

**Dariusz Czyłkowski, Bartosz Hrycak, Mariusz Jasiński**

Instytut Maszyn Przepływowych im. R. Szewalskiego PAN w Gdańsku

**Jerzy Mizeraczyk**

Instytut Maszyn Przepływowych im. R. Szewalskiego PAN w Gdańsku

Akademia Morska w Gdyni

## **BADANIA EKSPERYMENTALNE MIKROFALOWEGO GENERATORA MIKROPLAZMY MAŁEJ MOCY**

*W pracy przedstawiono nowe mikrofalowe źródło mikroplazmy generowanej w gazach pod ciśnieniem atmosferycznym. Opisano budowę, zasadę działania i badania eksperymentalne nowego źródła mikroplazmy. Istotną zaletą przedstawionego generatora są prosta budowa i niski koszt produkcji. Generowana mikroplazma ma formę płomienia o wymiarach kilku mm w zależności od rodzaju gazu, przepływu gazu i mocy fali absorbowanej. Wszystkie wyniki prezentowanych w pracy badań eksperymentalnych uzyskano dla mikroplazmy w argonie, kryptonie, azocie i powietrzu pod ciśnieniem atmosferycznym i częstotliwości mikrofal 2,45 GHz. Moc fali absorbowanej w plazmie wynosiła do 70 W, a przepływ gazu w zakresie od 2 do 25 l/min. Prostota budowy generatora i stabilność generowanej mikroplazmy pozwalają wnioskować, że prezentowane nowe źródło mikroplazmy znajdzie zastosowanie w wielu różnych dziedzinach.*

### **WPROWADZENIE**

Mikroplazma to stosunkowo nowe zagadnienie w dziedzinie fizyki plazmy. Plazma, czyli zjonizowany gaz, składa się z dodatnio lub ujemnie naładowanych jonów, elektronów oraz cząstek obojętnych. Plazma o małych rozmiarach rzędu od  $\mu\text{m}$  do mm nazywana jest mikroplazmą. Zmniejszenie wymiarów plazmy ma pozytywne aspekty, które nie są widoczne w źródłach plazmy o większych rozmiarach. Obecnie na świecie obserwuje się gwałtowny wzrost zainteresowania tą tematyką. Zainteresowanie mikroplazmą, zgodne z panującym obecnie w świecie trendem dążenia do miniaturyzacji, podyktowane jest ekonomicznością wytworzenia i eksploatacji urządzeń oraz ich funkcjonalnością. Wyrazem zainteresowania mikroplazmą jest również fakt, że zagadnieniem tym zajmują się całe ośrodki badawcze jak Center for Microplasma Science and Technology w Jersey City USA [20]. Mikroplazmie poświęcone są także międzynarodowe konferencje naukowe i warsztaty, np. The Fourth Internal Workshop "Physics of Microplasmas" w Geseke w Niemczech [19]. Dzięki swym charakterystycznym właściwościom obszar badań zastosowań mikroplazmy jest szeroki, począwszy od ochrony środowiska, biomedycyny jako źródło promieniowania UV i VUV [10], a skończywszy na zastosowaniach

typowo technicznych. Dla przykładu w ochronie środowiska naturalnego mikroplazma może być wykorzystywana do dekompozycji lotnych związków organicznych VOCs (*volatile organic compounds*) [5], eliminacji tlenków azotu ( $\text{NO}_x$ ) [13] i destrukcji szkodliwych czynników, takich jak  $\text{CF}_4$  wytwarzany przy produkcji półprzewodników [14]. W biomedycynie mikroplazma może znaleźć zastosowanie w sterylizacji i niszczeniu bakterii i wirusów [16]. W zastosowaniach technicznych mikroplazma jest wykorzystywana do mikrospawania [15, 17]. W pracy [18] zaproponowano wykorzystanie mikroplazmy do lokalnej obróbki warstw poliamidowych, a w pracach [8, 12] do precyzyjnego nanoszenia warstw węglowych. Mikroplazma generowana w mieszaninach gazowych może być także skutecznie wykorzystywana do wykonywania otworów rzędu kilkuset  $\mu\text{m}$  w płytkach krzemowych [6].

Mikroplazma może być generowana różnymi sposobami, np. za pomocą napięcia stałego, przy użyciu częstotliwości radiowych, jak również mikrofal, przy czym metoda generacji mikroplazmy za pomocą mikrofal charakteryzuje się większą efektywnością jej wytwarzania w porównaniu z innymi metodami (np. za pomocą wyładowania wysokiej częstotliwości – RF). Opracowano mikrofalowe generatory mikroplazmy różnej konstrukcji, tj. konstrukcji falowodowej [4, 7], współosiowej [3, 11] i z linią paskową [1, 8, 9].

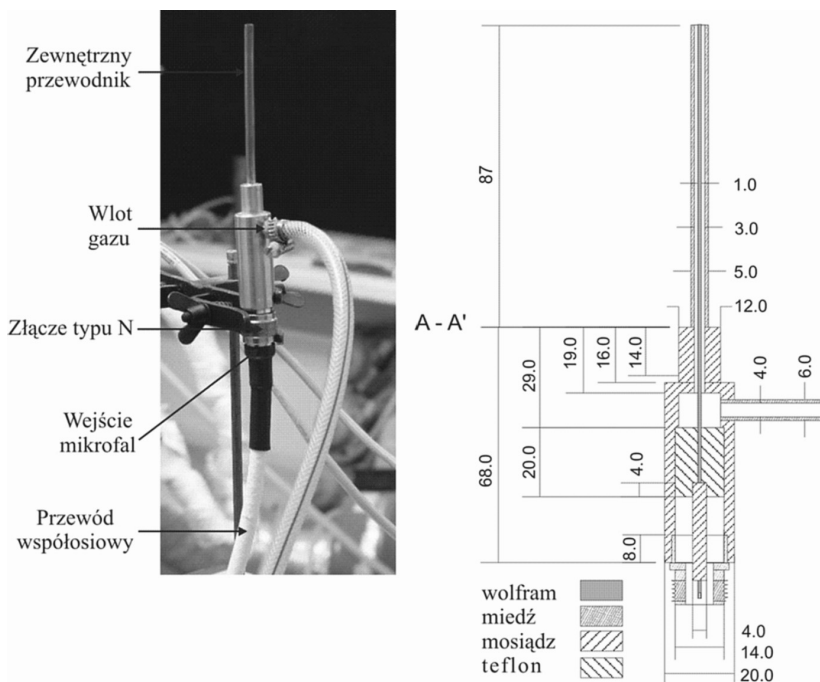
W niniejszej pracy przedstawiono mikrofalowy generator mikroplazmy generowanej mikrofalami (2,45 GHz) w gazach pod ciśnieniem atmosferycznym. Konstrukcja prezentowanego generatora mikroplazmy bazuje na linii współosiowej. Jest to jedno z najmniejszych źródeł plazmy testowanych w naszym zespole.

W artykule omówiono budowę i zasadę działania nowego generatora oraz przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych.

## 1. NOWY MIKROFALOWY (2,45 GHZ) GENERATOR MIKROPLAZMY MAŁEJ MOCY

Zdjęcie i przekrój z wymiarami prezentowanego poniżej nowego mikrofalowego generatora mikroplazmy przedstawiono na rysunku 1. Skonstruowano go na bazie linii współosiowej. Linię tę tworzą cylindryczny zewnętrzny przewódnik o średnicach wewnętrznej i zewnętrznej odpowiednio 5 i 3 mm oraz przewód wewnętrzny o średnicy 1 mm. Zewnętrzny przewódnik wykonano z mosiądzu, a przewód wewnętrzny – z wolframu. Zastosowanie wolframu wynika z możliwości występowania wysokiej temperatury gazu w wyładowaniu, przewyższającej wytrzymałość termiczną mosiądzu. Wewnątrz generatora umieszczono dielektryk w postaci tulejki teflonowej centrującej przewód wewnętrzny, zmniejszając tym samym możliwość powstawania przebić. Gaz do wyładowania doprowadzany jest za pomocą miedzianej rurki przez otwór wykonany w ścianie zewnętrznego przewódnika. Mikrofały o standardowej częstotliwości 2,45 GHz dostarczane są do generatora mikroplazmy giętkim przewodem współosiowym ( $50 \Omega$ ) poprzez

zintegrowane z nim złącze typu N. Zasilanie generatora mikroplazmy giętkim kablem współosiowym daje możliwość łatwego przemieszczania generatora na odległości ograniczone długością kabla zasilającego. Ponadto długa (ponad 87 mm) i wąska (5 mm) struktura współosiowa pozwala na kontakt mikroplazmy np. z obrabianym materiałem w trudno dostępnych miejscach. Generator mikroplazmy nie był wyposażony w żaden element dopasowujący impedancję.

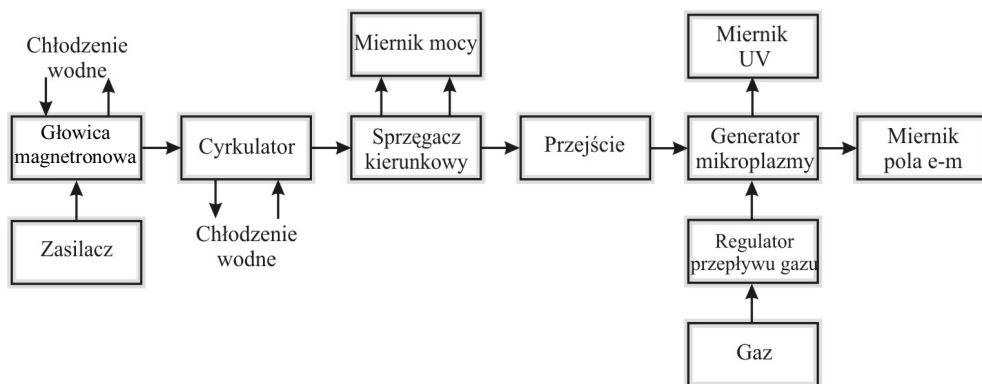


**Rys. 1.** Zdjęcie i przekrój nowego mikrofalowego generatora mikroplazmy  
**Fig. 1.** Photograph and sketch of the novel microwave source of microplasma

Opisany wyżej generator posiada prostą konstrukcję i jest łatwy do wykonania, co czyni go tanim w potencjalnej produkcji.

## 2. UKŁAD EKSPERYMENTALNY

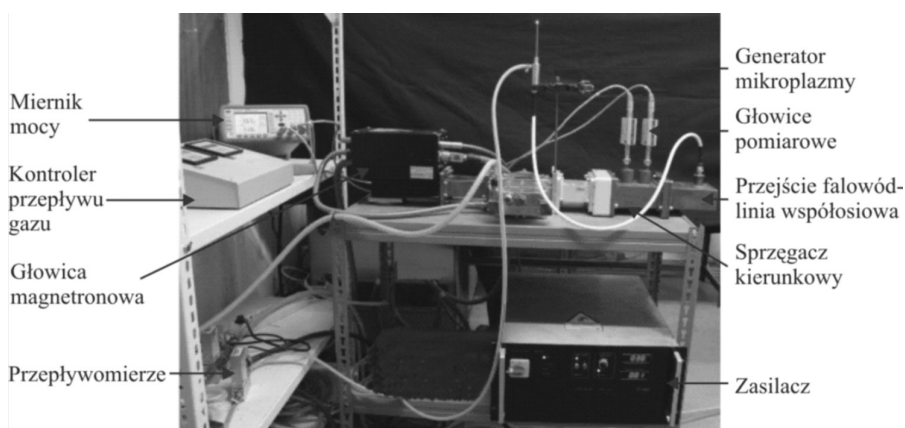
Schemat układu do eksperymentalnego badania nowego mikrofalowego generatora mikroplazmy przedstawia rysunek 2. Rysunek 3 zaś pokazuje zdjęcie układu eksperymentalnego. Układ składa się z generatora mikrofal, układu do pomiaru mocy fali padającej oraz odbitej, systemu kontroli przepływu gazu, generatora mikroplazmy oraz mierników natężenia promieniowania elektromagnetycznego i promieniowania UV. Zbudowany jest ze standardowych elementów falowodowych i współosiowych.



**Rys. 2.** Schemat układu eksperymentalnego

**Fig. 2.** Diagram of the experimental setup

Mikrofałe o częstotliwości 2,45 GHz dostarczane są z generatora mikrofal, składającego się z głowicy magnetronowej z zasilaczem wysokiego napięcia i panelem sterującym. Generator mikrofal pracuje w trybie pracy ciągłej. Głowica magnetronowa połączona jest z chłodzoną wodą cyrkulatorem, który zabezpiecza ją przed zniszczeniem przez falę odbitą. Dzięki zastosowaniu sprzęgacza kierunkowego o sprzężeniu 50 dB i kierunkowości 30 dB oraz głowic pomiarowych i dwukanałowego cyfrowego miernika mocy możliwy jest dokładny pomiar padającej i odbitej mocy mikrofal. Układ falowodowy zakończony jest przejściem z falowodu na linię współosiową. Dalej mikrofałe prowadzone są giętkim przewodem współosiowym do generatora mikroplazmy.



**Rys. 3.** Zdjęcie układu eksperymentalnego

**Fig. 3.** Photograph of the experimental setup

W układzie eksperymentalnym nie występowały żadne elementy dopasowujące impedancję jak zwierak ruchomy i strojnik śrubowy. Gaz roboczy do generatora mikroplazmy doprowadzany jest pod ciśnieniem atmosferycznym. Natężenie jego

przepływu ustalają regulatory przepływu gazu typu Mass Flow Controller umożliwiające automatyczną regulację przepływu gazu. Natężenie pola elektromagnetycznego wokół generatora mikroplazmy umożliwia miernik HI-1600 firmy Holaday EMF Measurement. Do pomiaru natężenia promieniowania UV emitowanego przez źródło plazmy wykorzystano miernik napromienienia bakteriobójczego UVB-20 firmy Sonopan.

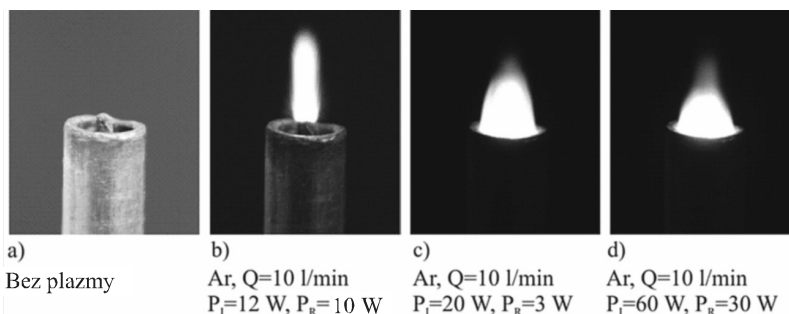
### 3. WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

W badaniach nowego generatora mikroplazmy jako gaz roboczy stosowano argon, krypton, azot i powietrze pod ciśnieniem atmosferycznym. Natężenie przepływu gazu wynosiło od 2 do 25 l/min. Zakres mocy fali padającej obejmował przedział od kilku do około 300 W. Moc mikrofal absorbowana przez mikroplazmę zmieniała się w granicach od 2 do około 70 W.

W niniejszym rozdziale zaprezentowano zdjęcia mikroplazmy argonowej dla różnych mocy absorbowanych mikrofal oraz zdjęcia mikroplazmy generowanej w innych gazach (krypton, azot, powietrze). Przedstawiono wyniki pomiarów efektywności transferu energii mikrofal do mikroplazmy oraz natężenia promieniowania elektromagnetycznego i natężenia promieniowania UV wokół generatora mikroplazmy.

#### 3.1. Wizualizacja płomienia plazmowego

Zdjęcia mikroplazmy argonowej dla różnych mocy fali padającej mikrofal przedstawiają rysunki 4b), 4c) i 4d). Wszystkie zdjęcia wykonano dla tego samego natężenia przepływu gazu, tj. 10 l/min. Na zdjęciach widać, że kształt mikroplazmy nie jest zawsze taki sam, ale zmienia się ze zmianą mocy mikrofal. Nie pozostaje to bez wpływu na wartość mocy fali odbitej, co pokazano w następnym podrozdziale.



**Rys. 4.** Zdjęcia mikroplazmy argonowej dla różnych mocy absorbowanych mikrofal

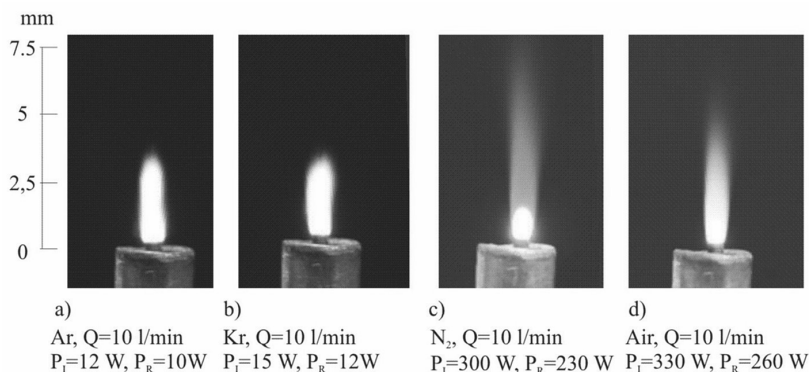
**Fig. 4.** Photographs of the argon microplasma for various values of the absorbed microwave power

Na rysunku 4b) widać płomień plazmowy w postaci wąskiej pojedynczej kolumny, rozchodzący się ku górze z wolframowego przewodnika wewnętrznego. Wysokość kolumny plazmowej wynosi około 3,5 mm. Moc fali padającej wynosi 12 W, a moc fali odbitej – 10 W. Dla tego przypadku moc fali odbitej stanowi około 83% wartości mocy fali padającej, a moc absorbowana w mikroplazmie równa jest pojedynczym watom.

Rysunek 4c) pokazuje zdjęcie płomienia plazmowego dla wartości mocy fali padającej i odbitej odpowiednio 20 W i 3 W. Moc absorbowana w mikroplazmie wynosi zatem kilka watów, a stosunek mocy fali odbitej do padającej wynosi 0,15. W stosunku do wcześniej opisanego przypadku mikroplazma nie ma postaci wąskiej kolumny. Jest niższa i szersza, zajmuje całą szerokość przewodnika zewnętrznego.

Na rysunku 4d) przedstawiono zdjęcie mikroplazmy odpowiadającej mocy fali padającej równej 60 W i mocy fali odbitej równej 30 W. W tym przypadku moc absorbowana w mikroplazmie wynosi kilkadziesiąt watów, lecz stosunek mocy fali odbitej do padającej wynosi 0,5. Płomień mikroplazmy w stosunku do płomienia z przypadku przedstawionego na rysunku 4c) wydaje się być jeszcze niższy i szerszy.

Na rysunku 5 zamieszczono zdjęcia mikroplazmy generowanej w argonie (rys. 5a), kryptonie (rys. 5b), azocie (rys. 5c) i powietrzu (rys. 5d). We wszystkich przypadkach natężenie przepływu gazu wynosiło 10 l/min. Moc fali padającej miała wartość 12, 15, 300 i 330 W, odpowiednio dla argonu, kryptonu, azotu i powietrza. Dla każdego z gazów była to minimalna wartość mocy fali padającej potrzebnej do generacji mikroplazmy. Jak widać z wartości mocy fali odbitej, podanej pod każdym ze zdjęć, moc absorbowana w mikroplazmie wynosiła odpowiednio około 2, 3, 70 i 70 W. Choć w przypadku mikroplazmy generowanej w azocie i powietrzu minimalna moc absorbowana wynosi tyle samo (70 W), to do inicjacji mikroplazmy w powietrzu wymagana jest wyższa wartość mocy fali padającej (330 W).



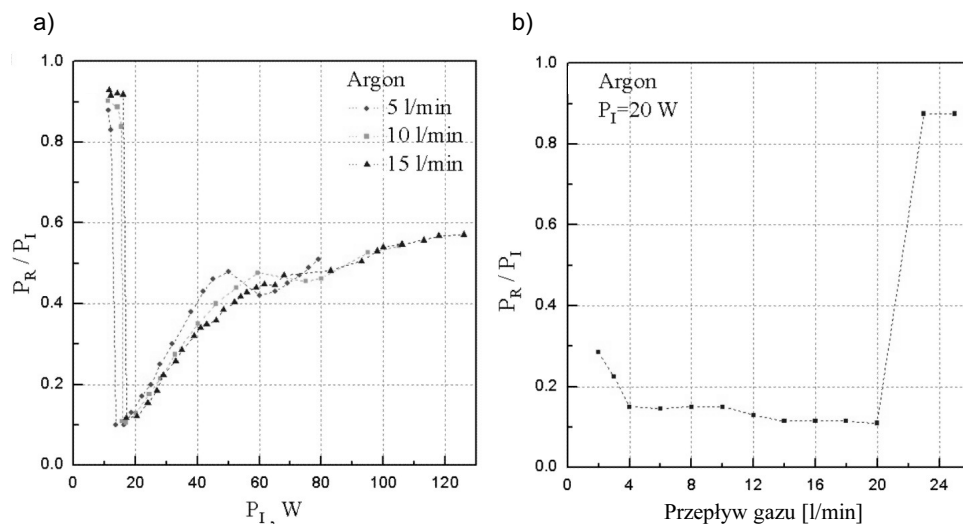
**Rys. 5.** Zdjęcia mikroplazmy w różnych gazach: a) w argonie, b) w kryptonie, c) w azocie, d) w powietrzu

**Fig. 5.** Photographs of the microplasma in various gases: a) argon, b) krypton, c) nitrogen, d) air

### 3.2. Efektywność transferu energii mikrofal

Wymiary generatora mikroplazmy powinny być dobrane tak, aby uzyskać dopasowanie impedancji generatora mikroplazmy do impedancji zasilającego toru mikrofalowego. Zapewnia to efektywne przekazywanie energii od generatora mikrofalowego do mikroplazmy. Badania efektywności transferu energii polegały na zmierzeniu charakterystyk elektrodynamicznych generatorów mikroplazmy argonowej, określających zależność znormalizowanego poziomu mocy fali odbitej od mocy fali padającej dla różnych wartości natężenia przepływu gazu.

Rysunek 6 przedstawia zależność mikrofalowej mocy fali odbitej w funkcji mocy fali padającej (rys. 6a) i przepływu gazu (rys. 6b). Pomiar przedstawiony na rysunku 6a wykonano w zakresie mocy fali padającej od 10 do 130 W dla trzech wartości natężeń przepływu argonu (5, 10, 15 l/min). Na rysunku można zaobserwować silną zależność mocy fali odbitej od mocy fali padającej.



**Rys. 6.** Zależność mikrofalowej mocy fali odbitej: a) w funkcji mocy fali padającej, b) przepływu gazu

**Fig. 6.** Dependence of the reflected microwave power: a) on the incident microwave power, b) gas flow rate

Jak wcześniej powiedziano, ze zmianą mocy absorbowanej w mikroplazmie zmienia się także jej kształt. Pokazują to zdjęcia przedstawione na rysunku 4.

Z rysunku 6a) widać, że w zakresie wartości mocy fali padającej od około 12 do 40 W moc fali odbitej nie przekracza 25% wartości mocy fali padającej. Podany przedział wartości mocy fali padającej jest wystarczający do generacji mikroplazmy argonowej o akceptowalnym poziomie mocy fali odbitej. Rysunek 6a) pokazuje także jedynie słabą zależność natężenia przepływu argonu na wartość mocy fali odbitej. Dla mocy fali padającej przekraczającej 80 W (dla natężenia przepływu gazu równego 5 l/min), 105 W (dla natężenia przepływu gazu równego

10 l/min) i 125 W (dla natężenia przepływu gazu równego 15 l/min) dochodziło do niepożądanych przebiegów wewnątrz generatora mikroplazmy i zaniku płomienia plazmowego.

Rysunek 6b) przedstawia zależność mikrofalowej mocy fali odbitej w funkcji przepływu argonu dla mocy fali padającej 20 W. Jak widać z rysunku, w zakresie natężeń przepływu argonu od 2 do 20 l/min generator mikroplazmy jest mało wrażliwy na zmiany natężenia przepływu gazu roboczego. Odnacza się też niskimi wartościami mikrofalowej mocy fali odbitej. Dla natężeń przepływu argonu w zakresie od 4 do 20 l/min moc fali odbitej nie przekracza 20% wartości mocy fali padającej.

Wyniki badania efektywności transferu energii od generatora mikrofal do mikroplazmy wskazują na to, że dla generatora mikroplazmy generowanej w argonie nie ma potrzeby polepszenia dopasowania impedancyjnego. W szerokim zakresie natężeń przepływu gazu generator plazmy pracuje stabilnie i efektywnie.

### 3.3. Pomiar natężenia promieniowania elektromagnetycznego i natężenia promieniowania UV

Promieniowanie elektromagnetyczne w zakresie mikrofalowym o zbyt dużym natężeniu może być szkodliwe dla zdrowia. Zredukowanie poziomu natężenia pola elektromagnetycznego emitowanego przez generatory mikroplazmy do poziomu określonego przez odpowiednie normy wymagane jest w celu zapewnienia bezpiecznego korzystania z tych urządzeń. W przeprowadzonych badaniach pomiar natężenia pola elektromagnetycznego wokół generatora mikroplazmy w zakresie od 0 do 10 mW/cm<sup>2</sup> wykonano przy użyciu miernika HI-1600 firmy Holaday EMF Measurement. Używając go, wykrywano i określano natężenie promieniowania na całym obwodzie wokół generatora mikroplazmy.

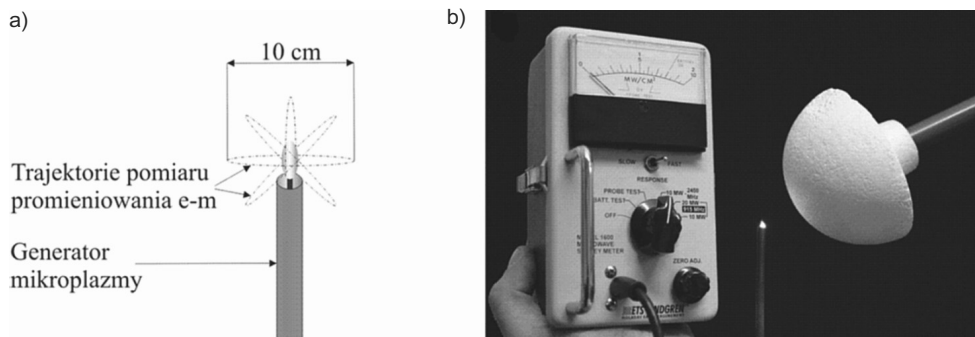
Rysunek 7a) pokazuje schematycznie drogę, po jakiej poruszano sondą wokół generatora mikroplazmy.

Rysunek 7b) przedstawia zdjęcie pomiaru dla przypadku mikroplazmy argonowej o natężeniu przepływu gazu 5 l/min i mocy absorbowanej 20 W. Odległość sondy od mikroplazmy wynosiła 5 cm.

Dla różnych warunków generacji mikroplazmy argonowej, tj. natężeń przepływu gazu i mocy absorbowanej, w czasie pomiarów nie zarejestrowano wskazań miernika natężenia promieniowania elektromagnetycznego. Dowodzi to zatem, że badany generator mikroplazmy jest całkowicie bezpieczny dla ludzi (zerowy poziom emitowanego pola elektromagnetycznego).

W celu określenia przydatności badanego generatora mikroplazmy do zastosowań biomedycznych wykonano pomiary natężenia promieniowania UV emitowanego przez mikroplazmę. Promieniowanie z tego zakresu odpowiedzialne jest za działanie bakteriobójcze. Pomiar wykonano, używając miernika napromienienia bakteriobójczego UVB-20 firmy Sonopan. Miernik umożliwiał pomiar natężenia promieniowania w zakresie od 0,1 mW/m<sup>2</sup> do 19,99 W/m<sup>2</sup>. Czułość spektralna detektora skorygowana była do skuteczności bakteriobójczej według PN-79/T 06588: *Promieniowanie nadfioletowe. Nazwy, określenia, jednostki.*



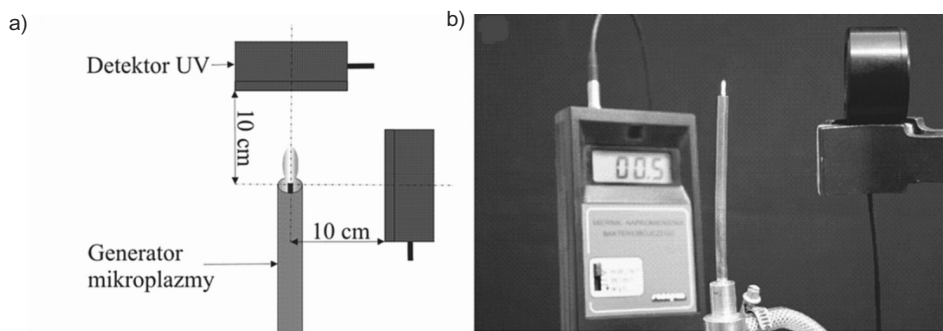


**Rys. 7.** Określenie natężenia promieniowania mikrofalowego:  
a) schemat, b) zdjęcie pomiaru

**Fig. 7.** Diagram and photograph of the microwave radiation intensity measurements

Rysunek 8a) schematycznie pokazuje rozmieszczenie sondy pomiarowej. Pomiar wykonano dla dwóch położeń sondy, z boku i nad generatorem mikroplazmy.

Rysunek 8b) prezentuje zdjęcie przykładowego pomiaru dla detektora umieszczonego z boku generatora mikroplazmy. Odległość detektora od mikroplazmy argonowej wynosi 10 cm.

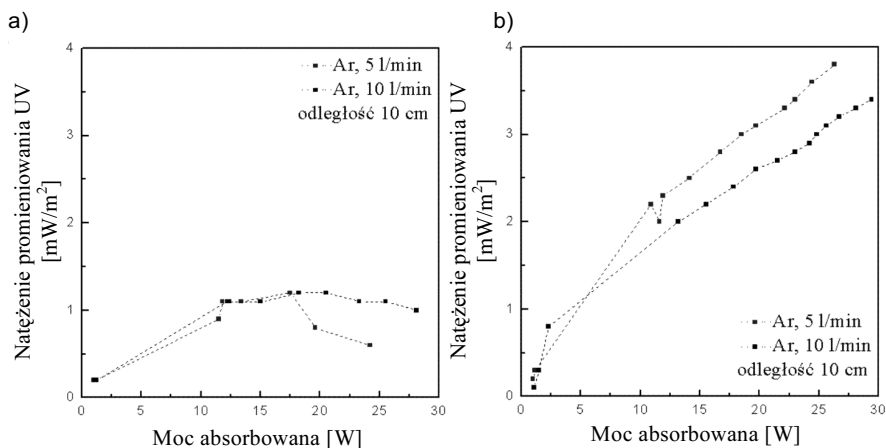


**Rys. 8.** Pomiar natężenia promieniowania UV: a) schemat, b) zdjęcie

**Fig. 8.** Diagram and photograph of the UV intensity measurements

Rysunek 9 przedstawia zależność natężenia promieniowania UV od mocy absorbowanej dla przypadku detektora umieszczonego z boku (rys. 9a) i nad (rys. 9b) generatorem mikroplazmy. Odległość detektora od mikroplazmy wynosiła 10 cm. W obu przypadkach pomiar wykonano dla dwóch wartości natężeń przepływu gazu (5, 10 l/min). Generalnie na rysunku 9 widać, że natężenie promieniowania UV rośnie ze wzrostem mocy absorbowanej w mikroplazmie, choć na rysunku 9a) (dla przypadku detektora umieszczonego z boku generatora mikroplazmy) widoczne jest słabe odstępstwo od tej prawidłowości. Dla przypadku detektora umieszczonego nad generatorem mikroplazmy notowane są wyższe wartości natężenia promieniowania UV. Maksymalną wartość natężenia promie-

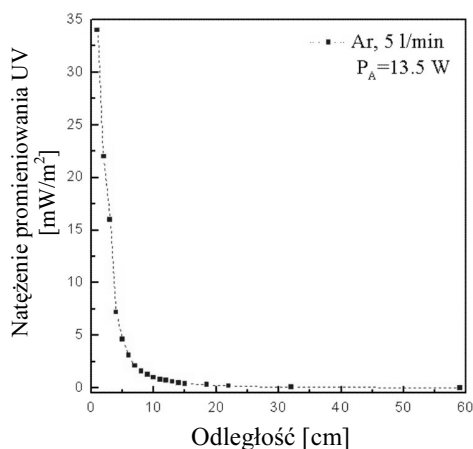
niowania UV, tj. około  $3,7 \text{ mW/m}^2$ , w tym przypadku zarejestrowano dla mocy absorbowanej mikrofal 25 W i przepływu argonu 5 l/min.



**Rys. 9.** Zależność natężenia promieniowania UV od mocy absorbowanej dla przypadku: a) detektora UV umieszczonego z boku, b) nad generatorem mikroplazmy

**Fig. 9.** Dependence of the UV intensity on the absorbed microwave power in a case of: a) UV detector placed parallel, b) perpendicular to the microplasma source

Na rysunku 10 przedstawiono natężenie promieniowania UV w funkcji odległości od mikroplazmy dla przypadku detektora UV umieszczonego z boku generatora mikroplazmy. Pomiar wykonano dla mocy absorbowanej 13,5 W i natężenia przepływu argonu 5 l/min. Jak widać z przedstawionych wyników, natężenie promieniowania UV silnie zależy od odległości. Spada szybko ze wzrostem odległości od mikroplazmy.



**Rys. 10.** Natężenie promieniowania UV w funkcji odległości od mikroplazmy dla przypadku detektora UV umieszczonego z boku generatora mikroplazmy

**Fig. 10.** Dependence of the UV intensity on the distance from the microplasma source in a case of parallel placed UV detector

Otrzymane wyniki pomiarów potwierdzają, że mikroplazma generowana w argonie za pomocą badanego generatora jest źródłem promieniowania ultrafioletowego UV. Dzięki temu generator może być wykorzystany do sterylizacji i odkażania (niszczenie bakterii i wirusów).

## PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono nowy mikrofalowy generator mikroplazmy o konstrukcji współosiowej. Na podstawie uzyskanych wyników badań eksperymentalnych przewiduje się, że opracowane przez zespół mikrofalowe źródło mikroplazmy będzie efektywnym, tanim i bezpiecznym źródłem mikroplazmy. Prezentowany generator mikroplazmy jest ekonomiczny. Charakteryzują go mały pobór mocy i niskie koszty produkcji. Jest to urządzenie o małych wymiarach, proste w obsłudze i przenośne. Generator mikroplazmy pracuje w sposób stabilny. Jest mało wrażliwy na zmiany natężenia przepływu gazu roboczego i zmiany mocy mikrofalowej dostarczanej do generatora. Jest bezpieczny dla ludzi. Wyniki badań eksperymentalnych udowodniły, że stanowi źródło promieniowania ultrafioletowego UV. Dzięki temu może być wykorzystany do sterylizacji i odkażania (niszczenie bakterii i wirusów). Dalsze badania prezentowanego w pracy generatora mikroplazmy będą skupiały się na pomiarze parametrów mikroplazmy, takich jak koncentracja elektronów, temperatura elektronów i temperatura gazu.

## LITERATURA

1. Bilgic A.M., Engel U., Voges A.M., Kuckelheim M. i in., *A new low-power microwave plasma source using microstrip technology for atomic emission spectrometry*, Plasma Sources Science Technology, Vol. 9, 2000, No. 1, s. 1–4.
2. Broekaert J.A.C., Siemens V., Bings N.H., *Microstrip microwave induced plasma on a chip for atomic emission spectral analysis*, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 33, 2005, No. 2, s. 560–561.
3. Choi J., Iza F., Do H.J., Lee J.K. i in., *Microwave-excited atmospheric-pressure microplasmas based on a coaxial transmission line resonator*, Plasma Sources Science Technology, Vol. 18, 2009, No. 2, s. 25–29.
4. Gregório J., Leroy O., Leprince P., Alves L.L. i in., *Design of a microwave microplasma source at atmospheric pressure*, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 37, 2009, No. 6, s. 797–808.
5. Hirasawa Makoto, Seto Takafumi Kwon Soon-Bark, *Decomposition of volatile organic compounds using surface-discharge microplasma devices*, Jpn Journal Applied Physics, Part 1, Vol. 45, 2006, No. 3A, s. 1801–1804.
6. Ichiki T., Taura R., Horiike Y., *Localized and ultrahigh-rate etching of silicon wafers using atmospheric-pressure microplasma jets*, Journal Applied Physics, Vol. 95, 2004, No. 1, s. 35–39.
7. Kanazawa S., Daidai R., Akamine S., Ohkubo T., *Generation of microplasma jet at atmospheric pressure using a modified waveguide-based plasma torch*, Surface & Coatings Technology, Vol. 202, 2008, No. 22–23, s. 5275–5279.

8. Kikuchi T., Hasegawa Y., Shirai H., *Rf microplasma jet at atmospheric pressure: characterization and application to thin film processing*, Journal Physics D: Applied Physics, Vol. 37, 2004, No. 11, s. 1537–1543.
  9. Kim J., Terashima K., *2.45 GHz microwave-excited atmospheric pressure air microplasmas based on microstrip technology*, Applied Physics Letters, Vol. 86, 2005, No. 19, s. 191504–191504-3.
  10. Kono A., Wang J., Aramaki M., *Production and characterization of high-pressure microwave glow discharge in a microgap aiming at VUV light source*, Thin Solid Films, Vol. 506–507, 2006, s. 444–448.
  11. Kroplewski Ł., Jasiński M., Dors M., Zakrzewski Z. i in., *Coaxial microplasma source*, Przegląd Elektrotechniczny, Vol. 85, 2009, No. 5, s. 122–123.
  12. Shimizu Y., Sasaki T., Ito T., Terashima K. i in., *Fabrication of spherical carbon via UHF inductively coupled microplasma CVD*, Journal Physics D: Applied Physics, Vol. 35, 2003, No. 23, s. 2940–2944.
  13. Shimizu K., Sugiyama T., Nishamami M., Kanamori M., *Application of micro plasma for NO<sub>x</sub> removal*, Industry Applications Conference 2007, 42nd IAS Annual Meeting, Conference Record of the 2007 IEEE, New Orleans, Louisiana, 2007, s. 1887–1892.
  14. Sichler P., Büttgenbach S., Baars-Hibbe L., Schrader C. i in., *A micro plasma reactor for fluorinated waste gas treatment*, Chemical Engineering Journal, Vol. 101, 2004, No. 1–3, s. 465–468.
  15. Slepokurov A.S., Sergatskii G.I., Alikin A.P., *Use of microplasma welding in component construction*, Chemical and Petroleum Engineering, Vol. 7, 1971, No. 11, s. 979–980.
  16. Stoffels E., Kieft I.E., Sladek R.E., van den Bedem L.J.M. i in., *Plasma needle for in vivo medical treatment: recent development and perspectives*, Plasma Sources Science Technology, Vol. 15, 2006, No. 4, s. 169–180.
  17. Voropai N.M., Shcherbak V.V., Grigoriev A.A., *Pulsed microplasma welding of aluminum gaskets*, Chemical and Petroleum Engineering, Vol. 7, 1971, No. 11, s. 977–978.
  18. Yoshiki H., *Generation of air microplasma jet and its application to local etching of polyimide films*, Jpn. Journal Applied Physics, Vol. 45, 2006, No. 6B, s. 5618–5623.
- Strony internetowe:
19. [www.for1123.rub.de/FG1123/](http://www.for1123.rub.de/FG1123/).
  20. [www.spc.edu/pages/3093.asp](http://www.spc.edu/pages/3093.asp).

## EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF LOW POWER MICROWAVE MICROPLASMA GENERATOR

### Summary

*In this paper a novel microwave source of microplasma (MmPS) generated in gases at atmospheric pressure is presented. The design, rule of operation and experimental investigations of the new MmPS are described. The main advantage of the presented microplasma source is its simplicity and low cost. The microplasma has a form of a small plasma jet of dimensions of a few mm, depending on the kind of gas, gas flow rate and absorbed microwave power. All results of experimental investigations presented in this paper were obtained with an atmospheric pressure argon, krypton, nitrogen and air microplasma, sustained at 2.45 GHz. The absorbed microwave power were up to 70 W and gas flow rates from 2 to 25 l/min. The simplicity of the source and stability of the microdischarge allows to conclude that the presented new microwave microplasma source can find practical applications in various fields.*