

zgodnie z zaleceniami producenta na bazie głównej noty technicznej [153] oraz noty AN4488 [154]. Wybrany mikrokontroler posiada szeroką gamę zaawansowanych peryferii, które wykorzystałem do budowy systemu. Najważniejszymi z nich są układy licznikowe zwane timerami, których zadaniem jest precyzyjne generowanie impulsów czasowych niezbędnych do sterowania systemami do wytwarzania tarcz laserowych. W opracowanym rozwiązaniu zdecydowałem się wykorzystać łącznie 5 z 14 programowalnych układów licznikowych wbudowanych z strukturą mikrokontrolera. Pozostałe układy licznikowe są dostępne do dalszej implementacji jako rozwiązania wewnętrzne bez wyprowadzeń fizycznych. Zadania timerów rozdzieliłem w zależności od parametrów układowych oraz możliwości konfiguracji wewnętrznych. Układy licznikowe działają na zasadzie zliczania kolejnych taktów sygnałów zegara aż do pewnej wartości zadanej lub do przepełnienia wartości licznika. Głównym blokiem programowalnego timera jest 16-to lub 32-bitowy licznik z powiązaniem z nim rejestrem automatycznego ładowania. Zegar licznika może być dzielony przez preskaler, który może dzielić częstotliwość zegara licznika przez dowolny współczynnik od 1 do 65536. W przypadku opracowanego systemu, zegar główny mikroprocesora pracuje z częstotliwością 168 MHz, a poszczególne bloki timerów zgodnie z daną częstotliwością magistrali wewnętrznej, równej 168 MHz lub 84 MHz. Docelowa rozdzielczość poszczególnych timerów została ustalona wstępnie za pomocą poszczególnych ustawień preskalera na wartość $1 \mu s$. Do sterowania kanałami układów zasilania elektromagnesów wykorzystane zostały dwa timery 32-bitowe, timer 2 oraz timer 5. Pozostałe timery są timerami 16-bitowymi, które są wykorzystywane jako sygnały kontrolne (timer 1) bądź dodatkowe układy synchronizacji zewnętrznej (timer 3 i timer 4). Wszystkie układy zostały skonfigurowane w trybie *One Pulse Mode (OPM)*. Tryb pracy *OPM* pozwala ~~on~~ na uruchomienie licznika w odpowiedzi na sygnał zewnętrzny i wygenerowanie impulsu o programowalnej długości po programowalnym czasie opóźnienia. Główny sygnał wyzwalaający poszczególne prace układów czasowych ~~połączony~~ jest fizycznie do kanału 2 (*TI2FP2*, ang. *Filtered Timer Input 2*) timera nr 1, skonfigurowanego jako timer synchronizujący pracę pozostałych bloków (*master timer*). Sygnał wyjściowy z timera 1 fizycznie jest podpięty do diody *LED* znajdującej się na panelu przednim kontrolera, której zadaniem jest informowanie użytkownika o poprawnym uruchomieniu timera. Jego parametry czasowe zostały ustawione na stałe podczas prac dotyczących oprogramowania wbudowanego. Wszystkie pozostałe układy timerów pracują w trybie *master-slave* względem timera 1. Dokładny schemat połączeń w bloku timerów oraz ich docelowe zastosowanie przedstawiłem w Tabeli 5. Tryb pracy *OPM* jest bardzo ciekawym rozwiązaniem układowym,

pracy oraz parametrów związanych z działaniem systemu, natomiast moduł komunikacji bezprzewodowej umożliwia sterowanie kontrolerem ^{rozwijają} zarówno z poziomu zewnętrznego urządzenia. Powyższa funkcja jest bardzo użyteczna w przypadku realizacji badań w laboratorium narażonym na wystąpienie promieniowania jonizującego podczas realizacji badań eksperymentalnych, a także poprzez dodanie zewnętrznych modułów pomiarowych, np. ciśnienia lub temperatury, które mogą być automatycznie zmieniać parametry pracy kontrolera zaworów.

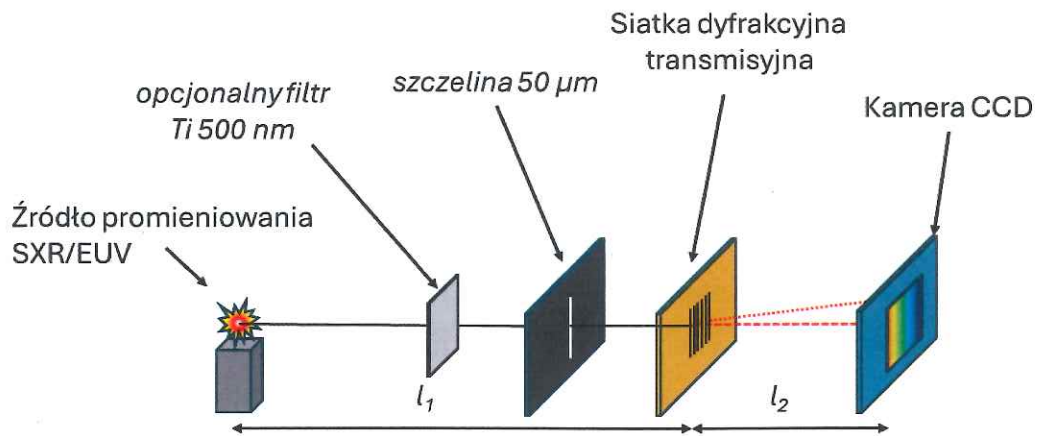
Powyżej opisane komponenty składowe sterownika elektronicznego zostały przetestowane w warunkach laboratoryjnych. Modułowy charakter urządzenia umożliwia stosunkowo proste wprowadzanie zmian w konstrukcji urządzenia oraz aktualizacji oprogramowania. Kontroler elektroniczny stanowi integralną część do opracowanych układów zaworów do wytwarzania tarcz gazowych oraz aerozolowych. Przedstawione w powyższym rozdziale konstrukcje urządzeń spełniają wszystkie wymagania stawiane początkowo w celu realizacji nowych systemów do wytwarzania tarcz laserowych. Oba rozwiązania bazują na rozwinięciu systemów do wytwarzania tarcz gazowych, jednak stanowią zupełnie nową konstrukcję o nowych możliwościach. Tarcze klastrowe wytwarzane na bazie pierwszego z opracowanych systemów mogą stanowić silną konkurencję dla dotychczas stosowanych rozwiązań wykorzystujących rozwiązania Hageny. Nie wymagają stosowania układów chłodzenia kriogenicznego ani wysokich ciśnień gazów oraz mają charakter tarcz o unikalnych parametrach. System do wytwarzania tarcz aerozolowych jest całkowicie oryginalnym rozwiązaniem na skalę światową z uwagi na zastosowaną metodę wytwarzania tarczy aerozolowej oraz samą konstrukcję urządzenia. Oba systemy potwierdzają słuszność stawianych tez w poniższej pracy i stanowią nowe systemy do wytwarzania tarcz laserowych.

4. Wybrane metody badań nowo opracowanych tarcz laserowych

Przedstawione w poprzednim rozdziale dwa nowe systemy do wytwarzania tarcz laserowych wymagają określenia podstawowych parametrów dotyczących wytwarzanych tarcz, takich jak profile oraz mapy gęstości wytwarzanej tarczy, optymalny zakres ciśnień gazów roboczych a także oszacowanie parametrów struktur ~~klasterowych~~ oraz aerozolowych w danych tarczach. Oba urządzenia bazują na rozwiązaniu systemów do wytwarzania tarcz gazowych, które posiadają znane i dobrze opracowane metody charakteryzacji [155, 156]. Do wyznaczenia dwuwymiarowych map oraz profili gęstości tarcz wykorzystana została dobrze znana metoda radiografii impulsowej w zakresie miękkiego promieniowania rentgenowskiego [157]. Do badań struktur ~~klasterowych~~ oraz aerozolowych wykorzystałem ^{metody} pomiary rozproszenia wiązki laserowej na wytwarzanej tarczy laserowej. Na podstawie pomiarów charakterystyk rozproszeniowych możliwe jest przeprowadzenie estymacji rozmiarów wytwarzanych struktur oraz określenie jej dominujących wymiarów. Tarcze zawierające struktury gazowo-~~klasterowe~~ o rozmiarach sub-mikrometrycznych ^{zarych}, mogą być także zobrazowane w zakresie optycznym metodą mikroskopową. Obrazowanie dużych struktur ~~klasterowych~~ na bazie podwójnej tarczy gazowej jak dotąd nie było nigdy zrealizowane w ramach żadnych badań dotyczących charakteryzacji tarcz gazowo-~~klasterowych~~ i jest pierwszą znaną mi ilustracją tego typu materii metodą optyczną. Wyniki przeprowadzonych pomiarów stanowią kartę charakterystyki oraz możliwości nowo opracowanych systemów.

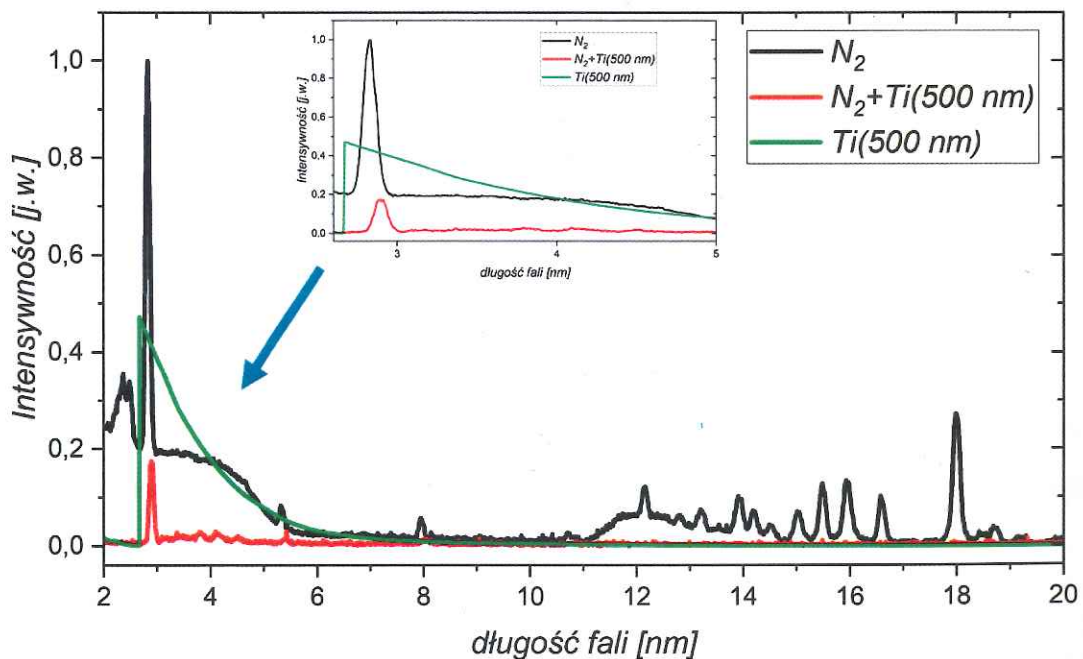
4.1. Radiografia impulsowa

Główną metodą badawczą wykorzystaną podczas charakteryzacji obu systemów jest technika radiografii impulsowej (*cieniografii*), w której tarcza laserowa prześwietlana jest impulsami miękkiego promieniowania rentgenowskiego (*soft X-ray, SXR*) o długości $\lambda = 2.88 \text{ nm}$. Impulsy promieniowania *SXR* zostały wytworzone za pomocą kompaktowego źródła laserowo-plazmowego opartego o podwójnej tarczy gazowej opracowanej w Instytucie Optoelektroniki, Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie [158, 159]. Gazem roboczym wykorzystanym do wytworzenia plazmy laserowej w źródle *SXR* był azot (N_2) o ciśnieniu $P_{N_2} = 8 \text{ bar}$, natomiast gazem buforowym był lekki, hel (*He*), którego ciśnienie robocze wynosiło $P_{He} = 6 \text{ bar}$. Plazma laserowa powstała w wyniku jonizacji azotu, emituje promieniowanie w zakresie miękkiego promieniowania rentgenowskiego *SXR* oraz skrajnego nadfioletu *EUV*. Wykorzystane źródło laserowo-plazmowe charakteryzuje się emisją widma typu liniowego, wynikającego z poszczególnych przejść atomowych podczas jonizacji azotu. Wąski zakres widmowy impulsów *SXR* zostały osiągnięty poprzez spektralną selekcję emisji widma z plazmy laserowej. Selekcja widmowa została uzyskana poprzez zastosowanie metalicznego filtra wykonanego z folii tytanowej o grubości $d_{Ti} = 500 \text{ nm}$, umieszczonego na drodze optycznej pomiędzy źródłem *SXR* a badaną tarczą laserową i kamerą *CCD* czułą na zakres promieniowania *SXR/EUV*. Z uwagi na to, że filtr metaliczny nie przepuszcza promieniowania widzialnego, pełni również funkcję odcinającą promieniowanie w zakresie widzialnym, pochodzące z plazmy laserowej. Pomiar widmowe promieniowania emitowanego przez źródło *SXR/EUV* zostały przeprowadzone za pomocą opracowanego spektrometru z siatką dyfrakcyjną typu transmisyjnego. Stała wykorzystanej siatki dyfrakcyjnej wynosi $5000 \frac{1}{\text{mm}}$ i została umieszczona w odległości ok. 720 mm od źródła, zgodnie ze schematem optycznym z poniższego rysunku:



Rysunek 55. Schemat optyczny dla wyznaczenia widma emitowanego przez plazmę laserową N_2/He w zakresie SXR/EUV

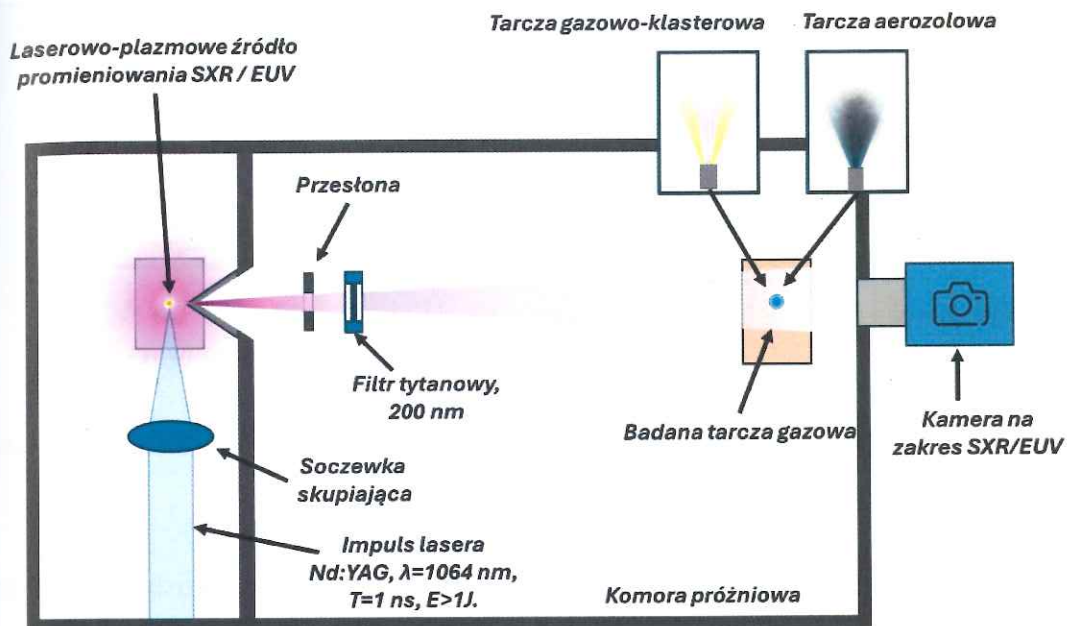
Kamera CCD została umieszczona w odpowiednio dobranej odległości l_2 od siatki dyfrakcyjnej, aby zarejestrować linie widmowe w zakresie widmowym $\lambda=1-20$ nm. Zarejestrowane widmo promieniowania emitowane ze źródła SXR wraz naniesioną krzywą transmisji dla filtra tytanowego przedstawiłem na Rysunek 56.



Rysunek 56. Widmo promieniowania emitowanego przez plazmę laserową N_2/He w zakresie SXR. Kolorem czarnym przedstawione zostało widmo bezpośrednio emitowane przez plazmę laserową, kolorem zielonym wykreślona została charakterystyka transmisyjna filtra tytanowego o grubości 500 nm, kolorem czerwonym przedstawione zostało wyselekcjonowane widmo wyjściowe.

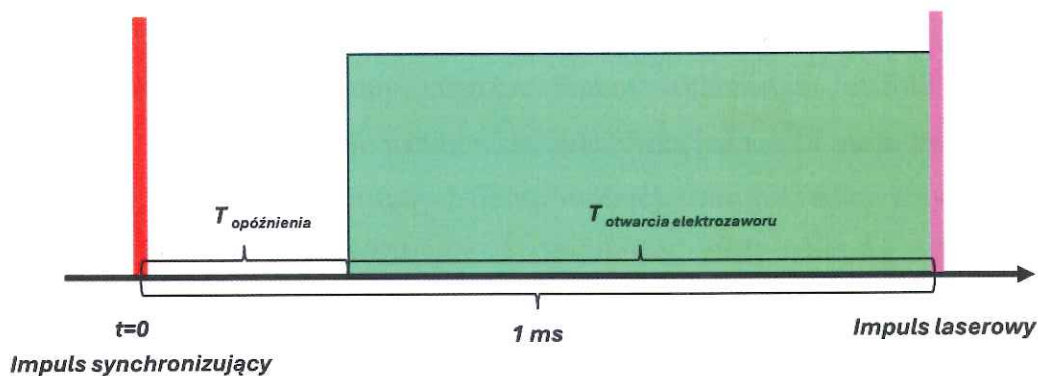
Wytwarzanie plazmy laserowej będącej źródłem impulsów promieniowania SXR odbywa się w wyniku oddziaływania impulsów lasera Nd:YAG ($\lambda=1064$ nm, $\tau=1$ ns, $E=5$ J) z tarczą N₂/He. Impulsy promieniowania laserowego były skupiane za pomocą soczewki skupiającej o ogniskowej $f=150$ mm na wysokości ok 1 mm ^{wylociem} nad środkiem dyszy gazowej.

Pomiary radiografii impulsowej zostały przeprowadzone w prostopadłościennym komorze próżniowej podzielonej na dwie sekcje. Źródło promieniowania SXR zostało umieszczone w pierwszej, mniejszej wydzielonej sekcji komory próżniowej, zwanej sekcją źródła, która posiadała swój niezależny system pompowania próżniowego zapewniający próżnię na poziomie 10^{-2} mbar podczas pracy źródła SXR. Sekcje 1 oraz 2 zostały oddzielone od siebie stalową grodzią, w której umieszczony został stożek z otworem o średnicy ok 1 mm. Jego zadaniem jest zapewnienie pompowania różnicowego komory próżniowej oraz wprowadzenie promieniowania SXR do sekcji 2 komory próżniowej. Od strony sekcji 1, stożek znajdował się w odległości ok 3 mm od miejsca wytwarzania plazmy laserowej. Badane tarcze laserowe znajdowały się w odległości ok. 630 mm od źródła, w drugiej sekcji komory próżniowej. Sekcja druga komory próżniowej ~~próżniowa odpompowana~~ została do próżni o wartości $P=10^{-4}$ mbar za pomocą układu próżniowego składającego się z ^{notacji} pompy próżni wstępnej oraz pompy turbomolekularnej. Na drodze optycznej pomiędzy źródłem SXR a badaną tarczą umieszczona została dodatkowa przesłona, której zadaniem jest ograniczenie możliwości przedostawania się rozbłysków powstałych w wyniku impulsowego wytwarzania plazmy laserowej w sekcji 1. Wyselekcjonowane widmowo promieniowanie plazmy w zakresie SXR prześwietla badaną tarczę laserową i jest rejestrowane w postaci obrazu 2D na kamerze CCD typu *back-illuminated* czulej na zakres SXR/EUV (Andor iKon-M, model DO-934-BN). Matryca zastosowanej kamery miała rozmiar 13.3×13.3 mm² przy rozdzielczości 1024×1024 pix (1.0 Mpix). Podczas pomiarów, detektor kamery został schłodzony za pomocą wbudowanego układu chłodzenia do temperatury $T=-20^{\circ}\text{C}$ w celu zmniejszenia szumów termicznych. Powiększenie optyczne obrazowanych tarcz laserowych wynosiło ok $M=1.2 - 1.4$ x. Schemat optyczny wykorzystanego układu pomiarowego przedstawiłem na Rysunek 57.



Rysunek 57. Schemat optyczny radiografii impulsowej w zakresie miękkiego promieniowania rentgenowskiego

Proces wytwarzania badanej tarczy laserowej oraz źródła promieniowania SXR ⁵⁹ jest ściśle zsynchronizowany z wykorzystanym do tego celu nanosekundowym systemem laserowym firmy Expla, model NL129. Pomiary zostały przeprowadzone w trybie pojedynczego impulsu laserowego. Czas trwania impulsu laserowego wynosił ok $\tau=1.2$ ns przy energii ok $E=7$ J. Synchronizacja układu pomiarowego została przeprowadzona względem impulsu wyzwalającego pochodzącego z systemu laserowego. Impuls synchronizacyjny wytwarzany jest przez sterownik systemu laserowego na 1 ms przed każdym impulsem laserowym. W momencie pojawienia się impulsu synchronizującego, kontroler systemów do wytwarzania badanych tarcz musi je wytworzyć w momencie pojawienia się impulsu laserowego, a ^{dotychczas} ~~zarazem~~ ^{impulsu} promieniowania SXR. Zobrazowanie graficzne momentu synchronizacji przedstawiłem na poniższym rysunku (Rysunek 58): ^{W sposób graficzny sekwencja kolejnych impulsów wyzwalających została przedstawiona na Rys. 58.}

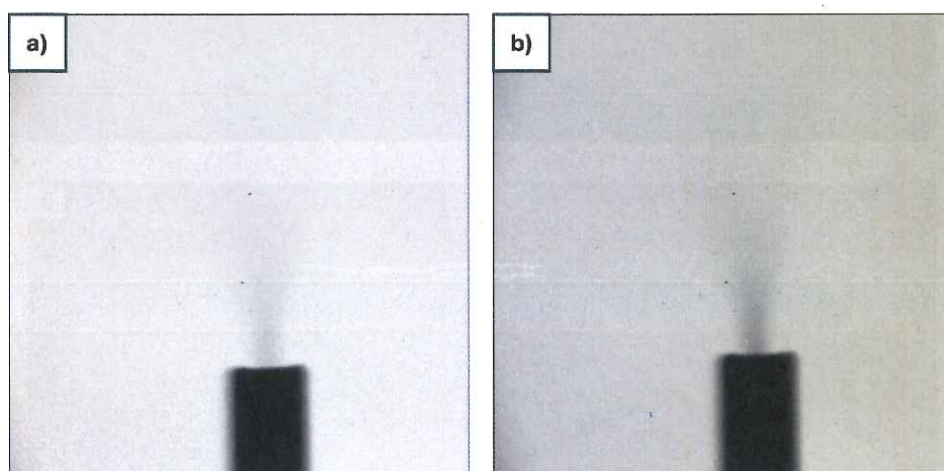


Rysunek 58. Procedura synchronizacji czasowej systemu do wytwarzania tarcz laserowych z impulsem laserowym

Na etapie prowadzonych badań niezbędne było wyznaczenie odpowiednich wartości czasów opóźnienia otwarcia (t_{op}) oraz czasu otwarcia (t_{otw}) elektrozaworu gazowego. Wartość tych czasów jest zależna od zastosowanego elektromagnesu w konstrukcji zaworu gazowego. Typowy czas otwarcia elektrozaworu nie przekraczał $t_{otw}=1000 \mu s$ i został oszacowany na wcześniejszym etapie. Poszczególne elektromagnesy różniły się wartością czasu opóźnienia i było to związane z bezwładnością działania ruchomego trzpienia elektromagnesu. Dla elektromagnesu *Ledex 195202-231*, czas opóźnienia wynosił $t_{op}=200 \mu s$, *195202-234* $t_{op}=280 \mu s$ natomiast dla elektromagnesu *195202-237* czas bezwładności trzpienia był na tyle wysoki, że konieczna była praca systemu w trybie drugiego impulsu laserowego, aby możliwe było stabilne wytwarzanie tarczy laserowej w odpowiednim momencie.

Opracowane systemy do wytwarzania tarcz laserowych, zarówno chłodzona tarcza gazowa jak i tarcza aerozolowa zostały ~~secharakteryzowane~~ wytworzone w warunkach próżniowych z wykorzystaniem gazów i cieczy częściowo absorbujących promieniowanie emitowane przez źródło *SXR*. W przypadku systemu do wytwarzania chłodzonej tarczy gazowej, charakteryzację metodą radiografii impulsowej przeprowadziłem dla ksenonu (*Xe*), dwutlenku węgla (*CO₂*) oraz sześćfluorku siarki (*SF₆*) jako gazów roboczych w zmiennym zakresie ciśnień od 2 do 10 bar. Ciśnienie helu zostało eksperymentalnie dobrane dla dwóch zakresów: $P_{He}=3 \text{ bar}$ oraz $P_{He}=6 \text{ bar}$. Wszystkie pomiary zostały przeprowadzone dla wariantu wytwarzania tarczy w temperaturze otoczenia, tj. $T_{ot}=20^\circ C$ oraz dla wariantu chłodzonego, w temperaturze $T_{min}=-30^\circ C$. Efektem przeprowadzonych badań było zarejestrowanie szeregu obrazów w postaci dwuwymiarowych cieniogramów wypływu gazu z dyszy zaworu systemu do wytwarzania tarcz laserowych. Badania radiografii impulsowej systemu do wytwarzania tarcz aerozolowych, wykorzystywały aerozol powstały na bazie mieszaniny helu i metanolu

(CH_3OH) jako układu aerosolowego. Do badań tarczy aerosolowej, detektor kamery CCD został profilaktycznie zabezpieczony cienkim filtrem wykonanym z folii Mylarowej. Transmisja folii w badanym zakresie widmowym była bliska ^{100%} jedności i może być całkowicie pominięta podczas analizy zarejestrowanych obrazów. Zarejestrowane radiogramy mają postać obrazów o rozdzielczości 1024×1024 pix i 16-bitowej skali szarości. Przedstawiają ^{one} dwuwymiarowy obraz absorpcji promieniowania źródła w gazie wypływającym z dyszy dla różnych warunków ciśnienia gazu roboczego oraz temperatury zaworu. Radiografia tarczy aerosolowej została przeprowadzona dla aerosolu helowo-metanolowego w funkcji zmiany ciśnienia helu w zakresie 1 do 2.5 bar. Temperatura zaworu aerosolowego wynosiła ok $30^\circ C$, która wynikała z ciepła wydzielonego przez przetwornik piezoelektryczny umieszczony w komorze nebulizacyjnej działający w trybie ciągłym. Przykładowe cieniogramy wytwarzanych tarcz laserowych przedstawiłem na Rysunek 59 oraz Rysunek 60. Na pierwszym z nich przedstawiłem typowe cieniogramy tarcz gazowo-klastrowych ¹ wytworzonych na bazie ksenonu oraz helu dla dwóch temperatur pracy zaworu: $T_1 = 20^\circ C$ oraz $T_2 = -30^\circ C$, natomiast na Rysunek 59 ⁶⁰ przedstawiłem cieniogramy porównawcze tarczy helowo-metanolowej ^{metanolowej} dla różnych wartości ciśnienia helu. V



Rysunek 59. Przykładowe cieniogramy wytwarzanych tarcz gazowo-klastrowych ^{na} bazie ksenonu i helu dla temperatury zaworu $T_1 = 20^\circ C$ (a) oraz $T_2 = -30^\circ C$ (b). Ciśnienia gazów roboczych wynosiły ^{następująco}: $P_{Xe} = 2$ bar, $P_{He} = 3$ bar

Parametry wytwarzanej tarczy aerosolowej w funkcji ciśnienia gazu roboczego okazały się być zbliżone w pełnym zakresie pomiarowym. W przypadku wzrostu ciśnienia powyżej 3 barów, parametry wytwarzanej tarczy uległy znaczącemu pogorszeniu przez zmniejszenie ilości

Dwuwymiarowe mapy transmisji $Tr(x, y)$ badanych tarcz laserowych wyznaczane zostały na podstawie różnicy radiogramów tarczy laserowej oraz obrazu tła kamery. Obraz tła kamery określa wartości szumów termicznych detektora CCD bez oświetlania jej promieniowaniem SXR. Wartość transmisji tarczy została przeskalowana w zakresie od $Tr=0$ do 100%. Opracowane mapy transmisji chłodzonych tarcz gazowych dla optymalnych parametrów wytwarzania przedstawiłem na poniższym rysunku (Rysunek 61). Chłodzona tarcza ksenonowa (Xe) osiągnęła swoje optymalne parametry wytwarzania już w przypadku następujących wartości ciśnień gazów: $P_{Xe}=4 \text{ bar}$, $P_{He}=3 \text{ bar}$ (Rysunek 61 a). Ze wzrostem ciśnienia gazu roboczego, kształt wypływu pozostawał zbliżony, ale miał charakter dyszy o zmiennej geometrii, zależnej od zastosowanych ciśnień. Zawór pracował wydajnie w pełnym zakresie ciśnień ksenonu, tj. od $P_{Xe}=2 \text{ bar}$ do $P_{Xe}=10 \text{ bar}$. Zwiększając ciśnienie gazu buforowego z $P_{He}=3 \text{ bar}$ do $P_{He}=6 \text{ bar}$, parametry tarczy uległy pogorszeniu. Tarcza laserowa wytworzona na bazie dwutlenku węgla (CO_2) charakteryzowała się optymalnym działaniem w zakresie $P_{CO_2}=4 \text{ bar} - 6 \text{ bar}$ dla ciśnienia gazu buforowego $P_{He}=3 \text{ bar}$, natomiast dla $P_{He}=6 \text{ bar}$ optymalny zakres ciśnień gazu roboczego wynosił $P_{CO_2}=6 \text{ bar} - 10 \text{ bar}$ (Rysunek 61 b)). Dla chłodzonej tarczy gazowo-klastrowej wytworzonej na bazie sześćofluorku siarki (SF_6), optymalny zakres ciśnień gazu roboczego wynosił $P_{SF_6}=6 \text{ bar} - 10 \text{ bar}$, zarówno dla $P_{He}=3 \text{ bar}$ jak i $P_{He}=6 \text{ bar}$ (Rysunek 61 c)). Dla tarczy aerozolowej optymalny zakres ciśnień gazu rozpraszającego ciecz został oszacowany na zakres $P_{He}=1 \text{ bar} - 2.5 \text{ bar}$. Przykładową mapę transmisji tarczy aerozolowej dla ciśnienia $P_{He}=1.5 \text{ bar}$ przedstawiłem na Rysunek 61 d).

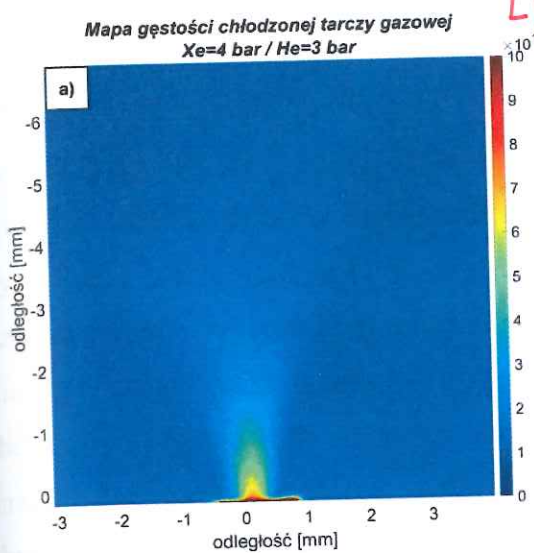
2
f. l. ob.
fid. 12
jakie to
są te
optymalne
parametry
jak to
wytwarzyć?

* - jakie są zdefiniowane te „optymalne parametry wytwarzania”?

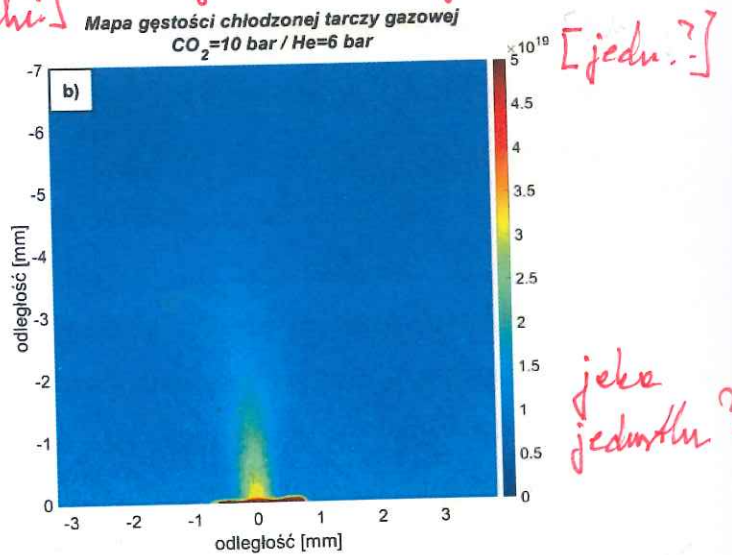
Gdzie:

- $Tr(x, y)$ - dwuwymiarowa mapa transmisji badanej tarczy gazowej,
- $\mu_0 = 2r_0\lambda f_2$ - przekrój czynny na absorpcję fotonów,
- $r_0 = 2.82 \times 10^{-15}m$ - klasyczny promień elektronu,
- λ - długość fali źródła,
- f_2 - część urojona współczynnika rozpraszania atomowego,
- m_{at} - masa atomowa, *czego?*
- $d(y)$ - funkcją opisującą obszar wytwarzania tarczy *tzn.?*

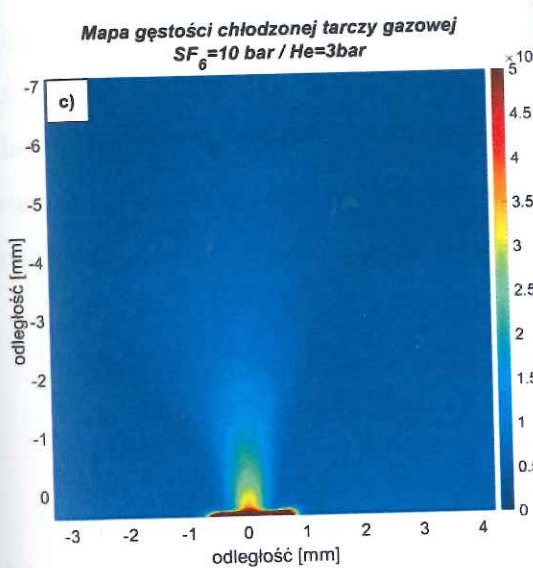
Metoda ta nadaje się do analizy radiogramów, w których źródło promieniowania było monochromatyczne oraz emitowało promieniowanie w zakresie energii fotonów $E=50-30000 eV$. Przekrój czynny μ_0 wyznaczany jest dla składu chemicznego danej tarczy gazowej na podstawie eksperymentalnie oraz empirycznie wyznaczonych współczynników rozpraszania f_2 . Wartość współczynników rozpraszania atomowego f_2 jest wartością tabelaryczną odczytaną dla konkretnego pierwiastka oraz danej długości fali [161]. Dla gazów molekularnych (CO_2 , SF_6) oraz metanolu (CH_3OH), wartość współczynnika f_2 została obliczona jako wartość średnia na podstawie poszczególnych wartości f_2 dla danego pierwiastka oraz proporcji masy atomowej danego pierwiastka w pojedynczej molekułe gazu lub cząsteczce cieczy. Oszacowanie dwuwymiarowych map gęstości tarczy wyznaczone zostało dla każdego zarejestrowanego radiogramu, tworząc docelowo charakterystykę kształtu oraz gęstości wytwarzanych tarcz laserowych w funkcji ciśnienia gazu. Z uwagi na ograniczoną liczebność danych pomiarowych na podstawie których wyznaczona została wartość f_2 , otrzymane mapy gęstości tarczy laserowej mogą być obarczone pewnym błędem pomiarowym w stosunku do gęstości rzeczywistych. Przykładowe mapy gęstości tarczy gazowych dla optymalnych parametrów przedstawiłem na rysunku Rysunek 62.



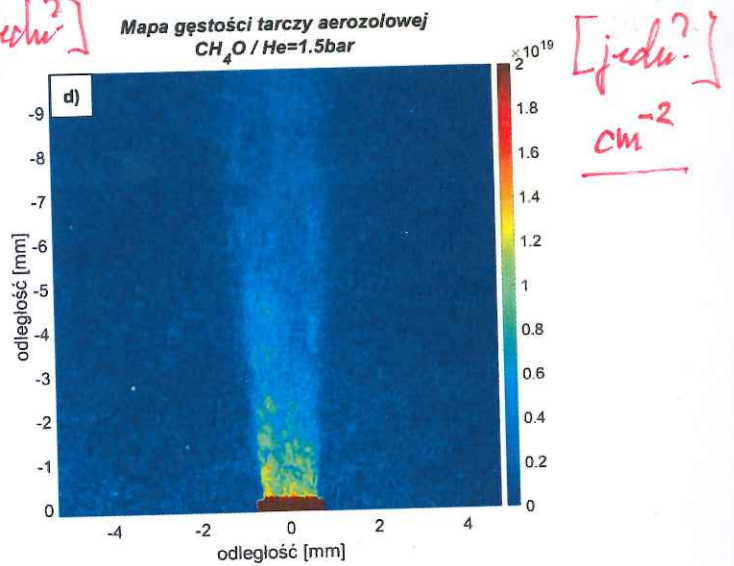
[jedni?]



jaka jednostka?



[jedni?]



[jedni?]
cm⁻²

Rysunek 62. Dwuwymiarowe mapy gęstości chłodzonych tarcz laserowych i tarczy aerozolowej dla wybranych ciśnień gazów roboczych oraz buforowych

Wytworzone tarcze laserowe charakteryzują się uzyskaniem wysokich wartości gęstości atomowych. Chłodzona tarcza ksenonowa ($P_{Xe}=4 \text{ bar}$) na wysokości ok $700 \text{ }\mu\text{m}$ nad powierzchnią dyszy charakteryzowała się średnią gęstością na poziomie $n_{at} = 6 \times 10^{18} \text{ at/cm}^3$. Chłodzone tarcze na bazie dwutlenku węgla oraz sześćofluorku siarki osiągnęły średnią gęstość na tej samej wysokości wynoszącą ok. $n_{at} = 2.5 \times 10^{19} \text{ at/cm}^3$.

Zmiany ciśnień gazów roboczych oraz gazu buforowego znacząco wpływają na kształt wytwarzanej tarczy. Dla pewnych wartości ciśnień gazów roboczych oraz buforowych możliwe jest osiągnięcie zarówno stosunkowo niskich wartości gęstości tarczy jak i uzyskanych na

poziomie 10^{19} at/cm^3 . Tarcza aerozolowa również charakteryzowała się bardzo wysoką gęstością średnią na poziomie $n_{at} = 1.5 \times 10^{19} \text{ at/cm}^3$ w odległości ok 1 mm nad dyszą zaworu, a spadek jej gęstości był stosunkowo niewielki na wysokościach będących 3-4 krotnością średnicy dyszy w warunkach próżniowych na poziomie 10^{-4} mbar .

Wytwarzane tarcze laserowe ze względu na swoją osiową symetryczność umożliwiają przeprowadzenie rekonstrukcji profilu rozkładu gęstości. Każda projekcja cylindrycznie osiowego układu na płaszczyznę dwuwymiarową matematycznie opisana jest transformatą Abela. Aby uzyskać trójwymiarową rekonstrukcję obrazu na podstawie zarejestrowanych obrazów dwuwymiarowych (np. radiogramów), należy przeprowadzić procedurę znaną jako odwrotna transformata Abela (IAT). Oferuje ona możliwość rekonstrukcji wycinka cylindrycznie symetrycznego układu 3D na podstawie obrazów dwuwymiarowych na płaszczyznę prostopadłą do osi symetrii. Dzięki temu, możliwe jest oszacowanie gęstości badanej tarczy laserowej w funkcji poszczególnych wartości odległości od dyszy. Matematycznie, dla układu, w którym środek danego układu jest osią symetrii (oś z), odwrotna transformata Abela projekcji 2D $f(r, z)$ jest dana następująco:

$$f(r, z) = -\frac{1}{\pi} \int_r^\infty \frac{dF(y, z)}{dy} \frac{1}{\sqrt{y^2 - r^2}} dy \quad (23)$$

Gdzie:

- r - jest promieniem osiowego obiektu cylindrycznego opisanego zależnością $r^2 = x^2 + y^2$,
- z - jest osią symetrii projekcji dla badanego układu.

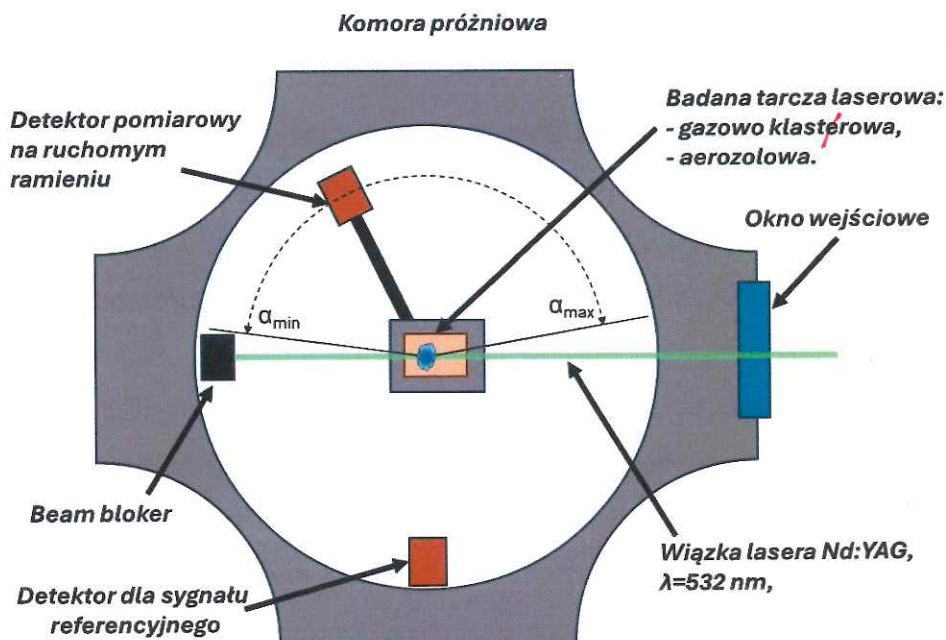
Metoda odwrotnej transformaty Abela bardzo dobrze nadaje się do rekonstrukcji osiowo-symetrycznych takich jak tarcze gazowe oraz plazma laserowa. Danymi wejściowymi mogą być zarówno cieniogramy jak i interferogramy pomiarowe. W przypadku pomiarów tarcz laserowych metodą radiografii impulsowej, analizę rekonstrukcji profilów rozkładów gęstości metodą IAT obliczyłem za pomocą kodu numerycznego [162] w środowisku Matlab, wykorzystującego rozwinięcie nieznanego rozkładu radialnego w ~~serii~~ ^{w poprzedku} funkcji cosinus [163]. Przykładowe profile gęstości uzyskane na podstawie map transmisji tarczy oraz wykorzystanego kodu matematycznego przedstawiłem na Rysunek 63.

4.2. Rozproszenie promieniowania laserowego

Do analizy rozmiarów wytwarzanych struktur koloidalnych w tarczy laserowej jedną z najpopularniejszych metod jest metoda dyfrakcji wiązki laserowej badanej tarczy laserowej. Na podstawie dyfrakcji laserowej możliwe jest określenie wielkości cząsteczek w bardzo szerokim zakresie pomiarowym, wynoszącym, w zależności od zastosowanego długości fali lasera λ , od dziesiątek nanometrów do setek mikrometrów. Pomiary z wykorzystaniem dyfrakcji laserowej są powszechnie stosowane w wielu różnych gałęziach przemysłu, zarówno do rutynowych analiz i kontroli jakości w procesach farmacji, chemii, jak również do szeregu badań $B+R$, przykładowo takich jak charakteryzacja aerozoli oraz struktur klastrowych jako tarcz laserowych. W ogólnym rozumieniu, zjawisko dyfrakcji laserowej polega na uginaniu się światła laserowego na krawędziach obiektu, na który pada wiązka laserowa. Kąt ugięcia jest silnie zależny od długości fali światła, współczynnika załamania światła w badanym materiale oraz przede wszystkim wielkości cząstki rozpraszającej. Rodzaj rozpraszania jest ściśle powiązany z długością fali lasera względem wielkości badanej cząsteczki. Dla cząsteczek większych od długości fali światła lasera $d > \lambda$ możliwe jest zastosowanie teorii Mie (rozpraszanie Mie) w celu określenia ich średniej wielkości z uwagi na znane wzory rozpraszania kąтового zależne od parametrów cząsteczki rozpraszającej. Zależność ta jest silnie kierunkowa w stosunku do rozmiarów cząsteczek i rośnie wraz ze wzrostem wielkości cząsteczki rozpraszającej. Dla cząsteczek o średnicach mniejszych od długości fali lasera ($d < \lambda$), należy zastosować model analizy rozpraszania Rayleigha. W reżimie rozpraszania Rayleigha, sygnał rozproszony jest dużo słabszy i quasi-izotropowy we wszystkich kierunkach rozpraszania. Metoda pomiarów dyfrakcyjnych posiada swoje ograniczenia stosowania i wykrywalności. Dolną granicą jest intensywność sygnału rozproszonego od małych cząsteczek ($d \approx \lambda$) a zarazem możliwość ich detekcji w układzie pomiarowym, natomiast górną granicą jest wartość kąta rozpraszania α dla dużych cząsteczek. Duże cząsteczki rozpraszają światło w bardzo małym kącie w stosunku do osi wiązki lasera co może powodować fizyczne problemy podczas procedury pomiarowej. Zakładając, że struktury rozpraszające w obszarze występowania tarczy laserowej powinny mieścić się w przedziale sub-mikrometrowym oraz wykorzystane zostanie źródło laserowe emitujące promieniowanie w zakresie widzialnym,

dominujący rodzaj rozpraszania wytwarzanego na tarczy laserowej powinien znajdować się w reżimie rozpraszania typu *Mie*.

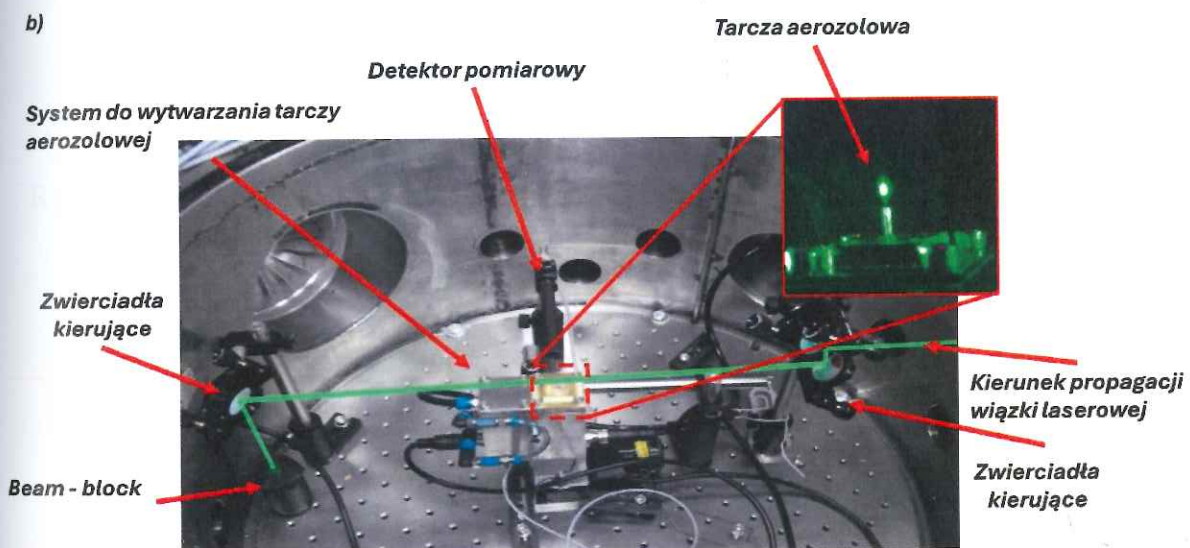
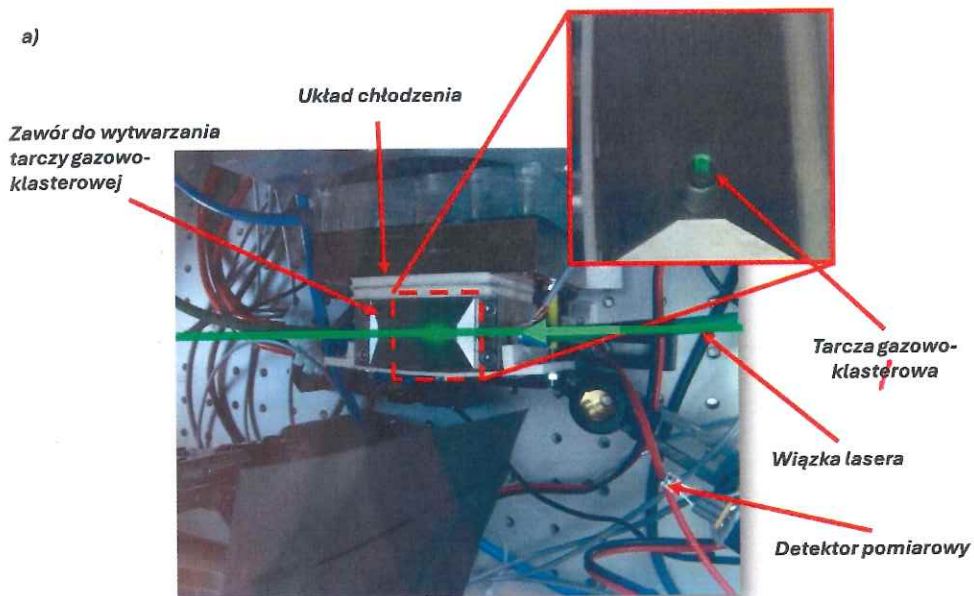
Na potrzeby charakteryzacji opracowanych systemów do wytwarzania chłodzonych tarcz gazowych oraz tarcz aerozolowych opracowałem stanowisko pomiarowe do badania charakterystyk dyfrakcyjnych opracowanych tarcz laserowych. Uproszczony schemat układu pomiarowego wykorzystanego w badaniach przedstawiłem na Rysunek 64. Układ pomiarowy składał się z cylindrycznej komory próżniowej, wewnątrz której umieszczony zostały system do wytwarzania badanej tarczy laserowej, układ kierowania wiązki laserowej, zestaw detektorów pomiarowych oraz absorpcyjny układ blokownia wiązki laserowej (*beam-block*^{dump}). Źródłem promieniowania laserowego, rozpraszanego na impulsowo wytwarzanej tarczy laserowej był laser nanosekundowy *Nd:YAG*, o czasie trwania impulsu ok $\tau=1.5$ ns i częstotliwości repetycji $f=10$ Hz. W celu poprawy wykrywalności struktur koloidalnych w pomiarach dyfrakcyjnych wykorzystałem dodatkowy moduł konwersji długości fali światła laserowego na postać II harmonicznej dla częstotliwości podstawowej, tj. $\lambda=532$ nm. Wartość energii impulsów laserowych wynosiła ok $E=60$ mJ i związana była z minimalnym poziomem konwersji częstotliwości ω lasera na wartość 2ω . Podczas pomiarów rozproszeniowych, komora została odpompowana do próżni na poziomie 10^{-2} mbar za pomocą dwustopniowej pompy *Rootsa* umożliwiającej pracę ciągłą z próżnią zanieczyszczoną środowiskiem aerozolowym.



Rysunek 64. Schemat układu pomiarowego do wyznaczenia charakterystyk rozproszeniowych chłodzonych tarcz gazowych oraz tarczy aerozolowej w próżni

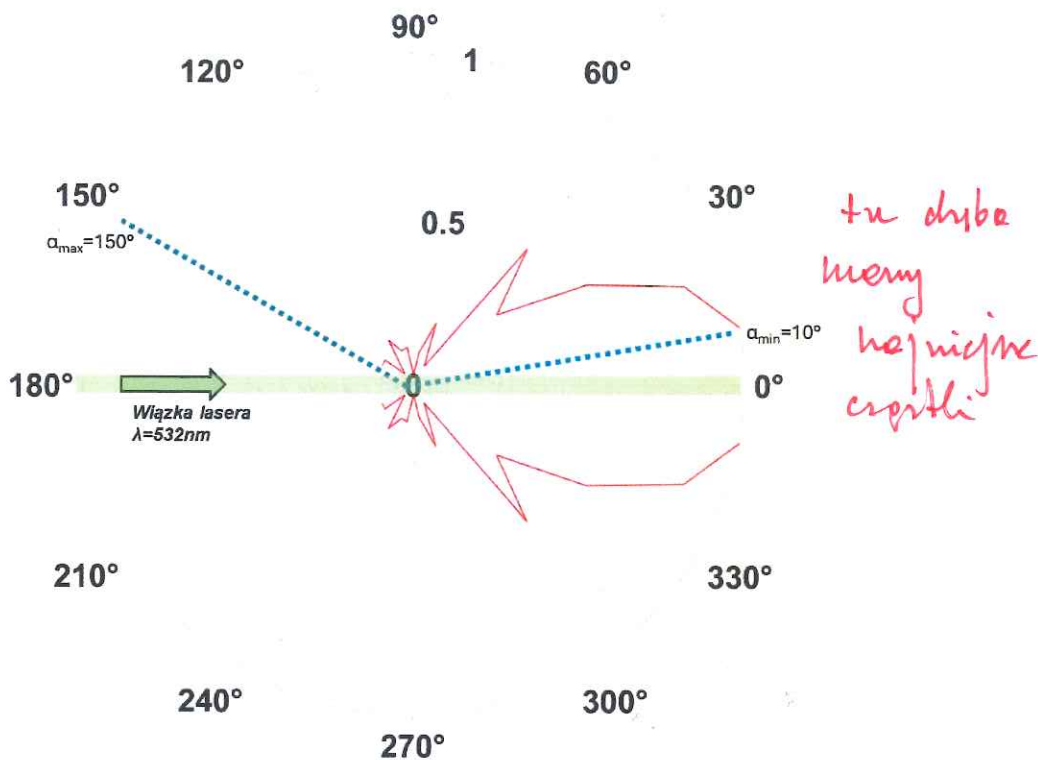
Podobnie jak w przypadku poprzednich pomiarów dotyczących radiografii impulsowej w zakresie *SXR*, proces wytwarzania badanej tarczy laserowej zsynchronizowany został z pracą systemu laserowego. Impuls synchronizujący generowany był przez kontroler systemu laserowego 1 ms przed docelowym impulsem laserowym. W tym czasie następowało formowanie się badanej tarczy laserowej względem impulsu lasera sondującego. Wiązka laserowa została wprowadzona do wnętrza komory próżniowej za pomocą okienka próżniowego o niskim współczynniku odbicia dla długości fali lasera. Pomiar charakterystyk rozproszeniowych został przeprowadzony za pomocą dwóch jednakowych detektorów w postaci fotodiod typu *PIN*, z których jedna była umieszczona na ruchomym ramieniu umożliwiając zdalną zmianę kąta detekcji α , natomiast drugi detektor umieszczony był na stałe w jednym miejscu w celu normalizacji fluktuacji sygnału pomiarowego. Zastosowane detektory charakteryzowały się selektywną czułością spektralną ograniczając możliwość rejestracji sygnału w zakresie podczerwonym ($\lambda=1064 \text{ nm}$) [164], który był dodatkowo częściowo odseparowany względem wiązki II harmonicznej. Podczas pomiarów dyfrakcyjnych wiązka laserowa została ograniczona przestrzennie do średnicy ok. $d=4 \text{ mm}$ oraz została ustawiona w taki sposób, aby umożliwiała prześwietlenie wytwarzanej tarczy laserowej na wysokości ok. 0.5 mm nad powierzchnią dyszy zaworu. Maksymalny zakres kątowy dla przeprowadzonych pomiarowych wynosił $\alpha_{\min}=8^\circ$ do $\alpha_{\max}=172^\circ$.

Pomiary dyfrakcyjne zostały przeprowadzone z wykorzystaniem użytych wcześniej gazów roboczych (*Xe*, *CO₂* oraz *SF₆*) oraz aerozolu na bazie helu i metanolu. Na podstawie pomiarów wstępnych, określiłem wartość ciśnienia gazów roboczych na poziomie $P=10 \text{ barów}$. Dla mniejszych wartości ciśnień, intensywność sygnału rozproszeniowego była zbyt niska do wyznaczenia stabilnych charakterystyk rozproszeniowych. Pomiary zostały powtórzone 3-krotnie celem eliminacji możliwych błędów pomiarowych oraz chwilowych niestabilności układów. Tarcza aerosolowa została zbadana dla aerozolu helowo-metanolowego, przy czym ciśnienie helu wynosiło ok. $P_{\text{He}}=2 \text{ bar}$. Aerosol wewnątrz zaworu był wytwarzany w trybie ciągłym. Z powodu fizycznego uszkodzenia przetwornika piezoelektrycznego o częstotliwości rezonansowej $f_r=1.7 \text{ MHz}$, do pomiarów dyfrakcyjnych wykorzystany został układ z przetwornikiem o częstotliwości $f_r=2.4 \text{ MHz}$. Zdjęcie badanych tarcz laserowych w promieniowaniu rozproszonym lasera, dla obu opracowanych systemów przedstawiłem na Rysunek 65. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów wyznaczone zostały charakterystyki rozproszeniowe unormowane do wartości sygnału maksymalnego z danego cyklu pomiarowego (Rysunek 66 – Rysunek 69) dla wszystkich badanych tarcz laserowych.

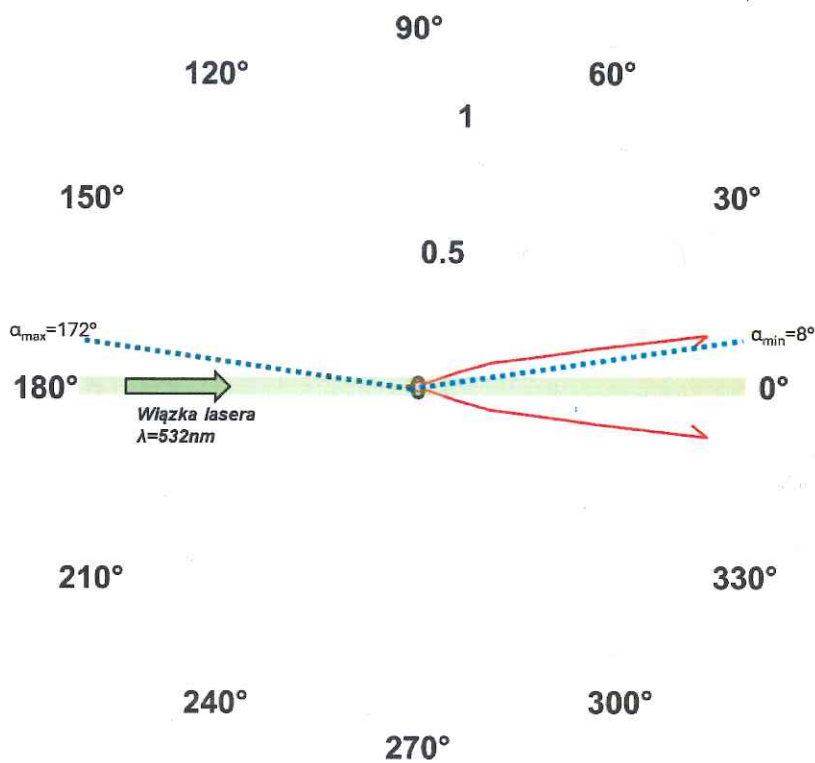


Rysunek 65. Zdjęcie układu pomiarowego oraz rozpraszonej wiązki laserowej na wytwarzanych tarczach gazowo-klastrowych (a) oraz aerozolowych (b)

Dla każdego pomiaru wyznaczona charakterystyka rozproszeniowa ma silnie ukierunkowany ~~kształt~~ ^{wzrost} rozpraszania światła, świadczący o dominacji rozpraszania na cząsteczkach większych od długości fali wiązki laserowej. Wyniki zostały porównane do serii symulacji rozpraszania typu *Mie* na cząsteczkach sferycznych. Symulacje rozpraszania typu *Mie* dla poszczególnych przypadków zostały przeprowadzone za pomocą ogólnodostępnego oprogramowania bazującego na oryginalnym algorytmie *BHMIE* [165, 166].



Rysunek 68. Zarejestrowane charakterystyki dyfrakcyjne dla chłodzonej tarczy gazowo-klastrowej na bazie sześćfluorku siarki o ciśnieniu $P_{SF_6} = 10 \text{ bar}$, $P_{He} = 6 \text{ bar}$

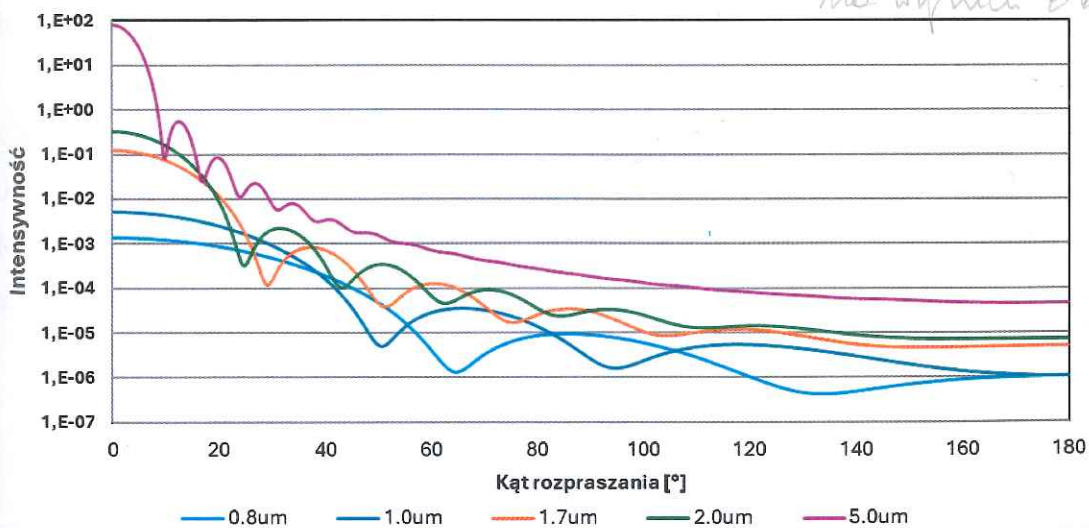


Rysunek 69. Zarejestrowane charakterystyki dyfrakcyjne dla tarczy aerozolowej na bazie aerozolu helowo-metanolowego o ciśnieniu $P_{He} = 2 \text{ bar}$

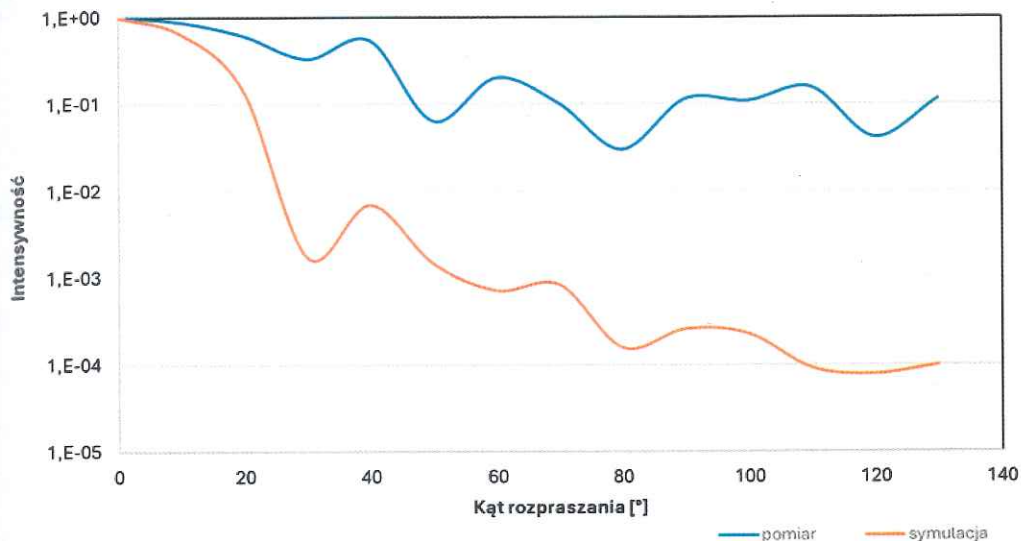
Dopasowanie otrzymanych charakterystyk rozproszeniowych do charakterystyk symulacyjnych możliwe było jedynie w pewnym zakresie średnicy cząstek. Wytwarzane tarcze mają charakter koloidalny, zbudowany z mieszaniny ~~zarówno~~ ~~klasterów~~ ~~jak~~ i cząsteczek aerozolu o różnych średnicach i kształtach, począwszy od rozmiarów nanometrowych aż po pewną liczbę cząsteczek o rozmiarach kilku mikrometrów. Świadczy o tym występowanie słabego sygnału dyfrakcyjnego w pełnym kącie pomiarowym dla rozpraszania na cząsteczkach mniejszych od długości fali oraz dominującej części związanej z rozproszeniem kierunkowym typu *Mie* dla cząsteczek dużych. Wykorzystane oprogramowanie umożliwia symulację rozpraszania *Mie* jedynie przy założeniu idealnych (kulistych) form rozpraszających a także ograniczonym rozkładzie cząsteczek rozpraszających. Klaster~~y~~ gazowe w swojej formie tworzą struktury o różnych kształtach geometrycznych, które zmieniają docelowy kąt rozpraszania w odniesieniu do wartości idealnych. Nieznane są również dokładne wartości współczynnika ~~rozpraszania~~ *zależności* dla danych struktur klaster~~ow~~owych wytworzonych na bazie wykorzystanych gazów. W ramach symulacji wykorzystane zostały wartości dla pierwiastków w postaci gazowej [167]. Wytwarzanie dużych klaster~~ow~~ów o różnych rozmiarach potwierdza również wydajne procesy ochłodzenia adiabatycznego gazów wytwarzających tarczę laserową. Przykładowe charakterystyki symulacyjne dla rozpraszania na klaster~~ach~~ wytworzonych z sześćciufluorku siarki (Rysunek 70) oraz dopasowanie wyników eksperymentalnych do symulacji rozproszenia wiązki światła o długości fali $\lambda=532$ nm przedstawiłem na Rysunek 71.

chyba powinno być odwrócić

można było to nawet na wypili eksperymentalnie



Rysunek 70. Wyniki symulacji dla rozpraszania na cząstkach gazu SF₆ (n=1.00072905) na cząsteczkach o różnej średnicy (rozpraszanie typu Mie)



co było parametrem dopasowania

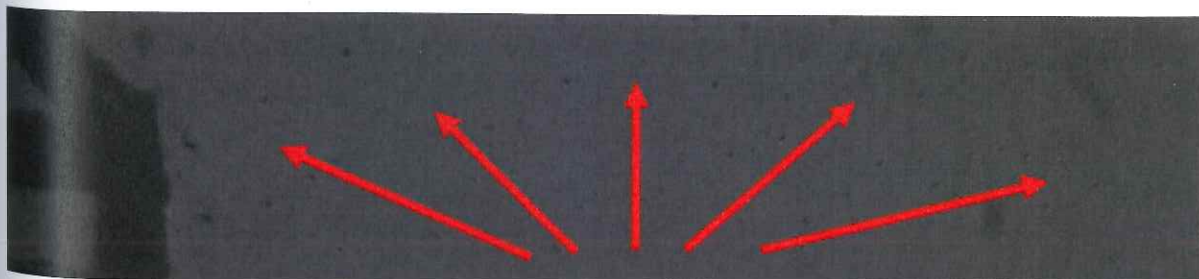
Rysunek 71. Dopasowanie wyników eksperymentalnych dla rozpraszania na tarczy klasterowej wytworzonej na bazie SF_6 z wynikami symulacji dla cząsteczek o średnicy $d=1.7 \mu m$

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów dyfrakcyjnych możliwe jest oszacowanie wytwarzanych struktur gazowo-klastrowych w zakresie setek nanometrów aż do pojedynczych mikrometrów. *rozkładu światła rozpraszającego* Widoczna jest zmiana kształtu rozpraszania dla poszczególnych pomiarów, która świadczy o niewielkich zmianach dominujących średnic klastrowych wytwarzanych w tarczy gazowo-klastrowej. Dla tarczy wytworzonej na bazie SF_6 oszacowana dominująca średnica klastrowych wynosi ok $d=1.7 \mu m$. Dla tarcz powstałych na bazie Xe oraz CO_2 , przeważają klastery o średnicy większej niż $d=1.5 \mu m$. Tarcza aerozolowa zawierała kropelki o typowej średnicy na poziomie $d=2 \mu m$ zgodnie z założeniami teoretycznymi wynikającymi z częstotliwości zastosowanego przetwornika piezoelektrycznego. Typowy rozkład dla średnicy kropelek aerozolu ma charakter rozkładu normalnego w związku z czym, tarcza aerozolowa posiada w swojej strukturze kropelki o średnicy w zakresu $d=1-3 \mu m$.

4.3. Mikroskopia optyczna

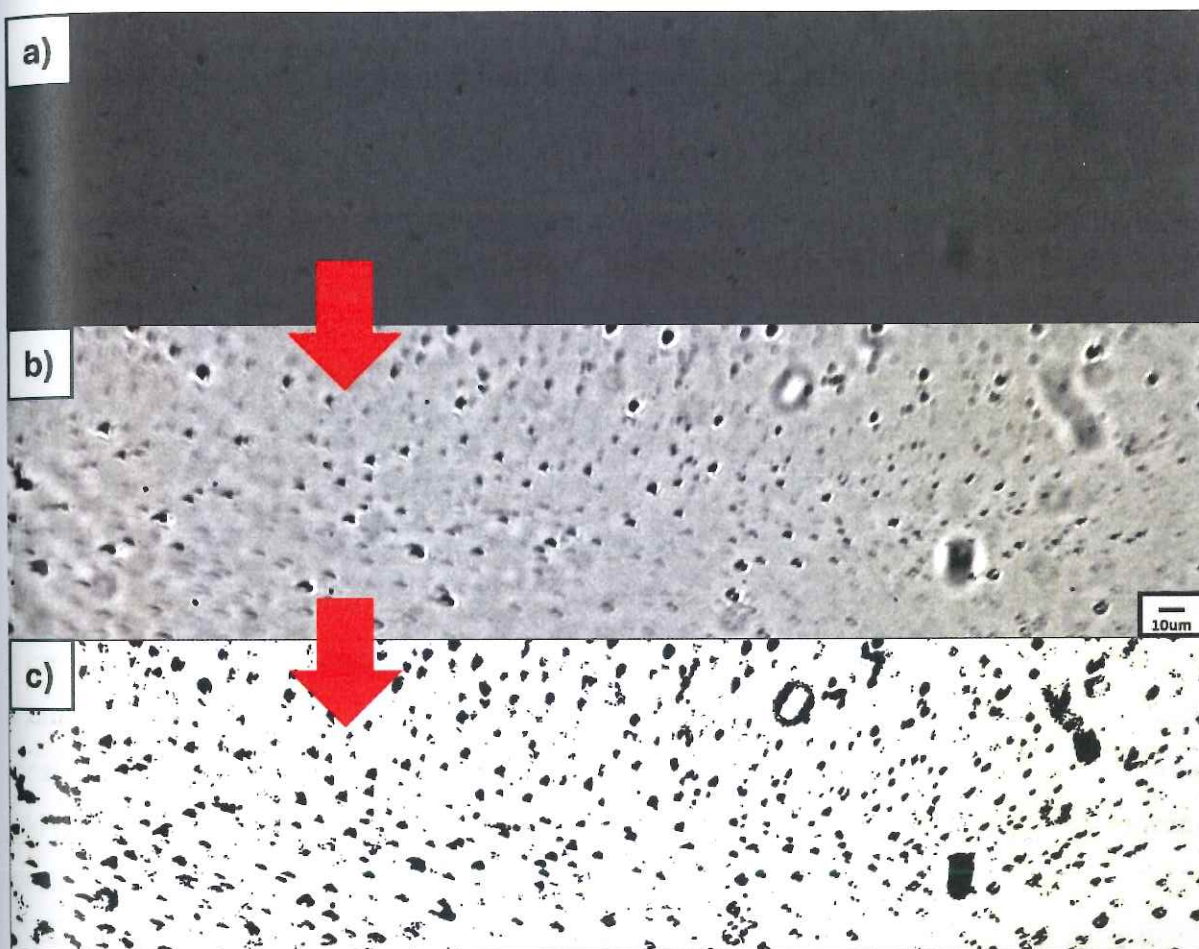
Na podstawie wyników badań dotyczących charakteryzacji dyfrakcyjnej wytwarzanych tarcz laserowych, potwierdzone zostało założenie, że oba opracowane przeze mnie systemy umożliwiają wytwarzanie tarcz zawierających struktury o rozmiarach mikrometrowych i mniejszych. W przypadku tarcz aerozolowych wniosek ten jest jednoznacznym potwierdzeniem stawianych założeń dotyczących konstrukcji i zasady działania urządzenia. Istniejące do tej pory systemy oraz metody wytwarzania tarcz zawierających klaster^a gazowe umożliwiają wytwarzanie klasterów o średnicach co najwyżej setek nanometrów a możliwości wytwarzania struktur mikrometrowych były silnie ograniczone głównie metody wytwarzania tarcz czysto kropelkowych. Klaster^o o rozmiarach większych, tj. sub-mikrometrowych oraz mikrometrowych są czymś zupełnie nowym w kontekście tarcz gazowo-klaster^oowych, a pomiary charakterystyk rozproszeniowych są potwierdzeniem wytwarzania struktur mieszanych o rozmiarach sub-mikronowych oraz większych. Niemożliwe jest jednoznaczne stwierdzenie, czy owe struktury są gigantycznymi klasterami czy już jest to materia ^{typu} masowa, która została wytworzona na bazie agregacji małych struktur klaster^oowych. Jednak sygnał rozproszeniowy jest jednoznacznym dowodem, że mamy styczność z tarczą koloidalną wytworzoną na bazie ^{do krytyczności} jednego rodzaju pierwiastka normalnie występującego w postaci gazowej. Zebrane charakterystyki rozproszeniowe świadczą zarówno o występowaniu rozproszenia na strukturach mniejszych od długości fali (rozproszenie Rayleigha) jak i znacznie większych (rozproszenie Mie). Obrazowanie tak małych obiektów, które przemieszczają się z prędkością naddźwiękową jest praktycznie niemożliwe z uwagi na niewielkie prawdopodobieństwo uchwycenia przemieszczających się mikrometrowych cząsteczek z odpowiednią ostrością. Próby zobrazowania takiej struktury metodą stroboskopową z wykorzystaniem impulsów lasera nanosekundowego o długości fali $\lambda = 532 \text{ nm}$ nie przyniosły oczekiwanych rezultatów z uwagi na bardzo słaby sygnał, a dalsze zwiększanie energii impulsów laserowych mogłoby doprowadzić do szybkiego uszkodzenia aparatury pomiarowej. Brak innych gotowych możliwości pomiarowych wymusił opracowanie przeze mnie nowego sposobu pomiarowego, w którym wytwarzane cząsteczki zostaną „zatrzymane” na pewien czas na powierzchni specjalnie przygotowanego ekranu, który umożliwi zobrazowanie ich za pomocą układu optycznego. Powyższa metoda wymagała opracowania odpowiedniego układu do mikroskopii optycznej w warunkach próżniowych oraz specjalnego uchwytu

~~Zgodnie z systematyką do poprzednich pomiarów~~ ^{Tele jak} badania dotyczące obrazowania optycznego ^o ^y klasterów przeprowadziłem dla tarcz wytwarzanych na bazie Xe, CO₂ oraz SF₆. Z powodu ograniczonych zasobów ksenonu podczas charakteryzacji chłodzonych tarcz gazowych, pomiary dotyczące obrazowania mikroskopowego zostały przeprowadzone jedynie dla tarcz o ciśnieniu gazu roboczego wynoszącym $P=10$ bar. **Pomiary tarcz laserowych bez aktywnego systemu chłodzenia nie wykazały występowania jakichkolwiek struktur możliwych do zobrazowania metodą mikroskopową.** W przypadku pracy urządzenia z aktywnym układem chłodzenia ~~a także~~ ^z osiągnięciem temperatury zaworu na poziomie $T=-30^{\circ}\text{C}$, obrazowanie tarczy laserowej ukazało impulsowe pojawianie się wielu struktur o rozmiarach mikrometrowych, których czas życia na powierzchni ekranu wynosił w zależności od rozmiaru od ok. 3 do ok. 10 sekund dla największych struktur aglomeracyjnych. Największe z nich miały średnicę ok. $d=10$ μm i składały się z wielu mniejszych płatków. Obrazy zarejestrowane dla poszczególnych tarcz gazowo-klasterowych przedstawiają zbliżone struktury o średnicach w zakresie $d=1-5$ μm . Wszystkie rejestrowane struktury miały postać bardzo cienkich płatków o zróżnicowanym kształcie, od postaci owalnej aż po struktury trójkątne. Z uwagi na niską głębię ostrości układu optycznego oraz obrazowanie pod kątem 45° , obszar pomiarowy umożliwiający wyraźne zobrazowanie struktur klasterowych o akceptowalnym poziomie ostrości wynosił jedynie 150 μm przy obszarze wytwarzania tarczy na poziomie ok. 800 μm . Kierunki wyrzutu wytwarzanych mikrostruktur klasterowych są bardzo silnie widoczne na poszczególnych obrazach mikroskopowych, z których ^o ^y ^{klasterów} możliwe jest wyznaczenie środka dyszy (Rysunek 76). Największe zagęszczenie wytwarzanych zarejestrowanych obrazów znajdowało się w centralnej części dyszy oraz zarejestrowanych obrazów. Pojawiające się miejscowo agregaty o rozmiarach ok. 10 μm i większych, widoczne były przeważnie w prawej bocznej części ekranu. Może to świadczyć o kondensacji większych struktur wytworzonych wewnątrz dyszy gazowej po przekroczeniu pewnej granicznej masy całej struktury.



Rysunek 76. Kierunki wytwarzania się struktur klasterowych na powierzchni ekranu. Kształt rozrzutu powyższych struktur jest silnie symetryczny względem środka dyszy zaworu

Analizę zarejestrowanych obrazów dla poszczególnych tarcz przeprowadziłem za pomocą ogólnodostępnego oprogramowania *ImageJ*, które jest dedykowane do analizy obrazów mikroskopowych. Procedura obróbki zarejestrowanych danych pomiarowych polegała na selekcji poszczególnych obrazów (Rysunek 77 a)), procesie filtracji (Rysunek 77 b)) oraz wyselekcjonowania poszczególnych struktur klastrowych z zarejestrowanych obrazów (Rysunek 77 c)).

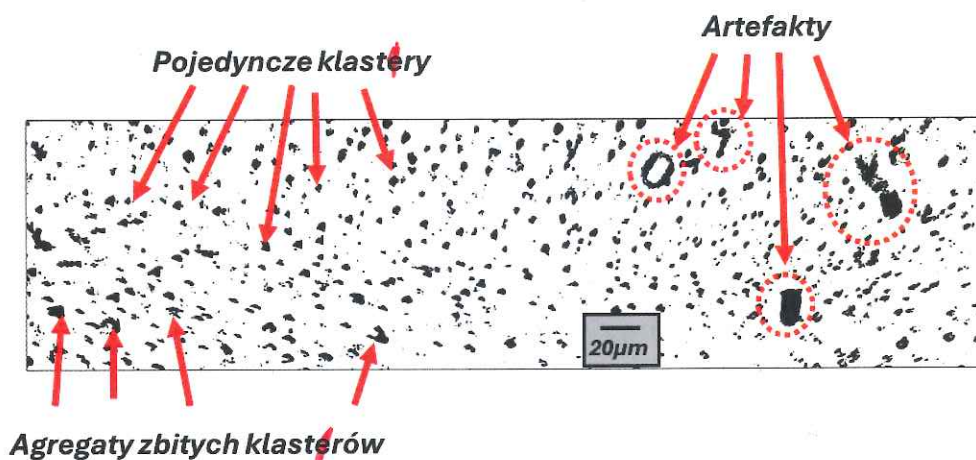


Rysunek 77. Obraz zatrzymanych struktur klastrowych na powierzchni ekranu (a), wyniki wstępnej analizy obrazów na podstawie redukcji szumów i filtracji (b) oraz jako wyodrębnienie samych struktur klastrowych z zarejestrowanych obrazów (c)

Tarcza gazowo klastrowa wytworzona na bazie ksenonu charakteryzowała się najmniejszą liczbą zobrazowanych struktur, a ich typowa średnica wynosiła ok. $1.5-2.5 \mu\text{m}$. W przypadku tarczy wytworzonej na bazie SF_6 , typowa średnica struktur wynosiła ok. $2.5 \mu\text{m}$. Liczba wytwarzanych klastrow, które udało się zarejestrować była ok. 1.5x większa niż dla tarczy na bazie Xe . Najwięcej pojawiających się mikrostruktur zarejestrowałem dla tarczy wytworzonej na bazie CO_2 . Liczebność struktur klastrowych była ok. 5x większa niż w przypadku tarczy Xe .

e to dziwne

Podobnie jak w obu poprzednich przypadkach, typowa średnica struktur klastrowych tarczy CO_2 została przez mnie oszacowana na ok $2 \mu m$. Typowy wynik analizy zarejestrowanych obrazów przedstawiłem na Rysunek 78.



Rysunek 78. Wyodrębnione struktury klastrowe wyodrębnione z obrazów pomiarowych układu mikroskopowego. Widoczne są zarówno małe klaster o rozmiarach $sub-\mu m$ także duże agregaty klastrowe złożone z wielu mniejszych klasterów.

Należy tutaj zaznaczyć, że zobrazowane struktury klastrowe stanowią jedynie część struktur klastrowych wytwarzanych w obszarze tarczy laserowej. Z całą pewnością tarcze składają się z czystego gazu oraz znacznej ilości mniejszych klasterów o wymiarach setek nanometrów, a zarejestrowane struktury mikrometrowe stanowią jedynie część obiektów o wymiarach możliwych do zobrazowania metodą mikroskopową. Niemożliwe jest również oszacowanie jaki procent całkowitej liczby struktur klastrowych stanowią zobrazowane struktury widoczne na zarejestrowanych zdjęciach.

Wyniki charakteryzacji wytwarzanych tarcz laserowych za pomocą opracowanych systemów, potwierdzają zasadność wszystkich trzech tez pracy, określonych w drugim rozdziale pracy doktorskiej. Zastosowane rozwiązanie bazujące na dwustrumieniowej dyszy gazowej oraz układzie wstępnego schładzania korpusu zaworu ^{z pewnością} umożliwia występowanie odpowiednich warunków do wytrącania się klasterów gazowych o znacznych rozmiarach. Duże znaczenie ma zapewnienie wstępnej równowagi termodynamicznej gazu znajdującego się we wnętrzu schłodzonego zaworu. Proces formowania się tarczy gazowej (klastrowej) jest także silnie zależny od występowania atmosfery ochronnej gazu buforowego, który nie bierze bezpośrednio udziału w ^{tworzeniu} wytwarzaniu się plazmy laserowej z uwagi na wysoki potencjał jonizacji. Impulsowe otwieranie i zamykanie się zaworu gazowego powoduje również

wytwarzanie się silnych fal uderzeniowych w gazie, które inicjują jego gwałtowną przemianę termodynamiczną. Ochłodzenie adiabatyczne wstępnie schłodzonego gazu oraz uniemożliwienie swobodnego rozplywu gazu roboczego do próżni stanowią podstawę działania urządzenia oraz nowej metody wytwarzania tarcz gazowo-klastrowych. Nowe tarcze laserowe charakteryzują się wysoką gęstością na poziomie $n_{at}=10^{19} \frac{at}{cm^3}$ oraz strukturami klastrowymi o rozmiarach sub-mikrometrowych. W przypadku tarcz aerozolowych możliwe jest wytwarzanie środowiska aerozolowego na bazie różnych roztworów przy niskich ciśnieniach zastosowanych gazów bezpośrednio w ognisku laserowym. Typowa gęstość wytwarzanej tarczy aerozolowej mieści się w zakresie $n_{at}=10^{19} \frac{at}{cm^3}$ i jest wysoce stabilna na dużej odległości ^{od} dyszy zaworu. Impulsowy charakter wypływu aerozolu jest ściśle zależny od paramentów ciśnienia gazu rozpraszającego a także rozmiarów kropelek cieczy, które określają warunki wypływu hydrodynamicznego gotowego roztworu aerozolowego.

5. Zastosowanie opracowanych urządzeń do wytwarzania plazmy laserowej

Przeprowadzone dotychczas badania opracowanych przeze mnie systemów do wytwarzania tarcz laserowych polegały na charakteryzacji wytwarzanych tarcz za pomocą wybranych metod, oszacowaniu optymalnych zakresów ciśnień pracy oraz sprawdzenia poprawności wytwarzania struktur gazowo-klastrowych oraz aerozolowych w warunkach próżniowych. Ostatecznym potwierdzeniem przydatności obu urządzeń jako nowych systemów do wytwarzania tarcz laserowych jest realizacja eksperymentów dotyczących ich praktycznego zastosowania, przykładowo jako nowych źródeł laserowo-plazmowych emitujących promieniowanie w zakresie SXR.

W ramach ~~poniższego~~ ^{tego} rozdziału zaprezentowałem wyniki ~~wstępnych~~ ^{pilotażowych} badań podstawowych dotyczących wytwarzania plazmy laserowej na bazie nowo opracowanych systemów tarcz laserowych. Badania zostały podzielone na dwa niezależne ~~od siebie~~ eksperymenty, w ramach których zaprezentowane zostały dwa różne źródła laserowo-plazmowe emitujące promieniowanie w zakresie SXR/EUV. Szczegółowe omówienie wyników oraz zaawansowana analiza opracowanych źródeł została opublikowana w ramach kilku publikacji naukowych [100, 101, 136].

Pierwszy z ~~przedstawionych~~ ^{przeprowadzonych} eksperymentów dotyczył oddziaływania ultrakrótkich impulsów laserowych z tarczą typu gazowo-klastrowego, w ramach którego zbadany został wpływ klastrow ~~gazowych~~ na parametry plazmy laserowej oraz emitowanego przez nią promieniowania. Przeprowadzone zostały badania porównawcze dla układu bez systemu chłodzenia oraz z aktywnym chłodzeniem zaworu elektromagnetycznego.

W ramach drugiego eksperymentu zbadana została możliwość wpływania na widmo emitowane z ~~plamy~~ ^{plazmy} laserowej powstałej w wyniku oddziaływania tarczy typu aerozolowego z impulsami lasera nanosekundowego. Tarcza typu aerozolowego do celów poniższego eksperymentu została wytworzona na bazie CH_3OH oraz roztworu $CH_3OH+NaBr$. Wpływ składu chemicznego pierwiastków tworzących aerozol został zobrazowany na widmie emitowanym z wytworzonej plazmy laserowej w zakresie SXR.

5.1. Oddziaływanie tarczy klastrowej z ultrakrótkimi impulsami laserowymi

Oddziaływanie impulsów laserowych z tarczami zawierającymi klastery gazowe jest intensywnie podejmowanym tematem badań związanym z budową wydajnych źródeł emisji promieniowania w zakresie rentgenowskim na potrzeby badań biologicznych, materiałowych, litograficznych oraz przyspieszania cząstek w ultrasilnym polu elektromagnetycznym, przy jednoczesnym zmniejszeniu wad i ograniczeń dotychczasowych systemów tarcz gazowych. Opracowany przeze mnie system do wytwarzania tarcz zawierających submikrometrowe klastery gazowe jest zupełnie nowym rozwiązaniem powstałym na bazie podwójnej tarczy gazowej oraz dodatkowego układu chłodzenia termoelektrycznego. Eksperymenty dotyczące oddziaływania ultrakrótkich impulsów laserowych z tarczami dwugazowymi nie były jak dotąd realizowane, w związku z czym nie istnieją bezpośrednie odniesienia literaturowe do otrzymanych wyników. Równocześnie istnieje ograniczona liczba badań dotyczących oddziaływania ultrakrótkich impulsów laserowych z klastery gazowymi o rozmiarze poniżej 100 nm , a klastery o średniej liczbie atomów w zakresie od 10^4 do 10^6 uznawane są za bardzo duże. Ponieważ rozmiar klastera gazowego może znacząco zmieniać warunki interakcji, gigantyczne klastery generowane wytwarzane za pomocą opracowanego przeze mnie systemu nadają tarczy charakter unikalnego medium. Liczba atomów w pojedynczym klastrze została oszacowana na podstawie porównania wymiarów geometrycznych klastera z pomiarów dotyczących charakterystyki tarczy oraz rozmiarów pojedynczego atomu. W przypadku ksenonu jest to wyjątkowo duża liczba, sięgająca nawet 10^{10} - 10^{11} atomów/cząsteczek dla klastarów o rozmiarach powyżej $1 \mu\text{m}$. Głównym powodem małej ilości przeprowadzonych dotąd badań nad dużymi klastery są trudności oraz ograniczone metody ich formowania. Duże struktury gazowo-klastrowe oddziałują z promieniowaniem w bardzo złożony sposób, a dalsze procesy po wystąpieniu zjawiska jonizacji zależą w dużej mierze od relacji między rozmiarem klastra a czasem trwania impulsu laserowego.

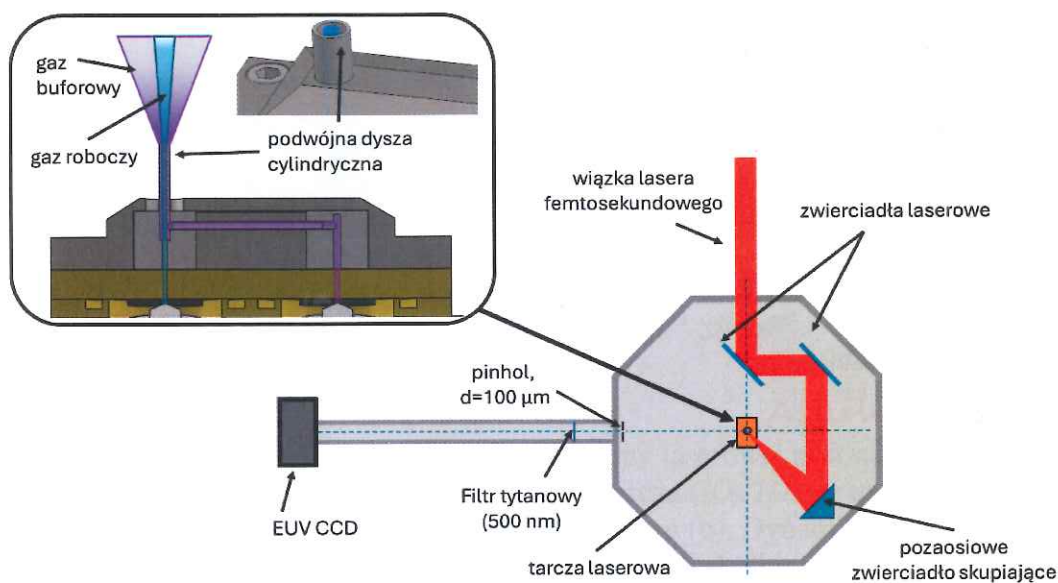
W ramach współpracy badawczej pomiędzy Wojskową Akademią Techniczną w Warszawie a Uniwersytetem Friedricha Schillera w Jenie w Niemczech, możliwe było przeprowadzenie badań podstawowych z wykorzystaniem nowych tarcz gazowo-klastrowych oraz ultrakrótkich impulsów laserowych generowanych za pomocą systemu laserowego JETI 40. Głównym celem przeprowadzonego eksperymentu było oszacowanie parametrów plazmy laserowej powstałej

w wyniku jonizacji tarczy zawierającej duże struktury klasterowe. Wytworzona plazma laserowa została zobrazona w zakresie miękkiego promieniowania rentgenowskiego oraz przeprowadzone zostały pomiary emitowanego widma w zakresie SXR. Eksperymenty zostały przeprowadzone dla dwóch trybów pracy opracowanego systemu, tj. z aktywnym oraz wyłączonym systemem chłodzenia zaworu gazowego. Różnica temperatury zaworu gazowego pomiędzy poszczególnymi trybami wynosiła ok. 50°C .

W eksperymencie wykorzystany został tytanowo szafirowy (*Ti:Sapphire*) laser femtosekundowy typu CPA, zlokalizowany w Instytucie Optyki i Elektroniki Kwantowej Uniwersytetu Friedricha Schillera w Jenie. Laser emitował promieniowanie w bliskiej podczerwieni o długości ~~szczytowej~~ ^{fali} $\lambda = 795 \text{ nm}$ i maksymalnej mocy szczytowej 40 TW. Podczas trwania eksperymentu, energia lasera wynosiła ok. $E = 1200 \text{ mJ}$ przed układem kompresora, oraz ok. $E = 700 \text{ mJ}$ w reżimie pracy ultrakrótkich impulsów. Typowy czas trwania impulsów laserowych wynosił ok. $\tau = 40 \text{ fs}$. Promieniowanie laserowe było prowadzone w warunkach próżniowych do komory eksperymentalnej, wewnątrz której umieszczony został opracowany system do wytwarzania tarcz gazowych oraz klasterowych. Impulsy laserowe zostały zogniskowane na wysokości ok. $0.5 - 0.8 \text{ mm}$ nad dyszą zaworu za pomocą pozaosiowego zwierciadła skupiającego ^{parabolicznego} (OAP, ang. *off-axis parabola*) o ogniskowej $f = 76.2 \text{ mm}$. Rozmiary ogniska laserowego wynosiły $5 \mu\text{m} \times 8 \mu\text{m}$ na poziomie FWHM. Zakładając, że 40% całkowitej energii znajdowało się w ognisku laserowym, uzasadnione jest przyjęcie maksymalnej intensywności promieniowania laserowego w ognisku na poziomie 10^{19} W/cm^2 . Kontrast impulsu laserowego zdefiniowany jako $C(t) = \frac{I_{bg}(t)}{I_{max}}$ wynosił $C(t) \leq 10^{-8}$ ze względu na poziom promieniowania tła pochodzącego ze wzmocnionej emisji spontanicznej (ASE) oraz był lokalnie pogarszany przez impuls poprzedzający (pre-puls) występujący $\approx 30 \text{ ps}$ przed głównym impulsem femtosekundowym (Rysunek 79). Tarcza laserowa była wytwarzana w sposób impulsowy z częstotliwością 10 Hz , uwarunkowaną trybem pracy systemu laserowego. Optymalny czas opóźnienia wytwarzania tarczy laserowej względem impulsu synchronizującego został określony eksperymentalnie na ok. $300 \mu\text{s}$, natomiast czas wytwarzania tarczy laserowej wynosił $900 \mu\text{s}$. Pomiary eksperymentalne zostały przeprowadzone w dedykowanej komorze badawczej do której dołączony został zewnętrzny układ spektrometru na zakres SXR, składający się z transmisyjnej siatki dyfrakcyjnej (5000 l/mm), szczeliny o szerokości $50 \mu\text{m}$ oraz kamery CCD na zakres promieniowania rentgenowskiego firmy Andor, model iKon-M. Zakres pomiarowy wykorzystanego

widmowe zostały zarejestrowane w formie uśrednionych 16-bitowych obrazów dla 50 impulsów promieniowania laserowego. Każdy pomiar został trzykrotnie powtórzony w tych samych warunkach w celu eliminacji ewentualnych błędów. Przy zmianie temperatury pracy zaworu, **każdorazowo określano optymalne położenie ogniska względem wytwarzanej tarczy gazowej, celem maksymalizacji emisji w zakresie SXR.** Proces ten był głównie spowodowany zmianą parametrów tarczy laserowej, gdzie strumień He można traktować jako dyszę o zmiennej geometrii. Z uwagi na konstrukcję komory próżniowej, wszystkie pomiary zostały wykonane pod kątem 45° względem kierunku propagacji promieniowania laserowego. W przypadku tarczy wytworzonej na bazie CO_2 , widoczna była emisja w zakresie tzw. okna wodnego w przedziale ok. 2 do ok 5 nm w postaci kontinuum formowanego z nakładających się linii widmowych (Rysunek 81). Intensywność emitowanych linii widmowych wzrastała ze wzrostem ciśnienia gazu roboczego. Optymalne warunki zostały oszacowane na $P_{CO_2}=10$ bar oraz $P_{He}=6$ bar. Wpływ układu chłodzenia a zarazem możliwości wytwarzania się klastrow gazowych objawił się w postaci wzrostu intensywności promieniowania dla tych samych warunków wytwarzania tarczy laserowej o współczynnik ok 2x. Liczba fotonów emitowanych w zakresie okna wodnego dla tarczy chłodzonej (klastrowej) została oszacowana na ok 5.7×10^{10} fotonów/sr oraz ok 2.8×10^{10} fotonów/sr dla układu bez aktywnego systemu chłodzenia. Sprawność konwersji wynosiła ok 1.25×10^{-5} . Plazma laserowa powstała na bazie ksenonu emitowała w bardziej szerokim zakresie, od ok 1.5 nm do ok 11 nm a kształt emitowanego widma miał charakter ciągły (Rysunek 82). Ograniczając się do wspomnianego zakresu okna wodnego (obszar koloru szarego na Rysunek 82), ksenonowa tarcza klastrowa emitowała ok 1.9×10^{13} fotonów/sr natomiast dla układu bez aktywnego chłodzenia liczba fotonów w zakresie 2-5 nm wynosiła ok 1.8×10^{12} fotonów/sr. Wydajność konwersji energii lasera na izotropową emisję w zakresie miękkiego promieniowania rentgenowskiego wynosiła ok 2×10^{-3} . Największa wydajność emisji z plazmy ksenonowej została zaobserwowana dla warunków ciśnienia $P_{Xe}=4$ bar / $P_{He}=3$ bar oraz aktywnego systemu chłodzenia zaworu gazowego ($T=-30^\circ C$). Intensywność emisji w zakresie SXR w porównaniu do układu bez aktywnego chłodzenia wzrosła ok 10 krotnie i przewyższała intensywność emisji w tym samym zakresie dla wyższych ciśnień gazu roboczego. Występowanie klastrow gazowych spowodowało także przesunięcie się widma emisji w stronę fal krótszych zgodnie z przesunięciem występującym w przypadku oddziaływań z tarczami stałymi o wysokiej gęstości.

Obrazowanie plazmy laserowej wytworzonej na bazie tarczy gazowej oraz gazowo-klastrowej zostało wykonane za pomocą układu kamery otworekowej w zakresie SXR. Układ pomiarowy miał zbliżony charakter do układu dotyczącego pomiarów widmowych. Składał się z kalibrowanej diafragmy otworekowej o średnicy $d=100\ \mu\text{m}$, filtra tytanowego o grubości $500\ \text{nm}$ oraz wspomnianej wcześniej kamery na zakres SRX/EUV (Rysunek 83). Powiększenie optyczne w układzie pomiarowym wynosiło $M=3,78x$ i wynikało z odległości źródło-otworek i otworek-kamera, równych odpowiednio $185\ \text{mm}$ i $700\ \text{mm}$.



Rysunek 83. Schemat układu pomiarowego dla pomiarów dotyczących obrazowania plazmy laserowej w zakresie SXR.

Obrazowanie plazmy laserowej zostało przeprowadzone dla optymalnych wartości ciśnień gazów określonych na podstawie pomiarów widmowych. Poszczególne obrazy plazmy laserowej zostały zintegrowane w czasie ^{na podstawie} rejestracji 20 oraz 50 impulsów w ramach jednego pomiaru. Różnica ta wynikała z bardzo dużej dynamiki jasności plazmy pomiędzy plazmą wytworzoną bez aktywnego układu chłodzenia a plazmą wytworzoną z aktywnym układem chłodzenia. W przypadku gdy oba pomiary zostały wykonane dla 20 impulsów, końcowa dynamika obrazów była zbyt niska i uniemożliwiała przedstawienie obrazów plazmy w tej samej skali. Natomiast pomiary zrealizowane dla 50 impulsów laserowych powodowały przesylenie się obszaru detektora kamery oraz „rozlanie się” ładunku na sąsiadujące piksele matrycy CCD. Powyższa różnica pomiarowa ^{w warunkach} została skorygowana na poziomie analizy

Kształt plazmy laserowej w zakresie SXR jest asymetryczny, co wynika z nakładania się rozkładu gęstości mocy promieniowania laserowego i rozkładu gęstości tarczy. Rozmiar plazmy laserowej wytworzonej na bazie chłodzonej tarczy z dwutlenku węgla wynosił ok. $217 \pm 2 \mu\text{m}$ w kierunku osiowym oraz $185 \pm 1 \mu\text{m}$ w kierunku radialnym. Adekwatnie dla układu bez aktywnego systemu chłodzenia wymiary plazmy wynosiły $228 \pm 2 \mu\text{m}$ na $213 \pm 1 \mu\text{m}$. Oszacowana energia w zakresie SXR wyselekcjonowanym za pomocą filtra Ti (500 nm) została określona na poziomie $2.8 \times 10^{-7} \text{ J/sr}$ dla układu z aktywnym chłodzeniem oraz $1.0 \times 10^{-7} \text{ J/sr}$ dla układu bez chłodzenia. W przypadku plazmy laserowej wytworzonej na bazie chłodzonej tarczy ksenonowej, jej rozmiar został określony na $481 \pm 3 \mu\text{m}$ w kierunku osiowym oraz $262 \pm 1 \mu\text{m}$ w kierunku ~~promieniowym~~ ^{radialnym}. Dla plazmy wytworzonej bez aktywnego układu chłodzenia, wymiary wynosiły odpowiednio $578 \pm 4 \mu\text{m}$ na $262 \pm 1 \mu\text{m}$. Energia została oszacowana na poziomie ok $6 \times 10^{-6} \text{ J/sr}$ (z chłodzeniem) oraz $1.1 \times 10^{-6} \text{ J/sr}$ (bez chłodzenia) w pojedynczym impulsie laserowym.

W obu przypadkach zaobserwowany został wzrost energetyczny dla plazmy powstałej na bazie tarczy chłodzonej zawierającej klastery gazowe, który wynosił odpowiednio ok $2.7x$ dla CO_2 oraz ok $7x$ dla Xe. Przy wzroście energetycznym obserwowane jest również zmniejszenie wymiarów źródła. Oszacowanie energii może być obciążone pewnym błędem pomiarowym wynikającym z zastosowanego filtra tytanowego, który silnie wycinał zakres emisji plazmy ksenonowej. Obrazowanie plazmy laserowej zostało także obciążone błędem wynikającym z rozmiarów zastosowanego otworka. W eksperymencie wykorzystany został otworek o średnicy $100 \mu\text{m}$, podczas gdy optymalna wartość jego średnicy dla wytworzonej plazmy wynosiła ok. $35 \mu\text{m}$. Zbyt duża średnica otworka przyczyniła się do zauważalnej niepewności (przeszacowania) rozmiaru ~~zarejestrowanego obrazu~~ źródła (σ_{im}) i wymagała zastosowania poprawek podczas wyliczania błędów pomiarowych. Obliczone błędy spowodowane były efektami rozmycia i dyfrakcji. Dominujący wpływ miały jednak błędy rozmycia obrazu źródła i zostały uwzględnione w skorygowanym rozmiarze źródła opartym na optyce geometrycznej.

Wyniki przeprowadzonego eksperymentu dowodzą, że tarcza zawierająca w swojej strukturze mieszaninę gazu oraz sub-mikrometrowych klastrów pozwala przezwyciężyć wiele wad stosowania tarczy gazowej. Potwierdzone zostało, że oddziaływanie tarczy gazowo-klastrowej z ultrakrótkimi impulsami laserowymi oferuje bardzo wydajne mechanizmy poszerzania widma prowadzące do bardzo szerokiego i stosunkowo gładkiego widma. Takie

• zwrócić uwagę na intensywność mas zebrać widmowa SXR.

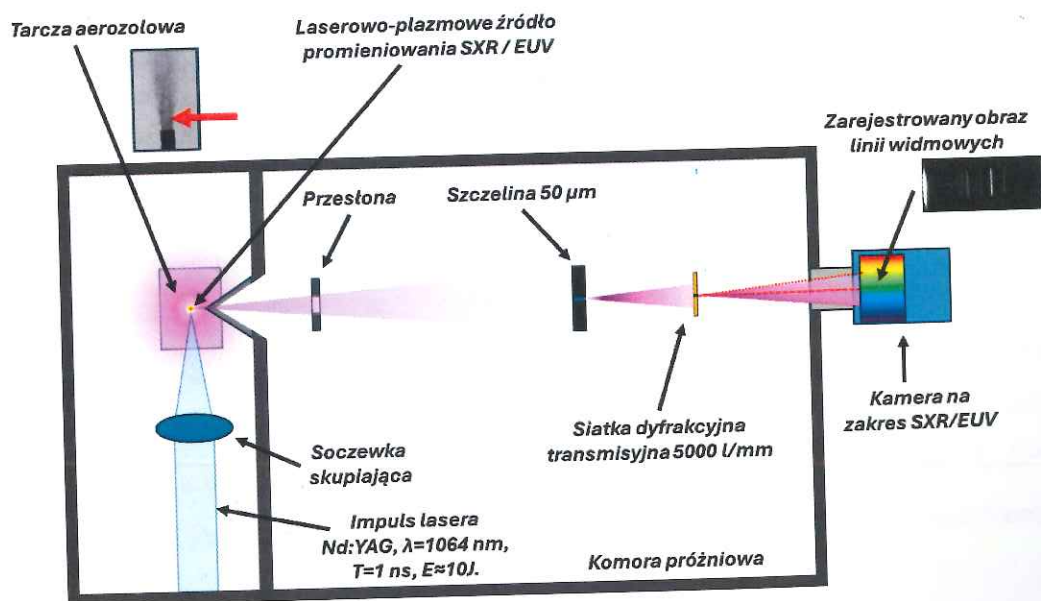
na jakim poziomie sygnały zostały to wyznaczone? / zmienne

doje widma b. niedlic

widmo jest preferowane w zastosowaniach takich jak rentgenowska tomografia koherencyjna i rentgenowska spektroskopia absorpcyjna typu XANES / NEXAFS. Opracowane źródło laserowo-plazmowe spełnia podstawowe wymagania do zastosowania jako źródło promieniowania w powyższych technikach. Strumień fotonów jest wysoki, a widmo mocy jest nie tylko szerokie, ale także wystarczająco gładkie. Optymalizacja parametrów wytwarzanej tarczy laserowej w konsekwencji powoduje zwiększenie intensywności plazmy laserowej oraz przesunięcie widma w stronę większych energii. W porównaniu do istniejących rozwiązań bazujących na tarczach klasterowych, opracowane urządzenie oferuje możliwość pracy przy stosunkowo niskich ciśnieniach roboczych gazu. Zastosowanie rozwiązania zaworu dwugazowego oraz formowanie tarczy strumieniem lekkiego gazu buforowego znacząco zawęża obszar wytwarzania się klasterów gazowych oraz zwiększa średnią gęstość tarczy. Impulsowy tryb pracy zaworu oraz jego wstępne schłodzenie może mieć decydujący wpływ na parametry oraz rozmiary klasterów gazowych. Dalszy rozwój oraz badania systemów do wytwarzania tarcz gazowo-klasterowych mogą otworzyć nowe aplikacje związane z wymaganiami dotyczącymi wydajnych źródeł promieniowania, a także akceleracji cząstek za pomocą lasera oraz generacji neutronów.

nieć pozytywny wpływ na rozwój nowych aplikacji wymagających źródeł prom. SXR, z tego

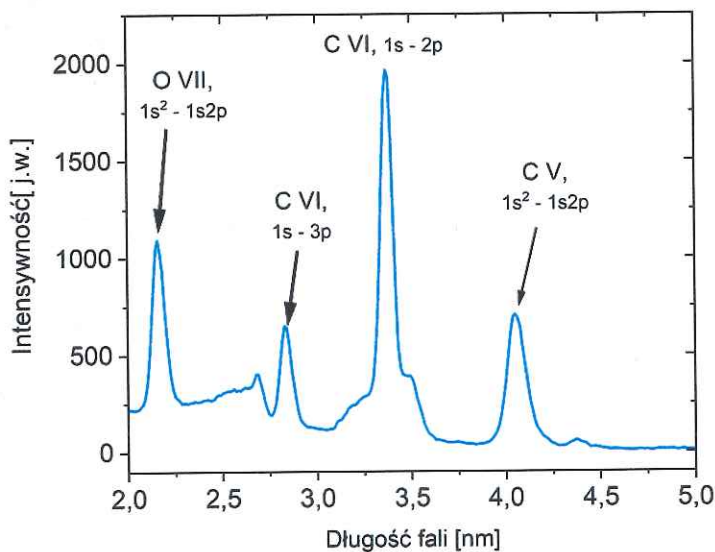
umieszczonym na Rysunek 86. System do wytwarzania tarczy aerozolowej został umieszczony w sekcji pierwszej, adekwatnie do układu pomiarowego wykorzystanego na etapie badań radiografii impulsowej w zakresie SXR. Wiązka laserowa została skupiona prostopadle do obszaru tarczy aerozolowej na wysokości ok 1.5 mm nad powierzchnią dyszy. Energia impulsu laserowego wynosiła ok 9.4 J przy czasie trwania impulsu $\tau=1.3 \text{ ns}$. Intensywność promieniowania laserowego w ognisku została oszacowana na ok 10^{14} W/cm^2 i była wystarczająca, aby wytworzyć plazmę wysokotemperaturową umożliwiającą emisję promieniowania w zakresie SXR/EUV. Wysokość ogniskowania wiązki laserowej została dobrana na podstawie charakterystyki tarczy laserowej za pomocą radiografii impulsowej oraz wyznaczonych dalej map gęstości tarczy aerozolowej. Odległość plazmy laserowej od siatki dyfrakcyjnej wynosiła ok 220 cm oraz 44 cm pomiędzy siatką a kamerą CCD. **Pomiary spektralne opracowanego źródła laserowo-plazmowego zostały przeprowadzone dla dwóch roztworów aerozolu.** W pierwszym przypadku plazma została wytworzona na bazie tarczy helowo-metanolowej ($\text{He-CH}_3\text{OH}$) przy ciśnieniu helu równym $P_{\text{He}}=2 \text{ bar}$. W drugim przypadku parametry aerozolu zostały zmodyfikowane poprzez dodanie pewnej ilości soli NaBr do metanolu tworząc roztwór $\text{NaBr}+\text{CH}_3\text{OH}$. Otrzymany roztwór był roztworem nasyconym i zawierał w sobie ok 14% zawartości soli NaBr . Proces wytwarzania tarczy aerozolowej został zsynchronizowany z działaniem systemu laserowego. Czas wytwarzania tarczy aerozolowej wynosił ok 1 ms . Obrazy widmowe zostały zarejestrowane w ramach akwizycji 3 impulsów laserowych. Każdy z pomiarów został powtórzony kilkakrotnie potwierdzając stabilność działania opracowanego źródła.



Rysunek 86. Schemat układu pomiarowego do wyznaczenia widma SXR

Zgodnie z oczekiwaniami, widmo emisyjne plazmy laserowej wytworzonej na bazie aerozolu helowo-metanolowego miało postać widma liniowego w zakresie 1.5 – 4.5 nm. Zarejestrowane linie widmowe pochodziły od jonów ^ohelu oraz wodoropodobnych dla węgla i tlenu (Rysunek 87). Najbardziej intensywną linią widmową jest linia pochodząca od jonu węgla $C^{VI} 1s-2p$. Pozostałe linie widmowe pochodzą od jonów węgla ($C^V, 1s^2 - 1s2p$; $C^{VI} 1s-3p$) oraz jonu tlenowego $O^{VII} 1s^2 - 1s2p$. Kształt otrzymanego widma jest zbliżony do widma pochodzącego z jonizacji tarczy gazowej na bazie CO_2 , jednoznacznie potwierdzając występowanie procesu jonizacji metanolu znajdującego się w strukturze tarczy laserowej.

Aby potwierdzić założenie dotyczące możliwości wytwarzania plazmy laserowej na bazie różnego rodzaju związków rozpuszczonych w danej cieczy, eksperyment został powtórzony dla roztworu zawierającego w swoim składzie atomy Na oraz Br rozpuszczone w czystym chemicznie metanolu. Pozostałe warunki wytwarzania tarczy aerosolowej oraz plazmy laserowej były identyczne względem pierwszego pomiaru.



Rysunek 87. Zarejestrowane widmo plazmy aerosolowej w zakresie SXR na bazie roztworu aerozolu CH_3OH w atmosferze helu ($P_{He}=2 \text{ bar}$)

Widmo promieniowania emitowanego przez plazmę wytworzoną na bazie nowego roztworu zawierało w swoim składzie wcześniej występujące linie widmowe pochodzące od jonów węgla oraz tlenu a także linie widmowe pochodzące od jonów bromu Br^{XI} , Br^{XVI} , Br^{XVII} oraz Br^{XIV} (Rysunek 88). Potwierdza to słuszność stawianego wcześniej założenia oraz trzeciej tezy

dwustrumieniowych, układu chłodzenia termoelektrycznego oraz kontrolera elektronicznego. Chłodzone tarcze gazowo-klastrowe nie wymagają stosowania wysokich ciśnień gazów, specjalnych dysz oraz układów chłodzenia kriogenicznego. Zastosowany układ chłodzenia termoelektrycznego zapewnia stosunkowo szybkie schładzanie korpusu zaworu gazowego do temperatury $T = -30^{\circ}\text{C}$, która okazała się być wystarczająca, aby wytworzyć klastery gazowe z wybranych gazów atomowych oraz molekularnych. Dla tarczy laserowej wytwarzanej na bazie opracowanego urządzenia, istotną rolę odgrywa wykorzystanie dodatkowej strugi gazu buforowego o wysokim potencjale jonizacji. Jego działanie ma silny wpływ na ograniczenie przestrzenne wypływu gazu roboczego, co skutkuje zwiększeniem koncentracji gazu na wysokości nawet kilku mm nad dyszą zaworu. Temperatura zaworu podczas aktywnego chłodzenia ma również decydujący wpływ na możliwości wytrącania się struktur klastrowych. Gaz znajdujący się w korpusie zaworu jest w równowadze termodynamicznej i temperaturze początkowej równej temperaturze schłodzonego zaworu. Niska temperatura gazu umożliwia wydajniejszy proces ochłodzenia adiabaticznego podczas impulsowego wytwarzania tarczy gazowo-klastrowej. Podczas prowadzonych testów eksperymentalnych na bazie gazu SF_6 , możliwe było wytworzenie specyficznych struktur w postaci nitki zestalonego gazu roboczego. Zjawisko to potwierdza, że podczas otwierania się zaworu inicjowany jest gwałtowny spadek temperatury gazu, co najmniej do poziomu temperatury zestalenia się gazu SF_6 , czyli ok $T = -60^{\circ}\text{C}$. Otrzymane struktury gazowo-klastrowe charakteryzują się znacznymi wymiarami, od setek nanometrów aż do pojedynczych mikrometrów, co zostało potwierdzone zarówno za pomocą pomiarów dyfrakcyjnych jak i bezpośredniego obrazowania struktur klastrowych za pomocą obrazowania mikroskopowego. Oszacowana liczba atomów/cząsteczek dla największych zarejestrowanych klastrow gazowych wynosi ok $10^{10}-10^{11}$ at./klast. Średnia gęstość tarcz gazowo-klastrowych została oszacowana na poziomie $10^{18}-10^{19}$ at./ cm^3 co jest bardzo dobrym wynikiem. Ostatecznym potwierdzeniem przydatności działania powyższego urządzenia był eksperyment dotyczący oddziaływania ultrakrótkich impulsów laserowych z wytwarzaną tarczą gazowo-klastrową. Zarejestrowany wzrost intensywności promieniowania emitowanego z plazmy laserowej na bazie tarczy gazowo-klastrowej osiągał wartość do $10x$, potwierdzając jednocześnie pokonanie ograniczeń dla klasycznych układów tarcz gazowych.

Wyniki pomiarów przeprowadzonych z zastosowaniem drugiego z opracowanych urządzeń są potwierdzeniem stawianej tezy nr 2, mówiącej o możliwości wytwarzania tarczy aerozolowej bezpośrednio w ognisku laserowym za pomocą układu do nebulizacji cieczy.