

3 Projekty Fusion for Energy

3.1 Projekt i rozwój radialnej kamery neutronowej i radialnego spektrometru promieniowania gamma: faza planowania

Osoba kontaktowa: R. Miklaszewski, ryszard.miklaszewski@ifpilm.pl

W ramach kontraktu SG01 zespół IFPiLM wziął udział w realizacji dwóch zadań, spośród trzech podstawowych.

Określenie wymagań stawianych przez zamawiającego (Fusion for Energy - F4E) oraz opracowanie analizy funkcjonalnej Radial Neutron Camera (RNC)

W ramach tego zadania zespół IFPiLM przeprowadził analizę dokumentów przygotowanych przez organizację *Fusion for Energy* oraz ITER Organization (IO) w celu identyfikacji wymagań stawianych RNC w zakresie kalibracji systemu.

Przygotowany przez wszystkie zespoły Konsorcjum dokument zawierający opis wymagań oraz lista wymagań niejasnych, nieprecyzyjnych lub sprzecznych przesłana została do organizacji F4E oraz IO.

Lista wymagań stanowiła podstawę do opracowania przez wszystkich uczestników Konsorcjum wstępnej analizy funkcjonalnej RNC.

Opracowanie Planu Realizacji Projektu (Project Execution Plan)

Uczestnicy Konsorcjum przygotowali własną interpretację podstawowych wymagań stawianych RNC oraz RGRS (*Radial Gamma Ray Spectrometer*) takich jak: czasowa i przestrzenna zdolność rozdzielcza, dokładność określenia rozkładów przestrzennych mierzonych parametrów, podział mierzonych parametrów na takie, które będą mierzone w czasie rzeczywistym oraz wymagające dłuższej obróbki i udostępniane po zakończeniu wyładowania.

Opierając się na podstawowym dokumencie dotyczącym RNC, przygotowanym przez IO: SDDD55.B1 *Radial Neutron Camera*, przeprowadzono analizę elementów wstępnej koncepcji RNC:

- detektorów promieniowania neutronowego,
- liczby i rodzaju kolimatorów,
- elektronicznych systemów akwizycji i obróbki danych, itp.

W wyniku tej analizy stwierdzono, że przedstawiona w tym dokumencie koncepcja budowy RNC nie będzie w stanie spełnić wymagań stawianych przez zamawiającego (F4E) i postanowiono przygotować w ramach następnego kontraktu (SG03) trzy nowe warianty projektu RNC.

Projekty te zostaną w ramach nowego kontraktu poddane gruntownej analizie z wykorzystaniem zestawu specjalnie przygotowanych kodów komputerowych i do dalszych prac wybrany zostanie jeden z tych wariantów.

Zgodnie z podziałem pracy w ramach kontraktu SG01 zespół IFPiLM opracował wstępną koncepcję systemu kalibracji RNC z rozbiem na poszczególne fazy budowy i działania tokamaka ITER: testowanie i kalibracja detektorów dostarczonych przez producenta, kalibracja kompletnej RNC po zamontowaniu jej w odpowiednim porcie tokamaka ITER oraz kalibracja RNC w trakcie eksploatacji urządzenia.

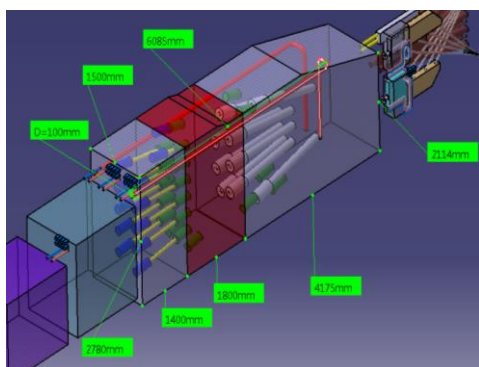
Ważnym zadaniem, zrealizowanym przez Konsorcjum było przygotowanie listy tzw. elementów krytycznych, których właściwe funkcjonowanie warunkuje spełnienie wymagań stawianych RNC przez

zamawiającego. Prototypy tych elementów zostaną zbudowane i testowane w trakcie trwania jednego z kolejnych kontraktów (SG05).

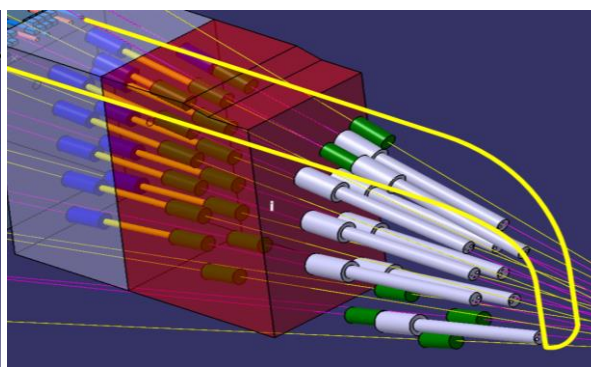
Jednym z tych krytycznych elementów jest system kalibracji okresowej detektorów RNC za pomocą źródła neutronów oraz urządzenia (tzw. *source mover*) pozwalającego przemieszczać źródło wewnątrz RNC. Urządzenie to powinno zapewnić precyzyjne pozycjonowanie źródła neutronów w aperturze kolejnych testowanych elementów kolimator – zestaw detektorów.

Ponieważ zespół IFPiLM odpowiedzialny jest w ramach Konsorcjum za całokształt działań związanych z kalibracją, zadaniem naszym było opracowanie koncepcji systemu okresowej kalibracji RNC oraz urządzenia przemieszczającego źródło neutronów.

W ramach realizacji tego zadania zespół IFPiLM opracował we współpracy z zespołem inżynierów z Instytutu Fizyki Jądrowej PAN dwa warianty rozwiązania układu przemieszczania i pozycjonowania źródła promieniotwórczego AmBe, oparte na zastosowaniu pneumatycznego systemu przemieszczania kapsuły ze źródłem promieniotwórczym (wariant I) oraz przemieszczania kapsuły za pomocą robotów poruszających się wewnątrz rury prowadzącej (wariant II).



Wariant I - system pneumatyczny



Wariant II – system z wykorzystaniem robotów



Robot D-40 proponowany, jako urządzenie przemieszczające kapsułę ze źródłem promieniotwórczym.

Opracowano także plan testowania prototypu w formie wymaganej przez F4E (*Prototype Description Form*).

4 Projekty 7. Programu Ramowego

4.1 LaserLab: Badanie za pomocą femtosekundowej polaro-interferometrii początkowych faz udarowego zapłonu termojądrowego plazmy generowanej z płaskich tarcz oświetlanych laserem

Osoba kontaktowa: T. Pisarczyk, tadeusz.pisarczyk@ifpilm.pl

Dominującą tematyką eksperymentów realizowanych na układzie laserowym PALS (Prague Asterix Laser System) w ramach poprzednich projektów LASERLAB są badania plazmowe, związane z realizacją fuzji inercyjnej poprzez koncepcję „shock ignition” (SI). Dotyczą one badania wpływu pre-plazmy na transport energii promieniowania laserowego do fali uderzeniowej i formowanie ciśnienia ablacyjnego w eksperymentach symulujących warunki SI. W badaniach tych wykorzystywane są różne diagnostyki, jednakże szczególnie przydatna okazała się wielokadrowa interferometria w opcji z femtosekundową rozdzielczością, dzięki zastosowaniu do oświetlenia układu interferometrycznego femtosekundowego lasera Ti:Sa o czasie impulsu około 40 fs. Implementacja tej diagnostyki była przedmiotem poprzedniego projektu LaserLab nr PALS-001914, zrealizowanego przez autora. Dzięki niej możliwe było określenie zmian gradientów koncentracji elektronowej, podczas oddziaływania impulsu laserowego z tarczą, co definitywnie potwierdziło występowanie absorpcji rezonansowej w przypadku pierwszej harmonicznej i jej wpływ na transport energii promieniowania laserowego do fali uderzeniowej generowanej w masywnej części tarczy dwuwarstwowej.

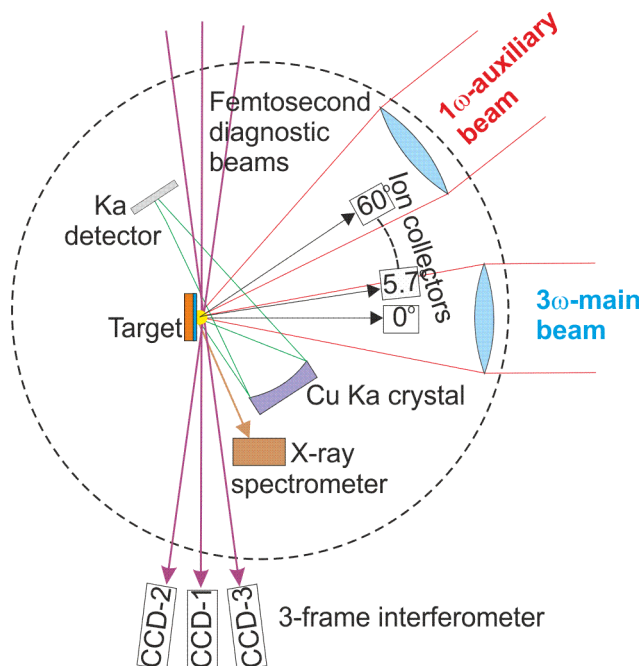
W roku 2014 kontynuowane były na eksperymencie PALS badania wpływu preplazmy na transport energii promieniowania laserowego do fali uderzeniowej i formowanie ciśnienia ablacyjnego w eksperymentach symulujących warunki SI. Jako wiązkę główną wytwarzającą zapłonową falę uderzeniową wykorzystywano 3-harmoniczną lasera jodowego ($\lambda_3=0.438 \mu\text{m}$) o intensywności promieniowania w zakresie $1\text{--}20 \text{ PW/cm}^2$ odpowiadającym zmianom parametru $I\lambda_3^2$: $2 \times 10^{14}\text{--}4 \times 10^{15} \text{ W}\mu\text{m}^2/\text{cm}^2$. Intensywność promieniowania wiązki głównej osiągana była poprzez wybór odpowiedniej energii oraz zmianę promienia wiązki laserowej na tarczy w zakresie $R_L=50\text{--}200 \mu\text{m}$. Preplazma symulująca wstępnie skompresjonowaną plazmę w realnym eksperymencie fuzji inercyjnej, kreowana była za pomocą 1-harmonicznej energii około 40 J, rozogniskowanej do wymiarów ogniska o promieniu $R_L=300 \mu\text{m}$. W eksperymentach wykorzystywano tarcze 2-warstwowe składające się z płaskiej tarczy masywnej z Cu, pokrytej cienkimi warstwami z polietylenu o różnych grubościach: 15, 25, 50 i $100 \mu\text{m}$.

W sesji eksperymentalnej na PALS, która się odbyła w okresie: 6-31 października 2014 roku wykorzystywane były następujące diagnostyki:

- 3-kadrowy interferometr z linią opóźniającą oświetlany femtosekundowym laserem Ti:Sa ($t=40 \text{ fs}$ i $\lambda=808 \text{ nm}$), do pomiaru rozkładów koncentracji elektronowej plazmy ablacyjnej,
- spektrograf rentgenowski z rozdzielczością przestrzenną w kierunku prostopadłym do tarczy, do określenia temperatury i koncentracji elektronowej plazmy ablacyjnej,
- 2D zobrazowanie emisji linii K_α z Cu za pomocą spektrografu ze sferycznym kryształem typu (211), w celu określenia rozkładu populacji szybkich elektronów oraz ich energii,
- kolektory siatkowe do pomiaru rozkładów kątowych emisji jonów, jako dodatkowe źródło informacji o temperaturze elektronowej plazmy ablacyjnej, średniej energii szybkich elektronów i geometrii ekspansji plazmy ablacyjnej.

Oprócz w/w diagnostyk prowadzone były pomiary kształtu i wymiarów kraterów wytwarzanych w tarczach masywnych, jako rutynowa diagnostyka wykorzystywana w eksperymentach na PALS, stosowana do oceny efektywności oddziaływania promieniowania laserowego z tarczą na podstawie informacji o objętości krateru.

Konfiguracja w/w diagnostyk, stosowana w zrealizowanych eksperymentach na PALS, pokazana jest na Rys.4.1.



Rys.4.1 Rozmieszczenie diagnostyk w komorze eksperymentalnej PALS.

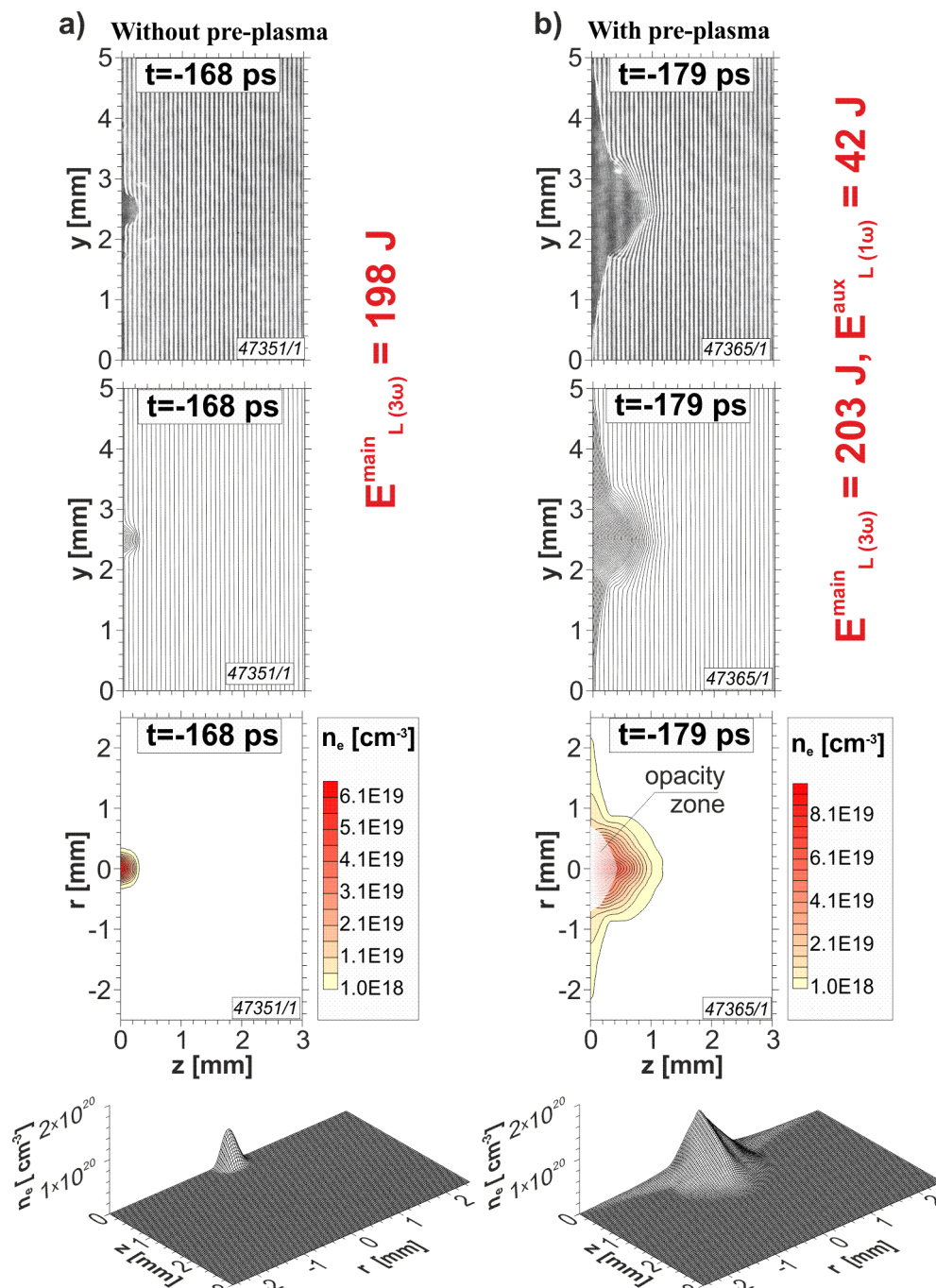
Przeprowadzenie zaplanowanych badań na PALS w ramach projektu wymagało:

- przygotowania wiązki diagnostycznej lasera femtosekundowego do oświetlenia 3-kadrowego interferometru, oraz zsynchronizowanie jej z impulsem lasera jodowego PALS,
- wykonania elementów optycznych i mechanicznych niezbędnych do zainstalowania na eksperymencie PALS podzespołów układu interferometrycznego: linii opóźniającej oraz układu rejestracji,
- przygotowania tarcz laserowych, obejmujące opracowanie konstrukcji i technologii ich wykonania oraz ilości dla planowanych eksperymentów plazmowych na PALS oraz
- przygotowania w/w diagnostyk do badań-instalacji i testowania.

Wyniki pomiarów oraz ich wstępna ocena i analiza, uzyskane w sesji badawczej na eksperymencie PALS

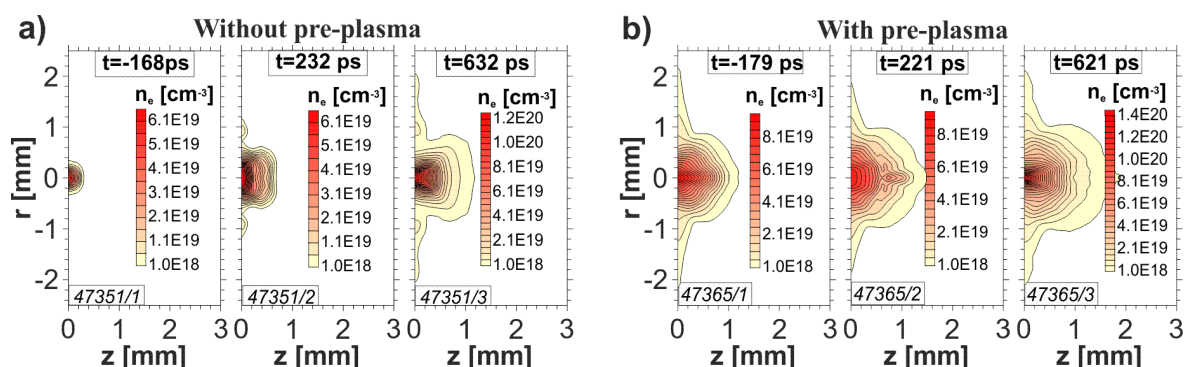
Interferometria 3-kadrowa

W celu uzyskania informacji o przestrzenno-czasowych rozkładach koncentracji elektronowej plazmy ablacyjnej pomiary interferometryczne realizowane były za pomocą 3-kadrowego interferometru z odstępem czasowym między kadrami 400 ps. Aby poznać zmiany czasowe koncentracji elektronowej podczas oddziaływania impulsu lasera, 1-kadr rejestrowany był przed impulsem lasera głównego – w zakresie: 200-400 ps w stosunku do jego maksymalnej intensywności. Uzyskano około 100 interferogramów, dla różnych warunków oświetlenia tarcz 2-warstwowych, które są obecnie przedmiotem ilościowych analiz w celu uzyskania danych o rozkładach koncentracji elektronowej. Rozkłady te stanowią będą bazę wyjściową do uzyskania



Rys.4.2 Interferogramy oraz uzyskane na ich podstawie rozkłady koncentracji elektronowej ilustrujące różnice w ekspansji plazmy ablacyjnej kreowanej 3-harmoniczną lasera o minimalnym promieniu ($R_L=50 \mu\text{m}$) w przypadku: a) bez oraz b) w obecności pre-plazmy.

informacji na temat gradientów koncentracji elektronowej, koncentracji liniowej oraz liczby elektronów w plazmie ablacyjnej. Analiza ilościowa interferogramów jest procesem dość złożonym i niezwykle pracochłonnym, szczególnie w fazie rekonstrukcji i uzyskania informacji o rozkładzie fazy. Z tego względu niniejszy raport zawiera informacje i wstępne oceny dotyczące tylko części zgromadzonych danych eksperymentalnych. Na rys.4.2 przedstawione są interferogramy oraz uzyskane na ich podstawie rozkłady koncentracji elektronowej, które pokazują różnice plazmy ablacyjnej generowanej za pomocą 3-harmonicznej lasera jodowego zogniskowanej do minimalnego promienia na tarczy 2-warstwowej, w przypadku jedno (rys.4.2a) oraz dwu-wiązkowego (rys.4.2b) oświetlenia. Czasowe zmiany koncentracji elektronowej, obejmujące oddziaływanie impulsu laserowego, demonstrują rozkłady na rys.4.3.



Rys.4.3 Porównanie rozkładów koncentracji elektronowej w różnych chwilach oddziaływania impulsu laserowego 3-harmonicznej z tarczą dwu-warstwową w przypadku: a) jedno oraz b) dwu-wiązkowego oświetlenia.

Pokazane na rys. 2 i 3 rozkłady koncentracji elektronowej wyraźnie demonstrują wpływ preplazmy na ekspansję plazmy ablacyjnej. Preplazma, która jest wytwarzana głównie z cienkiej warstwy plastikowej impulsem 1-harmonicznej przed głównym impulsem laserowym (około 1.2 ns), wyraźnie ogranicza radialną ekspansję centralnej plazmy kreowanej przez 3-harmoniczną, powodując wzrost koncentracji elektronowej na osi. Koncentracja rośnie z czasem ekspansji plazmy, co widoczne jest na rozkładach przedstawionych na rys. 3b.

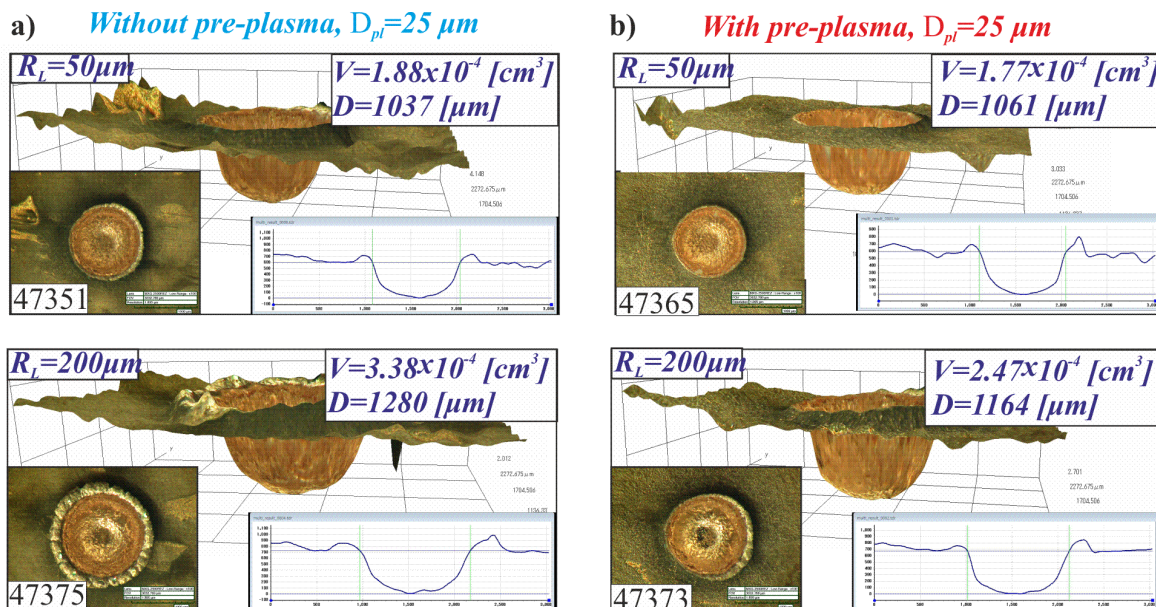
Dalszym etapem ilościowej analizy interferogramów, realizowanym obecnie, jest uzyskanie informacji o zmianach przestrzenno-czasowych koncentracji elektronowej w przypadku 1 i 2-wiązkowego oświetlenia dla większych promieni wiązki laserowej na tarczy: $R_L=100, 150$ i $200 \mu\text{m}$. Następnie rozkłady te będą wykorzystane do uzyskania informacji o:

- skali gradientu koncentracji elektronowej tzw. scale-length,
- koncentracji liniowej,
- całkowitej liczby elektronów,

niezbędnych do powiązania wyników badań interferometrycznych z wynikami uzyskanymi z pomiarów spektroskopowych i jonowych oraz prowadzenia szczegółowych analiz i formułowania wniosków odnośnie transportu energii promieniowania laserowego do fali uderzeniowej w warunkach adekwatnych do koncepcji SI. Szczególnie przydatnym parametrem do oceny efektywności transportu energii promieniowania laserowego z udziałem szybkich jest tzw. parametr N/V_{cr} , który wyznaczony będzie na podstawie danych o liczbie cząstek (N), zawartych w plazmie ablacyjnej oraz objętości kraterów V_{cr} , wytwarzanych w masywnej części tarcz 2-warstwowych.

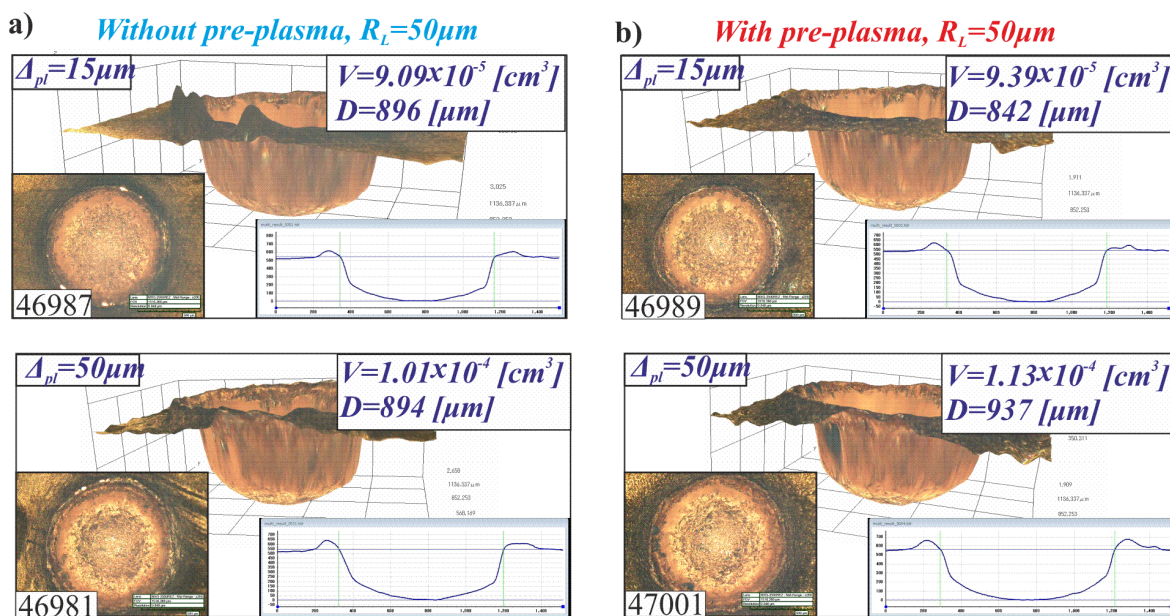
Pomiary objętości kraterów

Do pomiaru objętości kraterów wykorzystywany był mikroskop cyfrowy HIROX model KH-8700 z Instytutu Optoelektroniki WAT. Umożliwiał on określenie, zarówno pomiarów parametrów kraterów w wybranych przekrojach z mikronową dokładnością jak i ich wizualizację. Dzięki temu skomputeryzowanemu przyrządowi zmierzono objętości i wymiary kraterów (średnica i głębokość) dla wszystkich strzałów laserowych oddanych w sesji pomiarowej na PALS. Przykładowe poglądowe zestawienia kraterów otrzymanych w przypadku bez jak i obecności preplazmy, odpowiadające różnym warunkom oświetlenia w zależności od promienia wiązki laserowej oraz grubości warstwy plastikowej tarczy dwu-warstwowej, przedstawione są na rys.4.4 i 4.5. Rys.4.4 ilustruje wpływ zogniskowania wiązki laserowej na tarczy (jej promienia) na kształt i wielkość kraterów w przypadku tarcz dwu-warstwowych składających się z tarczy z miedzianej pokrytej warstwą plastikową o grubości $25 \mu\text{m}$.



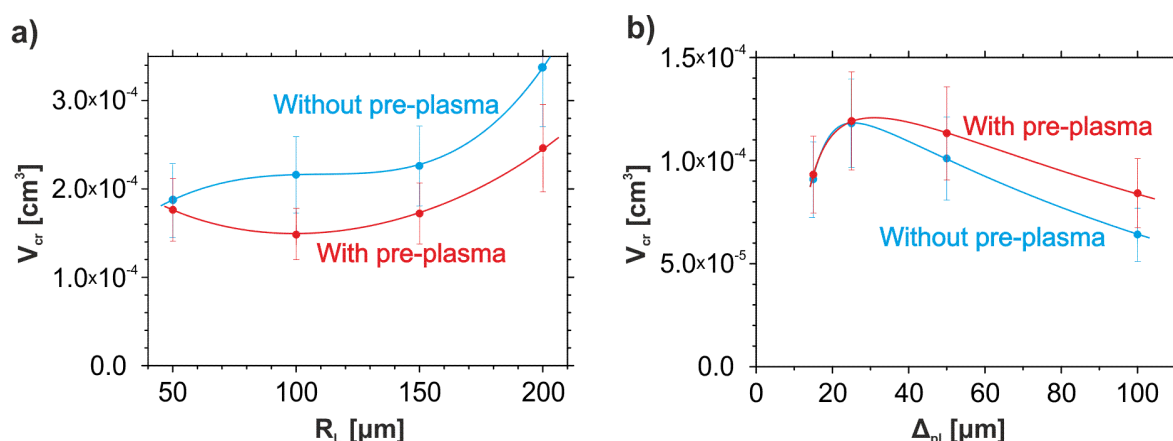
Rys.4.4 Wizualizacja kraterów za pomocą mikroskopu HIROX przedstawiająca kratery otrzymane w tarczach dwu-warstwowych o jednakowej konstrukcji w przypadku: a) bez oraz b) w obecności pre-plazmy dla dwóch różnych promieni wiązki laserowej.

Natomiast, rys.4.5 pokazuje wpływ grubości warstwy plastikowej na parametry kraterów otrzymywanych dla tych samych warunków oświetlenia odpowiadającym zogniskowaniu wiązki laserowej do minimalnego promienia, $R_L = 50 \mu m$.



Rys.4.5 Wizualizacja kraterów za pomocą mikroskopu HIROX przedstawiająca kratery otrzymane w tarczach dwu-warstwowych o różnej grubości warstwy plastikowej w przypadku: a) bez oraz b) w obecności preplazmy dla takich samych warunków oświetlenia odpowiadających minimalnemu promieniowi wiązki laserowej.

Ponieważ objętość kraterów jest miarą efektywności transportu energii promieniowania laserowego do tarczy, na podstawie informacji o objętościach kraterów otrzymanych dla różnych warunkach oświetlenia sporządzono diagramy ilustrujące zależność tej efektywności od: (i) wielkości promienia wiązki laserowej, rys.4.6a oraz (ii) grubości plastiku w tarczy dwuwarstwowej, rys.4.6b.



Rys.4.6 Zależność efektywności formowania krateru w przypadku bez oraz w obecności pre-plazmy w funkcji: a) wielkości promienia wiązki laserowej, oraz b) grubości plastiku w tarczy dwuwarstwowej.

Jak wynika z obu przedstawionych zależności na rys.4.6, obecność preplazmy w odmienny sposób wpływa na efektywność formowania krateru powodując zwiększenie bądź zmniejszenie transportu energii fali uderzeniowej generowanej w masywnej części dwu-warstwowej. W pierwszym przypadku, rys.4.6a, obecność preplazmy nie zmienia charakteru zależności $V_{cr}=f(R_L)$ tylko około 20% spadek efektywności jego formowania praktycznie w całym zakresie zmienności promienia wiązki laserowej. Wzrost efektywności formowania krateru, w przypadku bez jak i z preplazmą, jest zgodny z oczekiwaniami w przypadku krótszej długości fali (3-harmonicznej) i jest wynikiem zmniejszenia się roli dwuwymiarowej ekspansji plazmy ablacyjnej, która ze wzrostem promienia wiązki laserowej przechodzi w wymiarową ekspansję osiową w kierunku prostopadłym do tarczy, powodując wzrost ciśnienia ablacyjnego fali uderzeniowej odpowiedzialnej za formowanie krateru.

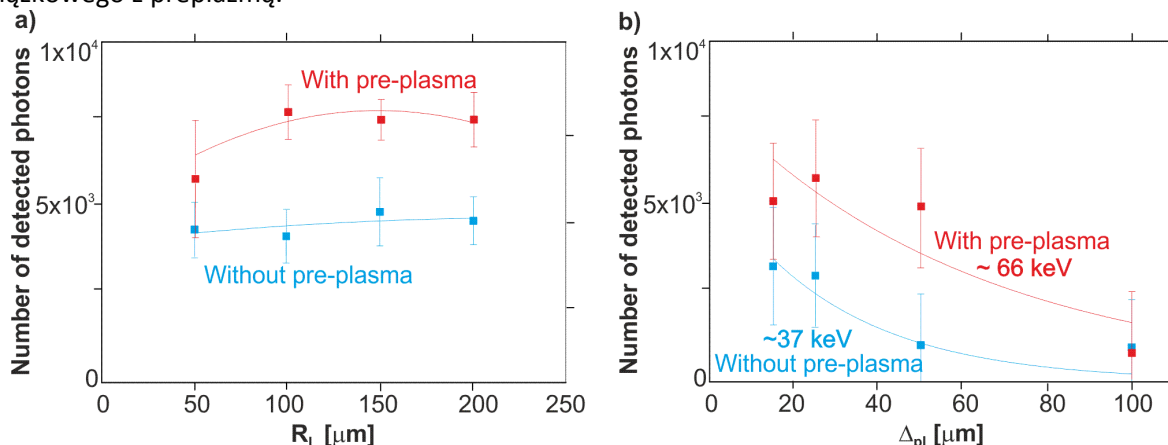
Natomiast zależność $V_{cr}=f(\Delta_{pl})$, wyraźnie demonstrowuje, że grubość plastiku tarczy dwu-warstwowej, około $\Delta_{pl}=25-30$ μm, jest optymalną grubością z punktu widzenia efektywności przekazu energii promieniowania do fali uderzeniowej formującej krater. Należy jednak zauważyć, że większa efektywność dla większej grubości warstwy plastikowej w przypadku preplazmy sugeruje udział w procesie formowania krateru szybkich elektronów o energiach większych niż w przypadku bez preplazmy. Taką tezę wyraźnie potwierdzają wyniki pomiarów energii szybkich elektronów uzyskane za pomocą 2D zobrazowania emisji linii k_{α} z miedzi, które są przedstawione w dalszej części sprawozdania. Oczekuje się również, że powyższa teza będzie potwierdzona przez wyznaczenie parametru N/V_{cr} , po uzyskaniu informacji o całkowitej liczbie elektronów, które będą wyznaczone z pomiarów interferometrycznych.

Pomiary spektroskopowe w zakresie rentgenowskim

Pomiary spektroskopowe w zakresie rentgenowskim, realizowane były za pomocą spektrografów z 2D zobrazowaniem, umożliwiającymi określenie, zarówno średniej temperatury elektronowej plazmy ablacyjnej jak i zobrazowania emisji szybkich elektronów poprzez rejestrację promieniowania rentgenowskiego obejmującym zakres linii k_{α} , będącego wynikiem oddziaływania szybkich elektronów z masywną tarczą miedzianą w celu określenia ich populacji oraz energii.

W celu określenia wpływu efektu 2D ekspansji plazmy ablacyjnej pomiary emisji szybkich elektronów realizowane były dla różnego zogniskowania wiązki laserowej na tarczy zmieniając jej promień w zakresie $R_L=50-200$ μm. Aby wyznaczyć energię szybkich stosowane były tarcze dwu-warstwowe o różnej grubości plastiku, $\Delta_{pl} = 15, 25, 50$ i 100 μm. Przykładowe wyniki pomiarów ilustrujące emisję fotonów generowanych w wyniku oddziaływania wiązki szybkich elektronów z masywną częścią tarczy z Cu, w warunkach bez oraz z wpływem preplazmy, przedstawione są na rys.4.7a i b. Zależność przedstawiona na rys. 7a pokazuje wzrost emisji fotonów ze wzrostem promienia wiązki laserowej, będący efektem zwiększenia osiowej ekspansji plazmy, natomiast wyraźnie demonstrowuje wzrost tej emisji w obecności preplazmy. Z kolei zwiększenie grubości warstwy plastiku, rys.4.7b, powoduje zmniejszenie emisji

fotonów, przy czym podobnie jak w poprzednim przypadku obecność pre-plazmy wyraźnie zwiększa ich emisję. Zakładając eksponencjalny zanik emisji fotonów ze zwiększeniem grubości warstwy plastiku i dopasowując go do danych eksperymentalnych, rys.4.7b, stosując metodę Monte Carlo przy założeniu Makswelskiego rozkładu energii szybkich elektronów zostały określone średnie energie szybkich elektronów odpowiadające przypadkom: (i) jedno-wiązkowego oświetlenia - bez preplazmy oraz (ii) dwu-wiązkowego z preplazmą.



Rys.4.7 Wyniki 2D zobrazowania emisji szybkich elektronów ilustrujące wpływ preplazmy na całkowitą populację fotonów w zależności od: a) wymiarów wiązki laserowej oraz b) grubości plastiku w tarczy dwu-warstwowej.

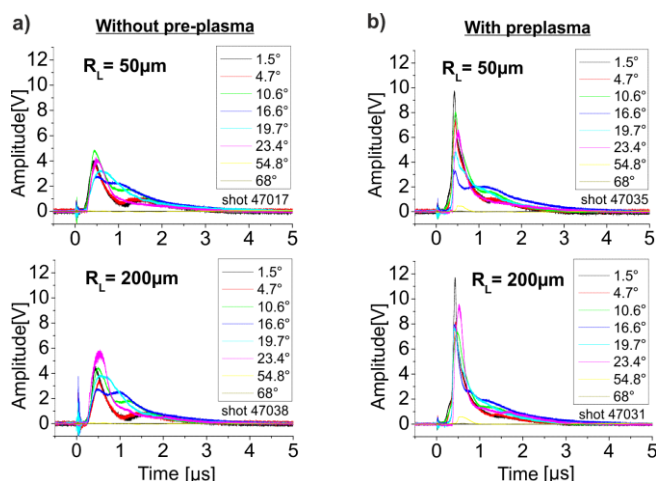
Obliczenia realizowane przez grupę prof. Oldricha Rennera z Instytutu Fizyki Plazmy Czeskiej Akademii Nauk pokazały, że obecność preplazmy prawie dwukrotnie może zwiększyć energię szybkich elektronów, rys.4.7b z 37 keV w przypadku bez preplazmy, do 66 keV w jej obecności.

Ten wzrost energii szybkich elektronów tłumaczy zwiększona efektywność transportu energii promieniowania laserowego do fali uderzeniowej stwierdzona w pomiarach objętości kraterów przedstawionych wcześniej.

Kolejnym etapem analizy wyników pomiarów spektroskopowych będzie określenie efektywności konwersji promieniowania laserowego w szybkie elektrony oraz porównanie tych wyników z wynikami symulacji numerycznych, które będą realizowane przez grupy teoretyczne z Instytutu Fizycznego im. Lebedeva w Moskwie oraz z Centrum Laserowego – CELIA Uniwersytetu w Bordeaux.

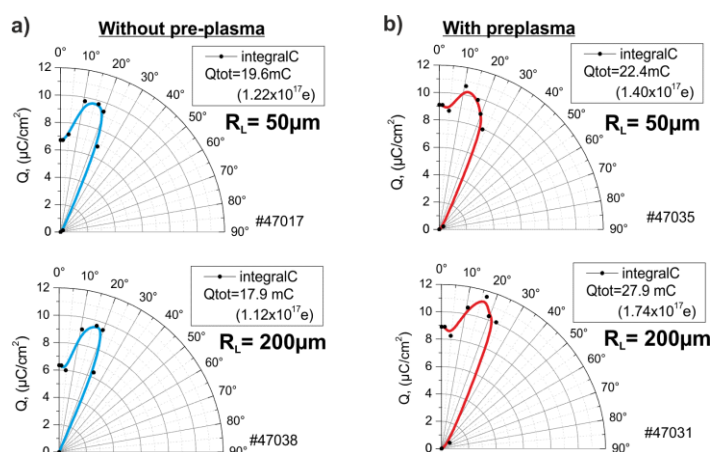
Pomiary jonowe

Pomiary emisji jonów prowadzone były za pomocą kolektorów usytuowanych w komorze eksperymentalnej w sposób pokazany na rys.4.1. Analiza uzyskanych wyników została już znacznie zaawansowana, a przykładowe wyniki przedstawione są na rys.4.8 i 4.9. Rys.4.8 ilustruje różnice



Rys.4.8 Amplitudy sygnałów jonowych zarejestrowanych za pomocą kolektorów siatkowych uzyskane dla dwóch sposobów zogniskowania promieniowania laserowego (minimalnym i maksymalnym promieniu wiązki laserowej w przypadku: a) bez oraz b) w obecności preplazmy.

między sygnałami jonowymi zarejestrowanymi w przypadku bez jak i w obecności preplazmy odpowiadające dwóm skrajnym opcjom oświetlenia tarcz dwu-warstwowych – minimalnym ($R_L = 50 \mu\text{m}$) i maksymalnym ($R_L = 200 \mu\text{m}$) promieniu wiązki laserowej. Jak wynika z diagramów, rys.4.8, zarówno większy promień wiązki laserowej oraz obecność preplazmy wymusza wzrost sygnału jonowego. Jednakże preplazma powoduje również zmniejszenie szerokości połówkowej tych sygnałów oraz ogranicza radialną ekspansję plazmy, powodując zwiększoną osiową emisję jonów w kierunku prostopadłym do tarczy, co potwierdzają zwiększone amplitudy sygnały dla detektorów usytuowanych pod małymi kątami w stosunku do osi wiązki laserowej. Na podstawie sygnałów czasowo-kątowych jonów, rys.4.8, zostały obliczone rozkłady kątowe gęstości ładunku jonów, rys.4.9, na których widoczny jest wpływ preplazmy oraz warunków oświetlania na parametry i charakter emisji jonów.



Rys.4.9 Kątowe rozkłady gęstości ładunku jonów uzyskane na podstawie sygnałów jonowych zarejestrowanych za pomocą kolektorów siatkowych dla dwóch sposobów zogniskowania promieniowania laserowego (przy minimalnym i maksymalnym promieniu wiązki) laserowej w przypadku: a) bez oraz b) w obecności preplazmy.

Dalszym etapem analizy wyników pomiarów jonowych będzie określenie wpływu preplazmy na parametry emisji jonów, wykorzystując w tym celu tarcze dwu-warstwowe o różnej grubości plastiku w zakresie: $\Delta p_l = 15\text{--}100 \mu\text{m}$. W tym przypadku, oczekiwania związane są z potwierdzeniem tezy wynikającej z pomiarów spektroskopowych oraz objętości o wpływie preplazmy na zwiększenie efektywności transportu energii laserowej do fali uderzeniowej poprzez udział w tym procesie szybkich elektronów o większych energiach, produkowanych w wyniku nieliniowych oddziaływań między promieniowaniem laserowym a plazmą w obecności preplazmy.

Wstępna ocena uzyskanych wyników badań

Oczekuje się, że wyniki badań eksperymentalnych w połączeniu z 2D symulacjami numerycznymi i analizami teoretycznymi odpowiadającymi warunkom realizowanych eksperymentów, pozwolą nie tylko zweryfikować, ale uzyskać również nowe informacje na temat:

- występowania w/w mechanizmów absorpcji promieniowania laserowego przez plazmę ablacyjną i ich udziału w procesie przekazu energii promieniowania laserowego do fali uderzeniowej generowanej w płaskich, dwu-warstwowych tarczach masywnych;
- wpływu transportu energii przenoszonej przez szybkie elektrony na formowanie ciśnienia ablacyjnego generowanego przez falę uderzeniową w masywnej części tarczy w warunkach eksperymentów symulujących koncepcję udarowego zapłonu.

Badania interferometryczne wczesnej fazy ekspansji plazmy ablacyjnej w połączeniu z pomiarami objętości krateru oraz pomiarami parametrów emisji szybkich elektronów uzyskanymi za pomocą diagnostyk spektroskopowych z 2D zobrazowaniem oraz jonowych, potwierdzają wyraźny wpływ *efektu 2D ekspansji plazmy* na efektywność transportu energii lasera do fali uderzeniowej generowanej w masywnej części tarczy dwu-warstwowej oraz emisję szybkich elektronów. Wzrost promienia wiązki laserowej prowadzi do wzrostu, zarówno efektywności transportu energii do tarczy jak i emisji szybkich elektronów. Preplazma nie zmienia znacząco charakteru tych zależności, natomiast wyraźnie wpływa na zwiększenie energii szybkich elektronów.

Z tego powodu, dotychczas opracowany materiał naukowy sugeruje postawienie następującej tezy:

Minimalny promień wiązki laserowej w przypadku 3ω , nie może być optymalnym z punktu widzenia efektywności transportu energii do fali uderzeniowej, ze względu na efekt 2D ekspansji plazmy ablacyjnej, powodując spadek ciśnienia ablacyjnego i towarzyszącą mu zmniejszoną emisję szybkich elektronów.

Wyniki tych badań będą porównane z wynikami dla 1ω uzyskanymi we wcześniejszych eksperymentach na PALS, w których nie obserwowano wpływu 2D ekspansji, a dominującym mechanizmem produkcji szybkich elektronów jest absorpcja rezonansowa.

Duże znaczenie dla weryfikacji w/w tezy będą miały informacje o zmianach rozkładów koncentracji elektronowej podczas oddziaływania impulsu laserowego z plazmą ablacyjną, uzyskane dzięki femtosekundowej interferometrii, które są obecnie przedmiotem ilościowych analiz. Oczekuje się, że uzyskanie informacji o gradientach koncentracji elektronowej pozwoli na identyfikację anomalnych oddziaływań odpowiedzialnych za generację szybkich elektronów o większych energiach w obecności preplazmy.

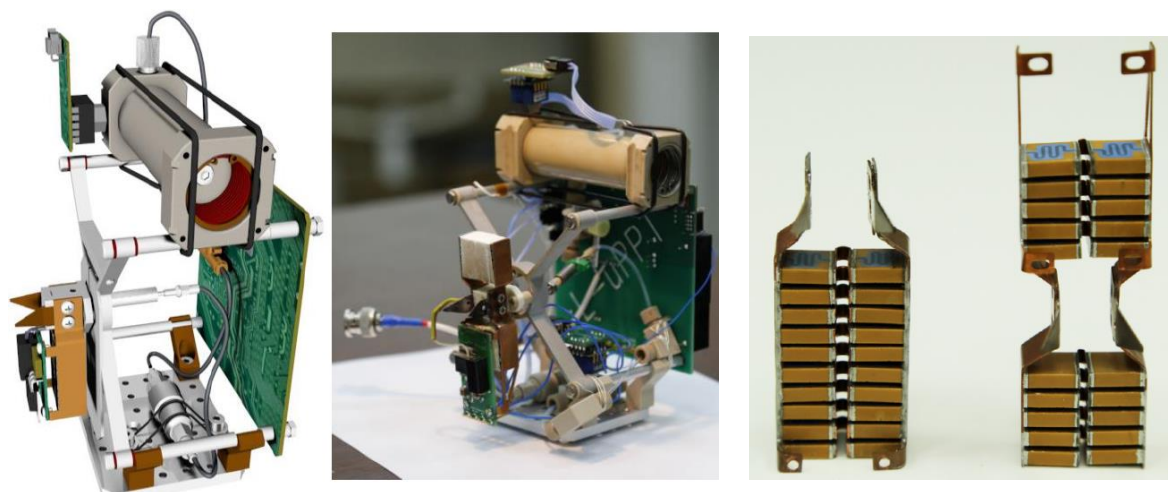
Uzyskany materiał naukowy w ramach realizacji projektu po opracowaniu, przewiduje się prezentować na międzynarodowych konferencjach dotyczących badań nad fuzją inercyjną. Pod uwagę brane są dwie najważniejsze konferencje odbywające się w roku 2015: 1) EPS 2015 w Lizbonie oraz 2) PLASMA 2015 w Warszawie. Niezależnie od prezentacji konferencyjnych, wyniki badań zamierza się jak najszybciej opublikować w najbardziej prestiżowych czasopismach z zakresu fizyki plazmy.

4.2 L μ PPT: Innowacyjny system zasilanego cieczą mikroimpulsowego silnika plazmowego dla nanosatelitów

Osoba kontaktowa: J. Kurzyna, jacek.kurzyna@ifpilm.pl

W wyniku problemów omówionych w Raporcie 2013 zadanie zostało rozpoczęte z opóźnieniem. Nie mniej, dzięki bardzo starannie przygotowanemu planowi zapasowemu i znakomitej współpracy konsorcjum, zadanie zostało wykonane w całości zgodnie z założeniami i pozwoliło doprowadzić do pomyślnego zakończenia kolejnego, najważniejszego zadania projektu, to jest przeprowadzić testy drugiego (ostatecznego) prototypu silnika L- μ PPT (patrz niżej). Zadanie 10 stanowi realizowaną w IFPILM część pakietu WP5. Zasadnicze cele tego zadania to:

- zespolenie wszystkich podzespołów ostatecznego prototypu w działającą całość,
- ocena funkcjonalności i charakterystyka strukturalna ostatecznego prototypu,
- ocena zgodności ostatecznego prototypu ze specyfikacją zdefiniowaną w pakiecie WP1.



Rys.10.1 Projekt (po lewej) i ostateczna realizacja drugiego prototypu – należy zauważyć zmianę asymetrycznej konfiguracji baterii kondensatorów na symetryczną (po prawej). Dwukomorowy zbiornik paliwa został zastąpiony wykonanym z tworzywa (PEEK) układem z jednym cylindrem – położenie zbiornika zostało wybrane ze względu na wygodę w układzie testowym i nie jest w żaden sposób określone przez rzeczywistą konstrukcję satelity.

Omawiając integrację drugiego układu prototypowego należy przypomnieć, że zasadnicze zmiany konstrukcyjne w stosunku do pierwszego prototypu wraz z nową koncepcją podawania paliwa opisano już w Raporcie 2013. Można je podsumować jak następuje:

- modyfikacji uległ sposób dostarczania paliwa dla wyładowania głównego polegający na wytworzeniu wąskiej „ścieżki” PFPE na izolatorze ceramicznym pomiędzy elektrodami silnika stanowiącej kontrolowaną warstwę dla inicjacji przebicia powierzchniowego (*surface flushover*) i rozwinięcia się wyładowania zasilanego z głównej baterii kondensatorów,
- zrezygnowano z miniaturowej pompy tłokowej (strzykawkowej) na rzecz bezpośredniego połączenia zaworu elektromagnetycznego z kapilarą ceramiczną mającą ujście w rowku wyżłobionym w bloku izolatora głównego,
- zastosowano zmienioną geometrię układu inicjującego zbliżoną do rozwiązań „klasycznych” ze wspólną z wyładowaniem głównym katodą,
- zmieniono energetykę układu inicjującego,
- zasadnicze zmiany elektroniki oraz konstrukcji zbiornika wykonane przez hiszpańskich partnerów JMP i NASP nie będą tu omawiane, chociaż są istotne dla integracji systemu i testów drugiego

prototypu zarówno od strony skuteczności sterowania i niezawodności działania silnika jak i efektywności podawania PFPE ze zbiornika.

Wszystkie zmiany zostały wprowadzone w wyniku szczegółowej analizy działania pierwszego prototypu oraz dodatkowych eksperymentów modelowych w specjalnie zaprojektowanym układzie do badania skuteczności i wydajności ablacji w układzie inicjującym (ponad 2 miliony strzałów). Na podstawie tych eksperymentów stwierdzono między innymi, że ablacja PFPE w układzie inicjującym jest pomijalnie mała w porównaniu do ablacji w wyładowaniu głównym. Dodatkowo okazało się, że do zapłonu wyładowania głównego wystarcza mniejsza energia iskry wyładowania inicjującego, co ma kluczowe znaczenie dla gospodarowania energią elektryczną dostępną na pokładzie satelity jak i dla zmniejszenia gabarytów tak istotnego w przypadku segmentu „nanosatellites”.

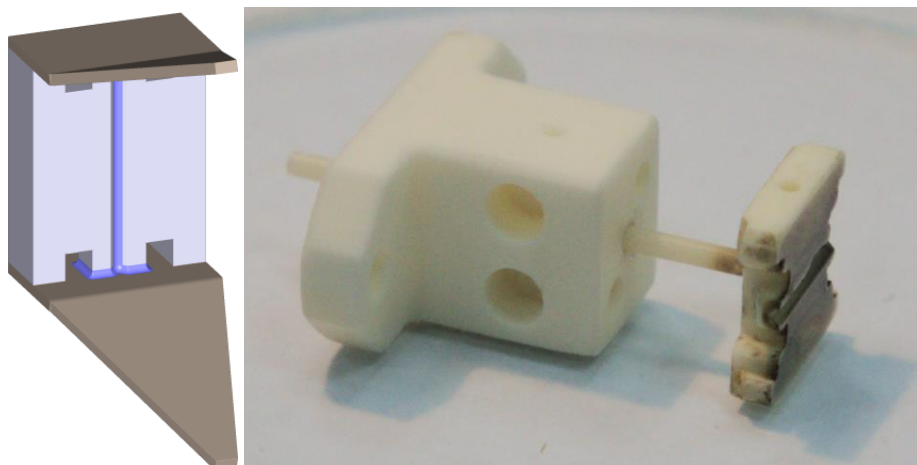
Dostarczanie paliwa

Należy przede wszystkim podkreślić, że wybór PFPE okazał się doskonale trafiony i ten polimer został wytypowany także, jako paliwo dla 2 wersji prototypowej (finalnej). Oprócz omówionej już dużej wydajności z punktu widzenia wytwarzanego impulsu siły ciągu trzeba podkreślić, że jest to substancja bezpieczna, niehigroskopijna, pozostająca w fazie ciekłej w bardzo szerokim zakresie temperatur, posiadająca atest do zastosowań kosmicznych, nieszkodliwa dla elementów optycznych i posiadająca wyjątkowo niskie ciśnienie pary nasyconej, co sprawia, że może pozostawać w próżni w otwartych naczyniach bez obawy, że wyparuje.

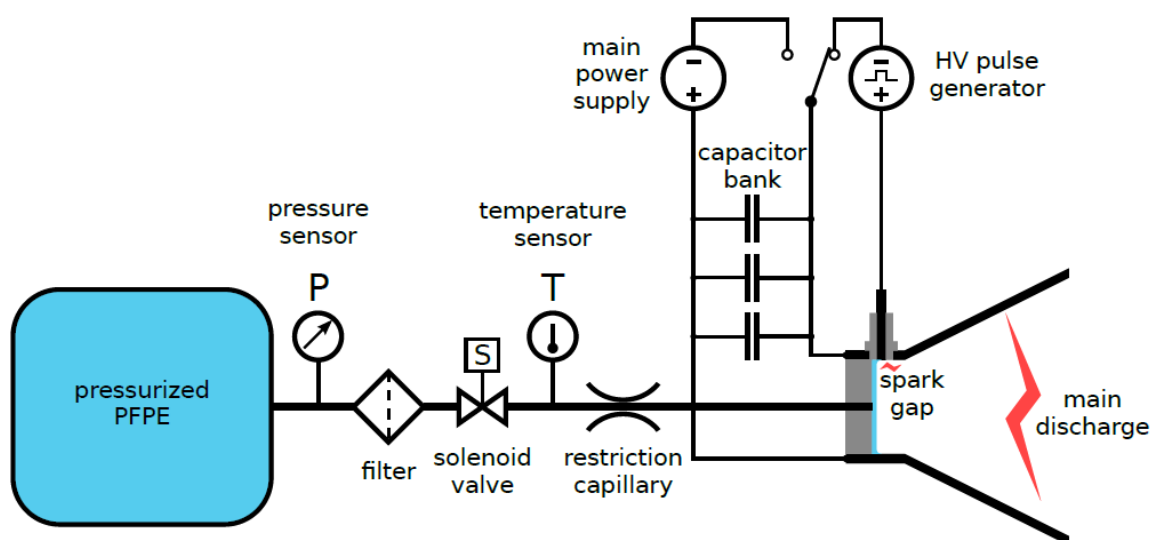
Geometria i zasilanie

Zasadnicza zmiana w geometrii dostarczania paliwa zilustrowana jest na rysunku 10.2 i opiera się na obserwacji, że wyładowanie główne może być zainicjowane jedynie wtedy, gdy powierzchnia izolatora między elektrodami pozostaje zwilżona przez PFPE. Jako alternatywę zaproponowano zastosowanie ceramiki porowatej nasyconej PFPE (zasada „knota”) i pewną liczbę eksperymentów przeprowadzono także z tym rozwiązaniem.

Natomiast nowy schemat dostarczania paliwa do bloku silnika przedstawiono na rysunku 10.3.



Rys.10.2 Z lewej: ilustracja działania układu z otwartą szczeliną wypełnioną PFPE. Menisk cieczy zaznaczono na niebiesko. Dodatkowe wycięcia w izolatorze w okolicy elektrod zapobiegają wyciekaniu dzięki utrzymywaniu cieczy przez siły kapilarne. Po prawej: mini-dozownik PFPE utworzony przez kapilarę zespoloną z czołową płytą izolatora.



Rys.10.3 Zasadniczy schemat zasilania elektrycznego i w paliwo (PFPE) dla finalnej wersji mikrosilnika.

Sterowanie wydatkiem masowym PFPE

O ile w pierwszej wersji prototypowej dostarczanie paliwa zapewniała miniaturowa pompa tłokowa (strzykawka) napędzana mikro-silnikiem krokowym, dla drugiego prototypu dostarczanie paliwa opiera się na układzie ciśnieniowym (zbiornik), z którego wypływ przez kapilarę ograniczającą odbywa się przez zadawany czas otwarcia zaworu elektromagnetycznego. Ze względu na stosunkowo dużą pojemność szczeliny jej otwarta powierzchnia między elektrodami pozostaje zwilżona przez wiele strzałów i uzupełnianie paliwa jest potrzebne tylko co określoną ich liczbę. Zaproponowana prosta metoda dostarczania określonej ilości paliwa na podstawie pomiaru czasu otwarcia zaworu jest uzasadniona przez prawo Poiseuille'a:

$$Q_v = \frac{\pi d^4 \Delta P}{128 \mu L}$$

opisujące wypływ masowy cieczy o lepkości dynamicznej μ z kapilary o długości L i średnicy d dla gradientu ciśnienia ΔP . Wynika stąd prosta proporcjonalność między czasem otwarcia zaworu t_{on} i żadaną objętością cieczy V_{diss} o temperaturze T dostarczanej do próżni ze zbiornika pod ciśnieniem P przez kapilarę o zadanych parametrach:

$$t_{on} \propto \frac{V_{diss} P}{p}.$$

Układ generacji plazmy

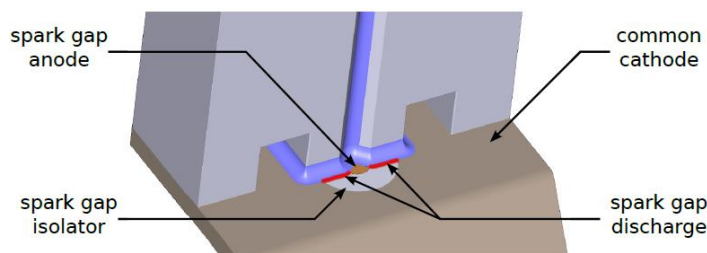
W porównaniu do układu zasilania paliwem, który zmieniony został w sposób zasadniczy, układ wytwarzania plazmy nie wymagał tak radykalnych modyfikacji. Dotychczasowy, trójkątny i rozarty układ elektrod zmieniono tylko na tyle, żeby można było zastosować nowy układ inicjujący (iskiernik) ze wspólną katodą, opracowano nowy typ iskiernika, zmieniono konstrukcję baterii kondensatorów i zaprojektowano układ ekranowania EM.

Iskiernik (inicjator)

Wspomniane już testy efektywności ablacji skłoniły do zastosowania klasycznej konfiguracji iskiernika o wspólnej katodzie z elektrodą główną. W ten sposób anoda iskiernika została osadzona w cylindrycznym izolatorze ceramicznym (układ koncentryczny) umieszczonym w otworze katody wyładowania głównego i służącej również, jako katoda dla anody iskiernika – patrz rysunek 10.4. Zastosowana geometria zapewnia częściowe zwilżanie przez PFPE powierzchni izolatora iskiernika i pozwala na rozwój

wyładowania powierzchniowego dostarczającego plazmy pierwotnej zawierającej elektrody główne i w ten sposób inicjującej rozwój wyładowania zasadniczego. W wyładowaniu głównym następuje zasadnicza ablacja PFPE i przyspieszanie cząstek produkujących impuls ciągu.

Rys.10.4 Iskiernik z "mokrą" powierzchnią izolatora.



Ponieważ w świetle uzyskanych wyników nie oczekuje się od iskiernika znaczącej ablacji PFPE, stosowany w pierwszym prototypie wysokonapięciowy transformator dużej mocy zastąpiono mniejszym i lżejszym transformatorem (Excelitas ZS 1052), co powinno także prowadzić do redukcji zakłóceń EM. Dalsze eksperymenty doskonale potwierdziły to założenie.

Bateria kondensatorów

Testy przeprowadzone z pojedynczymi kondensatorami ceramicznymi produkowanymi przez firmę Vishey pokazały, że powinny one pozwolić na uzyskanie wielomilionowych sekwencji wyładowań, chociaż testy całych baterii pozostają daleko w tyle za tymi przewidywaniami. Jak już to zostało przedstawione zasadniczym problemem okazało się nieprofesjonalne lutowanie. Zdecydowano się na dalsze stosowanie tych kondensatorów, mimo że kondensatory produkowane przez firmy Calramic i Novacap były również brane pod uwagę.

Integracja i wstępne testy

Podczas wspólnej sesji całego konsorcjum zorganizowanej w IFPILM w lipcu 2014 wszystkie podzespoły drugiego prototypu (wykonywane i testowane niezależnie przez poszczególnych członków konsorcjum) zostały zintegrowane w jedną, funkcjonalną całość – patrz rysunek 10.1. Podczas tej sesji zostały także przeprowadzone wstępne testy działania układu. Okazały się one bardzo obiecujące i udowodniły, że większa część problemów napotkanych podczas pracy z pierwszym prototypem została właściwie zinterpretowana i poprawnie rozwiązana w nowej konstrukcji. Dotyczy to przede wszystkim:

- zakłóceń EM – okazało się, że dzięki nowym rozwiązaniom cała elektronika działa bez problemów w obecności zakłóceń generowanych zarówno przez wyładowanie inicjujące jak i główne i można zrezygnować z dodatkowego ekranu osłaniającego układ elektrod głównych i baterię kondensatorów,
- układu inicjującego – małogabarytowy transformator wysokiego napięcia wystarcza energetycznie do niezawodnej inicjacji wyładowania głównego, a zastosowana koncepcja klasycznego iskiernika ze wspólną z wyładowaniem głównym katodą jest poprawna,
- dostarczania paliwa (PFPE) do rowka wykonanego w izolatorze ceramicznym między elektrodami głównymi – układ działa zgodnie z założeniami, co oznacza, że wyładowanie główne może być inicjowane w sposób niezawodny bez potrzeby zwilżania powierzchni tego izolatora „ręcznie” co określoną liczbę strzałów, jak to miało miejsce przy testach pierwszego prototypu.

Problemy

Zasadnicze problemy, jakie pojawiły się lub nie zostały rozwiązane podczas realizacji omawianego zadania to:

1. brak szczegółowej charakterystyki układu dozującego paliwo (PFPE) w funkcji temperatury i ciśnienia, która nie została dostarczona przez odpowiedzialnego partnera, ze względu na zbyt napięty harmonogram;

2. stała obecność pęcherzyków powietrza w zaworze podczas dozowania PFPE w próżni, co miało duży wpływ na niezawodność sterowania wydatkiem masowym paliwa;
3. wyjątkowo niska wartość siły ciągu, mimo prawidłowych charakterystyk wyładowania.

Rozwiązanie

Ad.1 Podczas sesji integracyjnej w IFPILM partnerzy z JMP i NanoSpace przeprowadzili dodatkowe testy układu dozującego, niestety, ze względu na brak czasu, jedynie w ograniczonym zakresie. Pokazały one, że podczas otwierania zaworu istnieje bardzo krótki czas przejściowy (rzędu ms), po którym za zaworem następuje stabilizacja ciśnienia na poziomie 50% wartości ciśnienia w zbiorniku spowodowana spadkiem ciśnienia w układzie filtrującym (rozwiązanie dodane jako korekta 1 prototypu). Ze względu na ograniczenia elektroniki sterującej (zbyt rzadkie próbkowanie) nie było można ocenić wydatku PFPE podczas tego czasu przejściowego. Późniejsze testy wykonane w IFPILM pozwoliły określić minimalny czas otwarcia zaworu, przy którym efekty przejściowe można było zaniedbać. Jednak ze względu na brak komory termicznej i konieczność skupienia się na testowaniu samego silnika wiarygodność pomiarów wydatku masowego nie została precyzyjnie oceniona.

Ad.2 Obecność pęcherzyków powietrza w układzie dozującym ujawniająca się podczas pracy w próżni sprawia, że podawanie paliwa jest źle kontrolowane i może często prowadzić do całkowitego opróżnienia kapilary do rowka w izolatorze w jednym kroku, powodując duże wycieki PFPE z samego rowka. Mimo, że zarówno partnerzy z JMP jak i IFPiLM są przekonani, że problem może być rozwiązany poprzez napełnianie zbiornika w próżni, to jednak brak wiarygodnej kalibracji układu dozującego z zaworem prowadzi do wniosku, że dla poprawnego pomiaru impulsów masy powinien on zostać zmodyfikowany. W związku z tym, na potrzeby testowania drugiego prototypu jako rozwiązanie zaproponowano prosty system dozujący utworzony przez kapilarę ceramiczną o wewnętrznej średnicy 1 mm, połączoną bezpośrednio z ceramicznym izolatorem silnika (dokładniej jego demontowalną płytą czołową) odłączoną od głównego zbiornika – patrz rysunek 10.2. Ten prosty system, po napełnieniu PFPE jest ważony a następnie montowany w bloku silnika i razem z nim umieszczany na wadze aerodynamicznej w komorze próżniowej. Po oddaniu serii strzałów (np. 1000) ten mini układ dozujący jest wyjmowany z próżni i ponownie ważony. W ten sposób, można było w wiarygodny sposób określić impuls masy na 1 strzał silnika.

Należy dodać, że pewną liczbę testów przeprowadzono również z innymi rozwiązaniami. W szczególności testowana była płyta czołowa izolatora wykonana z ceramiki porowatej (Al_2O_3 o 25% stopniu porowatości), nieposiadająca żadnych wyżłobień ani rowków. Niestety, w tym układzie, po kilkuset strzałach następowało zamknięcie porów ceramiki, prawdopodobnie produktami rozpadu PTFE w wyładowaniu. W związku z tym wszystkie testy dalej opisane prowadzono z opisanym powyżej prostym układem dozującym utworzonym przez kapilarę mającą ujście w rowku wykonanym w płycie czołowej izolatora. Napełnianie tego układu w próżni rozwiązało także problem pęcherzyków powietrza, tak, że działał bezproblemowo we wszystkich testach i okazał się najlepszym wyborem.

Ad.3 Bardzo szybko zostało stwierdzone, że niska wartość impulsu siły ciągu zarejestrowana podczas wstępnych testów związana była z błędną konstrukcją układu z asymetryczną baterią kondensatorów, którą zastosowano ze względu na łatwiejsze pozycjonowanie takiego układu w pobliżu krawędzi modułu „cube-sat”, pożądane z punktu widzenia dynamiki lotu. Poprawna konstrukcja baterii asymetrycznej wymagałaby całkowitej zmiany bloku silnika, co nie mogło być zrealizowane ze względu na przeładowany harmonogram projektu, jednak takie rozwiązanie jest przewidywane w przyszłości. Bieżący problem został bardzo szybko rozwiązany poprzez wyprodukowanie w IFPILM dwóch układów z symetrycznymi bateriami kondensatorów, w których zastosowano nowy (w odniesieniu do 1 prototypu) sposób łączenia kondensatorów z wykorzystaniem dzielonych elektrod pośrednich. Ten nowy sposób łączenia pozwolił jednocześnie zmniejszyć ryzyko zniszczenia wielu kondensatorów przy awarii choćby jednego z nich. Należy zaznaczyć, że asymetryczna bateria kondensatorów elektrycznie pracowała poprawnie, nie

wstrzymywała innych testów układu i wykazała, że zastosowana technologia lutowania jak również rozwiązanie z dzieloną elektrodą pośrednią są skuteczne.

Do wytworzenia nowych baterii kondensatorów (2 baterie 2.8 $\mu\text{F}/2\text{ kV}$ i 2 baterie 1.65 $\mu\text{F}/3\text{ kV}$) wykorzystano wnioski i doświadczenie zdobyte podczas testowania pierwszego prototypu. Do lutowania układu zostało w IFPILM zaprojektowane specjalne oprzyrządowanie, a samo lutowanie zostało zoptymalizowane i wykonane w profesjonalnym piecu konwekcyjnym przez warszawską firmę elektroniczną SEMICOM. Po wykonaniu baterii nie stwierdzono żadnych widocznych defektów w układzie.

Testowanie drugiego prototypu silnika L- μPPT

Po realizacji zadania 10 przystąpiono natychmiast do intensywnych testów drugiego prototypu (zadanie 11). Dzięki pomyślnej integracji i uruchomieniu drugiego prototypu, również to zadanie zostało w całości wykonane i wszystkie przewidywane testy zrealizowane. Poniżej zostaną przedstawione podstawowe rezultaty.

Opis

Kluczowym pytaniem stawianym podczas testowania drugiego prototypu była ocena wydajności finalnej wersji układu L μPPT . Niezbędne pomiary impulsów siły ciągu zostały przeprowadzone podobnie do pomiarów wykonanych dla pierwszego prototypu, tj. typowo dokonywano 10 pomiarów impulsu po serii 200 kolejnych wyładowań (strzałów). Zasadniczą bazę dla oceny wydajności stanowią pomiary impulsu masy (na jeden strzał), który zostały obliczony na podstawie ubytku masy paliwa (PFPE) w opisanym już mini układzie dozującym – patrz rysunek 10.2. Pomiarów ubytku masy dokonywano po serii strzałów liczącej od 1400 do 2200 strzałów. Oprócz wymienionych wyżej pomiarów niezbędnych dla oceny wydajności silnika plazmowego przeznaczonego do zastosowań kosmicznych, wykonano także zakrojone na szeroką skalę pomiary masowo-energetyczne cząstek emitowanych z plazmy. Energię i rodzaj cząstek wyznaczono metodą czasu przelotu połączoną z rejestracją za pomocą analizatora potencjałów opóźnionych. Dokonano również wizualizacji plazmy między elektrodami silnika za pomocą ultraszybkich kamery fotograficznej (czas ekspozycji 1 fotografii wynosił 10^{-8} s). W ten sposób uzyskano cenną informację na temat stopnia jonizacji składowych plazmy PTFE oraz rozwoju i ewolucji chmury plazmowej.

Energia zmagazynowana w baterii

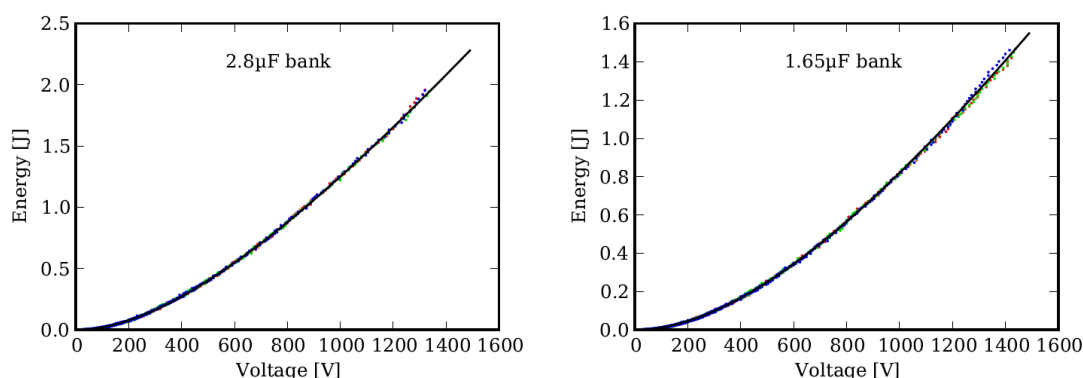
Do oceny wydajności silnika niezbędna jest znajomość energii zmagazynowanej w baterii kondensatorów. Chociaż nominalna pojemność użytych kondensatorów ceramicznych jest podawana przez producenta, to jednak zmienia się ona nieliniowo wraz z napięciem i do precyzyjnej oceny energii oddawanej podczas wyładowania należało przeprowadzić dokładniejsze pomiary. Spośród kilku zastosowanych metod najbardziej wiarygodne okazały się zależne od czasu pomiary napięcia na elektrodach baterii kondensatorów podczas jej rozładowania przez 20 k Ω opornik metalowy dużej mocy. Poprzez całkowanie mocy V^2/R oddawanej przez oporność R określano energię baterii w funkcji malejącego aż do zera napięcia. Dla każdej baterii wykonano trzy pomiary. Do otrzymanych wyników dopasowano następującą formułę analityczną:

$$E(V) = \frac{1}{2} C_0 \frac{V^2}{1 + V/V_0},$$

gdzie V/V_0 odpowiada degradacji pojemności baterii wraz z napięciem. Dobrano następujące wartości parametrów:

$C_0=4.50\text{ }\mu\text{F}$, $V_0=1250\text{ V}$ dla baterii o pojemności nominalnej 2.80 μF oraz

$C_0=2.55\text{ }\mu\text{F}$, $V_0=1800\text{ V}$ dla baterii o pojemności nominalnej 2.65 μF .

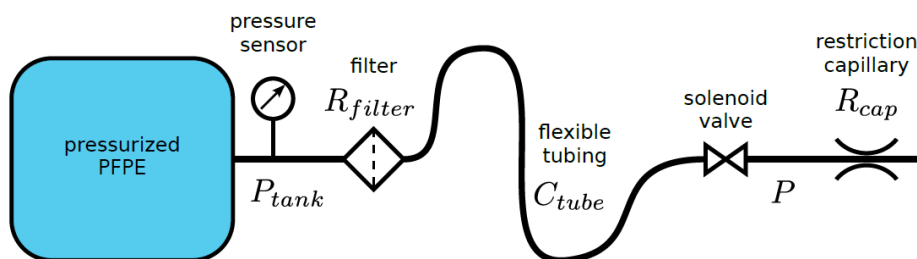


Rys.11.1 Eksperymentalnie otrzymana zależność energii zmagazynowanej w baterii kondensatorów w funkcji napięcia – kolory odpowiadają trzem różnym pomiarom, natomiast linia ciągła dopasowanej formule analitycznej.

Podstawowym wynikiem tych pomiarów jest obserwacja, że efektywna pojemność z punktu widzenia zmagazynowanej energii dla napięć nieprzekraczających około 30% napięcia nominalnego jest faktycznie większa niż wartość wynikająca z pojemności nominalnej, natomiast powyżej tego progu stale maleje spadając w końcu poniżej wartości teoretycznej.

Układ zasilania paliwem

Schemat układu zasilania silnika paliwem ze zbiornika ciśnieniowego został przedstawiony na rysunku 11.2. Mimo że do oceny wydajności silnika zastosowano omówiony już wcześniej miniaturowy układ z kapilarą zespoloną z płytą czołową izolatora, to jednak dla układu z rysunku 11.2 przeprowadzono niezależnie cały szereg pomiarów, których celem była ocena zaproponowanej wcześniej koncepcji zasilania.



Rys.11.2 Schemat hydrauliczny układu zasilania z zaworem elektromagnetycznym.

W przypadku małej liczby Reynoldsa można dla określenia przepływu przez kapilarę wykorzystać analogię pomiędzy układem elektrycznym i hydraulicznym, skąd otrzymuje się równanie:

$$\frac{P}{R_{cap}} = \frac{P_{tank} - P}{R_{filter}} - C_{tube} \frac{dP}{dt},$$

gdzie P oznacza ciśnienie w odcinku pomiędzy filtrem i wejściem kapilary, R_{cap} i R_{filter} opory hydrauliczne kapilary i filtru, natomiast C_{tube} pojemność hydrauliczną elastycznej rurki. Po otwarciu zaworu zmiana ciśnienia opisywana jest więc zależnością:

$$P(t) = \bar{P}(P_{tank} - \bar{P}) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

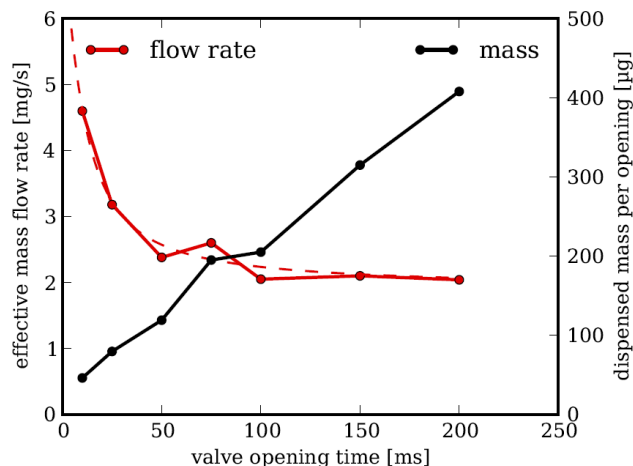
w której: $\bar{P} = \frac{R_{cap}}{R_{filter} + R_{cap}} P_{tank}$ i $\tau = \frac{R_{cap} R_{filter}}{R_{filter} + R_{cap}} C_{tube}$.

Pomiary zmian ciśnienia w czasie przeprowadzone w IFPILM za pomocą oscyloskopu w pełni potwierdziły tę zależność i pokazały, że dla $t \rightarrow \infty$ stosunek $\bar{P}/P_{tank} \approx 0.25-0.5$ oraz że τ jest rzędu kilku ms. Wynika stąd również, że średni wydatek $\langle Q \rangle$ w funkcji czasu otwarcia zaworu wynosi:

$$\langle Q \rangle(t) = \frac{\bar{P}}{R_{cap}} + \frac{P_{tank} - \bar{P}}{R_{cap}} \frac{\tau}{t} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right]$$

Pomiary dostarczanej masy i średniego wydatku masowego zostały wykonane dla różnych czasów otwarcia zaworu. Ich wyniki ilustruje rysunek 11.3.

Rys.11.3 Efektywny wydatek masowy i masa dostarczana ze zbiornika w funkcji czasu otwarcia zaworu. Linia przerywaną zaznaczono podaną wyżej formułę analityczną (po dopasowaniu parametrów).



Otrzymane rezultaty są zgodne z rozumieniem mechaniki dostarczania paliwa ze zbiornika z „szybkim” zaworem, ale dokładne przewidywanie wydatku masowego w przyszłym układzie zasilania wymaga dodatkowych pomiarów, precyzyjnej kalibracji oraz pewnych modyfikacji układu. Ponieważ do oceny impulsów masy został ostatecznie użyty wspomniany już mini-układ z kapilarą, pomiary wydatku ze zbiornika ciśnieniowego zakończono na tym etapie.

Wydajność układu silnika μ PPT

Wszystkie pomiary wykonano w takim samym układzie eksperymentalnym jak dla pierwszego prototypu, z wykorzystaniem udoskonalonej wersji wagi aerodynamicznej, zamontowanym, ale nie podłączonym, zbiornikiem paliwa – patrz rysunek 10.1 – i baterii kondensatorów o pojemności 2.8 μ F/2000 V, a w ostatnich seriach pomiarów 1.65 μ F/3000 V

Procedura

Pomiary siły ciągu prowadzono w oparciu o procedurę opracowaną dla pierwszego prototypu. Po każdej rejestracji sygnału odpowiadającego impulsowi siły ciągu I_{bit} rejestrowano także impuls kalibracyjny. Na podstawie wszystkich impulsów kalibracyjnych zarejestrowanych we wszystkich seriach pomiarowych z tym samym obciążeniem wagi aerodynamicznej (*thrust stand*) wyznaczano wartość oscylującej masy. Wartość ta służyła do obliczenia impulsu siły ciągu na podstawie amplitudy oscylacji z wykorzystaniem opisanej w Raporcie 2013 procedury numerycznej. Zwykle dokonywano 10 pomiarów impulsu po dłuższej sekwencji wyładowań, najczęściej złożonej z 200 strzałów. Zaobserwowano, że wartość impulsu siły ciągu zmniejszyła się o blisko 40% w porównaniu do pierwszego prototypu.

Impuls masy m_{bit} uwalnianej w każdym wyładowaniu określano na podstawie ubytku masy opisanego wcześniej mini-układu dozującego. Pomiaru dokonywano za pomocą precyzyjnej wagi laboratoryjnej OHAUS EX324 pozwalającej w praktyce określać masę z błędem ± 0.1 mg. Serie wyładowań pomiędzy pomiarami masy liczyły od 1400 do 2200 wyładowań, tak więc błąd pomiaru impulsu masy był zawsze mniejszy niż $\pm 0.1 \mu$ g.

Do określenia impulsu właściwego I_{sp} i sprawności η stosowano standardowe wzory:

$$I_{sp} = \frac{I_{bit}}{m_{bit}g_0} \quad \eta = \frac{1}{2} \frac{I_{bit}^2}{m_{bit}E}$$

gdzie E oznacza energię zmagazynowaną w kondensatorach, a g_0 przyspieszenie ziemskie. Sprawność η jest określona dla samego silnika i nie uwzględnia np. sprawności układu ładującego baterie.

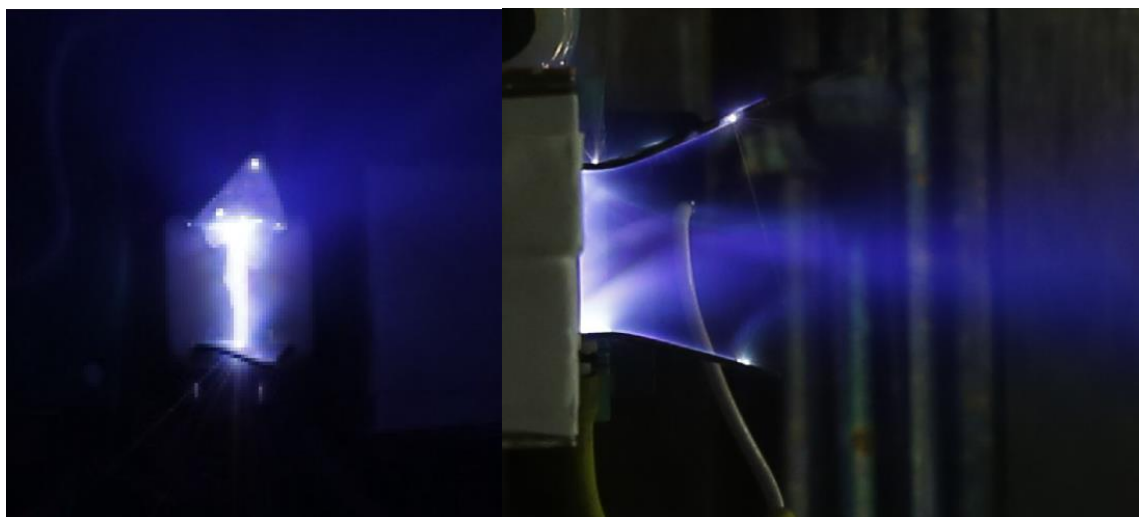
Wyniki pomiarów

Pomiary zostały przeprowadzone w trzech punktach charakterystycznych:

- przy napięciu pracy 750 V (bateria 2.80 μF , napięcie nominalne 2000 V)
- przy napięciu pracy 1000 V (bateria 2.80 μF , napięcie nominalne 2000 V)
- przy napięciu pracy 1500 V (bateria 1.65 μF , napięcie nominalne 3000 V)

Podczas wstępnych testów z baterią 2.8 μF jak również udokumentowanych testów wydajności przeprowadzonych przy napięciu 750 V (20000 wyładowań) i 1000 V (10000 wyładowań) nie zaobserwowano jakichkolwiek problemów. W układzie z baterią 1.65 μF wykonano ponad 2000 wyładowań przy napięciu 1500 V i aż do zakończenia testów wydajności również nie stwierdzono jakichkolwiek problemów.

Fotografia integralnego (w czasie) świecenia wyładowania (w pełnym zakresie widzialnym) została przedstawiona na rysunku 11.4. W odróżnieniu od pierwszego prototypu wyładowanie jest lepiej zlokalizowane i wyraźnie przywiązane do ścieżki PFPE pozostającej w rowku w izolatorze. Większe rozmycie wyładowania, jakie obserwowano dla pierwszego prototypu było prawdopodobnie związane z obecnością PFPE na całej powierzchni izolatora między elektrodami.



Rys.11.4 Fotografia integralnego świecenia plazmy wyładowania w 2 prototypie silnika. Po lewej – widok od frontu, wyraźnie zaznaczona ścieżka wyładowania wzdłuż rowka z paliwem. Po prawej – widok z boku, widoczna uformowana struga plazmowa.

Wydajność z baterią 2.8 μF przy napięciu 750 V

Wydajność silnika dla baterii 2.8 μF przy napięciu pracy 750 V została w sposób syntetyczny przedstawiona na rysunku 11.5. Wykresy podsumowują wynik ponad 500 pomiarów impulsu siły ciągu i są rezultatem realizacji ponad 10000 wyładowań. Zmniejszony blisko dwukrotnie stosunek siły ciągu do mocy wydawał się w pierwszej chwili degradacją w porównaniu z pierwszym prototypem. Jednak po wykonaniu pomiarów impulsu masy okazało się, że jest to spowodowane pracą w reżimie dużego I_{sp} i uzyskiwana sprawność na poziomie 10% jest wyjątkowo wysoka jak dla układów PPT. Należy podkreślić, że osiągnięty stosunek siły ciągu do mocy pozostaje nadal względnie duży i jest porównywalny z uzyskiwanym w najlepszych układach PPT zasilanych teflonem. I tak np. w mającym kosmiczny certyfikat silniku LES-6 wynosi 14 $\mu\text{N/W}$ [1], w silniku Dawgstar 10.7 $\mu\text{N/W}$ [2], a w najbardziej zaawansowanym silniku PPTCUP od 16.5 do 19 $\mu\text{N/W}$. Należy zauważyć przy tym, że dla wspomnianych silników impuls właściwy wynosi odpowiednio 300, 483 i 600 s podczas gdy dla drugiego prototypu $L_{\mu\text{PPP}}$ 1000 s, a więc jest blisko od 2 do 3 razy większy. Mimo pewnych statystycznych fluktuacji od sesji do sesji, można powiedzieć, że zarówno impuls właściwy jak i sprawność zachowują się względnie stabilnie.

Wydaje się, że główną przyczyną zmiany wartości stosunku siły ciągu do mocy jest zmiana powierzchni PFPE dostępnej dla wyładowania. O ile w pierwszym prototypie wynosiła ona około 100 mm², to w drugim, w skutek ograniczenia otwartej powierzchni PFPE jedynie do rowka w izolatorze, zmalała do ok. 10 mm². Wyniki pomiarów przy 1000 V również dostarczają argumentów na rzecz tej hipotezy.

Wydajność z baterią 2.8 μ F przy napięciu 1000 V

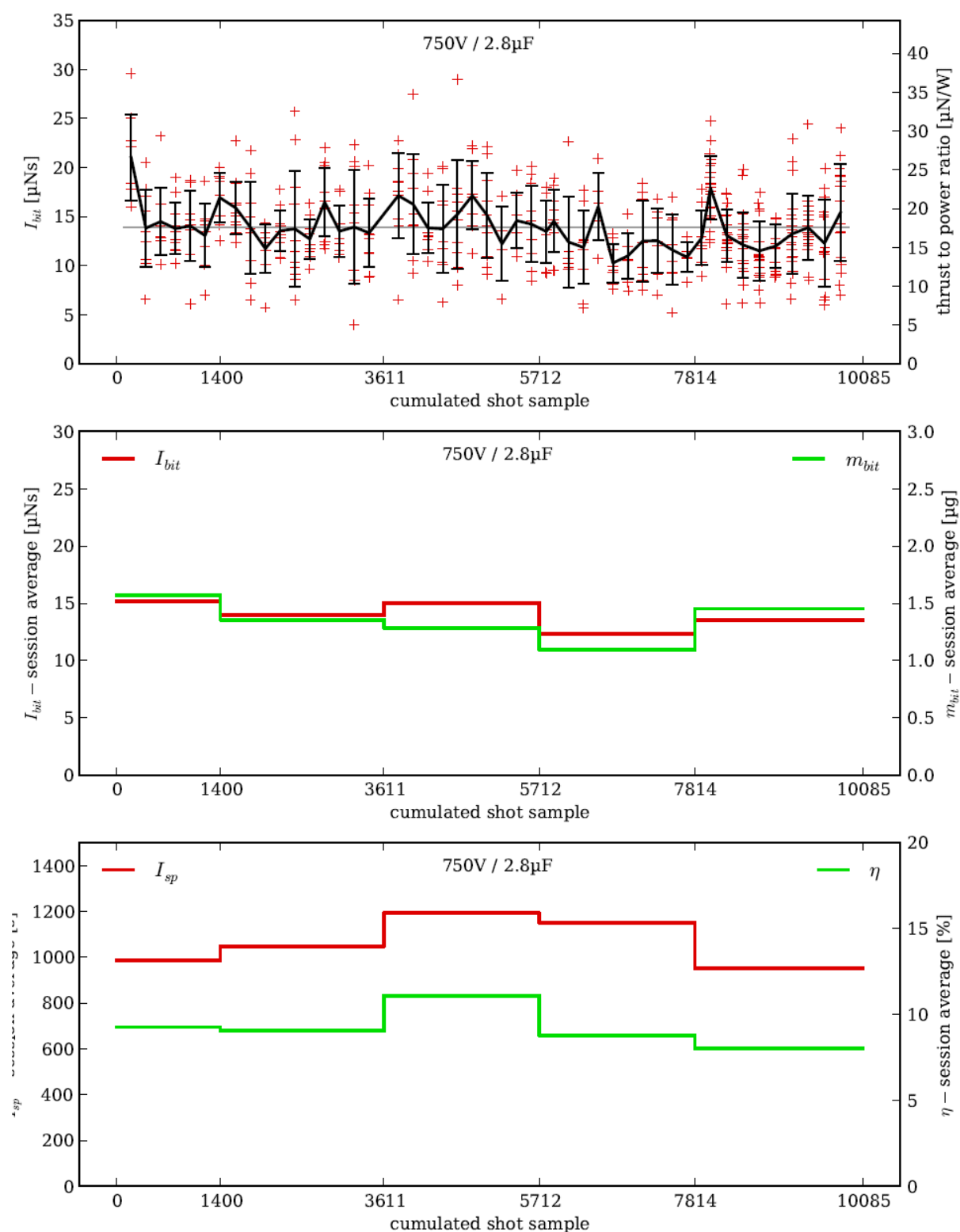
Zaobserwowane dla tego napięcia systematyczne zmiany wydajności od sesji do sesji można zinterpretować jako efekt wyczerpywania się lub nadmiaru PFPE (po uzupełnieniu) w rowku izolatora. Dla sesji, w których poziom PFPE w rowku był dobrze określony wydajność pozostawała stabilna i była porównywalna z wydajnością dla przypadku 750 V – w szczególności sprawność sięgała 10%, impuls właściwy był wyższy niż dla 750 V (1200 w porównaniu z 1000 s), a więc i stosunek siły ciągu do mocy był nieco mniejszy (15 zamiast 17 μ N/W).

Wydajność z baterią 1.65 μ F przy napięciu 1500 V

Ze względu na ograniczenia czasowe, w tych warunkach udokumentowano jedynie serię 1800 wyładowań. Podczas pomiarów żadne problemy się nie pojawiły, a po ich zakończeniu bateria nadal była sprawna. Wydajność silnika była podobna do określonej w poprzednich przypadkach i w szczególności $I_{sp} \approx 1000$ s, $\eta \approx 9\%$ a stosunek siły ciągu do mocy ≈ 17 μ N/W, co sugeruje, że większe znaczenie dla wydajności silnika ma jego konstrukcja niż napięcie lub energia baterii kondensatorów.

Testy wytrzymałości

Testy mające na celu określenie czasu życia, dla baterii 2.8 μ F przeprowadzono przy napięciu 1000 V. Przed rozpoczęciem testu bateria miała już za sobą 30220 wyładowań zarówno przy napięciu 750 jak i 1000 V. Po serii dodatkowych 17633 wyładowań przy 1000 V (w sumie 47853 wyładowań) dwie pary kondensatorów zaczęły źle pracować. Po usunięciu wadliwych kondensatorów testy kontynuowano przy zmniejszonej pojemności baterii (2.24 μ F). Dodatkowo oddano jeszcze 6000 strzałów jednak ostatecznie bateria została zastąpiona nową. Wydaje się, że uszkodzenie pierwszego z kondensatorów mogło nastąpić wskutek błędnego podłączenia iskiernika w serii 6000 pierwszych strzałów testowych. Takie podłączenie mogło prowadzić do podania wprawdzie małej mocy, ale wysokonapięciowych impulsów (10 kV) na baterię główną i w rezultacie uszkodzić jeden z kondensatorów, który stopniowo ulegał dalszej degradacji, aż do całkowitego zniszczenia.



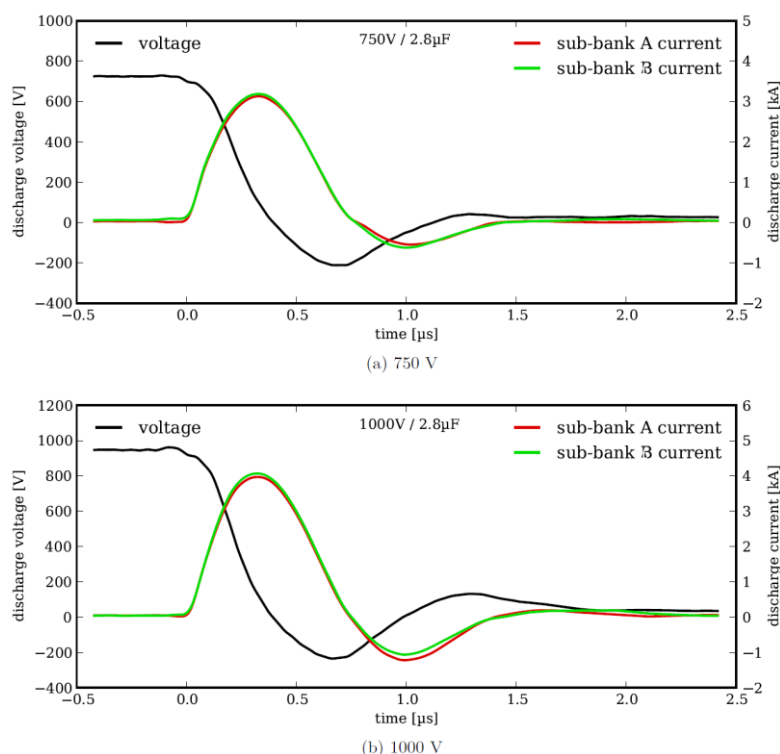
Rys.11.5 Wydajność 2 prototypu silnika LμPPT dla baterii 2.8 uF i napięcia 750 V określona na podstawie wszystkich zarejestrowanych przypadków.

Diagnostyka

Pomiary prądu i napięcia

Rejestracja zmian prądu rozładowania baterii kondensatorów i napięcia to podstawowa diagnostyka stosowana rutynowo w impulsowych układach plazmowych. W przypadku silnika $L\mu PPT$, ze względu na symetryczną budowę baterii rejestrowano niezależnie przebiegi prądowe dla każdej z dwóch gałęzi baterii. Do pomiarów prądu wykorzystywano dwa miniaturowe pasy Rogowskiego, a do pomiarów napięcia wysokonapięciową sondę oscyloskopu. Typowe wyniki pomiarów przedstawiono na rysunku 11.6.

Rys.11.6 Przebiegi prądu i napięcia dla wyładowania w silniku $L\mu PPT$.



Globalny kształt przebiegów jest bardzo powtarzalny, a położenie maksimum prądu prawie się nie zmienia i przypada ok. 300 ns po inicjacji wyładowania. Przebiegi prądu w obu gałęziach są na ogół bardzo podobne, co świadczy o dobrym zrównoważeniu układu. Nie mniej pojawiające się co pewien czas różnice kształtów odzwierciedlają się podczas wizualnej obserwacji wyładowania. Oscylacje prądu i napięcia wskazują, że układ jest bliski tłumienia krytycznego, co z punktu widzenia sprawności silników typu PPT ma kluczowe znaczenie i świadczy o efektywnym przekazie energii do plazmy.

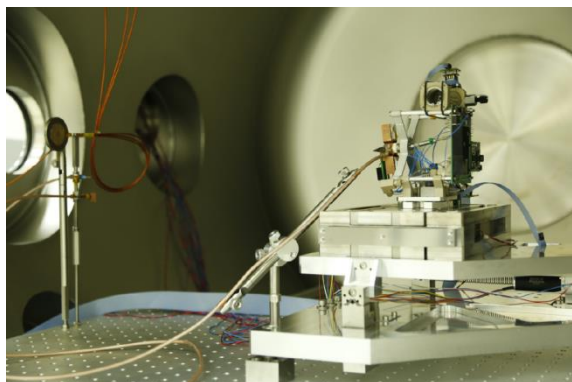
Należy zauważyć, że z powodu błędnej kalibracji układu sterującego rzeczywista (zmierzona) wartość początkowa napięcia była o około 5% niższa od wartości wprowadzanej do systemu. Wynika stąd, że energia wyładowania używana do oceny wydajności silnika była zawyżona i w konsekwencji stosunek siły ciągu do mocy oraz sprawność zaniżone.

Analiza masowo-energetyczna emitowanych cząstek

Energię i rodzaj cząstek powstających w procesie ablacji PFPE określono wykorzystując metodę czasu przelotu w połączeniu z wyznaczeniem ich energetycznej funkcji rozkładu za pomocą analizatora potencjałów opóźnionych (określanego czasami skrótem RPA lub RFEA). Dla napięcia pracy 750 V przeprowadzono zakrojone na szeroką skalę pomiary, które poniżej zostaną jedynie skrótowo opisane.

Nie wdając się w szczegóły, analizator RPA to rodzaj filtru elektrostatycznego pozwalający rejestrować strumień cząstek zjonizowanych o energiach przekraczających zadawaną wartość progową potencjału. Przez różniczkowanie zarejestrowanych przebiegów prądu po wartościach tego potencjału można znaleźć energetyczną funkcję rozkładu tych cząstek.

Ustawienie detektora (sondy RPA) w stosunkowo dużej odległości od silnika (0.5 m) pozwala określić prędkość cząstek docierających do detektora na podstawie tzw. czasu przelotu, tj. różnicy czasu między momentem generacji i rejestracji. Wykorzystano tutaj krótki czas trwania wyładowania (patrz rysunek 11.6) w porównaniu z czasem dotarcia cząstek do detektora. Układ eksperymentalny został przedstawiony na rysunku 11.7.

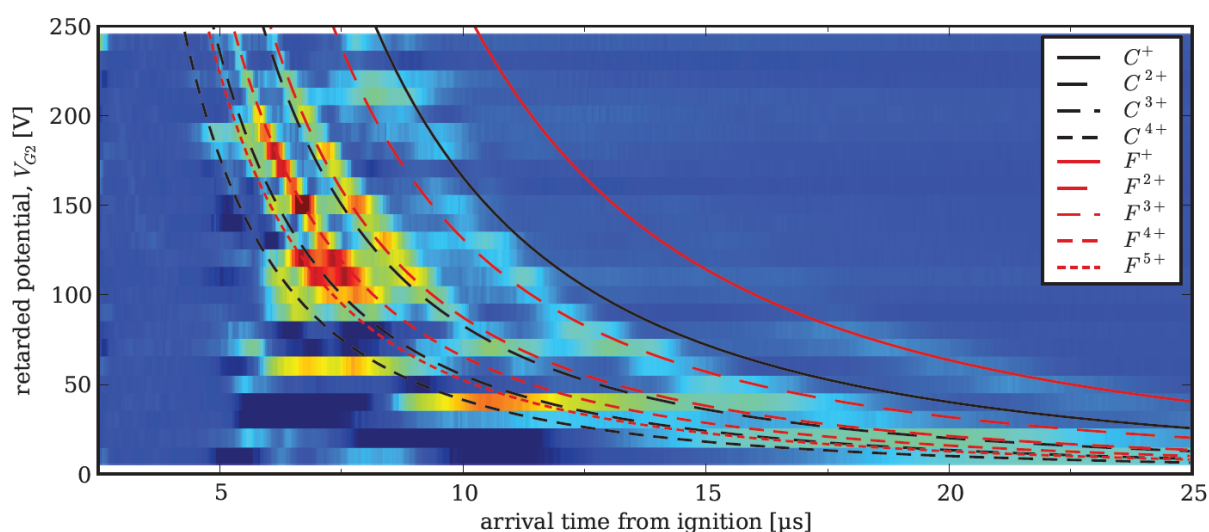


Rys.11.7 Układ eksperymentalny pokazujący detektor analizatora RPA (kołowa sonda po lewej) i sondę magnetyczną (obok baterii kondensatorów) pozwalającą na precyzyjną synchronizację pomiarów. Silnik znajduje się na wadze aerodynamicznej, a konfiguracja eksperymentu pozwala na jednoczesną rejestrację sygnałów z RPA i impulsów siły ciągu.

Prezentowane na rysunku 11.8 wyniki otrzymano przez rejestrację sekwencji 20 sygnałów dla 26 różnych wartości potencjałów progowych, a więc na podstawie analizy 520 zależnych od czasu sygnałów. Według najlepszej wiedzy autorów są to pierwsze dla silników PPT dane o składzie masowym chmury plazmowej dostarczające nowych informacji na temat fizyki wyładowania. Chociaż interpretację otrzymanych krzywych na podstawie porównania z teorią należy traktować z pewną dozą ostrożności (otrzymywana jest jedynie wartość stosunku masy i ładunku), to jednak istnienie wielokrotnych jonów węgla i fluoru wydaje się być bezsporne.

Chociaż dalsza analiza jest niezbędna, to jednak już można powiedzieć, że liczba ładunkowa jonów jest nadszpejowanie wysoka. Pamiętając o tym, że rejestrowany prąd jest proporcjonalny do liczby ładunkowej cząstek i tak wydaje się, że w plazmie dominują jony F^{3+} i F^{4+} . Ze względu na zbliżone wartości stosunku masy i ładunku dla jonów C^{2+} i F^{3+} oraz C^{3+} i F^{5+} nie można z całą pewnością ich zidentyfikować, nie mniej jony C^{4+} wydają się obecne.

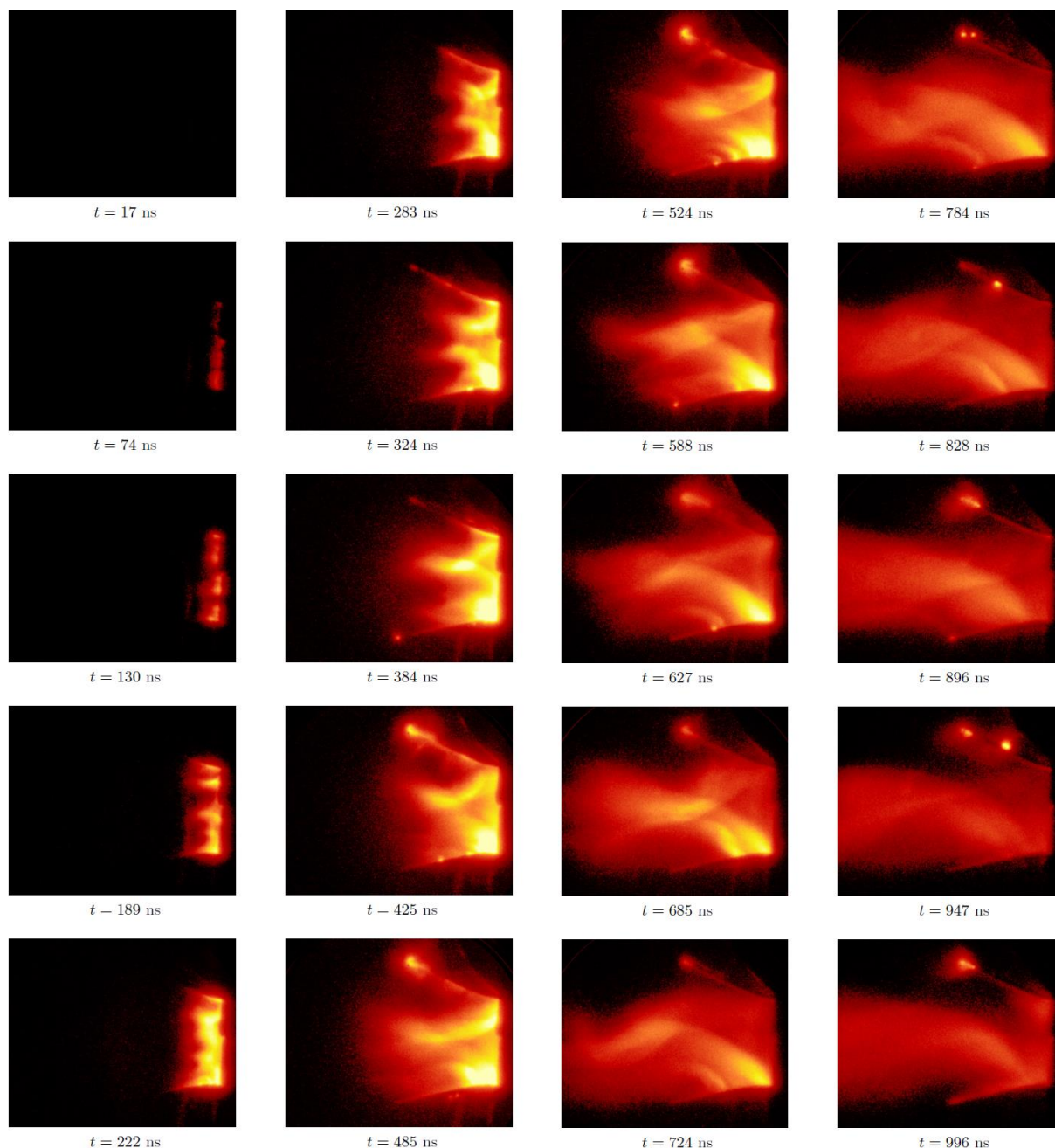
Jeżeli wyniki tych pomiarów się potwierdzą, to można sugerować, że niska wydajność silników PPT jest w dużej mierze związana z energetycznie kosztowną produkcją wysokoładunkowych jonów.



Rys.11.8 Wartość prądu składowych jonowych (skala kolorów) w funkcji potencjału analizującego i czasu przelotu. Na rysunku wykreślono teoretyczne krzywe dla odpowiednich stosunków masy i ładunku branych pod uwagę jonów.

Szybka fotografia plazmy

Szybka fotografia jest jedną z ważniejszych metod diagnostycznych stosowanych w układach plazmowych do badania dynamiki procesu i zrozumienia jego fizyki. Do rejestracji rozwoju wyładowania w silniku ŁμPPT zastosowano 1-kadrową, ultraszybką kamerę CCD z fotokatodą (350-900 nm) i bramkowanym wzmacniaczem obrazu (typu *channel-plate*) produkcji warszawskiej firmy ACS. Wszystkie fotografie rejestrowano z 10-cio ns czasem ekspozycji, a wyzwalenie realizowano za pomocą linii optycznej sterowanej widoczną na rysunku 11.7 szybką sondą magnetyczną. Żądane opóźnienie zapewniał szybki generator sygnałów.



Rys.11.9 Rekonstrukcja ewolucji plazmy wyładowania w silniku ŁμPPT na podstawie fotografii za pomocą szybkiej kamery – czas ekspozycji: 10 ns. Dla zwiększenia czytelności poziomy szarości zostały zastąpione pseudo-kolorem.

Już pierwsze fotografie pokazały, że powtarzalność wyładowania jest bardzo dobra (dla jednego czasu opóźnienia wykonywano zawsze dwie fotografie) i można jego dynamikę odtworzyć na podstawie sekwencji pojedynczych zdjęć wykonanych dla oddzielnych strzałów przy różnych czasach opóźnienia

rejestracji w stosunku do momentu inicjacji. Zmontowaną sekwencję 20 fotografii przedstawiono na rysunku 11.9. Na zarejestrowanych zdjęciach nie można wyróżnić propagującej warstwy prądowej, której istnienie zakłada się niejako implícite w układach PPT. Zamiast niej obserwuje się raczej objętościowe narastanie obszaru świecącego aż do czasu ok. 300 ns (odpowiadającego maksimum prądu) po którym od ok. 500 ns pojawia się faza quasi-stacjonarna z „włóknami” przyczepionymi do elektrod i malejącej intensywności świecenia aż do końca wyładowania.

Podsumowanie

Najbardziej istotnym wynikiem testów wydajności jest wysoka, stabilnie utrzymująca się powyżej 10% sprawność silnika $\text{L}\mu\text{PPT}$ niezależnie od napięcia pracy. Przekracza ona znacznie sprawność obserwowaną dla teflonowych, klasycznych silników PPT.

Zmniejszony w porównaniu z pierwszym prototypem stosunek siły ciągu do mocy jest związany ze zmniejszeniem powierzchni PFPE dostępnej dla wyładowania i prowadzi do wysokiego, przekraczającego 1000 s I_{sp} . Na podstawie przeprowadzonych eksperymentów można wnioskować, że zwiększenie siły ciągu (o ile wymagane) może być osiągnięte przez zwiększenie powierzchni PFPE dostępnej dla wyładowania, ale kosztem zmniejszenia I_{sp} .

Testy wytrzymałości przeprowadzone dla drugiego prototypu pokazały niemal 10-krotne zwiększenie czasu życia baterii w stosunku do pierwszego prototypu (50000 strzałów zamiast 6000). Nie mniej wskazują, że stosunkowo krótki czas życia całej baterii w porównaniu z czasem życia pojedynczych kondensatorów jest nadal problemem i dalsze testy zmierzające do określenia właściwego, tj. nieniszczącego napięcia pracy baterii są w przyszłości niezbędne.

Poprawiona elektronika i oprogramowanie pracowały bezbłędnie i zastosowana metoda izolacji układów sterujących od układów mocy w obecności silnych zakłóceń EM okazała się trafiona.

Nowy układ iskiernika okazał się dobrym rozwiązaniem i stosunek zainicjowanych wyładowań głównych do impulsów wyzwalaających mieścił się w przedziale od 70 do 100%, w zależności od warunków pracy i napięcia inicjującego. Nie mniej dalsze udoskonalenia są pożądane, a zwłaszcza optymalizacja geometrii i położenia iskiernika względem rowka z PFPE.

Podobnie do klasycznych silników PPT z teflonem, podczas pracy silnika $\text{L}\mu\text{PPT}$ na odstłoniętych powierzchniach i elektrodach pojawiała się karbonizacja. Nie mniej, zgodnie z oczekiwaniami, powierzchnia PFPE była zawsze czysta. Oznacza to, że wybór PFPE był także trafiony i ten polimer, jako jeden z nielicznych posiada właściwości wymagane dla zastosowań w silnikach PPT.

W końcu należy podkreślić, że oprócz udowodnienia przydatności innowacyjnej technologii dla segmentu silników satelitarnych wykonano szereg nowych pomiarów diagnostycznych (ultra-szybka fotografia, zależna od czasu analiza masowo-energetyczna), które pomogą zrozumieć fizykę działania układów PPT.

5 Projekty Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej

5.1 Badanie eksperymentalne uszkodzeń powodowanych przez strumienie plazmy oraz prędkich jonów, powstających podczas naświetlania w generatorze Plasma Focus PF-1000U próbek materiałów przewidzianych dla reaktorów fuzyjnych

Osoba kontaktowa: R. Miklaszewski, ryszard.miklaszewski@ifpilm.pl

W 2014 roku zrealizowano zgodnie z planem następujące zadania:

1) Za pomocą generatora plazmy Plasma-Focus PF-1000 przeprowadzono naświetlanie próbek wolframu (PLANSEE Double Forged Tungsten) przygotowanego przez FZJ Jeulich, Niemcy oraz stop wolframu ($W-1\%La_2O_3$) przygotowany w Uniwersytecie Tallińskim. Identyczne próbki naświetlane były w ramach tzw. round-robin tests w laboratoriach Instytutu Metalurgii i Badań Materiałowych (IMET), Moskwa, UNSC Kcharkov Institute of Physics and Technology, Ukraina, Międzynarodowego Centrum Fizyki Teoretycznej, Triest, Włochy oraz Uniwersytetu Tallińskiego.

2) W 2014 roku prowadzono analityczne badania uszkodzeń radiacyjnych powstających na powierzchni naświetlanych w IFPiLM materiałów. Ponieważ IFPiLM nie posiada specjalistycznej aparatury do badań metalograficznych (mikroskopy elektronowe, etc.) do analiz wykorzystano nowoczesne urządzenia analityczne zespołów z Instytutu Metalurgii w Moskwie oraz Instytutu Fizyki Plazmy Czeskiej Akademii Nauk w Pradze współpracujących z IFPiLM.

3) W 2014 roku kontynuowano badania eksperymentalne procesów fizycznych towarzyszących oddziaływaniu wysokoenergetycznych strumieni plazmy oraz wiązek jonów z powierzchniami materiałów. W badaniach tych wykorzystano nowoczesne diagnostyki wchodzące w skład kompleksu PF-1000 w tym: 16-kadrowy interferometr laserowy (badanie wczesnej fazy oddziaływania 0-300 ns), kadrowa kamera rejestrująca obrazy plazmy w zakresie miękkiego promieniowania X (dalsze fazy zjawiska $< 200\mu s$) oraz spektrometr optyczny z rozwinięciem czasowym umożliwiający zbadanie czasowej ewolucji składu atomowego warstwy plazmowej ekranującej powierzchnię badanej próbki.

Przedmiotem badań był proces tworzenia się warstwy plazmy pochodzącej z odparowanego materiału tarczy (wolfram, stal nisko-aktywacyjna, kompozyty węglowe), powstającej w wyniku nagrzewania powierzchni próbki przez padający strumień plazmy deuterowej oraz jej ekspansji w kierunku prostopadłym do tarczy.

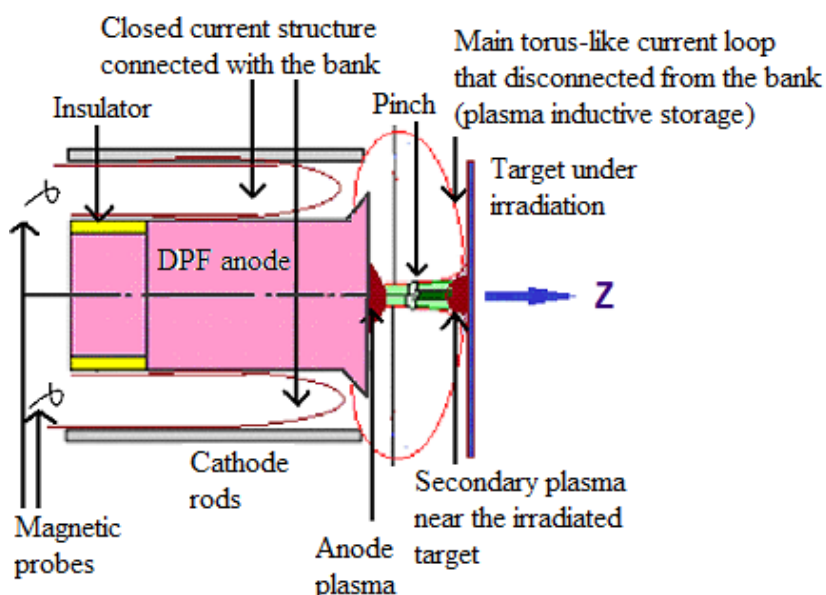
4) W 2014 nastąpił także znaczący rozwój bazy eksperymentalnej laboratorium Plasma-Focus. W ramach zadania zbudowano nowoczesny układ diagnostyczny pozwalający rejestrować obrazy plazmy w zakresie ultrafioletu próżniowego oraz miękkiego promieniowania X (8 eV- 6 keV). Unikalna kamera oparta na czterosektorowym elemencie MCP z otwartą płytką mikrokanałową (niezależnie wyzwalane sektory ułożone triangularnie) i wyposażona w ultra-szybką migawkę elektrooptyczną pozwala rejestrować cztery kadry ($< 1ns$) w regulowanych odstępach 10-100 ns.

Testowanie wytrzymałości materiałów na silne obciążenia termiczne

W 2014 roku generator plazmy Plasma-Focus PF-1000 wykorzystywany był do testowania wytrzymałości materiałów na silne obciążenia termiczne wywoływane strumieniami plazmy oraz wiązkami jonów. Najwięcej uwagi poświęcono badaniom próbek wolframowych, ponieważ europejski program koncentruje się aktualnie na tym materiale, jako najbardziej perspektywicznym z punktu widzenia konstrukcji divertora tokamaka ITER.

Kontynuowano także badania materiałów kompozytowych oraz specjalnych stali konstrukcyjnych, które nadal są przedmiotem zainteresowania konsorcjum EUROfusion.

Do badań wykorzystano próbki wolframu przygotowane dla wszystkich uczestników program CRP przez FZJ Juelich (PLANSEE Double Forged Tungsten) oraz wykonane przez IMET (Moskwa) i Uniwersytet Talliński (W+1%La). W prowadzonych badaniach próbki materiałów umieszczane były w odległości 7 cm od powierzchni czoła anody układu PF-1000, co oznacza, że miały bezpośredni kontakt z kolumną plazmową.

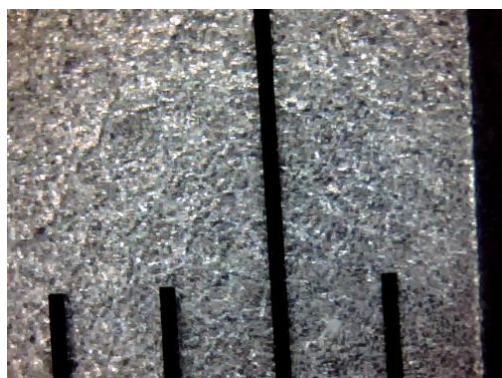
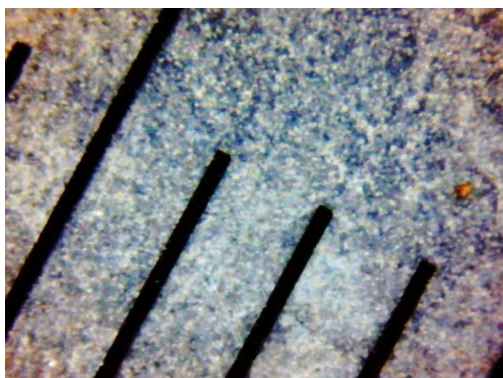


Rys.1.1 Schemat eksperymentów prowadzonych na układzie PF-1000 w ramach projektu.

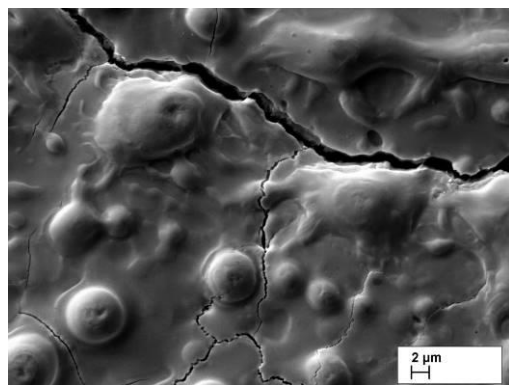
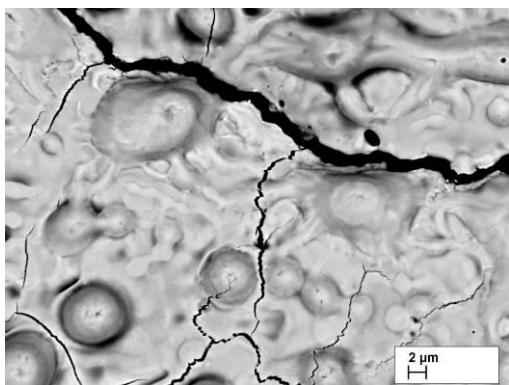
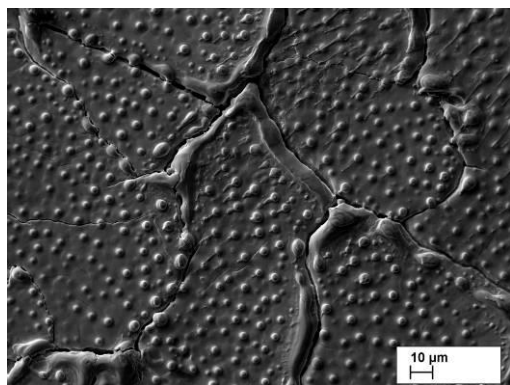
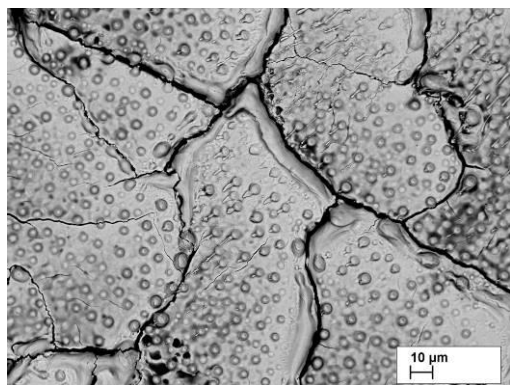
Naświetlono 10 próbek wolframowych wykorzystując emisję neutronów, jako wskaźnik intensywności strumienia jonów (z poprzednich, szczegółowych badań wynika, że intensywność emisji jonów oraz strumień energii plazmy są dobrze skorelowane z emisją neutronów). Każda próbka naświetlana była w ten sposób, aby całkowita emisja neutronów w zastosowanych wyładowaniach wynosiła odpowiednio: 5×10^{10} , 10^{11} , 2×10^{11} .

W ramach round-robin tests takie same próbki były naświetlane za pomocą innych układów typu Plasma-Focus: PF-5M (IMET, Rosja), PF-Bora (ICTP, Włochy), PF-7 (UT, Tallin, Estonia) w odmiennych warunkach (mniejsze energie wyładowań, różne czasy oddziaływania, inne gazy robocze w komorze).

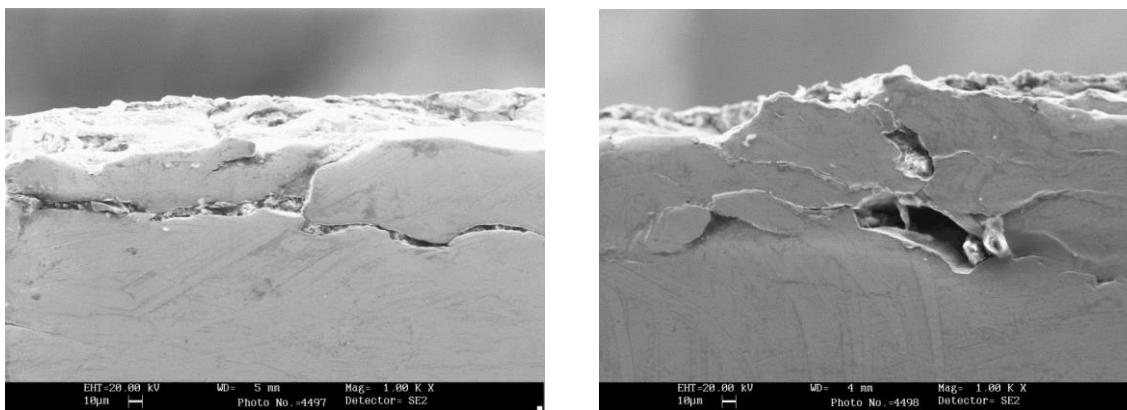
Dwa komplety próbek wolframowych naświetlone zostały w generatorze strumieni plazmowych QSPH-50 w IPP (Charkow), a następnie przywiezione do IFPiLM, gdzie poddano je oddziaływaniu strumienia plazmy i wiązek jonów w generatorze PF-1000 oraz PF-6. Wyżej wymienione próbki poddane kolejno różnym rodzajom obciążenia, w dwóch znacznie różniących się generatorach plazmy, są aktualnie badane w IMET (Moskwa), który był koordynatorem tego typu działań w ramach CRP.



Rys.1.2 Zdjęcia wykonane za pomocą mikroskopu optycznego próbki wolframowej naświetlonej za pomocą generatora strumieni plazmy QSPH-50 (Charków) (po lewej) oraz poddanej następnie naświetlenu na układzie PF-1000 (IFPiLM) (po prawej).

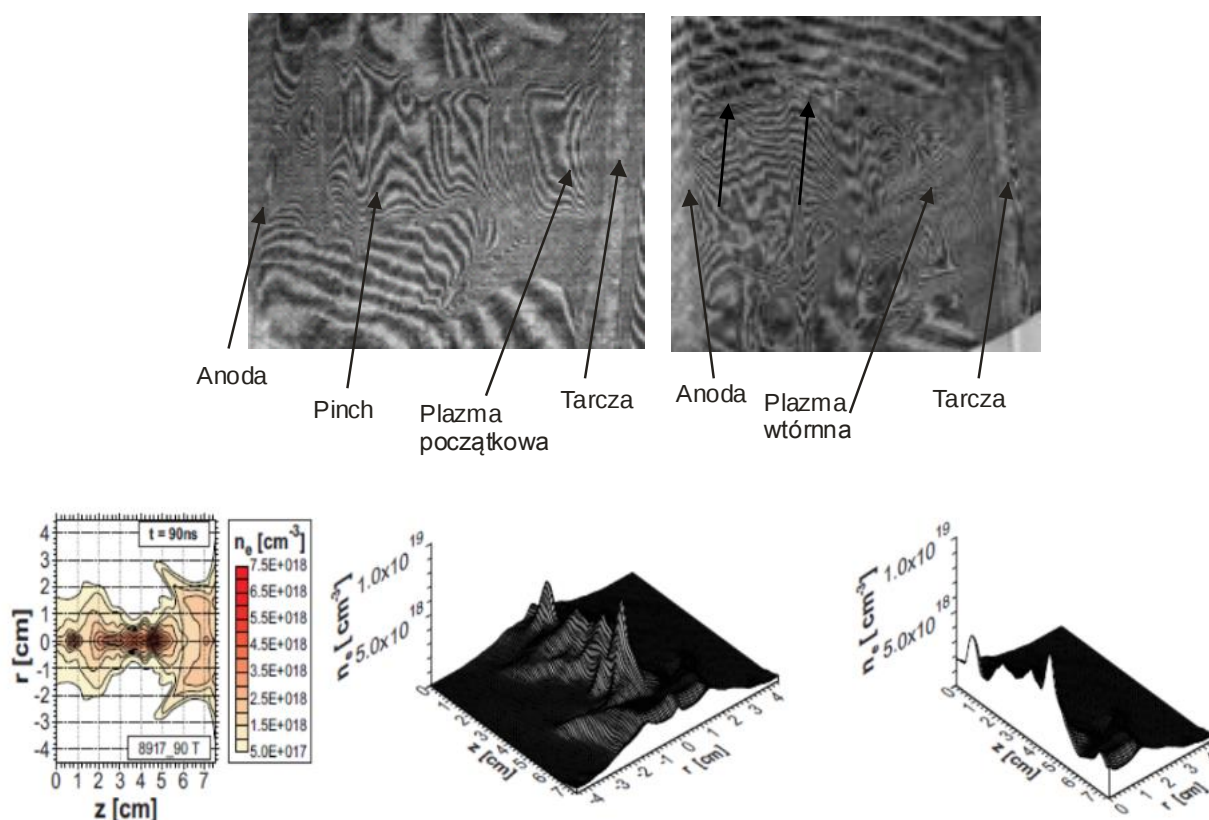


Rys.1.3 Zdjęcia powierzchni naświetlonej próbki wolframowej wykonane za pomocą mikroskopu elektronowego (SEM).PF-1000, 8 wyładowań, $q \leq 10^{12} \text{ W/cm}^2$.



Rys.1.4 Naświetlona w generatorze PF-1000 powierzchnia próbki (PLANSEE Double Forged Tungsten) struktura powierzchni próbki (przekrój poprzeczny – po cięciu i polerowaniu), w idoczne rozwarstwienie materiału w pobliżu naświetlonej powierzchni.

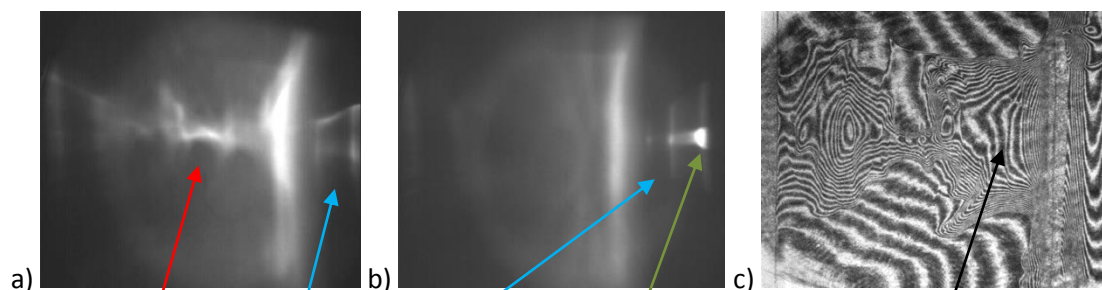
W 2014 roku kontynuowano badania procesów fizycznych towarzyszących oddziaływaniu wysokoenergetycznych strumieni plazmy oraz wiązek jonów z powierzchniami materiałów. Przeprowadzono serię wyładowań w których obserwowano proces tworzenia się plazmy przyściennej powstającej w wyniku obciążenia powierzchni materiału.



Rys.1.5 Strumień plazmy uderzający w powierzchnię materiału, plazma wtórna (powstająca w wyniku jonizacji materiału próbki poruszająca się w przeciwnym kierunku), izo-densy koncentracji elektronowej oraz rozkłady koncentracji elektronowej uzyskane za pomocą 16-kadrowego interferometru laserowego (wyładowanie nr. 8917).

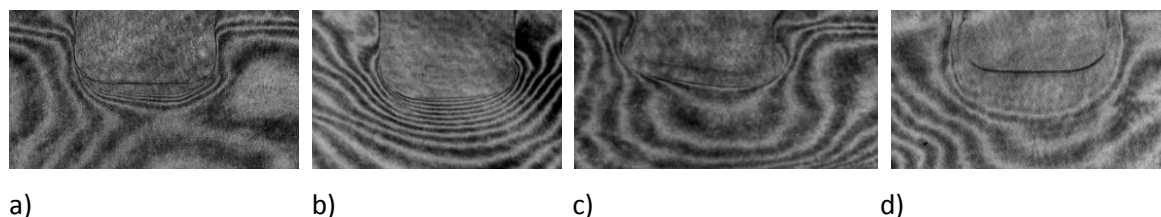
Strumień plazmy deuterowej (o temperaturze ~ 1 keV) oraz wiązka jonów deuteru uderzając w powierzchnię materiału przekazuje jej energię kinetyczną oraz wewnętrzną. Warstwa materiału o grubości ~ 1 μm ulega odparowaniu oraz jonizacji tworząc gęstą plazmę wtórną, która propaguje się w

kierunku przeciwnym do początkowego strumienia plazmy deuterowej z prędkością 3×10^6 cm/s. Znajomość prędkości propagacji oraz gęstości plazmy wtórnej pozwala oszacować jej temperaturę na ~ 10 eV. W tej temperaturze plazma wtórna intensywnie wypromieniowuje energię w zakresie promieniowania liniowego prowadząc do rozproszenia energii w całej objętości komory tokamaka izolując jednocześnie powierzchnię materiału przed następnym impulsem obciążenia.



Rys.1.6 Dwa kadry zarejestrowane za pomocą ultraszybkiej kamery kadrowej przedstawiające wiązkę jonów atakującą powierzchnię próbki a) i b) oraz interferogram ilustrujący powstanie plazmy wtórnej (czas trwania kadrów 1ns).

Zastosowanie 16-kadrowego interferometru laserowego pozwoliło zarejestrować także powstawanie fali odciążenia powstającej w wyniku wyjścia fali uderzeniowej na tylną powierzchnię próbki, oraz obliczyć prędkość propagacji fali uderzeniowej w próbce (Rys.1.7).



Rys.1.7 Interferogramy (materiał tarczy – kompozyt SiC) zarejestrowane w kolejnych momentach czasu (czas trwania kadru 1ns): a) początek powstawania plazmy wtórnej, b) końcowa faza propagacji plazmy wtórnej, c) wyjście fali odciążenia na tylną powierzchnię próbki, d) rozwinięta fala odciążenia.

Rozwój bazy diagnostycznej laboratorium PF-1000

W ramach zadania zbudowano nowoczesny układ diagnostyczny pozwalający rejestrować obrazy plazmy w zakresie ultrafioletu próżniowego oraz miękkiego promieniowania X (8 eV- 6 keV). Unikalna kamera oparta na czterosektorowym elemencie MCP z otwartą płytką mikro-kanalikową (niezależnie wyzwalane sektory ułożone triangularnie) i wyposażona w ultra-szybką migawkę elektrooptyczną pozwolą rejestrować cztery kadry (< 1 ns) w regulowanych odstępach 10-100 ns. Każdy sektor wyposażony został w oddzielną, wymienną kamerę otworkową typu „pinhole” o średnicy (20-180 mikrometrów) oraz folie blokujące niskoenergetyczną część spektrum (filtry). Każda kamera otworkowa posiada niezależny system justowania pozwalający uzyskiwać obraz plazmy powstającej w różnych miejscach obserwowanego obiektu.

Możliwość stosowania różnych filtrów dla każdego sektora połączona z możliwością niezależnego wyboru czasu ekspozycji oraz miejsca obserwacji, zapewnia kamerze dużą elastyczność i pozwoli wykorzystywać ją w badaniach materiałowych (do zobrazowania procesu oddziaływania strumieni plazmy oraz wysokoenergetycznych jonów z powierzchniami materiałów) jak też w badaniach podstawowych z zakresu fizyki wyładowań silnoprądowych w plazmie (powstawanie filamentów, tzw. hot-spotów, itp.).



Rys.1.8 Kamera do rejestracji obrazów plazmy na stanowisku testowym.



Rys.1.9 Kamera do rejestracji obrazów zamontowana na komorze generatora plazmy PF-1000.

5.2 Zastosowanie generatora plazmy PF-6 w radiacyjnych badaniach materiałowych dla potrzeb fuzji jądrowej oraz innych zastosowań (detekcja ukrytych obiektów, medycyna radiacyjna, biologia, itp.)

Osoba kontaktowa: R. Miklaszewski, ryszard.miklaszewski@ifpilm.pl

W 2014 roku kontynuowano badania eksperymentalne związane z oddziaływaniem silnych obciążeń termicznych na powierzchnie materiałów. Zgodnie z planem naświetlano próbki różnych materiałów strumieniami plazmy oraz jonów, generowanymi za pomocą Plasma-Focus PF-6. Część badań prowadzona była w ramach tzw. „round-robin tests” z udziałem innych uczestników programu CRP (Baikov Institute of Metallurgy and Material Sciences - Moskwa, Instytutu Fizyki Plazmy Ukraińskiej Akademii Nauk w Charkowie – Ukraina, Wydziału Matematyki i Nauk Przyrodniczych Uniwersytetu w Tallinie oraz Międzynarodowego Centrum Fizyki Teoretycznej – Triest, Włochy).

Przedmiotem prowadzonych w 2014 roku badań były oddziaływania strumieni plazmy z powierzchniami tarcz wykonanych z następujących materiałów: wolfram otrzymany metodą sinteringu (PLANSEE Double Forged Tungsten, dostarczony przez FCJ, Niemcy), stop wolframu (W- 1%La₂O₃) przygotowany w Tallinie oraz próbki wolframowe wykonane przez Instytut Fizyki Plazmy CAS (metodą sinteringu i nanoszenia metodą łuku plazmowego) oraz nisko-aktywacyjna stal typu “EUROFER”.

Dwa komplety próbek wolframowych naświetlone zostały w generatorze strumieni plazmowych QSPH-50 w IPP (Charkow) a następnie przywiezione do IFPiLM, gdzie poddano je oddziaływaniu strumieni plazmy i wiązek jonów w generatorze PF-6 oraz PF-1000. Wyżej wymienione próbki poddane kolejno różnym rodzajom obciążenia, w dwóch znacznie różniących się generatorach plazmy, są aktualnie badane w IMET (Moskwa), który był koordynatorem tego typu działań w ramach CRP.

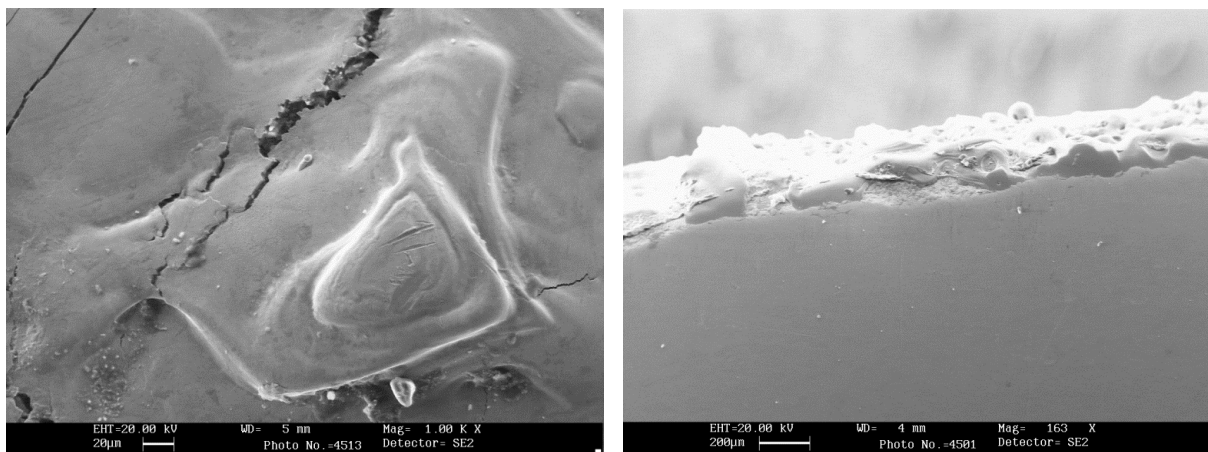
Jako źródło obciążenia termicznego powierzchni próbek zastosowano generator PF-6, który dzięki strumieniowi gęstej ($n \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) i gorącej plazmy ($\sim 1 \text{ keV}$) poruszającej się z prędkością 10^7 cm/s oraz wiązkom jonów deuteru o energiach $E_d \sim 0.1 \dots 1.0 \text{ MeV}$ zapewniał moc obciążenia termicznego w zakresie $10^{14} \dots 10^{16} \text{ W/cm}^2$. Głębokość penetracji jonów deuteru o energii 1 keV (strumień plazmy) jest rzędu kilku nanometrów, podczas gdy dla jonów o energii 100 keV $\sim 1 \text{ }\mu\text{m}$, oznacza to, że generator PF-6 zapewniał obciążenia powierzchniowe oraz objętościowe próbek.

Próbki umieszczane były w katodowej części głowicy układu PF-6 wyposażonej w specjalną komorę umożliwiającą rejestrację procesu naświetlania. Środek próbki pokrywał się z osią elektrody centralnej w odległości 3 cm . W trakcie wyładowania monitorowane były następujące parametry: pochodne prądu wszystkich czterech kondensatorów, prąd wyładowania (cewka Rogowskiego), sygnały z sondy (scyntylator-fotopowielacz) rejestrującej emisję neutronów oraz twardego promieniowania X z czasową zdolnością rozdzielczą $\sim 2 \text{ ns}$.

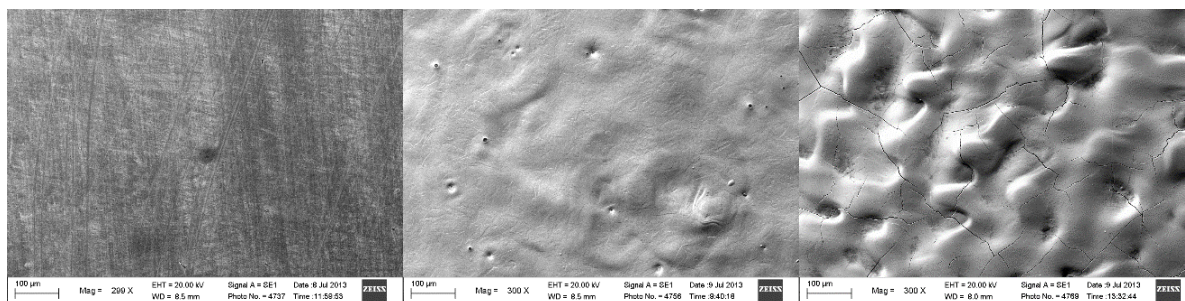
Dodatkowo w trakcie naświetlania próbek prowadzono pomiar emisji twardego promieniowania X oraz całkowitej emisji neutronów za pomocą monitora itrowego zbudowanego w ramach projektu w roku poprzednim.

Naświetlanie próbek prowadzono stosując ciśnienie deuteru w komorze wynoszące 10 Torr oraz napięcie baterii kondensatorów 15 kV , co zapewniało maksymalny prąd wyładowania 300 kA z czasem narastania $1.5 \text{ }\mu\text{s}$. Czas życia plazmy wynosił $\sim 100 \text{ ns}$ natomiast czas emisji wiązki wysokoenergetycznych jonów 10 ns . Średnia emisja neutronów w serii wyładowań osiągała wartość 2×10^8 neutronów/wyładowanie, a czas generacji neutronów wynosił $\sim 10 \text{ ns}$.

Przed i po naświetleniu próbki badane były za pomocą: cyfrowego mikroskopu optycznego, elektronowego mikroskopu skaningowego (SEM) w celu zbadania charakteru i mechanizmów zmian struktury powierzchni. Zmiany szorstkości powierzchni próbek rejestrowane były za pomocą Atomic Force Microscopy (AFM).



Rys.2.1 Naświetlona w generatorze PF-6 powierzchnia próbki (PLANSEE Double Forged Tungsten) (po lewej), struktura powierzchni próbki (przekrój poprzeczny – po cięciu i polerowaniu) (po prawej).



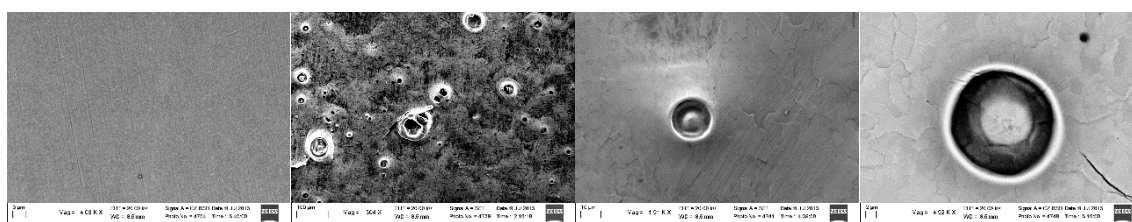
a)

b)

c)

Rys.2.2 Zdjęcia wykonane za pomocą SEM przedstawiające powierzchnię stali EUROFER poddaną oddziaływaniu obciążenia termicznego, a) powierzchnia przed naświetlaniem, b) zmiany powstające w wyniku pojedynczego wyładowania, c) po pięciu wyładowaniach w generatorze PF-6.

Zdjęcia wykonane za pomocą Skaningowego Mikroskopu elektronowego pokazują zmiany powierzchni próbki wykonanej ze stali EUROFER w miarę wzrostu obciążenia termicznego. Początkowo niewielkie pofalowanie powierzchni Rys.2.2 (b) przechodzi w wyraźną strukturę falową powierzchni (c).



a)

b)

c)

d)

Rys.2.3 Zdjęcia SEM przedstawiające powierzchnię próbki EUROFER w obszarze największego obciążenia termicznego (strumienia plazmy oraz jonów) a) – powierzchnia przed naświetlaniem, b) c) d) – powierzchnia po ośmiu wyładowaniach (rosnące powiększenie).

Dalsze zwiększenie obciążenia powierzchni powoduje powstanie pękających bąbli, których przyczyną jest uwalnianie gazów z warstwy przypowierzchniowej. Powstawanie tych bąbli powoduje niekorzystne z punktu widzenia zastosowania tego materiału w reaktorach fuzyjnych zjawisko wnikania trytu w głąb materiału.

W badaniach prowadzonych wspólnie z zespołem Instytutu Fizyki Plazmy Czeskiej Akademii Nauk wykorzystano próbki wolframowe wykonane za pomocą dwóch różnych technologii: sinteringu plazmowego z wykorzystaniem łuku elektrycznego (spark plasma sintering - SPS) oraz stabilizowanego

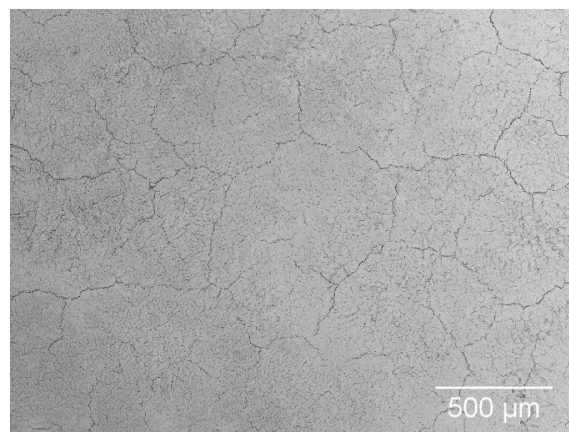
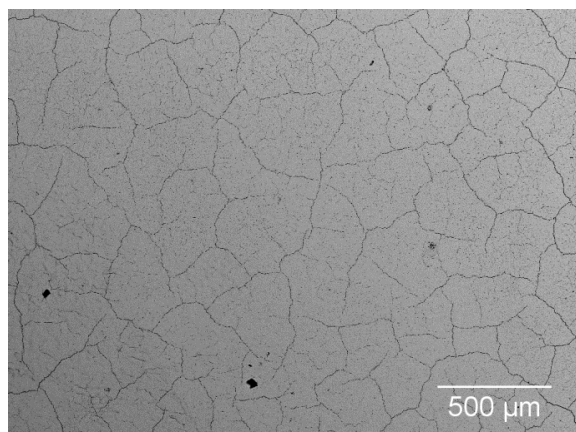
wodą napyłania plazmowego (water stabilized plasma spraying -WSP). Metoda SPS jest szybka, tania i pozwala uzyskać materiał o gęstości bliskiej wartości teoretycznej. Zaletą metody WSP jest możliwość napyłania grubej warstwy wolframu bezpośrednio na powierzchni materiału konstrukcyjnego, co eliminuje konieczność stosowania kłopotliwych połączeń tych materiałów.

Do produkcji próbek wolframowych WP-2 oraz WP-4 zastosowane zostało specjalne urządzenie SPS 10-4 "spark plasma sintering" (Thermal Technology, USA) wytwarzające wolfram metodą sinteringu z proszku o średnicy ziaren 2-4 μm . Powierzchnia części próbek została wypolerowana (próbki oznaczone, jako W2, W4) natomiast pozostawiono szorstką powierzchnię próbek W2-P, W4-P w celu symulacji struktur powierzchniowych tworzonych przez bąble helowo-wodorowe powstające w trakcie działania reaktora fuzyjnego.

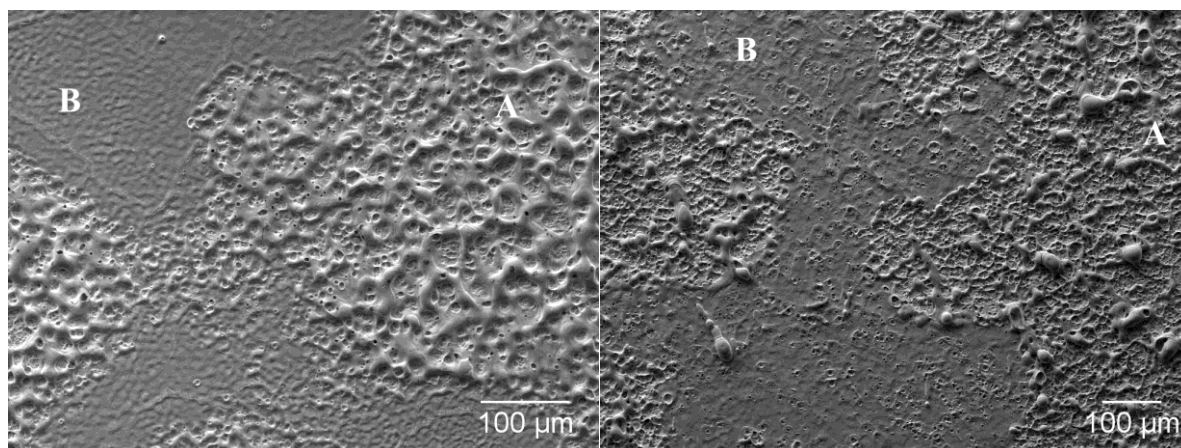
Natomiast próbki oznaczone symbolem WSPH wykonane zostały poprzez naniesienie warstwy wolframu na podkład wykonany ze stali nisko-aktywacyjnej, za pomocą hybrydowego, wodnego łuku plazmowego stabilizowanego argonem. Grubość warstwy wolframu wynosiła 500 μm .

Tabela 1: Parametry procesu wytwarzania próbek.

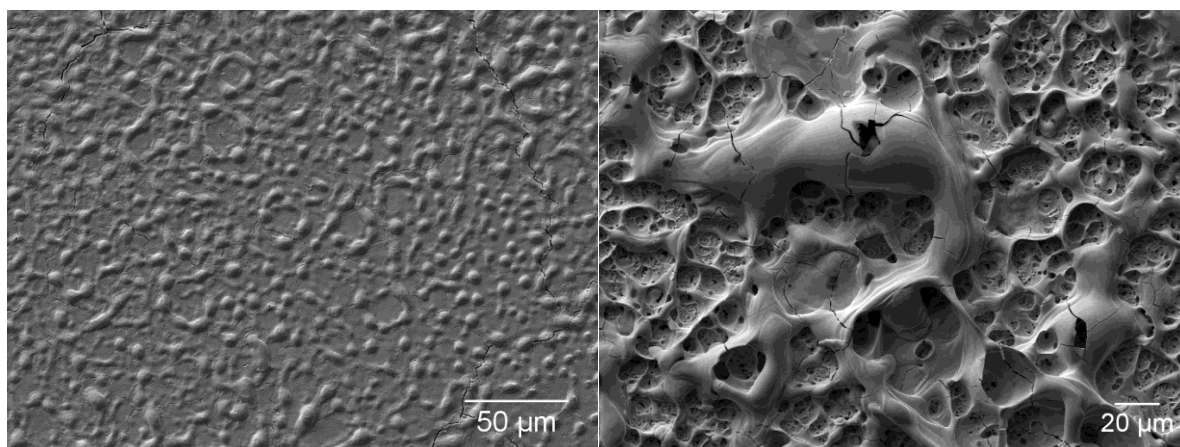
Próbka	Średnica proszku	Technologia	Parametry procesu	Porowatość powierzchni
W2	1.8-2.2 μm	SPS	1800 °C/5 min/60 MPa	mała
W2-P	1.8-2.2 μm	SPS	1800 °C/5 min/60 MPa	duża
W4	3.8-4.3 μm	SPS	1800 °C/5 min/60 MPa	mała
W4-P	3.8-4.3 μm	SPS	1800 °C/5 min/60 MPa	duża
W-WSPH	60-83 μm	WSP [®] H	FD=25mm, I=500A, Ar=24l/min, Ar shrouding	Porowatość objętościowa



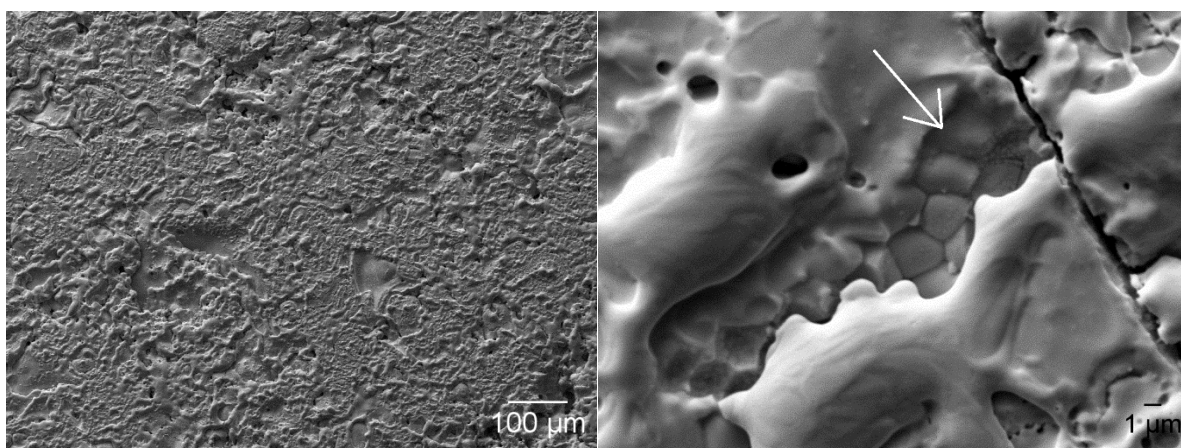
Rys.2.4 Siatka pęknięć (cracks) powstałych na powierzchni próbek W2 (zdjęcie lewe) and W4 (zdjęcie prawe) w wyniku naświetlania w generatorze PF-6.



Rys.2.5 Chropowatość powierzchni oraz powstawanie bąbli na powierzchniach próbek W2-P (zdjęcie lewe) oraz W4-P (zdjęcia prawe) w wyniku naświetlania w generatorze PF-6.



Rys.2.6 Rozwój struktur typu Blister na powierzchni próbek typu W2-P (zdjęcie lewe) oraz powiększony obraz obszaru porowatego (próbka W4-P) wyniku naświetlania w generatorze PF-6.

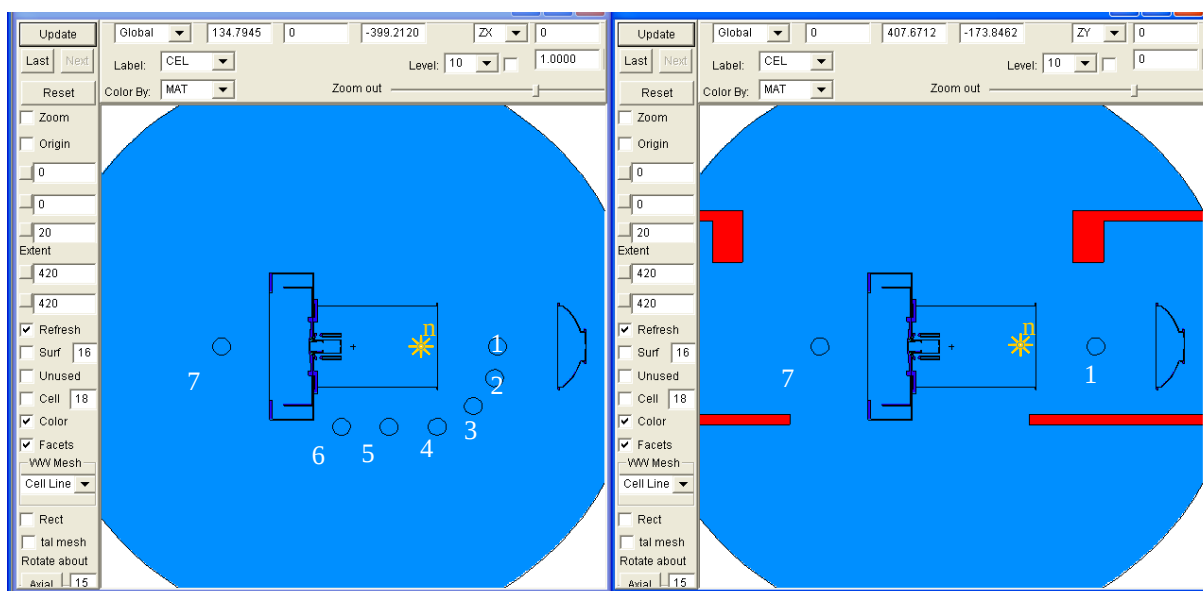


Rys.2.7 Morfologia powierzchni próbki W-WSPH naświetlonej w PF6 (zdjęcie lewe), szczegóły morfologii przetopionej warstwy z efektami rekrytalizacji (zdjęcia prawe).

Z powodu niskiej przewodności ciepła, powierzchnie próbek wykonanych metodą WSPH ulegają intensywnemu procesowi topienia (Rys.2.7).

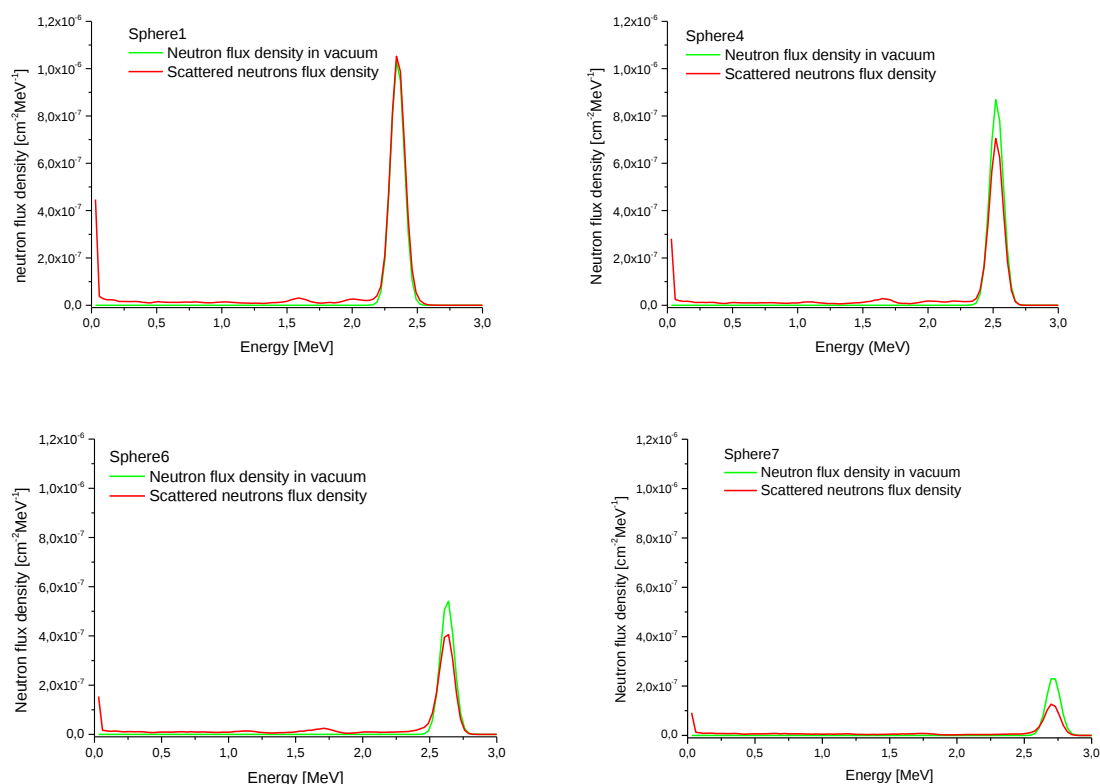
Zgodnie z tytułem Projektu kontynuowane będą także prace związane z zastosowaniami mobilnych generatorów typu Plasma-Focus w technice i technologii.

Kontynuowano badania związane z możliwością wykorzystania małych generatorów neutronów (typu PF-6) do badania pola neutronowego wokół dużych urządzeń fuzyjnych np. JET. Idea ta związana jest z koniecznością kalibrowania diagnostyk neutronowych takich urządzeń w celu uzyskania wiarygodnych informacji o intensywności zachodzenia reakcji fuzji jądrowej w trakcie ich pracy. Polega ona na wprowadzeniu generatora neutronów do toroidalnej komory reaktora i wykonanie pomiarów parametrów pola neutronowego w różnych punktach wokół urządzenia. Zaletą generatorów typu PF-6 jest w tym przypadku bardzo krótki czas emisji neutronów, co pozwala na zbadanie czasowych zmian pola neutronowego. Przed wprowadzeniem generatora PF-6 do komory eksperymentalnej układu PF-1000 przeprowadzono w 2014 roku badania kalibracyjne rozkładu pola neutronowego w otoczeniu generatora. Badania te przeprowadzono w pustym praktycznie pomieszczeniu w celu określenia charakterystyk odbiciowych samego generatora. Jednocześnie za pomocą kodu MCNP przeprowadzono symulacje komputerowe tego procesu. W przeciwieństwie do wcześniejszych badań, które dotyczyły statycznego rozkładu pola neutronowego, w 2014 roku symulowano przebiegi rejestrowane przez układy scyntylator-fotopowielacz w celu ich bezpośredniego porównania z przebiegami rejestrowanymi w trakcie kalibracji.



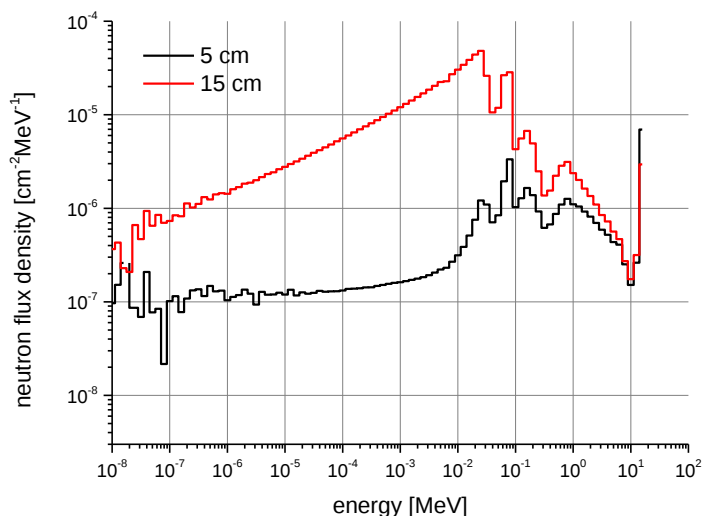
Rys.2.8 Schemat obliczeń prowadzonych za pomocą kodu MCNP – symulacja sygnałów rejestrowanych przez sondy scyntylator-fotopowielacz (umieszczone odpowiednio w punktach 1-7).

Schemat przedstawia komorę dużego układu PF-1000, do którego wprowadzono głowice generatora neutronów PF-6.



Rys.2.9 Symulowane za pomocą kodu MCNP przebiegi rejestrowane przez sondy scyntylnator-fotopowielacz umieszczone w punktach 1,4,6,7 (schemat eksperymentu numerycznego Rys.2.7).

W 2014 roku, w ramach niniejszego Projektu kontynuowano współpracę z Laboratorium Plasma-Focus Międzynarodowego Centrum Fizyki Teoretycznej (ICTP, Triest, Włochy) nad zbadaniem możliwości wykorzystania generatorów neutronów typu Plasma-Focus (np. PF-6) dla potrzeb terapii nowotworów (Boron-Neutron Capture Therapy - BNCT). Analizy teoretyczne pokazały, że optymalne z punktu widzenia takiej terapii byłoby impulsowe źródło neutronów o maksymalnie wysokiej intensywności, długości impulsu $< 1 \mu s$ oraz energii neutronów w zakresie 1eV – 10 keV (neutrony epitermiczne). Ponieważ generatory typu PF-6 emitują neutrony o energiach 2.5 MeV (z reakcji DD, $\sim 10^9$ neutronów/wyładowanie) lub 14 MeV (z reakcji DD, $\sim 10^{11}$ neutronów/wyładowanie) niezbędne jest zastosowanie odpowiedniego moderatora w celu zapewnienia istotnego udziału neutronów epitermicznych w ich widmie. Zasadnicza trudność polega na takim dobraniu charakterystyk moderatora, aby nieuniknione wydłużenie czasu trwania impulsu neutronowego w procesie moderacji nie było większe niż $\sim 1 \mu s$. W 2014 roku kontynuowano symulacje komputerowe procesu spowalniania neutronów (za pomocą kodu MCNP). Przygotowano specjalny „input” pozwalający uzyskiwać czasowe rozkłady impulsów neutronowych dla grupy neutronów epitermicznych. Prowadzono także przygotowania do eksperymentalnego badania procesu moderacji neutronów prędkich (2.5 MeV) do zakresu epitermicznego.



Rys.2.10 Widmo neutronów emitowanych z generatora PF-6 po przejściu warstw moderatora (FLUENTAL) o grubościach 5 cm oraz 15 cm. Symulacja za pomocą kodu MCNP.

Rozwój bazy diagnostycznej laboratorium PF-6:

W ramach działań mających na celu opracowanie nowych typów detektorów promieniowania neutronowego budowano specjalne stanowisko badawcze, którego celem jest testowanie możliwości zastosowania nowoczesnej technologii Open-MCP (ze zbiorczą anodą) z wykorzystaniem konwerterów typu neutron-proton oraz neutron-kwant γ do detekcji promieniowania neutronowego.

Urządzenie typu Open MCP z otwartą płytką mikro-kanalikową stosowane dotychczas w laboratorium Plasma-Focus, jako detektor promieniowania X posiada także zdolność rejestracji i wzmacniania kwantów γ oraz protonów. Celem badań testowych jest określenie przydatności różnych materiałów do pośredniej detekcji neutronów fuzyjnych, a w szczególności zoptymalizowanie składu chemicznego i grubości tych materiałów oraz oszacowanie ich efektywności detekcyjnej.

Materiały konwertujące – poddawane oddziaływaniu strumienia neutronów fuzyjnych, emitują w wyniku reakcji jądrowych lub zderzeń elastycznych kwanty gamma, pozytrony oraz protony odrzutu. Po opuszczeniu objętości materiału konwertującego, produkty wtórne procesu konwersji trafiają w aperturę wejściową urządzenia z otwartą płytką mikro-kanalikową, co powoduje rozpoczęcie lawinowego procesu generacji elektronów wtórnych w objętościach mikro-kanalików. Całkowity prąd elektronowy opuszczający obszar płytki mikro-kanalikowej jest przechwytywany przez stożkowy układ anody zbiorczej. Rejestracja sygnału elektrycznego (skorelowanego z całkowitym prądem elektronowym) odbieranego z anody zbiorczej pozwoli na wyznaczenie pochodnej strumienia neutronów dN/dt lub liczby impulsów proporcjonalnej do liczby skonwertowanych neutronów fuzyjnych.

Podstawowym elementem stanowiska badawczego jest cylindryczna komora próżniowa wraz z wysokowydajną pompą turbomolekularną, zapewniająca próżnię, co najmniej 10^{-6} mbar. Wewnątrz komory zainstalowany jest element MCP-PMT z otwartą płytką mikro-kanalikową. Przed frontem płytki mikro-kanalikowej, umieszczona jest specjalna obrotowa tarcza z sześcioma otworami zaopatrzonymi w odpowiednie uchwyty pozwalające montować konwertery o średnicy ≈ 40 mm. Dzięki takiej konstrukcji, bez szkodliwego dla MCP-PMT zapowietrzania oraz długotrwałego procesu uzyskiwania wysokiej próżni, można będzie w jednym cyklu badać sześć różnych konwerterów.



Rys.2.11 Widok specjalnego stanowiska do testowania detektora neutronów opartego na Open-MCP.

Przewidujemy, że detektor taki będzie około 10 razy mniej czuły na zewnętrzne pole magnetyczne w porównaniu z powszechnie używanymi detektorami scyntylacyjnymi, w których elementami rejestrującymi są czułe na pole magnetyczne fotopowielacze. Natomiast niewrażliwość na pole magnetyczne byłaby ważną zaletą takich detektorów w przypadku wykorzystania ich w systemach diagnostycznych układów fuzyjnych opartych na zasadzie utrzymania magnetycznego (tokamak, stellarator), w których diagnostyki neutronowe pracują w obszarach silnego pola magnetycznego. Badania efektywności konwerterów poprzedzone zostaną modelowaniem procesu konwersji za pomocą kodu MCNP-5.

5.3 Opracowanie koncepcji źródła neutronów na bazie układu Plasma Focus

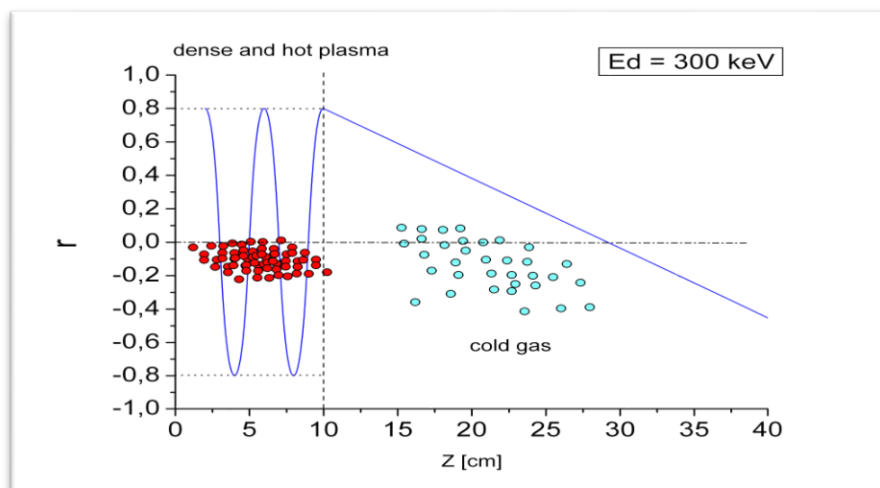
Osoba kontaktowa: R. Miklaszewski, rysard.miklaszewski@ifpilm.pl

W trakcie realizacji Projektu (IAEA CRP 17165) wykonano zgodnie z planem następujące zadania:

Opracowanie kodu Monte-Carlo pozwalającego modelować trajektorie prędkich jonów w kolumnie plazmowej układu Plasma-Focus oraz rozkłady energetyczne neutronów powstających w wyniku reakcji DD oraz DT

Analiza wyników modelowania za pomocą kodu 2D Snow-plow wzajemnych relacji między dynamiką warstwy plazmowej i obwodem elektrycznym generatora prądu, przeprowadzone dla hipotetycznego układu PF-10 MJ pokazały, że efektywne dopasowanie i przekaz energii do sznura plazmowego może być osiągnięty dla początkowych napięć ładowania baterii kondensatorów rzędu $U_B \sim 90\text{--}100\text{ kV}$. Ponieważ energie prędkich jonów powstających w układach PF są rzędu $3 \times U_B$ (270-300 keV), oznacza to, że odpowiadają one opadającej części wykresu przekroju czynnego na reakcje DT (maximum przekroju czynnego dla D-T $\sim 120\text{ keV}$, dla T-D $\sim 170\text{ keV}$). Warunek wykorzystanie pełnego potencjału energetycznego reakcji jądrowej wymaga spowolnienia generowanych jonów deuteru oraz trytu do energii rzędu 100-200 keV przed rozpadem kolumny plazmowej.

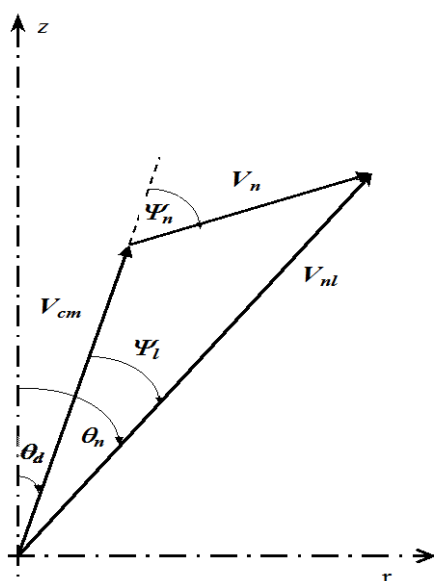
W celu modelowania procesu hamowania prędkich jonów oraz generacji neutronów w wysokonapięciowym układzie Plasma-Focus opracowano wstępną wersję kodu komputerowego opartego na metodologii Monte-Carlo symulującego ruch prędkich jonów w kolumnie plazmowej (ruch cząstek naładowanych w polu magnetycznym). Gdy analizowanymi jonami są deuterony oraz trytony, kod pozwala uzyskać dane o ich trajektorii w plazmie oraz charakterystykach emisji neutronów takich jak: całkowita emisja, anizotropia oraz spektra promieniowania neutronowego w dowolnym kierunku. W przypadku analizy trajektorii cząstek α , kod pozwala określić trajektorie cząstek, odpowiedzieć na pytanie o ich pułapkowaniu oraz określić przekaz energii do plazmy.



Rys.3.1 Schemat ideowy kodu komputerowego symulującego trajektorie cząstek naładowanych (deuteronów, trytonów, cząstek α) w kolumnie plazmowej z polem magnetycznym wytwarzanym przez prąd płynący w kolumnie. Kolorem niebieskim oznaczono trajektorię deuteronu o energii 300 keV.

Zgodnie z zasadą całkowania numerycznego, trajektoria deuteronu (trytonu) składa się z elementarnych odcinków, dla których obliczany jest przekrój czynny na reakcję jądrową (DD lub DT), różniczkowy przekrój czynny dla zadanych kątów emisji oraz energia neutronów dla tych kątów. Całkowanie po dużej liczbie trajektorii pozwala uzyskać spektrum emitowanych neutronów dla zadanego rozkładu

energetycznych szybkich jonów. Równanie ruchu jonów w polu magnetycznym prądu płynącego przez kolumnę plazmową rozwiązano metodą Rungego-Kutty czwartego rzędu.



Rys.3.2 Geometria reakcji jądrowej DD lub DT z emisją neutronu.

W celu znalezienia widma neutronów generowanych w powyższej konfiguracji zastosowano następujące formuły (dla reakcji DD). Deuteron o energii E_d (w układzie laboratoryjnym) poruszający się z prędkością V_d pod kątem θ_d , w stosunku do osi z układu wsp. uderza w stacjonarną tarczę złożoną z deuterionów. W takim przypadku, prędkość centrum masy (CM) wynosi $V_{CM} = (1/2)V_d$ a $\theta_{CM} = \theta_d$. Zakładamy, że neutron ma prędkość V_n , (w CM) oraz prędkość V_{nl} w układzie laboratoryjnym.

$$E_n = W_n(1 + \gamma^2 + 2\gamma \cos \psi_n)$$

gdzie:

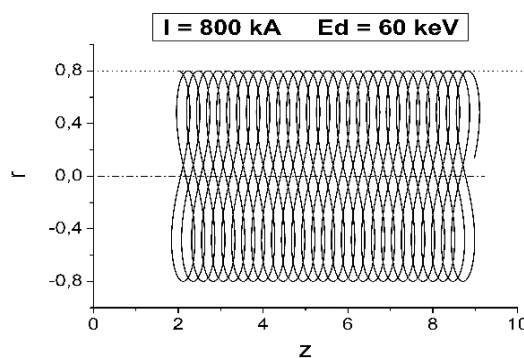
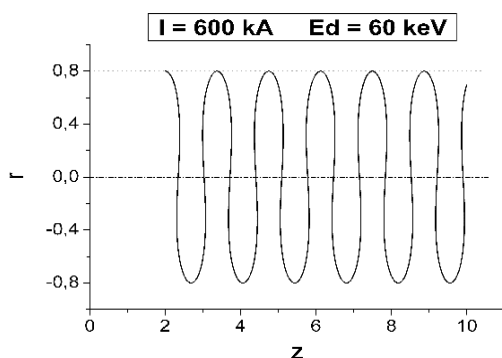
$$W_n = (1/2)m_n V_n^2 = (3/4)(Q + E_d/2) = 2.45 \text{ MeV} + (3/8)E_d$$

oraz:

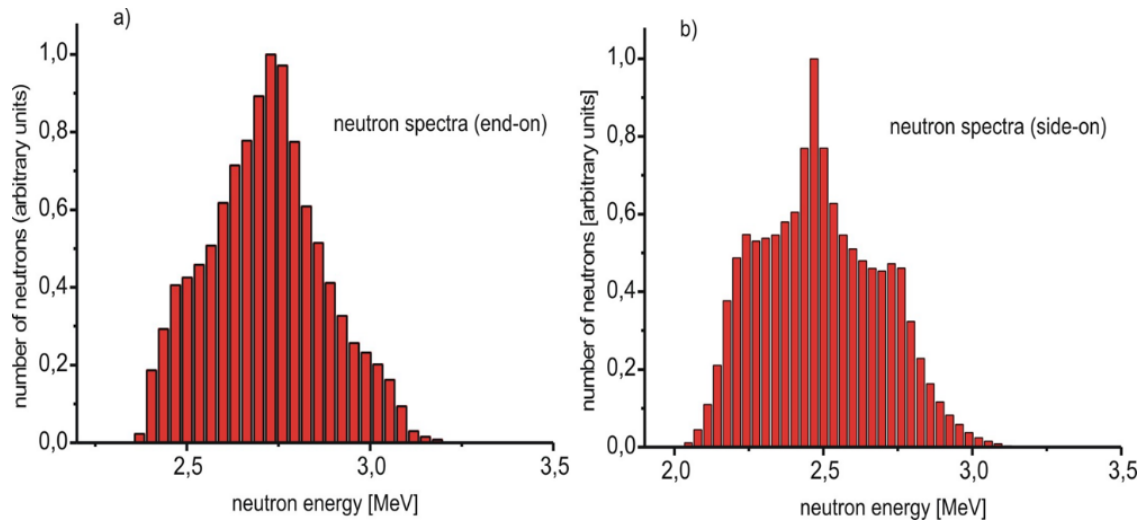
$$\frac{d\sigma}{d\Omega_{lab}} = \sigma_T \frac{1 + A \cos^2 \psi_n + B \cos^4 \psi_n}{1 + A/3 + B/5} \cdot \frac{(1 + 2\gamma \cos \psi_n + \gamma^2)^{3/2}}{(1 + \gamma \cos \psi_n)}$$

$$\sigma_T = \frac{1.79 \cdot 10^{-23}}{g^2} \cdot \exp\left(-\frac{14.578}{g}\right), \text{ cm}^2$$

- całkowity przekrój czynny.



Rys.3.3 Przykładowe trajektorie deuterionów o energii 60 keV w polu magnetycznym prądu 600 oraz 800 kA płynącego przez kolumnę plazmową.



Rys.3.4 Rozkłady energetyczne emitowanych neutronów rejestrowane: a) wzdłuż osi układu PF (widoczne przesunięcie maksimum rozkładu w stronę wyższych energii) oraz b) w kierunku prostopadłym do osi (widoczne poszerzenie widma z maksimum 2.5 MeV).

Następnym etapem rozwoju kodu będzie uwzględnienie hamowania jonów w plazmie.

Opracowanie dwuwymiarowego kodu (2D MHD) rozwiązującego pełny układ równań magnetohydrodynamiki dla symetrii cylindrycznej (r, z)

Podstawowa procedura kodu FOCl rozwiązuje hiperboliczny układ równań idealnej MHD dla geometrii odpowiadającej układowi Plasma-Focus. Równania te mają następującą postać:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad - \text{równanie zachowania masy},$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla \left(p + \frac{B^2}{2} \right) \quad - \text{równanie ruchu},$$

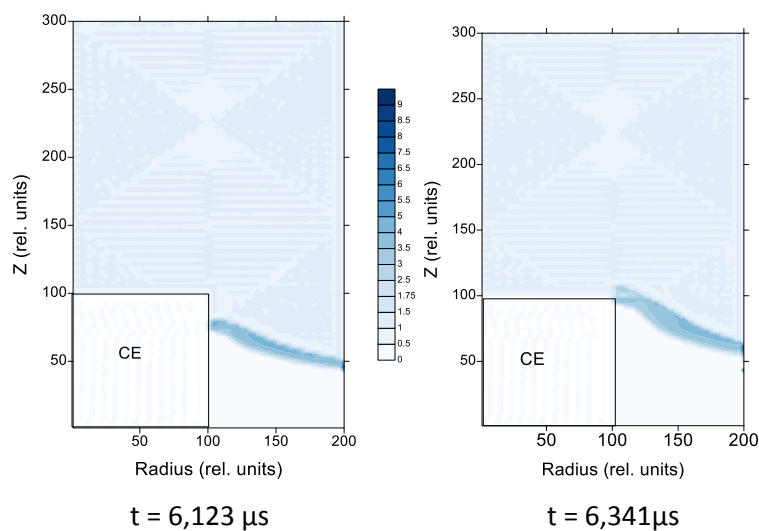
$$\frac{d}{dt} \left(\rho v^2 + \frac{B^2}{2} + \frac{p}{\gamma - 1} \right) dV = -\nabla \cdot \left[\left(\rho v^2 + \frac{p}{\gamma - 1} + \frac{B^2}{2} \right) \vec{v} + \left(p + \frac{B^2}{2} \right) \vec{v} - \frac{1}{c} (\vec{B} \cdot \vec{v}) \vec{B} \right] \quad - \text{równanie zachowania energii},$$

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} - \nabla \times (\vec{v} \times \vec{B}) = 0 \quad - \text{równanie pola magnetycznego}.$$

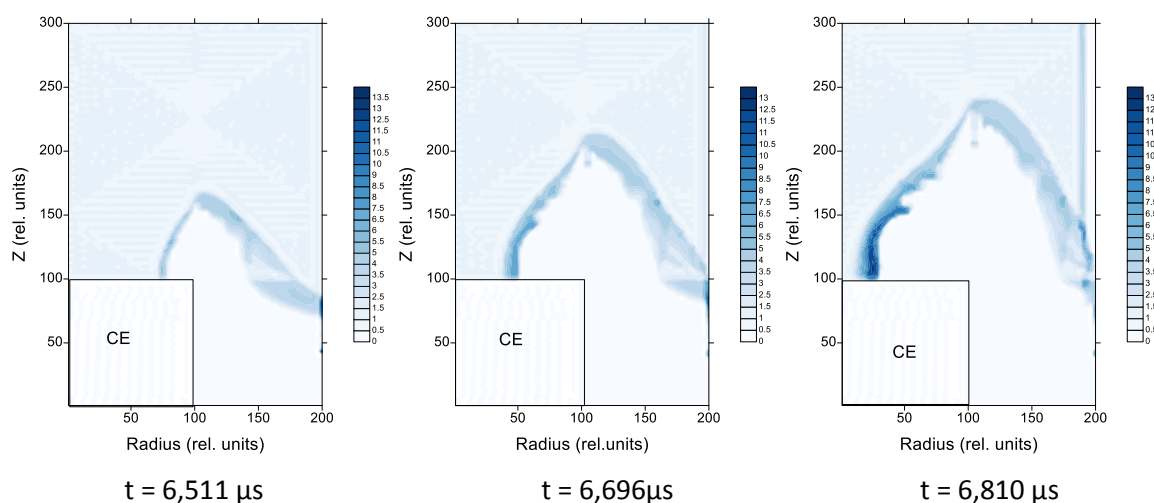
Dla warunków działania układu Plasma-Focus warstwa plazmowa ma charakter silnej fali uderzeniowej, stąd równanie stanu gazu doskonałego w postaci: $e = \frac{p}{\gamma - 1}$ pozwala z dobrym przybliżeniem symulować dynamikę zjawisk.

Badania testowe kodu przeprowadzone zostały dla konfiguracji elektrod układu PF w której średnica elektrody zewnętrznej jest dwukrotnie większa od średnicy elektrody wewnętrznej.

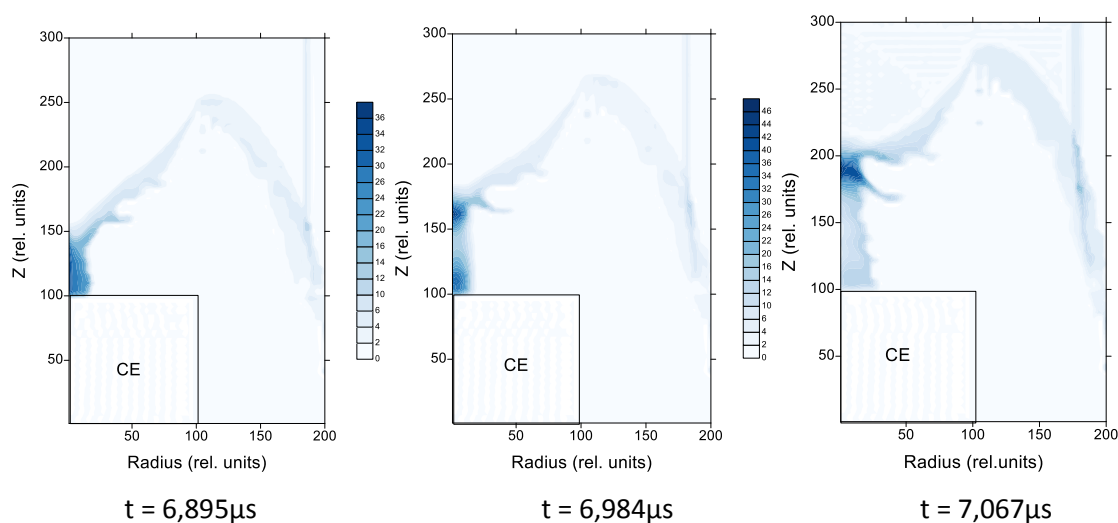
Przedstawione poniżej rozkłady koncentracji plazmy obrazują dynamikę plazmy w trakcie wyładowania wysokopradowego (rys.5a – faza akceleracji osiowej plazmy, rys. 5b faza kolapsu powłoki plazmowej oraz rys. 5c – faza formowania kolumny plazmowej oraz początek rozwoju niestabilności MHD).



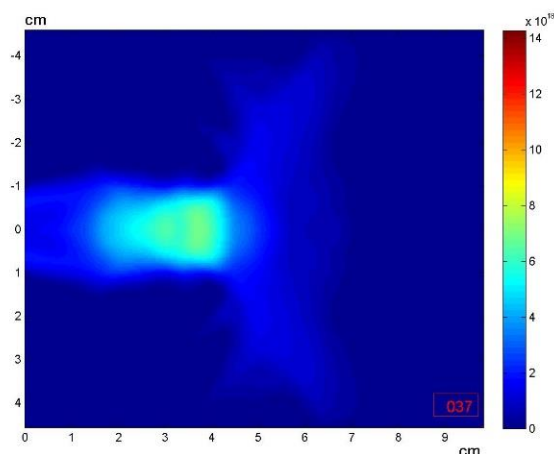
Rys.3.5a Rozkład koncentracji w warstwie plazmowej (faza akceleracji osiowej)



Rys.3.5b Rozkład gęstości w powłoce plazmowej – faza kolapsu.



Rys.3.5c Rozkład gęstości plazmy – faza formowania sznura plazmowego.

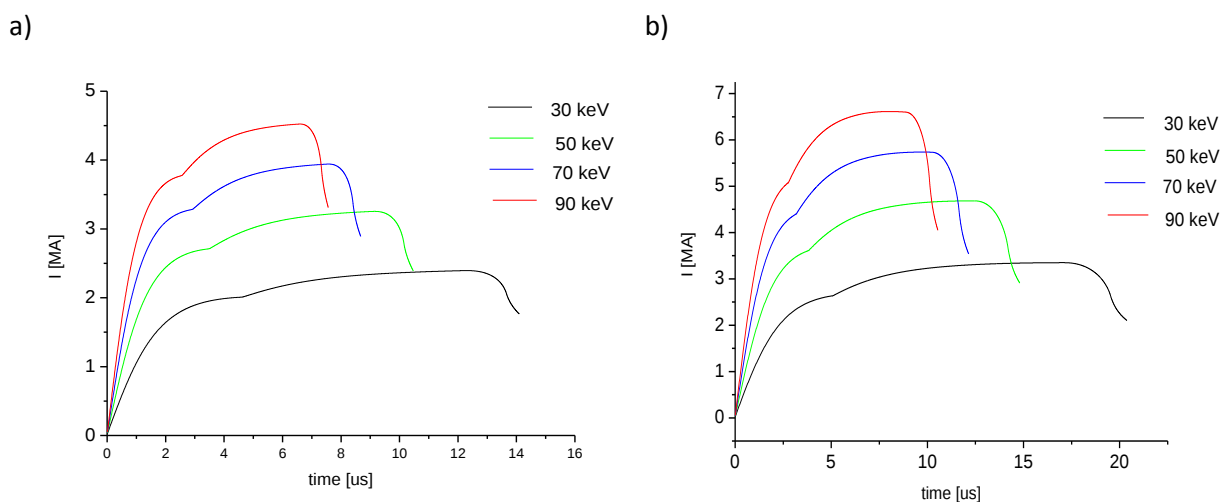


Rys.3.6 Dla porównania – rozkład koncentracji plazmy w kolumnie plazmowej rejestrowany za pomocą 16-kadrowego interferometru laserowego.

Analiza wzajemnych relacji między dynamiką powłoki plazmowej a obwodem elektrycznym generatora prądu

Analiza wzajemnych relacji między dynamiką powłoki plazmowej a obwodem elektrycznym generatora prądu w celu wyboru optymalnych warunków pracy generatora neutronów (napięcie ładowania, ciśnienie gazu roboczego, geometria elektrod, etc.) prowadzących do spełnienia wymagań Projektu (emisja neutronów na poziomie 10^{16} – 10^{17} neutronów na wyładowanie).

W badaniach wykorzystano dwuwymiarowy kod 2D SPS przygotowany w pierwszym roku realizacji Projektu. Jako rozwiązanie referencyjne przyjęto, że bateria kondensatorów będzie miała energię rzędu 10 MJ i dla tej energii prowadzono badania optymalizacyjne.



Rys.3.7 PF-10 MJ $Z_{el}=60$ cm, $R_{in}=12$ cm, dla różnych napięć a) $p=10$ Torr b) $p=25$ Torr

Przyjmując prawo skalowania w postaci: $Y_n \approx 0.6 \cdot 10^{14} I_{pinch}^4$ dla najlepszego rozwiązania ($p=25$ Torr, $U_B = 90$ keV) emisja neutronów wyniosłaby $Y_n \approx 1.5 \cdot 10^{16}$, czyli byłaby bliska celowi optymalizacji.

Z analiz przeprowadzonych w ramach Projektu wynika, że wzajemne relacje między dynamiką powłoki plazmowej, której indukcyjność stanowi obciążenie generatora prądu (bateria kondensatorów) nie dają się ująć w proste zależności. Stąd zrodził się pomysł opracowania kodu komputerowego wspomagającego optymalizację generatora neutronów opartego na układzie Plasma-Focus.

W 6 wymiarowej przestrzeni podstawowych parametrów wejściowych (promień elektrod oraz ich długość, ciśnienie napełniania komory, napięcie oraz indukcyjność baterii kondensatorów) kod komputerowy przeprowadzi obliczenia dla kilkudziesięciu tysięcy wariantów tworząc macierz parametrów istotnych z punktu widzenia optymalizacji takich jak: prąd w kolumnę plazmowej, energię przekazaną polu magnetycznemu, stosunek prądu maksymalnego do prądu w kolumnie plazmowej itp. Macierz ta będzie podstawą selekcji najbardziej obiecujących obszarów parametrów wejściowych, w których to obszarach prowadzone zostaną dalsze obliczenia optymalizacyjne.

Podstawowym elementem będzie procedura SPS, która pozwala przeprowadzić symulację pojedynczego wyładowania w czasie około 5 sek.

6 Projekty Narodowego Centrum Badań i Rozwoju

REALIZACJA CZĘŚCI ZADANIA BADAWCZEGO Nr 2

pt. Badania i rozwój technologii dla kontrolowanej fuzji termojądrowej w ramach strategicznego projektu badawczego „Technologie wspomagające rozwój bezpiecznej energetyki jądrowej”

Badanie fizyki oddziaływania impulsowych strumieni plazmy z tarczami wykonanymi z W/CFC/SS pod kątem weryfikacji modeli numerycznych opisujących konwersję energii strumienia plazmy w energię promieniowania, w warstwie plazmy uwalnianej z tarczy, depozycję tej energii na tarczy oraz spowodowaną tym zjawiskiem erozję materiału tarczy

Osoba kontaktowa: M. Kubkowska, monika.kubkowska@ifpilm.pl

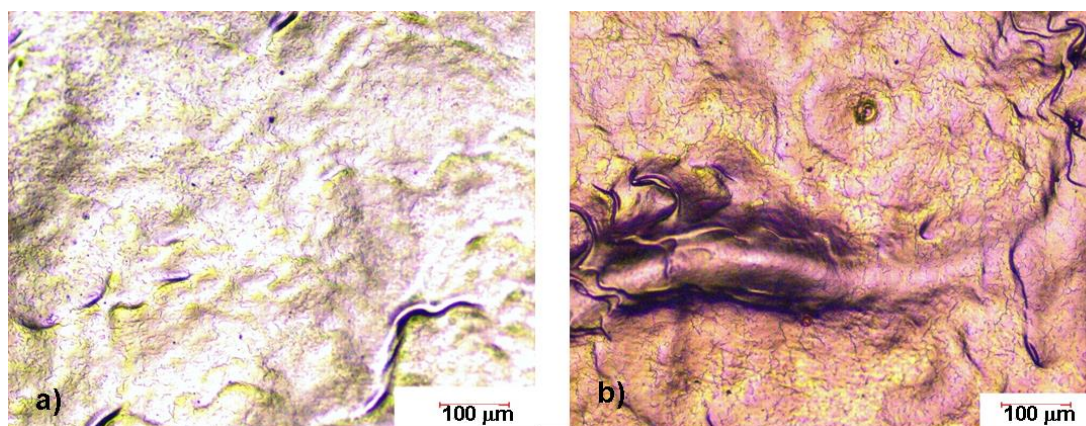
Zrealizowany projekt miał na celu wyznaczenie podstawowych parametrów strumieni plazmy, takich jak m.in. koncentracja elektronowa, szacowna gęstość energii deponowana na próbce, itp. oraz dostarczenie danych wejściowych do modelu numerycznego, który jest celem Etapu 2, w szczególności konwersję energii strumienia plazmy w energię promieniowania plazmy uwalnianej z tarczy, depozycję tej energii na tarczy oraz erozję materiału tarczy spowodowaną oddziaływaniem plazma-ściana. Przeprowadzono szereg sesji eksperymentalnych na urządzeniu *plasma focus* PF-1000U, które po modernizacji, będącej celem Etapu 8, przystosowane jest do przeprowadzania eksperymentów związanych z oddziaływaniem intensywnych impulsowych strumieni plazmy z pierwszą-ścianą i płytą dywertora reaktora termojądrowego w warunkach występowania różnych niestabilności. Zjawiska te mają niekiedy negatywny wpływ na pracę urządzenia lub nawet prowadzą do zakończenia impulsu, dlatego badania tego typu są istotne w dziedzinie fuzji jądrowej.

W ramach niniejszego etapu przedmiotem badań były materiały przewidywane do konstrukcji ścian reaktorów termojądrowych takie jak: węgiel typu CFC (*Carbon Fibre Composite*), wolfram (W) i stal nierdzewna (SS).

W 2014 roku przeprowadzono sesję eksperymentalną, która miała na celu badanie oddziaływań strumieni plazmy generowanych w urządzeniu PF-1000U z tarczą wolframową (99.95%) o wymiarach $3 \times 3 \times 1$ cm, zlokalizowaną 9 cm od końca elektrod na osi z układu. Badania przeprowadzono dla napięcia na kondensatorach równego 19 i 23kV, ciśnienia deuteru w komorze PF-1000U odpowiednio 1.2 i 1.8 Torr oraz czasu pomiędzy przyłożeniem napięcia a napuszczaniem gazu (również deuteru) 1.5 ms. W przypadku pomiarów spektralnych, w widmach zaobserwowano liczne linie wolframu, WI i WII, jednak o znacznie niższej intensywności niż to było w przypadku linii węgla i tarczy CFC. Przeprowadzone pomiary rozkładów gęstości elektronowej wykonane przez analizę pomiarów wielo-kadrową interferometrią, pokazały wzrost koncentracji tuż przy powierzchni próbki, jednak znacznie mniejszy niż to w przypadku badanego wcześniej materiału wykonanego z węgla.

Analiza utraty masy próbek W po oddziaływaniu ze strumieniami plazmy pokazała, że średnio na jedno wyładowanie PF-1000U, próbka wolframowa traci ok. 2.5 mg dla 23kV i 1.8 Torr deuteru w komorze, przy czym z zastosowaniem systemu gas-puff ubytek masy jest ok. 20% większy. Dla warunków eksperymentu 19kV i 1.2 Torr deuteru w komorze ubytek masy był znacznie mniejszy i wynosił ok. 1.18 mg na wyładowanie z zastosowaniem impulsowego napuszczania gazu. Warto podkreślić, że stosowanie dużych napięć w układzie PF-1000U powoduje uzyskiwanie większych gęstości energii deponowanych na powierzchni badanej próbki, jednak powodują także osadzanie się na powierzchni większych ilości

materiału elektrod, w szczególności miedzi. Badania materiałowe, przeprowadzone za pomocą mikroskopu optycznego pokazują, że odległość 9 cm od końca elektrod jest właściwa dla niższych parametrów pracy układu PF-1000U (19kV, 1.2Torr), jeśli chodzi o symulowanie niestabilności występujących w tokamakach. Dla wyższych parametrów układu (23kV, 1.8 Torr) pojawiają się warunki symulujące te niestabilności, ale i warunki depozycji materiałów elektrody, na co należy zwrócić uwagę podczas interpretacji wyników (rys.1). Porównanie wyników badań będących celem etapu 1 z wynikami modelu matematyczno-fizycznego, będącego celem etapu 2, pokazuje niewielką rozbieżność co do rzędu wielkości ilości odparowanego materiału. Z eksperymentu wynika, że średnio dla gęstości energii rzędu 1MJ/m^2 z próbki odparowuje ok. 1.8mg (wg modelu, etap 2 – ok. 6.1 mg), natomiast dla 3MJ/m^2 ok. 2.5 mg materiału (wg modelu, etap 2 – ok. 20mg). Trudnym do wyznaczenia jest czas oddziaływania strumieni z powierzchnią próbki, ponieważ wyładowanie w urządzeniu *plasma focus* jest zjawiskiem dość skomplikowanym. Z pewnością można stwierdzić, że nie jest on krótszy od czasu życia tzw. *pinchu*, który w przypadku PF-1000U wynosi ok. 200 ns, oraz nie jest dłuższy od kilku μs . W międzyczasie do powierzchni próbki docierają strumienie szybkich deuterionów oraz wolniejszych jonów, pochodzących z materiału elektrod. Czas ten jest znaczącym parametrem w symulacjach przeprowadzonych w ramach etapu 2 niniejszego zadania i wpływa na wyniki ilości odparowanej masy danego materiału w wyniku zdeponowania na powierzchni konkretnej gęstości energii. Niemniej jednak, porównanie wyników eksperymentalnych z wynikami modelu matematyczno-fizycznego pokazuje niewielką rozbieżność. (ok. kilku mg na wyładowanie PF-1000U).



Rys.1 Porównanie powierzchni próbek wolframowych poddanych trzem wyładowaniom na PF-1000U w następujących warunkach: a) $p = 1.2\text{Torr}$, $U = 19\text{kV}$, gas-puff: 2atm. Deuteru 2ms przed włączeniem urządzenia, b) $p = 1.8\text{Torr}$, $U = 23\text{kV}$, gas-puff: 2atm. Deuteru 2ms przed włączeniem urządzenia.

Kolejna sesja eksperymentalna przeprowadzona w 2014 r. dedykowana była również pomiarom oddziaływania impulsów plazmy z tarczami wykonanymi ze stali (316 L). Sesja ta nie była uwzględniona w harmonogramie zadania, jednak z uwagi na znaczenie tego typu materiału, chociażby w wybudowanym obecnie stellaratorze Wendelstein 7-X w Greifswaldzie, Niemcy, wskazane było zbadanie wpływu plazmy o podobnych parametrach, jakie użyto w przypadku próbek CFC i W, na zmiany materiałowe tego elementu. Sesję eksperymentalną przeprowadzono tylko w następujących warunkach urządzenia PF-1000U: 19 kV, 1.2 Torr deuteru oraz czas pomiędzy przyłożeniem napięcia a napuszczaniem gazu (również deuteru) - 1.5 ms. Badaniom poddano 3 próbki stalowe o wymiarach $3\times 3\times 1\text{ cm}$, oddając na powierzchnię tych materiałów odpowiednio 1, 3 i 5 wyładowań. Średni ubytek masy w tym przypadku wyniósł 0.91mg na wyładowanie, co świadczy o tym, że w porównaniu z wolframem nieco mniej materiału zostało odparowane w wyniku oddziaływania.

Opracowanie modelu matematyczno-fizycznego opisującego oddziaływanie impulsowych strumieni plazmy z tarczami oraz przeprowadzenie obliczeń dla eksperymentów wykonanych w etapie 1

Osoba kontaktowa: R. Zagórski, roman.zagorski@ifpilm.pl

Celem prac wykonanych w tym zadaniu było zaproponowanie takiego położenia dysz impulsowego napuszczania gazu (ang. *gas puff*), które pozwoliłoby otrzymywać w urządzeniu PF-1000U warstwę plazmową o jak najlepszych parametrach – m. in. dużej energii kinetycznej.

Kolejnym zadaniem było opisanie oddziaływania strumienia plazmowego z tarczą, w warunkach eksperymentu prowadzonego w IFPiLM. Otrzymywany w układzie PF-1000U bardzo intensywny strumień plazmy uderza w tarczę wolframową powodując jej powierzchniowe stopienie i odparowanie (tarcza węglowa w tych warunkach nie topi się, a sublimuje). Warstwa stopiona jest tym węższa i szybciej się porusza, im intensywniejszy jest strumień padającej plazmy. Energia padającej plazmy jest częściowo rozpraszana w parach wolframu gromadzących się przy bombardowanej powierzchni tarczy. Zastosowano jednowymiarowy opis przewodzenia ciepła w płycie wolframowej / węglowej.

Akceleracja warstwy plazmowej - wprowadzenie

Rozbudowany układ Plasma Focus pracujący w IFPiLM (PF-1000 → PF-1000U) miał posłużyć do przeprowadzenia eksperymentu, którego celem było badanie oddziaływania porcji plazmy z wolframową ścianką. Już plazma wytwarzana w urządzeniu PF-1000 miała parametry (gęstość strumienia energii, całkowita długość impulsu) zbliżone do parametrów plazmy ELM-ów (ang. *edge localised modes*) z tokamaka JET. Dodatkowe zainstalowanie dysz impulsowego napuszczania gazu (ang. *gas puff*), miało na celu dalszą poprawę osiąganego energii warstwy plazmowej i poprawę kontroli wyładowania. Gęstość strumienia energii i stosunkowo wysoka gęstość plazmy wytwarzanej przez PF-1000U czynią go szczególnie użytecznym narzędziem symulowania oddziaływań plazmy ze ścianką w amerykańskim układzie NIF (*National Ignition Facility*), gdzie rozwijana jest koncepcja syntezy termojądrowej z inercyjnym utrzymaniem plazmy.

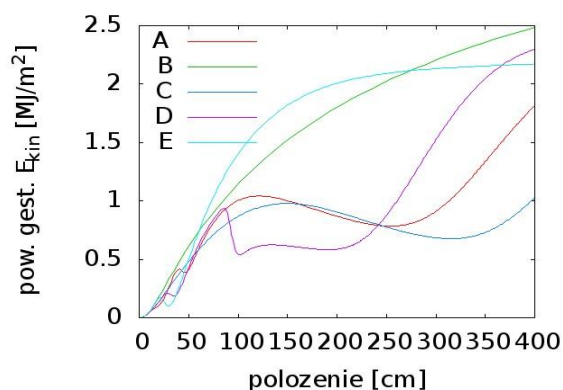
Wykonano prace celem przedyskutowania modyfikacji układu PF-1000U mających na celu zwiększenie gęstości strumienia energii plazmy produkowanej w układzie, a także wydłużenie impulsu prądowego. Ewentualnymi zmianami możliwymi do wprowadzenia było: wydłużenie elektrod i modyfikacja sposobu podawania gazu roboczego (typowo deuteru D₂). W starej konfiguracji był napuszczany na tyle wcześnie przed wyładowaniem, że osiągał on stałą gęstość w układzie. Tu uwzględnimy możliwość napuszczania impulsowego bezpośrednio przed „strzałem”, co pozwala różnicować rozkład gęstości gazu. Przebieg wyładowania jest bowiem na tyle szybki, że rozkład gazu w trakcie „strzału” (a przed ewentualnym zgarnięciem) można traktować jako zamrożony. Impuls prądowy wydłużyć ma jednocześnie użycie generatora urządzenia PF-1000U i generatora „C” (piorunowego) połączonych równolegle.

Symulacja

Do symulacji użyty został zerowymiarowy model tzw. pługu śnieżnego. W modelu tym zakłada się, że prąd płynie jedynie w cienkiej warstwie plazmy, której ruch powoduje siła Lorenza $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$. Plazma ta zgarnia i jonizuje część napotkanego gazu (ilościowo wyraża to stały współczynnik zgarniania) i nie oddziałuje z pozostałym. Zerowymiarowość modelu oznacza, że warstwę prądową opisujemy podając jedynie jej uśrednione położenie wzdłuż osi układu z, prędkość $v(z)$ (zaniedbujemy kształt warstwy) i jej całkowitą masę $m(z)$.

Zachowanie układu modelowaliśmy równaniami ewolucji masy zgarniętej m , położenia i prędkości pługu z i v , prądów i napięć na kondensatorach. Równanie ewolucji masy zgarniętej wyraża zasadę zachowania masy. Równanie ewolucji położenia i prędkości otrzymujemy uwzględniając ciśnienie pola magnetycznego w II Zasadzie Dynamiki Newtona. Ewolucję prądów i napięć otrzymujemy z równań obwodu elektrycznego. Powyższa metoda była szeroko stosowana w literaturze, gdyż szybko daje łatwe

w interpretacji wyników, które mają zadowalającą zgodność z eksperymentami. Rozważane scenariusze przyjmujemy rozmycie dopuszczanego gazu na obszarze rzędu 10 cm. Rozważamy pięć scenariuszy napełniania gazu.



Rys.1 Przebieg gęstości strumienia energii kinetycznej warstwy plazmowej w funkcji jej położenia w rurze dla różnych rozkładów gęstości napełnianego gazu.

Przypadek „A” to wariant z dwupunktowym napełnianiem gazu do komory roboczym ciśnieniu deuteru. Po wstępnym rozpędzeniu utrzymywana jest prędkość warstwy plazmowej powyżej $4 \cdot 10^6$ cm/s, co jest potrzebne dla jonizacji gazu. „B” to wariant z napełnianiem gazu jedynie w obszarze izolatora do komory o bardzo niskim ciśnieniu gazu. Przypadek „C” odpowiada obecnie przeprowadzanym eksperymentom ze stałym ciśnieniem w całej komorze. „D” to niespełniający ograniczenia dla prędkości minimalnej wariant „A” – ma on sprawdzać teoretyczne możliwości układu. Przypadek „E” różni się od wariantu „B” dwupunktowym napełnianiem gazu.

Wnioski

Analizując wykres zmian energii kinetycznej w funkcji położenia warstwy plazmowej w rurze zauważamy, że warianty ze stałym ciśnieniem gazu, do którego mogą być napełniane dodatkowe porcje gazu (wypadki „A”, „C”, „D”) pozwalają osiągnąć największą masę warstwy plazmowej. Dają one jednak stosunkowo mniejszy końcowy strumień energii kinetycznej gazu niż warianty z lżejszą warstwą.

Jeśli eksperyment prowadzony będzie w niewydłużonym układzie PF-1000U optymalne jest jednokrotne (blisko początku rury) napełnianie gazu. Pozwoli to jednak osiągnąć energię kinetyczną na poziomie $0,5$ MJ/m².

Jako że wydłużenie elektrod do długości kilku metrów wymagałoby dużej przebudowy układu badawczego, wobec braku konieczności osiągania gęstości strumienia energii kinetycznej na poziomie $2,5$ MJ/m², wydaje się to niecelowe.

Dołączenie generatora piorunowego mogło być mieć wpływ na dynamikę warstwy prądowej jedynie dla bardzo długich elektrod. W obecnym układzie może mieć wpływ stabilizujący podawany prąd. Jeśli eksperyment prowadzony będzie w niezmodyfikowanym układzie PF-1000U, optymalne jest jednokrotne (blisko początku rury) napełnianie gazu. Pozwoli to osiągnąć gęstość strumienia energii kinetycznej na poziomie $0,5$ MJ/m².

Bombardowanie strumieniem plazmy – wprowadzenie

Intensywny strumień gorącej plazmy wytwarzanej w PF-1000U dostarcza jest źródłem bardzo dużej mocy dostarczanych do wierzchniej warstwy płytki. Powoduje to szybkie jej stopienie i odparowywanie (sublimację, gdy badana jest próbka węglowa). Front ablacji jest tym węższy i szybciej poruszający się, im większa deponowana moc. Przed frontem znajduje się praktycznie nieograny materiał płytki, z tyłu zaś – pary.

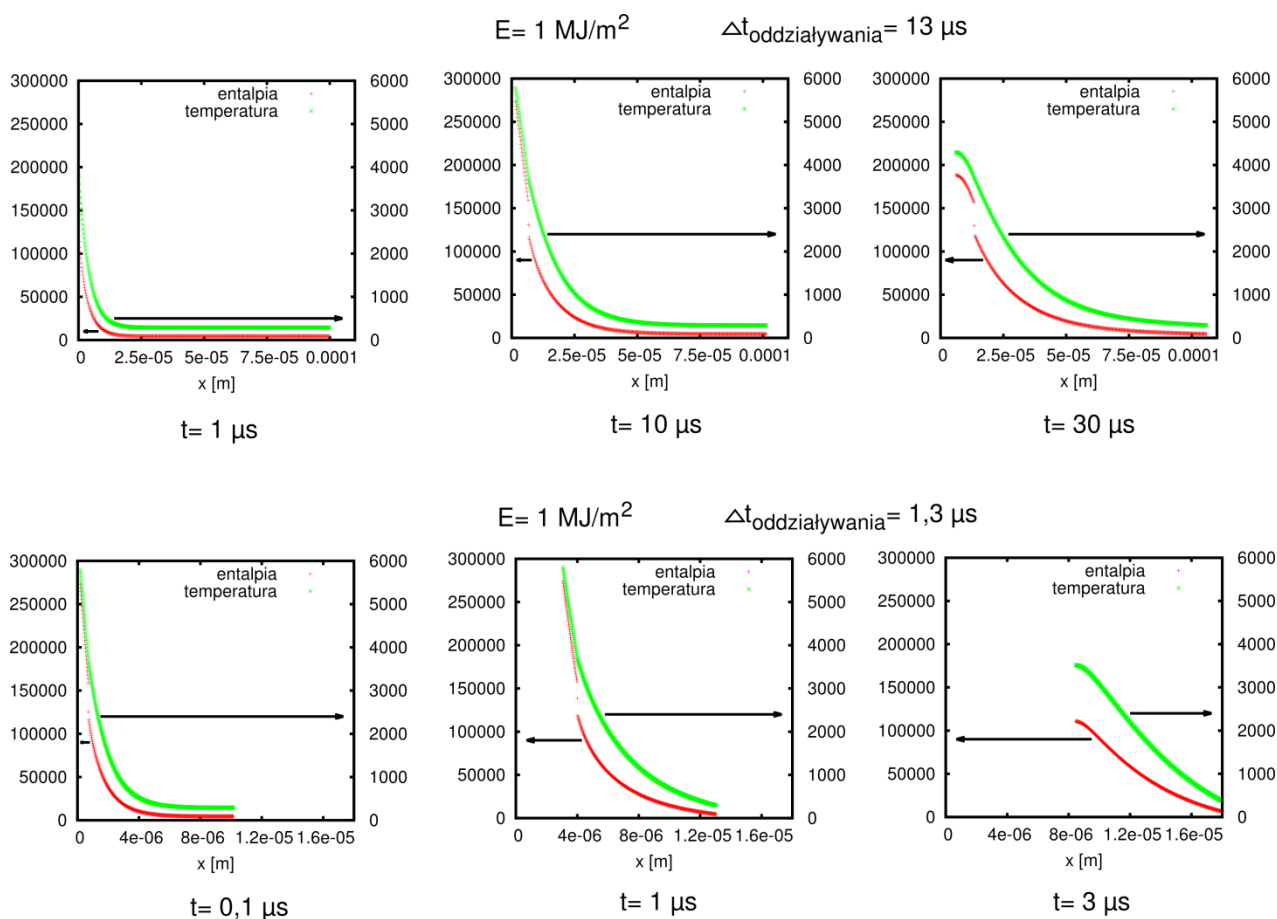
Powyższe przypuszczenia znajdują uzasadnienie w ścisłych szacunkach. Rozwiązaliśmy mianowicie analitycznie prosty model transportu ciepła w płytce. Okazało się, że jedynie ok. 1% energii jest absorbowany w płytce (i może być następnie odprowadzony przez układ chłodzenia). Tak intensywne

strumienie ciepła jak otrzymywane na PF-1000U praktycznie w całości zużywane są na ablację płytki (niezależnie od jej chłodzenia).

Celem otrzymania bardziej precyzyjnych wyników numerycznych opracowano kod komputerowy opisujący propagację ciepła wewnątrz próbki wolframowej z uwzględnieniem topienia i odparowania pod wpływem strumienia padającej plazmy. Aby jednoznacznie opisać przebieg topienia metalu prowadzono opis w języku entalpii molowej metalu, co pozwoliło naturalnie uwzględnić ciepło topienia metalu. Padający strumień plazmy wodorowej opisywany jest w warunku brzegowym parametrycznie, — jako źródło ciepła. Promieniowanie powierzchni wolframu uwzględniono w warunku brzegowym za pomocą współczynnika emisyjności $P = \epsilon \sigma_{SB} T^4$. Użyto doświadczalnych (zależnych od temperatury) wartości ciepła właściwego i przewodności cieplnej badanych materiałów.

Wyniki

Kod pracował w sposób stabilny dla różnych zadanych strumieni energii. Energia w układzie zachowana była z wysoką dokładnością (odchyłka < 0,001%).



Rys.2 Zmiany entalpii i temperatury podczas bombardowania próbki wolframowej dla podanych warunków.

Najlepsze wyniki uzyskano dla jednorodnej siatki numerycznej, której węzeł początkowy poruszał się z frontem odparowania. Zastosowanie niejawnego schematu Cranka–Nicholsona pozwoliło wydłużyć krok czasowy ewolucji, do co najmniej $3\tau_{\text{CFL}}$, gdzie τ_{CFL} jest maksymalnym krokiem czasowym metod jawnych (danym warunkiem Couranta–Friedrichsa–Levy'ego).

Podobnie jak uprzednie szacunki analityczne, symulacja wskazuje na odparowanie cienkiej (w porównaniu z objętością próbki), ale istotnej z punktu widzenia urządzenia termojądrowego, warstwy

metal. Wyniki eksperymentów przeprowadzone na układzie PF-1000U w IFPILM pokazują, że model numeryczny zawyża o rząd ilości materiału odparowanego z próbki. Możliwe, że zastosowany model ekranowania strumienia energii przez pary metalu był zbyt uproszczony. Przypuszczalnie jednak, masa próbki mogła zostać zwiększona przez napylenie na nią materiału anody i wyniki obliczeń można przyjąć za zadowalające.

Opracowanie technologii obrazowania plazmy w zakresie promieniowania rentgenowskiego na potrzeby diagnostyki monitorowania zanieczyszczeń uwalnianych ze ścian reaktora termojądrowego

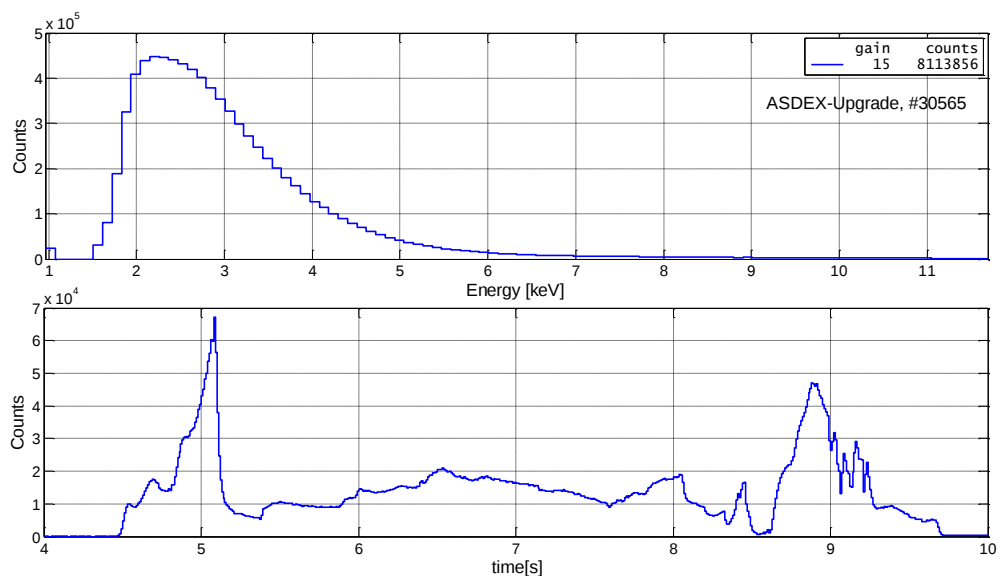
Osoba kontaktowa: M. Chernyshova, maryna.chernyshova@ifpilm.pl

W ramach tego zadania została opracowana i wstępnie przetestowana technologia obrazowania plazmy za pomocą detektora typu GEM (ang. *Gas Electron Multiplier*) w zakresie promieniowania rentgenowskiego, która powstała na potrzeby diagnostyki monitorowania zanieczyszczeń uwalnianych ze ścian reaktora termojądrowego. Ze względu na fakt, że w przyszłych reaktorach termojądrowych głównym kandydatem na materiał pierwszej ścianki reaktora jest wolfram, efektywność rejestracji promieniowania została dostosowana do zakresu energii emitowanych linii promieniowania wysoce zjonizowanego wolframu z plazmy centralnej w obszarze energii 2-3keV i wynosi ok. 40%. Tak wysoką efektywność zapewnia odpowiednio dobrana mieszanina gazowa (Ar 70%:CO₂ 30%) oraz geometria i konstrukcja roboczej komory detektora. Na potrzeby tego zadania została opracowana zaawansowana elektronika analogowo-cyfrowa najwyższej jakości, która umożliwiła osiągnięcie wysokiej rozdzielczości czasowej na poziomie częstości próbkowania sygnału (77-125MHz) i precyzyjnego określenia jego wartości, co odpowiada energii rejestrowanego fotonu. Opracowano i przetestowano różne konfiguracje odczytu sygnałów ze źródłami laboratoryjnymi oraz przeprowadzono wstępne testy jednej z konfiguracji na tokamaku ASDEX-Upgrade.

Najważniejszą diagnostyką, która w przyszłych reaktorach termojądrowych będzie dostarczać dane o poziomie zanieczyszczeń plazmy wolframem oraz dane o temperaturze jonowej plazmy, jest wysokorozdzielcza spektroskopowa diagnostyka rentgenowska. Diagnostyka ta powinna dostarczać precyzyjne informacje o przebiegach czasowych profili zanieczyszczeń i temperaturze jonowej. Co więcej, dobrze zaprojektowana diagnostyka rentgenowska może dodatkowo dostarczać dane o temperaturze elektronowej plazmy oraz o prędkości rotacji plazmy. Obrazująca diagnostyka rentgenowska wymaga użycia - specyficznych dla warunków reaktora termojądrowych - detektorów obrazujących promieniowanie rentgenowskie 2D. Zasada działania takich detektorów zbliżona jest do zasady działania detektorów wykorzystywanych w radiologii medycznej. Dlatego też prowadzone badania, specyficzne dla ekstremalnych warunków fizycznych w przyszłych reaktorach termojądrowych, mogą nie tylko przyczynić się do rozwoju technologii obrazowania rentgenowskiego plazmy 2D, ale mogą być wykorzystane w nowoczesnych metodach medycznego obrazowania rentgenowskiego.

Prace nad opracowaniem technologii obrazowania plazmy rozpoczęto w roku 2011 od przygotowania koncepcji modelowej technologii obrazowania struktur plazmowych 2D, projektowania prototypowej technologii obrazowania oraz koncepcji modelowego detektora do obrazowania plazmy w zakresie promieniowania rentgenowskiego, które razem z dotychczasowym doświadczeniem autorów niniejszego zadania badawczego wskazały, że detektor typu GEM (ang. *Gas Electron Multiplier*) jest dobrym kandydatem na detektor obrazujący struktury plazmowe tokamaka.

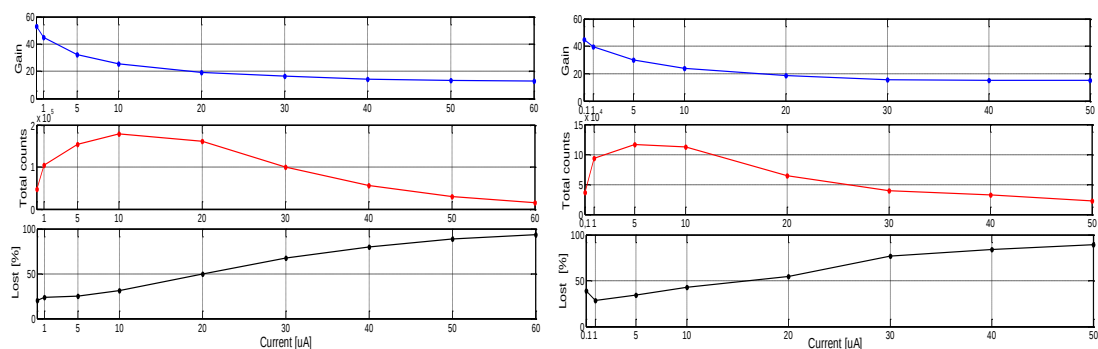
W 2014 roku trwania projektu zostały zakończone testy konfiguracji odczytu sygnałów z detektora w warunkach laboratoryjnych oraz przeprowadzono wstępne testy klasycznej pikselowej konfiguracji na tokamaku ASDEX-Upgrade. Rys.1 pokazuje przykładowy zarejestrowany sygnał z wyładowania #30565 tokamaka ASDEX-Upgrade.



Rys.1 Rozkład energetyczny (góra) oraz czasowy (dół) intensywności promieniowania z plazmy w wyładowaniu #30565 tokamaka ASDEX-Upgrade.

W ramach projektu stworzono algorytmy i kody numeryczne do analizy i procesowania sygnałów dla każdej konfiguracji odczytu. Dodatkowo stworzono kod numeryczny do weryfikacji technologii obrazowania struktur plazmowych uwzględniający optyczną konfigurację eksperymentu.

Ze względu na wymagania stawiane poprzez warunki pracy przyszłych reaktorów termojądrowych zostały przeprowadzone wstępne testy za pomocą lampy rentgenowskiej zależności parametrów detektora od intensywności padającego promieniowania. Wyniki dla dwóch struktur odczytu przedstawione na Rys.7 wskazują na to, że konfiguracja XUV ma lepszą zdolność odczytu większych strumieni fotonów niż struktura XY (prostokąty), niemniej jednak obie konfiguracje cierpią na spadek wzmocnienia detektora dla silnych strumieni fotonów. Rozwiązanie tego zagadnienia wymaga dodatkowych badań i testów w celu optymalizacji zastosowanej technologii.



Rys.7 Wzmocnienie detektora, ilość regularnych zliczeń (zaabsorbowanych fotonów) oraz utraconych danych w zależności od wartości prądu lampy rentgenowskiej (strumienia fotonów) dla konfiguracji XUV i XY, odpowiednio.

W trakcie realizacji danego zadania zostały osiągnięte następujące cele: opracowano technologię obrazowania struktur plazmowych w zakresie promieniowania rentgenowskiego oraz skonstruowano prototypowy detektor do obrazowania 2D w zakresie promieniowania rentgenowskiego na potrzeby diagnostyki monitorowania zanieczyszczeń plazmy. Wstępne wyniki testów detektora prototypowego w warunkach laboratoryjnych oraz w warunkach eksperymentu w tokamaku pozwoliły nakreślić kilka kierunków optymalizacji pracy detektora oraz opracowanej technologii w warunkach docelowych. Część tych kierunków wymaga dalszych dodatkowych badań i eksperymentów.

Do uzyskania wyników i osiągnięcia celów została zastosowana następująca aparatura oraz metody badawcze: PCB i schematy opracowano w środowisku Altium Designer; symulacji elektromagnetycznych w zakresie Signal Integrity dokonano za pomocą pakietu Hyperlynx; dokumentację produkcyjną stworzono narzędziem Camtastic, a tor analogowy symulowano programem Tina Texas Instruments; przy projektowaniu PCB posłużył programem SATURN, którym weryfikowano poprawność pakietu Altium w zakresie wyznaczanych impedancji charakterystycznych linii sygnałowych; po wyprodukowaniu płyt Backplane FPGA, AFE oraz Switch przystąpiono do ich uruchomienia, przy czym tor zasilania płyty Backplane FPGA został oprogramowany przy użyciu środowiska LPC Expresso wraz z debugerem sprzętowym; przydatny był również zestaw rozwojowy firmy Exar, który pozwolił przetestować programowanie zasilacza zanim zrobiono to na systemie docelowym, w ten sposób zmniejszono ryzyko uszkodzenia drogiego układu FPGA; posługując się oscyloskopem Mixed-Signal MSO4014 usunięto kilka drobnych błędów projektowych w torze AFE, na Backplane FPGA i w switchu; użyto pakietu Xilinx ISE oraz narzędzi wbgem i hdlmake do stworzenia firmware dla układu FPGA; przy uruchamianiu toru AFE użyto generatora sygnałów arbitralnych DDS. Część z tych prac wykonano jeszcze przed produkcją by zweryfikować założenia przyjęte podczas projektowania schematów Backplane FPGA. Prace przy firmware to znaczna część wszystkich prac nad projektem elektroniki. System zbiera dane z detektora GEM w trybie sygnałowym oraz poprzez interfejs PCI Express zapisuje na dysk komputera. Wstępne pomiary testowe wykonano dzięki specjalnie zaprojektowanemu oprogramowaniu sprzętowemu (FPGA) oraz przy użyciu programu MatLab, w środowisku którego zostały opracowane wszelkie algorytmy procesowania i obróbki sygnału wraz z kanałem diagnostycznym systemu. Symulacji optycznego toru układu detektor-pinhole-plazma dokonano za pomocą oprogramowania Delphi. Do tworzenia rysunków technicznych posługiwano się narzędziem CATIA. Kod numeryczny GEANT4 został zastosowany do określenia rezultatów oddziaływania materiału detektora z promieniowaniem jonizującym.

Adaptacja układu PF-1000 do realizacji celu szczegółowego 1

Osoba kontaktowa: M. Paduch, marian.paduch@ifpilm.pl

Zrealizowany projekt miał na celu wyposażenie, testy i uruchomienie laboratorium do badania oddziaływania plazmy o parametrach termojądrowych z tarczami wykonanymi z różnych materiałów.

W ramach tego zadania, zaprojektowano wykonano i uruchomiono cztery systemy, dzięki którym przystosowano układ do przeprowadzenia eksperymentów związanych z oddziaływaniem plazma-ścianka. Modyfikacja systemu generatora prądowego do wytwarzania i akceleracji plazmy polegać miała na dołączeniu do istniejącego generatora urządzenia PF-1000 dodatkowego generatora C załączanego odpowiednim iskiernikiem. Połączenie obu generatorów musi być dokonane poprzez niskiindukcyjny, wysokonapięciowy tor przesyłowy. Pierwszy odcinek, **kolektor PF-1000 – iskiernik załączający**, zbudowano w oparciu o 10 równolegle połączonych kabli typu YJKX o indukcyjności 80nH. Drugi odcinek, **iskiernik załączający – moduły kondensatorów**, zbudowano w oparciu 72 równolegle połączone kable typu RG 213/U 50-2,25/7,25 o indukcyjności 21 nH. Widok opisanych powyżej zespołów przedstawiono na rysunku 1.

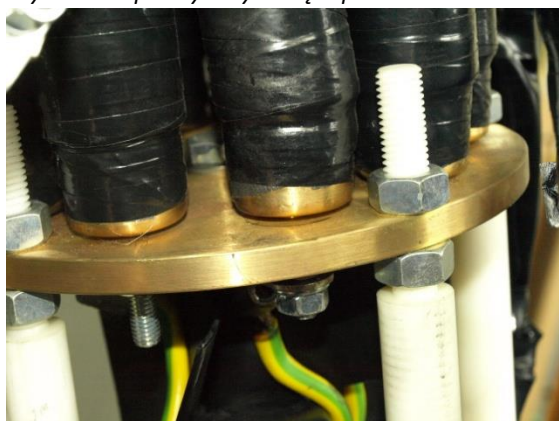
Na podstawie przebiegów prądowych z zarejestrowanych w zmodyfikowanym układzie DPF-1000U wynika, że przyjęty układ jest prawidłowy i otrzymujemy dwie składowe impulsu prądowego o parametrach 10μs/2MA i 350kA/0,1ms. Uzyskano przebiegi prądowe o znacznie dłuższym czasie trwania, a więc możliwe będzie uzyskanie strumieni plazmy o wyższej energetyce.



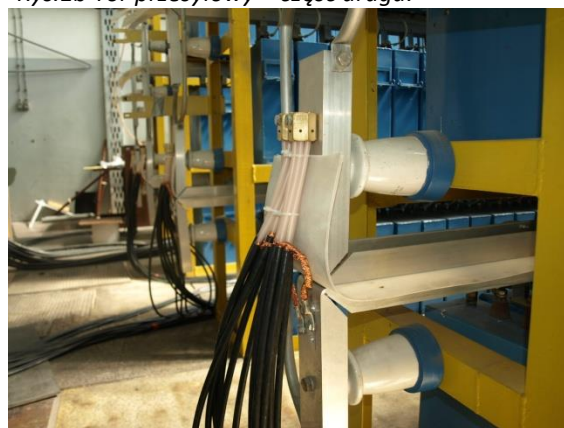
Rys.1a Tor przesyłowy – część pierwsza.



Rys.1b Tor przesyłowy – część druga.

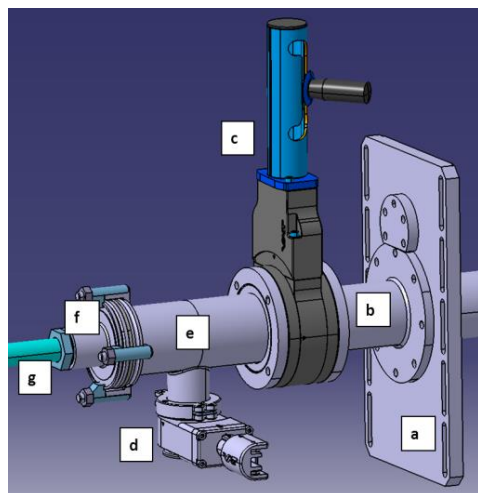


Rys.1c Tor przesyłowy – część pierwsza, przyłączy do iskiernika.



Rys.1d Tor przesyłowy – część druga, przyłączy do modułu kondensatorów.

Realizacja zadań związanych z oddziaływaniem plazmy z materią w warunkach podobnych jak w tokamakach wymaga z jednej strony „niskiego” ciśnienia w komorze eksperymentalnej, ale z drugiej strony potrzebujemy stosunkowo „wysokiego” ciśnienia gazu roboczego (deuteru) w obszarze międzyelektrodowym urządzenia DPF-1000U. Zastosowanie systemu gas-puff (elektromagnetyczny zawór typu „gas-puff”, system cewek magnetycznych, system typu „młotek”, generator impulsów prądowych, zasilacz WN wraz z systemem synchronizacji) pozwala modyfikować warunki gazowe w różnych obszarach komory eksperymentalnej układu DPF-1000U. Umożliwia to modyfikację warunków pracy urządzenia w celu optymalizacji generacji neutronów oraz intensywności strumieni plazmy.



W 2014 r. zainstalowany został na układzie PF-1000U specjalny system mocowania tarcz (układ służy umożliwiający wprowadzanie tarczy bez zapowietrzania komory). Układ ten umożliwia pozycjonowanie tarczy (o wymiarach do 55 mm) w wybranej przestrzeni komory eksperymentalnej (rys.2).

Rys.2 System śluzu oparty o elementy typu NW60. a – flansa przesuwna na „wrotach” komory, b – przejściówka izolacyjna na standard NW60, c – zawór NW60, d – zawór NW40 (do pompy próżniowej, e – trójnik NW60x60x40 (przebież wymiany tarcz), f – uchwyt pręta przesuwnego, g – pręt przesuwny.

Po uruchomieniu wszystkich systemów modernizujących układ PF-1000 przeprowadzono szereg sesji eksperymentalnych dla potrzeb realizacji pozostałych etapów projektu. W ramach tych eksperymentów przetestowano system diagnostyk do pomiaru parametrów plazmy powstającej przy powierzchni tarcz (16-to kadrowa interferometria laserowa, analizatory wysokoenergetycznych jonów, spektroskopia optyczna, układ do pomiar luminancji tarczy obciążonej impulsowymi strumieniami plazmy jak również diagnostyki neutronowe i rentgenowskie). Pomierzono parametry strumienia plazmy emitowanego z układu DPF-1000U w miejscu mocowania tarczy w zależności od ciśnienia gazu roboczego i energii generatora układu. Przeprowadzono badania czasowo-przestrzennych parametrów plazmy i jej widma promieniowania, przy powierzchni różnych tarcz węglowych i wolframowych poddanych działaniu impulsowego strumienia plazmy dla ustalonych warunków pracy układu DPF-1000U.

Urządzenie DPF-1000U jest jedynym w świecie urządzeniem plazmowym wyposażonym w systemy iniekcji gazu i układ zasilania umożliwiający wygenerowanie dwu składowych prądu (szybkiej i wolnej). Parametry zbudowanego stanowiska i zainstalowane diagnostyki (w szczególności wielokadrowa interferometria) pozwalają na prowadzenie na najwyższym poziomie światowym badań oddziaływania strumieni plazmy z różnymi materiałami z gęstością energii rzędu 2 MJ/m^2 .

7 Projekty Narodowego Centrum Nauki

7.1 SILMI: Badania makroskopowych efektów oddziaływań intensywnych impulsów laserowych z materią oraz przygotowanie propozycji praktycznych zastosowań wyników tych badań

Osoba kontaktowa: J. Badziak, jan.badziak@ifpilm.pl

Opisane prace zrealizowano w ramach projektu nr Nr 871-1/N-SILMI-RNP/2010/0 sponsorowanego przez MNiSW skorelowanego z projektem SILMI (*Super-intense laser-matter interactions*) w ramach programu *European Science Foundation (ESF), Research Networking Programme (RNP), Physical & Engineering Sciences Unit*. Projekt obejmował następujące dwa obszary badawcze:

- Super-intensywne oddziaływania lasera z materią na poziomie mikroskopowym (*Super-intense laser-matter interactions at the microscopic level*),
- Super-intensywne oddziaływania lasera z materią na poziomie makroskopowym (*Super-intense laser-matter interactions at the macroscopic level*).

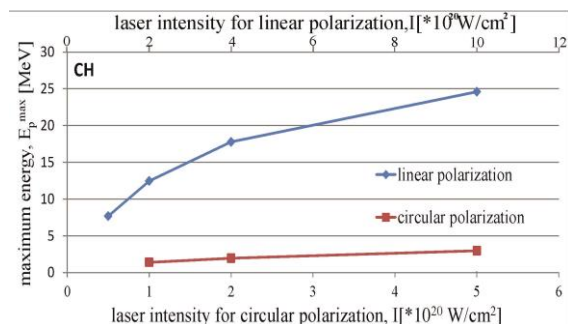
Obszar pierwszy dotyczy badań ekstremalnych zjawisk z wykorzystaniem nowych metod badawczych w zakresie fizyki atomowej, molekularnej i optyki fizycznej z użyciem super intensywnych impulsów laserowych. Obszar drugi dotyczy badań zjawisk z wykorzystaniem nowych metod badawczych w zakresie relatywistycznych oddziaływań ultra intensywnej fali elektromagnetycznej z materią, w szczególności z plazmą. Badania wchodzące w zakres projektu SILMI są stymulowane nowymi możliwościami badawczymi stwarzanymi bardzo szybkim rozwojem techniki krótko-impulsowych laserów wielkiej mocy rzędu 10^{22} W/cm².

Badania fizyki oddziaływań laserów dużej mocy z materią oraz badania dotyczące różnych wariantów kontrolowanej laserowej syntezy termojądrowej są realizowane w Instytucie Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy w Oddziale Plazmy Wytwarzanej Laserem (OPWL) od wielu lat. Większość prac w tym zakresie realizowana jest w ramach różnych projektów europejskich. Badania eksperymentalne oddziaływań lasera dużej mocy z materią są realizowane przez zespół z IFPiLM w dużych laboratoriach zagranicznych (głównie w Ośrodku Badawczym PALS w Pradze, Rep. Czeska) w ramach współpracy międzynarodowej przy wsparciu finansowym konsorcjum LASERLAB-EUROPE. W IFPiLM uruchomione zostało Laboratorium Laserów Wielkiej Mocy, w którym laser o mocy 10 TW jest stosowany do badań oddziaływań laser-materia. Przygotowano stanowiska badawcze i przetestowano układy diagnostyczne w eksperymentach realizowanych w IFPiLM i w O.B. PALS w Pradze Czeskiej. Realizowane są wstępne badania oddziaływań laser-materia.

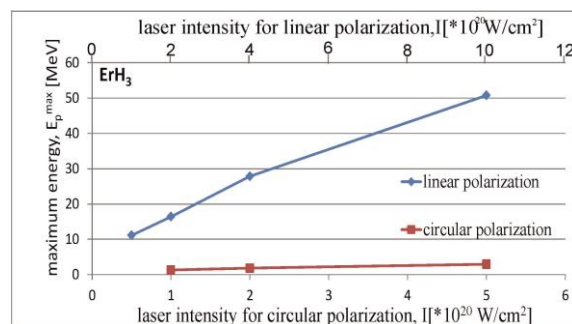
Instytut wykorzystując dotychczasowe doświadczenia badawcze i dostępną bazę aparaturową w Instytucie i w innych laboratoriach oraz współpracując z innymi zespołami realizuje w ramach projektu SILMI program badawczy pod nazwą: „Badania makroskopowych efektów oddziaływań intensywnych impulsów laserowych z materią oraz przygotowanie propozycji praktycznych zastosowań wyników tych badań”. Poniżej przedstawiono wyniki realizacji tego projektu w roku 2014 i w ostatnim punkcie podsumowanie realizacji całego projektu SILMI.

Symulacje numeryczne PIC dotyczące akceleracji jonów za pomocą lasera wielkiej mocy w wyniku oddziaływania z tarczami CH i ErH₃

Badano wpływ polaryzacji impulsu laserowego na maksymalną energię jonów i liczbę wysokoenergetycznych protonów. Wykazano, że oba te parametry są większe w przypadku stosowania polaryzacji kołowej niż liniowej impulsu laserowego. Przy stosowaniu tarcz ErH₃ otrzymano znacznie większe maksimum energii protonów i liczba szybkich protonów większe niż w przypadku tarcz CH. Na rysunkach 1 i 2 pokazano zależności powyższych wielkości od natężenia zogniskowanej wiązki laserowej.



Rys.1 Maksymalne energie protonów dla tarczy CH.



Rys.2 Maksymalne energie protonów dla tarczy ErH₃.

Analiza ilościowa interferogramów plazmy oraz danych uzyskanych za pomocą pozostałych diagnostyk stosowanych w eksperymentach na układzie PALS

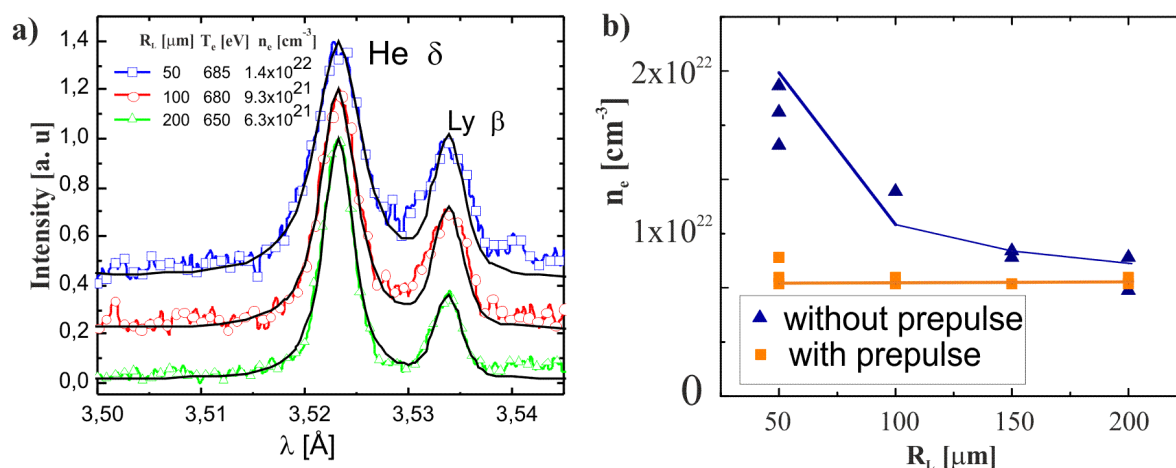
Głównym celem badań było określenie korelacji przestrzenno-czasowych rozkładów koncentracji elektronowej z pomiarów temperatury plazmy ablacyjnej, parametrami szybkich elektronów oraz jonów, które były uzyskane za pomocą: spektroskopii rentgenowskiej, dwuwymiarowego zobrazowania emisji linii K α miedzi, pomiarów emisji jonów za pomocą kolektorów oraz pomiaru objętości kraterów, jako źródła informacji o efektywności przekazu energii lasera do fali uderzeniowej generowanej w stałej części tarczy.

Prace badawcze koncentrowały się na analizie ilościowej widm z pomiarów spektroskopowych realizowanych za pomocą spektrometru rentgenowskiego ze sferycznym kryształem, umożliwiającego dwuwymiarowe zobrazowanie linii widmowych chloru He α and Ly α . Aby określić koncentrację (n_e), temperaturę elektronową (T_e) oraz charakterystyczny wymiar plazmy (L), zarejestrowane widma były dopasowywane do widm z modelu analitycznego za pomocą kodu „PrismSpect” [MacFarlane et al., *High Energy Density Physics* **3** (2007) 181]. Pierwszym krokiem procedury dopasowania było określenie parametru L , na podstawie poszerzenia linii Cl He α , a następnie na podstawie intensywności i poszerzenia linii: He δ oraz Ly β uzyskiwana była informacja odpowiednio o temperaturze (T_e) oraz koncentracji elektronowej plazmy (n_e). Typowe widma eksperymentalne oraz ich numeryczne dopasowanie za pomocą w/w procedury, przedstawione są na rys. 3a, natomiast uzyskane na ich podstawie wartości koncentracji elektronowej odpowiadające różnym warunkom oświetlenia tarcz dwuwarstwowych, regulowanych wielkością promienia wiązki laserowej, dla przypadków: w obecności jak bez pre-plazmy, pokazane są na rys. 3b.

Należy zauważyć, że charakter zmian koncentracji elektronowej otrzymany z pomiarów spektroskopowych jest bardzo podobny do tych otrzymanych z pomiarów interferometrycznych, pomimo pewnych różnic ilościowych. W przypadku bez pre-plazmy i promieni wiązki laserowej w zakresie: $R_L = 50 - 150 \mu\text{m}$ koncentracja elektronowa zmniejsza prawie identycznie (około 2 razy) tak jak wynika to z pomiarów interferometrycznych. Różnice między spektroskopią, a pomiarami interferometrycznymi występują dla większych promieni powyżej $R_L = 150 \mu\text{m}$ i odnoszą się do początkowej fazy ekspansji, w której koncentracja elektronowa rośnie z powodu osiowego charakteru wpływu plazmy ablacyjnej.

Różnice ilościowe wynikają również z faktu, że spektroskopia daje informację o uśrednionej w czasie wartości koncentracji elektronowej.

Obecność pre-plazmy, wyraźnie redukuje koncentrację elektronową. Analogicznie jak wynika to z pomiarów interferometrycznych, koncentracja elektronowa zmniejsza się ponad dwa razy, do takiego samego poziomu i dotyczy całego zakresu zmian promienia wiązki laserowej.



Rys.3 Przykładowe wyniki pomiarów spektroskopowych: a) zmiany intensywności linii widmowych chloru He α and Ly α i ich numeryczne dopasowanie do modelu [1] oraz b) zmiany koncentracji elektronowej w funkcji promienia wiązki laserowej.

Podsumowując powyższe wyniki pomiarów spektroskopowych możemy powiedzieć, że: w przypadku pomiarów promieniowania z plazmy bez obecności pre-plazmy otrzymane zależności zmian koncentracji i temperatury elektronowej w funkcji promienia wiązki laserowej są zgodne z pomiarami interferometrycznymi i potwierdzają dominowanie rezonansowego mechanizmu absorpcji promieniowania laserowego w przypadku 1 harmonicznej i dużych intensywności odpowiadających najmniejszym promieniom wiązki laserowej.

Obecność pre-plazmy istotnie degradowe przekaz energii promieniowania laserowego do fali uderzeniowej generowanej w tarczy masywnej, przenoszonej przez szybkie elektrony generowane w wyniku absorpcji rezonansowej.

Wynik badań wykonanych w ostatnim czasie zaprezentowano na międzynarodowych konferencjach: 41st EPS Plasma Physics Conference, Berlin, 23 - 27.06.2014 (wykład zaproszony) i na 33rd European Conference on Laser Interaction with Matter, Paris, 31-st August - 5th Sept.

Podsumowanie realizacji projektu SILMI w latach 2010 - 2014

W ramach niniejszego projektu Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Moikrosyntezy realizował zadania dotyczące „Badań makroskopowych efektów oddziaływań intensywnych impulsów laserowych z materią oraz przygotowania propozycji praktycznych zastosowań wyników tych badań”. Prace te wchodzą w zakres drugiego Obszaru programu SILMI (ESF RNP) obejmującego między innymi: nieliniowe oddziaływania promieniowania laserowego z materią, efekty oddziaływań laser-materia ważne dla zastosowań w technologii i medycynie, laserowo-plazmowe źródła szybkich cząstek.

Sprawdzano możliwość wykorzystania badanych zjawisk dla postępu prac nad opanowaniem laserowej syntezy termojądrowej, w szczególności w wariacie z tzw. szybkim zapłonem realizowanym w Europie w ramach projektu HiPER. Zadania objęte harmonogramem niniejszego projektu wykonane zostały przez zespół z IFPiLM w większości we współpracy z europejskimi zespołami naukowców.

Najważniejsze wyniki realizacji projektu można podsumować następująco:

- W wyniku symulacji numerycznych wykonanych za pomocą przygotowanego w IFPiLM relatywistycznego kodu LPIC++ wykazano możliwość użycia lasera Nd do generacji wiązki protonów o parametrach potrzebnych do realizacji syntezy laserowej (wariant z szybkim zapłonem), jako przyszłe zastosowanie.
- W wyniku symulacji numerycznych wykonanych za pomocą opracowanego w IFPiLM relatywistycznego kodu typu 1D PIC wykazano możliwość laserowej generacji ultraintensywnych wiązek deuterionów przez lasery KrF znacznie efektywniej niż przy stosowaniu lasera Nd, co ma znaczenie dla zastosowań w fuzji laserowej.
- Porównanie w eksperymencie na układzie PALS (w Pradze Czeskiej) mechanizmów laserowej absorpcji rezonansowej i zderzeniowej dla długo- i krótko-falowego promieniowania laserowego (1 i 3 harmoniczna promieniowania lasera Nd). Do badań tych zależności stosowano interferometrię i pomiary kraterów w tarczy.
- Wykazanie w wyniku symulacji numerycznych efektywności akceleratora laserowego LICPA (metoda opracowana w IFPiLM) stosowanego do przyspieszania strumieni jonów w wersji hydrodynamicznej i fotonowej.
- Uruchomienie, przetestowanie i zastosowanie w IFPiLM do badań lasera dużej mocy (10 TW) i nowych systemów pomiarowych zbudowanych w IFPiLM do badań oddziaływa laser-materia.
- Eksperymentalne zweryfikowanie rezultatów symulacji numerycznych dotyczących metody LICPA na układzie PALS w wersji hydrodynamicznej. Stosowano różne konstrukcje tarcz typu LICPA. Wykazano przewagę metody LICPA nad innymi metodami laserowej akceleracji jonów.
- Zastosowanie unikalnego femtosekundowego polaro-interferometru zbudowanego w IFPiLM do badań plazmy generowanej dwoma impulsami laserowymi w eksperymentach na układzie PALS.
- Określenie w eksperymentach na układzie PALS zależności parametrów plazmy laserowej od gradientu ekspandującej plazmy kształtowanego dwoma kolejnymi impulsami laserowymi o zmieniających parametrach.

Przewidywane zastosowania wyników realizacji projektu:

- Wyniki naukowe w ramach projektu SILMI uzyskane w IFPiLM potwierdzone w skali międzynarodowej służą lepszemu poznaniu zjawisk występujących przy oddziaływaniu lasera wielkiej mocy z materią. Ten obszar badań jest uznany za jeden z najważniejszych zarówno pod względem poznawczym jak i ze względu na potencjalne zastosowania praktyczne.
- Perspektywnym zastosowaniem wyników części prac wykonanych w ramach niniejszego projektu w korelacji z projektem SILMI było zbadanie wybranych zjawisk związanych z efektywną realizacją fuzji laserowej. Zespół z IFPiLM badał zjawiska mające wpływ na realizację syntezy laserowej w wersji z szybkim zapłonem protonowym i w wersji z tzw. zapłonem silną falą uderzeniową skompresowanego paliwa DT za pomocą lasera wielowiązkowego. Europejski projekt HiPER dotyczący opracowania i w przyszłości budowy laserowej infrastruktury do sprawdzenia efektywności fuzji laserowej przewiduje sprawdzenie także powyższych opcji fuzji laserowej.
- Intensywne strumienie prędkich jonów, głównie protonów, przyspieszanych laserem wielkiej mocy mogą być w najbliższej przyszłości wykorzystane w diagnostyce i terapii nowotworowej oraz w badaniach materiałowych. W ramach niniejszego projektu i projektu SILMI optymalizowano opracowany w IFPiLM laserowy akcelerator jonów LICPA umożliwiający produkcję jonów o parametrach znacznie wyższych niż uzyskiwane innymi metodami laserowego przyspieszania jonów. Ta metodyka może służyć zwiększeniu efektywności urządzeń laserowych konstruowanych do powyższych zastosowań.
- Stosując specjalne konstrukcje tarcz naświetlanych wiązką laserową i odpowiednio dobierając parametry impulsu laserowego zoptymalizowano metodę wytwarzania skolimowanych strug plazmowych (*jetów*) generowanych laserem. Takie strumienie plazmy, szczególnie w oddziaływaniu z gazem, służą do symulowania w laboratorium określonych zjawisk plazmowych w kosmosie.

Realizacja projektu SILMI została udokumentowana przede wszystkim licznymi publikacjami w renomowanych czasopismach naukowych i prezentacjami na specjalistycznych konferencjach międzynarodowych. Wybrane rezultaty badań objętych niniejszym projektem posłużyły do przygotowania materiałów włączonych do czterech dysertacji doktorskich i jednej habilitacji oraz do uzupełnienia dokumentacji kompletowanej w ramach postępowania o nadanie tytułów profesorskich.

7.2 HARMONIA: Badania nieliniowych oddziaływań laser-plazma i generacji fal uderzeniowych w plazmie dla potrzeb udarowego zapłonu termojądrowego z utrzymaniem inercyjnym

Osoba kontaktowa: J. Badziak, jan.badziak@ifpilm.pl

Badania laserowej akceleracji jonów w układzie LICPA przy relatywistycznym oddziaływaniu wykonano z użyciem kodu 2D PIC. Obliczenia wykonano dla impulsów laserowych o czasie trwania 130 fs i natężeniu promieniowania $1,4 \times 10^{23} \text{ W/cm}^2$ przy innych parametrach zbliżonych do parametrów budowanych petawatowych laserów wielkiej mocy w ramach projektu ELI. Średnia energia jonów i sprawność konwersji energii lasera do jonów jest w akceleratorze LICPA co najmniej 2 razy większa niż w układzie tradycyjnym. Parametry laserów ELI są wystarczające (z nadmiarem) dla uzyskania energii protonów wymaganych dla hadronowej terapii nowotworów ($\sim 0,2 \text{ GeV}$).

Z użyciem lasera PALS w Pradze Czeskiej wykonano badania akceleracji makrocząstki wykorzystując akcelerator plazmowy LICPA. Prędkość i efektywność laserowego przyspieszania makrocząstki w funkcji jej masy mierzono za pomocą diagnostyk jonowych metodą „czasu przelotu”. Prędkość makrocząstki malała od $\sim 130 \text{ km/s}$ do $\sim 70 \text{ km/s}$ ze wzrostem jej masy od 2 mg to 15 mg. Efektywność przyspieszania wzrastała od 9% do 15% wraz ze wzrostem masy makrocząstki. Ta efektywność działania akceleratora LICPA jest ponad rząd wielkości większa od konwencjonalnego laserowego przyspieszania w wyniku ekspansji plazmy ablacyjnej.

Symulacje numeryczne wykonane za pomocą kodu 2D PIC PALE wykazały, że w trakcie przyspieszania makrocząstki w kanale układu LICPA pozostaje makrodrobiną o gęstości ciała stałego. Ta gęstość jest 10-100 razy większa niż w przypadku przyspieszania ablacyjnego.

Układ LICPA zastosowano do generacji fali uderzeniowej o ultrawysokim ciśnieniu w eksperymencie przeprowadzonym na układzie PALS. Parametry takiej fali uderzeniowej określano na podstawie rozmiarów kraterów wytwarzanych w wyniku uderzenia makrocząstki w metalową tarczę. Te rezultaty porównywano z kraterami tworzonymi przez makrocząstki przyspieszanej ablacyjnie.

Używając kodu 2D PIC PALE wykonano symulacje numeryczne generacji ultrawysokich ciśnień wytwarzanych falą uderzeniową w warunkach występujących w eksperymencie PALS. Uzyskano falę uderzeniową o płaskim froncie (średnica $\sim 0,2 \text{ mm}$), maksymalnej gęstości $14,3 \text{ g/cm}^3$ i prędkości 80 km/s . Maksymalne ciśnienie na froncie było 144 Mbar , a za frontem osiągało 290 Mbar . Te wartości znacznie przewyższały parametry uzyskiwane w przypadku przyspieszania ablacyjnego i były w dobrej zgodności z wyżej podanymi wynikami pomiarów otrzymanych w eksperymencie na układzie PALS.

W uruchomionym w 2014 roku Laboratorium Laserów Wielkiej Mocy w IFPiLM wykonano pierwsze badania laserowej akceleracji jonów i generacji promieniowania X. Plazma była wytwarzana impulsem femtosekundowym ($\sim 44 \text{ fs}$) z użyciem lasera PULSAR o mocy maksymalnej 10 TW . Maksymalna zmierzona energia protonów emitowanych do przodu osiągała wartość $\approx 2,4 \text{ MeV}$ zaś średnia energia jonów wynosiła $\sim 0,7 \text{ MeV}$.

8 Projekty Międzynarodowego Centrum Gęstej Plazmy Namagnetyzowanej

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

Osoba kontaktowa: M. Paduch, marian.paduch@ifpilm.pl

Badano możliwości sterowania przebiegiem wyładowania w układzie Plasma Focus za pomocą iniekcji gazu (gas-puffing). Badano wpływ iniekcji gazu na dynamikę warstwy plazmowej, koncentrację elektronową plazmy, charakterystyki emisję neutronów miękkiego oraz twardego prom. X emitowanego z plazmy. Zoptymalizowano działanie układu PF-1000U w celu uzyskania maksymalnego strumienia plazmy dla badań materiałowych, maksymalnej emisji prom. X do testowania diagnostyk, itp.

Zbadano wpływ iniekcji gazu (deuter, neon) na dynamikę warstwy plazmowej, parametry plazmy w sznurze plazmowym oraz stabilność kolumny plazmowej. Eksperyment prowadzono we współpracy z zespołami naukowców z Politechniki w Czeskiej Pradze oraz NCBJ. Kontynuowano badanie wpływu zewnętrznego pola magnetycznego na niestabilności MHD oraz na emisję promieniowania X. Dynamikę plazmy badano przy pomocy 16-kadrowego interferometru laserowego.

Kontynuowano badania mechanizmów generacji neutronów oraz metody zwiększania tej emisji przy zadanej energii zgromadzonej w baterii kondensatorów. Mierzono anizotropię emisji neutronów (za pomocą liczników aktywacyjnych). Program realizowany był w ramach Centrum Gęstej Namagnetyzowanej Plazmy.

Testowano różne diagnostyki z wykorzystaniem urządzenia PF-1000U. Badano aktywację neutronami o energiach 2.45 MeV różnych izotopów w celu zastosowania ich do pomiarów neutronów na układach JET (Culham) i W7-X (w Greifswaldzie).

Badano wpływ miękkiego promieniowania X emitowanego z układu PF1000U na zmianę wielkość śladu pozostawionego przez jony lub neutrony w detektorach śladowych.

Wykonano kalibrację dwóch typów monitorów emisji neutronów prędkich: monitora berylowego i monitora opartego na aktywacji itru. Monitory te są przeznaczone do badań na układach tokamak i stellarator.

Wykonywano badania materiałowe z wykorzystaniem urządzenia PF-1000U wspólnie z zespołami z Inst. Fiz. Plazmy ANRC, Inst. Fiz. Plazmy UAN i NCBJ. Przeprowadzono badanie spektroskopowe plazmy powstającej w wyniku oddziaływania strumieni plazmy z płytką wolframową.

Układ PF-1000U wykorzystywano także do badań oddziaływania strumieni plazmy oraz wiązek jonów z różnymi tarczami w ramach projektów EUROfusion, MAEA i NCBiR. Badano materiały przewidziane na ścianki i na konstrukcję divertora w układach ITER i DEMO.

9 Projekty Europejskiej Agencji Kosmicznej i firmy SNECMA

9.1 KLIMT: Krypton Large Impulse Thruster

Osoba kontaktowa: J. Kurzyna, jacek.kurzyna@ifpilm.pl

Wykonano dalsze badania optymalizacyjne plazmowego silnika Halla (~500 W) w oparciu o wcześniejsze testy oraz teoretyczne i numeryczne modelowanie wyładowania w ramach projektu *Krypton Large Impulse Thruster KLIMT* (umowa w ramach ESA). KLIMT jest układem laboratoryjnym przeznaczonym do prac badawczych. Ma on konstrukcję modułową pozwalającą na pracę w kilku konfiguracjach.

W ubiegłym roku przygotowano 2-gą ulepszoną wersję silnika. Wykonano optymalizację modelu silnika, poprawiono termikę, w tym obwód magnetyczny, węzeł anody i katody. Zmodyfikowano układy zasilania gazem (kryptonem). Zakupiono instalację i uruchomiono układy zasilania energią.

9.2 Quasineutral PIC electron guiding center modeling in the presence of slow cross-field electron transport in a Hall thruster

Osoba kontaktowa: D. Daniłko, dariusz.danilko@ifpilm.pl

W obliczeniach stosowano przybliżenie centrum wiodącego dla elektronów w połączeniu ze schematem PIC przy założeniu kwasineutralności plazmy. Stworzony został model transportu elektronów wzdłuż kanału silnika. Poprawność wyników stwierdzono przez porównanie z rezultatami uzyskanymi za pomocą hydrodynamicznego kodu HETMAN (1D).