

Bartosz Hrycak, Robert Miotk, Mariusz Jasiński, Mirosław Dors
Instytut Maszyn Przepływowych im. R. Szewalskiego PAN w Gdańsku

Marco Scapinello
Uniwersytet w Padwie (Włochy)

Jerzy Mizeraczyk
Instytut Maszyn Przepływowych im. R. Szewalskiego PAN w Gdańsku
Akademia Morska w Gdyni

SPKTROSKOPOWE BADANIA WYŁADOWANIA MIKROFALOWEGO W ŹRÓDLE PLAZMY TYPU KOMORA REZONANSOWA ZASILANA FAŁOWODOWO

W pracy przedstawiono wyniki spektroskopowych badań wyładowania mikrofalowego (2,45 GHz) pod ciśnieniem atmosferycznym, generowanego w źródle plazmy typu komora rezonansowa. Gazami roboczymi były: argon, azot oraz metan, a także mieszaniny argon/metan oraz azot/metan. Natężenie przepływu gazu roboczego zmieniano w zakresie od 50 do 100 l/min, natomiast moc mikrofal absorbowanych przez wyładowanie wynosiła od 300 do 4000 W. Zmierzone zostały widma z zakresu 300–600 nm. Zmierzone widma emisyjne porównywane były z widmami uzyskanymi przy użyciu programów symulacyjnych w celu wyznaczenia temperatur rotacyjnych i oscylacyjnych jonów azotu N_2^+ oraz molekuł węgla C_2 , azotu N_2 i cyjanu CN.

WPROWADZENIE

Plazma nazywana jest czwartym stanem skupienia materii, gdyż jej właściwości różnią się znacząco od właściwości gazu. W literaturze przedmiotu definiuje się ją jako mieszaninę atomów (ew. molekuł), jonów, elektronów oraz fotonów. Rozwój źródeł plazmy pracujących pod ciśnieniem atmosferycznym jest obecnie jednym z trendów w inżynierii plazmowej. Wyładowania pod ciśnieniem atmosferycznym nie wymagają zastosowania drogich pomp próżniowych. Plazma taka może być generowana różnymi sposobami: za pomocą napięcia stałego (np. łuki elektryczne), przy użyciu napięcia zmiennego (np. wyładowania DBD), częstotliwości radiowych, jak również przy użyciu mikrofal [22]. Metoda generacji plazmy z użyciem mikrofal charakteryzuje się większą efektywnością niż inne metody. Koszty wytwarzania wyładowań mikrofalowych są niskie ze względu na to, że do ich generacji można stosować tanie komercyjne magnetrony oraz standardowe elementy mikrofalowe. Mikrofalowe źródła plazmy znajdują zastosowanie przy obróbce gazów (destrukcja gazów szkodliwych [1, 7, 9], produkcja wodoru [4, 8]), modyfikacji powierzchni materiałów [18, 19, 21], jako źródło promieniowania ultrafioletowego [10] oraz przy sterylizacji (np. narzędzi medycz-

nych) [13]. Opracowanie technologii efektywnie wykorzystujących plazmę mikrofalową w gazach pod ciśnieniem atmosferycznym uwarunkowane jest dokładnym poznaniem właściwości takiej plazmy. Jednym z narzędzi diagnostyki plazmy jest spektroskopia emisyjna.

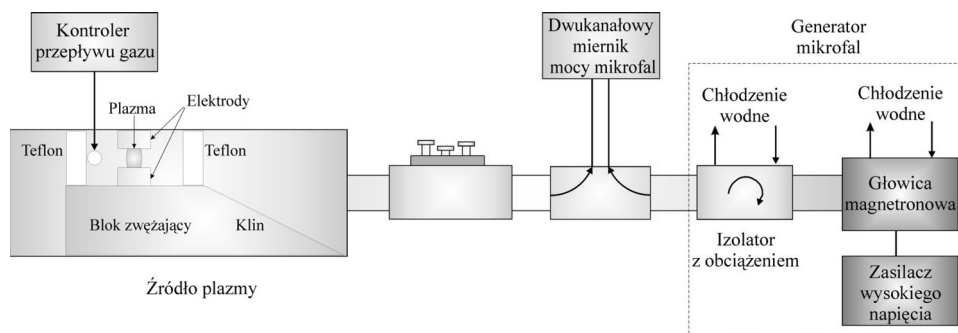
Emisyjna spektroskopia optyczna OES (ang. *Optical Emission Spectroscopy*), wykorzystująca naturalną emisję promieniowania wzbudzonego gazu, jest bardzo wartościowym narzędziem badania plazmy. Pozwala ona m.in. na zidentyfikowanie atomów, molekuł i jonów w wyładowaniu oraz na określenie takich właściwości plazmy, jak gęstość elektronów czy temperatury wibracyjne i rotacyjne molekuł i jonów, które następnie posłużyć mogą określeniu temperatury gazu w wyładowaniu [12]. Spektroskopia emisyjna jest przy tym metodą nieinwazyjną i nie wpływa na wyładowanie.

W artykule zaprezentowano wyniki badań spektroskopowych wyładowania mikrofalowego w źródle plazmy typu komora rezonansowa zasilana falowodowo. Przedstawiono widma wyładowań w różnych gazach oraz określone temperatury rotacyjne i oscylacyjne wybranych jonów i molekuł.

1. EKSPERYMENT

1.1. Układ eksperymentalny

Schemat układu eksperymentalnego przedstawiono na rysunku 1. Układ zbudowany jest ze standardowych elementów falowodowych WR 340. Składa się on z: generatora mikrofal, układu do pomiaru mocy fali padającej oraz odbitej, systemu kontroli przepływu gazu, źródła plazmy oraz elementu dopasowującego impedancję w torze mikrofalowym, który w tym wypadku stanowił strojnik trójśrubowy. Absorbowana przez wyładowanie moc mikrofal P_{abs} była wyznaczona bezpośrednio jako różnica między mocą fali padającej a mocą fali odbitej.



Rys. 1. Układ eksperymentalny

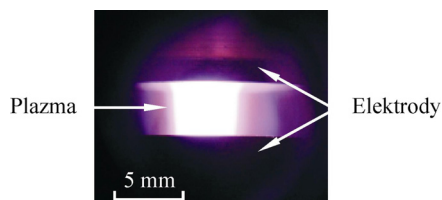
Fig. 1. Experimental setup

Źródło plazmy powstało na podstawie zgłoszeń patentowych [2, 3]. Jego wnętrze tworzy odcinek standardowego falowodu prostokątnego WR 340. Do wnętrza tego falowodu wprowadzono klin o wysokości zmieniającej się liniowo, na odcinku równym połowie długości fali w falowodzie WR 340. Na końcu klina umieszczony jest metalowy blok, którego wysokość jest równa wysokości końca klina. Klin i blok wypełniają całkowicie falowód wzdłuż jego szerszej ścianki. W obszarze, gdzie zamontowany jest blok, zwanym dalej falowodem o obniżonej wysokości, zamontowano dwie elektrody, między którymi powstaje plazma wyładowania mikrofalowego (rys. 1). W falowodzie o obniżonej wysokości zamontowana jest także wkładka teflonowa, która zapobiega przedostawaniu się gazu roboczego do toru falowodowego. Gaz roboczy doprowadza się poprzez otwory w węższych ściankach falowodu o obniżonej wysokości. Na wysokości miejsca, gdzie zamontowane są elektrody, w bocznej ścianie falowodu znajduje się okienko wizualizacyjne umożliwiające obserwację wyładowania.

Widok przez to okienko zobaczyć można na rysunku 2.

Rys. 2. Plazma generowana w azocie – widok przez okienko wizualizacyjne

Fig. 2. Nitrogen plasma – view through the visualization window



Z wyjątkiem eksperymentów, w których konieczna jest wysoka rozdzielczość przestrzenna pomiaru, spektroskopia emisyjna nie wymaga skomplikowanych układów optycznych. W opisywanych badaniach nie zdecydowano się wprowadzić rozdzielczości przestrzennej, ponieważ obszar obserwacji plazmy nie jest duży i w obszarze tym plazma wydaje się względnie jednorodna. Zarejestrowano promieniowanie z całego obserwowanego obszaru plazmy. Zastosowano prosty układ optyczny (rys. 3), w którym za pomocą soczewki kwarcowej promieniowanie z wyładowania skupiane jest na wejściu spektrometru (CVI DK-480, 1200 rys/mm). Mierzono widma z zakresu 300–600 nm (tylko dla wyładowania w metanie przeprowadzono dodatkowo pomiar widma w zakresie 600–900 nm).

Okienko wizualizacyjne Soczewka kwarcowa Wejście spektrometru



Rys. 3. Układ optyczny

Fig. 3. Optical setup

Ważnym elementem eksperymentu spektroskopowego jest uwzględnienie przy pomiarze widm czułości falowej użytej kamery CCD. Mierzone widma były poddawane korekcji uwzględniającej czułość użytej kamery (ST-6 firmy SBIG).

Aby móc analizować uzyskane podczas pomiaru widma, niezbędna jest wiedza o poszerzeniu aparaturowym używanego sprzętu. Poszerzenie wyznaczone zostało dla zastosowanego układu optycznego dla linii atomowych rtęci: 365,02 nm, 435,84 nm oraz 546,07 nm. Użyto w tym celu niskociśnieniowej lampy rtęciowo-neonowej. Wyznaczone poszerzenie aparaturowe wyniosło 0,14 nm.

1.2. Emisyjna spektroskopia optyczna

Jak wspomniano na wstępie, emisyjna spektroskopia optyczna jest bardzo wartościowym narzędziem badania plazmy. Pozwala ona m.in. na zidentyfikowanie atomów, molekuł i jonów w wyładowaniu oraz na określenie takich właściwości plazmy, jak temperatury oscylacyjne i rotacyjne molekuł i jonów, które następnie posłużyć mogą m.in. określeniu temperatury gazu w wyładowaniu.

Diagnostyka plazmy za pomocą pasm molekularnych zazwyczaj opiera się na prawie Boltzmanna, zastosowanym do określonych podzbiorów poziomów molekularnych. Otrzymywane z analizy widm parametry określa się jako:

- temperaturę wzbudzeniową, opisującą rozkład populacji na poziomach elektronowych;
- temperaturę rotacyjną, opisującą rozkład populacji na poziomach rotacyjnych;
- temperaturę oscylacyjną, opisującą rozkład populacji na poziomach oscylacyjnych.

W prezentowanej pracy skupiono się na określeniu dwóch ostatnich temperatur, tj. rotacyjnej i oscylacyjnej.

Temperatura rotacyjna opisuje rozkład populacji w stanach rotacyjnych w ramach jednego stanu oscylacyjnego. Wielkość ta zazwyczaj jest w równowadze z temperaturą gazu (cząstek ciężkich), przynajmniej dla rozkładów wewnątrz stanów długo żyjących (podstawowego, metastabilnych), gdzie liczba zderzeń pomiędzy cząstkami jest w stanie doprowadzić do termicznego rozkładu populacji na stanach rotacyjnych. We wzbudzonych, krótko żyjących stanach elektronowych rozkład populacji stanów rotacyjnych może być bardziej złożony i mogą wystąpić odstępstwa od rozkładu termicznego [20]. Wzbudzenia elektronowe zasadniczo nie zmieniają zbyt mocno stanu rotacyjnego molekuly, więc rozkład na poziomach rotacyjnych w stanie wzbudzonym może w takiej sytuacji nadal być w równowadze opisanej temperaturą rotacyjną, równą temperaturze translacyjnej cząstek ciężkich.

Temperatura oscylacyjna opisuje obsadzenie stanów oscylacyjnych molekuly. Wielkość ta jest bardzo ważna w analizie zachodzących w plazmie procesów chemicznych. Jej znajomość jest też potrzebna przy wyznaczaniu ze zmierzonych wartości współczynników emisji lub absorpcji całkowitych populacji badanych poziomów elektronowych (w tym podstawowego).

Temperatury rotacyjna i oscylacyjna w przypadku widma rozdzielonego uzyskiwane są dokładnie takimi samymi metodami jak w przypadku temperatury wzbudzenia dla linii atomowych, czyli za pomocą wykresu Boltzmann [6, 16]. Uzyskanie rozdzielonego widma molekularnego wymaga jednak bardzo dużej rozdzielczości, niemożliwej do uzyskania w większości eksperymentów spektroskopowych. Dodatkowo do wyznaczenia np. temperatury oscylacyjnej potrzebny jest pomiar natężenia całych pasm molekularnych. Konieczna jest wówczas możliwość pomiaru dużego zakresu widma, co z oczywistych przyczyn nie idzie w parze z rozdzielczością pomiaru. Pojawia się wówczas konieczność wyznaczania temperatur przy użyciu nierozdzielonych pasm molekularnych. Przykłady analizy takich widm oraz wyznaczania z nich temperatur znaleźć można w literaturze przedmiotu [5, 12, 15, 17].

Głównym sposobem na wyznaczanie temperatury z nierozdzielonych pasm molekularnych jest dopasowanie do nich pasma syntetycznego tak, aby uzyskać najlepszą zgodność parametrów modelu z pasmem zmierzonym. Wymaga to znajomości wielu parametrów dla każdego pasma i założenia określonych warunków równowagi plazmy. Zazwyczaj jest to częściowa równowaga termodynamiczna, dla której temperatury opisujące każdy z systemów poziomów (elektromowy, oscylacyjny i rotacyjny) mogą wyraźnie różnić się od siebie.

W tej pracy do uzyskania widm syntetycznych użyte zostały ogólnodostępne programy symulacyjne: LIFBASE [14] bazujący na teorii klasycznej oraz SPECAIR [11] bazujący na modelu zderzeniowo-radiacyjnym.

2. WYNIKI

Podczas pomiarów gazami roboczymi były: azot, argon i metan, a także mieszaniny argon/metan oraz azot/metan. Natężenie przepływu gazu roboczego zmieniane było w zakresie od 50 do 100 l/min, natomiast moc mikrofal absorbowanych przez wyładowanie w zakresie od 300 do 4000 W.

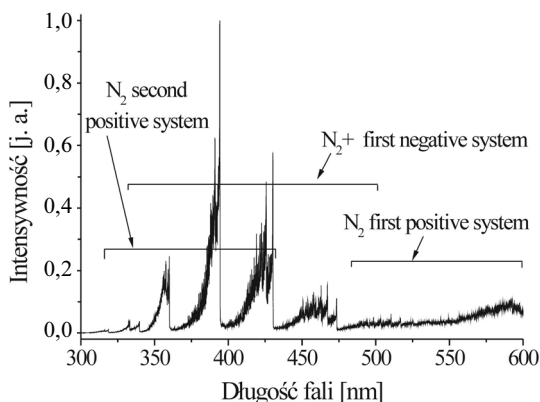
Podstawowym problemem przy analizie nierozdzielonych pasm molekularnych jest fakt, że każde z nich zajmuje dużą część widma. Powoduje to, że w obecności różnych molekuł ich pasma nakładają się na siebie, co komplikuje analizę sygnału.

Zmierzone widmo wyładowania w azocie przedstawiono na rysunku 4. Widać na nim trzy częściowo nachodzące na siebie pasma molekuł azotu oraz azotu zjonizowanego. Są to następujące pasma:

- drugie dodatnie pasmo azotu (ang. *second positive system*) ($C^3\Pi \rightarrow B^3\Pi$);
- pierwsze dodatnie pasmo azotu (ang. *first positive system*) ($B^3\Pi \rightarrow A^3\Sigma$);
- pierwsze ujemne pasmo azotu zjonizowanego (ang. *first negative system*) ($B^2\Sigma \rightarrow X^2\Sigma$).

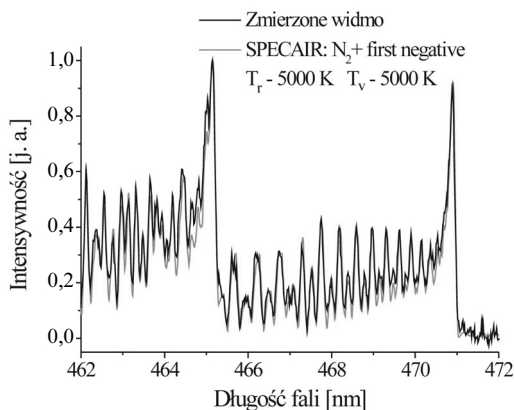
Najprostszą metodą na otrzymanie poprawnych temperatur oscylacyjnej i rotacyjnej jest wybranie do ich wyznaczenia zakresu widma, w którym pasma molekularne nie nachodzą na siebie. Wybrano do tego celu zakres 462–472 nm

dla pierwszego ujemnego pasma azotu zjonizowanego (rys. 5) oraz zakres 306–317 nm dla drugiego dodatniego pasma azotu. W przypadku obu porównań uzyskano te same wartości temperatur rotacyjnej i oscylacyjnej: po 5000 K (moc mikrofal absorbowana przez wyładowanie wynosiła $P_{abs} = 1700$ W, przepływ azotu $Q_{N_2} = 50$ l/min).



Rys. 4. Widmo wyładowania w azocie ($Q_{N_2} = 50$ l/min, $P_{abs} = 1700$ W)

Fig. 4. Measured emission spectrum of discharge in nitrogen ($Q_{N_2} = 50$ l/min, $P_{abs} = 1700$ W)



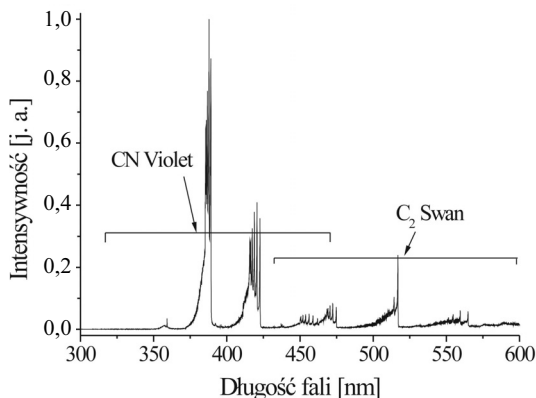
Rys. 5. Porównanie widma zmierzonego z widmem uzyskanym przy użyciu programu SPECAIR ($Q_{N_2} = 50$ l/min, $P_{abs} = 1700$ W)

Fig. 5. Comparison of the measured and simulated in SPECAIR program emission spectra of $N_2+(B-X)$ in discharge in nitrogen ($Q_{N_2} = 50$ l/min, $P_{abs} = 1700$ W)

Jak widać na rysunku 6, niewielka zmiana składu gazu roboczego w wyładowaniu (dodatek do azotu 4% metanu) spowodowała całkowitą zmianę widma wyładowania. W widmie nie zaobserwowano pasm molekularnych azotu. Pojawiły się w ich miejsce pasma zupełnie innych molekuł: węgla i cyjanu. Są to następujące pasma:

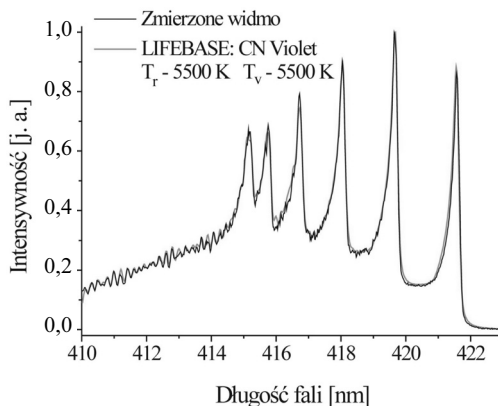
- pasmo Swana molekuł węgla ($A^3\Pi \rightarrow X^3\Pi$);
- pasmo Violet molekuł cyjanu ($B^2\Sigma \rightarrow X^2\Sigma$).

Natomiast temperatury rotacyjna i oscylacyjna wyznaczone dla wyładowania w mieszaninie azot/metan nie zmieniły się znacząco. Temperatury te wyznaczone zostały dla zakresu 505–517 nm dla pasma Swana molekuł węgla oraz zakresu 410–423 nm dla pasma Violet molekuł cyjanu (rys. 7). Wyniosły one odpowiednio po 5000 K dla molekuł węgla oraz po 5500 K dla molekuł cyjanu (moc mikrofal absorbowana przez wyładowanie wynosiła $P_{abs} = 1700$ W, przepływ azotu $Q_{N_2} = 50$ l/min, przepływ metanu $Q_{CH_4} = 2$ l/min).



Rys. 6. Widmo wyładowania w azocie z dodatkiem 2% metanu ($Q_{N_2} = 50$ l/min, $Q_{CH_4} = 2$ l/min, $P_{abs} = 1700$ W)

Fig. 6. Measured emission spectrum of discharge in nitrogen with 2% methane additive ($Q_{N_2} = 50$ l/min, $Q_{CH_4} = 2$ l/min, $P_{abs} = 1700$ W)

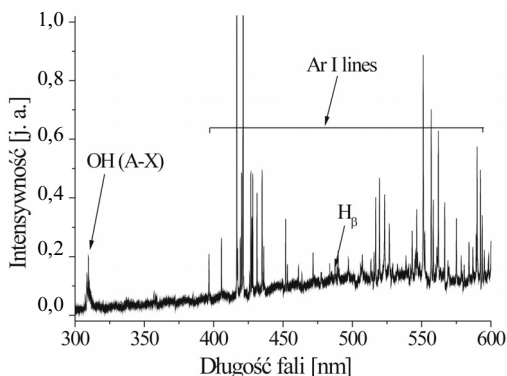


Rys. 7. Porównanie widma zmierzonego z widmem uzyskanym przy użyciu programu LIFEBASE ($Q_{N_2} = 50$ l/min, $Q_{CH_4} = 2$ l/min, $P_{abs} = 1700$ W)

Fig. 7. Comparison of the measured and simulated in LIFEBASE program emission spectra of CN(B-X) in discharge in nitrogen with 4% methane additive

Zwiększanie procentowego udziału metanu w mieszaninie azot/metan nie miało już takiego wpływu na pasma molekularne w widmie wyładowania. Niewiele też zmieniały się temperatury rotacyjna i oscylacyjna.

Podobnie wyraźny efekt całkowitej zmiany widma wyładowania wraz z niewielkim dodatkiem metanu do składu gazu roboczego zaobserwowano również w przypadku argonu. W widmie wyładowania w czystym argonie (rys. 8) zaobserwowano pasmo rotacyjne rodników OH ($A^2\Sigma \rightarrow X^2\Pi$), linię wodoru H_β oraz linie atomowe argonu. Obecność rodników OH oraz wodoru spowodowana była niewielką obecnością wilgoci w butli z argonem.

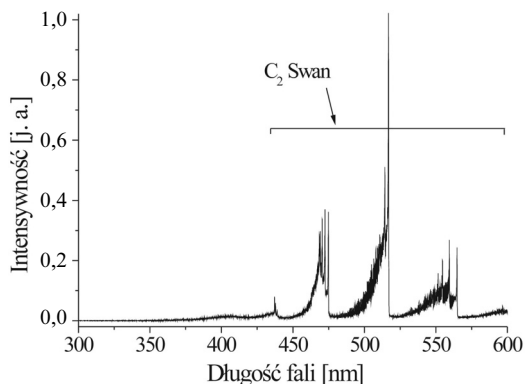


Rys. 8. Widmo wyładowania w argonie ($Q_{Ar} - 50$ l/min, $P_{abs} - 300$ W)

Fig. 8. Measured emission spectrum of discharge in argon ($Q_{Ar} - 50$ l/min, $P_{abs} - 300$ W)

Warto zwrócić uwagę, że wyładowanie w argonie absorboowało znacznie mniejszą moc mikrofal niż pozostałe wyładowania. Zwiększanie mocy fali padającej w tym wypadku skutkowało jedynie wzrostem mocy fali odbitej. Dzieje się tak, dlatego iż gazy molekularne są w stanie zaabsorbować więcej energii na wzbudzenia stanów rotacyjnych i oscylacyjnych oraz dysocjację molekuł niż gazy atomowe.

W widmie wyładowania w argonie z 2% dodatkiem metanu zaobserwować można było zdecydowanie już dominujące pasmo Swana molekuł węgla (rys. 9).



Rys. 9. Widmo wyładowania w argonie z dodatkiem 2% metanu
($Q_{Ar} - 50$ l/min, $Q_{CH4} - 1$ l/min, $P_{abs} - 1700$ W)

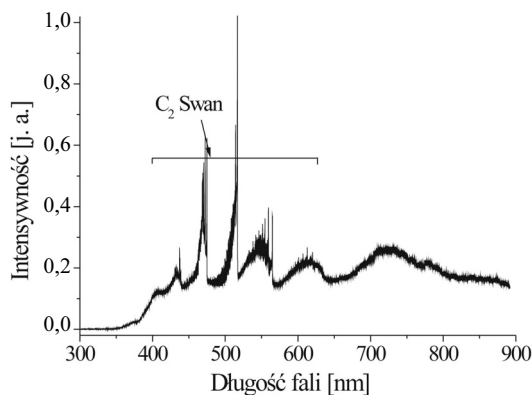
Fig. 9. Measured emission spectrum of discharge in argon with 2% methane additive
($Q_{Ar} - 50$ l/min, $Q_{CH4} - 1$ l/min, $P_{abs} - 1700$ W)

Wyznaczone w tym przypadku temperatury rotacyjna i oscylacyjna molekuł węgla wynosiły po 4000 K (moc mikrofal absorbowana przez wyładowanie wynosiła $P_{abs} - 1700$ W, przepływ argonu $Q_{Ar} - 50$ l/min, przepływ metanu $Q_{CH_4} - 1$ l/min).

Zwiększanie procentowego udziału metanu w mieszaninie argon/metan powodowało wzrost temperatur oscylacyjnej i rotacyjnej. W dalszym ciągu jedynym obserwowanym pasmem molekularnym było pasmo Swana molekuł węgla. Pojawił się natomiast nowy element w widmie wyładowania – widmo ciągłe w tle.

To ciągłe widmo, obserwowane również przy zwiększonym udziale metanu w mieszaninie azot/metan, widoczne jest wyraźnie na rysunku 10, na którym przedstawiono widmo wyładowania w czystym metanie. Aby zobrazować dokładniej widmo ciągłe, przeprowadzono dodatkowy pomiar w zakresie 600–900 nm.

W tym wypadku pojawienie się takiego widma mogło być spowodowane dwoma czynnikami. Promieniować mogły rozgrzane wolframowe elektrody, między którymi dochodziło do wyładowania. Drugim potencjalnym źródłem tego promieniowania były zanieczyszczenia w plazmie, tj. tworzące się w niej cząstki stałe (sadza tworząca się z molekuł węgla).



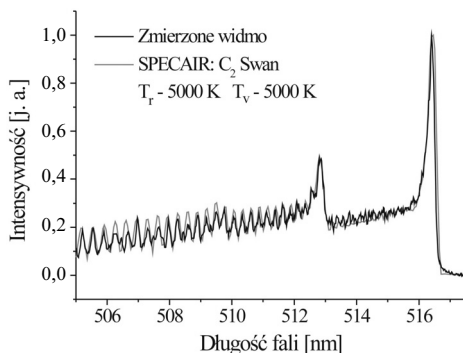
Rys. 10. Widmo wyładowania w metanie ($Q_{CH_4} - 50$ l/min, $P_{abs} - 2000$ W)

Fig. 10. Measured emission spectrum of discharge in methane ($Q_{CH_4} - 50$ l/min, $P_{abs} - 2000$ W)

Temperatury rotacyjna i oscylacyjna dla wyładowania w metanie były wyznaczone, jak wcześniej dla mieszanin azot/metan i argon/metan, dla zakresu 505–517 nm dla pasma Swana molekuł węgla.

Na rysunku 11 przedstawiono porównanie odseparowanego od tła, zmierzonego w wyładowaniu w metanie pasma Swana z widmem uzyskanym przy użyciu programu SPECAIR. Uzyskane wartości temperatur rotacyjnej i wibracyjnej wynosiły po 5000 K dla mocy mikrofal absorbowanej przez wyładowanie wynoszącej $P_{abs} - 1700$ W oraz natężenia przepływu metanu $Q_{CH_4} - 50$ l/min.

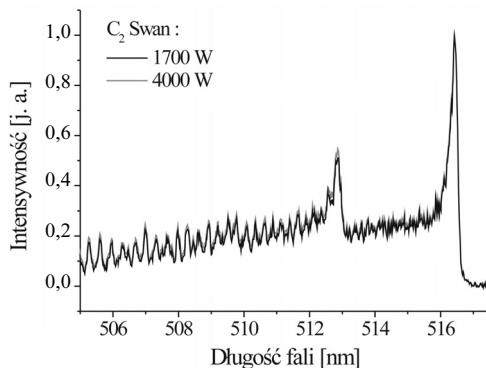
Uzyskiwane temperatury rotacyjna i oscylacyjna, podobnie jak w pozostałych gazach i mieszaninach gazów, nie zmieniały się znacząco ze wzrostem mocy mikrofal absorbowanej przez wyładowanie.



Rys. 11. Porównanie zmierzonego widma wyładowania w metanie z widmem uzyskanym przy użyciu programu SPECAR ($Q_{CH_4} - 50$ l/min, $P_{abs} - 1700$ W)

Fig. 11. Comparison of the measured and simulated in SPECAR program emission spectra of $C_2(A-X)$ in discharge in methane ($Q_{CH_4} - 50$ l/min, $P_{abs} - 1700$ W)

Rysunek 12 pokazuje zmierzone i odseparowane od tła pasma Swana molekuł węgla dla absorbowanej mocy mikrofal 1700 oraz 4000 W. Względne intensywności w paśmie nie różnią się znacząco dla obu przypadków. Temperatury uzyskane z tych pasm różniły się o 100 K. Podobnie zwiększenie przepływu z 50 do 100 l/min nie powodowało wyraźnych zmian otrzymanych temperatur.



Rys. 12. Porównanie pasma Swana molekuł węgla zmierzonych dla dwóch poziomów mocy mikrofal absorbowanej przez wyładowanie ($Q_{CH_4} - 50$ l/min)

Fig. 12. Comparison of the measured emission spectra of $C_2(A-X)$ in discharge in methane for two different microwave absorbed powers ($Q_{CH_4} - 50$ l/min)

PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono wyniki badań spektroskopowych plazmy generowanej w mikrofalowym źródle typu komora rezonansowa zasilana falowodowo. Pokazano widma wyładowań w azocie, argonie, metanie oraz mieszaninach azot/metan i argon/metan. Wyznaczono temperatury rotacyjne i oscylacyjne

oscylacyjnych jonów azotu oraz molekuł węgla, azotu i cyjanu. Ustalone temperatury rotacyjna i oscylacyjna były w każdym przypadku w równowadze ze sobą. Zmieniały się w zakresie od 4000 do 5500 K, zależnie od składu gazu w wyładowaniu oraz wybranej molekuly. Największe wartości temperatur uzyskano dla molekuly cyjanu CN. Nie zaobserwowano natomiast wyraźnego wpływu mocy absorbowanej ani natężenia przepływu gazu na uzyskiwane temperatury. Można wysunąć wniosek, że moc absorbowana przez wyładowanie oraz przepływ gazu wpływać może w większym stopniu na objętość plazmy niż na temperaturę gazu w wyładowaniu.

Opisane badania były finansowane z budżetu Zadania Badawczego nr 4 pt. „Opracowanie zintegrowanych technologii wytwarzania paliw i energii z biomasy, odpadów rolniczych i innych” w ramach strategicznego programu badań naukowych i prac rozwojowych pt.: „Zaawansowane technologie pozyskiwania energii” realizowanego ze środków NCBiR i ENERGIA S.A. w ramach umowy SP/E/4//65786/10.

LITERATURA

1. Baeva M., Gier H., Pott A., Uhlenbusch J., Hoschele J. i in., *Pulsed microwave discharge at atmospheric pressure for NOx decomposition*, Plasma Sources Science Technology, Vol. 11, 2002, No. 1, s. 1–9.
2. Bayliss K.H., *Plasma generator with field-enhancing electrodes*, patent amerykański nr US 5418430, 1995.
3. Gillespie R.F., Hall S.I., Raybone D., Winterbottom F., *Plasma gas processing*, patent amerykański nr US 6126779, 2000.
4. Henriques J., Bundaleska N., Tatarova E., Dias F.M., Ferreira C.M., *Microwave plasma torches driven by surface wave applied for hydrogen production*, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 36, 2011, No. 1, s. 345–354.
5. Izarra Ch., *UV OH spectrum used as a molecular pyrometer*, Journal Physics D: Applied Physics, Vol. 33, 2000, No. 14, s. 1697.
6. Janus H.W., Musielok J., *Field strength and temperature distributions in N₂/H₂ DBD discharge determined from measured spectral distributions of H_α and N₂⁺ radiation*, International Conference on Plasma Diagnostics 2010, Pont-à-Mousson, France, 2010, P52.
7. Jasiński J., Dors M., Mizeraczyk J., *Destruction of Freon HFC-134a Using a Nozzleless Microwave Plasma Source*, Plasma Chem. Plasma Process., Vol. 29, 2009, No. 5, s. 363–372.
8. Jasiński M., Dors M., Mizeraczyk J., *Production of hydrogen via methane reforming using atmospheric pressure microwave plasma*, Journal of Power Sources, Vol. 181, 2008, No. 1, s. 41–45.
9. Jasiński J., Mizeraczyk J., Zakrzewski Z., Ohkubo T., Chang J.S., *CFC-11 destruction by microwave plasma torch generated atmospheric-pressure nitrogen discharge*, Journal Physics D: Applied Physics, Vol. 35, 2002, No. 18, s. 2274–2280.
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. Laux C.O., *Radiation and Nonequilibrium Collisional-Radiative Models*, [w:] *Physico-Chemical Modeling of High Enthalpy and Plasma Flows*, D. Fletcher, J.-M. Charbonnier, G.S.R. Sarma, T. Magin (eds.), von Karman Institute Lecture Series 2002-07, Rhode-Saint-Genčse, Belgium, 2002, <http://www.specair-radiation.net> [6.04.2012].
12. Laux C.O., Spence T.G., Kruger C.H., Zare R.N., *Optical diagnostics of atmospheric pressure air plasmas*, *Plasma Sources Science Technology*, Vol. 12, 2003, No. 3, s. 125–138.
13. Lee K.-Y., Park B.J., Lee D.H., Lee I.-S., Hyun S.O. i in., *Sterilization of Escherichia coli and MRSA using microwave-induced argon plasma at atmospheric pressure*, *Surface & Coatings Technology*, Vol. 193, 2005, No. 1–3, s. 35–38.
14. Luque J., Crosley D.R., *LIFBASE: Database and Spectral Simulation Program (Version 1.5)*, SRI International Report MP 99-009, 1999, <http://www.sri.com/psd/lifbase/> [6.04.2012].
15. Okada A., Kijima K., *Measurement of C₂ rotational temperature in Ar-SiH₄-CH₄ inductively coupled plasma flame with Abel inversion*, *Journal Physics. D: Applied Physics*, Vol. 35, 2002, No. 17, s. 2126–2132.
16. Pawelec E., *Estimation of the plasma temperature by using the resolved spectrum of N₂⁺*, *The European Physical Journal Special Topics*, Vol. 144, 2007, No. 1, s. 227–231.
17. Pawelec E., Simek M., Nassar H., Czernichowski A., Musioł K. i in., *Temperature measurements in non-equilibrium “ferroelectric” plasma*, *Acta Physica Polonica A*, Vol. 89, 1996, No. 4, s. 503–507.
18. Peelamedu R., Kumar D., Kumar S., *Microwave atmospheric pressure plasma for surface treatment and reactive coating on steel surfaces*, *Surface & Coatings Technology*, Vol. 201, 2006, No. 7, s. 4008–4013.
19. Pfuch A., Cihar R., *Deposition of SiO thin films by microwave induced x plasma CVD at atmospheric pressure*, *Surface & Coatings Technology*, Vol. 183, 2004, No. 2–3, s. 134–140.
20. Raud J., Laan M., Jogi I., *Rotational temperatures of N₂(C,0) and OH(A,0) as gas temperature estimates in the middle pressure Ar / O₂ discharge*, *Journal Physics D: Applied Physics*, 2011, Vol. 44, No. 34, s. 345201 (5 stron).
21. Shin D.H., Bang C.U., Kim J.H., Han K.H., Hong Y.C. i in., *Modification of metal surfaces by microwave plasma at atmospheric pressure*, *Surface & Coatings Technology*, Vol. 201, 2007, No. 9–11, s. 4939–4942.
22. Tendero C., Tixier C., Tristant P., Desmaison J., Leprince P., *Atmospheric pressure plasmas: A review*, *Spectrochim. Acta Part B*, Vol. 61, 2006, No. 1, s. 2–30.

SPECTROSCOPIC INVESTIGATION OF DISCHARGE IN WAVEGUIDE-SUPPLIED RESONANT-CAVITY-BASED MICROWAVE PLASMA SOURCE

Summary

In this paper, results of spectroscopic study of microwave (2.45 GHz) plasma at atmospheric pressure in waveguide-supplied resonant-cavity-based plasma source are presented. Pure argon, nitrogen and methane, as well as mixtures argon/methane and nitrogen/methane were used as working gases. Working gas flow rate and microwave absorbed power varied from 50 up to 100 l/min and from 300 up to 4000 W, respectively. The emission spectra in the range of 300–600 nm were recorded. The rotational and vibrational temperatures of N₂⁺ ions, C₂, N₂ and CN molecules were determined by comparing the measured and simulated spectra.