

WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA

im. Jarosława Dąbrowskiego



ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Łukasz Węgrzyński

**Urządzenia do wytwarzania impulsowych tarcz
klasterowych oraz aerozolowych na potrzeby badań
oddziaływania impulsów laserowych z materia**

Promotor:

**dr hab. inż. Andrzej Bartnik,
prof. WAT**

Warszawa, 2024 r.

Streszczenie

Praca doktorska podzielona jest na 6 poszczególnych rozdziałów stanowiących opis dokonań nad opracowaniem nowych urządzeń do wytwarzania tarcz laserowych. Poniżej przedstawiono krótkie streszczenie i opis ich zawartości.

W rozdziale 1 przedstawiłem wprowadzenie do tematu pracy jako rys historyczny dotyczący tematyki laserów oraz oddziaływania impulsów laserowych z materią. Wyjaśniłem podstawowe pojęcia związane z plazmą laserową, metodami jej wytwarzania, właściwościami oraz podstawowymi parametrami. Przedstawiłem także przykładowe aplikacje systemów laserowo-plazmowych.

W rozdziale 2 zaprezentowałem aktualny stan wiedzy na temat tarcz laserowych. Omówione zostały podstawowe typy tarcz laserowych, ich parametry oraz aplikacje w eksperymentach laserowych. W podsumowaniu rozdziału zawarta została motywacja oraz celowość podjęcia się tematu i realizacji pracy dotyczącej opracowania nowych urządzeń do wytwarzania tarcz laserowych na bazie rozwiązania koncepcji tarczy gazowej.

W rozdziale 3 omówiłem opracowaną konstrukcję systemu do wytwarzania tarcz zawierających klastery gazowe na bazie podwójnej tarczy gazowej oraz nowe rozwiązanie urządzenia do wytwarzania tarczy aerozolowej w warunkach próżniowych.

W rozdziale 4 zaprezentowałem wyniki prac eksperymentalnych dotyczących charakteryzacji wytwarzanych tarcz laserowych. Wyznaczone zostały takie parametry jak mapy transmisji oraz gęstości tarczy, a także charakterystyki rozproszeniowe struktur gazowo-klastrowych i aerozolowych w próżni oraz wyniki obrazowania klastrow gazowych za pomocą mikroskopii w zakresie optycznym.

W rozdziale 5 przedstawione zostały wyniki eksperymentów demonstracyjnych z wykorzystaniem opracowanych urządzeń.

Rozdział 6 stanowi podsumowanie dotyczące opracowanych tarcz laserowych, ich konstrukcji, zaobserwowanych wad oraz zalet. Przedstawiono wnioski z pierwszych eksperymentów oraz propozycje rozwoju tematu i dalszych badań.

no tego tam
nie znajdziemy

wstępnych?

1. Wprowadzenie do tematyki pracy

1.1. Wstęp

Zainteresowanie człowieka światłem, jego możliwościami oraz właściwościami sięgają odległych czasów starożytności, gdzie sformułowane zostało pierwsze podstawowe prawo optyki dotyczące załamania się i prostoliniowego rozchodzenia się światła. Autorem tej zasady był wybitny uczyony z okresu starożytności *Euklides z Aleksandrii*, który zapoczątkował intensywny rozwój optyki i badań nad właściwościami światła. W późniejszych czasach badaniem natury oraz właściwości światła zajmowali się czołowi i najbardziej wybitni naukowcy świata, tacy jak *sir Isaac Newton*, *Christian Huygens*, *Thomas Young* czy też bardziej współcześni naukowcy tacy jak *Albert Einstein*, *Louis de Broglie*, *Teodor Maiman* oraz niedawni nobliści *Gerard Mourou*, *Donna Strickland* (2018r) oraz *Ferenc Krausz i Anne L'Huillier* (2023). Gwałtowny rozwój nauki dotyczącej badania światła doprowadził do powstania wielu nowych technologii, które przyczyniły się do rozwoju ery, zwanej erą laserów. Era laserów napędziła z kolei dalszy rozwój badań naukowych, zajmujących się badaniem oddziaływania ultrawysokiego pola elektromagnetycznego z materią. ^{silnego} Możliwe stało się badanie zupełnie nowych zjawisk bezpośrednio w warunkach laboratoryjnych a następnie ~~oraz~~ symulowanie ich za pomocą nowych modeli fizycznych. Nowe odkrycia, metody i techniki badawcze znalazły swoje zastosowanie w każdej dziedzinie otaczającego nas świata. Mogę śmiało powiedzieć, że bez laserów nie byłoby dzisiejszego postępu technologicznego oraz wiedzy o otaczającym nas świecie. Badania oddziaływania impulsów laserowych z materią nazywane są eksperymentami typu *laser-matter interaction* lub *laser induced plasma*, i należą w dużej mierze do badań podstawowych, które polegają na badaniu oddziaływania impulsów laserowych z materią w postaci specjalnie przygotowanych do tego celu tarcz laserowych. Badane są podstawowe procesy fizyczne zachodzące w danych materiałach, ^{z zakresu} procesy mechaniki ^{zjawisko} kwantowej i optyki nieliniowej a także procesy fizyki ultrawysokich ciśnień oraz temperatur. Pozwalają one badać materię w warunkach podobnych do tych panujących w gwiazdach, przestrzeni kosmicznej lub podczas syntezy jądrowej. Wszystkie eksperymenty tego typu wykorzystują specjalnie przygotowane do tego celu tarcze laserowe, które w wielu przypadkach są podstawowym ^{elementem} czynnikiem decydującym o charakterze oraz możliwościach danego eksperymentu. W ^{tej} poniższej pracy doktorskiej przedstawione są wyniki prac rozwojowych

dotyczące opracowania dwóch nowych urządzeń do wytwarzania tarcz laserowych typu hybrydowego – połączenia tarcz laserowych o charakterze gazowym, ciekłym oraz ciała stałego. Prace badawcze dotyczące owych rozwiązań wynikły z potrzeby posiadania tarcz laserowych o innych parametrach fizyko-chemicznych niż dotychczas ogólnodostępne i wykorzystywane tarcze bądź układy do wytwarzania tarcz laserowych.

1.2. Rys historyczny

Podwaliny techniki laserowej zostały zaproponowane przez Alberta Einsteina i jego rozważania nad mechaniką kwantową, w której wprowadził pojęcie istnienia fotonu oraz pojęcia emisji wymuszonej. Uważa się, że pierwszym fizycznym potwierdzeniem jego teorii było opracowanie w 1954r przez Charlesa Townesa, Jamesa Gordona i Herberta Zeigera masera mikrofalowego (*MASER, ang. Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation - wzmacnianie mikrofal przez wymuszoną emisję promieniowania*), czyli urządzenia emitującego wiązkę mikrofalową, którą dało się sterować. Urządzenie to było wstępem do gwałtownego rozwoju techniki laserowej, który nastąpił już w 1960 r. za sprawą wspomnianego już naukowca, Teodora Maimana. Teodor Maiman opracował w laboratorium badawczym HRL (ang. *Hughes Research Laboratories*) w Kalifornii pierwszy w historii działający laser na ciele stałym [1, 2]. Opracowane przez niego urządzenie emitowało milisekundowe impulsy laserowe o długości fali $\lambda=694.3$ nm. Rok ten uważa się za kluczowy w dziedzinie fizyki i technice laserowej, ponieważ kolejne lata gwałtownie z wielokrotności ilość prac dotyczących laserów oraz ich możliwymi aplikacjami. Z biegiem czasu powstały nowe typy laserów, bazujące na takich ośrodkach laserowych jak ciała stałe, ciecze, gazy, półprzewodniki, a także potężne instalacje laserowe takie jak lasery na swobodnych elektronach (*FEL, ang. Free Electron Laser*) [3]. Z historycznego punktu, pierwszym laserem był wspomniany na samym początku laser na ciele stałym, opracowany przez T. Maimana, jednak kilka miesięcy po nim, również w 1960 r. powstał pierwszy laser gazowy – laser helowo-neonowy *He-Ne*, opracowany przez zespół Aliego Javana, Williama Bennetta Jr., oraz Donalda Herriotta w laboratoriach badawczych firmy Bell. Laser ten emitował promieniowanie w zakresie podczerwonym o długości fali $\lambda=1.15$ μm . Jednak już kilka lat później uzyskano także emisję laserową w zakresie widzialnym na długości

chemik:

Gilbert Lewis
(1926)

to wie
Einstein
(kwantowy
światło)

wzmacnia
mikrofal

fali $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ [4, 5]. W dalszej kolejności opracowane zostały gazowe lasery molekularne na molekułach dwutlenku węgla CO_2 (1964r) [6, 7], pierwsze lasery półprzewodnikowe (1962 r.) [8] [9], lasery na bazie szkła neodymowego oraz granatu itrowo-glinowego domieszkowanego neodymem (Nd:YAG , ang. *neodymium-doped yttrium aluminum garnet*) [10] a także gazowe lasery ^{ksy}excimerowe (1970) [11]. Intensywnie pracowano nad nowymi ośrodkami laserowymi. Opracowane zostały lasery światłowodowe [12], a także lasery barwnikowe oraz różne metody pompowania owych laserów. Równolegle prowadzono także prace dotyczące optymalizacji istniejących już laserów celem uzyskania większych energii, możliwości zmian długości fali emitowanego promieniowania oraz sprawności. Powstały wspomniane już lasery emitujące promieniowanie w zakresie ultrafioletowym (lasery ⁴excimerowe), widzialnym jak i w różnych zakresach podczerwieni. Intensywnie prowadzono także praktyczne prace nad możliwością skracania czasu trwania impulsów laserowych za pomocą optycznych efektów nieliniowych, których występowanie zostało wcześniej teoretycznie ^{mechaniczne} przedstawione w różnych pracach [13, 4, 14] (1958-1961r). Na ich podstawie powstały dwie techniki skracania impulsów laserowych: metoda ^{mitigacji} modulacji dobroci (przełączania strat) rezonatora, zwana także Q -switching-iem, oraz bardziej zaawansowana metoda ^{synchronizacji} selekcji modów w rezonatorze, czyli tzw. metoda *mode-lockingu*. W obu przypadkach opracowano zarówno metody aktywne jak i pasywne skracania impulsów laserowych. Pierwsza demonstracja lasera z wykorzystaniem efektu skracania czasu trwania impulsów laserowych wykorzystywała laser rubinowy oraz komórkę Kerra. W wyniku zastosowania nowej technologii, możliwe było skrócenie impulsów z reżimu milisekundowego ($1 \text{ ms} = 10^{-3} \text{ s}$) do reżimu nanosekundowego ($1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$). W efekcie ~~końcowym~~ uzyskano impulsy laserowe o czasie trwania ok $\tau = 12 \text{ ns}$ i mocy szczytowej przekraczającej ^{nm} 600 kW [15]. Opracowana i zademonstrowana modulacja dobroci rezonatora laserowego nazwana została także metodą generowania impulsów gigantycznych, z uwagi na możliwości generacji gigawatowych impulsów ($1 \text{ GW} = 10^9 \text{ W}$) o czasie trwania pojedynczych nanosekund. Druga metoda skracania czasu trwania impulsów laserowych umożliwiła natomiast generację jeszcze krótszych czasów impulsu laserowego, rzędu piko oraz femtosekund ($1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$, $1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$) i polegała na wykorzystaniu zjawiska synchronizacji modów lasera we wnęce rezonatorowej. Powyższe metody stanowią kamień milowy w możliwościach aplikacji systemów laserowych do celów naukowych, przemysłowych, medycznych oraz przemysłu związanego z obronnością. Pierwszy wspomniany system laserowy ^{generacji} ultrakrótkich impulsów femtosekundowych ^{ok} wielkiej mocy, został zademonstrowany przez zespół Gerarda Mourou na bazie techniki *mode-lockingu* oraz nowej metody wzmacniania parametrycznego impulsów

światła zwanego CPA (ang. Chirped Pulse Amplification) [16]. Opracowany przez niego system lasera femtosekundowego zrewolucjonizował laboratoria badawcze na całym świecie. Technologia ta jest uważana obecnie za najnowocześniejszą metodę na uzyskanie laserów o najwyższej mocy szczytowej, umożliwiając osiągnięcie mocy impulsowej rzędu 10^{23} W/cm^2 [17]. Obie metody skracania impulsów laserowych różnią się od siebie możliwościami oraz docelowymi aplikacjami. Ograniczeniem metody modulacji dobroci rezonatora jest generacja nanosekundowych impulsów o stosunkowo dużej energii (kJ) ale o stosunkowo niskiej repetycji pracy lasera (maksymalnie pojedyncze kHz), natomiast technika typu *mode-locking* umożliwia generację ultrakrótkich impulsów laserowych o wysokiej repetycji (setki kHz, MHz) jednak o dużo niższej energii impulsu lasera. Obie technologie oferują inne możliwości oraz znalazły swoje docelowe zastosowanie aplikacje zarówno w nauce, przemyśle jak i medycynie. Koncepcja skracania czasu trwania impulsów laserowych za pomocą modulacji dobroci rezonatora oraz selekcji modów rezonatora odegrała kluczową rolę w rozwoju technologii laserowej i stanowi podstawę dzisiejszych badań nad oddziaływaniem impulsów laserowych z materią. Poza intensywnie rozwijanymi systemami laserów impulsowych powstawały także systemy laserowe o pracy ciągłej CW (ang. Continuous Wave). Charakteryzują się one znacznie mniejszymi gęstościami mocy ($< 10^{11} \text{ W}$), jednak ich znaczenie, udział i aplikacje są równie ważne jak w przypadku laserów impulsowych. W poniższej tabeli (Tabela 1) zebrane zostały informacje dotyczące parametrów nowoczesnych systemów laserowych, które wykorzystywane są w procesach związanych z oddziaływaniem impulsów laserowych z materią. Instalacje te są wykorzystywane głównie do zaawansowanych badań naukowych nad różnymi procesami związanymi z oddziaływaniem zarówno impulsów laserowych jak i samej plazmy indukowanej laserowo z materią.

	instalacje nanosekundowe	Impulsy ultrakrótkie	
		Systemy kompaktowe	Duże instalacje laserowe
Energia impulsu E	< 60 kJ	< 1 J	< kJ
Czas trwania impulsu t_p	1-5 ns	10-200 fs	< 1 ps
Moc w impulsie P	< 30 TW	< 200 TW	> PW
Rozmiar ogniska r_f	> 40 μm	< 10 μm	< 10 μm
Intensywność I	$10^{11}-10^{15} \text{ W/cm}^2$	$10^{17}-10^{19} \text{ W/cm}^2$	< 10^{23} W/cm^2

Tabela 1. Najważniejsze parametry systemów laserowych wykorzystywanych do w eksperymentów wytwarzania plazmy laserowej.

Najważniejsze

od

1.3. Oddziaływanie impulsów laserowych z materiałem

Wraz z pojawieniem się laserów wielkiej mocy rozpoczęto badania dotyczące możliwości wytwarzania plazmy ~~indukowanej laserowo~~ ^{z użyciem lasera}. Pierwsze eksperymenty tego typu odbyły się bezpośrednio po opracowaniu systemów laserowych wykorzystujących technikę skracania czasu trwania impulsu lasera i dotyczyły wytworzenia iskry laserowej w powietrzu [18]. Wytwarzanie plazmy laserowej jest ^{procesem} zjawiskiem powodującym bardzo szybkie wzbudzenie oraz jonizację materiału tarczy laserowej a w przypadku tarcz stałych, także częściowe odparowanie materiału tarczy (ablację). Wytwarzaniu plazmy laserowej towarzyszy również zjawisko powstawania silnych fal uderzeniowych indukowanych plazmowo. W momencie oddziaływania impulsu laserowego z tarczą laserową, dostarczana jest duża porcja energii w bardzo krótkim czasie. Materiał tarczy absorbuje pewną porcję energii ^{co prowadzi do} powodując jonizację oraz wzbudzenie ^{zwiększenie} elektronów do wyższych poziomów energetycznych. W procesie oddziaływania impulsów laserowych z materiałem możemy wyróżnić występowanie pewnych zjawisk ściśle powiązanych z procesem indukowania plazmy laserowej: zjawisko odbicia impulsu laserowego od materiału tarczy, rozproszenia a także absorpcji (częściowej lub pełnej). Ich występowanie zależy w dużej mierze od charakterystyki materiału tarczy (skład chemiczny, parametry fizyczne, optyczne itp.) a także od parametrów lasera (długość fali λ). Temat ten będzie szerzej omówiony w kolejnym rozdziale dotyczącym klasycznych rodzajów tarcz laserowych (Rozdział 2). Proces absorpcji energii impulsu laserowego zawsze związany jest z występowaniem elektronów swobodnych w danej tarczy laserowej. Ich zadaniem jest zaabsorbowanie energii promieniowania lasera oraz przekazanie jej ^{e. do} do dalszej struktury materiału, docelowo prowadząc do wytworzenia się plazmy laserowej. Jeżeli energia impulsu laserowego jest zbyt niska, aby wytworzyć plazmę laserową, zostanie ona wytracona w postaci ciepła lub odbita od powierzchni materiału tarczy. Efekty termiczne związane z oddziaływaniem impulsów laserowych z materiałem znajdują szerokie zastosowanie w przemyśle w postaci różnych procesów technologicznych takich jak spawanie laserowe, cięcie laserowe, czy też wiercenie laserowe. Systemy laserowe wykorzystywane do tego typu celów ^{nie przekraczają} ~~nie przekraczają~~ ^{metriem nie wieknie nur ołow} poziomu gęstości 10^{10} W/cm^2 . ^{W/cm², dwa na bierzynje}

Sama definicja plazmy nie jest ograniczona do zjawiska plazmy laserowej. Pod ogólnym pojęciem plazmy należy rozumieć czwarty stan skupienia materii, poza gazami, cieciami oraz ciałami stałymi, który może występować naturalnie lub może być wytwarzany za pomocą

procesy jednowe

różnych technik, np. wyładowania elektrycznego czy wspomnianej plazmy indukowanej laserowo. Najprostszą definicją plazmy jest określenie jej jako zjonizowanej (wzbudzonej) materii składającej się z quasi-neutralnego gazu, na który składają się głównie wzbudzone elektrony n_e oraz jony n_i znajdujące się w pewnym stanie naładowania Z . Plazma w skali makroskopowej jest elektrycznie neutralna – ich ładunki elektrycznie się równoważą zgodnie z równaniem **Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.**: ?

$$n_e \cong Zn_i \quad (1)$$

Najważniejszymi parametrami charakteryzującymi plazmę laserową są gęstość elektronowa n_e (cm^{-3}), temperatura plazmy T_e (eV) oraz stopień jonizacji plazmy α , który oznacza stosunek cząsteczek naładowanych n^+ do całkowitej liczby cząsteczek, w tym cząsteczek neutralnych n oraz jonów **Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.** Ponadto, charakteryzując plazmę możemy wyróżnić jeszcze takie parametry jak masa m_e , ładunek plazmy q_s , a także gęstość strumienia magnetycznego plazmy B [19, 20].

nie w tym miejscu

$$\alpha = \frac{n^+}{n + n^+} \quad (2)$$

Na podstawie przytoczonych parametrów możemy wyróżnić pewne typy plazmy określane jako plazma zimna bądź plazma gorąca. Stopień jonizacji w plazmie zimnej jest niski, ze względu na niską temperaturę elektronową, na poziomie pojedynczych eV , natomiast w plazmie gorącej temperatura elektronowa jest na poziomie kilkudziesięciu eV i wyżej i jest całkowicie zjonizowana. Jednakże gęstość plazmy gorącej może być bardzo mała jak np. w tokamakach czy stellaratorach, natomiast gęstość plazmy zimnej może być wysoka jak w wyładowaniu łukowym [21]. W przypadku plazmy zimnej, częstość zderzeń między elektronami i cząsteczkami nie jest dostatecznie duża, aby istniała termiczna równowaga między elektronami i cząsteczkami gazu. Cząstki o wysokiej energii w plazmie zimnej to głównie elektrony, podczas gdy energia cząsteczek gazu jest zbliżona do temperatury pokojowej. Występuje tutaj sytuacja, ^{je} gdy $T_e \gg T_i \gg T_g$, gdzie T_e , T_i oraz T_g to odpowiednio temperatury elektronów, jonów i cząsteczek gazu. Stopień jonizacji α w przypadku plazmy zimnej jest niewielki i wynosi mniej niż $\alpha < 10^{-4}$. W przypadku plazmy gorącej częstość zderzeń elektronów oraz jonów jest na tyle wysoka, że przekłada się na uzyskanie równowagi termicznej pomiędzy elektronami oraz jonami: $T_e \cong T_i$. Ilość materii zjonizowanej stanowiącej

ilości materii zjonizowanej blisko jedności?

plazmę gorącą jest stosunkowo wysoka i może być bliska jedności a stopień jonizacji α jest większy niż $\alpha > 10^{-4}$ [22].

Plazma może występować w warunkach naturalnych na Ziemi (np. wyładowanie atmosferyczne, zorza polarna), w kosmosie (np. korona słoneczna, wnętrza gwiazd), jak też możemy ją wytwarzać na Ziemi, w różnego typu urządzeniach plazmowych stosowanych w przemyśle, urządzeniach termojądrowych (tokamak), źródłach promieniowania rentgenowskiego, skrajnego i próżniowego nadfioletu, lampach wyładowczych, kulach plazmowych itp. Plazmę w tego typu urządzeniach wytwarza się głównie w wyniku wyładowania elektrycznego lub z zastosowaniem promieniowania laserowego. Zastosowań plazmy indukowanej laserowo jest wiele. Jak wspomniałem wcześniej, plazma laserowa może być wykorzystywana do badań związanych z procesami termodynamiki, parametrów fizycznych różnych materiałów, właściwości ultrawysokiego pola magnetycznego, ultrawysokich ciśnień, fal uderzeniowych, symulacji procesów astrofizycznych, osadzania cienkich warstw, produkcji jonów, identyfikacji materiałów czy też budowy nowych źródeł promieniowania w zakresie SXR/EUV [23, 24]. Aby wytworzyć plazmę indukowaną laserowo, konieczne jest osiągnięcie odpowiednio wysokiej gęstości mocy wiązki laserowej, której wartość jest różna w zależności od rodzaju jonizowanego ośrodka oraz czasu trwania impulsu laserowego.

głównie

czynniki matierii, które jak osiągnięte tej miarę zależy od Δt_{imp}

W laboratoryjnych procesach wytwarzania plazmy laserowej wyróżniamy głównie dwa reżimy czasowe ~~wytwarzania plazmy laserowej~~: plazmę laserową indukowaną laserami w skali nanosekundowej oraz plazmę indukowaną laserami o impulsach sub-nanosekundowych (impulsu) pikosekundowe oraz femtosekundowe) [25]. Mechanizm oddziaływania w obu przypadkach ~~jest~~ ^{może być} różny oraz prowadzi do wytworzenia plazmy o różnych parametrach. Sam proces wytwarzania plazmy laserowej jest złożonym zjawiskiem i nie jest głównym tematem poniższej pracy doktorskiej. Mechanizm transferu energii w oddziaływaniu w skali nanosekundowej polega głównie na absorpcji energii pochodzącej z impulsu laserowego do materiału tarczy poprzez tzw. odwrotny *bremstrahlung* (ang. *Inverse Bremsstrahlung, IB*) typu *foton-elektron*. Zaabsorbowana energia jest następnie przekazywana do innych elektronów swobodnych oraz związanych poprzez procesy zderzeniowe. W efekcie następuje sukcesywna jonizacja oraz wzbudzenie atomów oraz istniejących już jonów ośrodka. Stosunkowo długi czas oddziaływania materiału tarczy oraz plazmy z impulsem laserowym powoduje znaczne miejscowe gromadzenie się energii termicznej. Dla plazmy powstałej na bazie ciał stałych efektem powyższego procesu jest występowanie stref topienia, parowania oraz usuwania

przez
?
• błąd

materiału tarczy w procesie ablacji laserowej. Gwałtowny proces nagrzewania się tarczy oraz następująca po nim ekspansja plazmy laserowej powoduje występowanie silnych fal uderzeniowych zarówno w materiale tarczy jak i na zewnątrz, pochodzących bezpośrednio od plazmy laserowej. Procesy te, w zależności od założeń eksperymentalnych, mogą mieć charakter korzystny lub mogą być procesem destrukcyjnym. Występowanie fal uderzeniowych w materiale może być wykorzystywane do procesu szybkiej i miejscowego utwardzania materiałów bądź wprowadzania modyfikacji struktury powierzchni. Wytwarzane produkty ablacji materiału tarczy mogą zarówno prowadzić do degradacji danej tarczy i zanieczyszczeń bezpośredniego otoczenia tarczy laserowej jak i też mogą być czynnikiem pożądanym jako jedna z metod czyszczenia powierzchni a także metoda plazmowego osadzania cienkich warstw różnych materiałów (*PLD, Plasma Laser Deposition*). Plazma wytwarzana w skali nanosekundowej występuje również pod nazwą plazmy termicznej z uwagi na stosunkowo długi czas oddziaływania impulsu laserowego z indukowaną plazmą laserową. Plazma termiczna charakteryzuje się również długim czasem relaksacji (10-100 ns) i wolniejszą ekspansją. W większości przypadków jest głównie źródłem fotonów.

Jeżeli plazma laserowa zostanie wytworzona za pomocą impulsu laserowego o ultrakrótkim czasie trwania oraz odpowiednio wysokiej intensywności, jej charakter jest już zupełnie inny. Mechanizm transferu energii wykorzystuje głównie zjawisko jonizacji wielofotonowej oraz możliwości wystąpienia zjawiska rezonansowego transferu energii [26, 27, 28]. Plazma taka może być już źródłem zarówno fotonów jak i wiązek cząsteczek naładowanych o wysokiej energii (jonów oraz elektronów) [29]. W wyniku szybkiego transferu energii, materiał tarczy laserowej jest wzbudzany do stanu wysoce nierównowagowego. Formowanie się plazmy laserowej następuje dopiero po zakończeniu oddziaływania impulsu laserowego z materiałem, a nie jak w przypadku plazmy termicznej, podczas trwania impulsu laserowego. W wyniku interakcji ultrakrótkich impulsów laserowych z tarczą, klasyczny mechanizm Fourierowski dla przewodzenia ciepła oraz transportu energii nie może już być stosowany jak to było w przypadku oddziaływania impulsów nanosekundowych. Do opisu transferu energii wykorzystywany może być natomiast model dwutemperaturowy (*ang. Two-temperature model, TTM*), który uwzględnia ~~w sobie~~ temperaturę elektronów jak i sieci krystalicznej materiału tarczy [30]. W oddziaływaniach tego typu zminimalizowane są procesy dyfuzji ciepła oraz procesy związanych z degradacją termiczną materiału tarczy. Oddziaływanie impulsów laserowych z tarczami o sub-nanosekundowym reżimie pracy umożliwia prowadzenie badań dotyczących optyki nieliniowej, generacji promieniowania typu *HHG* (*ang. High harmonic*

niej głównym

to
bardziej
specyficzny
od reszty
tarczy

co to za tarcza?

generation), impulsów attosekundowych ($1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$), elektronów relatywistycznych, jonów o energiach MeV , pozytronów, neutronów a także promieniowania rentgenowskiego jak i promieniowania gamma [31, 32]. Czas relaksacji plazmy generowanej w wyniku oddziaływania ultrakrótkich impulsów laserowych może wynosić od pojedynczych do dziesiątek lub setek pikosekund (10^{-12} s).

Od momentu opracowania pierwszego lasera na świecie w warunkach laboratoryjnych aż do czasów współczesnych, osiągnięty został niesamowity postęp technologiczny dzięki laserom i ich aplikacjom. Lasery znalazły zastosowanie praktycznie we wszystkich dziedzinach życia: od wysoce zaawansowanych badań naukowych dotyczących kontrolowanej fuzji termojądrowej, przez zastosowania przemysłowe, komercyjne, militarne, medyczne, kończąc na aplikacjach domowych i rozrywkowych w postaci odtwarzaczy optycznych nośników danych (np. dyski *CD*, *DVD*, *BR*) jak i pokazów projekcji laserowych. Bez laserów nie byłoby współczesnej telekomunikacji, szeroko znanej pod postacią komunikacji światłowodowej, urządzeń medycznych wykorzystujących promieniowanie laserowe czy też diagnostyki laserowej *OCT* (ang. *Optical Coherence Tomography*), interferometrii czy też spektroskopii laserowej *LIBS*. Tematyka badań dotyczących oddziaływania impulsów z materią skupia się na możliwości dokładnego poznania różnych zjawisk fizycznych oraz mechaniki kwantowej. W wielu aspektach badania prowadzą do wytworzenia się plazmy laserowej, która może być źródłem zarówno fotonów, jonów, protonów oraz elektronów. ^{jak i} ^{cy} ^{ech} ^w Możliwe jest budowanie nowych urządzeń niezbędnych do różnych procesów technologicznych, takich jak fotolitografia *EUV/SXR*, spektroskopia laserowa, mikroskopia rentgenowska czy też spektroskopia typu *NEXAFS*. Rozwiązania techniczne wykorzystujące kompaktowe systemy do wytwarzania ^{maszynowa} wysokotemperaturowej plazmy laserowej stanowią ciekawą alternatywę do badań wykorzystujących duże instalacje laserowe (np. *FLASH*) czy też potężne instalacje synchrotronowe, które z uwagi na swoje rozmiary są bardzo oblegane i drogie w użytkowaniu. Kontynuacja oraz rozwój tematyki interakcji impulsów laserowych z materią jest ~~czynikiem~~ ^{ważnym} dla dalszego rozwoju nauki i wymaga dalszych prac dotyczących zarówno nowych systemów laserowych jak i nowych rodzajów tarcz wykorzystywanych w eksperymentach laserowych.

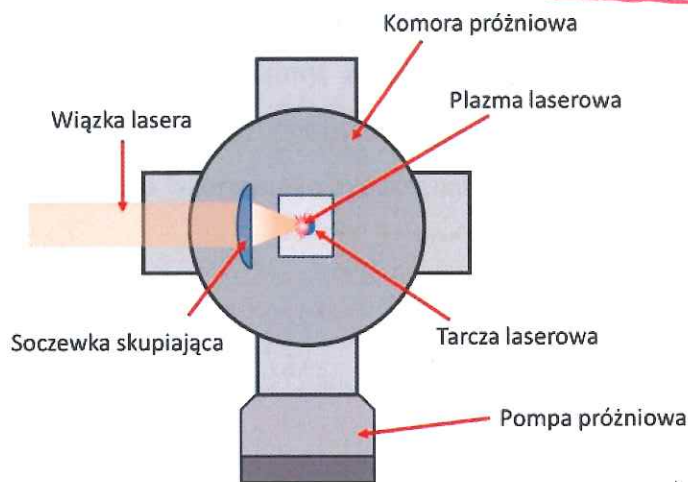
2. Aktualny stan wiedzy na temat tarcz laserowych

Tarcze laserowe wspomniane w poprzednim rozdziale stanowią jeden z kluczowych elementów wykorzystywanych w ramach eksperymentów badawczych dotyczących oddziaływania impulsów laserowych z materiałem. W wyniku oddziaływania impulsów laserowych wielkiej mocy z tarczą następuje przekazanie energii pochodzącej z fotonów wiązki laserowej do elektronów swobodnych materiału tarczy. Dalej następują procesy wtórne takie jak dysocjacja, jonizacja i wzbudzenie zderzeniowe, rekombinacja a także emisja i absorpcja promieniowania elektromagnetycznego. Efektem końcowym jest wytworzenie się plazmy laserowej o określonych parametrach. Plazma laserowa emituje promieniowanie w bardzo szerokim zakresie, począwszy od promieniowania terahercowego [33, 34, 35] aż po promieniowanie rentgenowskie [36, 37, 38] a także wiązki jonowe [39, 40, 41] i protonowe [42, 43, 44]. Definicyjnie tarczą laserową jest każda substancja bądź materiał, na którym ogniskowana jest wiązka laserowa prowadząc do jego jonizacji lub powstania innych efektów termicznych lub mechanicznych. Zgodnie z powyższym terminem, tarczą laserową może być zarówno dowolny gaz, ciecz czy też ciało stałe. Pierwsze eksperymenty dotyczące wytwarzania plazmy za pomocą lasera przeprowadzono tuż po opracowaniu technologii skracania impulsów laserowych w postaci wytworzenia iskry laserowej w powietrzu. W kolejnych eksperymentach zaczęto już wykorzystywać gazy czyste oraz inne materiały w postaci metali oraz cieczy.

Wytwarzanie plazmy laserowej w celach badawczych, w charakterze źródła promieniowania w zakresie od nadfioletu próżniowego (*VUV*) do miękkiego promieniowania rentgenowskiego (*SXR*), musi być realizowane w warunkach próżni. Związane jest to z silną absorpcją promieniowania z tego zakresu widmowego w gazach obecnych w atmosferze oraz innych ośrodkach gazowych. Na poniższym rysunku (Rysunek 1) przedstawiłem przykładowe charakterystyki transmisji promieniowania elektromagnetycznego w zakresie $\lambda = 1-120 \text{ nm}$ dla *100 nm* wybranych gazów szlachetnych oraz gazów wchodzących w skład atmosfery ziemskiej.

ale jaka grubość osłodka?

Zapewnienie optymalnych warunków wytwarzania i propagacji plazmy laserowej w warunkach eksperymentalnych odbywa się poprzez zastosowanie dedykowanych do tego celu komór próżniowych, w których prowadzone są badania dotyczące zarówno wytwarzania plazmy laserowej jak oddziaływania promieniowania plazmy. Wnętrze komory próżniowej znajduje się pod odpowiednio niskim ciśnieniem, rzędu tysięcznych części milibara, które to zapewnia odpowiednio dobre warunki do wytwarzania się plazmy laserowej oraz umożliwia swobodną propagację promieniowania w zakresie poniżej $\lambda = 200 \text{ nm}$. Przykładowe rozwiązanie komory próżniowej wykorzystywanej do wytwarzania plazmy laserowej przedstawiłem na Rysunek 2.



Rysunek 2. Schemat optyczny do wytwarzania plazmy laserowej wewnątrz komory próżniowej.

Parametry wytwarzanej plazmy laserowej silnie zależą od wielu czynników takich jak gęstość tarczy laserowej, skład chemiczny a także intensywność promieniowania laserowego w ognisku, czas trwania impulsu τ oraz długość fali promieniowania laserowego λ . W przypadku plazmy laserowej stosowanej w charakterze źródła promieniowania, dąży się do uzyskania plazmy laserowej o odpowiednio ^m dobranym ^{widmie} spektrum emisji oraz wysokiej konwersji energii lasera na promieniowanie z wymaganego zakresu widmowego. Sprawność tej konwersji zależy w dużym stopniu od dopasowania gęstości tarczy do parametrów systemu laserowego. Zależnością wiążącą powyższe parametry tarczy laserowej z systemem laserowym jest parametr nazwany gęstością krytyczną tarczy $n_c \text{ [cm}^{-3}\text{]}$ (3), gdzie n_c oznacza gęstość elektronową powyżej której propagacja promieniowania laserowego o danej częstotliwości/długości fali staje się niemożliwa. Gęstość ta określona jest wzorem [46]:

Intej widm. (3)

$$n_c = \frac{m_e \epsilon_0 \omega^2}{e^2} \quad (3)$$

gdzie: m_e masa elektronu, ϵ_0 przenikalność elektromagnetyczna próżni, ω częstotliwość lasera, e ładunek elementarny. Warunek ten jest spełniony dla częstotliwości lasera ω_L mniejszej od częstotliwości plazmowej ω_p : $\omega_L \lesssim \omega_p$. Częstotliwość plazmowa ω_p dotyczy oscylacji gęstości ładunku w plazmie i zależy od gęstości elektronowej (4),

$$\omega_p = \left(\frac{n_e e^2}{m_e \epsilon_0} \right)^{1/2} \quad (4)$$

Na podstawie powyższej zależności widzimy, że gęstość krytyczna jest proporcjonalna do pewnej stałej wartości oraz odwrotnie proporcjonalna do kwadratu długości fali lasera $n_c \approx \lambda^{-2}$. Uproszczeniem powyższego wzoru może być równanie określające n_c w funkcji długości fali lasera λ w μm (5):

$$n_c = 1.1 \times 10^{21} \left(\frac{1}{\lambda} \right)^2 \quad (5)$$

Analizując wartość parametru n_c dla tarcz laserowych możemy wyróżnić trzy przypadki:

- $n_e < n_c$, gęstość tarczy laserowej jest mniejsza od gęstości krytycznej, tzw. gęstość podkrytyczna tarczy laserowej,
- $n_e > n_c$, ośrodek tarczy ma gęstość elektronową większą od gęstości krytycznej, tzw. gęstość nadkrytyczna tarczy laserowej,
- $n_e \cong n_c$, sytuacja, kiedy gęstość elektronowa ośrodka tarczy laserowej jest bardzo bliska gęstości krytycznej.

Zobrazowanie trzech powyższych przypadków dla gęstości elektronowej tarczy podkrytycznej, nadkrytycznej oraz gęstości tarczy równej gęstości krytycznej zobrazowano na Rysunek 3.

Powyższe trzy przypadki mogą krótko omówić na przykładzie oddziaływania impulsów laserowych dla lasera *Nd:YAG* o długości fali $\lambda = 1064 \text{ nm} \cong 1 \text{ }\mu\text{m}$. Zgodnie z zależnością (5), gęstość krytyczna dla tej długości fali lasera wynosi $n_c = 10^{21} \text{ el/cm}^3$: $\text{cm}^{-3} / 1/\text{cm}^3$

$$n_c(\lambda) = n_c(1\mu\text{m}) \cong 10^{21} \text{ el/cm}^3$$

cm^{-3} lub $1/\text{cm}^3$

W pierwszym analizowanym przypadku gęstość tarczy laserowej n_{at} jest mniejsza od gęstości krytycznej $n_{at} < n_c$ i może być osiągnięta poprzez wytworzenie tarczy gazowej azotowej N_2 , o ciśnieniu $P=1 \text{ bar}$ we wnętrzu komory próżniowej. Teoretyczna średnia gęstość molekuł takiej tarczy wynosi $n_M \sim 10^{19} \text{ at/cm}^3$.

ale to nie dotyczy końc. elektronów a co z widł. jądrowym?

Promieniowanie laserowe w takim przypadku wytworzy plazmę laserową, która jest częściowo transparentna dla promieniowania lasera. Część energii impulsu laserowego zostanie wykorzystana do indukcji plazmy, natomiast pozostała część będzie propagowała się dalej lub zostanie rozprzozona za obszarem plazmy (Rysunek 3 a). Plazma taka jest wydajnym źródłem promieniowania w zakresie *SXR* oraz *EUV*.

Drugi możliwy przypadek określony jest wtedy, gdy materiał tarczy laserowej posiada wysoką gęstość - powyżej wartości gęstości krytycznej $n_{at} > n_c$. Materiałem takim może być tarcza laserowa wykonana z ciała stałego, np. metalu. Typowa gęstość tarcz wykonanych z metalu wynosi $n_M = 10^{23} \text{ at/cm}^3$.

ośrodek o

Podczas oddziaływania impulsu laserowego z materiałem tarczy stałej, następuje ablacja pewnej części materiału prowadząc do powstania o zmiennej gęstości ośrodka, na bazie którego wytwarzana jest plazma laserowa. Gęstość elektronowa takiej tarczy maleje w kierunku oddalania się od tarczy. Promieniowanie laserowe propaguje się i jest absorbowane w ośrodku o gęstości poniżej wartości krytycznej. Niezaabsorbowana część promieniowania laserowego zostanie odbita wstecznie od granicy z plazmą o gęstości krytycznej.

Plazma laserowa działa w tym przypadku także jako zwierciadło odbijające dla promieniowania laserowego (Rysunek 3 b). Pojawienie się impulsu laserowego wstecznego może być zjawiskiem niebezpiecznym zarówno dla elementów optycznych a także samego systemu laserowego. Odbity impuls laserowy może w skrajnym przypadku doprowadzić do poważnych uszkodzeń systemu laserowego. Eksperymenty wykorzystujące tarcze o wysokiej gęstości, powyżej wartości krytycznej, wymagają dodatkowego zabezpieczenia systemu laserowego za pomocą rotatora Faradaya.

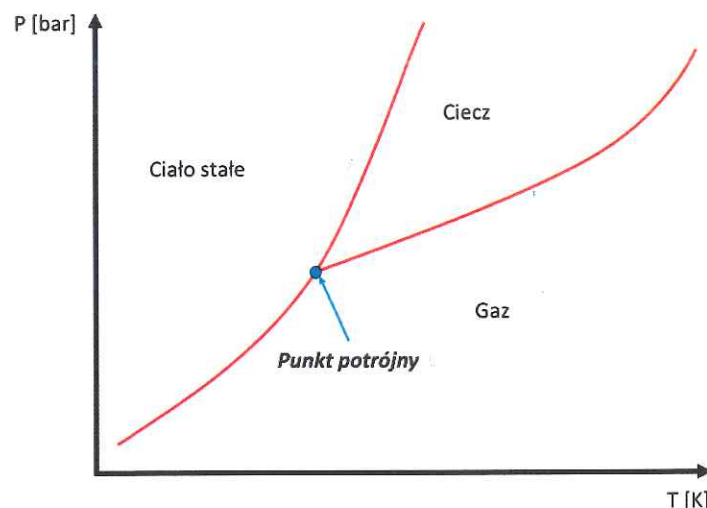
Trzeci przypadek, w którym tarcza laserowa osiąga gęstość zbliżoną do gęstości krytycznej $n_e \cong n_c$, jest przypadkiem wyidealizowanym i teoretycznie możliwe jest uzyskanie największej sprawności wytwarzania plazmy laserowej z uwagi na największą absorpcję

promieniowania laserowego w tarczy. (Rysunek 3 c). Osiągnięcie pełnego dopasowania odpowiedniej wartości gęstości tarczy laserowej n_{at} do długości fali λ posiadanego systemu laserowego jest w większości niemożliwe z przyczyn technicznych. Na podstawie równania (5) możemy oszacować, że dla gęstości mniejszych niż $n_{at} < 10^{19} \text{ at/cm}^3$, długość fali lasera λ musiałaby znajdować się w zakresie dalekiej podczerwieni, powyżej $\lambda > 10 \mu\text{m}$, dla tarcz laserowych o wysokiej gęstości $n_{at} > 10^{21} \text{ at/cm}^3$, długość fali lasera powinna znajdować się w zakresie ultrafioletowym oraz skrajnego nadfioletu. Dla systemów laserowych emitujących promieniowanie w zakresie bliskiej podczerwieni oraz w zakresie widzialnym, optymalna wartość gęstości tarczy laserowej znajduje się w zakresie $n_{at} \cong 10^{21} \text{ at/cm}^3$.

Odpowiednia konstrukcja i dobór materiału tarczy laserowej stanowi jedno z podstawowych zadań w realizacji eksperymentów dotyczących oddziaływania impulsów laserowych z materią. Tarcze laserowe mogą różnić się kształtem, składem chemicznym, gęstością oraz stanem skupienia. W ogólnym przypadku wyróżniamy trzy podstawowe rodzaje tarcz laserowych:

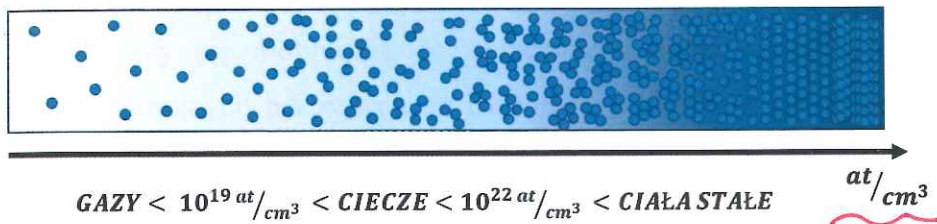
- tarcze stałe,
- tarcze ciekłe,
- tarcze gazowe.

Ich postać (stan skupienia) związana jest ściśle z ich stanem równowagi materiałowej określonym na podstawie stanów równowagi termodynamicznej (Rysunek 4).



Rysunek 4. Wykres stanów równowagi materiałowej.

Na powyższym wykresie możemy wyróżnić trzy główne stany skupienia materii: ciała stałe, ciecze oraz gazy. Czerwone linie ograniczające obszary trwałości faz nazywane są liniami równowagi fazowej i określają jakie wartości ciśnienia P oraz temperatury T , ~~muszą być~~ *muszą być spełnione, aby* odpowiednie fazy mogły *zostały* współistnieć *z sobą* obok siebie w stanie równowagi. Równoległe z powyższym wykresem fazowym, możliwa jest klasyfikacja materiałów na podstawie charakterystycznych wartości gęstości atomowych (liczności materii). Zobrazowanie ~~Takiego~~ podziału przedstawiłem poniżej (Rysunek 5):



Rysunek 5. Zobrazowanie liczności materii dla różnych stanów skupienia materiałów

Gazy posiadają cząsteczki bardzo oddalone od siebie. Ruchy pomiędzy nimi są bardzo szybkie i swobodne, a cząsteczki odbijają się od innych cząsteczek. *zderzenia z nimi* Odległości między *nimi* są zdecydowanie większe od rozmiarów samych cząsteczek. W uproszczonym modelu przyjmujemy, że cząsteczki gazu działają wzajemnie na siebie tylko w momentach zderzeń pomiędzy sobą. Ciecze mają cząsteczki położone blisko siebie, ale nie są uporządkowane w postaci sieci krystalicznych. Mogą przyjmować dowolne formy w zależności od kształtu naczynia, w którym się znajdują. Ruch pomiędzy cząsteczkami jest większy niż w ciałach stałych a mniejszy niż w gazach. Oddziaływania między cząsteczkami cieczy są słabsze i dlatego mogą się one przemieszczać względem siebie. Ciała stałe mają natomiast cząsteczki położone blisko siebie i znajdują się w stanie uporządkowanym. Ruch cząsteczek jest najmniej swobodny, tzn. drgają one tylko wokół swoich położen równowagi. Oddziaływania międzycząsteczkowe są w tym przypadku najsilniejsze.

Na podstawie wykresu fazowego stanów równowagi materiałowej (Rysunek 4) możliwe jest stwierdzenie, że każdy pierwiastek w pewnych warunkach może znajdować się w jednym z trzech stanów skupienia. Przykładowo woda, może mieć zarówno postać gazu, cieczy jak i ciała stałego. Tak samo inne pierwiastki, które są znane ze swojego stanu skupienia w warunkach normalnych, możemy doprowadzić do innych postaci fazowych. Wiedza ta jest bardzo cenna, jeżeli chcemy wytworzyć nowe, niestandardowe tarcze laserowe, których

woda to nie pierwiastek!

parametry wymagają pewnych modyfikacji ich podstawowych stanów skupienia. Zaznaczony na wykresie fazowym punkt potrójny, jest punktem charakterystycznym dla pewnych wartości ciśnienia oraz temperatury, w którym wszystkie trzy ~~różne~~ fazy współistnieją ze sobą w równowadze fazowej. Właściwość tego stanu skupienia stała się w pewnym sensie inspiracją do opracowania jednego z dwóch nowych urządzeń do wytwarzania tarcz hybrydowych, łączących zalety zarówno postaci materii w stanie stałym, ciekłym oraz gazowym. W celu głębszego przedstawienia tarcz laserowych, w dalszej części rozdziału przedstawię trzy podstawowe rodzaje tarcz laserowych bazujących na ciałach stałych, cieczach oraz gazach. Ich zalety oraz wady stały się motywacją do opracowania dwóch nowych systemów do wytwarzania tarcz laserowych bazujących na rozwinięciu systemów do wytwarzania tarcz gazowych w ramach poniższej pracy doktorskiej.

czy
chodzi
o to, ?
głęboko.

Na powyższym zdjęciu widoczne są intensywne wyłobienia powierzchni tarczy laserowej powstałej w formie obracającego się dysku wykonanego z żelaza. Degradacja tarczy powstała w wyniku oddziaływania impulsów lasera femtosekundowego z obracającą się tarczą oraz efektami wytworzenia się w obrębie jej powierzchni plazmy laserowej. Widoczna na zdjęciu plazma laserowa ma postać bardzo jasnego i intensywnego punktu znajdującego się w ognisku laserowym. Materiał powstały w wyniku ablacji tarczy osadzał się w całej powierzchni wewnętrznej komory próżniowej.

Mechanizm absorpcji energii elektromagnetycznej w tarczach laserowych stałych w wyniku oddziaływania z impulsami laserowymi polega na oddziaływaniu typu foton-elektron z elektronami swobodnymi (metale) materiału tarczy bądź z elektronami wzbudzonymi do pasma przewodnictwa (izolatory). Absorbpcja energii pochodzącej z impulsów laserowych odbywa się zawsze za pomocą elektronów swobodnych absorbujących energię z pola elektromagnetycznego wiązki laserowej, którą następnie przekazują dalej do jonów oraz fononów znajdujących się w materiale tarczy [47]. Plazma laserowa powstaje w wyniku dominacji zmian wielu procesów nierównowagowych nad procesami termicznymi zachodzącymi w materiale tarczy. Początkowa faza oddziaływania impulsu laserowego z tarczą laserową stałą polega na zaabsorbowaniu odpowiedniej ilości energii laserowej powodując punktowe ogrzewanie powierzchni tarczy aż do osiągnięcia temperatury parowania materiału. Materiał tarczy po przejściu z fazy stałej do fazy gazowej wytwarza chmurę elektronową inicjując docelową plazmę laserową. Wzbudzone promieniowaniem laserowym elektrony oraz jony w wytworzonej plazmie mogą powodować emisję spontaniczną promieniowania z plazmy laserowej. W wyniku wytworzenia się plazmy laserowej, zwiększa ona swoje rozmiary absorbując część promieniowania laserowego oraz oddziałuje z powierzchnią tarczy laserowej. Wytwarza jest falę uderzeniową, która propaguje się wewnątrz tarczy laserowej, oraz wytwarzane jest wysokie ciśnienie hydrodynamiczne, które wyrzuca materiał tarczy poza obszar oddziaływania z wiązką laserową.

Ilość zaabsorbowanej energii przez materiał tarczy laserowej stałej silnie zależy od gęstości mocy lasera, czasu trwania impulsu oraz jakości powierzchni tarczy (odbicie promieniowania laserowego, chropowatość powierzchni tarczy). Dominującymi procesami zachodzącymi w czasie oddziaływania są nagrzewanie, topnienie i parowanie materiału tarczy. Aby wszystkie powyższe procesy mogły zachodzić, niezbędne jest przekroczenie odpowiedniego progu gęstości mocy promieniowania laserowego I_{th} . Wpływ na wartość I_{th} mają rozmiar ogniska laserowego, czas trwania impulsu laserowego oraz energia impulsu

promieniowania / światła

pośrednictwem

to są dźwięki

skąd jony

?

to nie metal
tarczy
co jony

niepromiennie
mocy
f-a, f-b,
b-b
2 typy
składu
mij
pły

2.2. Tarcze ciekłe

Kolejnym rodzajem klasycznych tarcz laserowych wykorzystywanych w eksperymentach laserowych są tarcze ciekłe, znane także pod nazwą tarcz o ograniczonej masie (ang. *Mass Limited Target, MLT*). Pod względem fizycznym, tarcze tego typu charakteryzują się znacząco ograniczoną masą materii tarczy oraz niewielkimi rozmiarami geometrycznymi w porównaniu do tarcz wykonanych z ciała stałego. Wykonane są z materiałów znajdujących się w fazie ciekłej w momencie przed oddziaływaniem z impulsem laserowym. Pod względem chemicznym są podobne do tarcz stałych i mogą ~~składać się~~ ^{zestawiać} z praktycznie dowolnych pierwiastków. Wykorzystanie metali bądź gazów do produkcji tarcz w fazie ciekłej wymaga dodatkowych systemów grzania bądź chłodzenia do temperatur kriogenicznych komplikując budowę takiego systemu. Tarcze laserowe typu ciekłego w większości przypadków mają postać strugi cieczy [48, 49], mikro-kropel lub struktur koloidalnych (sprejów) [50] oraz jako produkty ablacji tarcz stałych [51, 52]. Mogą być wytwarzane zarówno impulsowo oraz w trybie ciągłego wytwarzania. Wymiary geometryczne pojedynczej tarczy laserowej typu *MLT*, mogą być zbliżone do rozmiarów ogniska laserowego. W zależności od konkretnego sposobu wytwarzania tarczy, mogą one wynosić od setek nanometrów do dziesiątek mikrometrów. Ich konkretny rozmiar zależy od wykorzystanego sposobu oraz materiału, z którego wytwarzana jest tarcza laserowa. Dążenie do zmniejszenia rozmiarów tarczy laserowej spowodowane jest jednym ze sposobów ograniczania procesów związanych z niejednorodnościami pola elektrycznego na zewnętrznych krawędziach obszaru oddziaływania tarczy laserowej z obszarem ogniska laserowego. Gęstość atomowa tarcz ciekłych jest zbliżona do gęstości tarcz wykonanych z materiałów stałych i średnio wynosi ok $n_{at} \approx 10^{22} \text{ at/cm}^3$. Wysoka gęstość tarcz *MLT* oraz ograniczone geometrycznie rozmiary przyczyniają się do zwiększenia absorpcji promieniowania laserowego oraz minimalizacją wytwarzania produktów ablacji. Charakter oddziaływania impulsów laserowych z tarczami *MLT* klasyfikuje je pomiędzy oddziaływaniem z tarczami stałymi o wymiarach ^{cm} fizycznych, dużo większych od ogniska laserowego ^{cm} oraz pomiędzy klastkami o wymiarach nanometrycznych.

Do wytwarzania tarcz ciekłych wykorzystywane są specjalne systemy zaworów przeznaczone do kontrolowanego dozowania pewnej porcji substancji w fazie ciekłej. Schemat przykładowego układu do wytwarzania tarcz *MLT* przedstawiłem na (Rysunek 8). Układ

chyba
powinno
być
wzrost
o gęstości
materii

oddziaływania w skali nanosekundowej oraz sub-nanosekundowej. Oddziaływanie impulsów nanosekundowych z tarczami *MLT* zdominowane jest ~~poprzez~~ procesy termiczne oraz hydrodynamiczne zachodzące w materiale jak i objętości tarczy laserowej. W skali nanosekundowej możemy wyróżnić następujące etapy oddziaływania: ogrzewanie oraz parowanie materiału tarczy, formowanie chmury gazowej wraz z występowaniem procesu jonizacji termicznej na brzegach fali uderzeniowej, propagacja fal uderzeniowych w przestrzeni wokół cząstki. W przypadku oddziaływania tarcz *MLT* z impulsami laserowymi o ultrakrótkich czasach trwania poniżej $\tau < 1 \text{ ps}$ oraz wysokiej intensywnościach powyżej $I > 10^{18} \text{ W/cm}^2$, plazma indukowana jest w procesie pośrednim, gdzie część energii laserowej przekształcana jest w elektrony relatywistyczne o energii rzędu *MeV*, których zadaniem jest transfer energii w głąb tarczy laserowej. W przypadku oddziaływania tarczy z ultrakrótkim impulsem laserowym o odpowiednio wysokim kontraście ($>10^8$), proces oddziaływania następuje bezpośrednio z tarczą w stanie statycznym, ponieważ w czasie trwania impulsu laserowego nie wystąpią żadne procesy hydrodynamiczne w materiale tarczy.

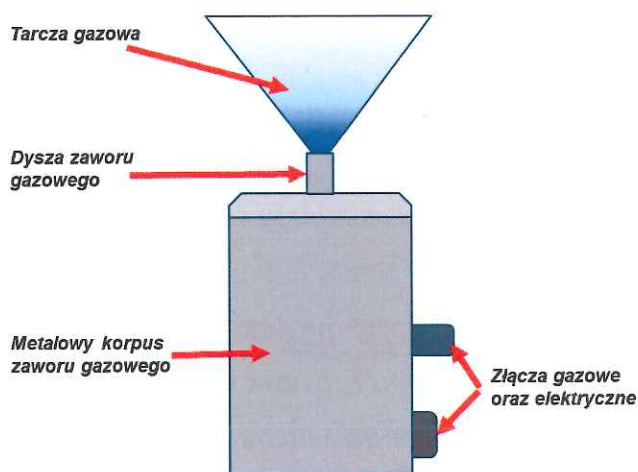
Tarcze *MLT* znalazły szczególne miejsce w badaniach dotyczących zagadnień astrofizycznych, zmian fazowych dla ekstremalnie wysokich ciśnień oraz temperatur, przejść fazowych pomiędzy fazą stałą oraz ciekłą i gazową czy też badań nad fuzją *IFC* (ang. *Inertial Confinement Fusion, ICF*). W swojej budowie wymagają stosowania precyzyjnych urządzeń do wytwarzania tarcz o określonych rozmiarach. Zmiany grubości bądź jednorodności materiału tarczy mogą znacząco wpłynąć na zachowanie się plazmy oraz proces formowania się plazmy laserowej. Tarcze *MLT* charakteryzują się ograniczoną produkcją zanieczyszczeń ablacyjnych oraz praktycznie nieograniczoną liczbą pierwiastków, które mogą być wykorzystane do produkcji tarczy. Znajdują zastosowanie w aplikacjach przemysłowych jako wydajne źródła promieniowania w zakresie skrajnego nadfioletu *EUV* oraz są wydajnym źródłem jonów, protonów oraz elektronów. Mogą być formowane na wiele sposobów jako systemy do wytwarzania tarcz hybrydowych o modyfikowanej gęstości i składzie tarczy. Możliwe jest wytworzenie tarcz laserowych zbudowanych jako aerozole, w których zarówno gaz jak i ciecz tworzą plazmę laserową.

2.3. Tarcze gazowe

Ostatnim rodzajem omawianych tarcz laserowych wykorzystywanych w eksperymentach oddziaływania impulsów laserowych z materią są tarcze gazowe. Pod względem fizycznym, mają one postać chmury gazowej o różnej wartości ciśnienia, od pojedynczych milibarów (10^{-3} bar) aż do pojedynczych barów (10^6 bar). W większości przypadków wytwarzane są przez impulsowe bądź ciągłe wstrzyknięcie odpowiedniej ilości gazu za pomocą dedykowanego do tego celu zaworu elektromagnetycznego. Wyływ gazu odbywa się poprzez odpowiednią dyszę gazową, której zadaniem jest formowanie strugi gazowej. Dysza ma przeważnie postać cylindrycznej rurki wykonanej z metalu o określonej średnicy i długości. Istnieją także wyspecjalizowane dysze naddźwiękowe, które spotykane są w literaturze pod nazwą dysz typu *de Laval*. W porównaniu do klasycznych dysz cylindrycznych, dysze *de Laval* charakteryzują się odpowiednio wyprofilowanym kanałem przepływu gazu wewnątrz dyszy, która w początkowym odcinku ulega zwężeniu, następnie rozszerzając się pod odpowiednim kątem α . Wyływ gazu z dysz *de Laval* osiąga prędkości naddźwiękowe podczas rozprężania się za obszarem przewężenia. Rozprężenie gazu powoduje wystąpienie przemiany adiabatycznej gwałtownie ochładzając wypływający gaz. Dysze naddźwiękowe wykorzystywane są do wytwarzania tarcz gazowych o ograniczonej ekspansji gazu do próżni oraz produkcji struktur klasterowych na bazie gazu. Pod pojęciem klastera gazowego kryje się nanostruktura quasi-krystaliczna zbudowana z wielu atomów gazu. Przez pewien niewielki okres, klastery gazowe mogą posiadać właściwości zarówno ciała stałego, cieczy oraz gazu, powracając ostatecznie do postaci gazowej. Systemy do wytwarzania tarcz gazowych mogą być także wyposażone w dodatkowe moduły chłodzenia kriogenicznego. Rozwiązania tego typu mogą być już traktowane jako tarcze typu *MLT*.

Typowe tarcze gazowe charakteryzują się ograniczoną liczbą pierwiastków znajdujących się w stanie gazowym które stanowią podstawową wadę tego typu tarcz. Typowa wartość gęstości atomowych dla tarcz gazowych znajduje się w przedziale $n_{at} \approx 10^{15} - 10^{21}$ at/cm³ [57]. Jest ona zależna od zastosowanego gazu, ciśnienia, temperatury a także przede wszystkim od odległości względem dyszy zaworu. Wyływ gazu do próżni ma charakter swobodnej ekspansji, a gęstość tak wytwarzanej tarczy gwałtownie maleje już w niewielkich odległościach od powierzchni dyszy. Plazma laserowa wytwarzana na bazie tarcz gazowych

powinna być wytwarzana w odpowiednio dobranej odległości od dyszy gazowej, na której występuje jeszcze odpowiednia gęstość tarczy. **Bliskość wytwarzania plazmy laserowej względem dyszy powoduje szybki proces jej degradacji.** Odstępstwem od powyższej metody wytwarzania tarcz gazowych w próżni są specjalne komórki gazowe (*ang. gas cells*), które wypełniane są odpowiednim gazem ^{poł} o niewielkim ciśnieniu ^{eluz}. Układy te są dedykowane do wytwarzania wysokich harmonicznych dla długości fali wiązki lasera oddziałującego z daną tarczą gazową [58]. Istnieją również systemy do wytwarzania tarcz gazowych, które wytwarzają wysoką gęstość ośrodka na odległości równej wielokrotności średnicy dyszy zaworu [59]. Systemy te składają się ze specjalnego dwugazowego zaworu oraz podwójnej, osiowosymetrycznej dyszy gazowej. Powyższe rozwiązanie zostało opracowane w ramach prac badawczych dotyczących tarcz gazowych w Instytucie Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie. Przykładowy schemat ideowy systemu do wytwarzania tarcz gazowych przedstawiłem na poniższym rysunku (Rysunek 9).



Rysunek 9. System do wytwarzania tarcz gazowych.

Urządzenie składa się z metalowego zaworu elektromagnetycznego typu *NZ* (normalnie zamknięty), który został wyposażony w odpowiednią dyszę wyjściową. Wytworzenie tarczy gazowej odbywa się w momencie impulsowego otwarcia zaworu i wpuszczenia odpowiedniej ilości gazu do komory próżniowej. Dla systemów tarcz wykorzystujących cylindryczną pojedynczą dyszę, rozptył gazu następuje zaraz po opuszczeniu dyszy. W przypadku systemów dwugazowych, wypływ gazu roboczego z którego wytwarzana jest plazma laserowa, jest silnie ograniczony przestrzennie za pomocą drugiego gazu o niskiej absorpcji wytwarzanego

2.4. Motywacja pracy

Ekspertyzy dotyczące wytwarzania plazmy indukowanej laserowo, należą do intensywnie rozwijanych prac badawczych. Badania te dotyczą poszerzaniu podstawowej wiedzy na temat fizyki, ^{STU 202} opracowywaniu nowych technologii oraz materiałów a także odkrywaniu nowych zastosowań opracowanej dotąd technologii. Tematyką oddziaływania impulsów laserowych z materią zajmuje się większość wiodących ośrodków badawczych na świecie, począwszy od małych laboratoriów wykorzystujących plazmę laserową do celów diagnostycznych, poprzez badania materiałowe kończąc na wykorzystaniu plazmy laserowej jako silnego źródła promieniowania w procesach fotolitografii oraz wykorzystania jej do przeprowadzenia kontrolowanej fuzji termojądrowej.

Przedstawione w rozdziale 2 trzy podstawowe typy tarcz laserowych w wielu przypadkach stanowią pewien etap przejściowy na bazie którego ^{ych} powstają nowe rozwiązania o lepszych parametrach. Tarcze laserowe wykonane z ciał stałych charakteryzują się najwyższą jasnością źródeł plazmowych oraz mają praktycznie nieograniczone zasoby materiałów, z których mogą być wykonane. Przeważnie mają postać taśm, prętów oraz cylindrycznych dysków. Głównymi wadami tarcz stałych jest wytwarzanie dużej liczby zanieczyszczeń, konieczność kontroli parametrów tarczy oraz okresowa wymiana na nową. Klasyczne tarcze gazowe charakteryzują się niższą gęstością ośrodka tarczy jednak nie produkują żadnych zanieczyszczeń wewnątrz komory próżniowej. Ich największą wadą jest ograniczony zasób substancji znajdujących się normalnie w stanie gazowym co przekłada się na ograniczone parametry widmowe plazmy laserowej. ^{2 kolec} Tarcze typu *MLT* są połączeniem obu rodzajów tarcz, gdyż miejscowo możemy je traktować jako tarcze o gęstości bliskiej gęstości tarcz stałych, jednak ograniczone rozmiary przestrzenne powodują zmniejszoną produkcję zanieczyszczeń ablacyjnych. Na podstawie przeprowadzonej analizy istniejących systemów do wytwarzania tarcz laserowych, zaistniała potrzeba opracowania nowego rozwiązania łączącego w sobie pewne parametry charakteryzujące tarcze gazowe, ciekłe oraz stałe. Wymagania te mogą zostać osiągnięte w przypadku tarcz klasterowych a także specyficznych tarcz aerozolowych.

Na podstawie określenia tematu badawczego zaproponowane zostały problemy badawcze będące teżami ^{ty} poniżej pracy, która ma charakter ściśle eksperymentalno – konstruktorski.

3. Realizacja impulsowych tarcz nowego typu

W poprzednim rozdziale przedstawiłem problematykę wytwarzania plazmy laserowej na bazie różnego rodzaju tarcz. Omówione zostały trzy podstawowe rodzaje tarcz laserowych, tj. tarcze stałe, ciekłe i także gazowe. Na podstawie przedstawionych typów i parametrów powyższych tarcz laserowych zaproponowałem również trzy tezy mojej pracy doktorskiej, dotyczących nowych systemów do wytwarzania tarcz laserowych.

W ^eponiższym ^{typu} rozdziale przedstawię potrzebę opracowania nowego rodzaju tarcz laserowych wraz z wyjaśnieniem tematyki ~~klasterów~~ oraz aerozoli w zastosowaniu jako tarcze laserowe. W dalszej części rozdziału zamieściłem opis opracowanych przeze mnie konstrukcji dwóch nowych systemów do wytwarzania tarcz laserowych typu hybrydowego, bazujących na rozwinięciu systemu do wytwarzania tarcz gazowych, opracowanego w Instytucie Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie. Zaprezentowane urządzenia stanowią efekt kilkuletniego etapu prac dotyczących rozwoju systemów tarcz gazowych. W ^{ej}głównym ^{miane}wymiarze, prace te skupiły się na możliwości wpływania na parametry wytwarzanej tarczy laserowej, wykorzystując zjawiska przejść fazowych dla wybranych gazów atomowych oraz molekularnych, a także opracowaniu nowej metody oraz urządzenia umożliwiającego wytworzenie struktury aerozolowej bezpośrednio w warunkach próżniowych z różnego rodzaju substancji znajdujących się w stanie ciekłym.

W ^{pięknym przykładzie}przypadku pierwszego rozwiązania, opracowany przeze mnie system wykorzystuje rozwiązanie dwustrumieniowego zaworu gazowego oraz dodatkowego, wysokowydajnego układu chłodzenia termoelektrycznego. Zadaniem układu chłodzenia jest schłodzenie zaworu gazowego do wystarczająco niskiej temperatury, która umożliwi zapoczątkowanie wytwarzania się ~~klasterów~~ gazowych w strukturze wytwarzanej tarczy gazowej. Wytwarzanie struktur gazowo-klasterowych jest jedną z metod wpływania na miejscowe zagęszczenie tarczy laserowej, która może mieć wpływ na efektywność wytwarzania się plazmy laserowej oraz zwiększenie jasności takiego źródła w porównaniu do wykorzystania klastycznej tarczy gazowej.

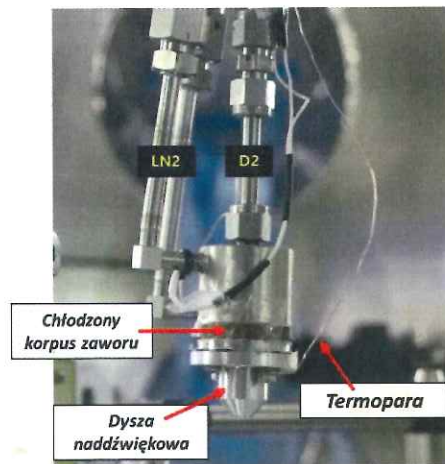
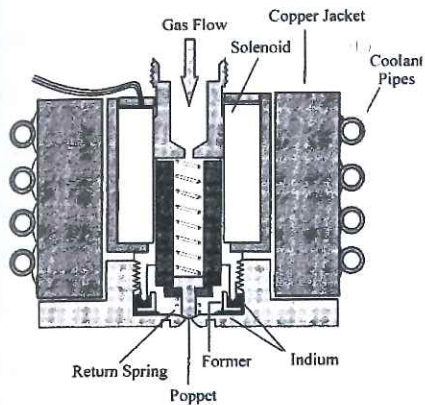
3.1. Uzasadnienie szukania nowych rozwiązań

Wytwarzanie plazmy laserowej w warunkach laboratoryjnych związane jest często z koniecznością posiadania źródła emitującego promieniowanie elektromagnetyczne o ściśle wyselekcjonowanych a zarazem specyficznych parametrach, głównie takich jak zakres widmowy emitowanego promieniowania oraz jego intensywność. Jak wspomniałem we wcześniejszym rozdziale, parametry promieniowania emitowanego przez plazmę laserową są ściśle powiązane zarówno z parametrami tarczy laserowej, głównie jego składem chemicznym, gęstością a także parametrami wykorzystanych systemów laserowych. W przypadku systemów laserowych dużej mocy, stosowanych w laserowo-plazmowych źródłach promieniowania, możliwości stosunkowo szybkiej zmiany kluczowych parametrów, takich jak długość fali promieniowania lasera λ , czy też zmiana czasu trwania impulsu τ są przeważnie praktycznie niemożliwe i docelowo wiążą się z koniecznością zastosowania całkowicie innego systemu laserowego. W związku z powyższym, jedyną realną możliwością wpływania na parametry plazmy indukowanej laserowo ~~ograniczają się~~ do zmiany warunków pracy systemu wytwarzającego daną tarczę laserową bądź możliwie szybkiej, wymiany danej tarczy laserowej na inną, o zmienionych parametrach fizycznych. fizyko-chemicznych

Powszechnie wykorzystywane systemy do wytwarzania plazmy indukowanej laserowo bazują ~~na~~ jednym z trzech opisanych wcześniej typów tarcz laserowych: tarczach stałych, ciekłych bądź gazowych. Rozwiązania te niosą ze sobą przytoczone już wcześniej korzyści oraz pewne wady, stanowiące ograniczenie dla wykorzystania potencjału systemów laserowych wielkiej mocy [60]. Rodzaj zastosowanej tarczy laserowej oraz systemu laserowego w dużej mierze ~~powiązany~~ jest z konkretnymi założeniami badawczymi, charakterem danego eksperymentu bądź rodzajem konkretnej aplikacji przemysłowej. Istniejące rozwiązania komercyjne ~~możliwych~~ systemów do wytwarzania tarcz laserowych są niestety mocno ograniczone, z uwagi na typowo badawczy charakter takich urządzeń. W celach przemysłowych, konkretne rozwiązanie jest ściśle optymalizowane ~~do warunków pracy~~ jak i parametrów końcowych urządzenia, uwzględniając całkowity długoterminowy koszt użytkowania oraz jego niezawodność (np. steppery do fotolitografii w zakresie EUV bazujące na plazmie Sn oraz laserze CO₂ [61]). W przypadku tarcz laserowych w postaci stałej (np. taśmy, pręty bądź cylindry), ich fizyczne wykonanie jest często realizowane bezpośrednio przez dane

instytucje badawcze jako część eksperymentalna, bądź też przez podmioty ściśle z nimi współpracujące. Wykonanie tego typu tarcz jest stosunkowo łatwe i w większości przypadków nie stanowi wyzwania technicznego. Dla systemów tarcz ciekłych (MLT), zgodnie z posiadaną wiedzą, nie istnieją żadne systemy oferowane komercyjnie jako produkty dla użytkownika końcowego. Większość tego typu rozwiązań stanowi pewien problem badawczy i jest realizowana w ramach badań podstawowych lub produktów celowych, często jednostkowych. Dla systemów tarcz gazowych, w chwili obecnej, ok. 90% rynku jest obsługiwane przez rozwiązania jednogazowe opracowane w firmie *Parker Hannifin Corporation*, USA [62]. Oferowane przez firmę produkty w postaci wysokociśnieniowych zaworów gazowych umożliwiają impulsowe bądź ciągle wytwarzanie tarcz gazowych z wykorzystaniem różnego rodzaju gotowych oraz dedykowanych dysz gazowych. Topowy produkt stanowią zawory z serii *Pulse Valves – Miniature High Speed High Vacuum Dispense*, a ich główną aplikacją według informacji producenta jest właśnie wytwarzanie tarcz gazowych do eksperymentów laserowych. Zawory te, w zależności od zastosowanej dyszy służą do wytwarzania różnego rodzaju tarcz gazowych a także struktur gazowo-klastrowych o zwiększonej gęstości tarczy poprzez zastosowanie odpowiedniej dyszy stożkowej lub Lavalą oraz dodatkowy układ chłodzenia kriogenicznego.

Jedną z metod zwiększenia gęstości wytwarzanej tarczy laserowej bazującej na systemie jedno gazowym jest maksymalizacja ciśnienia gazu ($P > 50 \text{ bar}$), stosowanie specjalnych dysz stożkowych lub dysz Lavalą [63, 64]. Kolejną formą poprawy parametrów tarcz gazowych jest zastosowanie wspomnianego w poprzednim rozdziale układu chłodzenia kriogenicznego zaworu gazowego oraz wytwarzanie struktur klastrowych [65, 66]. Połączenie obu metod, tj. chłodzenia kriogenicznego zaworu oraz wypływu gazu pod wysokim ciśnieniem poprzez dyszę o średnicy setek μm umożliwia wytworzenie struktur zarówno klastrowych jak i kropelkowych w obszarze tarczy laserowej [67]. Metoda wytwarzania tarcz o podwyższonej gęstości za pomocą wspomnianych metod może być jednak stosunkowo kłopotliwa, a także bardzo niebezpieczna dla systemów próżniowych i eksperymentatorów. Przykładowy schemat układu do wytwarzania tarcz klastrowych chłodzonych kriogenicznie oraz zdjęcie opracowanego systemu do wytwarzania tarcz klastrowych przedstawiłem na Rysunek 11.



Rysunek 11. Schemat układu eksperymentalnego z wykorzystaniem systemu do wytwarzania tarcz klastrowych metodą chłodzenia kriogenicznego oraz dyszy typu Laval'a (a), zdjęcie zaworu (b) [68]

Główną wadą ~~tego~~ powyższych systemów jest wymóg stosowania bardzo wysokich ciśnień gazów, które silnie zaburzają jakość próżni oraz konieczność posiadania wysokociśnieniowej instalacji gazowej wraz z odpowiednim zapasem gazów. Wysokie zużycie gazów oraz spadek jakości próżni wymagają zastosowania pomp próżniowych o odpowiednio dużej wydajności. Powoduje to konieczność zwiększenia poziomu skomplikowania systemu próżniowego znacząco zwiększając jego koszt budowy. System chłodzenia kriogenicznego, którego zadaniem jest wytworzenie struktur klastrowych wymaga także zapewnienia odpowiednich przyłączy próżniowych oraz obligatoryjnie zapewnienia wysokiej szczelności i niezawodności instalacji chłodniczej. Ewentualna awaria tego systemu w warunkach próżniowych może być katastrofalna w skutkach zarówno dla samej aparatury badawczej jak i nadzorujących eksperymentatorów.

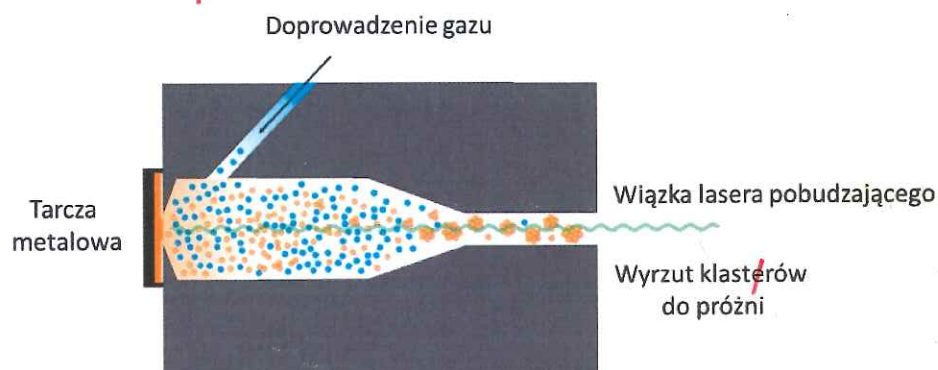
Wspomniane powyżej pojęcia dotyczące klastrowych oraz struktur gazowo-klastrowych, które przewijają się już kilkakrotnie w poniższej pracy wymagają szerszego i dokładnego wyjaśnienia. ~~Co~~ czym są klastery i dlaczego stanowią ciekawą alternatywę w zastosowaniach tarcz laserowych do eksperymentów badawczych? Klastery, razem z atomami i molekułami należą do grupy najmniejszych form materii występującej w warunkach normalnych. W większości przypadków mamy do czynienia z dobrze poznaną i powszechnie otaczającą nas materią masową w postaci różnych cieczy czy ciał stałych o znanych nam właściwościach. Pod pojęciem klastera może być zarówno struktura pochodząca z ciał stałych jak i bezpośrednio z gazów. Klastery w czystej postaci są to agregaty wielu atomów, cząsteczek lub jonów, które przylegają do siebie pod wpływem sił podobnych do tych, które wiążą atomy, jony lub

cząsteczki materii masowej. Istnieją klastry utrzymywane razem przez siły *Van der Waalsa*, siły jonowe, wiązania kowalencyjne i wiązania metaliczne [69]. Pomimo pewnych podobieństw sił wiążących klastry oraz materię masową, właściwości fizyczne klastrow różnią się od właściwości odpowiadającego im materiału masowego (np. gazu w postaci ciekłej). Same klastry mogą różnić się swoimi właściwościami nie tylko w odniesieniu do materii stałej (masowej) ale także względem innych klastrow, w zależności od liczebności atomów lub cząsteczek w danym klastrze. Klastry dzielą niektóre właściwości fizyczne charakterystyczne dla ciał stałych a także mogą znajdować się w fazie ciekłej, jeżeli ich temperatura jest wystarczająco niska. W porównaniu do układów zbudowanych z cząsteczek, klastry mogą mieć dowolną liczbę atomów składowych oraz przyjmować dowolną geometrię. Układy cząsteczkowe mają określone warunki do istnienia, mogą przyjmować tylko znane i dozwolone struktury. Jeżeli klastry będą składały się z niewielkiej liczby atomów składowych, mogą być uważane za układy cząsteczkowe. W przypadku klastrow o bardzo dużej liczbie atomów składowych, mogą być one podobne i uważane już za materię masową. Właściwości fizyczne klastrow, których rozmiar znajduje się pomiędzy tymi skrajnościami, mogą być zarówno podobne do jednego z nich lub całkowicie się od nich różnić. Małe klastry składające się z N -atomów, różnią się znacząco od materii masowej w prawie wszystkich swoich właściwościach fizycznych. W przypadku, kiedy klastry ewoluują w czasie zmieniając liczbę swoich atomów, ich właściwości również będą się w sposób ciągły zmieniały. Właściwość ta jest charakterystyczna dla struktur klastrowych, ponieważ w porównaniu do znanej materii masowej, jej właściwości fizyczne nie zmieniają się w przypadku zmiany N -atomów składowych i pozostają stałe. Średniej wielkości klastry mają zmienne właściwości fizyczne, które zmieniają się płynnie wraz z liczbą N -atomów składowych. Właściwości fizyczne takie jak temperatura topnienia, różnią się znacząco od właściwości odpowiadającej im masy. Duże klastry mają właściwości, które zmieniają się płynnie wraz z liczbą N -atomów i wyraźnie łączą się z właściwościami ich masowych odpowiedników. Powodem takiego szerokiego zakresu jest to, że klastry o pewnych dużych wartościach N , znanych jako liczby magiczne (*ang. magic numbers, N*) [70], mogą przyjmować niezwykle stabilne struktury geometryczne o dużych energiach wiązań nie będąc jednocześnie materią masową w klasycznym rozumieniu [71, 72, 73]. W przypadku małych klastrow o małych wartościach N , dominujące są niskie energie wiązań, które przekładają się na niewielką liczbę stabilnych form istnienia. Średniej wielkości klastry charakteryzują się przez zmienną wartość energii wiązań wraz ze zmianą parametru N . Jednak w większości są to znacznie niższe wartości energii wiązań w porównaniu do materii

^{obj.}masowej. W odróżnieniu ^{od} do materii ^{obj.}masowej, struktura ułożenia klastrów ma całkowicie inną postać. Cząsteczki klastrów tworzą bryły otwarte, w których większość atomów znajduje się na powierzchni struktury klastra. Materia ^{obj.}masowa ma większość atomów umieszczonych wewnątrz swojej objętości, a na powierzchni danej materii znajduje się tylko ułamek atomów składowych. Większość powszechnie występujących ciał stałych ^{występuje w formie} jest krystaliczna a kolejną różnicą pomiędzy klastrami a ciałami stałymi jest to, że klastry nie przyjmują struktur krystalicznych charakterystycznych dla większości ciał stałych. Klastry mogą występować w postaci różnych struktur geometrycznych wielościennych, zarówno kompletnych jak i otwartych, które nie mogą rosnąć w okresowe siatki sieci krystalicznych. Jedną z trudnych zagadek nauki o klastrach jest wyjaśnienie, w jaki sposób, w miarę wzrostu agregatu ^uklasterowego, przekształca się on z wielościennej struktury ^uklasterowej do struktury ^usieci krystalicznej materii ^{obj.}masowej. Niektóre właściwości klastrów odzwierciedlają ich niewielki rozmiar w bardziej subtelny sposób, który zależy od zjawisk **mechaniki kwantowej**. Jedną z takich **właściwości jest charakter poziomów energetycznych zajmowanych przez elektrony**. W przypadku struktur klastrowych, mogą wystąpić zjawiska powodujące zmianę struktury pasmowej, które ^ubeda różniły się w ^uprzypadku porównania danego pierwiastka do materii ^umasowej. Zmiana struktur pasmowych oraz właściwości fizycznych klastrów skierowały na ^uniezainteresowanie świata naukowego jako nowego materiału ^udo wytwarzania tarcz laserowych w procesie wytwarzania plazmy laserowej. Tarcze laserowe zawierające klastry gazowe skupiły na sobie zainteresowanie wielu instytutów badawczych, ^uktóre wykazały znaczny wzrost absorpcji ultrakrótkich ^uimpulsów laserowych na strukturach ^uklasterowych niż ma to miejsce w czystych systemach tarcz gazowych oraz tarczach stałych [74, 75]. Właściwość ta jest szczególnie ważna dla wydajnego wytwarzania plazmy wysokotemperaturowej emitującej promieniowanie w zakresie *SXR / EUV* [76, 77, 78] czy też generowania szybkich elektronów oraz jonów [79]. Źródła laserowo-plazmowe wykorzystujące tarcze ^uklasterowe mogą być wykorzystywane w procesie fotolitografii, ^umedycynie, biologii oraz innych naukach technicznych [80, 81, 82, 83, 84, 85, 86]. Prowadzone są także badania dotyczące wykorzystania tarcz ^uklasterowych do wydajnego generowania promieniowania w zakresie terahercowym [87] oraz wysokich harmonicznych [88].

Rozważając systemy do wytwarzania tarcz laserowych bazujących na układach ^uklasterowych, poza przytoczoną wcześniej metodą wytwarzania klastrów gazowych, istnieją również systemy hybrydowe do wytwarzania mieszanych tarcz ^uklasterowych na bazie ciał stałych. Metoda wytwarzania tego typu tarcz wykorzystuje produkty ablacji laserowej ciała

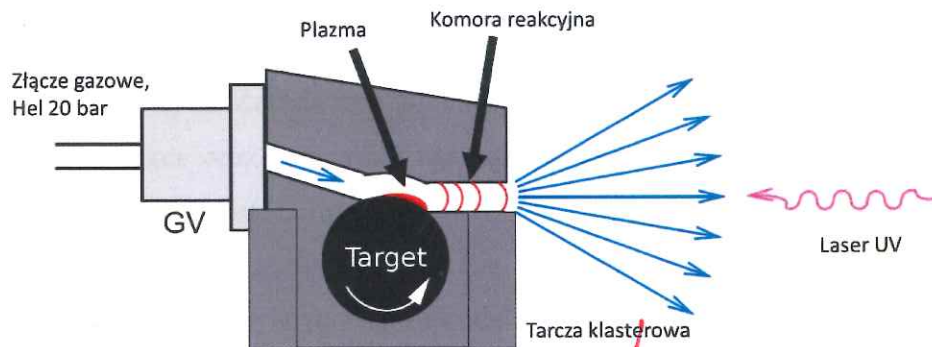
stałego jako źródła klast~~er~~ów, które są formowane w specjalnie opracowanym do tego celu systemie gazowym. Wytworzona w ten sposób struktura tarczy laserowej ma charakter tarczy gazowej zawierającej klast~~er~~ę lub mikrocząsteczki o innej budowie fizyko-chemicznej w porównaniu do tarcz gazowo-klast~~er~~owych, wytwarzanych **metodą kriogenicznego ochładzania gazu pod wysokim ciśnieniem**. Wykorzystanie tego typu tarczy umożliwia znaczącą ^{NO₂} modyfikację parametrów plazmy laserowej. Sama procedura wytwarzania takiego typu tarcz jest bardziej skomplikowana, ponieważ poza specjalnym systemem do wytwarzania tarczy laserowej konieczne jest wykorzystanie dotychczasowej linii laserowej do wytworzenia produktów ablacji. Przykładowe rozwiązania systemowe opracowanych układów przedstawiłem na Rysunek 12 oraz Rysunek 13. Pierwsze przytoczone rozwiązanie wykorzystuje specjalnie opracowany system składający się z zaworu gazowego wewnątrz którego umieszczona jest metaliczna płytką pełniącą rolę tarczy stałej, komora reakcyjna, w której następuje proces mieszania się produktów ablacji z gazem oraz dwa otwory, jeden pełniący funkcję doprowadzenia gazu, drugi będący jednocześnie dyszą wyjściową dla tarczy gazowo-klast~~er~~owej oraz wprowadzeniem wiązki laserowej do wnętrza systemu. Docelowa struktura tarczy gazowo-klast~~er~~owej ^{NO₂} ma postać swobodnego wypływu gazu do próżni, w którym znajdują się cząsteczki klast~~er~~ów pochodzących z materia~~łu~~ tarczy ciała stałego.



Rysunek 12. Wytwarzanie tarcz klast~~er~~owych metodą ablacji laserowej w atmosferze gazu buforowego [89].

W przypadku drugiego rozwiązania, idea działania systemu jest identyczna. Docelowa tarcza laserowa formowana jest w wyniku mieszania produktów ablacji pochodzących z materiałów tarczy stałej z gazem wypełniającym wnętrze systemu do wytwarzania tarczy laserowej zawierającej klast~~er~~ę. Urządzenie ma postać bryły, wewnątrz której umieszczony jest obracający się cylinder, który stanowi tarczę laserową do wytwarzania produktów ablacji. We wnętrzu urządzenia znajduje się także komora reakcyjna, w której następuje proces mieszania

i formowani się docelowej tarczy gazowo-kłasterowej. Proces wytwarzania kłasterów jest w tym przypadku bardziej równomierny z uwagi na zastosowany system obrotowego cylindra zaczerpnięty z rozwiązań układów do wytwarzania laserowych z ciał stałych. Moment oddziaływania ^{każdy impuls} impulsów lasera UV ^{odbiśnie} następuje z nowym obszarem tarczy znajdującej się wewnątrz systemu do wytwarzania tarcz kłasterowych. Tarcza stała może być dodatkowo poddawana procesowi obróbki termicznej, zarówno przez układ chłodzenia jak i grzania, który może wpływać na rozmiary wytwarzanych produktów ablacji.

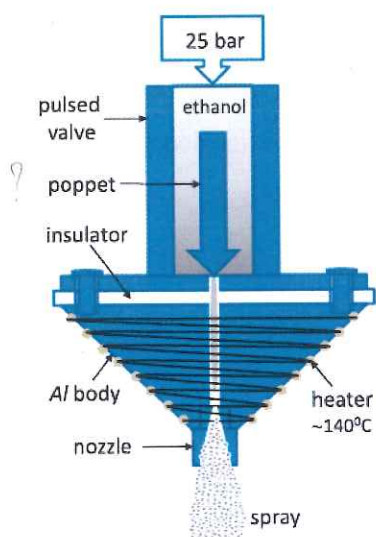


Rysunek 13. System do wytwarzania tarcz kłasterowych na bazie materiałów stałych [90].

Kolejnym rozwiązaniem ^{technicznym} technologicznym, umożliwiającym wytwarzanie tarcz laserowych typu *MLT* o zwiększonej gęstości mogą być tarcze bazujące na aerozolach. Struktury aerozolowe stanowią pewnego rodzaju układ koloidalny składający się z ośrodka rozpraszającego oraz ^{alnych} cząsteczek koloidowych. Czynnikiem rozpraszającym może być dowolny gaz o określonym ciśnieniu, w którym rozpraszane są cząsteczki cieczy lub ciała stałego o niewielkich rozmiarach ^{rozmiar} geometrycznych. Typowe wartości cząsteczek aerozoli w warunkach normalnych mieszczą się w przedziale do $d=10\mu\text{m}$. Wytwarzanie aerozoli możliwe jest w wyniku rozpylenia ^a ciągłego bądź impulsowego danej substancji za pomocą dedykowanej do tego celu dyszy w środowisku gazowym. Dysze te mogą mieć postać zarówno stożków o określonym kącie rozpylania jak i prostej rurki (kapilary) o niewielkiej średnicy. Materiał stanowiący koloid wypuszczany jest pod odpowiednio wysokim ciśnieniem do atmosfery tworząc wspomniany aerozol. Głównym problemem wytwarzania tarcz aerozolowych jest środowisko próżniowe. Fizyka wytwarzania aerozoli uniemożliwia bezpośrednie przeniesienie klasycznych układów do wytwarzania aerozoli ciekłych bezpośrednio do środowiska próżniowego. Mechanizm działania takiego układu w warunkach próżniowych spowoduje wytwarzanie struktur w postaci intensywnych strug cieczy bądź gwałtownego rozproszenia ^{wspylenia?}

materiału stałego stanowiącego cząsteczki koloidu w całej objętości komory próżniowej. ^{Opisane} ~~Przytoczone~~ wcześniej systemy do wytwarzania tarcz klastrowych na bazie substancji stałych możemy w pewnym sensie zakwalifikować jako systemy aerozolowe, ponieważ występuje tutaj sytuacja wytwarzania mieszaniny cząsteczek stałych w atmosferze gazowej.

Problemy technologiczne związane z systemami do wytwarzania tarcz aerozolowych spowodowały ograniczoną liczbę prac badawczych dotyczących tego typu układów. Jednym z nielicznych działających rozwiązań, które umożliwiają wytwarzanie tarcz aerozolowych na bazie substancji ciekłych, jest system opracowany przez zespół *Ter-Avetisyan, Schnürer, Nickles*. Urządzenie ^{to} zostało opatentowane jako układ do wytwarzania tarcz ciekłych typu spray w warunkach próżniowych. Zasada działania powyższego systemu bazuje na układzie zaworu gazowego firmy Parker oraz specjalnej nakładki grzejnej z umieszczoną wewnątrz dyszą rozpylającą. Nakładka ma postać aluminiowego stożka o izolowanej podstawie, na powierzchni którego znajduje się grzałka elektryczna. Centralnie w stożku umieszczona jest dysza rozpylająca, której konstrukcja bazuje na rozwiązaniach dysz typu *de Laval*. Zadaniem grzałki jest zapewnienie odpowiednio wysokiej temperatury dyszy, która jest znacznie wyższa od temperatury wrzenia rozpylanej cieczy. Opracowany system umożliwia wytwarzanie tarcz na bazie prostych chemicznie substancji ciekłych (np. etanolu, wody), które są wstrzykiwane pod bardzo wysokim ciśnieniem przez gorącą dyszę bezpośrednio do próżni. Schemat konstrukcyjny opracowanego rozwiązania oraz zdjęcie gotowego systemu do wytwarzania tarcz laserowych typu *spray* zamieściłem na Rysunek 14.

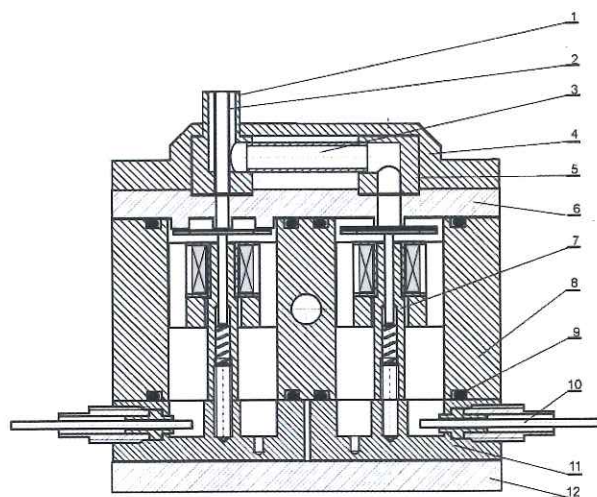


Rysunek 14. System do wytwarzania tarcz aerozolowych metodą termosprejów [91, 92].

Alternatywnym rozwiązaniem mającym na celu poprawę parametrów tarcz gazowych jest opracowany w Instytucie Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej system do wytwarzania podwójnej tarczy gazowej (*ang. double stream gas-puff target*). Opracowane urządzenie umożliwia wytwarzanie specjalnej struktury tarczy gazowej na bazie dwóch różnych gazów: gazu roboczego o wysokiej liczbie atomowej Z oraz gazu buforowego, lekkiego, o jak najmniejszej liczbie atomowej Z . Specjalna konstrukcja zaworu oraz podwójnej dyszy gazowej, umożliwia wytwarzanie tarczy gazowej o gęstości do $n_{at} = 10^{19} \text{ at/cm}^3$ w odległości większej niż 1 mm nad powierzchnią dyszy. W porównaniu do rozwiązania oferowanego przez firmę Parker, system do wytwarzania podwójnej tarczy gazowej nie wymaga ani chłodzenia kriogenicznego ani stosowania wysokich ciśnień gazów, aby otrzymać wysoką gęstość danej tarczy gazowej. Typowe wartości ciśnień wykorzystywanych gazów nie przekraczają $P = 10 \text{ bar}$, umożliwiając jednocześnie korzystanie z gazów znajdujących się w małych i przenośnych butlach. Czas wytwarzania samej tarczy jest również znacznie krótszy i wynosi typowo ok $t_{op} = 500 \mu\text{s} - 600 \mu\text{s}$.

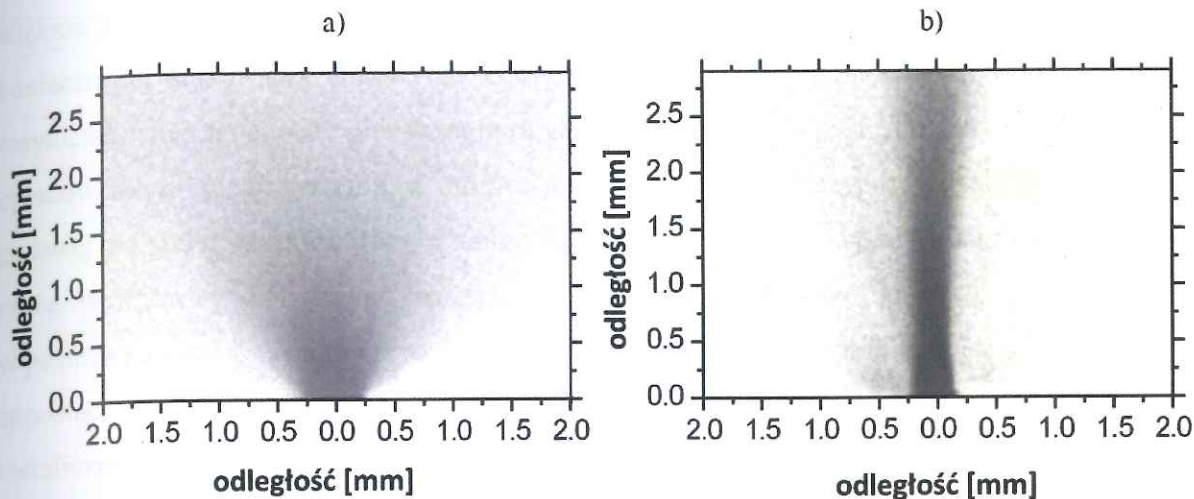
Pod względem konstrukcyjnym, system do wytwarzania podwójnej tarczy gazowej powstał w wyniku połączenia dwóch niezależnych zaworów do wytwarzania tarcz gazowych umieszczonych w jednym korpusie oraz specjalnie opracowanej do tego celu dyszy gazowej. Sama tarcza gazowa powstaje w wyniku impulsowego wstrzykiwania niewielkich porcji gazów poprzez podwójną osiowosymetryczną dyszę cylindryczną. Proces formowania tarczy jest ściśle zsynchronizowany z systemem laserowym za pomocą dedykowanego sterownika. Schemat budowy zaworu do wytwarzania podwójnej tarczy gazowej przedstawiłem na Rysunek 15. Urządzenie składa się z stalowego korpusu, wewnątrz którego umieszczone zostały dwa niezależne od siebie sekcje zaworów elektromagnetycznych, normalnie zamkniętych. Przestrzeń wypełniająca moduł elektromagnesu pełni także funkcję zbiornika wyrównawczego dla ciśnienia gazów. Otwarcie zaworu odbywa się poprzez przyłożenie odpowiedniego impulsu napięciowego do zacisków elektromagnesów poszczególnych zaworów.

jak
jak
podobnie
i jitter



Rysunek 15. Przekrój budowy zaworu oraz dyszy gazowej do wytwarzania podwójnej tarczy gazowej (1 – dysza 1, 2 – dysza 2, 3 – tulejka łącząca, 4 – nakładka, 5 – kolanko, 6 – pokrywa, 7 – zespół elektromagnesu, 8 – korpus, 9 – o-ring, 10 - zespół elektrody, 11 – podstawa, 12 – płytkę dociskową).

W czasie trwania impulsu zasilającego następuje pełne otwarcie obu zaworów elektromagnetycznych oraz zaczyna się proces formowania tarczy gazowej. Tarcza gazowa wytwarzana jest poprzez odpowiedni wypływ strugi gazu roboczego, którego rozplw przestrzenny jest silnie ograniczony drugim gazem - gazem buforowym. Osiowosymetryczna dysza gazowa ma postać dwóch rurek o różnych średnicach, mniejszej d_1 oraz większej d_2 , umieszczonych jedna wewnątrz drugiej. Dysza o mniejszej średnicy, d_1 , odpowiedzialna jest za wypływ gazu roboczego, natomiast dysza, d_2 , zewnętrzna wstrzykuje gaz lekki, buforowy. Powyższe rozwiązanie umożliwia impulsowe wytwarzanie tarczy gazowej o strukturze silnej strugi gazu roboczego z ostro zaznaczonymi granicami gazów. Porównanie cieniogramów dla jednogazowej oraz podwójnej tarczy gazowej wykonanych metodą radiografii przedstawiłem na Rysunek 16. Ciemny obszar na powyższych cieniogramach określa gęstość gazu tworzącego tarczę. W przypadku klasycznej tarczy gazowej pojedynczej (Rysunek 16 a)), widoczny jest silny spadek gęstości gazu zaraz po opuszczeniu dyszy zaworu gazowego. Podwójna tarcza gazowa (Rysunek 16 b) umożliwia uzyskanie wysokich gęstości gazu w odległości kilku mm nad powierzchnią dyszy. Sama plazma laserowa wytwarzana na bazie podwójnej tarczy gazowej wytwarzana jest w gęstym ośrodku gazu roboczego. W porównaniu do plazmy laserowej wytwarzanej za pomocą klasycznej tarczy jednogazowej, charakteryzuje się ona większą jasnością, szerszym zakresem widmowym i większą sprawnością wytwarzania plazmy.

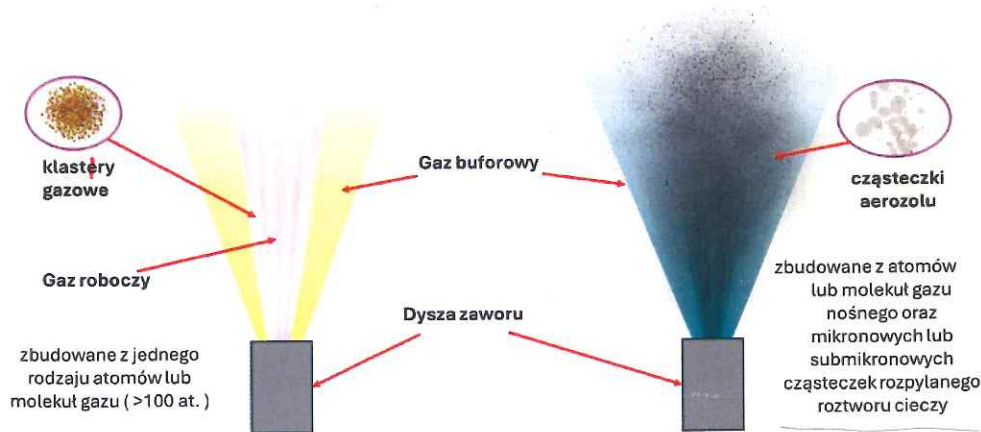


Rysunek 16. Zobrazowanie tarcz gazowych wykonanych metodą radiografii impulsowej: pojedyncza tarcza gazowa (a), podwójna tarcza gazowa (b) [93].

System do wytwarzania podwójnej tarczy gazowej może być traktowany jako jeden z etapów optymalizacji systemów do wytwarzania tarcz gazowych. Posiada on cechy rozwiązań innowacyjnego oferującego nowe możliwości. Ograniczeniem tego rozwiązania jest możliwość wytwarzania tylko tarcz gazowych. Dalszy proces rozwoju systemu do wytwarzania tarcz gazowych może prowadzić do wprowadzenia modyfikacji, które umożliwią pojawianie się struktur klastrowych w wytwarzanej tarczy gazowej przy jednoczesnym względny zachowaniu parametrów pracy zaworu gazowego bądź wytwarzania struktury aerozolowej wytwarzanej na bazie klasycznych systemów tarcz gazowych.

Analizując aktualny stan wiedzy oraz możliwości techniczne, skupiłem się na realizacji badań podstawowych dotyczących możliwości opracowania nowych rozwiązań dla systemów wytwarzania tarcz laserowych, w których bazę stanowią systemy do wytwarzania tarcz gazowych. Głównym problemem badawczym było opracowanie nowych systemów, których parametry przewyższają istniejące rozwiązania bądź też znacznie upraszczają zasadę działania oraz poziom skomplikowania istniejącego rozwiązania. Pierwszym opracowanym rozwiązaniem tego typu jest konstrukcja systemu do wytwarzania tarcz gazowych zawierających duże klastery gazowe o parametrach lepszych niż dotychczas istniejące rozwiązania. Niestety ograniczeniem fizycznym takiego systemu jest również skończona liczba gazów które mogą być wykorzystane do formowania tarczy laserowej. Uwzględniając jednak informację, że dotychczasowe systemy gazowo-klastrowe wytwarzają struktury nanometrowe, moim celem było opracowanie urządzenia, w którym klastery mają znacznie

większe rozmiary, rzędu pojedynczych mikrometrów, przechodząc do postaci masowej bez konieczności stosowania chłodzenia kriogenicznego i dyszy typu Lawała. Idąc dalej, aby rozwiązać niedogodność pierwszego urządzenia, dalsze prace dotyczyły możliwości opracowania drugiego systemu, w którym wytwarzana tarcza łączyłaby w sobie cechy tarczy gazowej oraz tarczy ciekłej. Rozwiązanie to niweluje niedogodność pierwszego systemu, który może wykorzystywać jedynie skończoną liczbę substancji normalnie znajdujących się w postaci gazów. Z uwagi na to, że praktycznie każdy znany pierwiastek w postaci ciała stałego może być doprowadzony do postaci ciekłej, np. jako roztwory koloidów metalicznych, postaci soli bądź innych substancji rozpuszczonych w danym roztworze, plazma laserowa wytworzona na bazie takiej tarczy może cechować się znacznie lepszymi parametrami w odniesieniu do plazmy laserowej indukowanej za pomocą dotychczasowych systemów tarcz laserowych. Po analizie problemu badawczego i opracowaniu założeń bazowych, idea rozwiązania dla drugiego urządzenia opiera się na opracowaniu systemu, którego zadaniem byłoby wytwarzanie tarcz laserowych typu aerozolowego w sposób impulsowy, wykorzystując idee działania systemów do wytwarzania tarcz gazowych. Zarówno chłodzone tarcze gazowo-klastrowe jak i tarcze aerozolowe pod względem klasyfikacji należy zaliczyć do tarcz typu *mass limited target*, jednak podstawą konstrukcyjną są tutaj systemy do wytwarzania tarcz gazowych. Wytwarzane struktury cechują się ograniczonymi rozmiarami, ale także istnieniem atmosfery gazu, w którym może być wytwarzana plazma laserowa. Ideowe przedstawienie tarcz wytwarzanych w ramach nowo opracowanych urządzeń przedstawiłem na Rysunek 17.



Rysunek 17. Schemat ideowy tarcz laserowych typu gazowo-klastrowego oraz aerozolowego opracowanego w ramach rozwoju systemu do wytwarzania tarcz gazowych

Wszystkie parametry urządzeń opracowanych w ramach poniższej pracy doktorskiej będą odnosił do tarcz typu gazowego jako dalszy rozwój systemów gazowych opracowanych w Instytucie Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej. Hybrydowe połączenie zalet tarcz gazowych, klastrowych oraz ciekłych może stanowić silną alternatywę w aktualnych metodach wytwarzania tarcz laserowych. Aby spełnić powyższe wymagania konieczne było opracowanie pewnych założeń konstrukcyjnych dla obu nowych urządzeń. Dla pierwszego urządzenia, dedykowanego do wytwarzania chłodzonych tarcz gazowych zawierających klastery, opracowałem poniższe założenie konstrukcyjne:

- tarcza laserowa wytwarzana jest w sposób impulsowy za pomocą opracowanego do tego celu zaworu elektromagnetycznego na bazie konstrukcji podwójnej tarczy gazowej,
- zawór wyposażony jest w układ chłodzenia innego niż chłodzenie kriogeniczne,
- opracowanym systemem do wytwarzania tarcz laserowych zarządza dedykowany do tego celu kontroler elektroniczny.

W przypadku drugiego urządzenia, dedykowanego do wytwarzania tarczy aerozolowej ^{ozone} załączenia konstrukcyjne mają następującą postać:

- tarcza laserowa wytwarzana jest w sposób impulsowy za pomocą opracowanego do tego celu gazowego zaworu elektromagnetycznego,
- wytwarzany aerozol będzie powstawał na bazie roztworu cieczy bazowej oraz gazu buforowego,
- warunki próżniowe nie będą mogły ograniczać metody generowania aerozolu,
- opracowanym systemem do wytwarzania tarcz laserowych zarządza dedykowany do tego celu kontroler elektroniczny.

Na podstawie powyższych założeń, opracowałem dwa nowe systemy do wytwarzania tarcz laserowych, których opis oraz zasadę działania przedstawiłem w dalszej części rozdziału.

Urządzeniem wspólnym dla obu konstrukcji jest kontroler elektroniczny, który pełni rolę sterownika wspólnego, umożliwiającego poprawną pracę obu urządzeń. Uproszczony schemat blokowy opracowanego rozwiązania przedstawiłem na poniższym rysunku:

3.2. System do impulsowego wytwarzania tarcz gazowych zawierających klaster

Klasyczne systemy do wytwarzania tarcz gazowo-klastrowych [94] zostały przedstawione przeze mnie na początku rozdziału podczas analizy problemu badawczego. Główną metodą umożliwiającą wytwarzanie klastrowych gazowych jest wielokrotnie wspomniana metoda chłodzenia kriogenicznego [95] oraz wykorzystanie do tego celu dedykowanych dysz naddźwiękowych typu *Lavala*. Prekursorami wszystkich badań dotyczących systemów gazowo-klastrowych w zastosowaniu tarcz laserowych są badania z lat 70-tych oraz 80-tych XX wieku prowadzone przez Otto Hagenę [96, 97, 98]. Jego prace stanowią bazę dotyczącą różnego rodzaju systemów klastrowych wykorzystujących ekspandujące dysze soniczne oraz hipersoniczne. Początkowe prace dotyczyły analizy możliwości wytwarzania struktur gazowo-klastrowych, parametrów, w których wytwarzane były wspomniane struktury, a także metod ich wytwarzania. Wraz z rozwojem prowadzonych badań, Otto Hagen zaproponował model matematyczny, który został szeroko przyjęty w środowisku naukowym, pozwalający oszacować liczebność atomów $\langle N \rangle$ (6) w danym klastrze gazowym w zależności od parametrów systemu do wytwarzania danej struktury gazowo-klastrowej, takich jak rodzaj gazu, temperatura gazu a także wymiary geometryczne oraz typ zastosowanej dyszy gazowej. Zależność ta znana jest powszechnie pod nazwą wzoru Hageny, opisanego jako:

$$\langle N \rangle = A \left(\frac{\Gamma^*}{1000} \right)^\gamma \quad (6)$$

gdzie A oraz γ oznaczają dane tabelaryczne zależne od wartości parametru Hageny Γ^* (7). Parametr Hageny Γ^* jest funkcją ciśnienia gazu P_0 [mbar] temperatury T_0 [K] na wejściu dyszy oraz silnie zależy od geometrii dyszy zaworu gazowego. Wzór na obliczenie parametru Hageny ma następującą postać analityczną:

$$\Gamma^* = (P_0 d_{eq}^q T_0^{0.25q-2.5}) K_{ch} \quad (7)$$

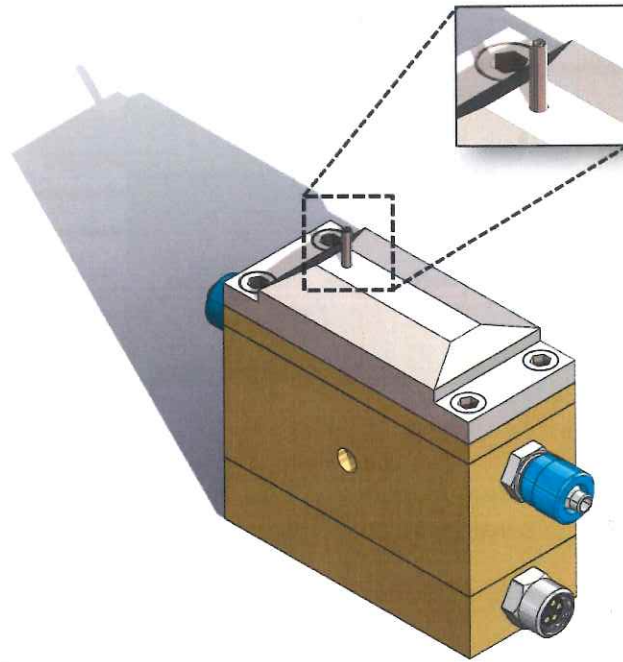
gdzie: K_{ch} jest stałą i bezwymiarową wartością tabelaryczną, dobraną eksperymentalnie. Jest ona zależna od zastosowanego gazu. Parametr d określa współczynnik geometryczny dyszy. Przykładowo dla ksenonu wartość współczynnika $K_{ch} = 5500$, ^{dla} kryptonu $K_{ch} = 2890$ a dla argonu tylko 1650. Wartość współczynnika q jest zmienna i zależna od parametrów źródła. Typowo mieści się w przedziale od 0.5 do 1. Dla dysz sonicznych typu stożkowego, współczynnik geometryczny dyszy jest charakteryzowany przez wartość zastępczą średnicy dyszy d_{eq} (8), zależną od średnicy w przewężeniu d oraz wartości kąta rozwarcia stożka dyszy α .

$$d_{eq} = \frac{0.74d}{\tan \alpha/2} \quad \text{tau}(\alpha/2) \quad (8)$$

Przytoczone powyżej zależności analityczne dotyczące charakterystyki źródeł ^{tej} klasterowych zostały potwierdzone w licznych publikacjach naukowych przytoczonych w ^{poniższej} pracy doktorskiej. Ich modyfikacje, badania i uproszczenia znajdują ciągłych naśladowców i badaczy chcących opracować nowe, bardziej wydajne konstrukcje tarcz laserowych opartych o źródła gazowo-klasterowe. Rozwiązanie Hageny, jak wspomniałem wcześniej, bazuje na wykorzystaniu systemów jednogazowych oraz specjalnie opracowanych do tego celu dysz, wysokich ciśnień a także układów chłodzenia kriogenicznego. W przypadku rozwiązania opartego o dwugazowy system do wytwarzania tarcz laserowych wraz z układem dysz współosiowych, niemożliwe jest zastosowanie analizy Hageny do oszacowania parametrów domniemanego źródła gazowo-klasterowego. Zaproponowane przeze mnie rozwiązanie układowe jest całkowicie nowym rozwiązaniem systemu do wytwarzania tarcz gazowo-klasterowych i nie posiada swojego odpowiednika w żadnej poznanej mi do tej pory konstrukcji. Nie istnieje również żaden model matematyczny opisujący zależność wytwarzania się klasterów z wykorzystaniem chłodzonej podwójnej tarczy gazowej. Aby oszacować zależność wytwarzania klasterów na bazie rozwiązania dwugazowego, konieczna jest kontynuacja prac oraz dalsze badania dotyczące warunków wytwarzania się tarcz gazowo-klasterowych. Klasyczne systemy gazowo-klasterowe wykorzystują zjawisko gwałtownego rozprężania się gazu w momencie opuszczania dyszy o stosunkowo niewielkiej średnicy oraz długości, formując docelowo strugę gazowo-klasterową. Typowe klasterki wytworzone tą metodą sięgają dziesiątek ^{opracowane} nm, a struktury o większych rozmiarach (setki ^{Opisane} nm) określane są mianem dużych klasterów. Wykorzystywane przeze mnie rozwiązanie wykorzystuje układ dysz współosiowych, których parametry geometryczne nie mogą być ^{Opisane} rozwiązane modelem Hageny. Tarcza ma charakter „modulowanej dyszy stożkowej” o zmiennej geometrii, w której parametry są silnie zależne od zastosowanych gazów oraz ich ciśnień. Schemat ideowy zasady działania

2
Chodzi o analizę zależności między wielkościami kłasterów a parametrami dyszy.

dedykowanego układu dysz współosiowych. Widok perspektywiczny modelu opracowanej konstrukcji przedstawiłem na Rysunek 21.

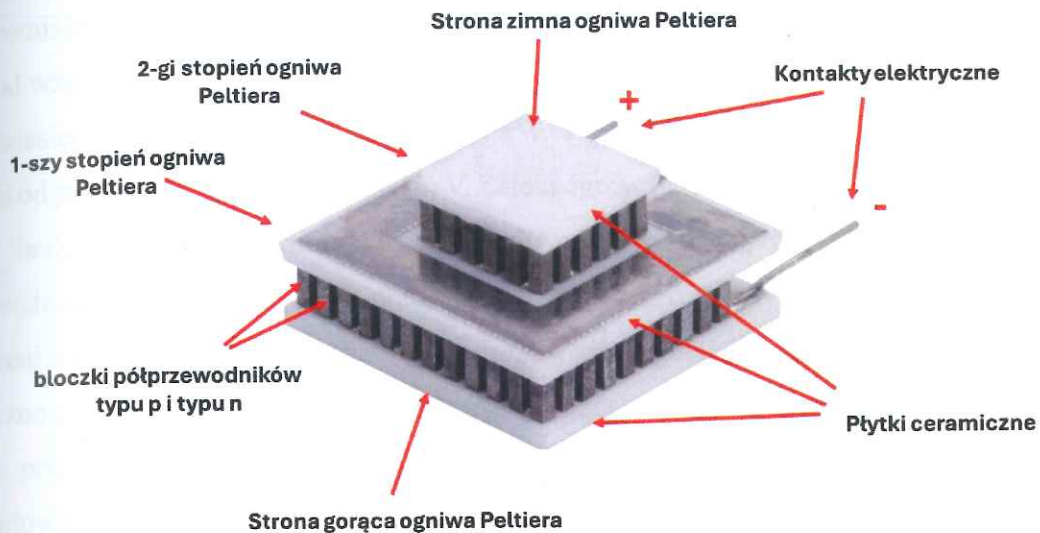


? brak opisu poszcz. elementów

Rysunek 21. Widok perspektywiczny modelu opracowanego zaworu gazowego do wytwarzania chłodzonych tarcz gazowych

Przekrój konstrukcyjny modelu opracowanego zaworu wraz z dokładnym rozmieszczeniem poszczególnych elementów przedstawiłem na Rysunek 22. Zastosowany układ dysz współosiowych składa się z dwóch cienkich rurek wykonanych ze stali nierdzewnej o średnicy wewnętrznej $d_1=700 \mu\text{m}$ dla dyszy gazu roboczego oraz $d_2=1500 \mu\text{m}$ dla gazu buforowego. Wymiary zostały określone eksperymentalnie podczas przeprowadzonych testów ^{odpowiednie} parametrów związanych ze zjawiskiem samoabsorpcji promieniowania plazmy w gazie dla dysz o zbyt dużej średnicy.

czyli plazma ma mieć odpowiednio małą średnicę / rozmiar?



Rysunek 23. Budowa dwustopniowego ogniwa Peltiera na przykładzie ogniwa MS2-083-05-05-13-13-11-W2 firmy Laird Thermal Systems [102].

Sprawność chłodzenia pojedynczego ogniwa Peltiera wynosi do ok 50% i drastycznie się zmniejsza w przypadku ogniw wielostopniowych o wysokiej różnicy temperatur ΔT pomiędzy stroną zimną i gorącą. Pod względem rzeczywistych możliwości transportu ciepła Q_c ogniw Peltiera, ich parametry zależą głównie od następujących parametrów:

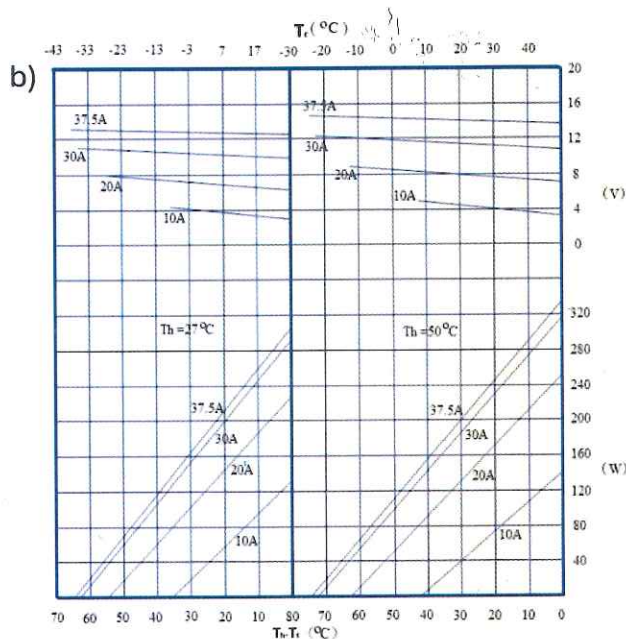
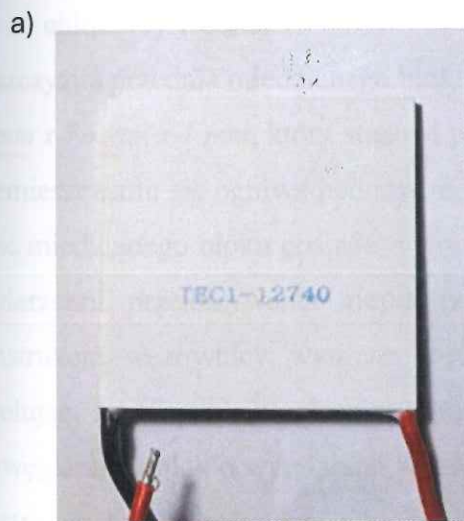
- Q_p , wartość transportu ciepła ze strony zimnej do strony gorącej,
- Q_{Rth} , przepływ wsteczny ciepła od strony gorącej do zimnej,
- Q_{Rv} , straty Joule'a reprezentowane przez rezystancję ogniwa R_v .

Ostateczne obciążenie cieplne ogniwa Peltiera Q_c stanowi kompromis pomiędzy Q_p , Q_{Rth} oraz Q_{Rv} . Każde ogniwo Peltiera może być scharakteryzowane za pomocą czterech podstawowych parametrów technicznych:

- Q_{max} - maksymalna wydajność pompowania ciepła przy zerowej różnicy temperatur między stroną gorącą,
- ΔT_{max} - maksymalna różnica temperatur na ogniwie Peltiera, gdy ciepło nie jest pompowane,
- I_{max} - maksymalny prąd płynący przez ogniwo Peltiera przy Q_{max} ,
- U_{max} - maksymalne napięcie na zaciskach ogniwa Peltiera przy Q_{max} .

Parametry Q_{max} oraz ΔT_{max} są wartościami teoretycznymi dostarczonymi przez producenta i służą jedynie do opisu zachowania ogniw Peltiera. W warunkach rzeczywistych wartości te nigdy nie są osiągane. W zastosowaniach termoelektrycznych należy kierować się

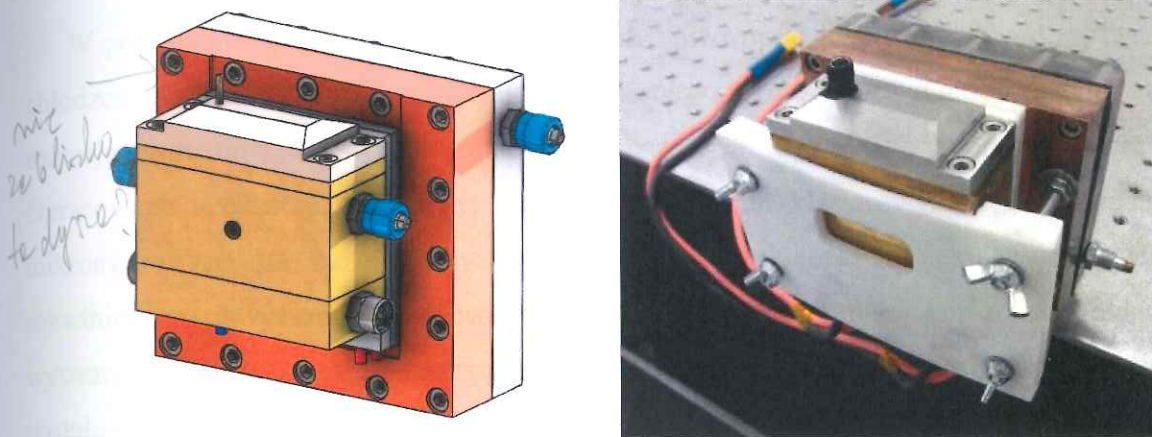
Podstawiając oszacowane wartości do powyższego wzoru, wartość ciepła niezbędnego do odebrania przez układ chłodzenia wynosi ok $\Delta Q = 12.5 \times 10^3 J$. Aby odprowadzić powyższą ^{ilość} wartość ciepła w rozsądnym czasie, konieczne jest zastosowanie ogniw Peltiera o odpowiednio dużej mocy chłodzącej oraz powierzchni styku pomiędzy chłodzonym zaworem a układem chłodzenia termoelektrycznego. Analizując dostępność rynkową ogniw Peltiera o dużej mocy ($P > 100 W$), jedynie ogniwa z serii *TEC1-12720* oraz *TEC1-12740* nadawały się do opracowania eksperymentalnego układu chłodzenia dla systemu wytwarzania chłodzonych tarcz gazowych. Zdjęcie pojedynczego ogniwa *TEC1-12740* wraz z przykładową teoretyczną charakterystyką wydajności ogniwa zamieściłem na Rysunek 24. Pierwsze ^z wymienionych ogniw Peltiera charakteryzuje się wymiarami $50.0 \times 50.0 \times 3.4 \text{ mm}$ oraz maksymalną mocą cieplną na poziomie $Q_{max} = 169 W$ przy prądzie zasilania $I_{max} = 20 A$. Teoretyczna różnica temperatur pomiędzy stroną zimną a stroną gorącą może sięgać aż $\Delta T_{max} = 65^\circ C$. Drugi model ogniwa, *TEC1-12740*, jest największym pojedynczym ogólnodostępnym ogniwem Peltiera, którego maksymalna moc cieplna wynosi aż $Q_{max} = 388 W$ przy prądzie zasilania $I_{max} = 40 A$. Wymiary fizyczne ogniwa wynoszą $62.0 \text{ mm} \times 62.0 \text{ mm} \times 4.5 \text{ mm}$. W obu przypadkach maksymalne zalecane napięcie zasilania wynosi $U_{max} = 15.0 V$.



Rysunek 24. Zdjęcie zastosowanego, pojedynczego ogniwa Peltiera model TEC1-12740 (a) oraz teoretyczna charakterystyka wydajności ogniwa w różnych punktach pracy (b) [103]

^{Analizując} Przy analizie parametrów powyższych ogniw Peltiera, doszedłem do wniosku, że pojedynczy stopień chłodzenia ogniwem Peltiera i dedykowaną chłodnicą wodną będzie niewystarczający.

Opracowany przeze mnie system do wytwarzania tarcz gazowo-klastrowych jest rozwinięciem systemów do wytwarzania tarcz gazowych bazujących na rozwiązaniu typu *gas-puff* opracowanym w Instytucie Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej. Model komputerowy oraz zdjęcie finalnego urządzenia przedstawiłem na Rysunek 28.



Rysunek 28. Zdjęcie opracowanego oraz wykonanego systemu do wytwarzania chłodzonych tarcz gazowych zawierających klaster gazowe

Nowe możliwości urządzenia rozwiązują problemy związane z ograniczeniem parametrów gęstości i struktury czystych tarcz gazowych. Opracowany system umożliwiła wytwarzanie struktur klastrowych o rozmiarach sub-mikronowych, które mogą być traktowane zarówno jako klaster a także substancja masowa,^{obj.} właściwościami zbliżonymi do parametrów ciał stałych. Co więcej, przedstawione urządzenie nie wymaga stosowania wysokich ciśnień i umożliwia łatwą oraz szybką implementację praktycznie w każdym laboratorium laserowym zajmującym się wytwarzaniem plazmy indukowanej laserowo, co zostało potwierdzone w ramach badań podstawowych dotyczących charakteryzacji wytwarzanej tarczy w rozdziale 4, a także w ramach eksperymentów oddziaływania nowo opracowanej tarczy gazowo-klastrowej z ultrakrótkimi impulsami laserowymi w laboratorium laserowych JETI 40 znajdującym się w ośrodku badawczym Uniwersytetu Friedricha Schillera w Jenie w Niemczech. Szczegółowy opis eksperymentów oraz wyniki zrealizowanych badań zostały przedstawione w formie publikacji naukowych [108, 109] oraz stanowią część rozdziału 5.

3.3. System do impulsowego wytwarzania tarczy aerozolowej

W poprzednim podrozdziale, 3.2., opisałem nowo opracowany system do wytwarzania chłodzonych tarcz gazowych zawierających klastery gazowe, który stanowi jeden z etapów rozwoju systemów do wytwarzania tarcz gazowych dla eksperymentów laserowych. Opracowane urządzenie umożliwia wytwarzanie struktur klasterych o rozmiarach submikrometrowych na bazie różnych gazów atomowych oraz molekularnych. Dalszym rozwinięciem powyższego opracowania jest przedstawiona poniżej konstrukcja układu do wytwarzania aerozoli w warunkach próżniowych. Propozycja nowego rozwiązania układowego została opracowana na bazie połączenia systemu do wytwarzania impulsowej tarczy gazowej oraz jednej z metod nebulizacji roztworów ciekłych. Połączenie obu rozwiązań umożliwiło opracowanie nowego systemu do impulsowego wytwarzanie tarczy laserowej o charakterze koloidalnym, w którym ośrodkiem rozpraszającym jest gaz, natomiast ośrodkiem rozpraszonym jest ciecz. Nowe rozwiązanie układowe należy zaliczyć do systemów hybrydowych należących do klasy tarcz laserowych o ograniczonej masie (MLT).

Różnego rodzaju systemy do wytwarzania aerozoli bądź sprejów od dawna przyciągały zainteresowanie świata naukowego w kontekście wykorzystania ich do precyzyjnego dozowania substancji o określonych parametrach fizyko-chemicznych dla zarówno dla celów analitycznych jak i wytwarzania plazmy laserowej [110]. Zastosowanie aerozoli jako formy dozowania różnych substancji jest powszechnie znane i wykorzystywana w różnych dziedzinach przemysłu, począwszy od przemysłu farmaceutycznego, poprzez wykorzystanie sprejów do kontrolowanego nanoszenia różnych substancji aż do zastosowań w życiu codziennym w różnego rodzaju środkach podawanych w postaci aerozoli zapachowych [111, 112]. Prace dotyczące prób podjęcia się opracowania nowych układów tarcz laserowych bazujących na aerozolu pojawiły się już w latach 90-tych XX wieku i trwają do dzisiaj. Wykorzystanie systemów aerozolowych jako tarcz laserowych umożliwia zastosowanie odpowiednio przygotowanych roztworów zawierających różnego typu pierwiastki oraz roztwory koloidalne na bazie czystych metali. Jest to bardzo istotne w sytuacji, kiedy pożądanym jest uzyskanie ciągłego widma w zakresie SXR/EUV. Zastosowanie pierwiastków o dużej liczbie atomowej Z skutkuje emisją tysięcy linii widmowych, które wskutek poszerzenia Starka

rozwiązań VMT, przetwornik ultradźwiękowy umieszczony jest bezpośrednio na bardzo drobnej stalowej siateczce, która w wyniku drgań działa jak pompa hydrauliczna zasysając daną ciecz i przepuszczając ją przez strukturę siatki. Drgania siatki mają odpowiednią energię, aby wywołać wystarczające ciśnienie hydrodynamiczne umożliwiające atomizację roztworu.

Sam proces nebulizacji ultradźwiękowej tłumaczy się głównie mechanizmem powstawania fal kapilarnych a także występowaniem zjawiska kawitacji. Powstawanie fal kapilarnych na powierzchni cieczy znajdującej się na drgającym przetworniku zostało po raz pierwszy opisane przez Faradaya w 1831 roku i dlatego są one również określane jako fale Faradaya. W wyniku dalszych badań nowego zjawiska, Kelvin wyprowadził zależność opisującą długość danej fali kapilarnej λ_k w zależności od napięcia powierzchniowego danej cieczy σ , gęstości płynu ρ , poziomu wysokości słupa cieczy h oraz częstotliwości fali stojącej f przy założeniu $f = F/2$, gdzie F jest częstotliwością drgań przetwornika piezoelektrycznego:

$$\lambda_k = \left(\frac{2\pi\sigma}{\rho f^2} \right)^{1/3} \quad (11)$$

Interesującym faktem w metodzie nebulizacji ultradźwiękowej jest powiązanie częstotliwości drgań przetwornika oraz średniej wielkości kropli wytwarzanego aerozolu d . Pierwsze rozwiązanie analityczne opisujące zależność średnicy kropli aerozolu ~~z~~^{od} częstotliwością drgań przetwornika zostało opracowane przez Roberta Lang'a już w 1962 r. (Równanie 12) [125]. Dalsze badania nad powiązaniem tej zależności zostały prowadzone przez kilka niezależnych zespołów badawczych [126, 127, 128, 129], dzięki którym bardziej dokładnie oszacowane zostały zależności dotyczące średniej wartości ^{wielkości} kropli aerozolu generowanego za pomocą nebulizatora ultradźwiękowego z uwzględnieniem zarówno zjawiska kawitacji jak i powstawania fal kapilarnych (Równania (13)-(16)).

$$d = 0.34 \left(\frac{8\pi\sigma}{\rho f^2} \right)^{1/3} \quad (12)$$

Warto było przedstawić tę zależność w formie wykresu albo kilku wartości różnych parametrów.

$$d = \left(\frac{\pi\sigma}{\rho f^2} \right)^{1/3} [1 + A(We)^{0.22}(Oh)^{0.166}(In)^{-0.0277}] \quad (13)$$

$$d = \left(\frac{\pi\sigma}{\rho f^2} \right)^{1/3} + 0.0013(We)^{0.008}(Oh)^{\frac{-0.14}{n}}(In)^{0.28} \quad (14)$$

$$d = 0.058 \left(\frac{\pi\sigma}{\rho f^2} \right)^{1/3} (We)^{0.151}(Oh)^{0.192}(In)^{-0.02} \quad (15)$$

$$d = 0.00154 \left(\frac{\pi\sigma}{\rho f^2} \right)^{1/3} \left[1 + \left(\frac{\pi\sigma}{\rho f^2} \right)^{-0.2} (We)^{0.154} (Oh)^{-0.111} (In)^{-0.033} \right] \quad (16)$$

$$We = \frac{fQ\rho}{\sigma} \quad (17)$$

$$Oh = \frac{\eta}{fAm^2\rho} \quad (18)$$

$$In = \frac{f^2 Am^4}{cQ} \quad (19)$$

$$Am = \left(\frac{2I}{\rho c (2\pi f)^2} \right)^{1/2} \quad (20)$$

gdzie, We oznaczają bezwymiarowe współczynniki *Webera* opisujące wpływ sił bezwładności i napięcia powierzchniowego cieczy, Oh oznaczają liczbę *Ohnesorge'a* opisującą wpływ lepkości na bezwładność oraz napięcie powierzchniowe, In jest mocą nebulizatora dostarczoną bezpośrednio do atomizowanej cieczy, c oznacza prędkość dźwięku w cieczy [m/s], Am amplitudę fali wytworzonej na powierzchni cieczy, I natężenie ultradźwięków [W/m^2].

Jak wspomniałem wcześniej, mechanizm atomizacji ultradźwiękowej wykorzystuje ~~zarówno~~ proces kawitacji oraz generowanie się fal kapilarnych. Kawitacja, czyli tworzenie i zapadanie się drobnych pęcherzyków gazowych w cieczy, występuje, gdy amplituda ciśnienia jest wystarczająco wysoka ^{we} i generuje jego duże zmiany. Powstawanie kawitacji jest spowodowane składową podciśnienia fal ultradźwiękowych, która powoduje, że część pary cieczy wydostaje się z roztworu w postaci małych pęcherzyków gazowych. Pęcherzyki te służą następnie jako punkty startowe, ^{zerowisk} w których ciecz może się dalej oddzielać, tworząc większe puste przestrzenie w cieczy. Puste przestrzenie zapadają się gwałtownie w przeciwnej połowie cyklu fali ultradźwiękowej, gdy ciśnienie staje się dodatnie, tworząc wysokie lokalne chwilowe gradienty ciśnienia oraz temperatury. W efekcie działania, na powierzchni cieczy pojawia się gejzer wodny w wyniku chwilowych prędkości cząstek osiągających prędkość naddźwiękową podczas zapadania się pęcherzyków. Okresowe gradienty zmian ciśnienia hydraulicznego wprawiają powierzchnię cieczy w szybki ruch oscylacyjny, powodując powstawanie na jej powierzchni stojących fal kapilarnych o ograniczonej amplitudzie. Amplituda fal kapilarnych wzrośnie, jeśli intensywność drgań lub średnia moc przenoszona na jednostkę powierzchni będzie wystarczająco wysoka. Nieliniowość procesu powoduje, że fale kapilarne będą

pracować w trybie impulsowym lub ciągłym. Główną wadą układów bazujących na technice termosprejów jest konieczność stosowania wysokich ciśnień dynamicznych rozpylanych roztworów a także stosowanie wysokich temperatur, które mogą powodować krystalizację składników roztworu w dyszy urządzenia. Rozwiązanie tego typu zostało opracowane w konstrukcji *Sargis Ter-Avetisyan et al. 2002*, do wytwarzania tarcz aerozolowych w eksperymentach laserowych.

Elektrospreje, podobnie jak poprzednie układy do wytwarzania aerozoli wykorzystują specjalne rozwiązania oparte o wypływ roztworu z dyszy typu kapilarnego. Podobnie jak w metodzie pneumatycznej, aerozol wytwarzany jest na końcu dyszy kapilarnej zawierającej ciecz. Wytwarzanie aerozolu występuje w typ przypadku w wyniku przyłożenia wysokiego napięcia, rzędu kilku kV , do powierzchni kapilary oraz do elektrody znajdującej się w pewnej odległości od powierzchni kapilary. Różnica potencjału powoduje przepływ prądu przez dany roztwór znajdujący się w kapilarze oraz gromadzenia się jonów na powierzchni roztworu tworząc ciśnienie elektryczne, czyli siłę powodującą przepływ ładunku elektrycznego w układzie. Wartość przyłożonego napięcia elektrycznego musi w typ przypadku pokonać siły napięcia powierzchniowego. Po pokonaniu bariery napięcia powierzchniowego cieczy, dany roztwór zaczyna przyjmować postać stożka, powodując wydmuchiwanie danego roztworu z kapilary. W miarę zwiększania odległości, strumień cieczy staje się niestabilny powodując docelowo wytwarzanie się naładowanych elektrycznie kropelek cieczy. Ze wzrostem napięcia pomiędzy elektrodami, długość strumienia (stożka) cieczy maleje, a kropelki aerozolu wyrzucane są bezpośrednio z dyszy kapilarnej. Proces nebulizacji może być ciągły bądź impulsowy w zależności od przyłożonego napięcia. Aby poprawić parametry nebulizacji, możliwe jest dodanie zewnętrznej dyszy gazowej, której zadaniem jest stabilizacja wytwarzanych struktur kropelkowych. Na wielkość wytwarzanych kropelek zasadniczo wpływa przyłożone napięcie, napięcie powierzchniowe cieczy, rozmiar i konfiguracja elektrody, natężenie przepływu cieczy oraz właściwości elektryczne cieczy, takie jak stała dielektryczna i przewodność elektryczna. Ze wzrostem napięcia, średnia średnica kropli wytwarzanego aerozolu maleje. Każda duża kropla wytrącona z kapilary ulega rozpadowi w wyniku niestabilności powodując rozpad na wiele mniejszych kropelek aż do osiągnięcia granicy Rayleigha [138]. Praktycznym przykładem rozwiązania termosprejów w aplikacji tarcz laserowych jest system do wytwarzania aerozoli opracowany przez *L.C. Mountford et al., 1998*. Zaprezentowane urządzenie umożliwia wytwarzanie struktury aerozolowej o średniej gęstości atomowej na poziomie $n_{at} = 10^{19} \text{ at/cm}^3$ oraz średnicy kropli na poziomie ok $d =$

sterowanie zarówno pracą samego zaworu gazowego, jego synchronizacją z aparaturą zewnętrzną jak i kontrolą procesu wytwarzania aerozolu wewnątrz zaworu.



Rysunek 30. Schemat blokowy systemu do wytwarzania tarcz aerozolowych w próżni.

W przypadku systemu do wytwarzania tarcz aerozolowych, nowe rozwiązanie ~~układowe~~ wymagało opracowania zupełnie odmiennych założeń konstrukcyjnych dla zaworu gazowego oraz zintegrowania układu do nebulizacji ultradźwiękowej we wnętrzu zaworu. Szczegółowy opis budowy ~~konstrukcji~~ zaworu elektromagnetycznego zamieściłem w podrozdziale 3.3.1. Do poprawnego działania urządzenia, poza specjalnym zaworem gazowo-aerozolowym, konieczne było także opracowanie kontrolera elektronicznego, którego zadaniem jest sterowanie pracą zaworu, jego synchronizacja a także zapewnienie odpowiedniego sygnału elektrycznego dla układu nebulizacji. Z uwagi na to, że w ramach poniższej pracy doktorskiej przedstawiane są dwa nowe systemy do wytwarzania tarcz laserowych o podobnym trybie pracy, funkcja ta została zaimplementowana w ramach jednego uniwersalnego kontroler^a elektroniczn^y. Opis konstrukcji sterownika elektronicznego z uwzględnieniem modułu sterowania procesem nebulizacji opisałem w dalszej części rozdziału 3.4. dotyczącego budowy kontrolera elektronicznego, a dokładnie w podrozdziale 3.4.1.

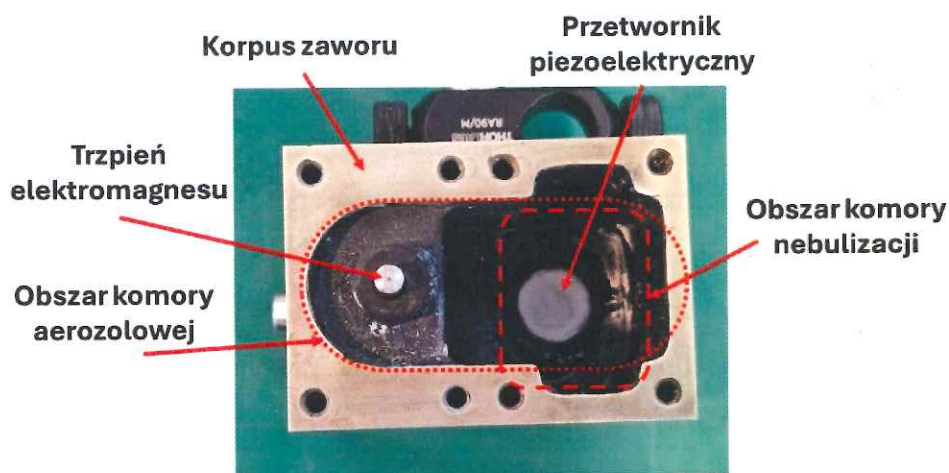
3.3.1. Zawór do wytwarzania tarczy aerozolowej w próżni

Konstrukcja systemu do wytwarzania tarcz aerozolowych w warunkach próżniowych bazuje na rozwinięciu systemów do wytwarzania tarcz gazowych z pojedynczym gazem. Klasyczne systemy do wytwarzania tarcz gazowych wykorzystują gaz roboczy wstrzykiwany pod odpowiednio wysokim ciśnieniem bezpośrednio w obszar ogniska laserowego celem wytwarzania plazmy laserowej lub badaniu oddziaływania tarczy gazowej z promieniowaniem w zakresie *SXR/EUV*, np. badaniem zjawisk fotojonizacji gazów [142, 143]. Typowa tarcza gazowa wytwarzana jest przez ciągłe bądź impulsowe wstrzykiwanie gazu do wnętrza komory próżniowej za pomocą dedykowanego do tego celu systemu. Nowe rozwiązanie będące jednym z celów mojej pracy doktorskiej, bazuje na integracji zasady działania klasycznego systemu do wytwarzania tarcz gazowych oraz systemu ultradźwiękowej nebulizacji cieczy. Podobnie jak w przypadku systemu do wytwarzania chłodzonych tarcz gazowych, zawierających klaster gazowe, opisanego w rozdziale 3.2, opracowanie systemu do wytwarzania tarcz aerozolowych miało również charakter czysto eksperymentalny. Prace zostały podzielone na część konstruktorską oraz eksperymentalną. Etap konstrukcji zakładał opracowanie zarówno samego zaworu oraz kompaktowego modułu nebulizacji ultradźwiękowej. Powyższe zadania były ze sobą ściśle powiązane i nie mogły być realizowane osobno. Układ nebulizatora został opracowany na bazie rozwiązań stosowanych w różnego rodzaju kompaktowych systemach nebulizacji kawitacyjnej wykorzystujących dyskowe przetworniki piezoelektryczne. W głównej mierze przyczyniła się do tego kompaktowa budowa raz dostępność komercyjna przetworników ultradźwiękowych. Element ten jest elementem kluczowym bez którego niemożliwe byłoby wykonanie docelowego urządzenia. Wykorzystany przetwornik ultradźwiękowy ma postać ceramicznego dysku o średnicy ok. $d=20\text{mm}$ oraz grubości ok. $h=1.5\text{mm}$. Zastosowane przetworniki wykonane są z materiału ceramicznego typu *PZT5H*, (ang. *Lead Zirconate Titanate*). Parametrem charakterystycznym dla każdego przetwornika jest jego częstotliwość rezonansowa f_r , pojemność statyczna c_s oraz impedancja rezonansowa R_i .

Na podstawie określonych parametrów układu nebulizacji, opracowałem konstrukcję zaworu gazowo-aerozolowego typu *NZ*, umożliwiającego impulsowe wytwarzanie strugi aerozolu zarówno w warunkach normalnych jak i próżniowych. Urządzenie ma postać

W górnej części zaworu umieszczona jest dysza cylindryczna, za pomocą której gotowy roztwór aerozolu wstrzykiwany jest do wnętrza komory próżniowej. Wartość średnicy dyszy została dobrana eksperymentalnie na podstawie przeprowadzonych testów dla dysz o średnicy od $d=0.7 \text{ mm}$ do $d=1.8 \text{ mm}$. Zadowalające efekty wytwarzania tarczy aerozolowej zostały zaobserwowane dla dysz o średnicy powyżej $d=1.0 \text{ mm}$. Może być to związane ze zjawiskiem gwałtownego rozprężenia gazu w momencie otwierania zaworu oraz dominujących procesów hydrodynamicznych opisujących przepływ cieczy przez dyszę zaworu. Dla dysz o mniejszej średnicy, aerozol przyjmował postać dużych kropli, które osadzały się na ścianach dyszy zaworu i nie były w sposób powtarzalny wyrzucane w zakładany obszar wytwarzania tarczy laserowej. Na dnie zaworu umieszczony został moduł przetwornika piezoelektrycznego, którego zadaniem jest wytwarzanie aerozolu we wnętrzu zaworu. W konstrukcji urządzenia możemy wyróżnić także komorę nebulizacyjną roztworu oraz komorę aerozolową, w której gromadzony jest gotowy roztwór aerozolu powstały w wyniku atomizacji cieczy w atmosferze gazowej. Wnętrze zaworu pokryte zostało dodatkowo strukturą zabezpieczającą w postaci cienkiej powłoki gumowej. Ma ona na celu zabezpieczenie powierzchni wewnętrznej zaworu przed ewentualnym zachodzeniem reakcji chemicznych pomiędzy wykorzystywanymi roztworami a materiałem zaworu. Zdjęcie wnętrza zaworu przedstawiające opisane moduły przedstawiłem na Rysunek 33. Komora nebulizacyjna ma postać zbiornika o pojemności ok 40 ml i wysokości słupa cieczy $h=25 \text{ mm}$. Parametry te są wystarczające, aby nastąpiło wydajne wytwarzanie aerozolu w warunkach ciśnienia normalnego dla różnych gazów. Sekcja komory wyrównawczej składa się z pustych przestrzeni wypełnionych gazem.

Co było
wskazania
tych danych
nie dyszy
czyli do
poleceń
o tym
zadanie
efekty



Rysunek 33. Widok wnętrza zaworu do wytwarzania tarczy aerozolowej w próżni

Proces wytwarzania tarczy aerolowej w próżni następuje w momencie odcignięcia ruchomego trzpienia elektromagnesu znajdującego się wewnątrz zaworu w stronę korpusu elektromagnesu i jest kontrolowany za pomocą dedykowanego sterownika. Wytwarzanie tarczy aerolowej możliwe jest dopiero po osiągnięciu odpowiedniego poziomu nebulizacji cieczy znajdującej się wewnątrz zaworu. Proces ten trwa ok 15 sekund od momentu podania sygnału na przetwornik piezoelektryczny, a także zależy od parametrów zastosowanego roztworu. Praca modułu nebulizacji może odbywać się w trybie ciągłym lub quasi-ciągłym, jednak preferowany tryb pracy nebulizatora to tryb ciągły. Z uwagi na pewną ilość ciepła wydzielanego przez przetwornik ultradźwiękowy, zalecane jest robienie ^{przerw} odstępów czasowych po kilkudziesięciu minutach pracy urządzenia. Dłuższa praca przetwornika w temperaturach powyżej $T=50^{\circ}\text{C}$ może doprowadzić do jego fizycznego uszkodzenia i konieczności wymiany na nowy. Zdjęcie poglądowe opracowanego zaworu do wytwarzania tarcz aerolowych zamieściłem na poniższym rysunku (Rysunek 34):



Rysunek 34. Zdjęcie zaworu do wytwarzania tarcz aerolowych w próżni

Cała konstrukcja zaworu do wytwarzania tarcz aerolowych w próżni została przetestowana eksperymentalnie w warunkach próżniowych. Potwierdzona została pełna szczelność oraz hermetyczność opracowanego rozwiązania. Podczas pierwszych testów urządzenia, z powodzeniem możliwe było wytwarzanie aerolu na bazie wody oraz azotu. Wytwarzana tarcza aerolowa spełniała swoje założenia i nadawała się do przeprowadzenia dalszych badań dotyczących charakterystyki tarczy na bazie różnych roztworów.

W dalszej kolejności prac związanych z realizacją pracy doktorskiej przeprowadziłem ~~wyniki~~ ^e badań dotyczących charakterystyki wytwarzanej tarczy oraz zastosowania tarczy aerolowej

badanie

w eksperymencie dotyczącym wytwarzania plazmy laserowej w wyniku oddziaływania nanosekundowych impulsów laserowych z tarczą aerozolową. Wyniki przeprowadzonych badań zamieściłem w dalszej części pracy doktorskiej, ^w rozdziale 4. ^{Też i} oraz 5., a także w ramach opublikowanych już publikacji naukowych [144, 145].