naukowych CRP (*ang. Coordinated Research Project*) międzynarodowej agencji IAEA oraz „Transnational Access to Major European Infrastructures” realizowanych przez zespół naukowców z IFPiLM (Załącznik 4, II(H), 30-34, 16).

Niezależnie była i nadal jest kontynuowana moja współpraca z IF PAN w ramach spektroskopii rentgenowskiej stosowanej do różnorodnych badań, jak np.: (1) modyfikacji lokalnej struktury atomowej wokół atomów Mn w warstwach (Ga, Mn)As po wygrzewaniu w wysokich temperaturach; (2) badania struktury XANES zmodyfikowanych i nowo zsyntetyzowanych nanostrukturalnych tlenków manganu; (3) łączonej analizy wyników emisji rentgenowskiej i struktury XANES dla krawędzi L_3 Cd i K krawędzi O w warstwach CdO i dla warstw $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ w celu zbadania struktury elektronowej; (4) zastosowania spektroskopii rentgenowskiej do badań struktury elektronowej polikrystalicznego dwusiarczku kadmu; (5) obserwacji ograniczenia kwantowego w paśmie przewodnictwa koloidalnych kropek kwantowych PbS; (6) zastosowania XPS do wyjaśnienia zmienności znaku współczynnika Halla w cienkich warstwach niobu przykrytych krzemem; (7) badania anizotropii magnetycznej w układzie Co/MgO ze złotą międzywarstwą za pomocą metody XPS; (8) wpływu trawienia jonowego argonu na otrzymane profile głębokości XPS dla próbek Si/Nb/Si, itd. Mój udział w omawianych badaniach dotyczących w większości eksperymentów za pomocą spektroskopii rentgenowskiej związany był z dyskusją, analizą wyników eksperymentalnych i teoretycznych oraz pomocą przy pomiarach synchrotronowych podczas realizacji projektów badawczych wykorzystując spektroskopię promieniowania rentgenowskiego. W ramach tej współpracy

brałam zarówno czynny udział w licznych pomiarach eksperymentalnych na europejskich synchrotronach: MAX-lab (Szwecja), ALBA (Hiszpania), ELETTRA (Włochy), jak i w pozyskiwaniu czasu pomiarowego na synchrotronach (ALBA, wniosek pt. „Impact of growth conditions on the chemical and electronic structure of *p*-type ZnO:N thin films produced by ALD” w 2015 r., współwykonawca; ELETTRA, wniosek pt. „X-ray absorption fine structure analysis of optically active centers in Re-implanted ZnO films” w roku 2016, współwykonawca) oraz w zorganizowaniu warsztatów naukowych (Załącznik nr 4 III(C) 5).

Poza omawianą wyżej tematyką badawczą, we współpracy z IF PAN zostały rozpoczęte wstępne badania implantacji renu do podłoża krzemowego. Oczekuje się, że krzem domieszkowany renem, będącym metalem przejściowym, należy do znanej klasy materiałów zwanych rozcieńczonymi półprzewodnikami magnetycznymi. Z powodu na wpół wypełnionej powłoki *d* w związkach z innymi pierwiastkami elektrony renu powinny tworzyć stany silnie zhybrydyzowane ze stanami łączonego pierwiastka. Do tej pory, ze względu na trudności z wprowadzeniem renu do objętościowego krzemu, taki materiał nie został zbadany eksperymentalnie. W celu sprawdzenia charakterystyk takiego materiału (zwłaszcza jego właściwości magnetycznych) przeprowadziłam eksperyment z użyciem urządzenia PF do implantacji renu do podłoża krzemowego. Przeprowadzone testy pozwoliły na uzyskanie wysokiej zawartości Re w matrycy Si o stałej koncentracji na głębokości do co najmniej 7 mikronów. Jednak, ze względu na zanieczyszczenie próbek przez miedź oraz chrom, pochodzące z materiałów komory urządzenia PF, ciężko było określić źródło słabego ferromagnetyzmu wyprodukowanych próbek, mogącego pochodzić również od Cr. Dlatego wymagane są dalsze badania uzyskanych próbek za pomocą techniki EPR (*ang. Electron Paramagnetic Resonance*) pozwalającej rozstrzygnąć te wątpliwości. Nie zważając na niejednoznaczny wynik eksperymentu, przeprowadzony eksperyment wskazał na unikatowe możliwości urządzenia PF do implantacji Re, który jest materiałem bardzo nietatwym w obróbce, o tak głębokiej przenikalności i wysokiej zawartości w podłożu krzemowym na całej badanej głębokości. Dalsze badania powinny być przeprowadzone w odpowiednio zaadaptowanej do implantacji komorze urządzenia.

W latach 2010-2013 moim głównym zadaniem była koordynacja i realizacja projektu „Gas Electron Multiplier Detector for X-ray Crystal Spectrometry GXS”, poświęconemu opracowaniu, budowie i wdrożeniu detektorów GEM do diagnostyki rentgenowskiej plazmy tokamakowej na tokamaku JET (spektrometr KX1). W pierwszym okresie trwania projektu byłam jego koordynatorem w ramach zespołu IFPiLM, nie mniej jednak w ostatnim roku trwania prac aż do pomysłnej jego finalizacji byłam zastępcą kierownika projektu, kierując

również instalacją finalnego systemu detekcji na spektrometrze KX1. Następnie, w latach 2011-2014 zostałam zaangażowana w strategiczny projekt badawczy NCBR pt. „Technologie wspomagające rozwój bezpiecznej energetyki jądrowej”. Mój udział w omawianym projekcie związany był głównie z Etapem 2.3 dotyczącym zadania „Opracowanie technologii obrazowania plazmy w zakresie promieniowania rentgenowskiego na potrzeby diagnostyki monitorowania zanieczyszczeń uwalnianych ze ścian reaktora termojądrowego”. W ramach tego projektu (od roku 2013 jako kierownik Etapu) odpowiedzialna byłam za zaprojektowanie, konstrukcję oraz testy dwuwymiarowych detektorów typu GEM do zastosowań w fuzji termojądrowej.

W latach 2015-2016 byłam inicjatorką modernizacji czystego pomieszczenia tzw. *cleanroom* w IFPiLM, gdzie powstają detektory, oraz wyposażenia Laboratorium Diagnostyki Promieniowania Rentgenowskiego w najnowsze narzędzia wykorzystywane do celów badawczych (mikroskop, nowoczesne układy elektroniczne, superkomputery do obliczeń, narzędzia spektroskopowe, zasilacze wysokiego napięcia, systemy gazowe, etc.).

W latach 2013-2019 podejmowałam aktywne próby pozyskiwania finansowania zarówno w programach międzynarodowych jak i krajowych, przygotowując wnioski projektowe oraz nawiązując współpracę międzynarodową z zagranicznymi ośrodkami badawczymi wygłaszając referaty na temat prowadzonych własnych badań naukowych. W latach 2013 i 2014 w ramach tzw. Enabling Research programu EUROfusion, złożyłam wnioski, które zostały zaakceptowane do realizacji i gdzie byłam głównym współautorem oraz projekt liderem.

Odbyłam też kilka wizyt do ośrodka CERN (laboratorium detektorów gazowych) w ramach wymiany naukowej i nawiązanej współpracy „RD51 MPGD Collaboration”, w obrębie której od 2017 r. jestem kierownikiem grupy naukowców ze strony IFPiLM.

W latach 2014-2018 w ramach projektów tzw. Enabling Research programu EURATOM, konsorcjum EUROfusion, (WP14-ER-01/IPPLM-05 oraz ENR-MFE15.IPPLM-04 pt. „Development of soft X-ray GEM based detecting system for tomographic tungsten focused transport monitoring”), których byłam kierownikiem, realizowałam badania dedykowane opracowaniu i konstrukcji detektorów dla pomiarów miękkich promieni rentgenowskich na tokamaku WEST. Oba detektory na dzień dzisiejszy są sfinalizowane. Detektor o płaskiej powierzchni jest zainstalowany w porcie tokamaka WEST i gotowy do pomiarów promieniowania z plazmy. Obecnie oczekujemy od strony francuskiej na weryfikację danych z tego detektora w następnej kampanii eksperymentalnej (w połowie 2019 r.). Po pomyślnej walidacji będzie można przystąpić do instalacji drugiego detektora

układu tomograficznego o zakrzywionej powierzchni detekcji, który jest na etapie testów laboratoryjnych w IFPiLM.

W ramach pracy nad detektorami gazowymi typu GEM, oprócz zastosowania detektorów do pomiarów promieniowania rentgenowskiego, uczestniczyłam w różnych projektach wchodzących w skład 7.PR EURATOM oraz H2020 EURATOM w ramach programu ramowego Unii Europejskiej, dotyczących zaprojektowania, skonstruowania i przetestowania detektorów typu GEM jak, na przykład, do monitorowania neutronów o energii 2.5 i 14 MeV. Moją rolą w zadaniu dedykowanym, m.in., budowie prototypu detektora typu GEM, wypełnionego neonem, do detekcji neutronów o energii 14 MeV za pomocą aktywacji Ne w obszarze dryftu, było kierowanie końcowym etapem, a mianowicie przeprowadzeniem eksperymentu i analizy wyników z detektora typu GEM, który został użyty do rejestracji cząstek beta. W 2013 r. realizowałam także projekt dotyczący rozwoju detektorów rentgenowskich nowej generacji służących do pomiarów i obrazowania gorącej plazmy w obszarze miękkiego promieniowania rentgenowskiego w zakresie energii fotonów 2–10 keV.

Oprócz bardzo obszernej pracy nad detektorami gazowymi rozpoczętej w 2010 roku, związanymi z projektowaniem i budową diagnostyk rentgenowskich dla urządzeń fuzyjnych z wykorzystaniem detektorów gazowych typu GEM, której najbardziej istotne osiągnięcia są podstawą niniejszej pracy habilitacyjnej, angażowałam również się w różne przedsięwzięcia naukowe. Poczynając od roku 2013, w ramach europejskiego programu badań nad syntezą jądrową (EURATOM) prowadziłam analizę danych i brałam czynny udział w kampaniach eksperymentalnych na urządzeniach fuzyjnych (JET, ASDEX Upgrade), na których pogłębiałam swoją wiedzę i zdobywałam doświadczenia naukowe. Ciągłe podnoszę swoje kwalifikacje w obszarze fizyki plazmy i urządzeń fuzyjnych uczestnicząc w szkoleniach: „Szkolenie z zakresu podstaw techniki próżni”, 2006, Kraków; „JET Bolometer Analysis Training”, 2014, Culham, dotyczącym tomografii opartej o dane z bolometrów na tokamaku JET; „The JET Refresher Course”, 2018, Culham, dotyczącym kompetencji VSO (*ang. Viewing System Operator*). Od roku 2014 po odbyciu szkolenia w ramach kampanii eksperymentalnych przygotowuję rekonstrukcje tomograficzne na podstawie pomiarów bolometrycznych uzyskanych podczas eksperymentów oraz rozkłady mocy promieniowania w obszarze divertora i komory głównej tokamaka dla wyładowań plazmy o różnych scenariuszach. W ramach tego zagadnienia przeprowadzam analizę mocy promieniowania dla całego wyładowania, walidację wartości parametrów promieniowania plazmy oraz analizę czułości doboru parametrów rekonstrukcji na otrzymany wynik.

VI.iii. Praca dydaktyczna oraz inne osiągnięcia

Obowiązki adiunkta oraz naukowo-badawczy kierunek działalności instytutu IFPiLM nie dostarczają zbyt wielu okazji do pracy dydaktycznej ze studentami. Jednakże badania naukowe prowadzone w Instytucie budzą zainteresowanie w szerokim kręgu osób, także wśród studentów i doktorantów. Dzięki temu w latach 2014-2015 byłam opiekunem naukowym pracy inżynierskiej „Zastosowanie detektorów gazowych typu GEM do pomiarów miękkiego promieniowania rentgenowskiego emitowanego z plazmy” studenta Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej (Załącznik 4 III(I)), która dotyczyła symulacji rozkładu pola elektromagnetycznego w detektorach typu GEM dla różnych konfiguracji elektrod i przykładanych napięć i została obroniona przez dyplomanta na ocenę „bardzo dobrą” w roku 2015. Jako opiekun naukowy zapewniałam wsparcie merytoryczne dotyczące zjawisk fizyki plazmy, zjawisk związanych z detektorami GEM, realizacji symulacji oraz interpretacji uzyskanych wyników numerycznych.

Od początku roku 2017 jestem też opiekunem naukowym inżynierskiej pracy dyplomowej studenta Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej (Załącznik 4 III(I)) pt. „Impact of GEM foil on plasma to electric current conversion process simulation”, która dotyczy symulacji sygnałów detektora typu GEM w niejednorodnym polu magnetycznym i której wyniki mogą przyczynić się do optymalizacji otrzymywanych informacji. Współpraca ze studentem trwała do końca roku 2018, jednak z ważnych powodów osobistych studenta praca nie została jeszcze sfinalizowana pomimo liczego wsparcia i gruntownej pomocy merytorycznej przy przygotowaniu i gromadzeniu wyników niezbędnych do napisania pracy inżynierskiej.

Od początku tego roku (opieka naukowa sprawowana od 2016 r.) jestem promotorem pomocniczym doktoranta Instytutu Systemów Elektronicznych Wydziału Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej (Załącznik 4 III(J)). Rozwiązanie, które będzie zaprezentowane w rozprawie doktorskiej, dotyczy przetwarzania danych w ramach rozwijanego wspólnie przez IFPiLM oraz PW systemu służącego do monitorowania zanieczyszczeń plazmy w eksperymencie WEST w Cadarache (Francja). Jako promotor pomocniczy zapewniaam wsparcie merytoryczne dotyczące zjawisk fizyki plazmy, zjawisk związanych z detektorami (szczególnie GEM), interpretacji oraz uzyskania wyników o wysokiej jakości, wdrożenia realizowanej pracy, poprawnego zaplanowania i wykonania pomiarów.

Moje ekspertyzy w obszarze detektorów gazowych uzupełniły również dwie prace doktorskie magistrów z Instytutu Systemów Elektronicznych Wydziału Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej, które zostały pomyślnie obronione w roku 2018.

Od lipca 2014 r. pełnię funkcję Kierownika Laboratorium Diagnostyki Promieniowania Rentgenowskiego w IFPiLM oraz Zespołu, który wcześniej, od stycznia 2013 r., zaczęłam prowadzić w pracach nad detektorami typu GEM, co też wiąże się z pewną pracą dydaktyczną wśród moich pracowników. Dodatkowo w roku 2017 przejęłam rolę kierownika grupy ze strony IFPiLM w ramach współpracy „RD51 MPGD Collaboration” w ośrodku naukowym CERN.

Mój wkład w badania, uzyskane wyniki oraz ich analiza we współpracy z krajowymi i zagranicznymi ośrodkami zaowocowała dość sporym dorobkiem publikacji, wystąpień konferencyjnych prezentowanych osobiście przeze mnie bądź moich współpracowników. Wyniki badań, w realizacji których brałam czynny udział, były przedstawiane przeze mnie w postaci 10 referatów wygłoszonych oraz 17 referatów w formie plakatu na międzynarodowych konferencjach oraz sympozjach naukowych poświęconych fizyce plazmy lub wyłącznie detektorom gazowym MPGD (Załącznik nr 4 II(J), III(B)). W tym także jeden zaproszony referat, który wygłosiłam na konferencji PLASMA 2015: International Conference on Research and Applications of Plasmas, Warszawa, 2015 r.

Moje osiągnięcia naukowe zostały dwukrotnie docenione przez dyrektora IFPiLM poprzez nagrody indywidualne zdobyte w latach 2013 i 2018 w postaci dyplomu za zdobycie nagrody II stopnia w konkursie na wyróżniające się osiągnięcia naukowe w roku 2013 (tytuł wyróżnionej pracy: „Znaczący udział w uruchomieniu diagnostyki KX1 na JET i dostarczenie istotnych dla rozwoju fuzji jądrowej danych, na podstawie których możliwe jest określenie koncentracji wolframu i niklu w plazmie”) oraz nagrody w ramach zarządzenia Dyrektora IFPiLM nr 25/2018 z dnia 16 listopada 2018 za wzorowe wypełnianie swoich obowiązków, przejawianie inicjatywy w pracy i podnoszenie jej wydajności, a w szczególności za zaangażowanie w starania o nowe projekty oraz efektywne zarządzanie kierowanym Laboratorium.

Jestem współautorką patentu No 229625 na wynalazek pod tytułem „Sposób i układ do separacji nakładających się impulsów” trwający od dnia 07-06-2016.

Byłam powoływana jako recenzent przez następujące czasopisma: Czechoslovak Journal of Physics (2), Review Scientific Instruments (2), Fusion Engineering and Design (2) oraz do oceny pracy dyplomowej magisterskiej studenta Instytutu Systemów Elektronicznych

(Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej) pt. „Szybki tor akwizycji ładunku z wykorzystaniem układu FPGA” (Załącznik nr 4 III(H)).

Bibliografia

1. J. Ongena, G. Van Oost, „Energy for future centuries: will fusion be an inexhaustible, safe, and clean energy source?”, *Fusion Science and Technology*, 45(2T) (2004) 3-14.
2. F.H. Séguin et al., „Radiation-hardened x-ray imaging for burning-plasma tokamaks”, *Review of Scientific Instruments* 68 (1997) 753.
3. F. Sauli, „The gas electron multiplier (GEM): Operating principles and applications”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* 805 (2016) 2-24.
4. A.F. Buzulutskov, „Radiation Detectors Based on Gas Electron Multipliers (Review)”, *Instruments and Experimental Techniques* 50(3) (2007) 287–310.
5. K.W. Hill et al., „A spatially resolving x-ray crystal spectrometer for measurement of ion-temperature and rotation-velocity profiles on the Alcator C-Mod tokamak”, *Review Scientific Instruments* 79 (2008) 10E320.
6. K.-D. Zastrow et al., „Deduction of central plasma parameters from line-of-sight averaged spectroscopic observations”, *Journal of Applied Physics* 70 (1991) 6732.
7. I. Zemtsov et al., „Modelling of tungsten behavior in plasma of t-10 tokamak”, *Physics of Atomic Nuclei* 81(7) (2018) 1042-1047.
8. T. Pütterich et al., „Modelling of measured tungsten spectra from ASDEX Upgrade and predictions for ITER”, *Plasma Physics and Controlled Fusion* 50 (2008) 085016.
9. J. Rzadkiewicz et al., „Design of T-GEM detectors for X-ray diagnostics on JET”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 720 (2013) 36.
10. K. Jakubowska et al., „Development of a 1D Triple GEM X-ray detector for a high-resolution X-ray diagnostics at JET”, *Proceedings of the 38th EPS Conference on Plasma Physics 2011* (EPS 2011) 716.
11. R. Bartiromo et al., „JET high resolution bent crystal spectrometer,” *Review of Scientific Instruments* 60 (1989) 237.
12. S. Bachmann. et al., „Charge amplification and transfer processes in the gas electron multiplier”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* 438 (1999) 376.
13. A.E. Shumack et al., „X-Ray Crystal Spectrometer Upgrade for ITER-like wall experiments at JET”, *Review of Scientific Instruments* 85 (2014) 11E425.
14. T. Nakano et al., „Determination of tungsten and molybdenum concentrations from an X-ray range spectrum in JET with the ITER-like wall configuration”, *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics* 48 (2015) 144023.

15. K.T. Pozniak et al., „FPGA based charge fast histogramming for GEM detector”, *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments, Proc. SPIE* 8903 (2013) 89032F.
16. J. Bucalossi et al., „The WEST project: Testing ITER divertor high heat flux component technology in a steady state tokamak environment”, *Fusion Engineering and Design* 89(7-8) (2014) 907-912.
17. M. Sertoli et al., „Modification of impurity transport in the presence of saturated (m,n) = (1,1) MHD activity at ASDEX Upgrade”, *Plasma Physics and Controlled Fusion* 57(7) (2015) 075004.
18. D. Mazon et al., „Design of soft-X-ray tomographic system in WEST using GEM detectors”, *Fusion Engineering and Design* 96-97 (2015) 856-860.
19. P. Zienkiewicz et al., „Data management software concept for WEST plasma measurement system”, *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics, Proc. of SPIE* 9290 (2014) 92902B-1.
20. A. Wojenski et al., „Diagnostic-Management System and Test Pulse Acquisition for WEST Plasma Measurement System”, *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics, Proc. of SPIE* 9290 (2014) 929029-1.
21. M. Chernyshova et al., „GEM detector development for tokamak plasma radiation diagnostics: SXR poloidal tomography”, *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics, Proc. of SPIE* 9662 (2015) 966231-1.
22. F. Sauli, „Development and applications of gas electron multiplier detectors”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 505 (2003) 195-198.
23. M. Ball et al., „Ion backflow studies for the ALICE TPC upgrade with GEMs”, *Journal of Instrumentation* 9 (2014) C04025.
24. S. Agostinelli et al., „Geant4—a simulation toolkit”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 506 (2003) 250.
25. I.B. Smirnov, „Modeling of ionization produced by fast charged particles in gases”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 554 (2005) 474.
26. D. Mazon et al., „SXR measurement and W transport survey using GEM tomographic system on WEST”, *Journal of Instrumentation* 12 (2017) C11034.
27. A. Jardin et al., „Tomographic capabilities of the new GEM based SXR diagnostic of WEST”, *Journal of Instrumentation* 11 (2016) C07006.
28. A. Wojenski et al., „Concept and current status of data acquisition technique for GEM Detector-based SXR diagnostics”, *Fusion Science and Technology* 69 (2016) 595-604.
29. A. Wojenski et al., „Multichannel reconfigurable measurement system for hot plasma diagnostics based on GEM-2D detector”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 364 (2015) 49-53.

30. A. Wojenski et al., „FPGA-based GEM detector signal acquisition for SXR spectroscopy system”, *Journal of Instrumentation* 11 (2016) C11035.
31. D. Mazon et al., „GEM detectors for WEST and potential application for heavy impurity transport studies”, *Journal of Instrumentation* 11 (2016) C08006.
32. S. Bachmann et al., „High rate X-ray imaging using multi-GEM detectors with a novel readout design”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 478 (2002) 104.
33. A. Zielinska et al., „X-ray fluorescence imaging system for fast mapping of pigment distributions in cultural heritage paintings”, *Journal of Instrumentation* 8 (2013) P10011.
34. J.F.C.A.Veloso et al., „Energy resolved X-ray fluorescence imaging based on a micropattern gas detector”, *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* 65(3) (2010) 241-247.
35. S. Blatt et al., „Charge transfer of GEM structures in high magnetic fields”, *Nuclear Physics B Proceedings Supplement* 150 (2006) 155-158.
36. A. Bressan et al., „Beam tests of the gas electron multiplier”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* 425(1-2) (1999) 262-276.
37. B. Mindur et al., „Performance of a GEM detector with copper-less foils”, *Journal of Instrumentation* 12 (2017) P09020.



Podpis wnioskodawcy