

3 Projekty Programu H2020

3.1 LaserLab: Badania plazmy ablacyjnej z zastosowaniem femtosekundowej polaro-interferometrii w kontekście fuzji jądrowej z inercyjnym utrzymaniem plazmy i astrofizyki

T. Pisarczyk, tadeusz.pisarczyk@ifpilm.pl

Zgodnie z opisem projektu, w 2016r. przygotowywane były dwa eksperymenty na układzie laserowym PALS (Prague). Pierwszy eksperyment dotyczy badań spontanicznych pól magnetycznych i planowany był na grudzień 2016r., natomiast drugi - związany z testowaniem nowych metod wytwarzania strumieni plazmy namagnetyzowanej - miał się odbyć w kwietniu bieżącego roku.

Jednakże, zaplanowane i przygotowane badania na PALS nie zostały zrealizowane w 2016r. z powodu problemów zdrowotnych kierownika projektu – operacji stawu biodrowego. Za zgodą strony czeskiej oraz MNiSW sesje eksperymentalne na PALS zostały przesunięte, co potwierdza aneks do umowy wykonania projektu. Nowy harmonogram projektu przedstawiony jest w załączniku do aneksu. Zgodnie z nowym harmonogramem I sesja eksperymentalna została przesunięta z grudnia 2016 na kwiecień 2017r., natomiast druga, która miała być w kwietniu 2017r., zaplanowana jest na październik 2017r.

W ramach przygotowań do tych eksperymentów zostały zrealizowane zakupy sprzętu i aparatury niezbędne do przygotowania i instalacji diagnostyk przewidzianych do zrealizowania badań. Szczegółowe informacje odnośnie zakupionego sprzętu przedstawione są w wykazie punkcie 2). Jedynym odstępstwem od planowanych zakupów jest pozycja nr 2 (tarcze laserowe typu „SNAIL”), z której zrezygnowano z powodu braku zadawalających ofert zakupu lub wykonania takich tarcz (zarówno przez firmy krajowe jak i zagraniczne). Dlatego w IFPiLM podjęto próbę wykonania tarcz typu „SNAIL”, która zakończyła sukcesem. Opracowana technologia umożliwia na obecnym etapie wykonanie tarcz ślimakowych o minimalnej średnicy około 1000 μm i grubości 20 μm , rys. 1. Tarcze o mniejszej średnicy wydają się być realne do wykonania po udoskonaleniu technologii.

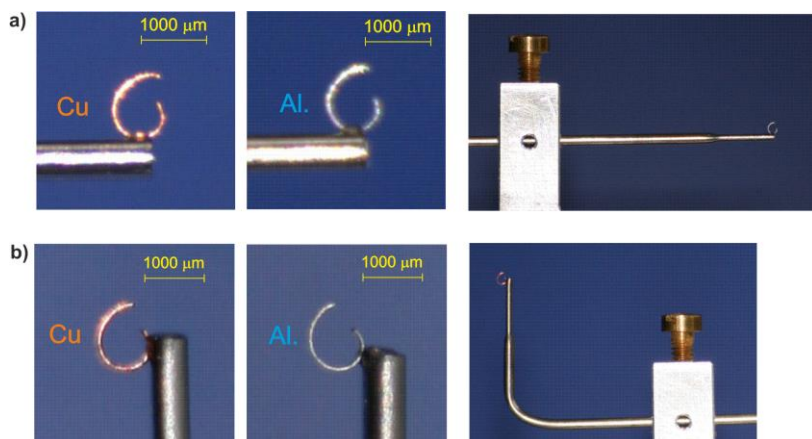
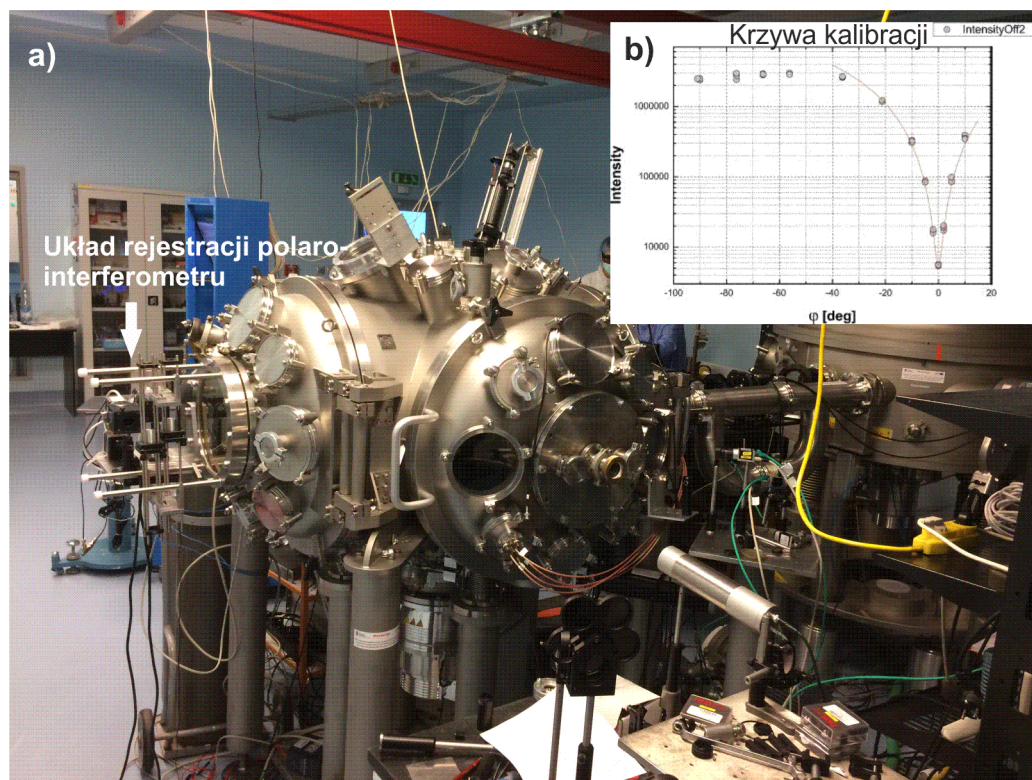


Fig. 1 Fotografie tarcz typu SNAIL i sposób ich zamocowania, wykonane w IFPiLM.

Zakupiony sprzęt oraz elementy optyczne niezbędne do modernizacji 2-kanalowego polaro-interferometru, po kątem zastosowania go w badaniach proponowanych w projekcie, a w szczególności dotyczących nowych metod wytwarzania plazmy namagnetyzowanej, był testowany na układzie lasera femtosekundowego w IFPiLM oraz laboratorium PALS.

W przypadku prac przygotowawczych prowadzonych w IFPiLM sprawdzana była jakość zakupionych elementów optycznych w celu uzyskania jak największej czułości w kanale polarymetrycznym 2-kanalowego polaro-interferometru. Widok eksperymentu na którym był testowany był polaro-interferometr, pokazany jest na fotografii rys. 2a. Przykładowa krzywa kalibracji kanału polarymetrycznego, uzyskana w testach przy oświetleniu układu 2-harmoniczną promieniowania lasera Ti:Sa, przedstawiona jest na rys. 2b.



Rys. 3 Widok eksperymentu na którym testowane były elementy 2-kanalowego polaro-interferometru (a) oraz przykładowa krzywa kalibracji kanału polarymetrycznego uzyskana dla oświetlenia polaro-interferometru 2ω lasera Ti:Sa.

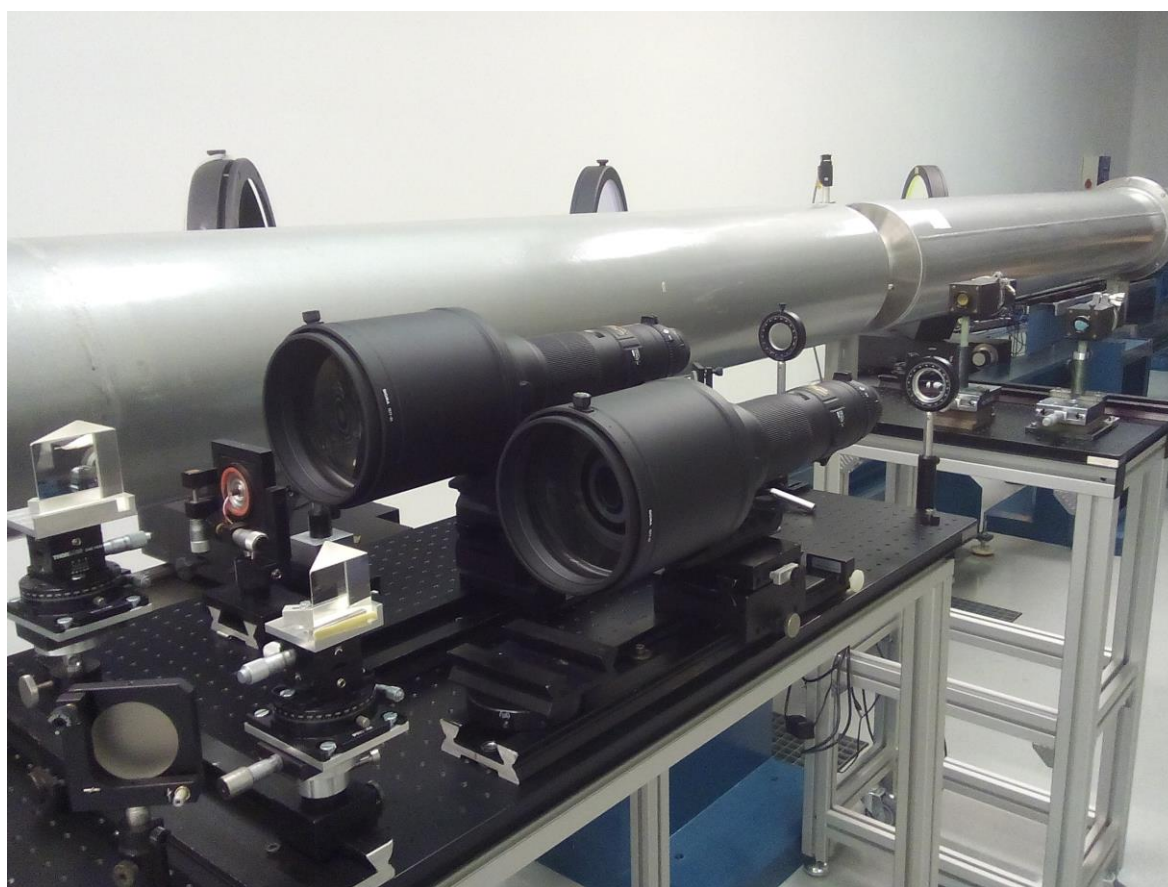
W ramach prac przygotowawczych, zrealizowanych na PALS, zestawiono 2-kanalowy polaro-interferometr w zmodernizowanej wersji z nowymi obiektywami (rys. 3) i optymalizowano warunki rejestracji obrazów (poprzez dobór parametrów elementów optycznych i ich rozmieszczenie w kanałach), biorąc pod uwagę uzyskanie odpowiedniej szerokości prążków interferencyjnych i wystarczająco dużego pola interferencji przy wymaganym powiększeniu układu. Układ testowano w dwóch opcjach w których może pracować 2-kanalowy polaro-interferometer: (i) rejestracji polarogramu i interferogramu oraz (ii) rejestracji kompleksowego interferogramu (zamiast polarogramu) i interferogramu. Widok układu rejestracji z nowymi obiektywami na stanowisku testowym przedstawia fotografia - rys. 3.

W ramach przygotowań do sesji eksperymentalnej został opracowany i rozesłany do uczestników szczegółowy plan badań, obejmujący:

- ✓ krótki opis proponowanych eksperymentów i celów do osiągnięcia,

- ✓ schematy eksperymentu oraz rozmieszczenie przewidzianych diagnostyk w komorze plazmowej,
- ✓ warunki eksperymentalne odnośnie parametrów wiązki laserowej generującej plazmę oraz sposobu zogniskowania jej na tarczach, a także geometrii oświetlenia tarcz w przypadku eksperymentu dwuwiązkowego (dotyczy tarcz open-book),
- ✓ zakres pomiarowy parametrów plazmy dla diagnostyk przewidzianych w eksperymentach, a także ilość strzałów laserowych o parametrach wymaganych do zrealizowania zaplanowanych opcji w eksperymentach.

Sesja eksperymentalna na PALS planowana jest dniami: 3 - 21 kwietnia 2017r.



Rys. 3 Widok układu rejestracji 2-kanalowego polar-interferometru na stanowisku testowym w Centrum Laserowym PALS.

4 Projekty Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej

4.1 Badania materiałów poddanych radiacji w urządzeniu PF-6, do zastosowania w inercyjnej fuzji jądrowej w warunkach zapłonu oraz do innych możliwych zastosowań

R. Miklaszewski, rysard.miklaszewski@ifpilm.pl

I. Opis

W pierwszym roku realizacji Projektu (2015-2016) zespół IFPiLM planował wykonanie następujących zadań:

1. Przeprowadzić szereg eksperymentów, w których generator strumieni plazmy PF-6 wykorzystany zostanie do naświetlania materiałów uważanych za perspektywiczne przy budowie komory reaktora fuzyjnego, bazującego na koncepcji utrzymania bezwładnościowego (inertial confinement).
2. Wziąć udział w badaniach porównawczych prowadzonych dla identycznych próbek materiałów poddawanych obciążeniom termicznym w innych ośrodkach naukowych biorących udział w programie CRP (tzw. round robin tests).
3. Prowadzić badania podstawowe procesu oddziaływania strumieni plazmy z powierzchniami różnych materiałów oraz dla różnych reżimów naświetlania (nanosekundowych i milisekundowych) z wykorzystaniem nowoczesnego kompleksu diagnostycznego laboratorium Plasma-Focus IFPiLM.
4. Ważnym elementem realizacji zadań Projektu będzie rozwój bazy eksperymentalnej laboratorium Plasma-Focus niezbędny dla prowadzenia badań przewidzianych w Projekcie.

Ad 1)

Kampanie eksperymentalne prowadzone w 2016 poprzedzone zostały niezbędnymi pracami modernizacyjnymi generatorów plazmy oraz układów diagnostycznych.

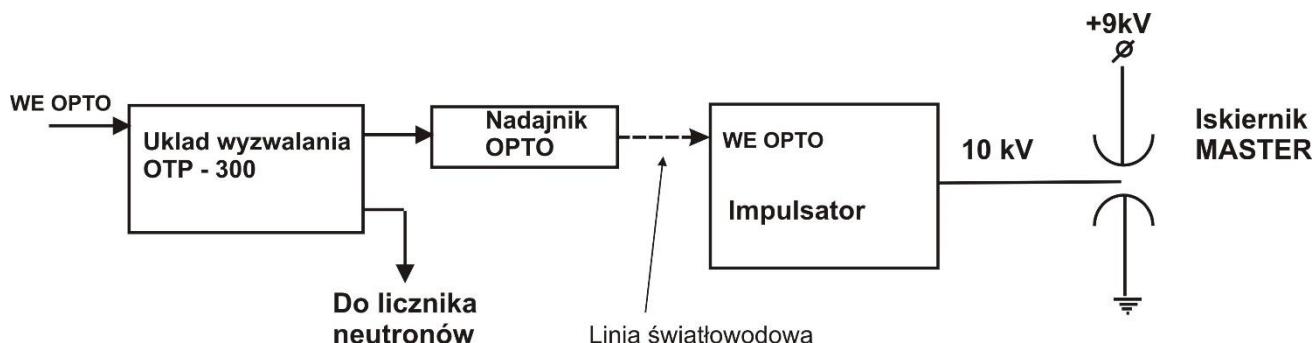
W lutym 2016 poważnemu uszkodzeniu uległa głowica generatora PF-6 przystosowana do badań materiałowych. Głowica zastała rozcięta (Rys.1) w celu stwierdzenia przyczyny awarii. Okazało się, znacznej erozji uległo czoło anody oraz uszkodzony został izolator ceramiczny pomiędzy anoda o katodą (obudowa głowicy). O ile erozyjne ubytki można by uzupełnić, to niestety uszkodzenie izolatora nie może zostać naprawione i zaistniała konieczność przystosowania do badań materiałowych zapasowej głowicy dedykowanej wcześniej i optymalizowanej dla emisji neutronów.

Specjalna komora zapewniająca dostęp urządzeń diagnostycznych rejestrujących proces oddziaływania plamy z powierzchnią materiału zamontowana została na głowicy neutronowej, w której górna część hermetycznej obudowy została odcięta na odpowiedniej wysokości.



Rys.1. Uszkodzona głowica generatora PF-6 po odcięciu pokrywy. Widoczna erozja czoła anody.

W ramach przygotowania generatora PF-6 do realizacji zadań w ramach nowego Projektu zmodyfikowano układ zasilania i wyzwalania generatora impulsów prądowych. Dotychczasowy układ oparty na samoistnym przebiegu iskiernika głównego generatora (po osiągnięciu zadanego napięcia ładowania) zamieniono systemem wymuszającym wyładowanie za pomocą optoelektronicznie sterowanych impulsów zewnętrznych. Pozwala to na synchronizację układów diagnostycznych (interferometr laserowy oraz ultraszybka kamera rejestrująca obrazy w zakresie miękkiego promieniowania X) z wyładowaniem plazmowym z dokładnością $\pm 2-3$ ns.



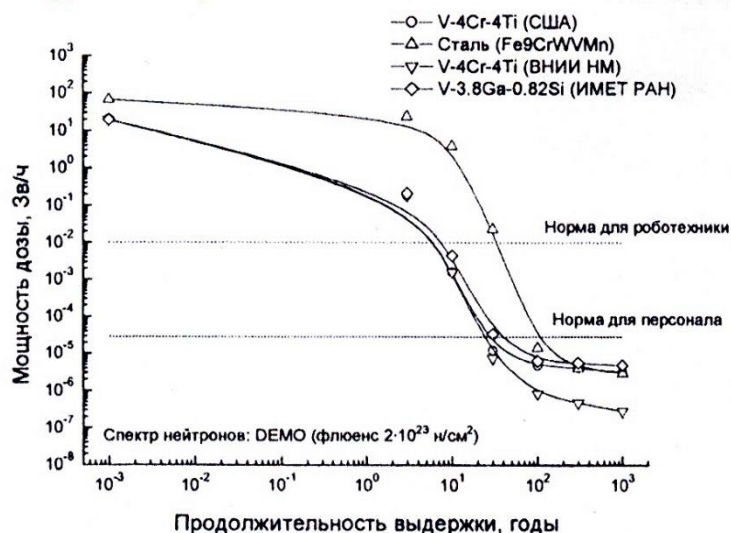
Rys.2. Schemat nowego układu synchronizacji diagnostyk optycznych z inicjacją wyładowania generatora PF-6.

W 2016 roku uzyskano próbki (6 sztuk) nowoczesnych, nisko-aktywacyjnych stali typu ODS (Oxide Dispersion Strengthened) w których tlenki chromu wprowadzane są do stali w formie nano-cząstek. Próbki ODS wyprodukowane zostały w laboratoriach w Japonii oraz Federacji Rosyjskiej i charakteryzują się (według założeń) wysoką odpornością radiacyjną. W ramach grantu IAEA CRP zadaniem zespołu IFPiLM jest zbadanie odporności powierzchni tych nowych materiałów na obciążenia wywołane intensywnymi strumieniami plazmy oraz strumieniami jonów. Odpowiednio przygotowane próbki naświetlane były w komorach generatorów PF-6 oraz PF-1000 w odległości odpowiednio 6 cm oraz 50 cm od powierzchni anody.

W 2016 przeprowadzono serię naświetleń próbek wykonanych z wanadu, materiału uważanego za perspektywiczny materiał konstrukcyjny dla reaktorów fuzyjnych ze względu na dobre własności mechaniczne połączone z niższą (w porównaniu z nisko-aktywacyjnymi stalami) aktywność

wzbudzoną strumieniami neutronów o widmie odpowiadającym warunkom reaktora DEMO, oraz szybszemu zanikowi indukowanej dawki.

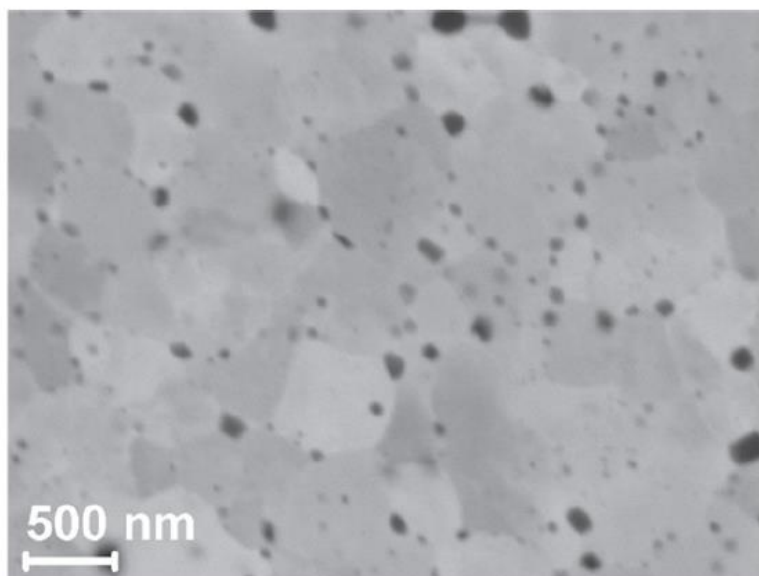
Wnioski te wynikają, między innymi, z badań przeprowadzonych i opublikowanych przez zespół instytutu IMET(Moskwa), współuczestnika programu CRP. Na rys. 2 przedstawiono wykres aktywności wzbudzonej trzech stopów wanadu oraz stali nisko-aktywacyjnej w funkcji czasu po naświetleniu strumieniem neutronów, obrazujący wyżej opisane własności.



Rys. 2. Zanik wzbudzonej aktywności próbek wykonanych ze stopów wanadu oraz stali nisko-aktywacyjnej. (Иванов Л.И., Пименов В.Н., Платов Ю.М. Сплавы на основе ванадия – перспективные конструкционные материалы для реакторов термоядерного синтеза, Цветные металлы, 2011, №5, 53 – 58.)

Pierwsza seria naświetlań próbek wykonanych z wanadu miała na celu rozpoznanie zachowania powierzchni z szerokim zakresem obciążeń. Próbki wykonane z wanadu montowane były w komorze eksperymentalnej generatora PF-6 w odległości 7 cm od anody i poddane obciążeniom powstałym w wyniku 4, 5, 12, 20 i 22 wyładowań.

W 2016 roku kontynuowano rozpoczęte w 2015 roku systematyczne badania wolframu i jego stopów we współpracy z Instytutem Fizyki Plazmy Czeskiej Akademii Nauk w Pradze (IPP CAS). W 2016 roku zespół IPP CAS dostarczył ponownie próbki stopu wolframu z tlenkiem itru (W-1%Y₂O₃) w celu naświetlenia ich w komorze generatora PF-6, w warunkach niskiej intensywności obciążenia. Dostarczone próbki uzyskane zostały z proszku wolframowego ((średnia średnica ziarna 1.2 μm) zmieszanego w atmosferze argonu w wolframowym młynie kulowym z proszkiem tlenku itru (średnica ziaren 0.6 μm). Mieszanina proszków poddana została konsolidacji metodą „spark plasma sintering” w temperaturze 1800 stopni, przy ciśnieniu 70 MPa i w czasie 2 minut. Uzyskana próbka zawiera drobne ziarna (< 200 nm) z rozproszonymi cząstkami Y₂O₃ zlokalizowanymi na granicach ziaren oraz w ich środku (czarne punkty na rys.3). W celu uzyskania niskiej intensywności obciążenia powierzchni, próbki umieszczone zostały w odległości 7 cm od czoła anody i zastosowano jedno oraz dwa wyładowania na próbkę.



Rys.3. Mikrostruktura próbek W-1%Y₂O₃ przed naświetlaniem (ciemne punkty odpowiadają wtrąceniom Y₂O₃)

Naświetlone w generatorach PF próbki testowanych materiałów badane są za pomocą specjalistycznej aparatury metalograficznej. Ponieważ IFPiLM nie posiada takiej aparatury (mikroskopy elektronowe jak też najbardziej zaawansowane „atomic-probe tomography”), naświetlone próbki przekazane zostały do Instytutu Metalurgii i Badań Materiałowych (Moskwa) oraz Instytutu Fizyki Plazmy Czeskiej Akademii Nauk (próbki wolframu).

Ad 2)

Identyczne próbki nisko-aktywacyjnych stali typu ODS (Oxide Dispersion Strengthened) oraz wanadu dostarczone zostały w ramach programu CRP do Instytutu Fizyki Plazmy Ukraińskiej Akademii Nauk w Charkowie (celem naświetlenia ich w generatorze plazmy QSPH), Instytutu Metalurgii i Badań Materiałowych w Moskwie (PF-10) oraz Wydziału Matematyki i Nauk Przyrodniczych Uniwersytetu w Tallinie (PF-12). Badania te to realizacja elementu programu IAEA CRP tzw. „round robin tests” w którym identyczne próbki poddawane są globalnie podobnym obciążeniom (lecz o różnych charakterystykach spektralnych) w różnych urządzeniach a ich wyniki porównywane między sobą.

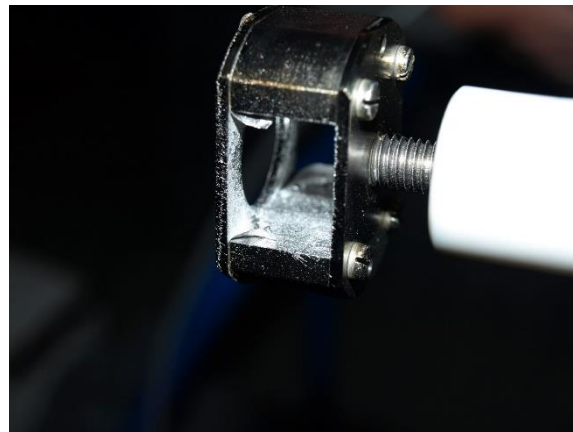
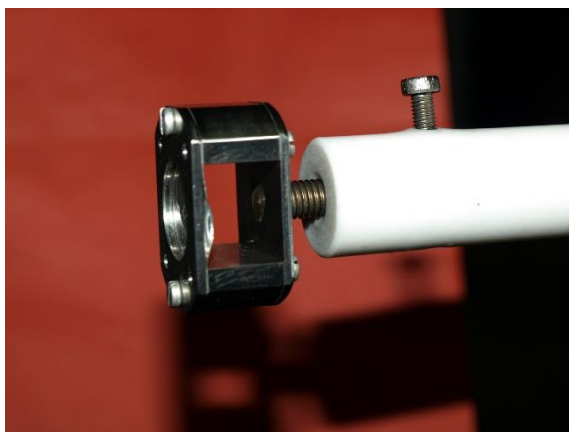
Ad 3)

Poza tradycyjnymi testami polegającymi na naświetlaniu próbek różnych materiałów strumieniami plazmy oraz wiązkami prędkich jonów w generatorach plazmy i następnie badaniu stopnia destrukcji powierzchni materiałów oraz zmiany ich parametrów (pkt.1), prowadzone były także badania podstawowe samego procesu oddziaływania. W ramach badań podstawowych w których wykorzystywano nowoczesny kompleks diagnostyczny laboratorium Plasma-Focus IFPiLM, przeprowadzono w 2016 dwa typy eksperymentów:

- Podjęto próbę określenia zmian strukturalnych w materiale spowodowanych przejściem przez próbkę fali uderzeniowej powstającej w wyniku obciążenia jej powierzchni strumieniem plazmy oraz wiązką jonów. W tym celu płytkę wykonaną z krzemu o rozmiarach: średnica- 70 mm, grubość - 1,5 mm umieszczono w odległości 11 cm od anody układu PF-1000. Istotą pomysłu jest wykorzystanie nowoczesnej metody pomiaru zmian mikro-przewodności w cienkich warstwach (Four-Line Probe Method), spowodowanych zmianami mikrostruktury krzemu w wyniku przejścia fali uderzeniowej. Wynik pierwszej próby nie był do końca satysfakcjonujący, ponieważ płytka

została poważnie uszkodzona i wyniki pomiarów mikro-przewodności nie były jednoznaczne. Planujemy powtórzenie tego eksperymentu w 2017 roku.

W celu zbadania procesu wyjścia fali uderzeniowej na tylną powierzchnię próbek poddanych standardowemu obciążeniu w naszych badaniach i testach materiałowych wykonano serię eksperymentów wykorzystując płytki tantalowe o grubości 150 μm i średnicy 30mm. Przygotowano specjalny uchwyt pozwalający zamocować płytki przed frontem anody układu Plasma-Focus w sposób zapewniający możliwość rejestracji obrazów interferometrycznych plazmy powstającej za ich tylną powierzchnią (rys.4.).

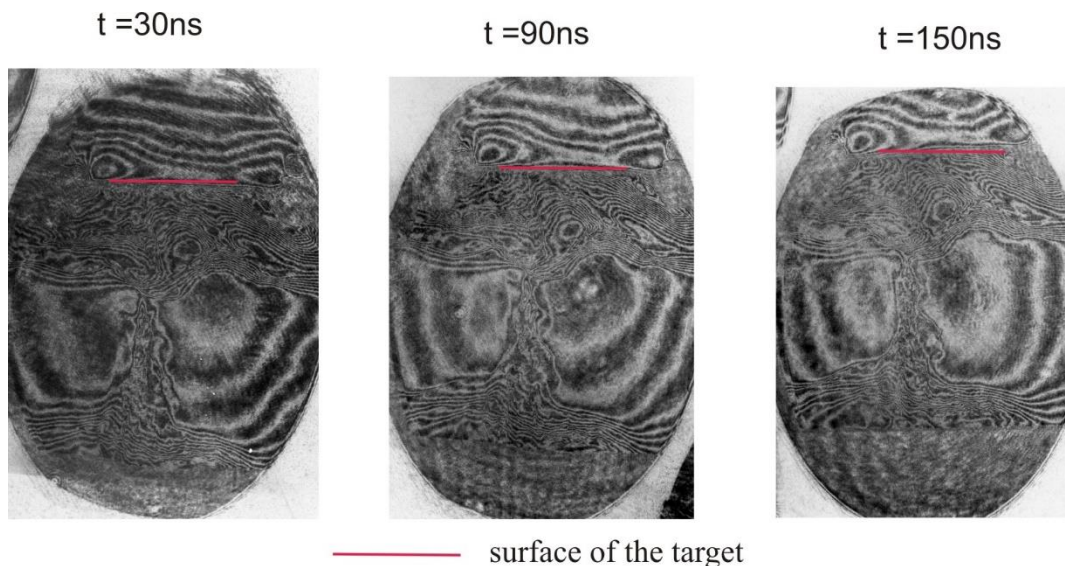


Rys.4. Uchwyt pozwalający zamocować płytki przed frontem anody układu Plasma-Focus w sposób zapewniający możliwość rejestracji obrazów interferometrycznych plazmy powstającej za ich tylną powierzchnią.

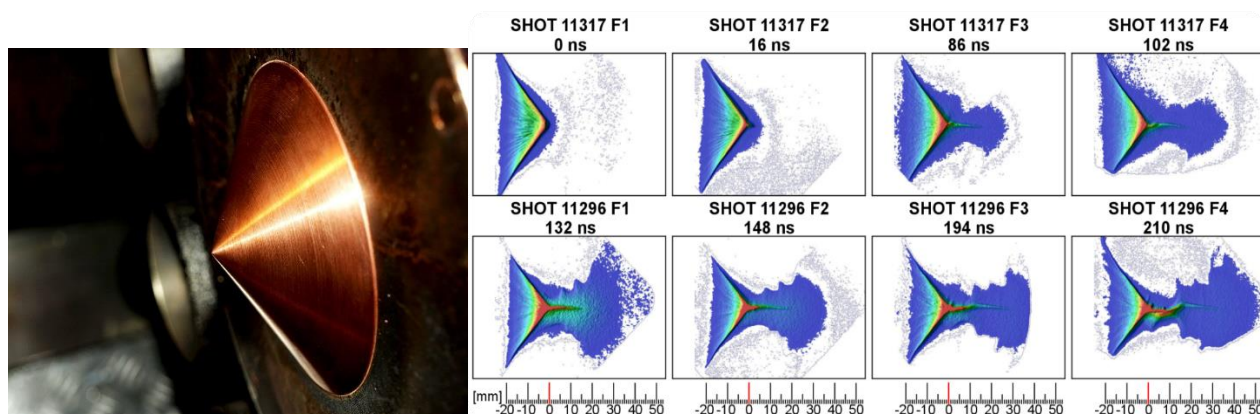
Na rysunku 5 przedstawiono sekwencję interferogramów obrazujących wyjście fali uderzeniowej na tylną powierzchnię płytki tantalowej. Uzyskane wyniki pokazują, że przy właściwej synchronizacji (opóźnieniu) interferometru w stosunku do wyładowania możliwe będzie przeprowadzenie pomiaru prędkości tylnej powierzchni płyty tantalowej ze względu na dużą różnicę czasów charakterystycznych wyładowania ($T = 6.49 \mu\text{s}$) oraz czasu działania interferometru ($t = 150 \text{ ns}$), konieczne będzie przeprowadzenie dodatkowo kilku pomiarów. W przypadku przedstawionym na Rys.5 ostatni kadr interferometru zarejestrowany został zbyt wcześnie, aby zmierzyć wiarygodnie prędkość propagacji.

W 2016 roku prowadzono także szereg badań o charakterze podstawowym mających związek długofalowymi celami Projektu:

- Kontynuowano badania podstawowe nad propagacją strumieni plazmy generowanych w układach typu Plasma-Focus. Między innymi kontynuowano prace nad generacją strumieni plazmy metalicznej (miedzianej) w wyniku profilowania czoła elektrody centralnej poprzez dodanie stożkowej wkładki na osi wyładowania (Rys.6)
- W 2016 roku prowadzono prace teoretyczne (modelowanie komputerowe) mające na celu wyjaśnienie zjawisk towarzyszących propagacji powłoki plazmowej wzdłuż pobocznic stożka, powodujących powstawanie stabilnych strumieni plazmy metalicznej.

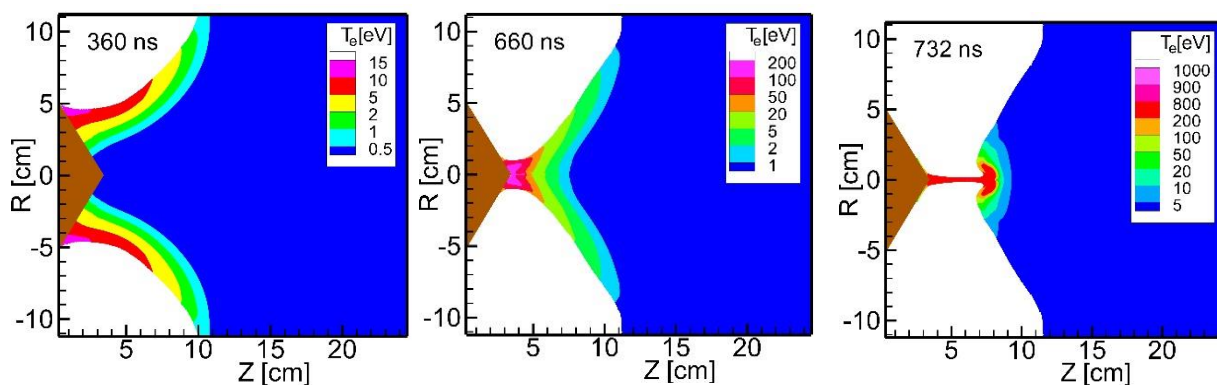


Rys.5. Interferogramy obrazujące wyjście fali uderzeniowej na tylną powierzchnię płytki tantalowej. Rzeczywisty czas rejestracji $T=6.49 \mu\text{s} + t$ (gdzie T czas liczony od maximum pochodnej prądu natomiast t – czas pierwszego z szesnastu kadrów interferometru).



Rys. 6. Stożkowa wkładka w elektrodzie centralnej układu PF ($\Phi=10\text{cm}$, $h=4 \text{ cm}$)

Rys.7. Powstawanie stabilnego strumienia plazmy metalicznej w trakcie wyładowania rejestrowane za pomocą ultraszybkiej kamery w zakresie miękkiego promieniowania X.



Rys.8. Wyniki modelowania komputerowego propagacji powłoki plazmowej wzdłuż pobocznic stożka i powstawania strumienia plazmy metalicznej.

Modelowanie komputerowe prowadzono za pomocą dwu-wymiarowego kodu komputerowego KAROL rozwiązującego układ równań nie-idealnej magnetohydrodynamiki uwzględniającego także oddziaływanie powłoki plazmowej z powierzchnią stożka. Przykładowe wyniki modelowania komputerowego przedstawiono na rys. 8. Artykuł prezentujący wyniki powyższych badań zatytułowany „Optimization of parameters of a copper plasma jet produced at the DPF-1000U device” jest praktycznie gotowy i w najbliższych dniach zostanie wysłany do czasopisma naukowego Laser & Particle Beams.

W kwietniu 2016 roku wspólnie z zespołem z Instytutu Kurchatowa w Moskwie prowadzono na układzie PF-1000 badania propagacji strumieni plazmy w gazie wypełniającym komorę w odległości 50-100 cm od miejsca ich powstania w tym powstawanie samo-uzgodnionych struktur plazma – pole magnetyczne. W badaniach wykorzystano zestaw diagnostyk laboratorium IFPiLM w tym wielokanałowy, optyczny układ śledzący propagację zaburzeń w dużych odległościach od elektrod, oparty na zestawie detektorów typu „PIN” oraz przywieziony przez zespół z Kurchatowa zestaw sond magnetycznych do pomiaru rozkładu pól magnetycznych. Wstępne wyniki badań prezentowane będą w referacie zatytułowanym „Laboratory simulations of astrophysical jets: results from experiments in the PF-3, PF-1000, and KPF-4 facilities”, który wygłoszony zostanie w trakcie 44 Międzynarodowej Konferencji Fizyki Plazmy i Kontrolowanej Syntezy Termojądrowej, Zwienigorod, 13-17 kwietnia 2017r.

W październiku 2016 odbyła się kolejna, dwutygodniowa sesja eksperymentalna na układzie PF-1000, której celem było prowadzenie badań struktur nieliniowych (filamentów) powstających w kolumnie plazmowej. W sesji eksperymentalnej, poza zespołem IFPiLM brali udział pracownicy naukowcy z Czech Technical University (CVUT) w Pradze (5 osób) oraz Narodowego Centrum Badań Jądrowych (2 osoby).

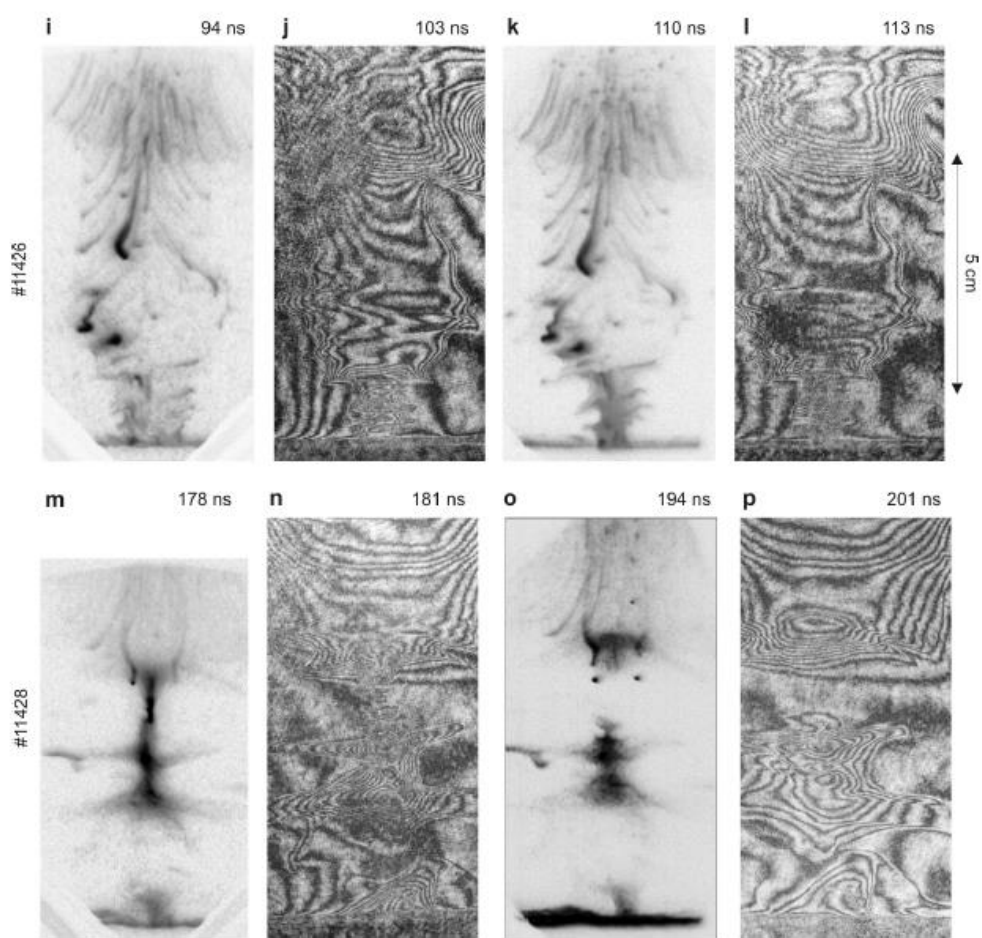
Podstawowymi diagnostykami, wykorzystanymi w badaniach były: 16 kadrowy interferometr laserowy oraz zmodernizowana w ramach niniejszego Projektu, ultraszybka kamera rejestrująca obrazy w zakresie XUV.

Wyniki powyższych badań opisano w artykule zatytułowanym „Filamentation in the pinch column of the dense plasma focus”, przyjętym do publikacji w czasopiśmie Physics of Plasmas.

Ad. 4)

Ważnym elementem realizacji zadań Projektu był rozwój bazy eksperymentalnej laboratorium Plasma-Focus niezbędny dla prowadzenia badań przewidzianych w Projekcie, na który przeznaczono ~25% przewidywanych kosztów Projektu. W ramach prac modernizacyjnych systemu diagnostycznego wykonano:

- automatyczny system blokowania wysokiego napięcia podawanego na element czynny ultraszybkiej kamery rejestrującej obrazy plazmy w zakresie miękkiego promieniowania X (XUV) w przypadku wzrostu ciśnienia w komorze przejściowej powyżej 9 Torr lub awarii systemu pompowania różnicowego (w sytuacjach takich może nastąpić uszkodzenie elementu czynnego kamery, którego koszt jest aktualnie rzędu 120 tys. zł),
- zaprojektowano, zbudowano i przetestowano układ synchronizacji systemu generatorów wysokonapięciowych impulsów bramkujących pozwalający na jednoczesne (+- 10ns) rejestrowanie obrazów z ultraszybkiej kamery XUV/SXR oraz interferogramów z 16 kadrowego interferometru laserowego.
- zwiększono zdolności rozdzielczej ultraszybkiej kamery poprzez zastosowanie specjalnych elementów typu „pinhole” o średnicy 30µm zamiast stosowanych aktualnie średnic 60 µm.



Rys.9. Sekwencje obrazów przedstawiające rozwój nieliniowych struktur w kolumnie plazmowej rejestrowanych za pomocą kamery XUV oraz interferometru laserowego (wyładowania #11426 oraz #11428).

5 Projekty Narodowego Centrum Nauki

5.1 HARMONIA: Impulsy elektromagnetyczne inicjowane oddziaływaniem lasera z tarczą w układach laserowych wielkiej mocy

J. Badziak, jan.badziak@ifpilm.pl

I. Opis

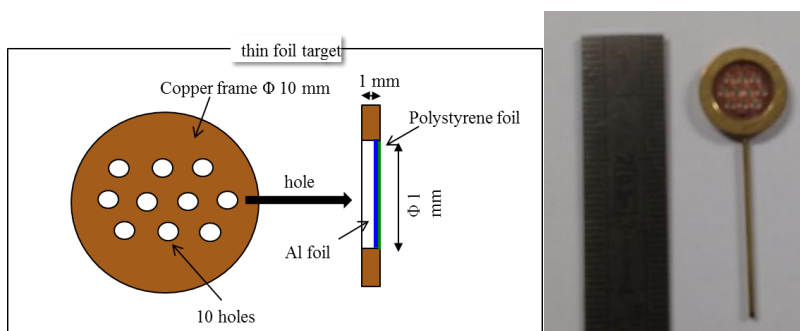
W ostatnich latach przeprowadzono szeroko zakrojone badania silnych impulsów elektromagnetycznych (EMP) w zakresie GHz, emitowanych w oddziaływaniu ultra-intensywnego laser fs z grubą tarczą stałą [J.-L. Dubois et al., Phys. Rev. E89, 13102 (2014), A. Poye et al., Phys. Rev. E91, 43106 (2015)].

Pokazano, że głównym źródłem EMP w tych oddziaływaniach jest prąd zwrotny do tarczy, wywołany elektryczną polaryzacją tarczy w wyniku oddziaływania z impulsem laserowym. Stworzono ilościowy model dla ładunku elektrycznego tarczy w przypadku tarczy grubej (rzędu kilku mm) i porównano go z danymi doświadczalnymi.

Bardzo ciekawym problemem jest rozszerzenie tych badań na przypadek tarcz z cienkich folii metalowych (grubości rzędu kilku μm), które są m.in. często używane do laserowej akceleracji jonów. W tym celu przeprowadzono eksperymenty na laserze ECLIPSE w CELIA, Bordeaux oraz na laserze 10TW w IFPiLM.

Badania są finansowane w ramach grantu NCN Harmonia 265004 (kierownik J. Badziak). Dostęp do lasera ECLIPSE był możliwy dzięki wsparciu z programu LASERLAB-EUROPE, w ramach projektu CNRS-CELIA002294 (kierownik P. Rączka).

Idea eksperymentu na laserze ECLIPSE polegała na zbadaniu EMP wytwarzanych przy użyciu cienkich folii w warunkach jak najbardziej zbliżonych do wcześniejszych eksperymentów z tarczą grubą. M. in. użyto tego samego układu do pomiaru prądu zwrotnego do tarczy i tej samej sondy B-dot co w poprzednim eksperymencie. Dodatkowo, tarcza z cienką folią została zaprojektowana dokładnie tak jak wcześniej używana tarcza gruba typu „lollipop”.

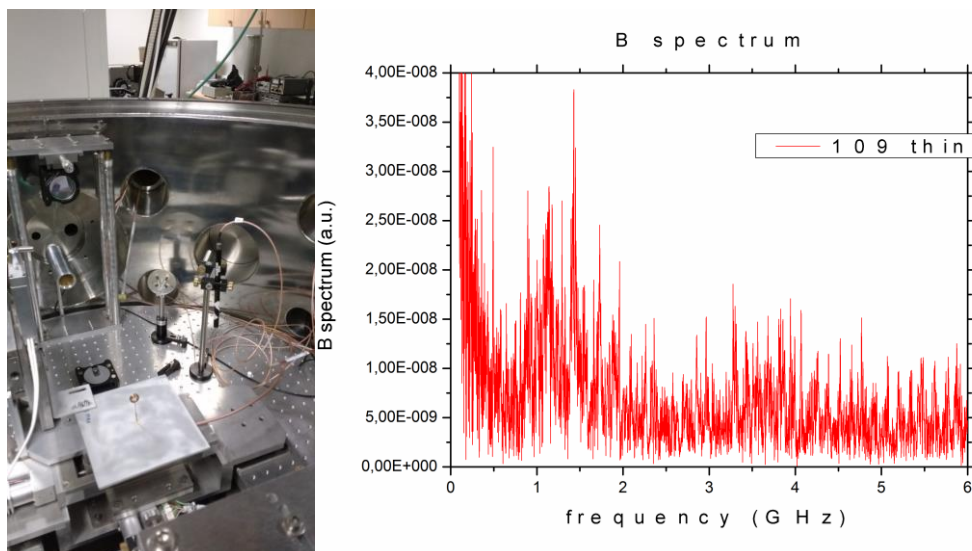


Rys. 1. Układ eksperymentalny w laboratorium CELIA i jedna z sond pomiarowych

Zestaw sond pomiarowych składał się z:

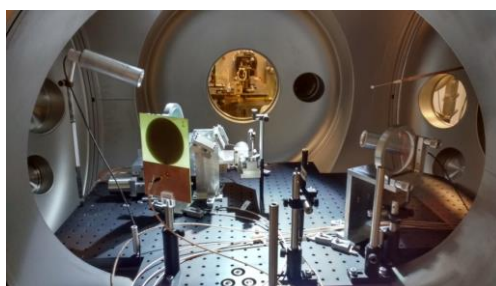
- układu do pomiaru prądu zwrotnego do tarczy;
- dwóch sond B-dot;

- dwóch anten super-szerokopasmowych, wykonanych według wzoru S. Barbarino, F. Consoli, IEEE TAP 58, 4074 (2010);
- sondy D-dot;
- pętli Moebiusa produkcji własnej;
- dwóch kolektorów jonów i półprzewodnikowych detektorów jonów.



Rys.2. Zestaw pomiarowy w laboratorium CELIA i przykładowe widm pola magnetycznego otrzymane z sygnału sondy B-dot1.

Badania nad powstawaniem EMP prowadzono także przy użyciu lasera 10TW w IFPiLM. Układ doświadczalny i zastosowane tarcze były podobne do układu ECLIPSE, jednak laser IFPiLM zapewniał nieco większą energię na tarczy (ok. 200 mJ). Przez krótki okres stosowano oscyloskop o bardzo szerokim pasmie (16 GHz).



Rys.3. Zestaw pomiarowy w Laboratorium Laserów Wielkiej Mocy w IFPiLM.

Zarejestrowane widma pola B, uzyskano z sygnału sondy B-dot dla tarczy cienkiej i tarczy grubej. Sygnał EMP powstający przy użyciu tarczy cienkiej jest silniejszy niż dla tarczy grubej. W widmie wyróżniają się dwa maksima, ok. 1GHz (związanego ze skalą czasową pulsacji prądu zwrotnego ok. 1 ns) oraz 2 GHz.

6 Projekty Międzynarodowego Centrum Gęstej Plazmy Namagnetyzowanej

6.1 Badania eksperymentalne procesów fizycznych w urządzeniu PF-1000U, w szczególności badania emisji produktów reakcji fuzji izotopów wodoru

M. Paduch, marian.paduch@ifpilm.pl

1. Najważniejsze badania naukowe i prace rozwojowe wykonane z wykorzystaniem urządzenia

W roku 2016 generator plazmy PF-1000U wykorzystany był do prowadzenia następujących badań naukowych oraz prac rozwojowych:

- Kontynuowano badania nad bez-neutronową syntezy termojądrową (Anutronic Fusion), opartą na reakcji proton-bor. Generator Plasma-Focus PF-1000U z komorą wypełnioną wodorem, jako gazem roboczym, stanowił źródło intensywnego strumienia protonów. Dokonano pomiaru parametrów strumienia protonów w odległości 30 cm od powierzchni anody. Zarejestrowano wysokoenergetycznych cząstki alfa (produktów reakcji p-B) w pobliżu tarczy borowej umieszczonej na osi PF-1000U (badania prowadziły zespoły IFPiLM oraz NCBJ).
- W ramach badań o charakterze podstawowym, mających na celu określenie mechanizmów generacji neutronów w urządzeniach typu Plasma-Focus, kontynuowano badania nad wpływem geometrii czoła anody (w centrum anody montowano wkładki stożkowe o różnych wysokościach i kształtach tworzącej) na dynamikę plazmy z fazy formowania sznura plazmowego, charakterystyki promieniowania neutronowego oraz promieniowania X. W drugim roku badań realizowanych w ramach Międzynarodowego Centrum Gęstej Namagnetyzowanej (ICDMP) przeprowadzono eksperymenty mające na celu optymalizację geometrii stożków miedzianych w celu uzyskania maksymalnej długości stabilnego strumienia plazmy metalicznej (tzw. jeta) oraz uzyskania możliwie najwyższej intensywności chwilowej impulsu neutronowego. Prace eksperymentalne wspierane były modelowaniem za pomocą dwuwymiarowego kodu MHD przez zespół z Wojskowej Akademii Technicznej.
- Przeprowadzono wstępne badania powstawania samo-uzgodnionych struktur plazmowych powstających propagujących się w gazie wypełniającym komorę generatora PF-1000 na odległości 50-100 cm. Badania te, podobnie do opisanych powyżej badań powstawania skoncentrowanych strumieni plazmy metalicznej, są elementami przygotowań zespołu IFPiLM do wejścia w nową tematykę tzw. astrofizykę laboratoryjną. Przeprowadzono pierwszy eksperyment wyniki porównano z wynikami otrzymanymi na rosyjskich urządzeniach PF-3 KPF-4. Prace prowadzili naukowcy z NRC Kurchatov Institute, Moscow, Russia, TRINITI, Troitsk, Moscow, Russia, IFPiLM, NCBJ, Otwock-Swierk, ACS Ltd, Warszawa, SUE «SFTI», Sukhumi, Abkhazia
- Kontynuowano badania wpływu iniekcji różnego rodzaju gazów, przed frontem anody układu PF-1000U, na dynamikę powłoki plazmowej, parametry sznura plazmowego oraz stabilności kolumny plazmowej. Rejestracją dynamiki plazmy prowadzono przy pomocy

16-kadrowgo interferometru laserowego. Eksperymenty prowadzone były z różnymi rodzajami gazów (wodór, deuter, neon, azot) w komorze i przed frontem anody. Stosowano również mieszanki gazów zarówno do napełnienia komory jak i w układzie poosiowej iniekcji. Zespół realizujący badania składał się z pracowników naukowych z IFPiLM, Czech Technical University oraz Narodowego Centrum Badań Jądrowych.

- Kontynuowano badanie aktywacji neutronami o energiach 2.45 MeV różnych izotopów w celu zastosowania ich do pomiarów neutronowych na JET (Joint European Torus) w ramach programu fuzji jądrowej Wspólnoty EURATOM (Horizon 2020).

Generator Plasma-Focus PF-1000U stanowił źródło strumieni plazmy oraz wiązek jonów do badań materiałowych. W ramach programów Wspólnoty EURATOM badano materiały używane lub przewidywane do wykorzystania w układach fuzyjnych (np. w tokamaku JET, ITER i DEMO oraz ICF) jako materiały pierwszej ścianki oraz dywertyora. Naświetlono ponad 60 próbek wykonanych z różnych materiałów takich jak wolfram, wanad oraz nowoczesne nisko-aktywacyjne stale typu ODS (Oxide dispersion-strengthened), w których tlenki chromu wprowadzane są do stali w formie nano-cząstek. Badania prowadzone były przez zespoły pracowników naukowych z Instytutu Fizyki Plazmy Czeskiej Akademii Nauk, Instytutu Fizyki Plazmy Ukraińskiej Akademii Nauk, NCBJ oraz IFPiLM.

- Podjęto próbę określenia zmian strukturalnych w materiale spowodowanych przejściem przez próbkę fali uderzeniowej powstającej w wyniku obciążenia jej powierzchni strumieniem plazmy oraz wiązką jonów. W tym celu płytkę wykonaną z krzemu o rozmiarach: średnica- 70 mm, grubość - 1,5 mm umieszczono w odległości 11 cm od anody układu PF-1000. Istotą pomysłu jest wykorzystanie nowoczesnej metody pomiaru zmian mikro-przewodności w cienkich warstwach (Four-Line Probe Method), spowodowanych zmianami mikrostruktury krzemu w wyniku przejścia fali uderzeniowej.
- Kontynuowano pomiary spektroskopowe plazmy powstającej w wyniku oddziaływania strumieni plazmy z powierzchnią próbek badanych w ramach programów Wspólnoty EURATOM jak i programów realizowanych ramach projektów MAEA CRP; eksperyment prowadzony był przez zespół pracowników naukowych Zakładu Fizyki Plazmy NCBJ(Świerk), Instytutu Fizyki Plazmy Ukraińskiej Akademii Nauk oraz IFPiLM.
- Wykorzystując generator PF-1000U jako intensywne, impulsowe źródło neutronów prędkich testowano skonstruowany przez INFN Frascati (Włochy) spektrometr neutronów prędkich (INFN Frascati, Politechnika Mediolan oraz IFPiLM)

W ciągu 102 dni odbyło się 17 sesji eksperymentalnych w trakcie których przeprowadzono 627 wyładowań generatora PF-1000U.

1. Opis najważniejszych wyników badań naukowych i prac rozwojowych.

Najważniejszym rezultatem prowadzonych w roku 2016 badań było uzyskanie w wyniku optymalizacji kształtu czoła elektrody centralnej (wymienne wkładki stożkowe) kilku reżimów pracy urządzenia PF-1000U przy energii zgromadzonej w baterii kondensatorów jedynie 170 kJ (napięcie ładowania baterii 16 kV). Jeden z nich pozwala na uzyskanie ekstremalnie intensywnych impulsów neutronowych (czas trwania ok. 20 ns) na poziomie powyżej 10^{18} neutronów na sekundę. W drugim otrzymujemy powtarzalne wyjście neutronów na poziomie 2×10^{11} neutronów wyładowanie. Ponadto możliwe jest uzyskanie intensywnych kilkucentymetrowych (ok. 10cm) strumieni plazmy (jetów) utrzymujące swoją średnicę na dystansie ok. 70 cm.

Wyniki badań prowadzonych przez zespoły naukowców opublikowane zostały w renomowanych czasopismach naukowych. W sumie w 2016 roku międzynarodowy zespół naukowców prowadzący badania z wykorzystaniem generatora plazmy Plasma- Focus PF-1000U opublikował 14 artykułów w recenzowanych czasopismach naukowych z listy filadelfijskiej. Kilka dalszych zostało przygotowane do publikacji (część została już przyjęta z terminem opublikowania 2017).

2. Informacja o zakresie i stopniu wykorzystania urządzenia do wykonywania zadań innych niż badania naukowe i prace rozwojowe.

Działalność służąca rozwojowi młodych naukowców - realizacja prac doktorskich i magisterskich na układzie PF-1000U w 2016 roku:

W eksperymentach prowadzonych na układzie PF-1000U w 2016 roku brali udział młodzi naukowcy gromadzący materiały do swoich rozpraw doktorskich byli to:

- mgr Włodzimierz Surąła, doktorant Narodowego Centrum Badań Jądrowych;
- mgr Dobromił Załoga, doktorant Narodowego Centrum Badań Jądrowych;
- mgr Włodzimierz Stępniewski IFPiLM, temat pracy doktorskiej: "Modelowanie układów Z-pinch i Plazma-Focus".

Działalność służąca rozwojowi młodych naukowców – staże, praktyki i stypendia:

W eksperymentach prowadzonych na układzie PF-1000U w ramach staży, praktyk i stypendiów brali udział następujący studenci:

- Katarzyna Mikszuta, Wydziału Chemii UW –stypendium IFPiLM,
- Paweł Potrykus, Wydziału Chemii UW –stypendium IFPiLM,
- Ewa Gierlach, Wydział Fizyki i Informatyki AGH – dwumiesięczna praktyka studencka

Upowszechnianie wiedzy na temat badań i zastosowań układu PF-1000U w 2016 roku:

- Wizyty w laboratorium układu PF-1000U grupy uczniów połączone z wysłuchaniem wykładów wygłaszanych przez pracowników naukowych Instytutu. W roku 2016 odbyło się dziewięć spotkań, w których łącznie wzięło udział 318 uczniów, większość z nich to licealiści. Ponadto laboratorium wizytowały dwie grupy studentów UW i PW dwie kiluosobowe grupy inżynierów z WSK PZL Kalisz i SEP BBJ Lublin.
- XIX Festiwal Nauki w IFPiLM połączony z wizytami uczestników Festiwalu w laboratorium PF-1000U i z prelekcjami na temat tego urządzenia,
- Współpraca laboratorium PF-1000U z Teatrem GO – otwarte warsztaty artystyczne „Piąty stan skupienia” prowadzone z udziałem aktorów i naukowców w unikalnej scenerii laboratorium PF-1000U oraz premiera spektaklu ENSTraument (25.02.2016).
- Organizacja w ramach ICDMP międzynarodowego spotkania „Workshop and Expert Meeting on Dense Magnetized Plasmas” (8-9.10.2016). Na spotkaniu tym, w którym uczestniczyło 30 naukowców z 12 krajów (USA, Francja, Włochy, Niemcy, Chiny, Czechy, Estonia, Ukraina, Bułgaria, Czechy, Syria, Polska) przedstawiono najnowsze rezultaty badań prowadzonych na układzie PF-1000U.

3. Informacja o wykorzystaniu urządzenia przez inne jednostki, w tym międzynarodowe

- zespół pracowników naukowych i doktorantów Politechniki Praskiej (5 osób) kierowany przez profesora Pavla Kubesa oraz pracownicy IFPiLM (7 osób) i NCBJ (4 osoby) przeprowadzili eksperymenty (2 x 2 tygodnie) mające na celu realizację programu

naukowego w ramach Międzynarodowego Centrum Gęstej Plazmy Namagnetyzowanej. Łączna zaangażowanych było 16 osób.

- zespół pracowników Zakładu Fizyki Plazmy NCBJ (Świerk) (6 osób) pod kierunkiem dr Elżbiety Sadowskiej, Instytutu Fizyki Plazmy z Charkowa (2 osoby) oraz IFPiLM (8 osób), (4 x 1 tydzień) prowadził badania spektroskopowe i rentgenowskie w ramach programu konsorcjum EuroFusion (Wspólnota EURATOM) oraz projektów IAEA-CRP.
- prof. Hans Joachim Kunze, Ruhr University Bochum oraz pracownicy IFPiLM (7 osób) - 1 tydzień, badania związane z Pinchem radiacyjnym - program naukowy w ramach Międzynarodowego Centrum Gęstej Plazmy Namagnetyzowanej.
- zespół pracowników naukowych NRC Kurchatov Institute, Moskwa, kierowany przez dr Viacheslava Krauze (3 osoby) prowadził razem z zespołami IFPiLM (6 osób) oraz NCBJ (3 osoby) badania nad powstawaniem i propagacją samo-uzgodnionych gazowych struktur plazmowych (jetów) w urządzeniu PF-1000U (8 dni w ramach umowy o współpracy naukowej).
- zespół pięciu pracowników naukowych INFN Frascati oraz Politechniki Mediolańskiej (Włochy) pod kierownictwem dr Roberta Bedogni przez 4 dni testował neutronowy spektrometr impulsów neutronowych wykorzystując unikalne własności układu PF-1000U. Ze strony IFPiLM zaangażowanych było 7 osób.

7 Projekty Europejskiej Agencji Kosmicznej

7.1 KLIMT: Krypton Large Impulse Thruster

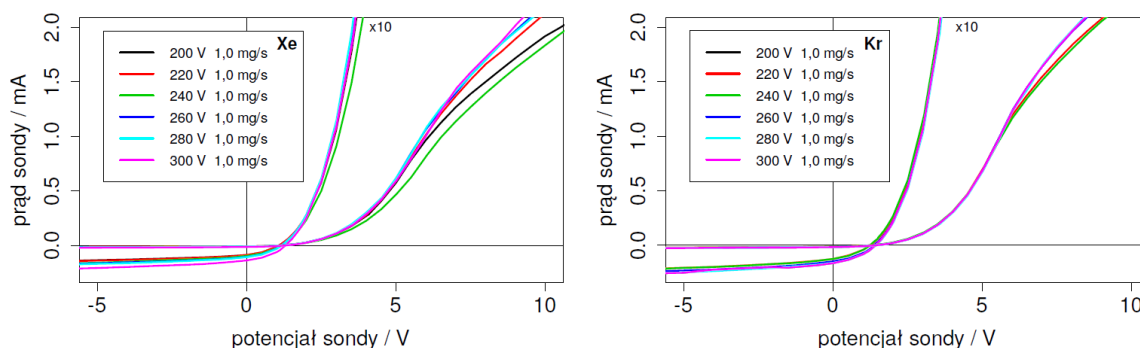
J. Kurzyna, jacek.kurzyna@ifpilm.pl

Zadaniem głównym jak również zasadniczym wynikiem uzyskanym w roku 2016 w Laboratorium Plazmowych Napędów Satelitarnych (PlaNS) było zakończenie trzyletniego projektu europejskiego KLIMT (PECS – ESA Contract No.4000107746/13/NL/KLM) finansowanego przez Europejską Agencję Kosmiczną. Szczegółowy raport merytoryczny z wykonania projektu obejmujący ponad 80 stron tekstu wraz z ilustracjami oraz pełna dokumentacja techniczna i formalna dokumentacja zamykająca kontrakt (*Contract Closer Documentation*) zostały przedstawione ESA i zaaprobowane przez jej przedstawicieli. Wyniki projektu zostały również podsumowane w referacie sprawozdawczym finalizującym kontrakt wygłoszonym wobec przedstawicieli ESA w ośrodku technologicznym Agencji ESTEC w Holandii. W ten sposób projekt został w pełni rozliczony. Poniżej przytoczony jest skrócony raport z wykonania projektu, tzw. **Executive Summary Report**, w wersji oryginalnej. Zgodnie z wymaganiami kontraktu był on częścią dokumentacji zamykającej projekt. Obszerna prezentacja projektu i wyniki pomiarów były przedstawiona na specjalistycznej konferencji międzynarodowej *Space Propulsion* w roku 2014 i 2016, w pracach:

- [1] J. Kurzyna, S. Barral, D. Daniłko, J. Miedzik, A. Bulit & K. Dannenmayer, “First Tests of the KLIMT Thruster with Xenon propellant at the ESA Propulsion Laboratory”, in *Proc. Space Propulsion 2014*, Paper No. 2980923, Cologne (Germany) 2014
- [2] J. Kurzyna, A. Szelecka, D. Daniłko, S. Barral, K. Dannenmayer, E. Bosch Borrás and T. Schönherr, “Testing KLIMT prototypes at IPPLM and ESA propulsion laboratories”, in *Proc. Space Propulsion 2016*, Paper No. 3125256, Rome (Italy), 2016

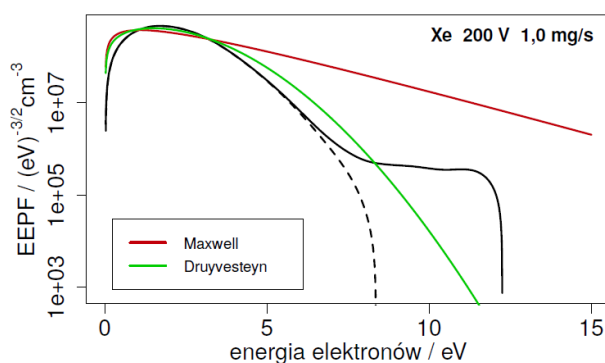
Dodatkowo, w omawianym okresie, w ramach współpracy z Politechniką Warszawską, Pan Maciej Jakubczak, student 5 roku Wydziału Fizyki zrealizował i obronił pracę magisterską pt. *Diagnostyka strumienia plazmy emitowanego przez kryptonowy silnik satelitarny typu Halla* nadzorowaną merytorycznie przez dr. Jacka Kurzynę. Do diagnostyki plazmy magistrant zastosował metodę pojedynczej sondy Langmuira. Dla potrzeb eksperymentu skonstruował od podstaw nowe sondy o geometrii cylindrycznej i zestawiał układ eksperymentalny umożliwiający pomiar charakterystyk prądowo-napięciowych sondy na osi strumienia plazmy. Dla przykładu zbiór takich charakterystyk otrzymanych dla wybranego zestawu parametrów roboczych silnika przytoczono na Rys. 1. W celu wskazania najbardziej wiarygodnej metody obróbki danych pomiarowych zarejestrowanych w warunkach eksperymentu magistrant sprawdził efektywność różnych sposobów odzyskiwania informacji o parametrach plazmy z charakterystyk prądowo-napięciowych sondy. Do tego celu wykorzystał większość znanych i przystających do warunków eksperymentu teorii sondy Langmuira, poczynając od klasycznej, poprzez, OMT, ABRC, a kończąc na wyznaczeniu funkcji rozkładu energii elektronów. Z oszacowania parametrów plazmy wynika, że w wybranej lokalizacji sonda pracuje w reżimie *conventional thin sheath* (konwencjonalnej warstwy cienkiej) albo blisko granicy jego stosowalności. Po odtworzeniu składowej jonowej i elektronowej prądu sondy na podstawie zarejestrowanych charakterystyk kolejno wyznaczono potencjał pływający, potencjał plazmy, temperaturę

elektronową, koncentrację elektronową oraz odtworzono funkcję rozkładu energii elektronów w obszarze *far-field* w stosunku do ujścia kanału wyładowania silnika. Obliczone wartości parametrów plazmy są zbliżone do rezultatów otrzymywanych dla innych podobnej klasy silników Halla, chociaż różnią się między sobą w zależności od zastosowanej metody, co jest uzasadnione ze względu na granice stosowalności każdej z tych metod.



Rys. 1. Charakterystyki I - V cylindrycznej sondy Langmuira umieszczonej na osi strumienia plazmy w odległości 0.5 m od płaszczyzny wylotowej silnika Halla dla różnych napięć pracy silnika.

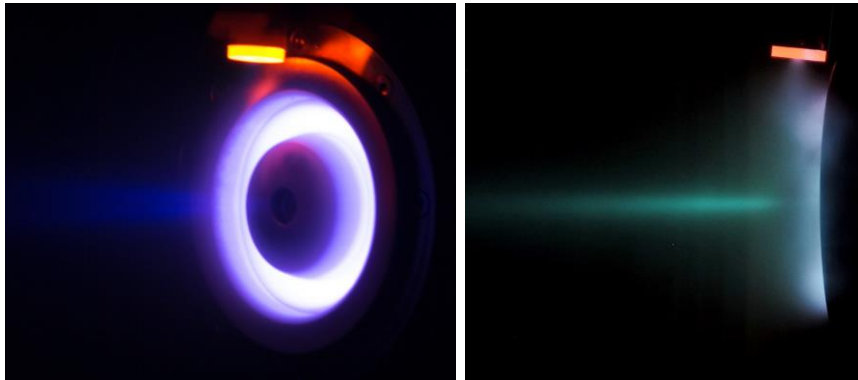
Stwierdzono, że najbardziej wiarygodne wyniki otrzymuje się na podstawie funkcji rozkładu. Wskazano, że w warunkach eksperymentu jest ona znacznie lepiej przybliżana przez rozkład Druyvesteyna niż Maxwella – patrz Rys.2. Stwierdzono, że dla parametrów plazmy zaobserwowanych w dużej odległości od silnika (0.5 m) niska gęstość elektronowa i temperatura (odpowiednio na poziomie $\sim 5 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ i $\sim 1\text{-}2 \text{ eV}$) dobrze uzasadniają odstępstwo od rozkładu Maxwella na rzecz rozkładu Druyvesteyna.



Rys.2. Porównanie wyznaczonego rozkładu prawdopodobieństwa energii elektronów z dopasowanymi funkcjami rozkładu Maxwella oraz Druyvesteyna. Czarną ciągłą linią zaznaczono funkcję rozkładu wyznaczoną z eksperymentu przed, a przerywaną po odjęciu składowej jonowej.

Badania będą kontynuowane tak by odtworzyć geometryczną mapę parametrów plazmy w obszarze dalekim i w bezpośrednim sąsiedztwie ujścia kanału silnika.

KLIMT – Krypton Large IMpulse Thruster
EXECUTIVE SUMMARY REPORT
PECS – ESA Contract No.4000107746/13/NL/KLM
J. Kurzyna, A. Szelecka



Final version of KLIMT as operating with krypton at EPL (left: perspective view of the exit plane) and with xenon propellant at PlaNS laboratory (right: side view).

Objectives

KLIMT is the acronym for Krypton Large IMpulse Thruster, the project commenced at the Institute of Plasma Physics and Laser Microfusion (IPPLM). Despite of the fact that Poland has formally become a member of ESA since the end of 2012, the KLIMT project was still embarked within the frame of ESA's Plan for European Cooperating States (PECS). The project was aimed at incremental development and optimisation of a 0.5 kW-class plasma rocket-like engine in which, as a propellant, could be used krypton. Gradually improved implementation of a laboratory/research model has relied on the well-known idea of Hall effect thruster. However, the new design is geared towards addressing increased heat loads which occur in the state-of-the-art HETs if xenon is to be replaced by krypton. Promotion of krypton fits well with one of the currently mapped out electric propulsion (EP) trends endorsed by ESA (as presented at the Brussels-2014 and Stockholm-2015 EPIC Work-shops and is reflected in EP incremental line of Horizon 2020 Space Strategic Research Cluster (SRC) by addressing development and searching for alternative to xenon propellants (Horizon 2020 International Space Information Day, Warsaw, September 2015).

Background

HET is a plasma accelerator with the annular discharge channel in which thrust is produced due to effective speeding-up of massive ions by electric field E between the anode and the cathode – see Figure 1. The positively charged ions are created from the neutral atoms of the gaseous propellant in collisions with electrons. To make a dense target for colliding neutrals the electrons generated by an efficient cathode (that is placed outside the channel) are subjected to drift azimuthally being trapped by magnetic field B perpendicular to E . Due to collisions with the neutrals and the channel walls the drifting electrons can diffuse to the anode across magnetic field (i.e. along the electric field direction). The additional electrons from the cathode compensate the space charge of the ejected ions which are moving downstream the exit plane of the thruster. In this way, the thruster is kept electrically neutral. The thrust produced increases with the speed and mass of ions and hence, depends on the type of propellant.

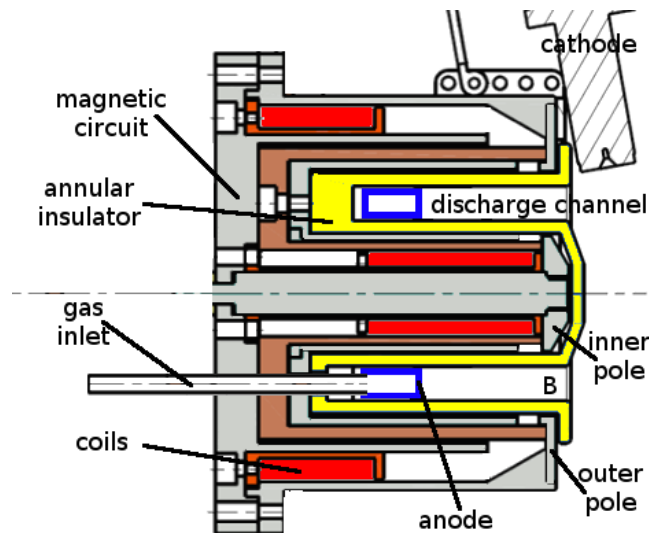


Fig. 1. Cross-section of the 2nd KLIMT's prototype showing schematically HET's concept and its implementation. The radiators are disassembled.

Searching for HET propellants other than xenon has already initiated a significant number of studies. Despite of the fact that several promising technologies have been offered, xenon is still considered to be an almost ideal propellant for EP. This is not only due to its high atomic mass value (131.3 u), relatively low ionization potential (12.1 eV) and large ionization cross section in collisions but, also for its chemical neutrality and lack of deposition. However, one of the most critical disadvantages of xenon cannot be overcome – *i.e.* its cost at the world markets. The price of xenon is a function of its occurrence in the Earth atmosphere (~ 0.087 ppm) and the yearly global production. It is therefore natural, that the closest to xenon (by physical features) but cheaper noble gas has been suggested as an attractive alternative.

Due to its ~ 13 times greater abundance in the atmosphere (~ 1.14 ppm), krypton price per mass unit is several times less than that of xenon and that is why it is so attractive. However, krypton physical characteristics (atomic mass of 83.8 u, ionization potential of 14.0 eV and ionization cross section lower than the one of xenon) makes it a more demanding forerunner as far as maintaining plasma in the channel of HET and thrust production on par with those of xenon is considered.

Work-plan

Within the project work-plan three optimisation steps for three subsequent prototype versions of KLIMT were predicted. Corresponding three milestones consisted of the design and the new version procurement phases, each one followed by a test phase. The test sessions aimed at critical assessment of the developed versions and collecting data for modifications to be implemented at the next stage of the project. During the project implementation it was decided that the 1st and the 3rd measurement campaigns would be performed at ESA Propulsion Laboratory (EPL) as it was planned while the 2nd one in the newly opened IPPLM laboratory for plasma thrusters – PlaNS. The experimental campaign at IPPLM enabled extensive and detailed investigation of the 2nd prototype addressing the most drawbacks of the design which could be corrected in the last version. Moreover, it turned out that an additional campaign aimed at preliminary verification of the 3rd prototype before the last session at EPL would be desired and could be implemented in PlaNS laboratory.

Implementation

Usually testing HETs with krypton propellant has been performed for thruster models that were optimized for operation with xenon. Physical considerations, numerical modeling and outcomes of experiments confirm that performance of the krypton HET could be preserved at the level only slightly lower than the one obtained for xenon but for increased mass flow rates and discharge power.

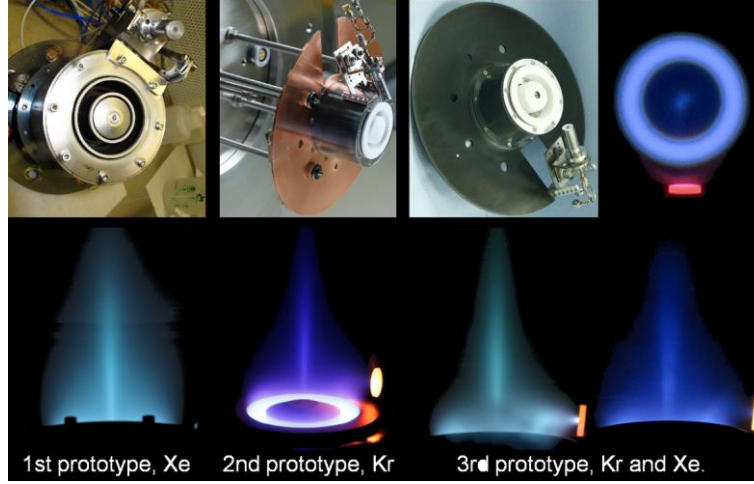


Fig. 2. *Klimt's evolution towards the final version.*

KLIMT from the very ground-up was designed keeping in mind the more severe requirements resulting from the use of krypton as a target propellant (mostly the growth of heat loads due to the increased number density of gas in the discharge channel for smaller ionization cross section compensation). The evolution of KLIMT towards the 3rd version implementation is depicted in Fig. 2. The guidelines to the design were discussed in paper² while the results of numerical analysis for the KLIMT's performance prediction in papers^{2,7}. That is why here only few details are mentioned which are necessary to survey the concept. The main assumptions consisted of sizing, power and mass supply magnitude as well as magnetic field topology definition. For sizing a radial scaling down with respect to the well-known SPT-100 geometry has been adopted. Modular design of the new thruster was chosen for easy variation of its geometry (including channel length and cathode positioning) and magnetic field topology (by the use of exchangeable magnetic poles). The main figures that characterize the final KLIMT's version are listed in Table 1.

Table 1. *KLIMT's parameters*

Geometry and volume	Operating parameters
Outer diameter of discharge channel $D_{out} = 50$ mm	$U_D \leq 500$ V
Discharge channel width $D_{ch} = 8$ mm	$I_D \leq 2.0$ A
Discharge channel length $L_{ch} = 12-35$ mm	$P_D \leq 0.5$ kW
Outer diameter of the thruster mantle ~ 85 mm	$B_0 = 150-250$ Gs
Thruster weight with the radiator ~ 4 kg	$dm/dt \leq 1.5$ mg/s

The annular discharge channel (main insulator) of the thruster – see Figure 1 and 4.d – was made of M26 boron nitride ceramics. However, its shape evolved towards the final solution with each version. The stainless steel anode (depicted in Figure 4.d) was thought to be also a gas

distributor (classical design) in which propellant is supplied to the discharge channel by two concentric crowns of orifices (with diameter of ~ 0.1 mm). Each crown is covered with a baffle to slow down gas ejected and increase particles residence time in the channel. The carcasses for the coils were made of copper alloy to provide effective heat evacuation to the parts of magnetic circuit in thermal contact with the radiator. The coils are wound with Kulgrid 28 high temperature wire. HW PES-250 HeatWave Labs Inc. hollow cathode model has been chosen for laboratory tests. The 3rd prototype CAD model, photo as well as its main modules are depicted in Figure 3 and 4, while thruster interface with dimensioning in Figure 5.

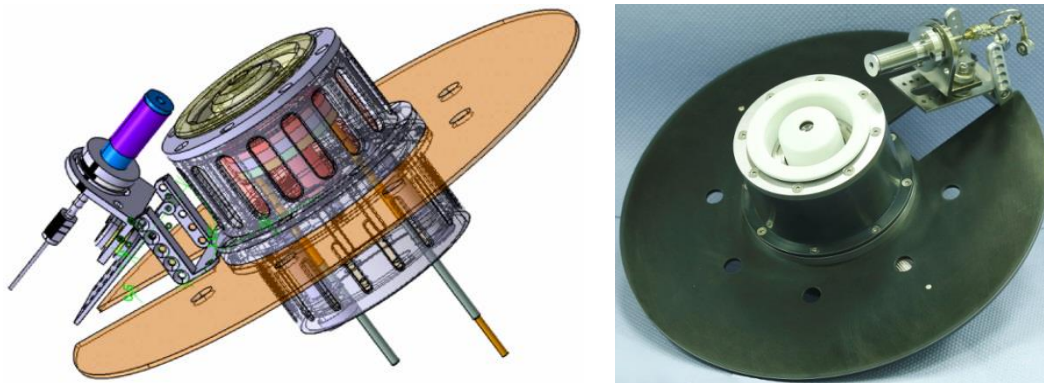


Fig. 3. 3D CAD model of KLIMT's 3rd prototype with the main radiator and its implementation.

KLIMT's evolution and testing

The figures collected in Table 2 summarize the performance of the 1st prototype as measured for xenon at EPL during the 1st measurement campaign. These outcomes confirmed that the basic assumptions to the design had been defined correctly, however KLIMT's thermal layout (cathode and anode modules including) should be improved. Consequently, a new radiator of an enlarged view factor and a corrected thermal interface with the thruster magnetic circuit has been designed. The anode ensemble has been significantly modified providing effective cooling of the gas connector.

Post-session examination of the 1st prototype revealed an intense sputtering at the surface of both magnetic circuit poles. As a remedy, for the next version BN insulator was modified to cover totally the surface of the inner, and partially of the outer pole.

The topology of magnetic field that was chosen for KLIMT at the outset² appeared to be effective enough to provide its stable operation. The magnetic circuit of the 1st prototype was made entirely of soft iron. However, to make the circuit thermally more stable and resistant to the increased heat loads, since the 2nd version its hottest elements have been replaced by parts made of Fe-Co alloy. For the new magnetic circuit the maximum value of B -field in the channel exceeded the previous one by $\sim 15\%$ for the same coil current ratios I_{in}/I_{ex} .

The 2nd prototype was tested only at IPPLM and only for krypton. Krypton mass flow rate was set to 0.54, 0.68, 0.81, 1.08, 1.35 and 1.62 mg/s (8.6, 10.9, 12.9, 17.2, 21.6 and 25.9 sccm). The tests were performed varying values of discharge voltage U_d and magnetic field strength in wide ranges. Maximum power at which thruster was operated was let to reach 750 W however, the coil temperature was strictly observed to prevent exceeding the permitted limit. The domain of the best performance has been revealed by comparative measurements of the momentum flux produced by the thruster as captured for different set-points by the graphite target located at the MECARTEX thrust balance (see Figure 5.b).

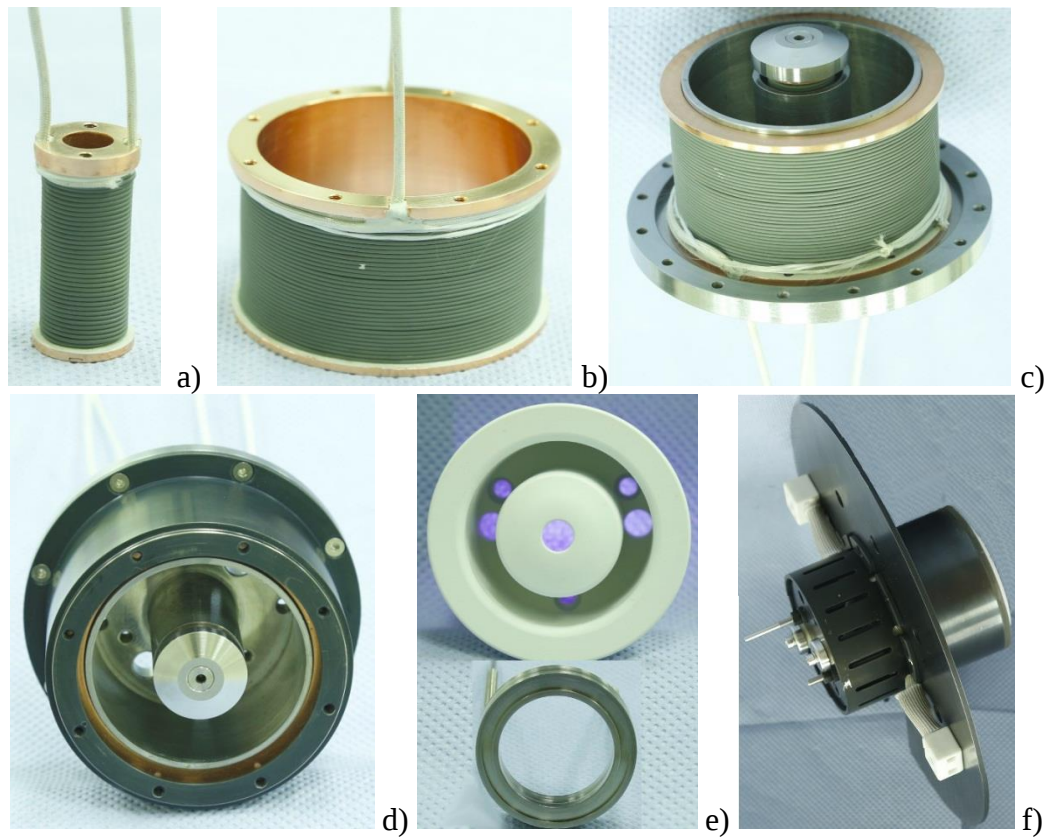


Fig. 4. Assembling KLIMT: a) inner and b) outer coils as wound at heat-guiding carcasses, c) both coils and the core with the inner pole mounted at the magnetic circuit yoke, d) solid mantle bolted to the yoke, e) main insulator and the anode, f) assembled thruster with the cover protecting the anode radiator.

Table 2. 1st prototype performance as measured at EPL for xenon

anode mass flow rate mg/s	anode voltage V	discharge power W	anode current readout mA	thrust mN	specific impulse s	anode efficiency %
1	300	245	818	12.14	1240	30
1	300	247	822	12.42	1270	31
1.1	300	271	904	14.73	1370	36
1.1	300	272	907	15.59	1450	41
1.1	350	322	921	14.49	1340	30
1.1	450	456	1013	18.18	1690	33
1.5	200	267	1335	19.1	1300	46
1.5	250	331	1324	20.27	1380	41

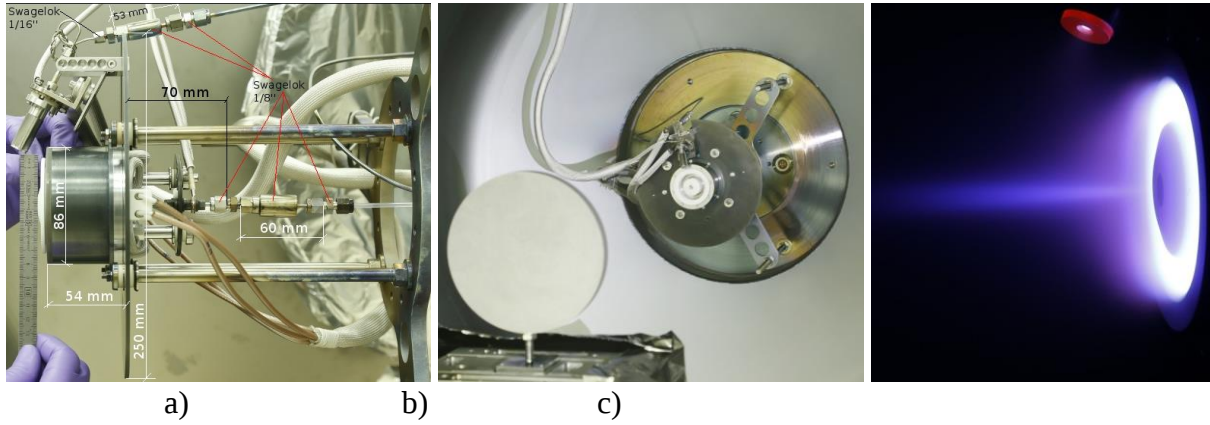


Fig. 5. a) The 3rd prototype ready for installation in the IPPLM's vacuum chamber; b) as installed facing to the graphite target mounted at the MECARTEX thrust stand for momentum flux measurements; c) one of the first launches with krypton.

KLIMT operated most stably for U_d from the range of 160-260 V at any mass flow rate that was tested. The lowest voltage for which the thruster had been examined was set to 80 V while the highest to 350 V. Magnetic field strength was adjusted to provide the stable thruster operation in the widest possible range of the other operating parameters. The maximum value of the momentum flux that was recorded corresponds to 21.6 sccm of krypton (1.35 mg/s) – see Figure 6.

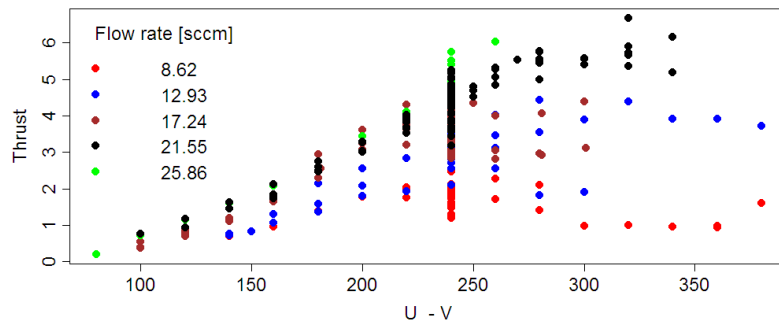


Fig. 6. Cumulative plot of the momentum flux (which is a comparative measure of thrust) as measured during the 2nd measurement campaign for all operating conditions.

Relying on the results of the 2nd measurement campaign further improvements of KLIMT's thermal structure were implemented. In the 3rd version all the thermal interfaces has been refined while radiated surfaces blackened (see Figure 3 and 4) to increase effectiveness of cooling by radiation and reduce a vacuum flash effect. New solution for the internal heat guides and screens (thermal and magnetic ones) has been implemented. The effectiveness of the modified thermal layout was examined numerically. Consequently, the outer diameter of the thruster and its length (as well the length of BN channel) have been reduced by ~ 1 cm to decrease the thruster weight. All these corrections resulted in the new structure of the magnetic circuit however, the topology of magnetic field has been preserved.

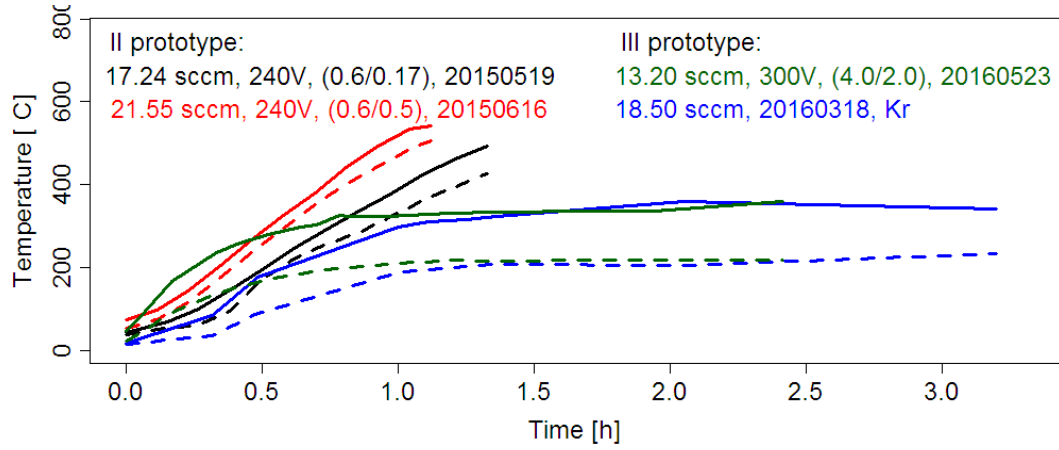


Fig. 7. Comparison of coil temperature variation vs time for the 2nd and 3rd prototype as measured at IPPLM at different krypton flow rates: inner coil - solid lines, outer coil – dashed lines.

The main problem of the increased heat loads has been positively solved in the KLIMT's final version. It was demonstrated (with experimental characterization) the effectiveness of heat excess evacuation from the thruster interior to the dedicated radiator. The improvement that was set for thermal interfaces provided thruster operation within the permitted safety limits. The final version turned to be thermally steady within the predicted range of power for the all given operating conditions and worked reliably as long as it was required – see Figure 7.

The materials designated for the magnetic circuit, heat guides, coils and insulators appeared to be chosen properly. Nevertheless, the significant erosion of the BN insulator in the exit plane has been observed what seems to be reasonable if small ratio of the channel width to its radius is realized. During the 3rd measurement campaign the thruster operated totally about 70 hours what was enough to display the developed erosion effect.

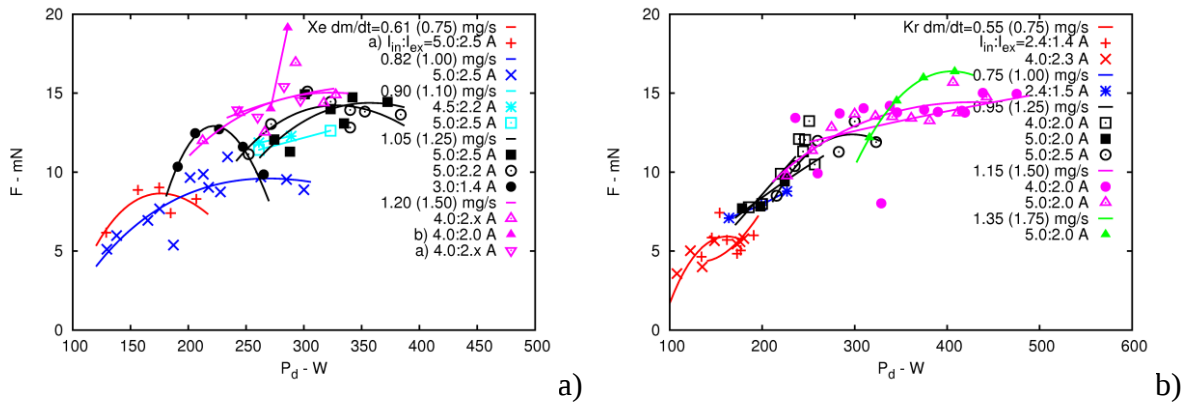


Fig. 8. Comparison of thrust produced by the 3rd prototype as measured in different operating conditions for xenon a) and krypton b).

To better prepare the 3rd measurement campaign the short session at PlaNS laboratory was arranged with aim at preliminary characterization of the final KLIMT's version. When probing its operational envelope at EPL several hundred of set-points were examined. To study KLIMT's performance as usually mass flow rates, discharge voltage and coil currents were varied in a wide range while relevant discharge current (time dependant and averaged) and absolute thrust value were measured for krypton as well for xenon. Additionally beam divergence was measured however, only for krypton. The consistency of the results was verified in the post-session at IPPLM. The maximum thrust values as measured at EPL were at the level

of 15 mN (see Figure 8.a and b), anode efficiency close to 30% while specific impulse gained 1600 s. It is worth noting that the maximal performance is comparable for both gases. The obtained figures seems to be satisfactory for HET of this size, despite of the fact that lower than we have foreseen with our numerical simulations. It was shown that the thruster performance can be slightly boosted by a proper adjustment of operating parameters, mostly by magnetic field topology optimization. However, the more reliable measurements of the thrust would be required for further optimization purpose.

Conclusion

KLIMT is a relatively small (~500 W class) HET with an annular discharge channel, that was from the ground-up designed to operate with krypton as the main propellant. All the tasks of the scheduled work plan has been accomplished: three gradually improved versions have been manufactured and assessed in three measurement campaign. The lessons learnt from each campaign were a crucial feedback for the next design phase. The results of the test sessions that were performed in both propulsion laboratories (at EPL and PlaNS) confirm the correctness of the assumptions for the new thruster. The final version turned to be thermally steady in the predicted range of power for the all given operating conditions and worked reliably as long as it was required. The comparative tests performed for krypton and xenon have revealed almost equivalent performance at its maximum for both gases.