

DETEKTORY GAZOWE – DRUGIE ŻYCIE W BADANIACH TERMOJĄDROWYCH

Gas detectors – second life in thermonuclear research

Maryna Chernyshova, Ewa Kowalska-Strzęciwiłk

Streszczenie: Poszukiwanie najnowszych technologii w dziedzinie diagnostyki plazmy jest napędzane rosnącymi wymogami dotyczącymi stabilności materiałów, pod wpływem różnego rodzaju promieniowania, stosowanych w budowie i eksploatacji urządzeń termojądrowych. W miarę postępu tych urządzeń, badanie procesów zachodzących podczas oddziaływania promieniowania z materią staje się coraz bardziej istotne. W tym kontekście poszukiwanie innowacyjnych technologii, zwłaszcza w detekcji obrazowej promieni X, staje się niezbędne dla nowej generacji reaktorów, takich jak ITER, oraz przyszłej elektrowni termojądrowej DEMO.

Współcześnie powszechnie używane detektory promieniowania rentgenowskiego stosowane w takich warunkach stoją przed znaczącym wyzwaniem – szybką degradacją pod wpływem intensywnych strumieni neutronów charakterystycznych dla urządzeń termojądrowych. Kwestia ta wytycza potrzebę opracowania nowej technologii detekcji promieniowania rentgenowskiego dostosowanej do unikalnych wymagań obecnych oraz przyszłych urządzeń termojądrowych, z naciskiem na ich odporność i trwałość.

Mimo iż tradycyjnie detektory półprzewodnikowe są wciąż wykorzystywane do rejestracji miękkich promieni rentgenowskich (z ang. SXR – Soft X-Ray), to istnieje rosnące zainteresowanie badaniem detektorów gazowych w układach plazmowych, jako bardziej obiecujących kandydatów ze względu na ich inherentną odporność na promieniowanie neutronowe. Wśród nowej klasy detektorów gazowych szczególnym wyróżnieniem cieszy się detektor typu GEM (z ang. GEM – Gas Electron Multiplier). Detektor tej klasy wykazuje wysoki współczynnik wzmocnienia dla pierwotnego ładunku pochodzącego z absorpcji fotonów, co między innymi czyni go właściwym wyborem do zastosowań w przyszłych reaktorach termojądrowych.

Abstract: The search for the latest technologies in the field of plasma diagnostics is driven by increasing requirements for material stability under the influence of various types of radiation used in the construction and operation of thermonuclear devices. As these devices advance, studying the processes that occur during radiation-matter interactions becomes increasingly important. In this context, the search for innovative technologies, especially in X-ray imaging detection, becomes essential for future reactors such as ITER and the future thermonuclear power plant DEMO.

Currently widely used X-ray radiation detectors used in such conditions face a significant challenge - rapid degradation under the influence of intense neutron flux characteristic of thermonuclear devices. This problem necessitates the development of new X-ray detection technology tailored to the unique requirements of current and future thermonuclear devices, with a focus on their resistance and durability.

Although semiconductor detectors are traditionally used for soft X-ray (SXR) detection, there is growing interest in studying gas detectors for plasma devices as more promising candidates due to their inherent resistance to neutron radiation. Among the new class of gas detectors, the Gas Electron Multiplier (GEM) type detector is particularly notable. This type of detector exhibits a high gain coefficient for the primary charge resulting from photon absorption, making it, among other things, a noteworthy choice for applications in future thermonuclear reactors.

Słowa kluczowe: Instrumenty i metody jądrowe do diagnozowania gorącej plazmy; Detektory rentgenowskie; Powielacze elektronowe (gazowe); Detektory gazowe typu MPGD (MSGC, GEM, THGEM, RETHGEM, MHSP, MICROPIC, MICROMEAS, InGrid, itp.)

Keywords: Nuclear instruments and methods for hot plasma diagnostics; X-ray detectors; Electron multipliers (gas); Micropattern gaseous detectors (MSGC, GEM, THGEM, RETHGEM, MHSP, MICROPIC, MICROMEAS, InGrid, etc.)

Wstęp

Obecne metody wytwarzania energii nie są w stanie zaspokoić długoterminowych globalnych potrzeb, a zanieczyszczenie środowiska spowodowane spalaniem paliw kopalnych i odpadów nuklearnych komplikuje i tak już trudną globalną sytuację środowiskową. Dlatego jednym z najważniejszych zadań dzisiejszej cywilizacji są badania ukierunkowane na rozwój nowych „czystych” źródeł energii. Jedną z takich alternatywnych metod produkcji energii na Ziemi jest fuzja

termojądrowa, czyli proces, w którym dwa lekkie jądra atomowe w określonych warunkach łączą się, tworząc cięższe jądro i uwalniając przy tym znaczną ilość energii. Fuzja ta jest uważana za potencjalnie czyste i praktycznie nieograniczone źródło energii, ponieważ nie wytwarza gazów cieplarnianych i opiera się na paliwach występujących w środowisku naturalnym.

Proces fuzji polega na pokonaniu odpychania elektrostatycznego między dodatnio naładowanymi jądrami atomowymi, zazwyczaj izotopami wodoru, by zbliżyć je na tyle, aby siła jądrowa związała je w jedno,

cięższe jądro. Jest to ten sam proces, który napędza Słońce i inne gwiazdy. W gwiazdach, w tym w naszym Słońcu, wysoka temperatura i ciśnienie w ich rdzeniach stwarzają warunki sprzyjające fuzji jądrowej.

Dla takiej właśnie syntezy opracowywany jest obecnie reaktor termojądrowy, w którym oczekuje się, że energia termojądrowa na skalę przemysłową będzie uzyskiwana w wyniku kontrolowanej fuzji. Najczęściej badanym paliwem dla badań nad fuzją na Ziemi jest mieszanka izotopów wodoru: deuteru i trytu. W kontrolowanym środowisku na Ziemi naukowcy dążą do odtworzenia warunków, aby osiągnąć trwałą i kontrolowaną fuzję jądrową. Jedno z podejść polega na tworzeniu plazmy – gorącego, naładowanego elektrycznie gazu – utrzymywanej i kontrolowanej za pomocą pól magnetycznych. Najczęściej badanym do tej pory urządzeniem jest tokamak, w którym wykorzystuje się komorę w kształcie torusa, aby utrzymać w jej wnętrzu stabilną gorącą plazmę.

Jednak osiągnięcie kontrolowanej fuzji termojądrowej na Ziemi stwarza znaczne wyzwania naukowe oraz inżynierskie, co nie zostało jeszcze pozyskane na trwałą i ekonomicznie opłacalną skalę. Projekty takie jak ITER, międzynarodowy eksperymentalny reaktor termojądrowy budowany w Saint-Paul-lès-Durance we Francji, który jest wynikiem współpracy pomiędzy siedmioma partnerami: Unią Europejską, Chinami, Indiami, Japonią, Koreą Południową, Rosją oraz, w mniejszym stopniu, Stanami Zjednoczonymi, mają na celu potwierdzenie możliwości uzyskania kontrolowanej fuzji termojądrowej jako źródła energii, komercyjnie opłacalnego, na dużą skalę. Projekt ten obejmuje budowę tokamaka, urządzenia wykorzystującego silne pola magnetyczne do utrzymania i kontrolowania plazmy.

Budowa, uruchomienie oraz praca reaktora ITER mają utorować drogę do rozwoju komercyjnych elektrowni termojądrowych, oferując czyste i niemal nieograniczone źródło energii przy minimalnym wpływie na środowisko. Projekt ITER stanowi znaczący krok naprzód w poszukiwaniu praktycznej i zrównoważonej energii termojądrowej.

Warto jednak wspomnieć, że pomimo długotrwałych i kosztownych badań, opracowanie wydajnego reaktora termojądrowego okazało się znacznie bardziej złożonym zadaniem niż opracowanie reaktora rozszczepienia jądrowego. Główne wysiłki naukowców są obecnie skierowane na badanie interakcji plazmy ze ścianą komory, opracowywanie materiałów o niskiej aktywności indukcyjnej do wykorzystania jako elementy konstrukcyjne oraz opracowywanie technologii, które sprawią, że reaktor będzie ekonomicznie opłacalny. Jednym z zadań związanych z badaniem interakcji plazma-ściana jest monitorowanie oraz analiza powstawania i zachowania zanieczyszczeń plazmy.

Rozwiązanie większości problemów związanych z zanieczyszczeniami zależy w dużej mierze od zna-

jomości dynamiki emisji zanieczyszczeń w czasie i przestrzeni. Prowadzi to do zrozumienia wpływu zanieczyszczeń na scenariusze utrzymania plazmy oraz umożliwia lepszą ocenę stanu plazmy, jak również optymalizację parametrów wyładowań w przyszłych reaktorach termojądrowych. Podstawowe informacje o zanieczyszczeniach uzyskuje się, badając liniową emisję zanieczyszczeń.

Wykorzystywana w tym celu spektroskopia rentgenowska jest znanym, skutecznym i potężnym narzędziem w diagnostyce plazmy. Metoda ta odgrywa kluczową rolę w badaniu i zrozumieniu zachowania plazmy w tokamakach, obecnie najbardziej stosowanych urządzeniach przeznaczonych do badań kontrolowanej fuzji termojądrowej. Spektroskopia rentgenowska dostarcza cennych informacji na temat temperatury, gęstości i zawartości zanieczyszczeń plazmy, pomagając naukowcom optymalizować warunki fuzji oraz oceniać ogólną wydajność urządzenia fuzyjnego.

Można wypunktować podstawowe aspekty spektroskopii rentgenowskiej w kontekście plazmy utrzymywanej w polu magnetycznym:

- Spektroskopia rentgenowska służy do analizy emisji promieniowania generowanego przez plazmę, które to zawiera informacje na temat właściwości plazmy, w tym jej temperatury i składu. Warto podkreślić, że wysokorozdzielcza spektroskopia umożliwia analizę charakterystycznych linii emisyjnych, które są emitowane przez zjonizowane atomy plazmy. Ponieważ promieniowanie charakterystyczne jest bezpośrednio powiązane z energią przejścia wewnątrzatomowego i jest charakterystyczne dla danego pierwiastka, pozwala to na określenie składu chemicznego i stanu jonizacji plazmy. Na podstawie obserwacji intensywności linii rentgenowskich można też wnioskować o strukturze elektronowej atomu i ewentualnych zmianach spowodowanych oddziaływaniem z polem magnetycznym;
- W ten sposób pomiar emitowanego widma w obszarze rentgenowskim pomaga identyfikować oraz ilościowo oceniać zanieczyszczenia obecne w plazmie. Zanieczyszczenia, takie jak pierwiastki inne niż paliwo podstawowe, mogą wpływać na wydajność plazmy i efektywność reakcji syntezy. Monitorowanie i zrozumienie zachowania zanieczyszczeń plazmy jest istotne dla optymalizacji procesu fuzji;
- Widmo promieniowania emitowane przez plazmę jest zależne od temperatury plazmy. Analizując spektra emitowanego promieniowania rentgenowskiego, można określić temperaturę plazmy. Z kolei, informacje o temperaturze są niezbędne do zrozumienia warunków wymaganych do podtrzymywania reakcji syntezy;
- Spektroskopia rentgenowska może również być stosowana do szacowania gęstości plazmy. Zmiany intensywności określonych linii rentgenowskich do-

starczą informacji o zmienności gęstości plazmy, co pomaga monitorować i kontrolować zachowanie plazmy;

- Pomiar promieniowania X (w podstawowym zakresie 0,1-20 keV) jest standardowym sposobem uzyskiwania cennych informacji na temat interakcji transportu cząstek i zjawisk MHD (z ang. MHD – MagnetoHydroDynamics).

Stosowanie spektroskopii rentgenowskiej na urządzeniach plazmowych wymaga zwykle użycia wyspecjalizowanych detektorów i spektrometrów do rejestracji i analizy promieniowania plazmy. Instrumenty te są projektowane do pracy w trudnych warunkach tokamakowych, w szczególności w obecności intensywnych strumieni promieniowania jonizującego (w tym neutronów), wysokich temperatur i pól magnetycznych.

Nowa technologia detekcji promieniowania rentgenowskiego jest obecnie bardzo wymagana dla takich tokamaków jak ITER. Powodem jest to, że półprzewodnikowe detektory promieniowania rentgenowskiego stosowane w istniejących urządzeniach mogą szybko ulec degradacji na skutek wysokich strumieni neutronów charakterystycznych dla środowiska tokamaka, co zaobserwowano podczas testów fuzji jądrowej na urządzeniu TFTR w USA w trakcie kampanii eksperymentalnej na mieszaninie deuteru i trytu¹.

Detektory gazowe typu GEM

Nieustanne pojawianie się nowych wymagań dotyczących detekcji miękkiego i twardego promieniowania rentgenowskiego stymuluje intensywną pracę nad nowymi typami detektorów, które spełniałyby warunki wymagane w badaniach fizycznych oraz metodach pomiarowych stosowanych w różnych dziedzinach nauki. Pomimo stosunkowo powszechnego użycia detektorów półprzewodnikowych do rejestrowania promieniowania SXR (ogólnie promieniowania jonizującego), detektory gazowe są obiecującymi kandydatami, które znacznie lepiej nadają się do stosowania w przyszłych reaktorach termojądrowych ze względu na ich lepszą odporność na promieniowanie neutronowe.

Nie tak dawno w ośrodku naukowo-badawczym CERN (z fr. CERN – Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) zaproponowano i opracowano kilka nowych detektorów gazowych, powszechnie określanych jako detektory typu MPGD (z ang. MPGD – MicroPattern Gas Detector). Wiele typów detektorów gazowych MPGD zostało użytych jako detektory monitorowania promieniowania w eksperymentach z zakresu fizyki cząstek elementarnych oraz jako detektory obrazujące promieniowanie, szczególnie w przypadku miękkiego promieniowania rentgenowskiego. Zalety tych detektorów

takie jak zdolność do wysokiej częstotliwości zliczeń, dobra rozdzielczość przestrzenna i energetyczna, niski koszt oraz możliwość konstrukcji detektorów o dużej powierzchni, jak również o bardzo małym obszarze martwym, sprawiły, że cieszą się one dużym zainteresowaniem w fizyce wysokich energii.

Najbardziej obiecującym przedstawicielem tej klasy okazał się detektor typu GEM (z ang. GEM – Gas Electron Multiplier)^{2,3}, który charakteryzuje się wysokim współczynnikiem wzmocnienia ładunku pierwotnego pochodzącego z absorpcji promieniowania. Zakres zastosowań detektorów GEM staje się coraz bardziej rozległy w ostatnich latach i obejmuje już nie tylko obszar fizyki cząstek elementarnych o wysokiej energii, ale także medycynę, biologię i sztukę, taką jak malarstwo⁴. Dzięki zastosowaniu detektorów GEM można mierzyć zarówno intensywny strumień gamma w radioterapii, jak i słaby strumień promieni rentgenowskich pochodzący z odpadów radioaktywnych, a także monitorować wysokoenergetyczne wiązki dla terapii hadronowej^{5,6}. Ponadto, detektory te mogą być wykorzystane w badaniach plazmy tokamakowej poprzez pomiar miękkiego promieniowania rentgenowskiego, jak również do detekcji neutronów, co otwiera możliwość wykorzystania tej technologii, np., w źródłach neutronów opartych na spalacji.

Głównymi zaletami technologii GEM są kompaktowość detektora, dobra rozdzielczość czasowa oraz przestrzenna, zdolność do rozróżniania energii fotonów i lepsza odporność na neutrony w porównaniu z używanymi obecnie systemami. Wszystko to sprawia, że taki system detekcji jest potencjalnie lepszym kandydatem do pomiarów miękkiego/twardego promieniowania rentgenowskiego w reaktorach ITER i DEMO. W ramach prac w zakresie detekcji promieniowania z plazmy w Instytucie Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy (IFPiLM) zaproponowano nowy typ systemu detekcji oparty na technologii GEM do pomiarów promieniowania rentgenowskiego w badaniach ukierunkowanych na reaktor ITER oraz DEMO. Detektory te mają być wykorzystywane do monitorowania zanieczyszczenia plazmy w projektach badawczych i programach naukowych mających na celu wsparcie budowy

¹ F. H. Séguin i inni, "Radiation-hardened x-ray imaging for burning-plasma tokamaks", *Review of Scientific Instruments* 68, 753 (1997).

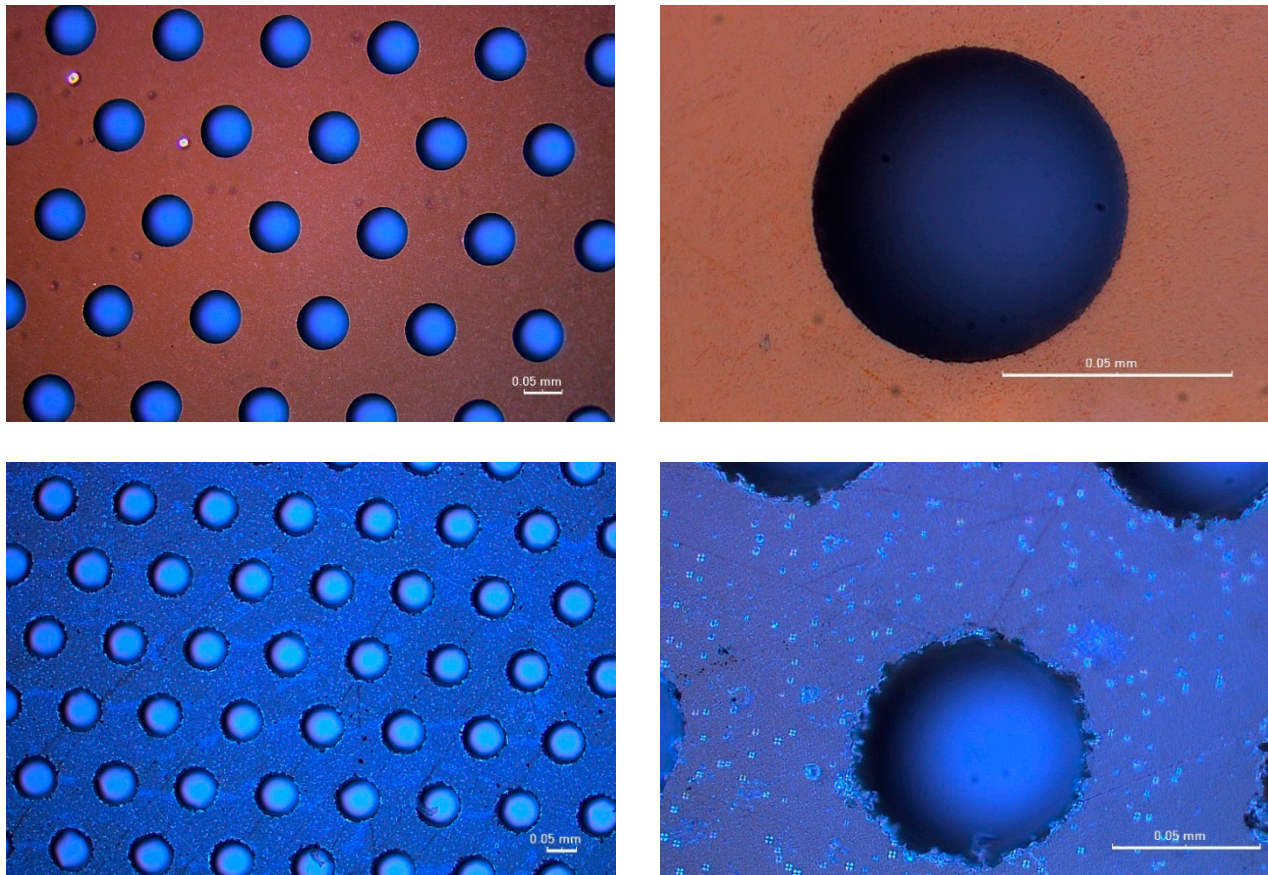
² F. Sauli, "The gas electron multiplier (GEM): Operating principles and applications", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 805, 2-24 (2016).

³ A.F. Buzulutskov, "Radiation Detectors Based on Gas Electron Multipliers (Review)", *Instruments and Experimental Techniques* 50(3), 287-310 (2007).

⁴ A. Zielińska i inni, "X-ray fluorescence imaging system for fast mapping of pigment distributions in cultural heritage paintings", *Journal of Instrumentation* 8, P10011 (2013).

⁵ F. Murtas, "Applications of triple GEM detectors beyond particle and nuclear physics". *Journal of Instrumentation* 9 C01058 (2014).

⁶ M. Bucciantonio i inni, "Development of a fast proton range radiography system for quality assurance in hadron therapy", *Vienna Conference on Instrumentation* 732, 564-567 (21 December 2013).

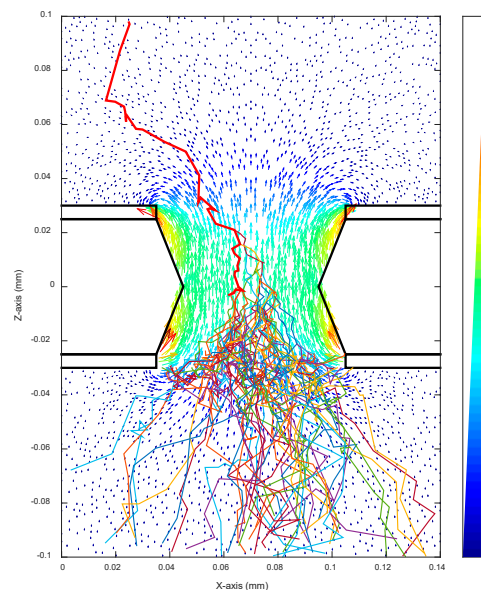


Fot. 1. Zdjęcia z mikroskopu optycznego folii GEM z okładkami z miedzi (górną) oraz z aluminium (dolną)
Photo 1. Optical microscope photographs of GEM film with copper (top) and aluminium (bottom) cladding

reaktora eksperymentalnego ITER, a co więcej ostateczne osiągnięcie wydajnej syntezy termojądrowej.

Podstawowym elementem detektora jest folia GEM, która składa się z cienkiej folii dielektrycznej (fot. 1) o grubości, ok. 50 μm , takiej jak Kapton, perforowanej tysiącami mikroskopijnych otworów o średnicy w zakresie kilkudziesięciu mikrometrów. Powszechnie używany kształt otworków to podwójny stożek (rys. 2). Z obu stron folia dielektryczna jest pokryta metalem, do którego jest przyłożona różnica potencjałów rzędu 300-500 V. W ten sposób pomiędzy okładkami metalowymi w otworkach wypełnionych gazem roboczym wytwarzane jest silne pole elektryczne.

Detektor GEM działa w ten sposób, że promieniowanie jonizujące wpadające do ośrodka gazowego ulega absorpcji powodując tym samym powstawanie w gazie dodatnio naładowanych jonów oraz swobodnych elektronów (rys. 3). Pole elektryczne kieruje elektrony w stronę otworków w folii GEM, gdzie pod wpływem silnego pola elektrycznego zachodzi wielokrotna jonizacja gazu, wywołując powstanie lawiny elektronowej w kierunku elektrody odczytu. W ten sposób w wyniku procesu elektronowej jonizacji zderzeniowej następuje silne wzmocnienie pierwotnego sygnału. Ostatecznie, współczynnik mnożenia/powielenia elektronów, suma-



Rys. 1. Wektorowy wykres pola elektrycznego w pojedynczym otworze folii GEM oraz przykładowa trajektoria elektronu pierwotnego przechodzącego przez ten otwór⁷

Fig. 1. Vector plot of electric field in the single GEM foil's hole and example trajectory of the primary electron passing through the hole⁷

⁷ K. Malinowski i inni, „Simulation of energy spectrum in GEM detector from an X-ray quantum”, Journal of Instrumentation 13, C01018 (2018).

ryczne wzmocnienie detektora, zależy wykładniczo od sumy napięć na foliach GEM.

Zastosowana koncepcja i układ elektrod daje możliwość zaprojektowania detektorów GEM o kompaktowym i modularnym designie. Cienka folia GEM pozwala na efektywne wzmocnienie gazowe rzędu 10^3 - 10^5 w relatywnie małej przestrzeni, co sprawia, że są one odpowiednie do zastosowań, w których miejsce jest ograniczone. Ta cecha zwiększa ich praktyczność i umożliwia ich integrację z różnorodnymi układami eksperymentalnymi. Osiągnięcie wysokiego wzmocnienia pozwala na wykrywanie bardzo małych sygnałów, pochodzących nawet od pojedynczych jonizujących cząstek, dzięki czemu detektory GEM charakteryzują się wysoką czułością i wydajnością w różnych zastosowaniach.

Rozdzielenie strefy wzmocnienia oraz struktury odczytu sygnału generowanego w komorze detektora oferuje doskonałą rozdzielczość przestrzenną, umożliwiającą precyzyjne zlokalizowanie obszaru absorpcji promieniowania w ośrodku gazowym wewnątrz detektora. Dodatkową zaletą takiej struktury jest to, że tylko szybka składowa elektronowa lawin w gazie dryfuje w kierunku padów elektrody odczytowej, co znacząco redukuje efekt ładunku przestrzennego powodowanego przez jony dodatnie. Mały rozstaw otworów w folii metalowej umożliwia precyzyjne zlokalizowanie punktu oddziaływania z dokładnością do około $100 \mu\text{m}$ w przypadku standardowych potrójnych detektorów GEM (z ang. Triple-GEM). Ta cecha sprawia, że detektory GEM są pożądane w aplikacjach, gdzie precyzyjna rozdzielczość przestrzenna jest istotna, na przykład przy śledzeniu naładowanych cząstek w eksperymentach z zakresu fizyki wysokich energii.

Działając w modzie licznika proporcjonalnego detektory GEM mogą zapewniać dobrą dyskryminację energii padającego promieniowania, umożliwiając rozróżnianie fotonów z różnych zakresów energetycznych na podstawie sygnałów generowanych w detektorze.

Zatem sygnały generowane na elektrodzie odczytu zawierają wszystkie informacje niezbędne do oceny energii i odtworzenia położenia zaabsorbowanych fotonów. Ze względu na dyfuzję ładunku podczas eta-

pów dryfu i wzmocnienia, końcowa chmura elektronów w obszarze indukcyjnym rozprzestrzenia się już na kilka pikseli odczytu. Taka grupa tworzy klastery dla danego pojedynczego zdarzenia absorpcji kwantu padającego promieniowania. Dlatego ważnym zagadnieniem pomiarowym jest określenie ładunku i położenia klastra (tj. energii i położenia fotonu), poprzez jego identyfikację za pomocą algorytmu przetwarzania danych.

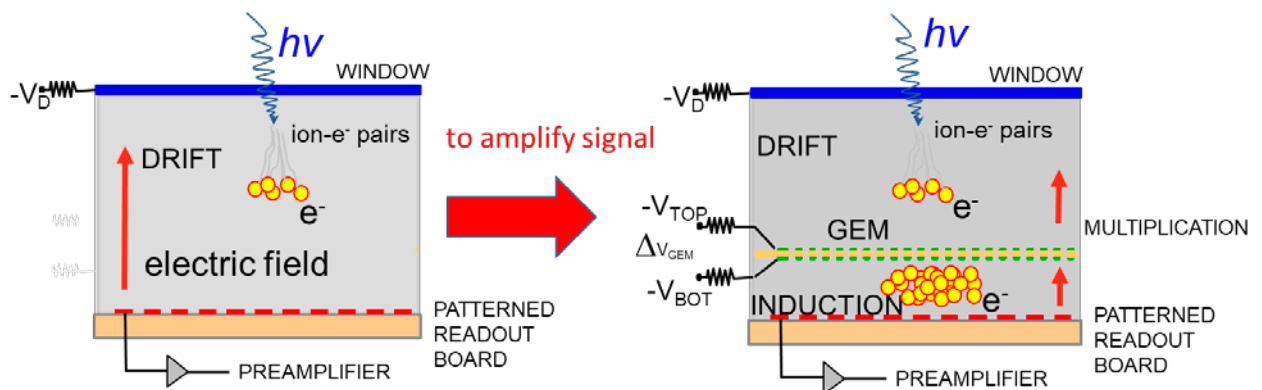
W IFPiLM w ramach badań w zakresie detekcji promieniowania rentgenowskiego detektory tego typu są rozwijane w celu zastosowania na różnych tokamakach do monitorowania oraz zobrazowania promieniowania rentgenowskiego. Między innymi zostały zaprojektowane i skonstruowane detektory do spektrometru KX1 na tokamaku JET w Wielkiej Brytanii oraz do układu tomograficznego na tokamaku WEST we Francji. W obu przypadkach przeprowadzono instalację systemów detekcyjnych oraz zarejestrowano wyniki eksperymentalne. Ponadto w toku są prace nad zaprojektowaniem układu tomograficznego składającego się z wielu detektorów dla przyszłej elektrowni termojądrowej DEMO.

Koncepcja projektowania i montażu komory detektora typu GEM

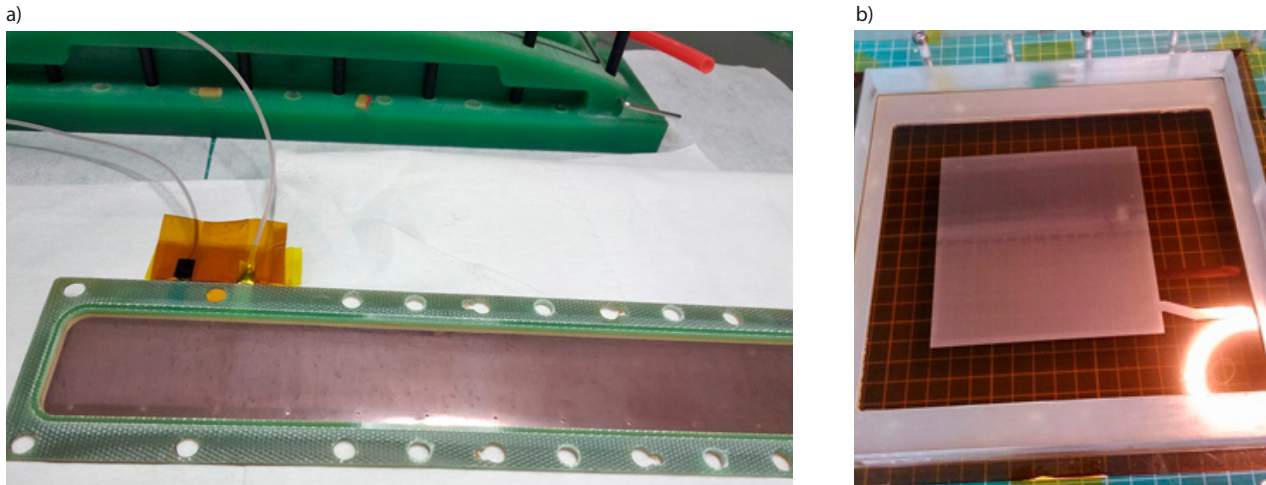
Kluczowym elementem detektora jest komora detekcyjna, która jest aktywnym obszarem i urządzeniem używanym do wykrywania oraz pomiaru różnego rodzaju cząstek/promieniowania, np., promieniowania gamma oraz rentgenowskiego. W tym przypadku najważniejszymi charakterystykami promieniowania mierzonymi w określonym przedziale czasu są pozycja, intensywność i energia. Składa się taka komora z kilku kluczowych komponentów, które powinny współpracować ze sobą w celu dokładnego wykrycia i analizy promieniowania.

Podstawowe elementy komory, poczynając od okna i kończąc na strukturze pikselowej, to:

- okno detektora, o właściwościach transmisji promieniowania odpowiednich do zakresu detekcji. W wielu zastosowaniach detektorów GEM takie



Rys. 2. Schemat komory jonizacyjnej (po lewej stronie) oraz detektora GEM (po prawej)
Fig. 2. Schematic of the ionisation chamber (left) and the GEM detector (right)



Fot. 2. (a) Folia GEM o powierzchni aktywnej 200x20 mm² naklejona na ramkę wykonaną ze szkła epoksydowego, (b) folia GEM o powierzchni aktywnej 100x100 mm² przygotowana do klejenia na ramkę, (c) prace montażowe w tzw. czystym pomieszczeniu

Photo 2. (a) GEM foil with an active area of 200x20 mm² mounted to a frame made of epoxy glass, (b) GEM foil with an active area of 100x100 mm² placed in an intermediate frame, (c) assembly work in a clean room

okno wejściowe jest metalizowane i pełni funkcję katody układu;

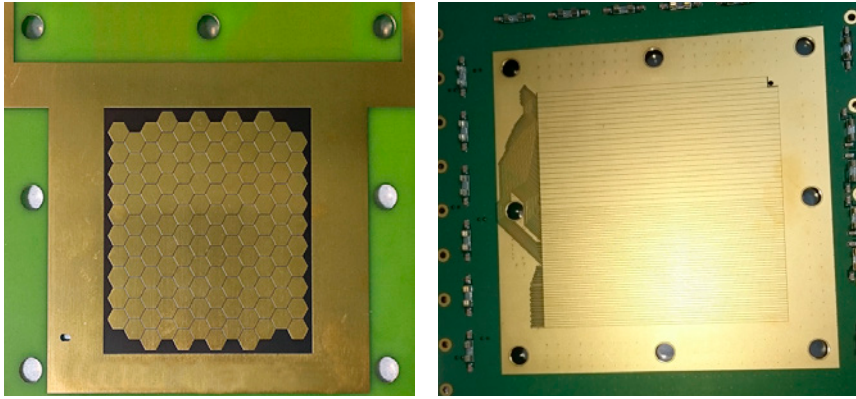
- folie GEM, które służą do wzmocnienia pierwotnego sygnału generowanego przez fotoelektron (fot. 2);
- obudowa komory gazowej, która otacza wszystkie elektrody znajdujące się w ośrodku gazowym. Przykładowo jest wypełniona gazem szlachetnym, takim jak argon lub ksenon, z domieszką czynnika gaszącego, np., CO₂ lub CF₄. Mieszanka gazowa pełni dwie funkcje – działa jako ośrodek, w którym zachodzi oddziaływanie promieniowania z gazem, oraz uczestniczy we wzmacnianiu sygnałów generowanych przez tę interakcję;

- elementy elektroniki odczytowej, które znajdują się wewnątrz komory, a mianowicie elektroda odczytu o różnych kształtach dopasowanych do potrzeb diagnostyki (fot. 3) połączona, często w dość złożony sposób, z analogowym układem elektroniki, który zbiera i wzmacnia sygnały generowane wewnątrz komory;
- zasilanie wysokonapięciowe elektrod komory, które jest niezbędne, aby stworzyć pole elektryczne wewnątrz komory gazowej. To pole elektryczne jest oczywiście kluczowe zarówno dla procesu generacji oraz wzmocnienia pierwotnego sygnału jak i dla detekcji tego sygnału na elektrodzie odczytu.

W dalszym etapie, sygnały generowane w komorze detekcyjnej zostają poddane przetwarzaniu i analizie za pomocą wyspecjalizowanego oprogramowania oraz opracowanych algorytmów. Pozwala to na określenie parametrów i identyfikację promieniowania.

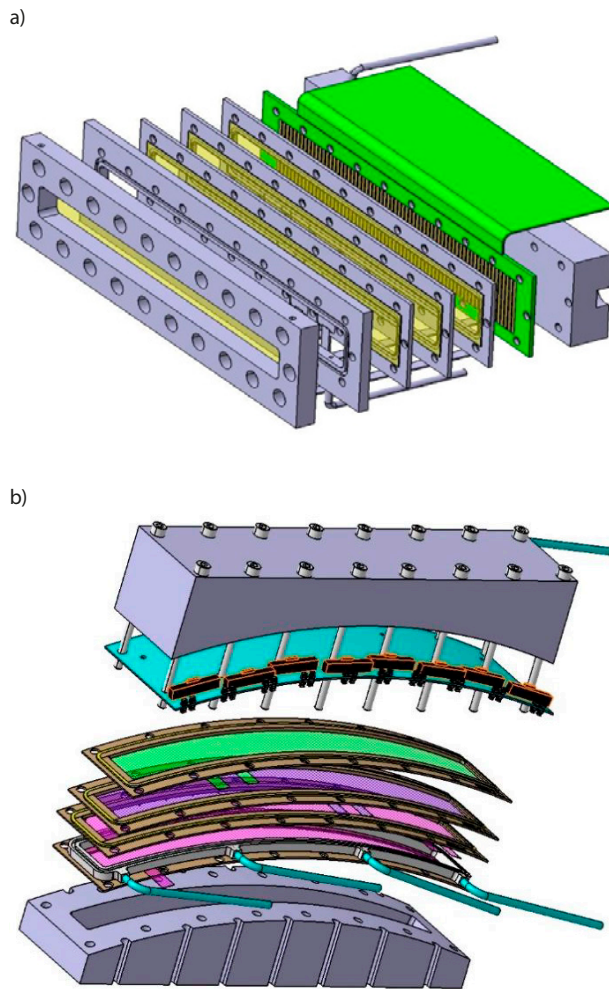
Finalny montaż komory detekcyjnej polega na starannym zintegrowaniu wszystkich ww. komponentów w szczelną i stabilną strukturę. Folie GEM, elementy układu elektroniki odczytowej i komora gazowa są montowane razem, z odpowiednimi zabezpieczeniami, aby zapobiec uszkodzeniom delikatnych elementów, takich jak okno czy folie GEM.

Pierwszym krokiem procesu technologicznego jest odpowiednie dobranie materiałów do konstrukcji komory detektora, co podyktowane jest dość specjalnymi warunkami, w jakich będą one pracować. Wysokie pole magnetyczne, wysoka temperatura czy promieniowanie neutronowe automatycznie wymusza ten etap pro-



Fot. 3. Zdjęcia płyt odczytu dla heksagonalnych (po lewej) oraz paskowych (po prawej) pikseli odczytu

Photo 3. Pictures of readout boards for hexagon (left) and strip (right) readout pixels



Rys. 3. (a) Schemat struktury detektorów dla tomografii poloidalnej promieniowania z plazmy; ramki detektora dla portu pionowego tokamaka WEST z paskową strukturą odczytu (zielona płytką); (b) schemat zaprojektowanych ramek dla detektora dla portu poziomego tokamaka WEST

Fig. 3. (a) Schematic structure of detectors for plasma radiation poloidal tomography; frames of the WEST vertical port detector with strip readout plane (green plate); (b) schematic of designed frames for the WEST horizontal port detector

cesu. Ponadto, materiały te nie mogą same zakłócać działania detektora, więc do budowy komory detekcyjnej można używać jedynie materiałów certyfikowanych, które przeszły testy odgazowania, starzenia się, odporności na promieniowanie oraz mają odpowiednie właściwości elektryczne.

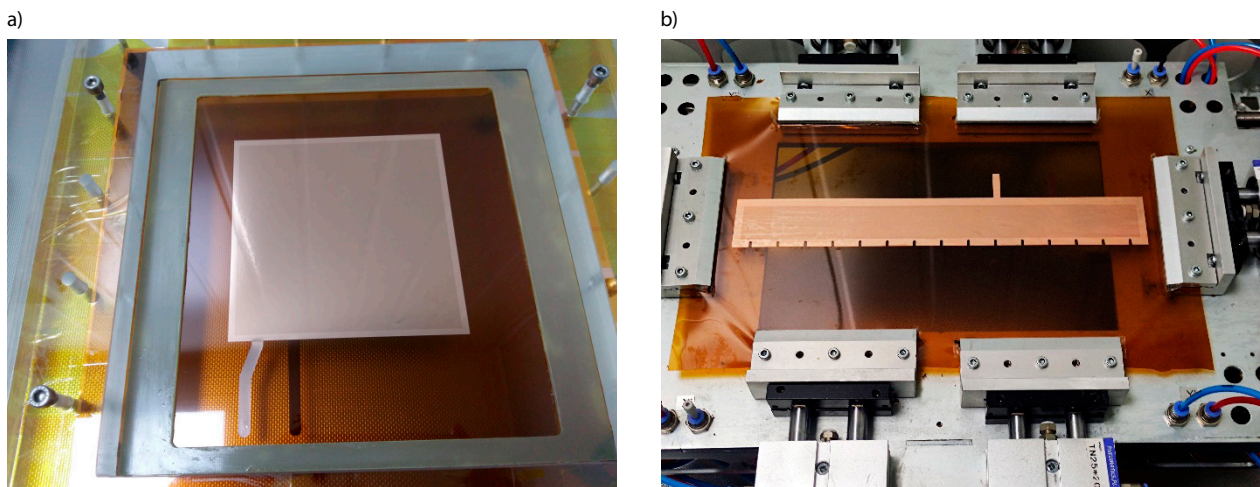
Kolejnym krokiem, przed podjęciem ostatecznej decyzji dotyczącej materiałów na komponenty komory detekcyjnej, jest przeprowadzenie testów z różnymi materiałami, takimi jak, np., „biały” lub „czarny” ertacetal, różne rodzaje włókien szklanych (np.: Isoval, Voltadur) oraz szkielepoksydowych.

Konieczne jest między innymi zaprojektowanie odpowiedniej geometrii folii GEM w celu przygotowania detektorów. Po zakończeniu tych etapów opracowywana jest ostateczna struktura komory detektora zawierająca wszystkie elementy. Na rys. 3(a)-(b), na przykładzie komory detekcyjnej dla detektorów zaprojektowanych dla tokamaka WEST, przedstawiono schemat elementów nośnych folii GEM oraz innych elementów. Geometria detektora Triple-GEM dla diagnostyki SXR ma umożliwić osiągnięcie wysokiego całkowitego wzmocnienia gazowego przy niskim prawdopodobieństwie wyładowań w detektorze.

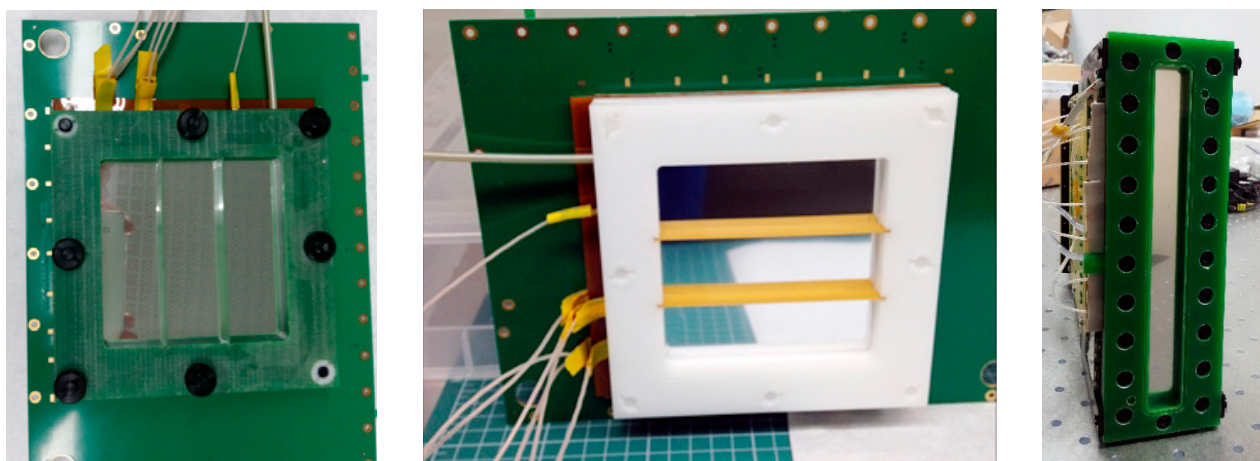
Etap projektowania oraz produkcji elementów komory detekcyjnej kończy się montażem wszystkich elementów. W celu uzyskania takiego samego pola elektrycznego w odpowiednich obszarach gazowych komory detekcyjnej opracowano dwie metody rozciągania cienkich folii, które pełnią funkcje elektrod całości struktury. Pierwsza metoda polega na mechanicznym tj. ręcznym naciągnięciu folii i następnym przyklejeniu brzegów folii do ramki, zaś druga metoda pozwala na użycie specjalnej instalacji do naciągania. Poniższe zdjęcia pokazują, jak wygląda rozciągnięta folia podczas typowego ręcznego procesu rozciągania (fot. 4 (a)) i na urządzeniu rozciągającym (fot. 4 (b)). Cały przebieg rozciągania odbywa się w temperaturze pokojowej, ale etap klejenia przeprowadzany jest już w piecu w temperaturze 40-50°C. Metoda ręczna wydaje się łatwiejsza i skuteczniejsza dla folii Al/Mylar, ale dla folii GEM metoda z użyciem urządzenia rozciągającego skutkuje bardziej płaską i jednolitą powierzchnią.

Fot. 5 przedstawia przykładowe komory detektora z Laboratorium w IFPiLM w końcowym stadium montażu.

Celem prowadzonych prac technologicznych było opracowanie nowej diagnostyki dla urządzeń plazmowych, co wymagało m.in. przygotowania technolo-



Fot. 4. (a) Proces rozciągania folii GEM na ramce pośredniej oraz (b) proces rozciągania folii GEM na urządzeniu rozciągającym
Photo 4. (a) The process of stretching the GEM foil on the intermediate frame and (b) process of stretching of GEM foil on the stretching device



Fot. 5. Zdjęcia komory detekcyjnej detektora prototypowego do zobrazowania promieniowania plazmy
Photo 5. Photos of the detection chamber of a prototype detector for plasma radiation imaging

gii montażu detektorów oraz uzyskania płaskich powierzchni dla cienkich metalizowanych warstw. Warto wspomnieć, że wszystkie części detektora są wymienne. Tak więc ewentualne uszkodzone części detektorów GEM można szybko wymienić i naprawić niskim kosztem. W ramach tych badań ostateczne materiały i procedury montażu zostały wybrane i pomyślnie opracowane, a następnie przeprowadzone testy prototypów detektora pozwoliły na kontynuowanie i finalizowanie prac nad projektami i rozwojem detektorów docelowych.

Rozwój oraz zastosowanie detektorów gazowych opartych na technologii GEM w układach z magnetycznym utrzymaniem plazmy

Wyżej opisana i rozwijana w IFPiLM technologia detektorów gazowych typu GEM została zastosowana do przygotowania diagnostyk promieniowania X na tokamakach JET oraz WEST.

Nowa technologia detekcji promieniowania została zaproponowana w ramach programu badawczego skupionego na rozwoju przyszłego reaktora ITER. Program ten koncentruje się m.in. na materiałach stosowanych w komponentach pierwszej ścianki komory próżniowej tokamaka oraz dywertora. Jednym z elementów badawczych tego programu jest obserwacja poziomu zanieczyszczenia plazmy wolframem.

W tym celu opracowano dwie niezależne ścieżki pomiarowe dla wysokorozdzielczego spektrometru KX1 na tokamaku JET opartego na dwóch cylindrycznie wygiętych kryształach. Każda ścieżka pomiarowa została zaprojektowana do monitorowania widm emisji plazmy w określonych zakresach energii fotonów, które odpowiadają określonym rzędom dyfrakcji użytych kryształów. Jest to istotne, gdyż promieniowanie rentgenowskie z plazmy tokamaka może się składać z promieniowania ciągłego (np.: bremsstrahlung) i promieniowania liniowego. W szczególności, na tokamaku JET, oprócz promieniowania ciągłego, intensywne

promieniowanie liniowe jest emitowane przez wysoko zjonizowane zanieczyszczenia wolframowe, jak również niklowe, które wydostają się z materiałów strukturalnych podczas wyładowania plazmowego. Dlatego głównym celem przygotowywanego dla spektrometru KX1 na tokamaku JET systemu detekcji był pomiar widm rentgenowskich, z wysoką rozdzielczością, charakterystycznych linii tych zanieczyszczeń i zapewnienie monitorowania tego promieniowania. Pomiar ten był ważny, ponieważ mógł dostarczyć dokładnych informacji na temat kluczowych parametrów plazmy, takich jak koncentracja zanieczyszczeń, temperatura jonów i prędkość rotacji toroidalnej^{8,9}. Co więcej, nie mniej ważne było uzyskanie rozdzielczości energetycznej techniki detekcji, która pozwoliłaby na identyfikację fotonów z różnych rzędów dyfrakcji. Zaproponowany układ detekcji miał na celu dostarczenie ważnych informacji o parametrach plazmy poprzez uzyskanie danych dotyczących widma promieniowania ciągłego. Należy zauważyć, że wcześniejszy system detekcji stosowany w spektrometrze KX1 nie pozwalał na taką sposobność.

Pierwszy kanał diagnostyczny został zaprojektowany do monitorowania promieniowania emitowanego przez jony wolframu, głównie W^{46+} o energii około 2,4 keV, obserwowanego w pierwszym rzędzie dyfrakcyjnym. Ten kanał pomiarowy umożliwia jednoczesną rejestrację promieniowania ciągłego emitowanego w wąskich zakresach energii określonych przez geometrię spektrometru i odpowiadających trzem pierwszym rzędom dyfrakcyjnym. Drugi kanał detekcji został zaprojektowany do monitorowania promieniowania emitowanego przez jony niklu Ni^{26+} o energii około 7,8 keV, obserwowanego w drugim rzędzie dyfrakcyjnym odpowiedniego kryształu. Ten kanał detekcji umożliwia również rejestrację promieniowania ciągłego o energiach fotonów odpowiednich dla pierwszego, drugiego i trzeciego rzędu dyfrakcji i intensywności określonej przez temperaturę elektronową plazmy.

Moduły detekcyjne oparte na technologii detektora Triple-GEM zostały zaprojektowane i zbudowane w celu spełnienia wymagań monitorowania miękkiego promieniowania X na tokamaku JET¹⁰. Podczas projektowania uwzględniono następujące wymagania: duży obszar detekcji (odpowiedni dla dużych objętości plazmy i geometrii spektrometru), wysoki współczynnik konwersji fotonów SXR w obszarze dryfu/konwersji detektora, dobry stosunek sygnału do szumu zapewniony przez wysokie wzmocnienie ładunku detektora i zadowalającą rozdzielczość energetyczną (20-30%). Monito-

rowanie promieniowania rentgenowskiego wymagało również dobrej rozdzielczości przestrzennej (dobrej do charakterystyk spektrometru), rozdzielczości czasowej odpowiadającej dynamice plazmy oraz wysokiej powtarzalności i stabilności pomiaru przy wysokich natężeniach promieniowania.

Po testach laboratoryjnych i wstępnych wynikach tokamakowych oraz po optymalizacji ostatecznej konstrukcji mechanicznej detektorów zostały one zainstalowane na spektrometrze KX1 na tokamaku JET (fot. 6). Celem pomiaru sygnałów uzyskanych z detektorów było uzyskanie rozkładu energii i położenia fotonów dla czasu ekspozycji 10 ms. Opracowane detektory GEM są czynnie wykorzystywane do akwizycji danych i pomiarów promieniowania zanieczyszczenia plazmy oraz określania parametrów plazmy na tokamaku JET.

Rys. 4 ilustruje działanie systemu monitorowania wolframu podczas wyładowania plazmowego w to-



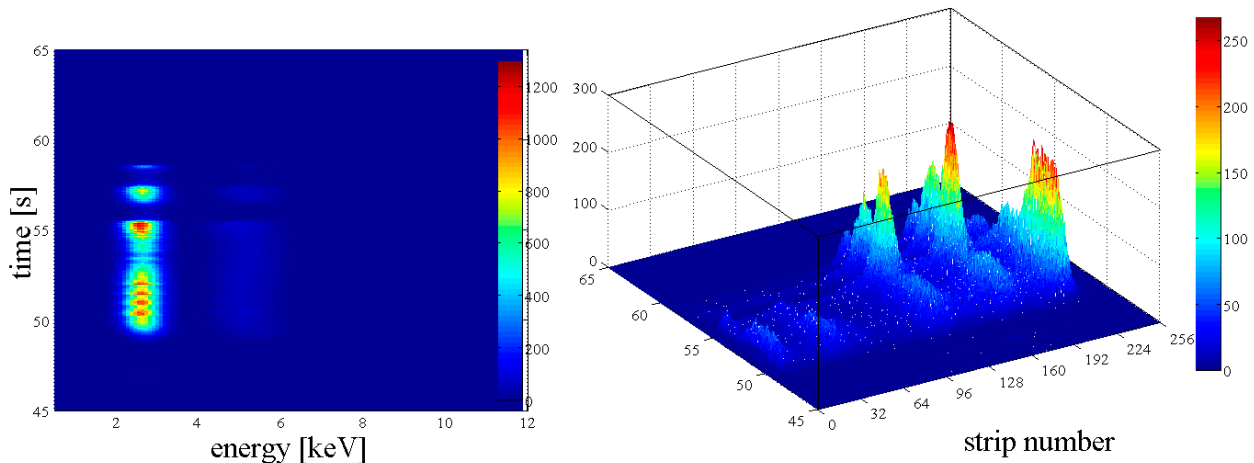
Fot. 6. Zdjęcie systemu pomiarowego składającego się z dwóch detektorów GEM dla dwóch kanałów pomiarowych spektrometru KX1 na tokamaku JET

Photo 6. Photo of the measurement system consisting of two GEM detectors for the two measurement channels of the KX1 spectrometer on JET tokamak

⁸ K.W. Hill i inni, "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, 10E320 (2008).

⁹ K.-D. Zastrow i inni, "Deduction of central plasma parameters from line – of – sight averaged spectroscopic observations", Journal of Applied Physics 70, 6732 (1991).

¹⁰ R. Bartiromo i inni, "JET high resolution bent crystal spectrometer", Review of Scientific Instruments 60, 237 (1989).



Rys. 4. Zależność czasowa rozkładu energii fotonów dla wszystkich kanałów (a) i odpowiadająca jej 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 promieniowania rentgenowskiego ze wszystkich rzędów dyfrakcyjnych¹¹

Fig. 4. Time dependence of photon energy distribution for all channels (a) and corresponding time dependence of photon intensity (b) for individual detector channels during the discharge on JET tokamak with time resolution of 10 ms (exposure time). Both parts of the figure represent the total X-ray spectrum from all diffraction orders¹¹

kamaku JET. Zależność czasowa widma energetycznego promieniowania jest sumą widm ze wszystkich kanałów odczytu detektora dla czasu ekspozycji 10 ms (rys. 4 (a)). Dwie linie są wyraźnie widoczne przy energii 2,4 keV i 4,8 keV, odnosząc się odpowiednio do pierwszego (linie promieniowania charakterystycznego jonu W^{46+} i innych jonów W o podobnej jonizacji, a także promieniowanie ciągłe) i drugiego rzędu dyfrakcji kryształu (promieniowanie ciągłe). Rys. 4 (b) pokazuje ewolucję czasową liczby fotonów dla każdego kanału pomiarowego podczas 20-sekundowego wyładowania plazmowego. Należy zauważyć, że dane te zostały przetworzone w czasie rzeczywistym w ramach indywidualnego histogramowania sygnałów (rozkłady energii i pozycje zarejestrowanych fotonów) dla każdego kanału.

Dane uzyskane z opracowanych detektorów dobrze korelowały z procesem plazmowym. Dostarczony system detekcji po raz pierwszy zidentyfikował profile dyfrakcyjne odpowiadające różnym rzędom odbicia kryształów dla diagnostyki KX1, dostarczając w ten sposób dokładnych informacji na temat emisji ciągłego i charakterystycznego promieniowania pochodzącego od zanieczyszczeń plazmy. Wyniki te wskazują, że opracowane detektory Triple-GEM są innowacyjnym narzędziem naukowym i badawczym o wysokiej użyteczności, jak również znaczeniu dla pomiarów promieniowania z plazmy w zakresie SXR.

Kolejnym przykładem zastosowania detektorów gazowych typu GEM w badaniach termojądrowych może posłużyć rozwój systemu tomograficznego do pomiarów promieniowania plazmy dla tokamaka WEST

zamiast dotychczasowej diagnostyki SXR. Problem zanieczyszczeń plazmy metalami dotyczy również tego urządzenia, w którym zastosowano aktywnie chłodzony dywertor wolframowy. Ze względu na sprzężenie między transportem zanieczyszczeń a aktywnością MHD, które może prowadzić do akumulacji zanieczyszczeń w plazmie, jest to szczególnie niebezpieczne w przypadku długotrwałych impulsów tokamaka (wyładowania docelowe na tokamaku WEST). Dlatego też wymagane jest odpowiednie narzędzie diagnostyczne do monitorowania poziomu zanieczyszczeń i rekonstrukcji ich rozkładu.

Detektory dla tego urządzenia zostały zaprojektowane tak, aby spełniały wymagania dotyczące ograniczeń wymiarowych, były czułe na przestrzenną lokalizację promieniowania rentgenowskiego i jego energię (tj. podstawowe cechy wymagane od każdego detektora promieniowania rentgenowskiego z plazmy tokamaka), oferowały wystarczająco duży obszar detekcji dopasowany do dedykowanego portu diagnostycznego, miały dobrą rozdzielczość przestrzenną, wysoki stosunek sygnału do szumu, zdolność szacowania energii fotonów i odporność na neutrony. Należy podkreślić, że opracowany system pomiarowy pozwala na rozróżnienie energii fotonów, taka informacja była niedostępna dla poprzedniego systemu tomograficznego na tokamaku WEST. Połączenie informacji spektralnej o promieniowaniu plazmy z dobrą rozdzielczością przestrzenną detekcji, znacznie lepszą w porównaniu do poprzedniej diagnostyki, pomoże dostarczyć podstawowych informacji o stanie plazmy.

Ponieważ zaproponowany układ detekcyjny oparty na detektorach GEM planowano wykorzystać do prac badawczych nad zanieczyszczeniami wolframem,

¹¹ M. Chernyshova i inni, "Development of GEM gas detectors for X-ray crystal spectrometry", Journal of Instrumentation 9, C03003 (2014).

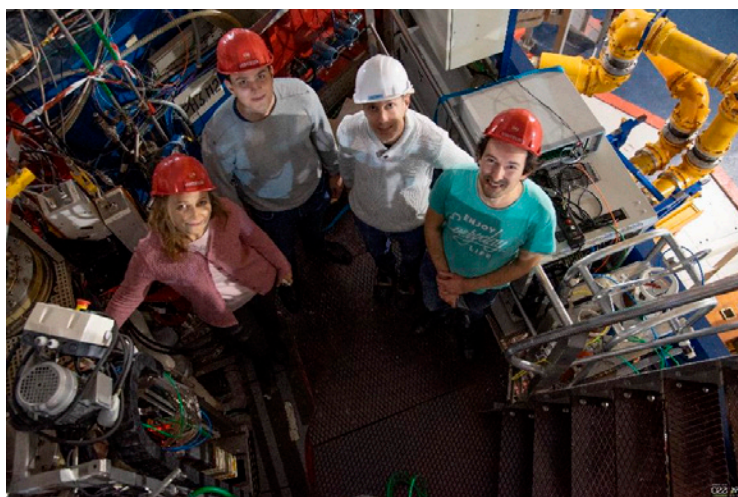
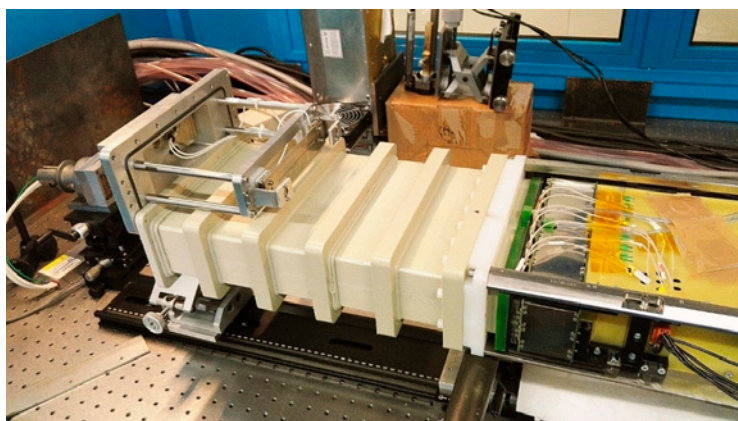
głównym celem nowej diagnostyki rentgenowskiej było zapewnienie monitorowania promieniowania emitowanego przez wysoko zjonizowane zanieczyszczenia metaliczne, koncentrując się na emisji w zakresie 2-4 keV.

Oczekuje się, że układ dwóch detektorów GEM, umieszczonych w dwóch portach, pionowym i poziomym, będzie rejestrował energię fotonów SXR wraz z rekonstrukcją ich położenia, tj. umożliwiając poloidalną tomografię plazmy z rozdzielczością energetyczną. Usytuowanie detektorów jest takie, aby pokryć maksymalny całkowity kąt widzenia dostępny dla każdego portu w celu osiągnięcia zarówno optymalnej rozdzielczości przestrzennej, jak i optymalnej struktury wewnętrznej komory detekcyjnej. Podczas projektowania tej diagnostyki należało rozwiązać liczne problemy fizyczne, techniczne i logistyczne, biorąc pod uwagę ograniczenia przestrzenne i warunki pracy systemu detekcji, takie jak wysoka temperatura otoczenia, oczekiwane rozkłady pola magnetycznego itp. Ponadto, ponieważ kąt widzenia dla obu portów jest dość duży (~25 i ~32°), należało uwzględnić efekt paralaksy. Dlatego zoptymalizowano obszar dryfu/konwersji komory detektora, aby zminimalizować przesunięcie widocznej pozycji promieniowania z plazmy obserwowanego dla dwóch różnych linii patrzenia (linii tomograficznych).

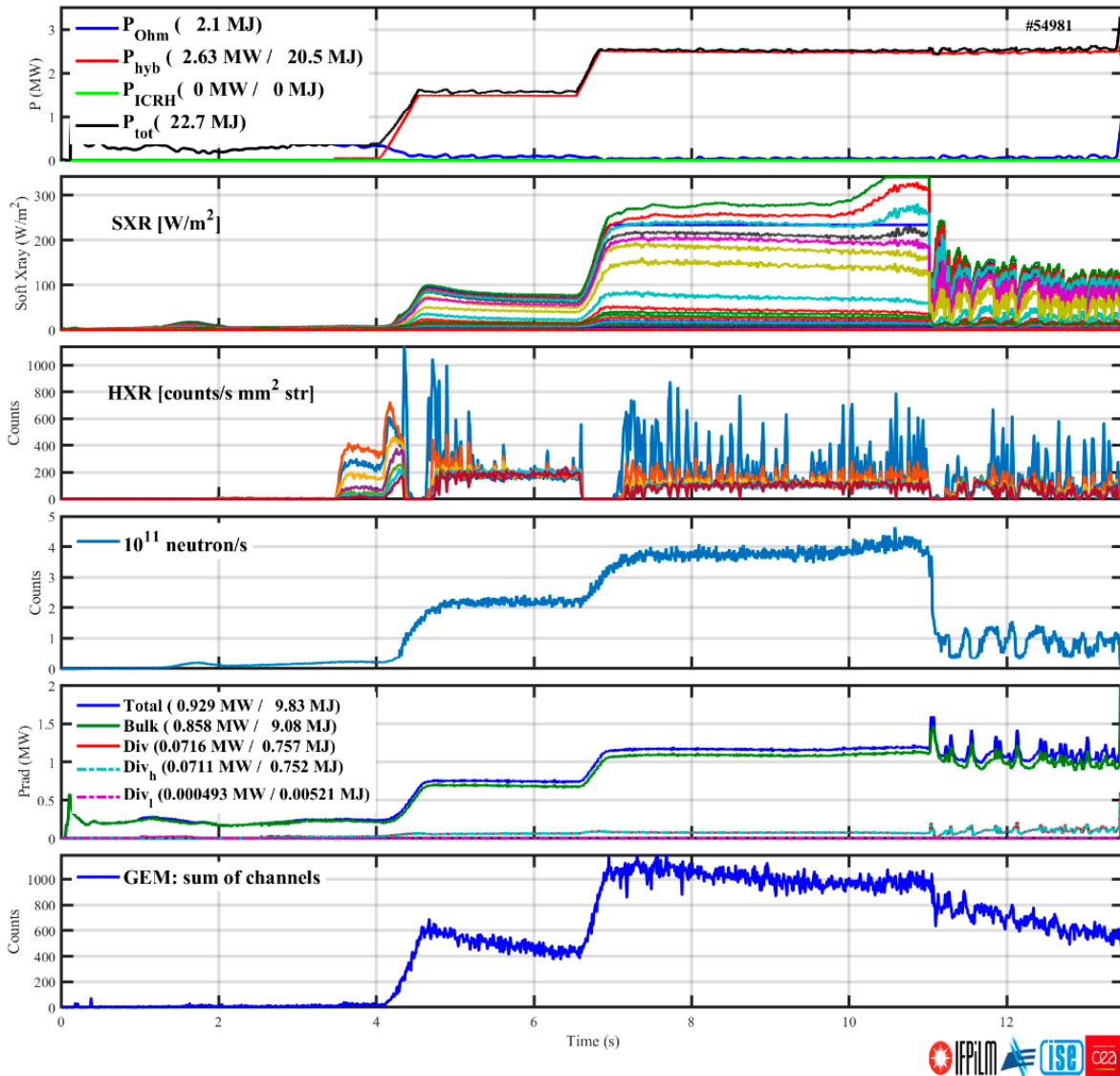
Ze względu na ukierunkowanie badań w obszarze zanieczyszczeń wolframem i aktywności MHD, ustalono następujące wymagania dotyczące rozdzielczości czasowej: system detekcji powinien być w stanie osiągnąć zakres transportu zanieczyszczeń z rozdzielczością co najmniej 1 kHz i powinien rejestrować najwolniejszą aktywność MHD o częstotliwości 10 kHz. W odniesieniu do skali przestrzennej oszacowano, że rozdzielczość 1 cm dla całej objętości plazmy jest wystarczająca do uzyskania dobrego obrazu tomograficznego, który będzie zawierał dokładne informacje o osi magnetycznej, promieniu inwersji zjawiska typu *sawtooth* i rozkładzie zanieczyszczeń.

Pierwsza z dwóch przewidzianych kamer z 85 liniami patrzenia (z ang. LOS – Line Of Sight) została zainstalowana w porcie pionowym Q2AH na tokamaku WEST, obejmując stożkowo widok dywertora i około jednej trzeciej widoku plazmy od krawędzi do krawędzi w płaszczyźnie ekwatorialnej. Fot. 7. przedstawia zdjęcie detektora wraz z układem elektroniki analogowej dla portu pionowego połączonego z buforem helowym, który ma służyć do obniżenia tłumienia promieniowania o niższej energii (poniżej 4 keV), i strukturą wsparcia.

Przygotowany system diagnostyczny oparty na technologii GEM został wykorzystany podczas kampanii eksperymentalnej na tokamaku WEST. Pierwsze widma zostały zebrane przez 47,3 cm warstwę powietrza między pinholem a oknem detektora, co podyktowało próg energii około 4keV. Górna granica rejestrowanej energii fotonów jest ograniczona przez wydajność detektora i zastosowane wysokie napięcia przyłożone do folii GEM (stopień wzmocnienia detektora). Akwizycja danych w systemie jest uruchamiana za pomocą zewnętrznego systemu, który jest zsynchronizowany z innymi urządzeniami diagnostycznymi WEST. Uzyskane dane z promieniowania plazmy mogą być przetwarzane z dowolną rozdzielczością czasową (do 10 μ s) systemu dostosowaną do obserwowanych statystyk. Do kalibracji energii wykorzystano dwa źródła promieniowania gamma ^{55}Fe , zamontowane na stałe z przodu detektora. Analizowane wyładowania charakteryzowały się stabilnym wzmocnieniem detektora, zweryfikowanym przez widma promieniowania kalibracyjnego wykonane przed i po wyładowaniu. Na rys. 5. przedstawione są przykładowe wyniki dla wyładowania #54981.



Fot. 7. Zdjęcie systemu pomiarowego dla portu pionowego (góra) oraz miejsce instalacji pierwszego detektora układu tomograficznego na tokamaku WEST (dół)
Photo 7. Photo of the measurement system for the vertical port (top) and the location of the first detector of the tomographic system on the WEST tokamak (bottom)



Rys. 5. Eksperymentalne zależności czasowe dla wyładowania #54981 łącznie z sygnałem z detektora GEM o rozdzielczości czasowej 10 ms¹²
Fig. 5. Experimental time traces for pulse #54981 along with the GEM detector signal of 10 ms time resolution¹²

Zarejestrowany profil czasowy diagnostyki GEM (zintegrowana energia fotonów) został porównany z danymi SXR, HXR (z ang. HXR – Hard X-Ray) i neutronowymi. Różne kolory na danych SXR i HXR odpowiadają odpowiednio 45 i 38 poziomym LOS z sumaryczną energią promieniowania. Maksymalna intensywność promieniowania SXR i HXR ujawnia się dla centralnej LOS. Zaobserwowano rozsądną zgodność między sygnałem z detektora GEM a promieniowaniem HXR dla tego impulsu, z mniej wyraźnym związkem z danymi SXR. Warto zauważyć, że wszystkie diagnostyki kwantowe, w tym opracowana, mają różną odpowiedź spektralną, co stwarza pewne trudności podczas bezpośredniej próby ich porównania.

Po pierwszych uzyskanych wynikach eksperymentalnych wykazano, że diagnostyka umożliwiła zebranie skalibrowanych danych zarówno przestrzennie, jak i spektralnie. Zarejestrowane widma przedstawiają złożony wkład zarówno SXR, jak i wysokoenergetycznego promieniowania jonizującego. Porównanie z innymi metodami diagnostycznymi na tokamaku WEST wykazuje dobrą zgodność trendów. Przy pierwotnej konfiguracji diagnostyki system rejestrował raczej wysokoenergetyczną część promieniowania X, która może być przydatna do potwierdzenia nasilenia erozji. Zmiana proporcji w stronę niskoenergetycznej składowej widma jest realizowana za pomocą bufora helowego zamontowanego przed detektorem. To pozwoli na bezpośrednie pomiary SXR, które są planowane do przeprowadzenia podczas kolejnych eksperymentów z wykorzystaniem opracowanej diagnostyki. Zbudowa-

¹² M. Chernyshova i inni, konferencja PSI 2020, plakat „First exploitation results of recently developed SXR GEM-based diagnostics at the WEST project” (2020).

ny układ detekcyjny pozostaje w użyciu na tokamaku WEST i ma dostarczać danych w nadchodzących kampaniach eksperymentalnych.

Jak już zostało wyżej wspomniane, obecnie dla tokamaków takich jak ITER czy DEMO wymagana jest nowa technologia detekcji promieniowania rentgenowskiego. Ekstremalne obciążenie promieniowaniem związane z działaniem instalacji termojądrowych nakłada specjalne wymagania na stabilność materiałów stosowanych w tych warunkach. Wymagania te, stawiane nie tylko materiałom na ściany komory, ale również tym stosowanym w urządzeniach wspomagających bezpieczną i niezawodną pracę reaktorów termojądrowych, są powodem ciągłego poszukiwania nowych materiałów i technologii w zakresie aparatury do diagnostyki plazmy.

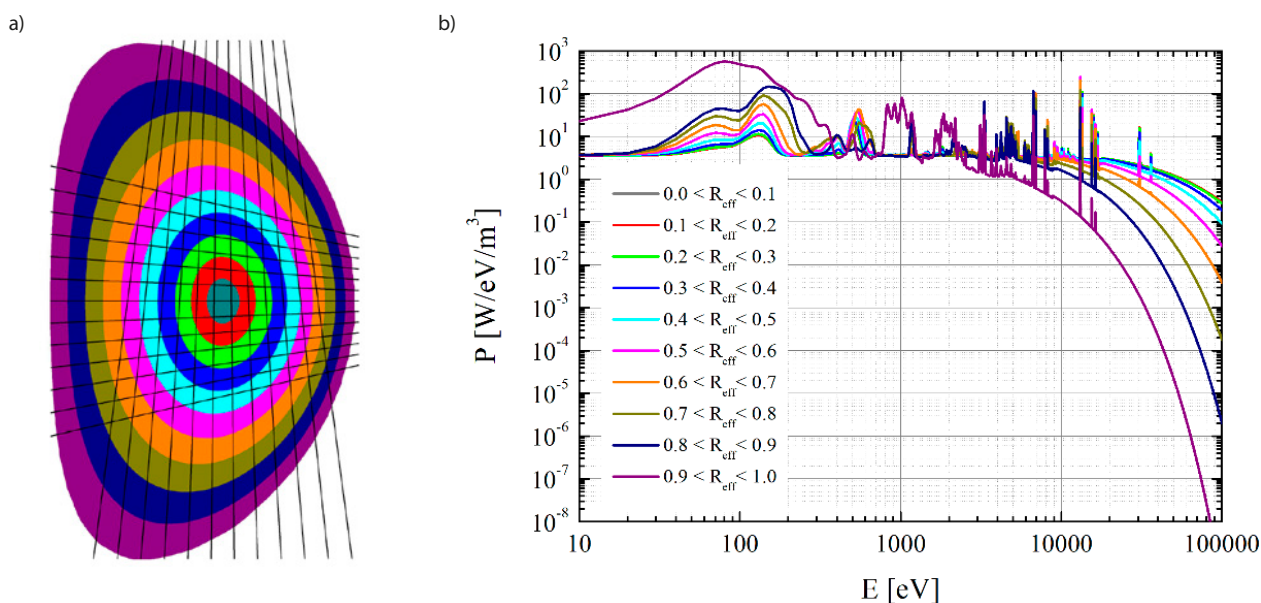
Jednym z takich urządzeń jest rozwijany w IFPiLM system diagnostyczny, który ma na celu ocenę mocy promieniowania plazmy centralnej (P_{rad}) w celu monitorowania i kontroli strumienia energii przez separatory, ostatnią zamkniętą powierzchnię magnetyczną, wykorzystując ich wzajemną zależność. Przewiduje się, że system ten zostanie połączony z pomiarem intensywności miękkiego promieniowania rentgenowskiego z centralnego obszaru plazmy ze względu na nakładające się obszary długości fali, a także ze względu na wymuszoną agregację diagnostyk kontrolnych dla DEMO. Na obecnym etapie oczekuje się, że taki system diagnostyczny będzie miał łącznie 52 linie patrzenia: 26

dla portu ekwatorialnego i 26 dla portu górnego, przy czym każda LOS będzie miała wyznaczony detektor oparty na technologii GEM.

Na rys. 6. przedstawiony jest zarys układu tomograficznego dla tokamaka DEMO oraz obliczona moc promieniowania, z uwzględnieniem udziału najistotniejszych zanieczyszczeń, dla każdego zaznaczonego obszaru plazmy. Symulowane widmo zawiera promieniowanie liniowe oraz ciągłe, co jak widać, rozciąga się na szeroki zakres energii fotonów. Dla większości zastosowań diagnostycznych, interesujące energie fotonów mieszczą się w przybliżeniu w zakresie od 1 eV do 15 keV. Obejmuje to wszystkie regiony widma od bliskiej podczerwieni do SXR, których pomiar z trudem może być obsługiwany przez pojedynczy system pomiarowy.

Biorąc pod uwagę obecną listę diagnostyk przewidzianych dla DEMO, które są planowane z redundancją, potrzebę diagnostyki P_{rad} /SXR do monitorowania i kontrolowania centralnego promieniowania plazmy, (wyniki przedstawione na rys. 6 (b)), oraz obecnie planowane pokrycie przekroju plazmy skoncentrowane na centralnej części, zmusza to do pewnych uproszczeń i redukcji przy projektowaniu tej diagnostyki.

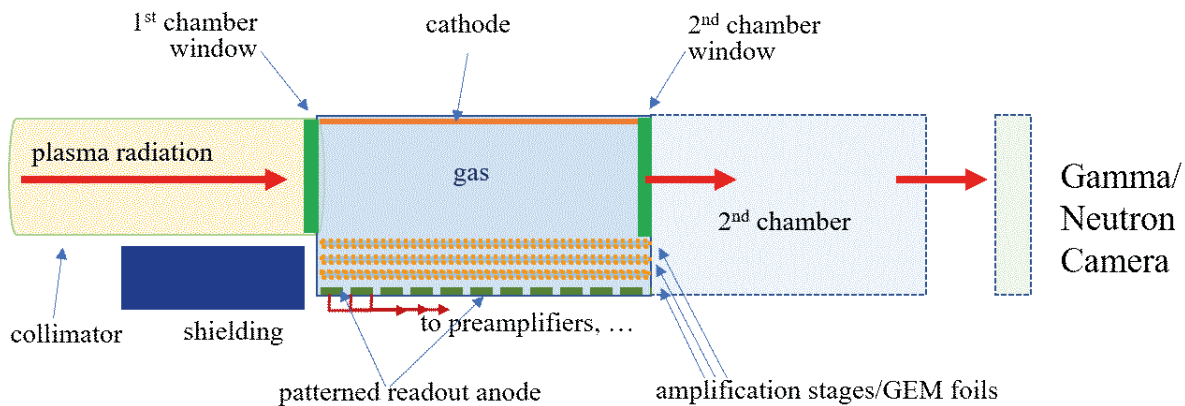
Warto wspomnieć, że proponowany projekt nadal musi spełniać szereg wymagań dotyczących, np., wydajności przez okres całego cyklu pracy elektrowni (kilka lat pracy z pełną mocą), rozdzielczości czasowej, poziomu szumów, rozdzielczości przestrzennej czy czasu



Rys. 6. Przekrój plazmy podzielony na 10 stref znormalizowanego efektywnego promienia z krokiem 0,1. (b) Emisyjność plazmy w zakresie 10 eV-100 keV (rozdzielczość energii 10 eV) dla wybranych stref pokazanych w (a) z dopasowanymi kolorami

Fig. 6. Plasma section divided into 10 zones with a normalised effective radius with a step of 0,1. (b) Plasma emissivity in the range 10 eV-100 keV (energy resolution 10 eV) for selected zones shown in (a) with colour matching¹³

¹³ M. Chernyshova i inni, „Multi-chamber GEM-based concept of radiated power/SXR measurement system for use in high radiation environment of DEMO”, Journal of Instrumentation 17 C05013 (2022).



Rys. 7. Układ koncepcyjny i konstrukcja komory czujnika z dwiema komorami. Dla przejrzystości, wszystkie ważne komponenty są pokazane dla pierwszej komory, ale nie są pokazane dla drugiej komory¹⁴

Fig. 7. Conceptual arrangement and design of the sensor with two chambers. For clarity, all important components shown for the first chamber but are not shown for the second chamber¹⁴

latencji. Oczekiwane wysokie natężenia strumieni neutronów i wysokoenergetycznych fotonów są szczególnie wymagające, i wymagają rozwiązań pozwalających na ekranowanie jak największej powierzchni detektora.

Podczas projektowania części aktywnej układu detekcji położono nacisk na osiągnięcie szerokiego zakresu pomiarowego SXR. Wybrano tryb zliczania fotonów, aby umożliwić zarówno pomiar widma promieniowania, jak i pomiar mocy całkowitej.

W celu pokrycia jak najszerszego zakresu energii fotonów, począwszy od 1-2 keV, zaproponowano podzielenie komory detekcyjnej na dwie części. Daje to możliwość zastosowania różnych parametrów dla każdej z nich, takich jak mieszanina gazów roboczych, ciśnienie, długość, kształt filtrów przed detektorem, itp. W ten sposób każda komora może być dedykowana do określonego zakresu promieniowania plazmowego. Oczekuje się, że pierwsza komora będzie dostosowana do rejestracji fotonów o energii w obszarze 2-15 keV, a druga – do rejestracji fotonów o energii powyżej 10 keV. W razie potrzeby można dodać dodatkowe komory, z których każda koncentrowałaby się na określonym obszarze energii.

Ponadto, znając skład spektralny promieniowania na wejściu, możliwa jest modyfikacja go w sposób, który rozkłada zliczenia względnie równomiernie w różnych energiach. Regulacja składu widmowego promieniowania wewnątrz komory może się odbywać za pomocą filtra, o odpowiednim składzie i kształcie, umieszczonego przed przestrzenią wypełnioną gazem. Kształt filtra jest ustalany za pomocą opracowanego narzędzia numerycznego, którego celem jest osiągnięcie wstępnie ustawionego poziomu całkowitej absorpcji w komorze w zadanym obszarze energii.

Dotychczas przeprowadzone badania koncepcyjne stanowią podstawę i punkt wyjścia do ostatecznego projektu systemu pomiarowego mocy promieniowania plazmy centralnej i intensywności SXR, nad którym prace nadal trwają. Koncepcja systemu, opisana powyżej, uwzględnia szeroki zakres pomiarowy energii oczekiwanego promieniowania w obszarze SXR i jednocześnie pozwala na efektywną absorpcję fotonów wraz z określaniem ich energii i pozycji. Przedstawiona struktura detektora minimalizuje również wpływ rygorystycznego środowiska przyszłych reaktorów termojądrowych na komponenty systemu pomiarowego. Daje również możliwość obciążenia promieniowaniem na akceptowalnym poziomie zarówno struktury gazowej, jak i zaprojektowanych elementów elektroniki. Na kolejnym etapie badań przewiduje się optymalizację wielomateriałowego filtra oraz dalsze prace nad szczegółowym projektem mechanicznym detektora prototypowego.

Na zakończenie warto również wspomnieć o doskonałych możliwościach obrazowania detektorów gazowych opartych na technologii MPGD, które mogą być wykorzystane również do bezpośredniego obrazowania promieniowania plazmowego.

Dlaczego akurat obrazowanie 2D jest takie ważne? Jak wiadomo, transport jonów wolframu oddziałuje z aktywnością MHD, a interakcja ta jest zjawiskiem w pełni trójwymiarowym (np. trójwymiarowa redystrybucja wolframu w modzie NTM (z ang. NTM – Neoclassical Tearing Mode) lub wewnętrzne niestabilności spowodowane np. rotacją plazmy lub pozaosiowym grzaniem ICRH (z ang. ICRH – Ion Cyclotron Resonance Heating)). Właściwa identyfikacja trybu niestabilności i jej lokalizacji, a także rozkładu przestrzennego wolframu, byłaby dokładniejsza dzięki diagnostyce gwarantującej uzyskanie takich efektów 3D. Taka konstrukcja mogłaby powstać z ustawienia trzech detektorów: dwóch w standardowym układzie tomografii polo-

¹⁴ M. Chernyshova i inni „Multi-chamber GEM-based concept of radiated power/SXR measurement system for use in high radiation environment of DEMO”, JINST (2022) 17 C05013”.

idealnej oraz trzeciego uzupełniającego, który byłby dwuwymiarowym detektorem obserwującym przekrój poloidalny i zapewniłby dostęp do wymaganych informacji 3D. Taki system pomiarowy mógłby być użyteczny zarówno do skutecznej identyfikacji ograniczeń tomografii 2D w prostych przypadkach z osiowo-symetryczną emisją SXR, jak i do walidacji efektów 3D w podejściu diagnostyki syntetycznej lub do wykorzystania jako bezpośrednia tomografia 3D. Należy zauważyć, że aktywność W i MHD nie może być uważana za niezależną, dlatego rozdzielczość spektralna i informacje 3D są komplementarne, jeśli mają być przeprowadzone szczegółowe badania fizyczne. Co więcej, oczekuje się, że elektrony przyspieszane podczas procesów rekoneksji magnetycznej, tj. w zjawiskach typu sawtooth, lub podczas zaburzeń wyładowań spowodowanych masywnymi iniekcjami gazu, powinny wytwarzać silnie anizotropowy sygnał, do pomiaru, którego kamera toroidalna jest doskonale przystosowana. Dlatego wspólne wykorzystanie detektora toroidalnego z detektorami poloidalnymi pozwoliłoby na korzystniejszą kwantyfikację anizotropii promieniowania, a tym samym lepszą kwantyfikację odpowiedzialnego pola elektrycznego, jak i lepszą lokalizację przestrzenną przyspieszonych elektronów. Oczywiście takie promieniowanie byłoby widoczne w zakresie wyższych energii, ale wczesne obserwacje sugerują, że powinno być widoczne również na sygnałach SXR.

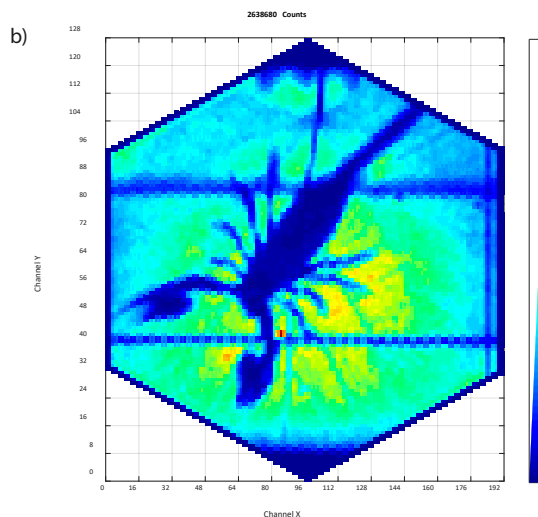
Na przykład, wykorzystanie obrazowania 2D opartego na toroidalnym detektorze GEM i połączenie go z tomografią poloidalną opartą na detektorach tego samego typu umożliwiłoby uzyskanie informacji 3D, które powinno być dostępne do badania interakcji między zanieczyszczeniami wolframu a aktywnością MHD. W połączeniu z zaawansowaną elektroniką detektory te oferują doskonałą rozdzielczość przestrzenną i czasową, a także możliwość uzyskania widma ładunku, z którego można odtworzyć widmo fotonów. Rozdziel-

czość spektralna zapewniana przez system może być wykorzystana do określenia warunków brzegowych dla kodów transportu wolframu.

Te możliwości detektorów zostaną wykorzystane do diagnostyki obrazującej promieniowanie plazmy, która jest przygotowywana przez zespół naukowców z Instytutu.

Ponieważ plazma tokamakowa jest bardzo jasnym źródłem promieniowania SXR, może wytwarzać ona bardzo intensywny strumień fotonów na powierzchni detektora, który osiąga ponad 10^5 - 10^7 cps/mm² w zależności od mocy grzania, zanieczyszczeń obecnych w plazmie i od systemu detekcji. Aby ocenić możliwości obrazowania rozwijanego systemu, różne struktury anodowe detektora Triple-GEM zostały przetestowane pod kątem obrazowania miękkiego promieniowania rentgenowskiego. Jednym z celów było określenie względnej rozdzielczości przestrzennej różnych struktur odczytu dla obrazowania promieniowania plazmy. Biorąc pod uwagę, że obrazowanie plazmowe tokamaka o wysokiej rozdzielczości przestrzennej wymagałoby ogromnej liczby pikseli podłączonych bezpośrednio do kanałów elektroniki odczytowej, bardziej właściwe byłoby opracowanie struktury odczytu ze zmniejszoną liczbą niezależnych kanałów elektroniki. W związku z tym podjęto próby zaprojektowania takiej struktury. Dla analizowanych struktur odczytowych o zależnych kanałach i połączonych między sobą pikselach zostały przeprowadzone badania, których głównym celem było ustalenie warunków i zdolności jednoznacznego określenia klastra ładunków wytwarzanego przez pojedynczy foton oraz jego położenia na płaszczyźnie anody. Tego typu pomiary przeprowadzono dla różnych struktur odczytowych. Przykładowe wyniki uzyskane dla opracowanej struktury odczytu UXV przedstawiono na rys. 8.

Ponadto, wszystkie struktury odczytu były poddawane intensywnemu strumieniowi fotonów SXR w celu oceny ich zdolności do obsługi takiego strumienia.



Rys. 8. (a) Zdjęcie skorpiona w obszarze widzialnym oraz (b) w zakresie miękkiego promieniowania rentgenowskiego
Fig. 8. Photo of a scorpion in the visible region (a) and soft X-ray (b)

Wyniki wskazały, że przetestowane odczyty były zdolne do obsługi zastosowanych w badaniu strumieni fotonów i wykazały swoją przydatność w większym lub mniejszym stopniu do zamierzonych celów odczytu. Stwierdzono, że zaprezentowaną strukturę odczytu UXV, uwzględniając jej dalszy rozwój i optymalizację, można uznać za obiecującą konfigurację podstawową struktury anody o wymaganych charakterystykach na potrzeby obrazowania plazmowego.

Przy wspomnianych dużych strumieniach promieniowania istnieje duże prawdopodobieństwo nakładania się sygnałów w czasie i przestrzeni, co może uniemożliwić identyfikację klastrów ładunków na podstawie sygnałów detektora, a to oznacza utratę informacji o energii i liczbie fotonów. W celu poprawy pracy detektora w Instytucie opracowano procedurę separacji nakładających się impulsów dla tego samego kanału elektronicznego tak, aby można było ją wdrożyć w przetwarzanie danych w czasie rzeczywistym. Opracowany algorytm oddziela nałożone na siebie sygnały spowodowane przez stosunkowo powolny obwód elektroniczny. Separacja nakładających się impulsów została pomyślnie wprowadzona, opatentowana i zweryfikowana w eksperymentach symulacyjnych. Procedura jest skuteczna, gdy główne, nieukształtowane przez układ elektroniczny, impulsy w detektorze GEM nie nakładają się na siebie. Oczekiwana poprawa rozdzielczości czasowej wynosi około ~50 ns w porównaniu z ~500 ns uzyskanymi wcześniej dla ukształtowanych sygnałów detektora. Może to znacznie poprawić wydajność detektora GEM poprzez zaimplementowanie algorytmu w module FPGA (lub poprzez przetwarzanie sygnałów w trybie quasi-online).

Podsumowanie

Niniejszy artykuł przedstawia prace zespołu z IFPiLM nad projektem i przygotowaniem nowego systemu pomiarowego promieniowania X opartego na detektorach gazowych typu GEM. Prace te rozpoczęto ponad dekadę temu i są one nadal kontynuowane w ramach wsparcia programu badawczego ITER. Celem tych prac jest przygotowanie użytecznego i niezawodnego detektora do badań w dziedzinie fizyki plazmy, umożliwiającego rejestrację promieniowania i analizę pomiarów. Głównymi osiągnięciami tych prac było zaprojektowanie oraz zbudowanie nowych detektorów dla spektrometru o wysokiej rozdzielczości, dla układu tomograficznego, jak również projekt koncepcyjny detektorów dla przyszłych reaktorów termojądrowych i obrazowania promieniowania plazmowego.

*Maryna Chernyshova,
Ewa Kowalska-Strzęciwilk,
Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy,
Warszawa*

Literatura:

- [1] F. H. Séguin i inni, "Radiation-hardened x-ray imaging for burning-plasma tokamaks", *Review of Scientific Instruments* 68, 753 (1997).
- [2] F. Sauli, "The gas electron multiplier (GEM): Operating principles and applications", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 805, 2-24 (2016).
- [3] A.F. Buzulutskov, "Radiation Detectors Based on Gas Electron Multipliers (Review)", *Instruments and Experimental Techniques* 50(3), 287-310 (2007).
- [4] A. Zielińska i inni, "X-ray fluorescence imaging system for fast mapping of pigment distributions in cultural heritage paintings", *Journal of Instrumentation* 8, P10011 (2013).
- [5] F. Murtas, "Applications of triple GEM detectors beyond particle and nuclear physics". *Journal of Instrumentation* 9 C01058 (2014).
- [6] M. Bucciantonio i inni, "Development of a fast proton range radiography system for quality assurance in hadron therapy", *Vienna Conference on Instrumentation* 732, 564-567 (21 December 2013).
- [7] K. Malinowski i inni, "Simulation of energy spectrum in GEM detector from an X-ray quantum", *Journal of Instrumentation* 13, C01018 (2018).
- [8] K.W. Hill i inni, "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, 10E320 (2008).
- [9] K.-D. Zastrow i inni, "Deduction of central plasma parameters from line - of - sight averaged spectroscopic observations", *Journal of Applied Physics* 70, 6732 (1991).
- [10] R. Bartiromo i inni, "JET high resolution bent crystal spectrometer", *Review of Scientific Instruments* 60, 237 (1989).
- [11] M. Chernyshova i inni, "Development of GEM gas detectors for X-ray crystal spectrometry", *Journal of Instrumentation* 9, C03003 (2014).
- [12] M. Chernyshova i inni, konferencja PSI 2020, plakat "First exploitation results of recently developed SXR GEM-based diagnostics at the WEST project" (2020).
- [13] M. Chernyshova i inni, "Multi-chamber GEM-based concept of radiated power/SXR measurement system for use in high radiation environment of DEMO", *Journal of Instrumentation* 17 C05013 (2022).
- [14] M. Chernyshova i inni, "Multi-chamber GEM-based concept of radiated power/SXR measurement system for use in high radiation environment of DEMO", *JINST* (2022) 17 C05013".