

INSTYTUT FIZYKI PLAZMY I LASEROWEJ MIKROSYNTEZY - 40 LAT BADAŃ DLA ENERGETYKI PRZYSZŁOŚCI

Institute of Plasma Physics and Laser Microfusion - 40 years of research for secure energy in the future

Jerzy Wołowski z zespołem współpracowników z IFPiLM

Streszczenie: Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy został utworzony w 1976 r. We współpracy z innymi instytutami realizuje badania w takich dziedzinach jak: fizyka gorącej plazmy, synteza (fuzja) jądrowa, oddziaływania laser-materia i zastosowania plazmy. Instytut jest nadzorowany przez Ministerstwo Energii, jednak jego działalność dofinansowywana jest z Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego (MNiSW) w ramach dotacji statutowej i grantów badawczych. W Instytucie jest zatrudnionych 85 pracowników, w tym 45 naukowców. Od września 2010 r. dyrektorem Instytutu jest dr hab. Andrzej Gałkowski. Od wielu lat IFPiLM organizuje każdego roku przemiennie dwa ważne spotkania międzynarodowe: konferencję PLASMA - International Conference on Research and Applications of Plasmas i Letnią Szkołę w Kudowie-Zdroju „Kudowa Summer School towards Fusion Energy”. Polski program fuzji jądrowej jest od roku 2005 częścią europejskiego programu EURATOM, który od roku 2014 koordynowany jest przez europejskie konsorcjum EUROfusion. IFPiLM koordynuje wszystkie badania fuzyjne w Polsce na podstawie decyzji MNiSW przewodnicząc krajowemu konsorcjum Centrum naukowo-przemysłowe Nowe Technologie Energetyczne. Poza tym, w IFPiLM utworzony został Krajowy Punkt Kontaktowy EURATOM-Fusion. Projekty EUROfusion realizowane w Instytucie obejmują przygotowywanie diagnostyk dla tokamaków JET i WEST oraz stellaratora W7-X, a także opracowywanie i stosowanie kodów numerycznych do analizy działania tokamaków (w tym przyszłego tokamaka-reaktora DEMO). Instytut wspólnie z Politechniką Warszawską prowadzi badania w zakresie technologii fuzyjnych (usuwanie kodepozytu z elementów komory tokamaka, erozja powierzchni materiałów, pył w komorze tokamaka). Zespoły naukowe w IFPiLM uczestniczą też w innych projektach europejskich nie dotyczących fuzji w tokamakach i stellaratorach. Wieloletnie badania plazmy produkowanej laserem i fuzji laserowej, głównie objęte projektami HiPER i LaserLab-Europe, są realizowane wspólnie z innymi zespołami, przede wszystkim w Ośrodku Badawczym PALS w Czechach. Ponadto, w Instytucie działa Międzynarodowe Centrum Plazmy Namagnesowanej utworzone pod auspicjami UNESCO koordynujące badania w układzie plasma focus PF1000U. Te prace są dofinansowywane w ramach projektów Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej. W Laboratorium Symulowanych Wyładowań Atmosferycznych w IFPiLM testowana jest odporność różnych urządzeń technicznych na skutki działania wyładowań piorunowych. Z kolei w utworzonym w IFPiLM w 2013 r. laboratorium plazmowych silników satelitarnych są opracowywane i testowane prototypy takich silników.

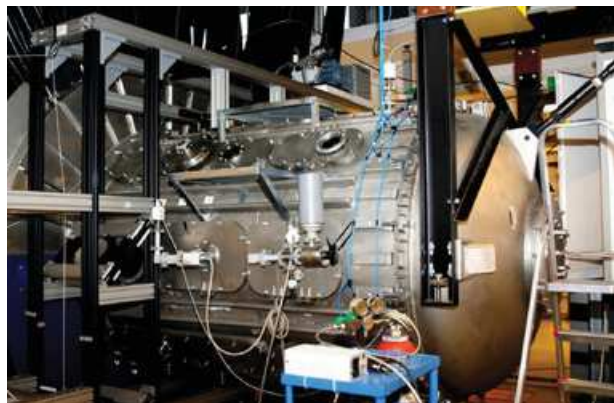
Abstract: The IPPLM, established in 1976, currently carries out research and co-operates with other institutes in fields such as: pulsed high temperature plasmas, thermonuclear fusion, laser-matter interactions and plasma applications. The Institute is subordinated to the Ministry of Energy, however continuous financial support has been granted by the Ministry of Science and Higher Education (MSHE). The Institute employs 85 persons including 45 scientists. Dr. Andrzej Gałkowski has been a director of the Institute since September 2010. As a flagship event, the IPPLM organizes international “Kudowa Summer School towards Fusion Energy” in Kudowa Zdrój (Poland) biennially, alternating with International Conference on Research and Applications of Plasmas (PLASMA), which is focused on presenting various aspects of plasma physics applications and fusion energy. Since 2005, Polish fusion programme has been the part of the European fusion programme coordinated by EUROfusion consortium. The IPPLM is an entity which is authorized by the MSHE to coordinate all the fusion research in Poland acting as National Contact Point EURATOM-Fusion. The Polish fusion programme comprises institutions that form the national consortium known as New Energy Technologies (CeNTE). During last years of international cooperation the scientists from IPPLM have developed components and diagnostics for tokamaks JET and WEST and for stellarator W7-X, as well as codes for fusion devices including DEMO. Involving various partners such as Warsaw University of Technology, the Institute carries out research related to fusion technology, namely fuel removal, dust, chemical erosion. It is worth mentioning that, the scientists from IPPLM participate in other European projects related to plasma produced by lasers and laser fusion. Researchers accomplish their experiments mainly within HiPER and LaserLab-Europe projects in close collaboration with foreign teams in PALS Research Centre situated in Prague in Czech Republic. Besides that, the Institute hosts an International Centre for Dense Magnetised Plasmas (ICDMP), which coordinates studies of plasma physics and application of plasma focus (PF1000U) device. These activities are realized within projects co-financed by International Atomic Energy Agency in Vienna. In addition, the existence of PLaNS laboratory at IPPLM brings to the institute theoretical and experimental knowledge on plasma propulsion for satellites. The team working in that field carries out successful experiments in collaboration with a large European research network. Last but not least, the Lightning Tests Laboratory in the IPPLM-conducts research on the resistance of the various devices against the lightning interaction.

Słowa kluczowe: fizyka plazmy, synteza termojądrowa, układy termojądrowe, lasery, Program EURATOM

Key words: plasma physics, thermonuclear fusion, thermonuclear devices, lasers, EURATOM Programme

Pierwsze sukcesy badań termojądrowych i narodziny Instytutu

Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy (IFPiLM) powstał 1 stycznia 1976 r. w wyniku połączenia Zespołów zorganizowanych w Wojskowej Akademii Technicznej przez prof. Sylwestra Kaliskiego wówczas komendanta tej uczelni. Celem utworzenia Instytutu było rozwijanie badań plazmy i różnych wariantów syntezy termojądrowej (fuzji) w gorącej plazmie. Reakcje syntezy jąder izotopów wodoru - deuteru (D) i trytu (T) są źródłem energii, która w określonych warunkach może mieć zastosowanie praktyczne. Fuzję jądrową w tym czasie badano już w wielu laboratoriach. Na podstawie analiz teoretycznych i zastosowań fuzji w broni termojądrowej przewidywano, że kontrolowana fuzja może być w przyszłości źródłem taniej energii elektrycznej, bezpiecznej dla ludności i środowiska. W Polsce badania plazmy wysokotemperaturowej prowadzono w tym czasie w wąskim zakresie tylko w Instytucie Badań Jądrowych (IBJ).



Fot. 1. Koncentrator plazmowy plasma-focus PF1000U w IFPiLM
Phot. 1. The plasma focus PF1000U device – the high power plasma concentrator in IPPLM

Od wielu lat prowadzone są prace nad opanowaniem fuzji jądrowej w gorącej plazmie, utrzymywanej i grzanej w toroidalnych pułapkach magnetycznych typu tokamak i stellarator (układy MCF). Są to obecnie układy termojądrowe najbliższe zastosowań w prototypowych reaktorach, produkujących energię elektryczną. Inną opcją praktycznego opanowania syntezy jądrowej jest zastosowanie laserów do kompresji i grzania plazmy bez pola magnetycznego. Badania dotyczące tej opcji służą opracowaniu w przyszłości reaktora energetycznego wykorzystującego tzw. fuzję z inercyjnym utrzymaniem plazmy (zwaną też fuzją laserową). W nowym Zespole Fizyki Jądrowej (ZFJ) w WAT już w 1973 r. uzyskano efekt fuzji jąder deuteru w wyniku oddziaływania impulsu nowego lasera neodymowego z próbką zawierającą deuter. Był to siódmy na świecie eksperyment tego rodzaju. W tym czasie, także w ZFJ, badano fuzję w plazmie generowanej w koncentratorze plazmowym typu plasma focus, nazwanym PF150, zbudowanym w Instytucie Badań Jądrowych dla WAT. Przed rokiem 1976 w innych nowoutworzonych Zespołach w WAT budowano różne lasery impulsowe do grzania plazmy oraz rozpoczęto teoretyczne i eksperymentalne badania inicjowania fuzji materiałem wybuchowym.

Trudne lata osiemdziesiąte

Nowoutworzony Instytut podporządkowano Ministerstwu Nauki, Szkolnictwa Wyższego i Techniki, a pierwszym dyrektorem Instytutu został prof. Sylwester Kaliski, wówczas kierownik tego ministerstwa. W latach 70. i 80. XX wieku w IFPiLM badano głównie plazmę wytwarzaną laserem i wspólnie z IBJ (później IPJ) plazmę w układach plasma focus. Przez kilka lat sprawdzano też idee prof. Sylwestra Kaliskiego dotyczące kompresji plazmy za pomocą konwencjonalnego wybuchu oraz kombinowane warianty fuzji jądrowej: dogrzewanie impulsem laserowym plazmy w układzie plasma focus i plazmy skompresyjowanej wybuchem oraz grzanie takim impulsem plazmy w silnym polu magnetycznym. Prace te dostarczyły wiele oryginalnych wyników naukowych, ale nie potwierdziły celowości dalszych badań na większą skalę dla sprawdzenia przyszłych zastosowań energetycznych. Wyniki badań fuzji laserowej i fuzji w układzie plasma focus zostały wyróżnione zespołowymi Nagrodami Państwowymi I-ego stopnia. We wrześniu 1978 r. zmarł prof. Sylwester Kaliski w wyniku obrażeń doznanych w wypadku samochodowym. Nowym dyrektorem Instytutu został jego zastępca doc. inż. Sławomir Denus. Badania plazmy wytwarzanej laserem rozpoczęte w ZFJ w WAT kontynuowano w IFPiLM stosując oprócz lasera użytego do ważnego eksperymentu w roku 1973, także inne lasery, w tym: zakupiony we Francji laser QL oraz lasery zbudowane w IFPiLM: laser na dwutlenku węgla oraz cztero-wiązkowy laser neodymowy wykorzystany do kompresji mikrobalonów szklanych wypełnionych deuterem. Do tych prac stosowano zbudowane w IFPiLM specjalne układy diagnostyczne. Badania plazmy i fuzji laserowej prowadzono także w ramach współpracy w Instytucie Fizycznym (FIAN) w Moskwie kierowanym przez prof. N.G. Basova laureata Nagrody Nobla. Kontynuowano badania plazmy w układach plasma focus we współpracy z IBJ (IPJ) doskonaląc jednocześnie metody pomiarowe. W latach 80. XX wieku rozpoczęto w IFPiLM przygotowania kilku układów diagnostycznych dla tokamaka T15 budowanego w Moskwie. Prace te przerwano po kilku latach z powodu wstrzymania budowy tego układu. Po podporządkowaniu IFPiLM Ministerstwu Obrony Narodowej w roku 1987 przez kilka lat Instytut reorganizowano ograniczając badania plazmowe i rozwijając prace w zakresie optoelektroniki.

Rozwój badań w zmniejszonym Instytucie w odrodzonej Polsce

Na początku lat 90. XX wieku Instytut został podzielony na dwie części - jedną włączono do WAT, a drugą część podporządkowano Państwowej Agencji Atomistyki jako instytut badawczy z dotychczasową nazwą. Dyrektorem Instytutu został dr Zygmunt Składanowski. W tym czasie uruchomiono w IFPiLM jeden z największych na świecie układów typu plasma focus, układ PF1000, również zbudowany w IPJ (d. IBJ). Do koordynacji badań w układach plasma focus utworzono w 1993 r. w Instytucie pod auspicjami UNESCO Międzynarodowe Centrum Gęstej Plazmy Namagnetyzowanej (ICDMP). W połowie lat 90. XX wieku do badania oddziaływań laser-plazma zastosowano zbu-

dowany w IFPiLM laser neodymowy dużej mocy (1 TW). W szczególności badano nietermiczne przyspieszanie jonów intensywnym impulsem laserowym. W tym okresie rozpoczęto też współpracę z Instytutem Fizyki Czeskiej Akademii Nauk wykorzystując działający tam laser jodowy PERUN i zbudowane w IFPiLM układy diagnostyczne do badań plazmy laserowej. Współpraca z tym Instytutem w zmienionej formie jest kontynuowana do chwili obecnej z bardzo dobrymi rezultatami. W latach 90. ubiegłego wieku w Instytucie wykonywano też we współpracy międzynarodowej analizy numeryczne w zakresie fizyki plazmy i fuzji w układach tokamak. Badania eksperymentalne i teoretyczne fuzji w różnych układach MCF w tym czasie, inaczej jak w IFPiLM, intensywnie rozwijano w wielu laboratoriach przewidując przyszłe ich wykorzystanie w energetyce. Po roku 2000 Instytut realizuje większość prac w ramach programów europejskich przy wsparciu krajowymi środkami na naukę. Zakres i ważniejsze wyniki tych prac są przedstawione poniżej.

Pozycja Instytutu po roku 2000

W latach 2001-2015 Instytut podlegał Ministerstwu Gospodarki. Obecnie jest nadzorowany przez Ministerstwo Energii. Badania w IFPiLM są dofinansowywane przez MNiSW (w ramach dotacji statutowej i projektów badawczych) oraz w ramach projektów europejskich. W Instytucie jest zatrudnionych 85 pracowników (w tym 45 naukowców). Od września 2010 r. dyrektorem Instytutu jest dr hab. Andrzej Gałkowski. W 2013 r. IFPiLM uzyskał kategorię „A” na podstawie oceny dokonanej przez Komitet Ewaluacji Jednostek Naukowych. Szczególnie wysoko oceniono wyniki badań mierzone liczbą i jakością publikacji, oraz zakres i efektywność międzynarodowej współpracy naukowej.



Fot. 2. Budynek laboratoryjny w IFPiLM
Phot. 2. The laboratory building in IPPLM

Co dwa lata przemiennie IFPiLM organizuje ważne spotkania międzynarodowe: konferencję PLASMA - International Conference on Research and Applications of Plasmas (w ostatnich latach w Warszawie) i Letnią Szkołę „Kudowa Summer School „Towards Fusion Energy”. Oba te spotkania są poświęcone fizyce plazmy i fuzji jądrowej. Instytut od lat prowadzi różnorodną działalność popularyzacyjną w zakresie fizyki plazmy i fuzji. Młodzież zapoznaje się z tą tematyką na warsztatach „Stany Skupienia – nauka i sztuka” organizowanych we współpracy z Teatrem Go, którego siedziba znajduje się na terenie Instytutu.

Badania wyładowań plazmowych w tokamakach

W ostatnich latach wzrasta udział zespołu naukowców z IFPiLM w badaniach prowadzonych na europejskich układach z magnetycznym utrzymaniem plazmy (MCF) w ramach projektów objętych od roku 2005 programem Wspólnoty Euratom. W europejskim tokamaku JET w Culham w Wielkiej Brytanii są analizowane zjawiska plazmowe za pomocą symulacji komputerowych dla konkretnych wyładowań. Wyniki obliczeń dotyczących wpływu na te wyładowania transportu zanieczyszczeń w plazmie oraz wprowadzanych domieszek są porównane z danymi eksperymentalnymi dla analizowanych wyładowań w tym układzie.



Fot. 3. Wnętrze komory europejskiego tokamaka JET (Culham, W.B.)
Phot. 3. An internal view of the European tokamak JET (Culham, U.K.)

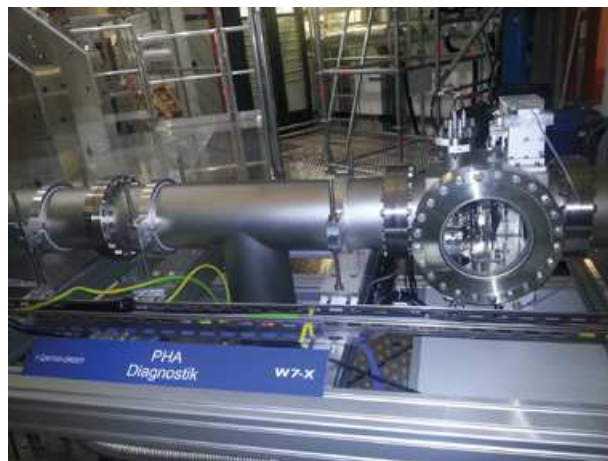
Na tym tokamaku wykonano też kalibrację układów przeznaczonych do pomiarów promieniowania w zakresie ultrafioletu próżniowego (VUV). Na podstawie analizy zmierzonych widm określano koncentrację metalicznych zanieczyszczeń w plazmie dla różnych scenariuszy wyładowań. Wyniki pomiarów wyładowań w tokamaku ASDEX UG w Garching w Niemczech porównano z symulacjami komputerowymi wykonanymi z użyciem opracowanego w IFPiLM kodu COREDIV. Pomiar i obliczenia przeprowadzono dla plazmy deuterowej z wprowadzanymi domieszkami oraz przy stosowaniu grzania plazmy mikrofalami (ICRH). Wyniki pomiarów służą optymalizacji systemów grzewczych oraz opracowaniu scenariuszy grzania plazmy w tokamaku ze ścianą metaliczną np. w tokamaku ITER budowanym w Cadarache we Francji. Na podstawie pomiarów spektroskopowych badano wpływ asymetrii sznura plazmowego w tokamaku TCV w Lozannie na transport zanieczyszczeń w plazmie. W roku 2016 wykonane zostały pierwsze pomiary promieniowania X emitowanego z plazmy w stellaratorze W7-X w Greifswaldzie w Niemczech z użyciem wykonanego w IFPiLM układu do analizy amplitud impulsów z detektorów rejestrujących to promieniowanie (układ Pulse Height Analysis – PHA).

Modelowanie procesów fizycznych w układach z magnetycznym utrzymaniem plazmy

Modelowanie procesów w układach termojądrowych jest niezbędne do poznawania zachodzących w nich procesów, interpretacji wyników eksperymentów i projektowania nowych układów fuzyjnych. Po przystąpieniu IFPiLM do programu EURATOM w 2005 r. zespół naukowców z Instytutu bierze aktywny udział we współtworzeniu wielu komponentów nowej platformy numerycznej przeznaczonej do modelowania plazmy w tokamaku (Integrated Tokamak Modelling - ITM). Opracowane w Instytucie kody COREDIV i TECXY zainstalowano na platformie ITM, umożliwiając wykorzystanie ich przez inne zespoły uczestniczące w programie EURATOM. Kod COREDIV stosowano do symulacji wyładowań w tokamakach JET i ASDEX UG uzyskując bardzo dobrą zgodność wyników obliczeń z rezultatami pomiarów. Te wyniki posłużyły do ekstrakcji parametrów plazmy do warunków w budowanych obecnie tokamakach ITER we Francji i JT-60SA w Japonii oraz w projektowanym tokamaku-reaktorze DEMO. Dla układu ITER modelowano wpływ transportu domieszek w plazmie na reakcję syntezy i na straty promieniste energii. Realizowane w IFPiLM symulacje komputerowe za pomocą kodu TECXY dotyczące układu DEMO mogą służyć wyborowi materiałów dla ściany w komorze reaktora i do określenia konfiguracji magnetycznych tzw. dywertora (układ służący usuwaniu zanieczyszczeń z komory tokamaka). W układach typu stellarator złożona geometria pola magnetycznego, inna niż w tokamakach, wymaga stosowania w obliczeniach specjalnych kodów. W IFPiLM opracowywany jest trójwymiarowy kod płynowy, do badania ucieczki jonów utrzymywanych w złożonej konfiguracji pola magnetycznego w stellaratorze W7-X.

Opracowywanie i zastosowania diagnostyk dla tokamaków i stellaratorów

W Instytucie od początku realizacji projektów EURATOM opracowywane są we współpracy z innymi laboratoriami układy pomiarowe do badania promieniowania X i neutronów emitowanych z plazmy w tokamakach i stellaratorze W7-X. Dla tego stellaratora są przygotowywane dwa układy do badania promieniowania X. System PHA zaprojektowany, zbudowany i przetestowany w IFPiLM od roku 2015 jest stosowany do pomiaru promieniowania X na stellaratorze W7-X, jak wspomniano wyżej. Drugi system przeznaczony do pomiaru temperatury plazmy wykorzystuje filtry krawędziowe umieszczone przed detektorami (układ MFS - Multi-Foil Spectrometry). W roku 2017 układ ten będzie uruchamiany. Przy projektowaniu systemów diagnostycznych wykorzystywany jest stworzony w IFPiLM specjalny kod RayX symulujący widma energetyczne promieniowania X.



Fot. 4. Układ diagnostyczny PHA przygotowany w IFPiLM dla stellaratora W7-X w Greifswaldzie (Niemcy)

Phot. 4. The X-ray diagnostic system with pulse height analysis (PHA) prepared for stellarator W7-X in Greifswald (Germany)

W IFPiLM opracowano i zbudowano detektory gazowe typu GEM (Gas Electron Multiplier) dla diagnostyki promieniowania X w układzie JET w celu rejestracji linii wolframu i niklu. Prace realizowano we współpracy z zespołami z Uniwersytetu Warszawskiego i Politechniki Warszawskiej wykorzystując także wyniki uzyskane z CERN. Detektory GEM zostały zainstalowane na układzie JET (diagnostyka KX1) i zintegrowane z systemem zbierania danych. IFPiLM, wspólnie z zespołami z Politechniki Warszawskiej, z Uniwersytetu im. Mikołaj Kopernika w Toruniu i z Centrum Badawczego CEA w Cadarache, realizuje projekt związany z przygotowaniem diagnostyki tomograficznej z detektorami GEM dla tokamaka WEST we Francji. W 2015 r. model takiego detektora GEM zainstalowano na tokamaku ASDEX UG w celu przetestowania go w trakcie wyładowania plazmowego.



Fot. 5. Gazowy detektor GEM zbudowany w IFPiLM zainstalowany na tokamaku ASDEX UG w Garching, Niemcy

Phot. 5. The gas electron multiplier build in IFPiLM (installed on ASDEX UG tokamak in Garching, Germany)

W ramach przygotowania badań w układzie JET z użyciem mieszaniny DT (kampania (DTE2) zespół z IFPiLM wspólnie z innymi zespołami opracowuje metodę kalibracji diagnostyk neutronowych, w których stosuje się aktywność neutronami wybranych izotopów. Do kalibracji ak-

tywacyjnej neutronami o energii 14 MeV (generowanych w reakcji D+T) wykorzystano generator w laboratorium w Anglii. Stosując tę metodę kalibracji wyznaczono charakterystyki neutronów dla generatora neutronów w NCBJ i opracowano metodę monitorowania neutronów generowanych w układach plasma focus. Aktywności radionuklidów weryfikowane są za pomocą obliczeń numerycznych.

Badania oddziaływania plazma-ściana

Oddziaływanie plazmy z elementami wewnętrznymi komory tokamaka jest zjawiskiem negatywnym wpływającym na prawidłowy przebieg wyładowania w tym układzie. Proces ten powoduje produkcję zanieczyszczeń przenikających do plazmy. Są one też deponowane w formie tzw. kodepozytu na elementach wewnątrz komory tokamaka. Kodepozyt może zawierać deuter i tryt pochodzące z plazmy. Od roku 2005 realizowano w IFPiLM w ramach programu EURATOM projekty dotyczące usuwania kodepozytu za pomocą laserów impulsowych. Ten proces jest optymalizowany z użyciem spektrometru optycznego, diagnostyk jonowych oraz kamery optycznej. Badane są próbki pochodzące z komór tokamaków TEXTOR w Jülich w Niemczech i ASDEX UG oraz próbki wzorcowe. Badano również wytwarzanie pyłu towarzyszące laserowemu usuwaniu kodepozytu. Taki pył powstający w komorze tokamaka musi być kontrolowany, gdyż wpływa niekorzystnie na wyładowanie plazmowe w tym układzie. Pionierskie zastosowanie diagnostyk jonowych (kolektory i analizator energii jonów) zwiększyło efektywność prowadzonych badań. Stosowana jest metoda LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy), która umożliwia kontrolowanie usuwania kodepozytu na podstawie analizy widma promieniowania emitowanego ze zjonizowanego materiału. Uzyskano ważne wyniki stosując do tych badań dwuimpulsowy laser neodymowy i laser światłowodowy. Badania są realizowane we współpracy z zespołami z takich instytucji jak: ENEA Włoska Narodowa Agencja Nowych Technologii i Energetyki; Forschungszentrum Jülich w Niemczech, Centrum CIEMAT w Hiszpanii, Politechnika Warszawska i Instytut Fizyki Plazmy w Republice Czeskiej.



Fot. 6. Układ eksperymentalny do badania laserowego usuwania kodepozytu z płytek wyjętych z komory tokamaka

Phot. 6. An experimental arrangement for investigation of laser-induced co-deposit removal from in-vessel tokamak components

Inne badania oddziaływania plazma-ściana realizowane są z użyciem układu plasma focus PF1000U, w którym strumień plazmy jest kierowany na próbki, symulujące elementy komory tokamaka. Efekty oddziaływania plazma-próbka są badane za pomocą diagnostyk materiałowych. Prace realizowane były w ramach projektu NCBiR, projektów Euratom i projektów sponsorowanych przez Międzynarodową Agencję Energii Atomowej w Wiedniu.

Badania plazmy laserowej i fuzji laserowej

W Instytucie Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy przez 40 lat prowadzone są badania oddziaływań laser-materia i badania fuzji laserowej rozpoczęte w WAT na początku lat 70. w zespole, który włączono do IFPiLM utworzonego 1 stycznia 1976 r. W ostatnich latach nastąpił znaczny rozwój tych badań w ramach projektów europejskich, takich jak: projekty konsorcjum LaserLab-Europe, projekt HiPER (opracowanie i budowa europejskiego lasera fuzyjnego) i projekt ToIFE (w ramach konsorcjum EUROfusion). Większość badań realizowana jest z użyciem lasera PALS w Pradze przy zastosowaniu zbudowanych w IFPiLM układów do pomiaru jonów i promieniowania X emitowanych z plazmy laserowej, 3-kadrowego interferometru, polaro-interferometru oraz innych układów. Szczególnie wartościowe wyniki są uzyskiwane w wyniku badań przyspieszania jonów albo makrocząstki w opracowanym w IFPiLM akceleratorze LICPA (Laser-Induced Cavity Preassure Acceleration) oraz badań strumieni plazmy laserowej z użyciem interferometru i polarymetru. Część tych badań dotyczy optymalizacji różnych opcji fuzji laserowej. Równoległe z badaniami eksperymentalnymi od lat prowadzone są analizy teoretyczne i symulacje numeryczne dotyczące tej tematyki.



Fot. 7. Aparatura badawcza w Laboratorium Laserów Wielkiej Mocy w IFPiLM

Phot. 7. The experimental equipment in the High Power Laser Laboratory in IPPLM

W latach 2011-2013 w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Mazowieckiego zbudowano i zakupiono nowoczesną aparaturę pomiarową dla Laboratorium Laserów Wielkiej Mocy w IFPiLM, wyposażonego wcześniej w laser wielkiej mocy (10 TW) zakupiony ze środków projektu HiPER z udziałem środków krajowych.

Badania i zastosowania układu plasma focus PF1000U oraz generatorów prądowych

Układy plasma focus służą do generacji gęstej i gorącej plazmy w wyniku wyładowania silnoprądowego. W takiej plazmie mogą zachodzić reakcje syntezy jądrowej, intensywne emisje promieniowania X oraz elektronów, jonów i strumieni plazmowych. Wyniki wieloletnich badań wyładowań w układzie plasma focus PF1000U w IFPiLM posłużyły do wyjaśnienia większości zjawisk plazmowych występujących w tych urządzeniach. Badania w dużym stopniu są dofinansowywane środkami z projektów Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej (IAEA) w Wiedniu i z projektów EUROfusion.



Fot. 8. System interferometry stosowanego do badania plazmy w układzie plasma focus PF1000U w IFPiLM

Phot. 8. An interferometric system applied for studies of plasma discharge in the plasma focus PF1000U device in IPPLM

W ramach projektów fuzyjnych układ PF1000U jest wykorzystywany do testowania i skalowania diagnostyk przygotowywanych dla tokamaków i stellaratora W7-X. W szczególności wykonuje się bezwzględne skalowania neutronowych diagnostyk aktywacyjnych dla tokamaków i badania aktywacji materiałów stosowanych w budowanym tokamaku ITER. Oddziaływania generowanych w układzie PF1000U intensywnych strumieni gorącej plazmy z różnego rodzaju tarczami służy do symulowania podobnych oddziaływań plazmy na ścianę w komorze tokamaka.

W Instytucie działa Laboratorium Symulowanych Wyładowań Atmosferycznych, w którym na zasadach komercyjnych sprawdzany jest poziom odporności różnych urządzeń na skutki wyładowań piorunowych. Do tych prac stosowany jest zestaw generatorów wytwarzających im-

pulsy prądowe symulujące wyładowanie atmosferyczne. Badano m.in. odporność na skutki takich wyładowań elementów konstrukcyjnych aparatów latających.

Opracowania, budowa i badania plazmowych silników satelitarnych

W 2008 r. rozpoczęto w IFPiLM prace koncepcyjne, konstrukcyjne i badawcze dotyczące prototypów plazmowych napędów satelitarnych, które są pewną kontynuacją badań realizowanych kilkanaście lat wcześniej w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN. Jako zaplecze eksperymentalne dla tych prac w roku 2013 utworzono w IFPiLM Laboratorium Plazmowych Napędów Satelitarnych PLaNS wyposażone w komorę próżniową i aparaturę pomiarową do testowania silników satelitarnych. W laboratorium badane są plazmowe silniki satelitarne typu Halla i silniki impulsowe PPT (Pulsed Plasma Thrusters).



Fot. 9. Laboratorium PLaNS przeznaczone do badań plazmowych silników satelitarnych

Phot. 9. PLaNS - Laboratory for development of small plasma propulsions in IPPLM

W ramach projektu KLIMT finansowanego przez Europejską Agencję Kosmiczną opracowano prototyp silnika Halla, w którym zamiast kryptonu zastosowano tańszy ksenon. Oprócz testów wykonanych w laboratorium PLaNS drugą i trzecią wersję prototypu tego silnika sprawdzono w laboratorium ESA-ESTEC w Holandii. Europejski projekt μ PPT (7PR) obejmował opracowanie i przetestowanie impulsowego silnika typu PPT zasilanego ciekłym polimerem zamiast stałym teflonem. Dwa modele prototypowe takiego silnika były badane w laboratorium PLaNS. Uzyskano prawie dwukrotnie większą sprawność niż w klasycznych silnikach zasilanych teflonem. Proces konstrukcji prototypów silników satelitarnych, w laboratorium PLaNS był wspierany analizami wykonanymi za pomocą opracowanego kodu hydrodynamicznego HETMAN oraz specjalnego kodu PIC (Particle In Cell) do opisu ruchu elektronów w polu magnetycznym.

*prof. dr hab. Jerzy Wołowski z zespołem współpracowników,
Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy,
Warszawa*