

DOI: 10.5604/20830157.1121341

# WŁAŚCIWOŚCI I ZASTOSOWANIA REAKTORÓW PLAZMOWYCH TYPU DYSZA PLAZMOWA

Michał Kwiatkowski, Piotr Terebun, Piotr Krupski, Radosław Samoń,  
Jarosław Diatczyk, Joanna Pawłat, Henryka Stryczewska

Politechnika Lubelska, Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii

**Streszczenie:** Reaktory plazmowe typu dysza plazmowa, służące do wytwarzania plazmy niskotemperaturowej, mają wiele możliwości zastosowań, m.in. w inżynierii biomedycznej, gdzie wykorzystywane są do sterylizacji ran powierzchniowych i narzędzi nieodpornych na działanie wysokich temperatur oraz w technice materiałowej, gdzie służą do zmiany właściwości fizyko-chemicznych powierzchni materiałów. Ich wielką zaletą jest możliwość precyzyjnej aplikacji zjonizowanego gazu w niewielkich przestrzeniach.

Niniejsza praca obejmuje przegląd stosowanych w nauce i technice konstrukcji dysz plazmowych oraz możliwości ich zastosowań, a także przedstawia budowę reaktora plazmowego z wyładowaniem barierowym wraz z wynikami wykonanych pomiarów.

**Słowa kluczowe:** reaktory plazmowe typu dysza plazmowa, wyładowanie barierowe

## PROPERTIES AND APPLICATIONS OF PLASMA NOZZLE REACTORS

**Abstract.** Plasma nozzle for producing low-temperature plasma, has many possible applications, in biomedical engineering, which are used to sterilize wounds and surface of medical tools easily at low temperatures and in the technology of materials, to change the physico-chemical properties of surface. Their great advantage is the possibility of precise application of ionized gas.

This paper gives an overview of background science and technology of plasma jets, their possible application, and the first experimental results of mini plasma jets with dielectric barrier discharge.

**Keywords:** plasma reactors plasma jet type, barrier discharge

### Wstęp

W ostatnich latach można zauważyć wzrost zainteresowania wytwarzaniem i zastosowaniem plazmy nietermicznej generowanej przy ciśnieniu atmosferycznym. Prosty układ zasilania oraz duża tolerancja na zmiany parametrów zasilania, zmiany ciśnienia oraz skład gazu roboczego, a także szerokie możliwości zastosowania w wielu dziedzinach gospodarki i nauki, powodują duże zainteresowanie badaczy i firm na całym świecie.

Plazmę do celów technologicznych wytwarza się przy użyciu różnych typów wyładowań elektrycznych, w zależności od układu zasilania, geometrii elektrod czy składu gazu roboczego

W technologiach plazmowych wykorzystuje się zarówno wyładowania niepełne, niezwiązane elektrod reaktora plazmowego, np. wyładowania barierowe, czy wyładowania zupełne, do których zaliczamy wyładowanie łukowe [12].

W tabeli 1 przedstawiono krótkie zestawienie typów reaktorów plazmowych oraz ich zastosowania [12].

Tabela 1. Reaktory plazmowe i ich zastosowania [12]

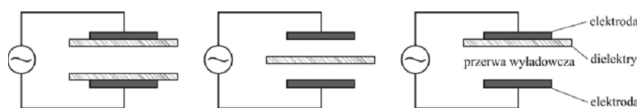
Rodzaj reaktora plazmowego	Zastosowania	Sposób zasilania
Reaktory z wyładowaniami barierowymi	Synteza ozonu, konwersja metanu, oczyszczanie gazów wylotowych, sterylizacja powierzchni.	Napięcie przemienne częstotliwości sieciowej, podwyższonej i wysokiej częstotliwości
Reaktory z upakowaniem dielektrycznym	Rozkład $SO_x$ i $NO_x$ , konwersja węglowodorów	Napięcie stałe, impulsowe bądź przemienne
Reaktory z wyładowaniem koronowym	Unieszkodliwianie lotnych substancji organicznych VOC	Napięcie impulsowe, stałe
Reaktory z mikro wyładowaniami	Sterylizacja, obróbka materiałów organicznych	Napięcie impulsowe, wysoka częstotliwość
Reaktory z wyładowaniami powierzchniowymi	Unieszkodliwianie tlenków azotu, lotnych substancji organicznych	Napięcie sinusoidalne podwyższonej i wysokiej częstotliwości
Reaktory łukowe (plazmotrony)	Syntezy chemiczne, topienie, spawanie, obróbka powierzchniowa, utylizacja odpadów	Napięcie stałe, jednokierunkowe, napięcie sinusoidalne częstotliwości sieciowej
Reaktory ze ślizgającym się łukiem elektrycznym	Neutralizacja toksycznych gazów, nieszkodliwienie $SO_x$ i $NO_x$	Napięcie stałe, impulsowe oraz przemienne
Reaktory mikrofalowe	Usuwanie lotnych substancji organicznych VOC	Napięcie o częstotliwości rzędu mega i giga herców

Do dzisiaj niemal wszystkie typy wyładowań elektrycznych zostały przebadane pod względem możliwości zastosowania w generowaniu plazmy. Jednym z najczęściej wykorzystywanych jest wyładowanie z barierą dielektryczną, nazywane również wyładowaniem cichym.

## 1. Reaktory plazmowe z wyładowaniem barierowym

### 1.1. Schematy

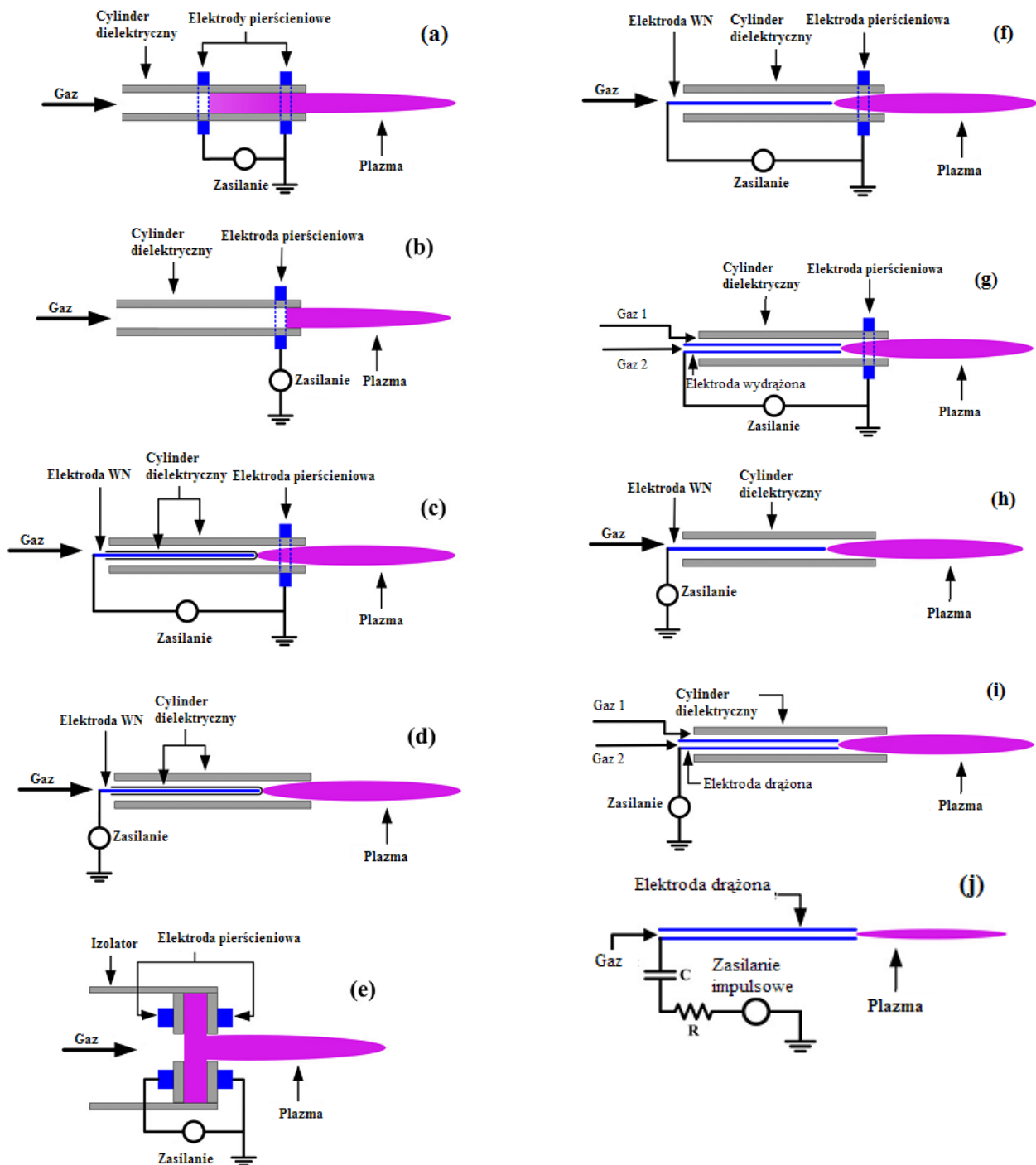
Przy wyładowaniu barierowym najczęściej wykorzystuje się elektrody płaskie bądź cylindryczne. Trzy podstawowe konfiguracje elektrod, stosowane przy wyładowaniu barierowym przedstawiono na rysunku 1 [12]. Warstwa dielektryka umiejscowiona jest na elektrodzie wysokiego napięcia, na obydwu elektrodach bądź też w szczelinie pomiędzy nimi.



Rys. 1. Typowe konfiguracje elektrod reaktorów z wyładowaniem barierowym [12]

Zastosowanie materiałów dielektrycznych wymusza potrzebę stosowania wysokiego napięcia, aby zaistniały warunki umożliwiające zapoczątkowanie wyładowania elektrycznego. Właśnie dlatego dysze plazmowe z wyładowaniem barierowym, działające przy ciśnieniu atmosferycznym, najczęściej mają średnicę od nawet poniżej jednego mm do kilku cm [16] – przy czym im większa średnica, tym wyższe napięcie konieczne do zaistnienia wyładowania.

W układach reaktora z wyładowaniem barierowym z dyszą plazmową używa się kilku zmodyfikowanych wariantów z wyżej przedstawionych podstawowych konfiguracji elektrod (rys. 2), wykonanych w układzie cylindrycznym z materiałów dielektrycznych (ceramika, szkło, polimer, materiały porowate nieprzewodzące).



Rys. 2. Schematy dysz plazmowych z wyładowaniem barierowym stosowanych w konstrukcjach reaktorów plazmowych [4]

Pierwszym z przedstawionych rozwiązań (rys. 2a) jest reaktor wykonany z dielektrycznej rury. Na zewnętrzną powierzchnię zostały nawinięte dwie elektrody pierścieniowe, umieszczone od siebie w odległości uniemożliwiającej zaistnienie łuku elektrycznego w powietrzu między elektrodami.

Na kolejnym schemacie (rys. 2b) usunięto jedną z elektrod, na reaktorze umieszczono elektrodę wysokiego napięcia, natomiast funkcję drugiej elektrody uziemionej pełni materiał poddawany obróbce. Taka konfiguracja powoduje zmniejszenie mocy wyładowania wewnątrz rury dielektryka.

Na rys. 2c przedstawiony został reaktor z elektrodą wysokiego napięcia w postaci wewnętrznie umiejscowionego centralnego pręta w dielektrycznej osłonie oraz pierścieniowej elektrody uziemionej nawiniętej na zewnątrz. Takie rozwiązanie powoduje wzmocnienie pola elektromagnetycznego wokół wiązki plazmy.

Według literatury przedmiotu konfiguracja ta sprzyja tworzeniu długiego strumienia plazmy o większej aktywności chemicznej na wyjściu z generatora [4].

Reaktor z rys. 2d posiada jedynie elektrodę wewnętrzną izolowaną dielektrykiem, a jako elektroda uziemiona służy obiekt poddany działaniu plazmy. Taka konfiguracja zapewnia niższą aktywność chemiczną plazmy, niż w przypadku schematu rys. 2c lecz wyższą niż w schemacie rys. 2b.

Konfiguracja z rys. 2e, opracowana przez M. Laroussi oraz X. Lu [3], różni się od pozostałych reaktorów z wyładowaniem barierowym – elektrody pierścieniowe zostały przymocowane do dwóch centralnie perforowanych tarczy dielektryka. Otwory w tarczach mają około 3mm średnicy, a same tarcze są oddalone o około 5mm. Taka konfiguracja pozwala na uzyskanie strumienia plazmy o długości kilku cm.

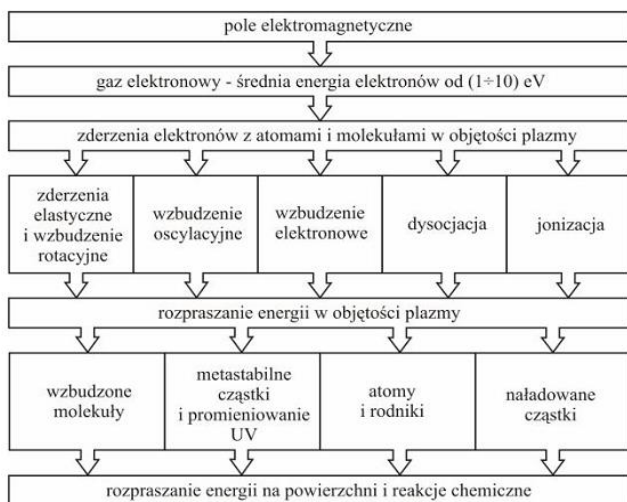
Reaktor z kolejnego rysunku (2f) ma podobną konstrukcję do reaktora z rys. 2c, z tą jednak różnicą, że elektroda wysokiego napięcia wewnątrz tuby nie jest dodatkowo izolowana. Nieco inny wariant został przedstawiony na rys 2g – elektroda wewnętrzna jest wydrążona, więc reaktor posiada dwa oddzielne kanały, które umożliwiają mieszanie się gazów roboczych bezpośrednio przed jonizacją, a nie w przewodzie gazowym przed reaktorem.

Schematy z rysunków 2h oraz 2i są analogiczne do rysunków 2f i 2g, z tą jednak różnicą, że nie posiadają nawiniętych uziemionych elektrod pierścieniowych – rolę elektrody pełni tu obiekt poddany działaniu plazmy [10]. Elektrody wysokiego napięcia nie są izolowane a rura dielektryczna bierze udział jedynie w ukierunkowaniu strumienia plazmy. Jednak w tym przypadku istnieje ryzyko zaistnienia łuku elektrycznego, przez co reaktory te nie są zalecane do zastosowań biomedycznych.

Ostatnim przedstawionym reaktorem (rys. 2j) jest przykładowy układ bez dielektryka, w którym rolę rurki pełni elektroda wydrążona bez dodatkowego izolatora, np. igła [15]. Zastosowanie połączonego szeregowo rezystora i kondensatora pozwoliło na zmniejszenie maksymalnego prądu do wartości bezpiecznej dla człowieka, co pozwala na bezpośrednio oddziaływanie plazmy bez ryzyka porażenia elektrycznego.

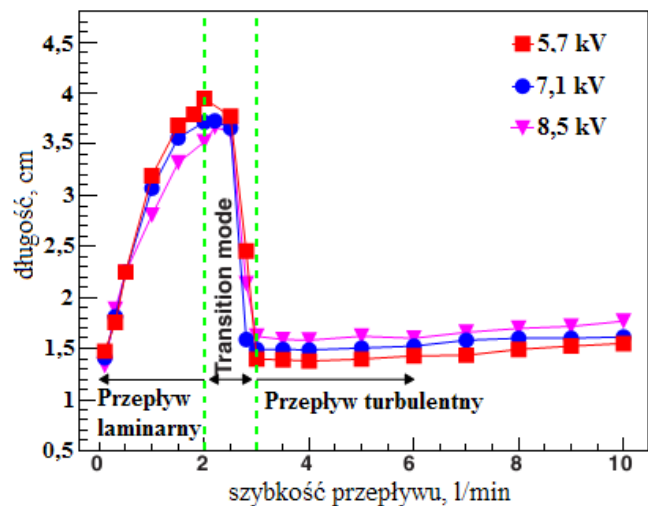
Reaktory są zasilane wysokim napięciem o częstotliwości rzędu od kilku do kilkudziesięciu kiloherców, bądź napięciem impulsowym [10]. W momencie, gdy przez rurkę dielektryczną przepływa gaz roboczy, a napięcie jest włączone, następuje silna jonizacja gazu, zjawisko to powoduje powstawanie gazu złożonego z mieszaniny gazów roboczych, wolnych rodników, jonów oraz wolnych elektronów nazywanym plazmą.

Rysunek 3. przedstawia przemiany energii zachodzące w reaktorach plazmowych podczas generowania plazmy nietermicznej. W trakcie wyładowań elektrycznych większość energii zostaje zużyta do wytworzenia wysokoenergetycznych elektronów, a nie na podgrzanie gazu [13]. Energia wyładowania jest więc wykorzystywana na jonizację gazu i dysocjację jonową mającą na celu wytworzenie reaktywnych rodników, które są aktywnym składnikiem plazmy.



Rys. 3. Przemiany energii i zjawiska zachodzące w plazmie [13]

Prędkość przepływu gazu w reaktorze jest istotnym czynnikiem, ponieważ przy zbyt niskim przepływie wyładowanie może nie nastąpić, jednak zbyt wysoka prędkość gazu roboczego powoduje przechodzenie przepływu strumienia plazmy z laminarnego w turbulentny (rys. 4).



Rys. 4. długość strumienia plazmy w zależności od szybkości przepływu gazu roboczego [10]

Przedstawiony powyżej przegląd reaktorów plazmowych z dyszą dotyczy jedynie najczęściej stosowanych konstrukcji. W użyciu znajdują się również reaktory dostosowane do konkretnych potrzeb produkcyjnych, specjalnych układów zasilania bądź też gazów roboczych.

## 1.2. Zastosowania dysz plazmowych

Plazma jest zjonizowanym gazem w którym atomy różnych pierwiastków łatwo wchodzi w reakcje z innymi substancjami chemicznymi. Dzięki tym właściwościom znalazła zastosowanie w wielu dziedzinach nauki i techniki.

Zastosowanie reaktorów z wyładowaniem barierowym typu dysza plazmowa jest obecnie najbardziej rozpowszechnione w technologicznym uzdatnianiu wody pitnej, gdzie generowany w wyładowaniach ozon w znacznym stopniu zastąpił toksyczny chlor.

Główne zastosowania plazmy wyładowań barierowych obejmują [2, 5, 7, 8, 9, 11, 14]:

1) W technice i przemyśle:

- sterylizację wody, powietrza, gleby, powierzchni i opakowań;
- selektywne usuwanie zanieczyszczeń z gazów wylotowych;
- modyfikowanie właściwości powierzchni materiałów, poprzez zmianę ich właściwości fizykochemicznych.
- możliwość przedłużenia przydatności do spożycia artykułów spożywczych, dzięki zastosowaniu plazmy w procesie pakowania.

2) W medycynie i bioinżynierii:

- sterylizację tkanek i wspomaganie leczenia (zwłaszcza w dermatologii) – oddziaływanie plazmy na mikroorganizmy zmniejsza ryzyko zakażenia, przyspiesza gojenie ran i wspomaga leczenie nowotworów skóry;
- sterylizację narzędzi medycznych – plazma o niskiej temperaturze pozwala na odkażanie narzędzi medycznych wykonanych z tworzyw sztucznych, nieodpornych na działanie wysokiej temperatury, zastępuje stosowanie chemicznych środków, które jest znacznie trudniej usunąć;
- pokrywanie implantów soczewek, biosensorów warstwami biokompatybilnymi. Pokrywając elementy z tworzyw sztucznych amorficznymi warstwami, pomoże zwiększyć tolerancję organizmu na kontakt z implantami protezami czy soczewkami;
- zastosowanie przy produkcji i pakowaniu leków;
- kurację przy użyciu plazmy bądź ozonoterapię, które skutecznie niszczą większość bakterii, wirusów, pleśni

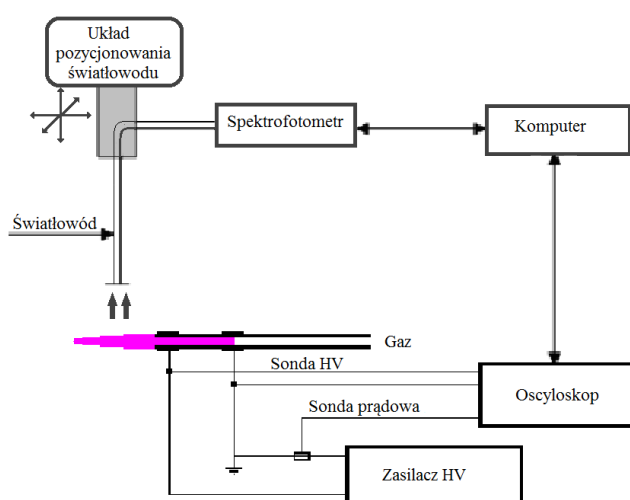
i grzybów, pozwalając uniknąć kuracji przy użyciu środków farmakologicznych.

Wiele z wymienionych zastosowań jest z powodzeniem używanych zwłaszcza w przemyśle. Zastosowanie reaktorów plazmowych w medycynie jest obecnie przedmiotem intensywnych badań i tylko niektóre rozwiązania są już stosowane w praktyce, nad resztą nadal trwają prace badawcze.

## 2. Pomiary parametrów reaktora plazmowego znajdującego się w laboratorium IPEiE PL

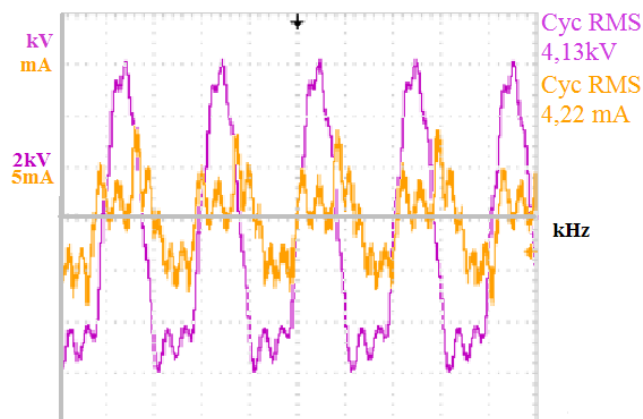
Pomiary elektryczne zostały przeprowadzone dla reaktora z wyładowaniem barierowym przedstawionym na schemacie z rysunku 2a. Zaletami takiego układu są: prosta budowa, niewielkie wymiary reaktora i układu zasilającego.

Sprawdzenie parametrów elektrycznych reaktora typu dysza plazmowa z wyładowaniem barierowym przy ciśnieniu atmosferycznym, wraz z pomiarem widma optycznego zostały wykonane w układzie przedstawionym na rysunku 5.



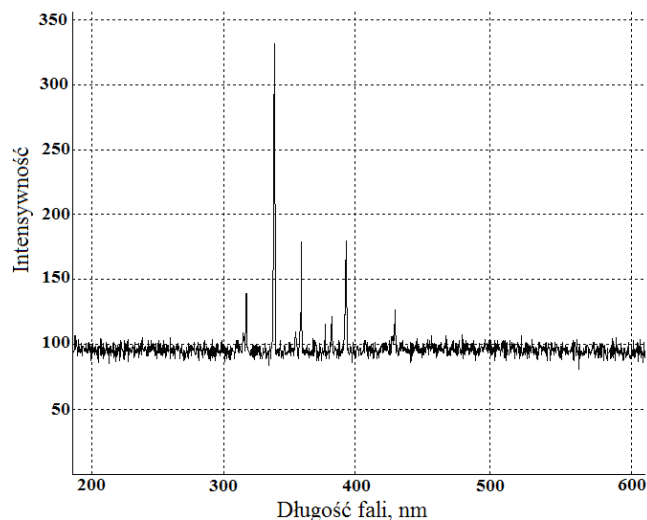
Rys. 5. Schemat układu pomiarowego reaktora plazmowego

Pomiary przebiegu prądu i napięcia zasilania reaktora typu dysza plazmowa z dwiema elektrodami pierścieniowymi, wykonanymi z blachy miedzianej, nawiniętej na ceramiczną rurę o średnicy wewnętrznej ok. 1,5 mm przedstawiono na rys. 6. Pomiary wykonane zostały przy użyciu oscyloskopu cyfrowego z dołączoną sondą wysokiego napięcia i sondą prądową.

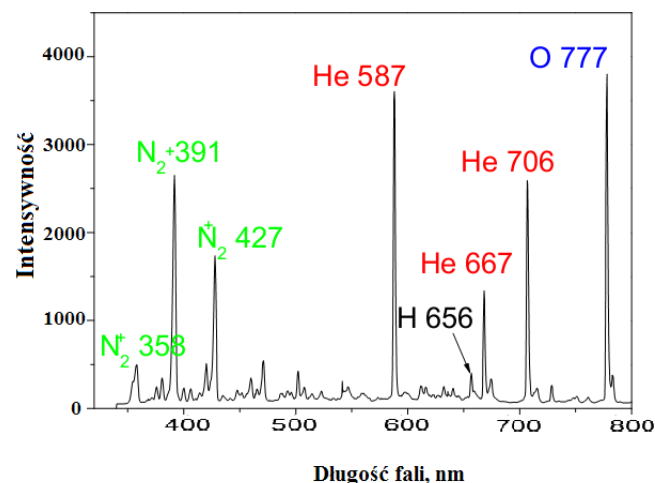


Rys. 6. Przebieg prądu i napięcia reaktora plazmowego typu dysza plazmowa

Jak widać na oscylogramie dla tego typu reaktora moc dostarczana do szczeliny wyładowczej jest niewielka i wynosi około 17,42 VA. Przy częstotliwości zasilania 19,7 kHz. Na rysunku 7 zamieszczono pomiar widma optycznego, wykonany przy wykorzystaniu spektrometru optycznego, przy przepływie 0,03 l/min He. Dla porównania zostało zamieszczone zdjęcie przedstawiające charakterystykę widma emisyjnego, zaczerpnięte z literatury (rys. 8) [6].



Rys. 7. Widmo optyczne strumienia plazmy przy wyładowaniu barierowym w zakresie od 200 do 600 nm



Rys. 8. Charakterystyka widma emisyjnego [6]

## 3. Podsumowanie

Ponieważ plazma i większość jej składników bardzo szybko ulega rozpadowi, nie można jej przechowywać i musi być wykorzystywana natychmiast po wytworzeniu, urządzenia służące do jej generowania są ciągle rozwijane i dostosowywane do nowych zastosowań.

Reaktory plazmowe typu dysza dzięki niewielkim wymiarom dają bardzo duże możliwości dla medycyny i inżynierii biomedycznej. Duża precyzja aplikacji plazmy w połączeniu z niewielkimi wymiarami zarówno urządzenia, jak i układu zasilającego pozwalają temu typowi reaktorów na osiągnięcie przewagi w wielu zakresach porównując go z innymi typami reaktorów.

## Literatura

- [1] Komarzyniec G., Stryczewska D. H.: Technologie nadprzewodnikowe i plazmowe w energetyce, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2009.
- [2] Kryza K., Szczepanik G.: Zastosowanie techniki zimnej plazmy jako nowoczesna technologia zabezpieczania surowców żywnościowych 2010. rsi.org.pl/index.php/pl/Nowosci/8, 2010, 334.
- [3] Laroussi M., Lu X.: Room-temperature atmospheric pressure plasma plume for biomedical applications. Applied Physics Letters 87/2005, 113902.
- [4] Lu X., Laroussi M., Puech V.: On atmospheric-pressure non-equilibrium plasma jets and plasma bullets. Plasma Sources Sci. Technol. 21/2012, 034005.
- [5] Nehra V., Kumar A., Dwivedi H. K.: Atmospheric non-thermal plasma sources. International Journal of Engineering 02/2008, pp. 53-68.
- [6] Olenici-Craciunescu S. B.: Micro capillary dielectric barrier plasma jet discharge. Characterisation By Optical Spectroscopy. Technische Universität Dortmund Leibniz-Institut für Analytische Wissenschaften, 02/2011, pp. 42.
- [7] Pawlat J., Diatczyk J., Stryczewska H. D.: Low-temperature plasma for exhaust gas purification from paint shop-a case study. Przegląd Elektrotechniczny 1/2011, s.245-248.
- [8] Pawlat J., Samoń R., Stryczewska H. D., Diatczyk J., Giżewski T: RF-powered atmospheric pressure plasma jet for surface treatment. The European Physical Journal Applied Physics, 02/2013, 24322.
- [9] Pawlat J.: Atmospheric pressure plasma jet for decontamination purposes. The European Physical Journal Applied Physics 02/2013, s. 1-11.
- [10] Qing Li, a, Jiang-Tao Li, Wen-Chao Zhu, Xi-Ming Zhu, Yi-Kang Pu: Effects of gas flow rate on the length of atmospheric pressure nonequilibrium plasma jets. Applied Physics Letters 95/2009, pp. 1-2.
- [11] Sirajuddin D., Foster J. E.: Plasma sterilization. www.itcanbeshown.com/NER5590, 2007.
- [12] Stryczewska D. H.: Technologie plazmowe w energetyce i inżynierii środowiska. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2009.
- [13] Stryczewska H. D.: Technologie zimnej plazmy. Wytwarzanie, modelowanie, zastosowania. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2011.
- [14] Topala I., Dumitrascu N., Dimitriu D.: Experimental and theoretical investigations of dielectric-barrier plasma jet in helium. IEEE Transactions on Plasma Science 11/ 2012, pp. 2811-2816.
- [15] Xinpei Lu et al.: An RC Plasma device for sterilization of root canal of teeth. IEEE Transactions On Plasma Science 5/2009, pp. 668-669.
- [16] Xinpei Lu, ZhongHe Jiang, Qing Xiong, ZhiYuan Tang, XiWei Hu, Yuan PanAn: 11 cm long atmospheric pressure cold plasma plume for applications of plasma medicine. Applied Physics Letters 92/2008, 081502.

**Mgr inż. Michał Kwiatkowski**  
e-mail: m.kwiatkowski@pollub.pl

W roku 2011 ukończył studia na wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. W roku 2011 rozpoczął pracę na Wydziale Elektrycznym Politechniki Lubelskiej na stanowisku starszy referent techniczny. W 2012 roku został przyjęty na pierwszy rok studiów doktoranckich na wydziale Elektrycznym Politechnik Lubelskiej.



**Mgr inż. Piotr Terebun**  
e-mail: piotr.terebun@gmail.com

Mgr inż. Piotr Terebun jest absolwentem Politechniki Lubelskiej na kierunkach Elektrotechnika oraz Fizyka Techniczna. Od 2012 roku, jako doktorant Politechniki Lubelskiej w dyscyplinie Elektrotechnika, zajmuje się zagadnieniami fizyki plazmy w Instytucie Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii. Jego zainteresowania naukowe obejmują technologie plazmowe w ochronie środowiska i medycynie, odnawialne źródła energii oraz modelowanie numeryczne.



**Mgr inż. Piotr Krupski**  
e-mail: piotr.krupski@pollub.edu.pl

Mgr inż. Piotr Krupski Jest absolwentem fizyki technicznej, oraz elektrotechniki na Politechnice Lubelskiej, specjalność odnawialne źródła energii. Obecnie doktorant w dyscyplinie naukowej elektrotechnika na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. Nauczyciel przedmiotów elektrotechnicznych i związanych z energetyką odnawialną w Zespole Szkół Energetycznych im. prof. Kazimierza Drewnowskiego w Lublinie. Jego zainteresowania naukowe obejmują fizykę plazmy nierównowagowej a także analizę układów zasilania niewielkich generatorów plazmy niskotemperaturowej.



**Mgr inż. Radosław Samoń**  
e-mail: radzio64@vp.pl

Mgr inż. Radosław Samoń – urodzony w 1981 roku w Lublinie, w 2007 r. ukończył studia na Politechnice Lubelskiej, gdzie w 2008 r. rozpoczął studia doktoranckie. Tematyka jego rozprawy doktorskiej obejmuje wykorzystanie technologii plazmowych dla potrzeb ochrony środowiska. Od 2012 roku jest audytorem energetycznym.



**Dr inż. Jarosław Diatczyk**  
e-mail: j.diatczyk@pollub.pl

Tytuł magistra inżyniera uzyskał w 2002 roku na Wydziale Elektrycznym Politechniki Białostockiej. Po ukończeniu Studiów Doktoranckich na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej uzyskał w 2009 roku tytuł doktora nauk technicznych. Od 2003 roku pracuje na Politechnice Lubelskiej na stanowisku asystenta, a od 2010 roku – na stanowisku adiunkta. Prowadzi zajęcia dla studentów Wydziału Elektrotechniki i Informatyki, na studiach podyplomowych oraz na kierunkach międzywydziałowych.



**Dr inż. Joanna Pawlat**  
e-mail: askmik@hotmail.com

Dr inż. Joanna Pawlat jest absolwentką Politechniki Lubelskiej i Saga University w Japonii. Pracowała w Waseda University (2004-2010), Hi-Tech Center przy Chuo University w Japonii (2001-2002). W latach 2002-2004 była stypendystką JSPS na Uniwersytecie Saga przy współpracy z Toyohashi Technical University w Japonii. Obecnie jest adiunktem na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej.



**Prof. dr hab. inż. Henryka Danuta Stryczewska**  
e-mail: h.stryczewska@pollub.pl

Ukończyła Wydział Elektryczny Politechniki Lubelskiej. Tytuł profesora uzyskała w 2010 r. W latach 2003-2004 pracowała jako profesor wizytujący w Laboratorium Przemian Energii Uniwersytetu Kumamoto w Japonii, zajmując się m.in. plazmową sterylizacją gleby. Obecnie kieruje Instytutem Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej.



otrzymano/received: 14.05.2014

przyjęto do druku/accepted: 07.07.2014