

Helena Nowakowska

Instytut Maszyn Przepływowych im. R. Szewalskiego PAN w Gdańsku

Jerzy Mizeraczyk

Akademia Morska w Gdyni

Instytut Maszyn Przepływowych im. R. Szewalskiego PAN w Gdańsku

ROZKŁADY POLA ELEKTRYCZNEGO WEWNĄTRZ MIKROFALOWEGO ŹRÓDŁA PLAZMY (MŹP) TYPU KOMORA REZONANSOWA ZASILANA FALOWODOWO

W artykule przeprowadzono analizę numeryczną właściwości elektrodynamicznych mikrofalowego źródła plazmy typu komora rezonansowa zasilana falowodowo, przeznaczonego do plazmowej obróbki gazów. Zbadano wpływ odległości między elektrodami i przenikalności elektrycznej dielektryka wypełniającego komorę na wartości częstotliwości rezonansowych i rozkłady pola elektromagnetycznego odpowiadające dwóm najniższym rezonansom. Ponadto zbadano wpływ parametrów plazmy (unormowana koncentracja elektronów i unormowana częstość zderzeń elektronu) na rozkłady pola elektrycznego wewnątrz komory przy pobudzeniu falą o częstotliwości 2,45 GHz. Obliczenia wykonano za pomocą oprogramowania Comsol Multiphysics.

WPROWADZENIE

Wyładowania mikrofalowe w gazach pod ciśnieniem atmosferycznym są źródłem plazmy o bardzo korzystnych właściwościach. Plazma mikrofalowa charakteryzuje się dużą koncentracją elektronów (do ok. 10^{21} m^{-3}), wysoką energią elektronów (do ok. 4 eV) przy stosunkowo niskiej temperaturze gazu roboczego. Taka plazma ma właściwości katalityczne, wynikające z obecności w niej wolnych rodników i innych aktywnych chemicznie składników. Dzięki temu znajduje wiele zastosowań, z których najważniejsza jest obróbka gazów, obejmująca m.in. oczyszczanie gazów szlachetnych z zanieczyszczeń, usuwanie gazów szkodliwych dla środowiska (np. freony, SH_6) czy dezaktywację gazów bojowych [7, 12]. Innym procesem, w którym wykorzystuje się właściwości plazmy mikrofalowej, jest produkcja wodoru metodą zarówno reformingu parowego, jak i plazmowej pirolizy metanu lub innych węglowodorów [5, 10].

Przemysłowa obróbka gazów wymaga zwykle dużej efektywności procesu, mierzonej objętością gazu obrabianego w jednostce czasu. Aby osiągnąć warunek wysokiej efektywności, konieczne są duże wartości przepływu gazu (setki litrów na minutę) oraz duże wartości mocy mikrofalowej przekazywanej do plazmy (rzędu kilowatów). Do przesyłania mikrofal o dużej mocy najczęściej stosuje się falowody prostokątne, które nadają się do tego celu lepiej niż np. linie współosiowe.

W związku z tym większość mikrofalowych źródeł plazmy do przemysłowej obróbki gazów zbudowana jest właśnie z wykorzystaniem elementów falowodów prostokątnych. Najczęściej stosowane źródła plazmy to źródła typu pochodnia (ang. *torch*) [9], gdzie plazma ma kształt swobodnego płomienia, lub źródła, w których wyładowanie zachodzi w rurze wyładowczej przechodzącej przez górną i dolną ścianę falowodu [4].

Innym rozwiązaniem jest mikrofalowe źródło plazmy (MŹP) typu komora rezonansowa o konstrukcji wykorzystującej odcinek standardowego falowodu prostokątnego. Urządzenie takie zostało zaprojektowane przez Baylissa [1] z przeznaczeniem do plazmowej obróbki gazów, np. do usuwania SH_6 [11]. Następnie zostało zmodyfikowane przez brytyjski zespół [2] w celu wykorzystania go do plazmowej produkcji wodoru metodą parowego reformingu węglowodorów. Prace zmierzające do zwiększenia wydajności produkcji wodoru z zastosowaniem tego MŹP były prowadzone również w Instytucie Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku [6]. Źródło plazmy tego typu jest właśnie przedmiotem niniejszej pracy.

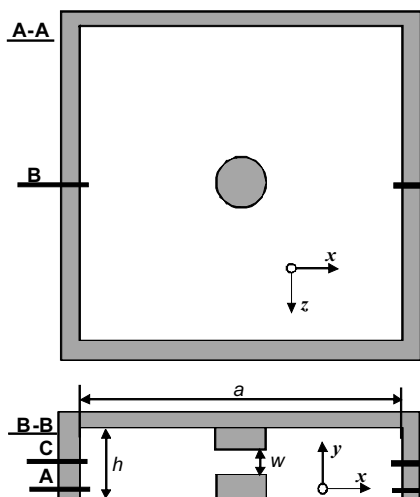
Prezentowane mikrofalowe źródło plazmy (MŹP) jest komorą zbudowaną z wykorzystaniem zwartego odcinka standardowego falowodu prostokątnego WR340 i dwóch osiowosymetrycznych elektrod, umieszczonych na dolnej i górnej ścianie falowodu. W niewielkiej przestrzeni między elektrodami zachodzi wyładowanie elektryczne. Wewnątrz komory znajduje się teflonowa wkładka, której kształt wymusza kołowy przepływ gazu roboczego. Gaz podawany jest przez otwory wywiercone we wkładce, odprowadzany zaś (jako plazma) przez otwory znajdujące się w elektrodach do drugiej komory o większej objętości, w której zachodzą reakcje chemiczne. Źródło plazmy zasilane jest falą o częstotliwości 2,45 GHz. Omawiane MŹP było szczegółowo badane eksperymentalnie, lecz przede wszystkim pod kątem zachodzących w nim plazmowych reakcji chemicznych [11]. Przeprowadzona w laboratorium IMP optymalizacja wymagała również analizy właściwości elektrycznych MŹP w celu dokładnego poznania różnorodnych zjawisk zachodzących w trakcie wyładowania, włączając procesy inicjacji wyładowania, procesy plazmowe i optymalizację masowej oraz energetycznej wydajności produkcji wodoru.

Obliczenia prezentowane w pracy wykonano za pomocą komercyjnego programu *Comsol Multiphysics* [13] z modułem RF. Program ten umożliwia rozwiązywanie równań Maxwella wraz z warunkami brzegowymi w skomplikowanych trójwymiarowych układach geometrycznych. Obliczenia wykonywane są metodą elementu skończonego (ang. FEM).

W następnym rozdziale przedstawiono analizę uproszczonej wersji MŹP, w której obie elektrody są identycznymi walcami, a w komorze nie ma dielektrycznej wkładki. Analiza ta pozwala na zrozumienie podstawowych cech elektrodynamicznych tego źródła. W drugim rozdziale przeprowadzono analizę komory (traktowanej jako rezonator), będącej elementem rzeczywistego MŹP, badanego eksperymentalnie w IMP PAN [6]. Rozdział kolejny będzie poświęcony analizie tej samej komory, ale z uwzględnieniem odcinka falowodowej linii zasilającej oraz obecności kolumny plazmy znajdującej się między elektrodami.

1. ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI REZONANSOWYCH UPROSZCZONEJ WERSJI MIKROFALOWEGO ŹRÓDŁA PLAZMY

Poniżej przedstawiono analizę prostokątnego rezonatora o podstawie kwadratu (o długości boku a i wysokości h) z dwiema cylindrycznymi elektrodami umieszczonymi na osi, odsuniętymi od siebie na odległość w (rys. 1), i wszystkich ścianach doskonale przewodzących. Taki rezonator można traktować jako zgrubne przybliżenie rzeczywistego MŻP. Należy zauważyć, że dla $w = h$ rezonator ten odpowiada zwykłemu rezonatorowi prostokątnemu, natomiast dla $w = 0$ – rezonatorowi o jednej elektrodzie łączącej obie podstawy prostokąta. Zostaną tu wyznaczone częstotliwości rezonansowe i odpowiadające im rozkłady pola elektrycznego dla różnych przypadków.



Rys. 1. Przekroje rezonatora prostokątnego z cylindrycznymi elektrodami na osi oraz wybrany układ współrzędnych: a) przekrój A-A w płaszczyźnie xz , b) przekrój B-B w płaszczyźnie xy

Fig. 1. Cross-sections of the resonator with cylindrical electrodes on the axis, also coordinate system: a) A-A cross section in xz plane, b) B-B cross section in xy plane

Najprostszy do analizy jest przypadek, gdy $w = h$, gdyż wówczas możliwe jest wyznaczenie częstotliwości rezonansowej i rozkładów pola elektromagnetycznego jedynie ze wzorów analitycznych [13]. Częstotliwość rezonansowa f_r podstawowego modu, czyli modu TE_{101} , nie zależy od wysokości rezonatora i wyraża się wzorem:

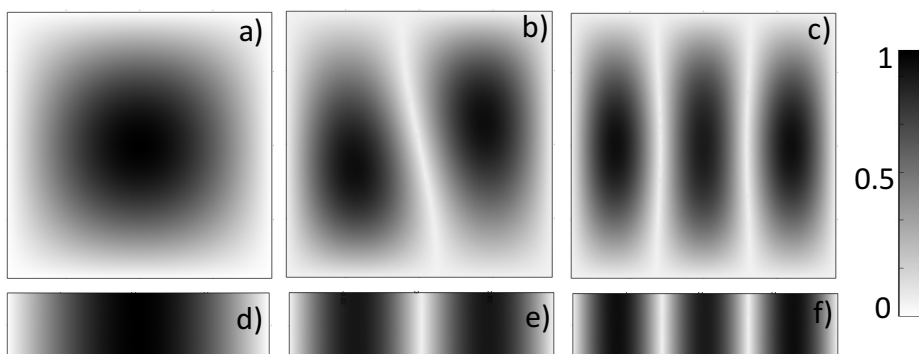
$$f_r = \frac{c}{\sqrt{2a}}, \quad (1)$$

gdzie c jest prędkością światła w próżni.

Ze wzoru (1) wynika, że aby częstotliwość rezonansowa wynosiła 2,45 GHz (typowa częstotliwość mikrofalowa stosowana w badaniach eksperymentalnych i przemyśle), rezonator powinien mieć długość boku $a = 86,2$ mm. Odpowiada to prawie dokładnie szerokości standardowego falowodu WR340 (86,36 mm). Dla rzeczywistego MZP [2, 6], którego długość wynosi $a = 72$ mm, częstotliwość rezonansowa wynosi 2,94 GHz.

Również dla kolejnych, wyższych modów, które mogą być wzbudzone w tym rezonatorze, czyli modów TE_{201} i TE_{301} , częstotliwości rezonansowe nie zależą od wysokości rezonatora i mają wartość odpowiednio: $(\sqrt{5}/2)(c/a)$ oraz $(\sqrt{10}/2)(c/a)$. Dla długości podstawy $a = 72$ mm wynoszą one zatem 4,66 GHz oraz 6,58 GHz.

Rozkłady modułu pola elektrycznego $|E|$ dla modów rezonansowych TE_{101} , TE_{201} , TE_{301} , otrzymane za pomocą programu *Comsol Multiphysics*, przedstawiono na rysunku 2. Moduł pola elektrycznego nie zmienia wartości wzdłuż osi y , a ilość połówek fali odłożonych wzdłuż osi x odpowiada wartości pierwszego indeksu w nazwie modu. Należy dodać, że wartości częstotliwości rezonansowych wyznaczone numerycznie zgadzają się z wartościami otrzymanymi analitycznie co najmniej do trzeciego miejsca po przecinku. Świadczy to m.in. o prawidłowym wyborze wielkości siatki obliczeniowej i dobrej dokładności obliczeń.

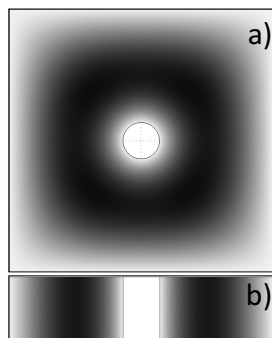


Rys. 2. Rozkłady modułu pola elektrycznego dla modów rezonansowych dla przypadku $a = 72$ mm; $w = h$: a) i d) – mod TE_{101} ; b) i e) – mod TE_{201} ; c) i f) – mod TE_{301} ;
a), b) i c) – widok w płaszczyźnie A-A; d), e) i f) – w płaszczyźnie B-B.
Jednostki umowne

Fig. 2. Electric field module distributions for resonant modes for $a = 72$ mm; $w = h$:
a) and d) – TE_{101} mode; b) and e) TE_{201} – mode; c) and f) – TE_{301} mode;
a), b) and c) – correspond to A-A section; d), e) and f) – correspond to B-B section.
Arbitrary units

Umieszczenie pełnej elektrody cylindrycznej na osi rezonatora (co odpowiada przypadkowi $w = 0$) zmienia całkowicie rozkłady pola elektrycznego, gdyż wymusza wartość zero dla składowej stycznej pola elektrycznego na ścianie elektrody. Zmianie ulegają również częstotliwości rezonansowe.

Rysunek 3 przedstawia rozkłady modułu pola elektrycznego dla wysokości rezonatora równej 17,5 mm i elektrody cylindrycznej o promieniu 5 mm. Rozkłady te różnią się zupełnie od tych przedstawionych na rysunku 2. Choć wartości pola elektrycznego ponownie nie zmieniają się wzdłuż osi y , to zmieniło się położenie maksimum pola elektrycznego, które w tym przypadku znajduje się w odległości około 13 mm od ściany elektrody. Na ścianie rezonatora moduł pola elektrycznego wynosi zero.



Rys. 3. Rozkłady modułu pola elektrycznego dla podstawowego modu rezonansowego dla przypadku $w = 0$:

a) widok w płaszczyźnie A-A;

b) widok w płaszczyźnie B-B.

Skala ta sama, co na rysunku 2

Fig. 3. Electric field module distributions for the basic mode for $w = 0$:

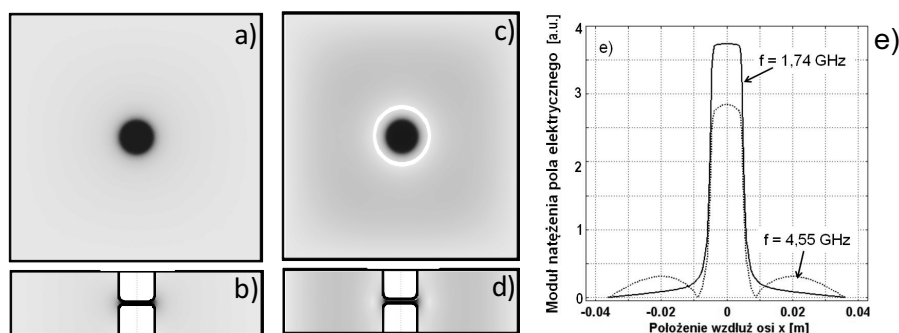
a) A-A section;

b) B-B section.

The same scale as in Fig. 2

Dla przypadku rezonatora z dwoma elektrodami oddzielonymi szczeliną rozkłady pola elektrycznego mają jeszcze inny charakter niż te z rysunków 2 i 3. Pole elektryczne skupione jest głównie w przestrzeni między elektrodami (ma tam największą wartość), natomiast w pozostałej objętości przyjmuje wartości bliskie zero.

Ten efekt, szczególnie widoczny dla małych odległości elektrod w , zobaczyć można na rysunku 4, na którym pokazano rozkłady modułu pola elektrycznego dla $w = 1$ mm i dwóch modów o najniższych częstotliwościach rezonansowych (1,74 GHz i 4,55 GHz).



Rys. 4. Rozkłady modułu pola elektrycznego dla modów rezonansowych dla przypadku $w = 1$ mm: a) i b) mod podstawowy o $f_r = 1,74$ GHz; c) i d) mod $f_r = 4,55$ GHz; a) i c) widok w płaszczyźnie A-A; b) i d) w płaszczyźnie B-B; skala ta sama, co na rysunku 3; e) rozkłady $|\mathbf{E}|$ wzdłuż osi x w połowie wysokości rezonatora

Fig. 4. Electric field module distributions for resonant modes for $w = 1$ mm:

a) and b) the basic mode with $f_r = 1,74$ GHz; c) and d) the mode with $f_r = 4,55$ GHz;

a) and c) A-A section; b) and d) B-B section; the same scale as in Fig. 3;

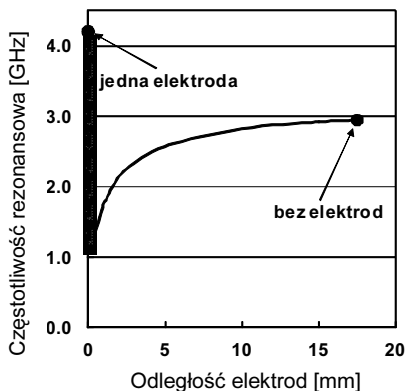
e) distributions of $|\mathbf{E}|$ along x -axis in the half of the resonator height

Na rysunku 4e) widać, że dla modu rezonansowego o częstotliwości niższej moduł pola elektrycznego maleje monotonicznie do zera, osiągając tę wartość na ścianach komory. Dla modu o częstotliwości wyższej (4,55 GHz) istnieje minimum pola o wartości zero w odległości około 9 mm od osi oraz drugie (niewielkie) maksimum w odległości około 20 mm od osi.

Obliczenia przeprowadzone w całym zakresie zmienności w pokazują, jak zmiana odległości elektrod wpływa na zmianę częstotliwości rezonansowej.

Jak widać na rysunku 5, częstotliwość ta maleje od około 2,9 GHz dla maksymalnej odległości elektrod w (równiej 17,5 mm), do około 1 GHz dla odległości w bliskiej zeru. Dla odległości równej zeru (odpowiadającej przypadkowi połączenia elektrod) następuje skok częstotliwości rezonansowej do wartości 4,22 GHz. Ta nieciągłość wartości częstotliwości wynika z drastycznej zmiany rozkładów pola elektromagnetycznego następującej w momencie połączenia elektrod, będącej w istocie zmianą modu. Różnice rozkładów pola elektrycznego widać wyraźnie, jeśli porówna się rysunki 3a), b) i 4a), b).

Z obliczeń wynika, że odległość elektrod w , dla której częstotliwość rezonansowa ma wartość 2,45 GHz, wynosi 3,7 mm.



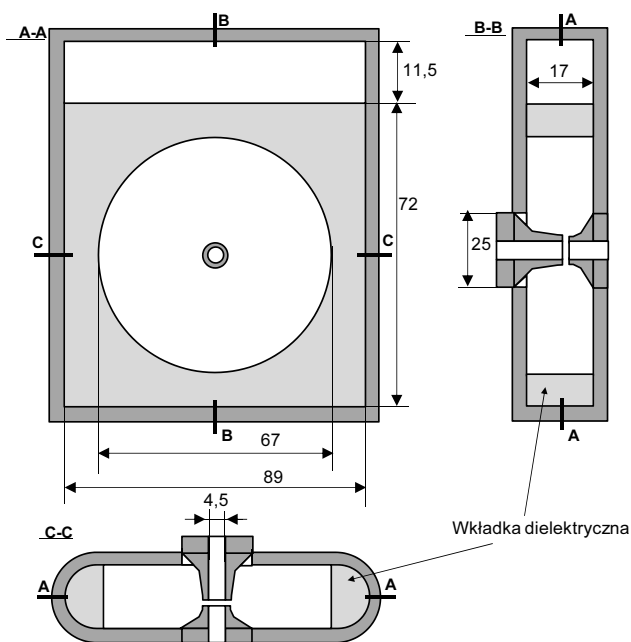
Rys. 5. Wpływ odległości elektrod na częstotliwość rezonansową modu podstawowego w rezonatorze prostokątnym z dwiema elektrodami

Fig. 5. Influence of the gap width on the basic mode resonant frequency in the resonator with two electrodes

2. ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI REZONANSOWYCH MIKROFALOWEGO ŹRÓDŁA PLAZMY

Mikrofalowe źródło plazmy (MŹP), będące przedmiotem badań w laboratorium IMP PAN, w ogólnym zarysie przypomina analizowany powyżej rezonator prostokątny. Jednak, w odróżnieniu od niego, ma zaokrąglone ściany boczne, jest dłuższe i ma wewnątrz komory wkładkę dielektryczną. Elektrody nie są cylindryczne, a ponadto dolna różni się od górnej (rys. 6). Odległość między elektroda-

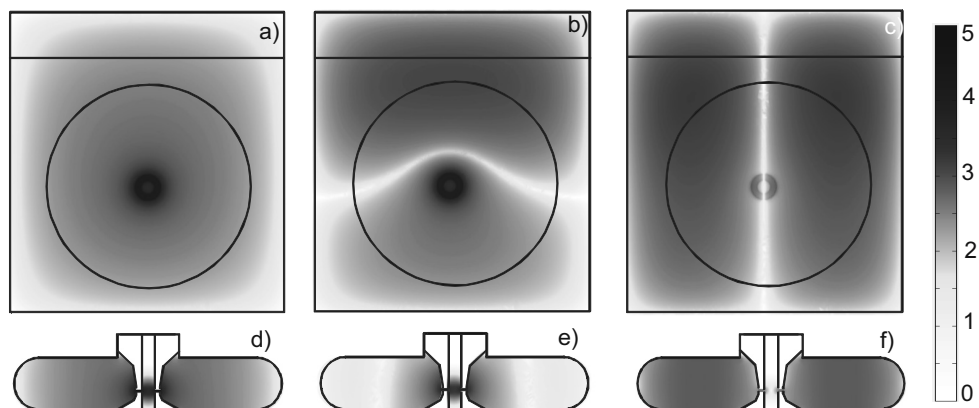
mi można zmieniać, regulując położenie górnej elektrody. Zakres zmian tej odległości wynosi od prawie 0 do około 5 mm. Jednak praktycznie stosowana odległość to około 1 mm, gdyż wtedy gęstość energii mikrofal absorbowanej w plazmie i zależne od niej właściwości samej plazmy są najbardziej korzystne. Kształt wkładki dielektrycznej został dobrany tak, aby uzyskać kołowy przepływ gazu, który podawany jest do komory przez otwory wewnątrz wkładki (otwory te nie zostały pokazane na rysunku) i odprowadzany przez otwory znajdujące się w elektrodach.



Rys. 6. Przekroje poprzeczne mikrofalowego źródła plazmy. Wymiary podane w milimetrach
Fig. 6. Cross-sections of the microwave plasma source. Dimensions given in millimeters

W celu wyznaczenia rezonansowych właściwości tego źródła plazmy przeprowadzono obliczenia zakładając, że wszystkie ścianki wykonane są z idealnego przewodnika, dielektryk jest bezstratny, a jego względna przenikalność elektryczna wynosi 2,04 (co odpowiada przenikalności teflonu). Rozkłady pola elektrycznego wyznaczone dla przypadku, gdy odległość elektrod wynosi 1 mm, dla trzech kolejnych modów pokazane są na rysunku 7.

Modem podstawowym jest mod TE_{101} o częstotliwości $f = 1,73$ GHz. Dla tego modu maksimum wartości pola elektrycznego znajduje się w przestrzeni między elektrodami, minimum zaś (równe 0) – na ścianach bocznych rezonatora. Dwa mody o wyższych częstotliwościach rezonansowych mają dodatkowe minimum pola: mod TE_{102} wzdłuż (w przybliżeniu) osi x , a mod TE_{201} wzdłuż osi z (rys. 1). Częstotliwości tych modów wynoszą odpowiednio 2,84 GHz i 3,33 GHz.

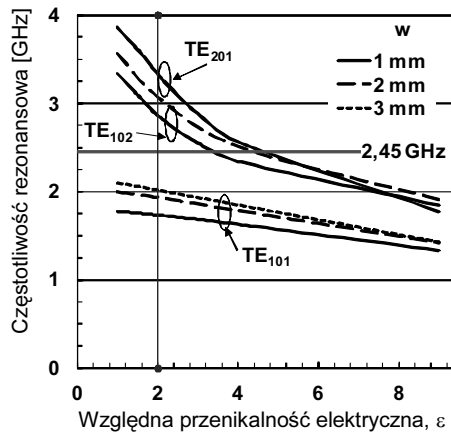


Rys. 7. Rozkłady modułu pola elektrycznego dla trzech modów o najniższych częstotliwościach, skala logarymiczna: a) i d) mod podstawowy TE_{101} ($f = 1,73$ GHz); b) i e) mod TE_{102} ($f = 2,84$ GHz); c) i f) mod TE_{201} ($f = 3,33$ GHz); a), b) i c) rozkłady w płaszczyźnie równoległej do A-A i znajdującej się między elektrodami; d), e) i f) rozkłady w płaszczyźnie C-C

Fig. 7. Electric field module distributions for three resonant modes with the lowest resonant frequencies, logarithmic scale: a) and d) the basic mode TE_{101} ($f = 1,73$ GHz); b) and e) TE_{102} mode ($f = 2,84$ GHz); c) and f) TE_{201} mode ($f = 3,33$ GHz); a), b) and c) distributions in the plane between the electrodes parallel to A-A plane; d), e) and f) distributions in C-C plane

Dla wszystkich trzech modów wartości modułu pola elektrycznego nie zmieniają się z wysokością. Jedynie wewnątrz otworów w elektrodach pole elektryczne zmienia się wzdłuż osi otworów. Ze względu na ich małą średnicę pole jest silnie tłumione.

Rysunek 8 pokazuje, jak częstotliwość rezonansowa MŻP zależy od względnej przenikalności elektrycznej ε wkładki znajdującej się w rezonatorze i odległości między elektrodami w . Widać, że dla każdego z prezentowanych modów częstotliwość rezonansowa maleje ze wzrostem przenikalności elektrycznej wkładki. Wynika to z faktu, że w ogólnym przypadku długość fali maleje, gdy rośnie przenikalność elektryczna dielektryka wypełniającego rezonator. Ze wzrostem odległości elektrod rośnie częstotliwość rezonansowa. Ten efekt widoczny był poprzednio na rysunku 4. Jak widać z rysunku 8, dla modu podstawowego przy odległości elektrod poniżej 3 mm nie można uzyskać częstotliwości rezonansowej równej 2,45 GHz. Dla wkładki dielektrycznej wykonanej z teflonu i odległości elektrod wynoszącej 1 mm częstotliwość rezonansowa każdego z trzech modów jest nie większa niż 2 GHz. Częstotliwość rezonansową równą 2,45 GHz, przy odległości elektrod 1 mm, można otrzymać dla modu TE_{102} i przenikalności elektrycznej wkładki $\varepsilon = 3,4$ lub dla modu TE_{201} i przenikalności elektrycznej $\varepsilon = 4,7$.



Rys. 8. Wpływ względnej przenikalności elektrycznej wkładki dielektrycznej ϵ oraz odległości elektrod w na częstotliwości rezonansowe wybranych modów rezonatora przedstawionego na rysunku 6

Fig. 8. Influence of the insert electric permittivity ϵ and the gap width w on the resonant frequency of chosen modes of the resonator presented in Fig. 6

3. ROZKŁADY POLA ELEKTRYCZNEGO WEWNĄTRZ MIKROFALOWEGO ŹRÓDŁA PLAZMY ZASILANEGO FALOWODOWO

W niniejszym rozdziale przedstawiono rozkłady pola elektrycznego wyznaczone dla mikrofalowego źródła plazmy, omawianego poprzednio, ale z dodatkowym odcinkiem standardowego falowodu prostokątnego WR340, stanowiącego linię zasilającą. Założono pobudzenie podstawowym modem fali TE_{01} o częstotliwości 2,45 GHz. Do obliczeń przyjęto, że długość odcinka falowodu wynosi 43 mm, co stanowi około 1/4 długości fali w falowodzie. Pomiędzy odcinkiem falowodu a komorą znajduje się metalowa przesłona.

W odróżnieniu od wyżej analizowanych przypadków, w których zaniedbywano istnienie plazmy, do obecnych obliczeń przyjęto, że między elektrodami znajduje się kolumna jednorodnej plazmy. Założono, że względna przenikalność magnetyczna plazmy wynosi 1, a względna zespolona przenikalność elektryczna plazmy ϵ_p wyraża się wzorem Lorenza [3] w postaci:

$$\epsilon_p = 1 - \frac{n}{1+s^2} - j \frac{ns}{1+s^2}, \quad (2)$$

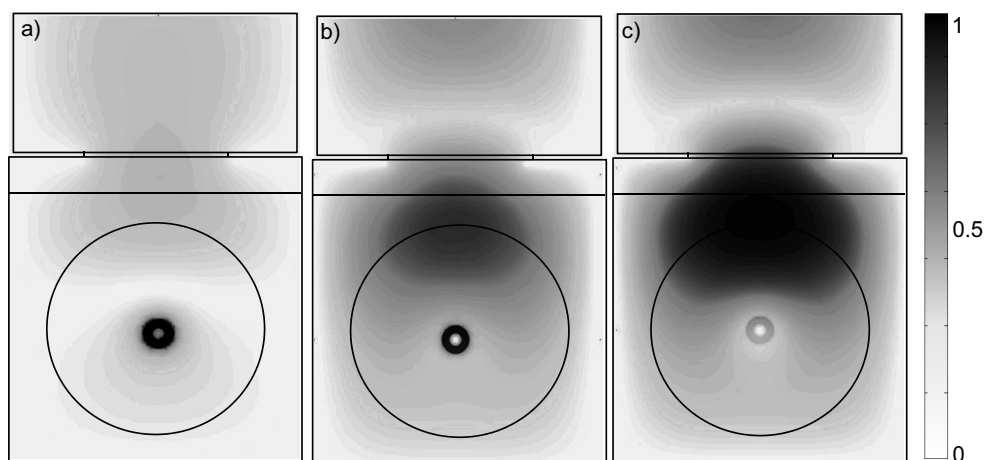
gdzie:

- $n = n_e/n_c$ – unormowana koncentracja elektronów,
- $s = v/\omega$ – unormowana częstość zderzeń elektronów,

- $n_c = \omega^2 \epsilon_0 m / e^2$ – krytyczna koncentracja elektronów (równa $7,45 \cdot 10^{16} \text{ m}^{-3}$ dla $f = 2,45 \text{ GHz}$),
 n_e – koncentracja elektronów,
 ν – częstość zderzeń elektronów na przekazanie pędu,
 e – ładunek elementarny,
 m – masa elektronu,
 ϵ_0 – przenikalność elektryczna próżni, $\omega = 2\pi f$.

Częstość zderzeń elektronu ν zależy przede wszystkim od rodzaju i temperatury gazu oraz temperatury elektronów. Trudno ją wyznaczyć doświadczalnie, zwykle oblicza się ją na podstawie odpowiednich modeli. Dla gazów rozrzedzonych jest ona zwykle dużo mniejsza niż 1. Dla gazów pod ciśnieniem atmosferycznym ma wartości bliskie lub większe od 1. Jak widać ze wzoru (2) sytuacja, gdy $n = 0$, odpowiada przypadkowi, gdy nie ma plazmy.

Wyznaczone numerycznie rozkłady pola elektrycznego dla trzech wartości unormowanej koncentracji elektronów n (0, 20 i 100) oraz $s = 1$ i $w = 1 \text{ mm}$ przedstawiono na rysunku 9. Dodany odcinek falowodu WR340 znajduje się w górnej części rysunków. Przewężenie reprezentuje przesłonę.



Rys. 9. Rozkłady modułu pola elektrycznego wewnątrz MŹP w płaszczyźnie równoległej do A-A i znajdującej się między elektrodami, zasilanego falą o częstotliwości 2,45 GHz i modzie podstawowym TE_{10} , dla trzech wartości unormowanej koncentracji elektronów n w plazmie; a) $n = 0$; b) $n = 20$; c) $n = 100$. Jednostki umowne, $s = 1$

Fig. 9. Electric field module distributions inside the microwave plasma source in the plane between the electrodes parallel to A-A; for frequency 2,45 GHz and the basic mode TE_{10} , for three values of normalized electron density n in plasma; a) $n = 0$; b) $n = 20$; c) $n = 100$. Arbitrary units, $s = 1$

Rozkłady pola elektrycznego dla tych samych warunków, ale dla $s = 25$ (gaz o dużych molekułach, np. CH_4) pokazano na rysunku 10. Jak widać, dla każdego z prezentowanych przypadków pole elektryczne ma maksimum w obszarze między elektrodami, ale im większa wartość n , tym pole to jest mniejsze. Wynika to

z faktu, że ze wzrostem koncentracji elektronów rośnie również część urojona przenikalności elektrycznej (wzór (2)), a zatem i przewodność elektryczna plazmy. Powoduje to zmniejszenie głębokości wnikania pola elektrycznego do plazmy. Dla małej wartości unormowanej częstości zderzeń ($s = 1$) w obszarze między plazmą a przesłoną widoczne jest silne maksimum pola elektrycznego, będące efektem nałożenia się fali padającej i odbitej. Maksimum to widać również na rysunku 10, jednak jest ono dużo słabsze. Jest to spowodowane tym, że większej wartości s odpowiada zwykle silniejsze pochłanianie fali w plazmie (większa część energii elektronów jest tracona w zderzeniach z atomami), a zatem fala padająca jest silniej absorbowana i natężenie fali odbitej jest mniejsze.



Rys. 10. Wpływ względnej przenikalności elektrycznej wkładki dielektrycznej ε oraz odległości elektrod w na częstotliwości rezonansowe wybranych modów rezonatora przedstawionego na rysunku 8 dla $s = 25$ i dla dwóch wartości unormowanej koncentracji elektronów n w plazmie: a) $n = 20$; b) $n = 100$

Fig. 10. The same as in Fig. 8 but for $s = 25$ and two values of the normalized electron density n in plasma: a) $n = 20$; b) $n = 100$

PODSUMOWANIE

Mikrofalowe źródło plazmy zbudowane z wykorzystaniem falowodu prostokątnego i dwóch elektrod jest skutecznym narzędziem do prowadzenia plazmowej obróbki gazów. Umieszczenie elektrod na osi silnie zmienia rozkłady pola elektrycznego, a zatem również częstotliwości rezonansowe tej komory w porównaniu do komory bez elektrod. Pole elektromagnetyczne skoncentrowane jest głównie między elektrodami i maleje do zera w kierunku ścian rezonatora. Ten efekt jest szczególnie widoczny dla małych odległości między elektrodami. Częstotliwość 2,45 GHz (powszechnie stosowana w badaniach eksperymentalnych i w przemyśle) nie może być częstotliwością rezonansową dla modu podstawowego, przyjmując,

że odległość elektrod zmienia się od 1 do 3 mm. Częstotliwość ta może być rezonansowa dla modu TE_{102} i przenikalności elektrycznej wkładki $\varepsilon = 3,4$ lub dla modu TE_{201} i przenikalności elektrycznej $\varepsilon = 4,7$.

Obecność i właściwości plazmy znajdującej się między elektrodami znacznie modyfikują rozkłady pola elektromagnetycznego w komorze. Pole elektryczne w przestrzeni między elektrodami maleje ze wzrostem koncentracji elektronów. Między plazmą i przesłoną oddzielającą komorę od falowodu powstaje fala stojąca. Wzrost częstości zderzeń elektronu powoduje zmniejszenie amplitudy fali stojącej.

Pracę sfinansowało Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach projektu badawczego 2595/B/T02/2008/35 oraz Instytut Maszyn Przepływowych im. Roberta Szewalskiego PAN w Gdańsku.

LITERATURA

1. Bayliss K.H., *Plasma generator with field-enhancing electrodes*, 1995, Patent nr 5, 418,430.
 2. Beech P.M., Jones S.L., Shawcross J.T., *Hydrogen Production*, 2007, Patent WO 2007/116225 A1.
 3. Ginzburg W.L., *Fale elektromagnetyczne w plazmie*, PWN, Warszawa 1964.
 4. Jasiński M., Dors M., Nowakowska H., Mizeraczyk J., *Hydrogen production using various microwave plasma sources*, *Chemicke Listy*, Vol. 102, 2008, s. 1332–1337.
 5. Jasiński M., Dors M., Nowakowska H., Nichipor G.V. i in., *Production of hydrogen via conversion of hydrocarbons using a microwave plasma*, *Journal of Physics, D: Applied Physics*, Vol. 44, 2011, s. 194–202.
 6. Jasiński M., Hrycak B., Nowakowska H., Dors M. i in., *Investigations of the QinetiQ plasma block. Short summary (Report 11)*, 2010, Oprac. wew. IMP PAN nr arch. 561/2010.
 7. Kabouzi Y., Moisan M., Rostaing J.C., Trassy C. i in., *Abatement of perfluorinated compounds using microwave plasmas at atmospheric pressure*, *Journal of Applied Physics*, Vol. 93, 2003, s. 9483–9496.
 8. Litwin R., Suski M., *Technika mikrofalowa*, WNT, Warszawa 1972.
 9. Moisan M., Sauve G., Zakrzewski Z., Hubert J., *An atmospheric pressure waveguide-fed microwave plasma torch: the TIA design*, *Plasma Sources Science Technology*, Vol. 3, 1994, s. 584–592.
 10. Petitpas G., Rollier J.D., Darmon A., Gonzalez-Aguila J. i in., *A comparative study of non-thermal plasma assisted reforming technologies*, *International Journal Hydrogen Energy*, Vol. 32, 2007, s. 2848–2867.
 11. Radoiu M., Hussain S., *Microwave plasma removal of sulphur hexafluoride*, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 164, 2009, s. 39–45.
 12. Uhm H.S., Hong Y.C., Shin D.H., *A microwave plasma torch and its application*, *Plasma Sources Science Technology*, Vol. 15, 2006, s. 26–34.
- Strony internetowe:
13. www.comsol.com.

ELECTRIC FIELD DISTRIBUTIONS IN A WAVEGUIDE-FED RESONANT-CHAMBER-TYPE MICROWAVE PLASMA SOURCE (MPS)

Summary

In this paper electric field distributions of a waveguide-fed resonant-chamber-type microwave plasma source are determined numerically solving the wave equation using commercial software. Dependence of the resonant frequencies for different electrodes gap widths and the dielectric insert electric permittivity values is examined. Influence of plasma parameters on electric field distributions inside the MPS is analyzed.