

Michał SOBAŃSKI
Mariusz JASIŃSKI
Jerzy MIZERACZYK

ANALIZA NUMERYCZNA MIKROFALOWEGO MODUŁU PLAZMOWEGO DO PRODUKCJI WODORU

STRESZCZENIE *Mikrofalowy moduł plazmowy (MMP) służy do produkcji wodoru poprzez reforming węglowodorów. W pracy przedstawiono wyniki optymalizacji transferu energii w MMP o strukturze współosiowej zasilanym falowodem WR 340. W omawianym MMP wyładowanie mikrofalowe powstaje pod ciśnieniem atmosferycznym, a częstotliwość pracy wynosi 2,45 GHz. Wyniki analizy numerycznej pokazują, że dla wybranej konfiguracji MMP minimalny stosunek mocy fali odbitej do mocy fali padającej osiąga wartości poniżej 5% w szerokim zakresie zmian położenia elementu strojącego.*

Słowa kluczowe: mikrofalowy moduł plazmowy, mikrofalowy generator plazmy, wyładowanie mikrofalowe, produkcja wodoru

1. WSTĘP

Mikrofalowe moduły plazmowe (MMP) znajdują zastosowanie w spektroskopii, oczyszczaniu powierzchni, produkcji nanorurek węglowych, sterylizacji, oraz obróbce gazów i cieczy [1, 2, 3]. Prezentowany MMP jest ulepszoną wersją MMP używanego do produkcji wodoru w procesie konwersji węglowodorów [4, 5]. Omawiany w tym artykule MMP pracuje na częstotliwości 2,45 GHz i jest zasilany falowodem WR 340. Wyładowanie mikrofalowe powstaje w gazie pod ciśnieniem atmosferycznym.

mgr inż. Michał SOBAŃSKI¹⁾, dr inż. Mariusz JASIŃSKI¹⁾

e-mail: msobanski@imp.gda.pl; mj@imp.gda.pl

prof. dr hab. inż. Jerzy MIZERACZYK^{1),2)}

e-mail: jmiz@imp.gda.pl

1) Ośrodek Techniki Plazmowej i Laserowej, Instytut Maszyn Przepływowych
im. Roberta Szwedalskiego, Polska Akademia Nauk

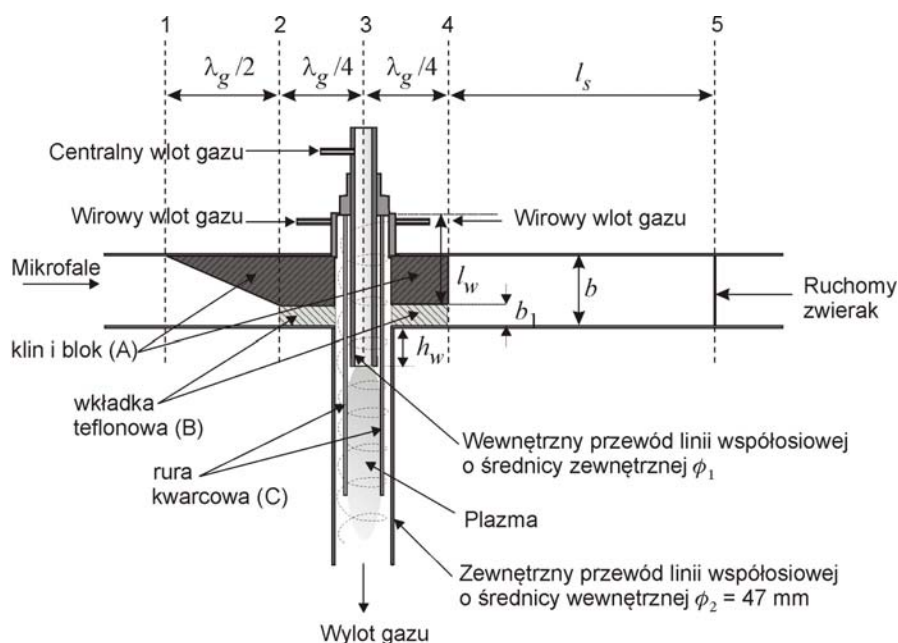
2) Katedra Elektroniki Morskiej, Akademia Morska w Gdyni

Optymalizacja prezentowanego MMP polega na obliczeniu wymiarów elementów konstrukcyjnych, które zapewnią minimalny stosunek mocy fali odbitej P_R do mocy fali padającej P_I w płaszczyźnie wejściowej w możliwie najszerszym zakresie zmian położenia zwieraka falowodowego l_s . Zwierak falowodowy stanowi element strojący. Zależność stosunku P_R/P_I od położenia l_s zwieraka falowodowego stanowi tak zwaną charakterystykę strojenia, która jest dobrym wskaźnikiem sprawności energetycznej omawianego MMP.

Aby obliczyć optymalne wymiary kluczowych elementów konstrukcyjnych omawianego MMP posłużono się modułem RF programu Comsol Multiphysics, który korzysta z metody elementów skończonych.

2. KONSTRUKCJA MMP

Na rysunku 1 przedstawiono szkic omawianego MMP, który składa się z odcinka falowodu prostokątnego WR 340 z wtrąconym prostopadle do szerszego boku falowodu odcinkiem linii współosiowej. Tor falowodowy zakończony jest ruchomym zwierakiem falowodowym, który stanowi główny element strojący.



Rys. 1. Szkic konstrukcji Mikrofalowego Modułu Plazmowego do produkcji wodoru

W artykule przedstawiono wyniki obliczeń dla różnych konfiguracji omawianego MMP. Elementy konstrukcyjne występujące w poszczególnych konfiguracjach MMP oznaczono odpowiednimi literami na rysunku 1 i omówiono w dalszej części niniejszego artykułu.

Konfiguracja I to MMP z elementem A (klinem i blokiem) i elementem B (wkładką teflonową), bez elementu C (bez rury kwarcowej).

Konfiguracja II to MMP z elementem A (klinem i blokiem) i elementem C (rurą kwarcową) bez elementu B (wkładki teflonowej).

Konfiguracja III to MMP z elementem B (wkładką teflonową), bez elementu A (bez klina i bloku) i bez elementu C (bez rury kwarcowej).

Konfiguracja IV to MMP z elementem C (rurą kwarcową), bez elementu A (bez klina i bloku) i bez elementu B (bez wkładki teflonowej).

Gaz roboczy przepływa w centralnym przewodzie odcinka linii współosiowej. Plazma tworzy się na wylocie centralnego przewodu linii współosiowej. Po przeciwnej stronie występowania plazmy linia jest zwarta.

Główne parametry omawianego MMP to:

$a = 86,4$ mm, $b = 43,2$ mm – odpowiednio szerokość oraz wysokość standardowego falowodu prostokątnego WR 340,

b_1 – wysokość falowodu o obniżonej wysokości (zmienna w optymalizacji),

$\lambda_g = 173,4$ mm – długość fali w falowodzie prostokątnym WR 340 (mod H_{10}),

$\lambda = 122,4$ mm – długość fali w próżni oraz w linii współosiowej,

l_s – położenie zwieraka falowodowego,

l_w – długość zwartej odcinka linii współosiowej (zmienna w optymalizacji),

$h_w = 72$ mm – długość odcinka linii współosiowej z plazmą.

W konfiguracji I oraz II omawianego MMP falowód prostokątny zawiera między płaszczyzną 2-2 a płaszczyzną 4-4 metalowy blok o wysokości $b - b_1$, gdzie b oznacza wysokość falowodu WR 340, a b_1 wysokość szczeliny utworzonej przez blok oraz ściankę falowodu. Zastosowanie bloku zapewnia wzrost natężenia pola elektrycznego w obszarze szczeliny. Obszar szczeliny to falowód o obniżonej wysokości. Między płaszczyzną 1-1 a płaszczyzną 2-2 wprowadzono do falowodu metalowy klin o długości $\lambda_g/2$ (λ_g - długość fali w falowodzie WR 340). Odcinek toru falowodowego z klinem tworzy falowód o liniowo zmiennej wysokości, który jest transformatorem admitancji.

W konfiguracji II oraz IV omawianego MMP jest obecna cienkościenna (2 mm) rura kwarcowa zamontowana wzdłuż osi wyładowania, która zapobiega przedostawaniu się gazu do falowodu. Generowana plazma ma bardzo wysoką temperaturę i często dochodzi do uszkodzenia rury kwarcowej. W konfiguracji I oraz III omawianego MMP zamiast rury kwarcowej zastosowano wkładkę teflonową z centralnie wyciętym otworem o średnicy zewnętrznego przewodu linii współosiowej. Wkładka teflonowa znajduje się w chłodniejszej części MMP, więc jest mniej narażona na uszkodzenia termiczne. Jednak jej obecność

w torze falowodowym silnie wpływa na własności elektryczne całego MMP, co przedstawiono w rozdziale 4 niniejszego artykułu.

3. ZAŁOŻENIA OBLICZENIOWE

Celem analizy numerycznej przedstawionej w rozdziale 4 niniejszego artykułu jest obliczenie wartości parametrów konstrukcyjnych omawianego MMP, które zapewnią P_R/P_I poniżej 5% w możliwie jak najszerszym zakresie zmian znormalizowanego położenia zwieraka falowodowego (l_s/λ_g). Parametry konstrukcyjne, które zmieniano w optymalizacji numerycznej to: wysokość falowodu o obniżonej wysokości b_1 , długość zwartego odcinka linii współosiowej l_w oraz średnica wewnętrznego przewodu linii współosiowej φ_1 .

Do obliczeń numerycznych przyjęto standardowy model jednolitej plazmy zgodnie z [6], w którym znormalizowana do częstości pola ω częstość zderzeń s wynosi 0,1. Znormalizowaną do koncentracji krytycznej n_c koncentrację elektronów n przyjęto z przedziału od 10 do 200. Ponadto przyjęto, że plazma ma kształt walca o średnicy 20 mm i długości 80 mm i znajduje się tuż pod linią pod wewnętrznym przewodem linii współosiowej (rys. 1).

Do obliczeń numerycznych przyjęto, że wszystkie ścianki MMP oraz wszystkie przewody toru współosiowego są doskonale przewodzące. Mikrofałe o mocy 2 kW doprowadzono w płaszczyźnie 1-1 falowodem WR 340.

Moduł RF programu Comsol Multiphysics pozwala obliczyć współczynnik odbicia Γ_{in} w płaszczyźnie wejściowej generatora plazmy. Wartość P_R/P_I w danym położeniu zwieraka falowodowego można obliczyć za pomocą wzoru:

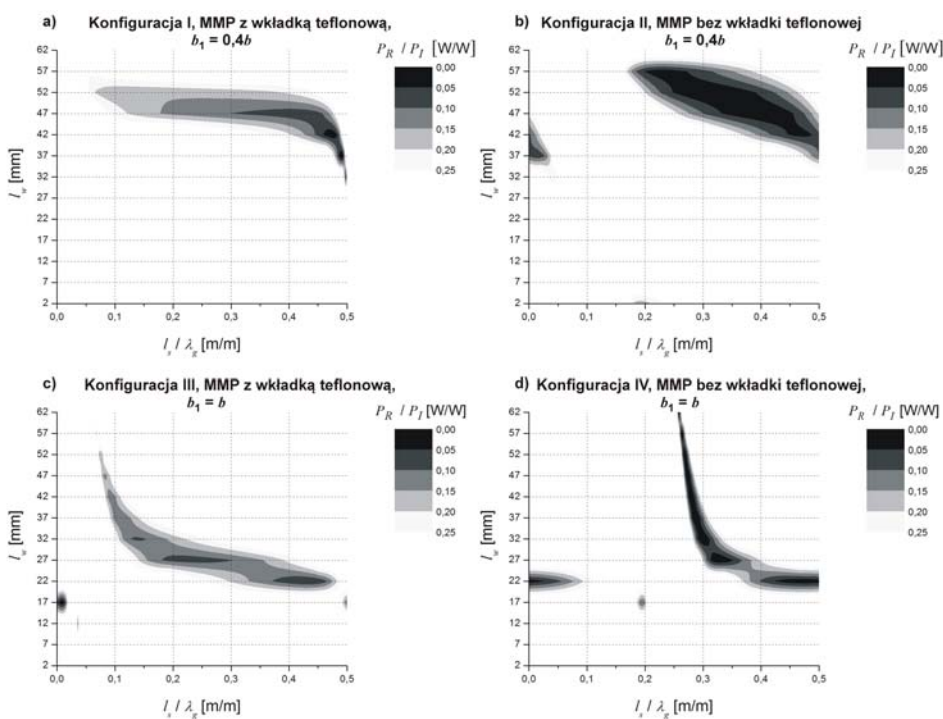
$$\frac{P_R}{P_I} \left(\frac{l_s}{\lambda_g} \right) = |\Gamma_{in}|^2. \quad (1)$$

Aby otrzymać pełną charakterystykę strojenia MMP, trzeba wykonać osobne obliczenia dla różnych znormalizowanych położenia zwieraka falowodowego l_s/λ_g , dlatego posłużono się mniej czasochłonną metodą przedstawioną w [7], gdzie MMP analizuje się jako dwuwrotnik zakończony zwierakiem. W tej metodzie wykorzystuje się moduł RF programu Comsol tylko do obliczenia macierzy rozproszenia dwuwrotnika, natomiast charakterystykę strojenia MMP oblicza się ze wzoru przedstawionego w [7].

Przeprowadzono analizę numeryczną omawianego MMP dla wszystkich konfiguracji MMP przedstawionych w rozdziale 2. Należy jednak zaznaczyć, że obecność cienkościennej rury kwarcowej w MMP została pominięta w analizie numerycznej.

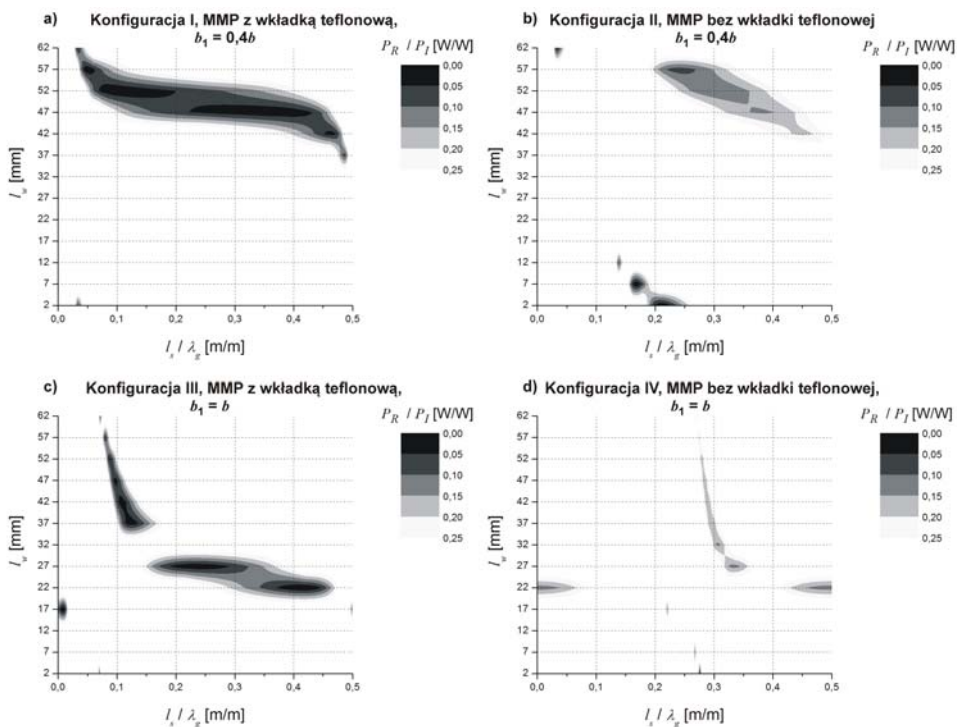
4. WYNIKI ANALIZY NUMERYCZNEJ

W rozdziale 4 niniejszego artykułu przedstawiono obliczone charakterystyki strojenia (rys. 2, rys. 3) przedstawione jako funkcje dwóch zmiennych: znormalizowanego położenia zwieraka falowodowego (l_s / λ_g) oraz wysokości zwartego odcinka linii współosiowej l_w . Wyniki zaprezentowano w postaci dwuwymiarowej mapy konturowej.

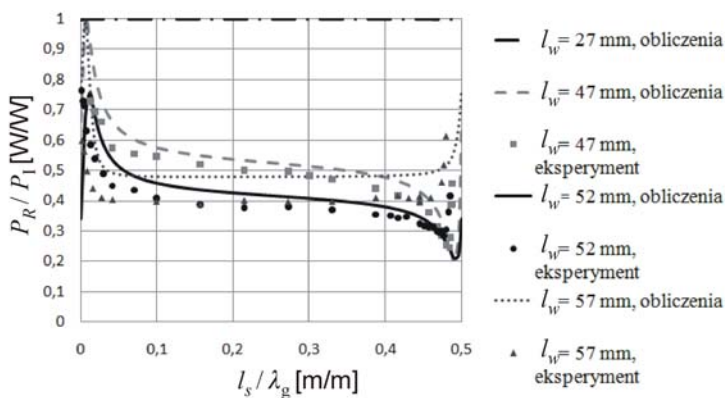


Rys. 2. Obliczone numerycznie charakterystyki strojenia omawianego MMP dla różnych konfiguracji i dla różnych długości zwartego odcinka linii współosiowej l_w . Wprowadzono średnicę wewnętrznego przewodu linii współosiowej równą 20 mm

Charakterystyka strojenia przyjmuje wartości w zakresie od 0 do 1, jednak w artykule wyniki przedstawiono w zakresie od 0 do 0,25, aby skupić się na obszarze najkorzystniejszych wartości P_R / P_I . Zaprezentowano wyniki analizy numerycznej, w której przyjęto że znormalizowana częstość zderzeń s w plazmie i znormalizowana koncentracja elektronów n wynoszą odpowiednio 0,1 oraz 13,5. Dla modelu plazmy z tymi wartościami parametrów s oraz n , obliczenia numeryczne zgadzają się z wynikami eksperymentu w [8], co przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 3. Obliczone numerycznie charakterystyki strojenia omawianego MMP dla różnych konfiguracji i dla różnych długości zwartego odcinka linii współosiowej l_w . Wprowadzono średnicę wewnętrznego przewodu linii współosiowej równą 25 mm



Rys. 4. Charakterystyka omawianego MMP. Porównanie obliczeń numerycznych dla $s = 0,1$; $n = 13,5$ z wynikami eksperymentu. Wysokość falowodu o obniżonej wysokości b_1 wynosi 9,6 mm. Wykres pochodzi z pracy [8]

W artykule przedstawiono wyniki obliczeń dla dwóch średnic wewnętrznych przewodu linii współosiowej $\varphi_1 = 20$ mm oraz $\varphi_1 = 25$ mm.

Jak widać na rysunku 2, dla średnicy $\varphi_1 = 20$ mm i konfiguracji II (z klinem i blokiem bez wkładki teflonowej), obliczona charakterystyka strojenia osiąga wartość poniżej 0,05 w stosunkowo szerokim zakresie zmian, zarówno znormalizowanego położenia zwieraka falowodowego l_s / λ_g , jak i długości zwartego odcinka linii współosiowej l_w (rys. 2b).

Natomiast dla średnicy $\varphi_1 = 25$ mm (rys. 3) obliczona charakterystyka strojenia osiąga wartość poniżej 0,05 dla konfiguracji I (z wkładką teflonową z klinem i blokiem) w stosunkowo szerokim zakresie zmian znormalizowanego położenia zwieraka falowodowego l_s / λ_g , ale w wąskich zakresach zmian l_w (rys. 3a).

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

Przeprowadzona analiza numeryczna, której wyniki przedstawiono w niniejszym artykule, może pomóc w zaprojektowaniu MMP, którego charakterystyka strojenia spełni omówione kryteria optymalizacji.

W procesie konwersji węglowodorów w MMP najczęściej wprowadza się metan, centralnie wzdłuż toru współosiowego, oraz osłonowy azot stabilizujący, wprowadzany w postaci wiru. W [9] przedstawiono charakterystyki strojenia podobnego MMP zasilanego falowodem WR 430. Charakterystyki strojenia w przypadku, gdy gazem roboczym był azot wprowadzany zarówno do bocznych otworów w torze współosiowym oraz centralnie wzdłuż toru współosiowego (natężenie przepływu 50 litrów na minutę), nie różniły się znacząco od tych, kiedy zamiast azotu wprowadzano metan centralnie wzdłuż toru współosiowego (natężenie przepływu od 88 litrów na minutę do 175 litrów na minutę). Azot w postaci przepływu wirowego osłania płynący centralnie węglowodór. Powstała plazma azotowa na zewnątrz plazmy węglowodorowej stanowi w pewnym stopniu niezmienny warunek brzegowy dla mikrofal w MMP. Wyniki przedstawione w [9] pokazują, że obecność azotu jako gazu osłonowego stabilizuje wyładowanie w MMP, tzn. kształt charakterystyki strojenia nie zależy silnie od gazu roboczego wprowadzanego centralnie wzdłuż toru współosiowego. Można zatem przyjąć, że wprowadzony model plazmy omówiony w rozdziale trzecim niniejszego artykułu, będzie w dużym stopniu poprawny w przypadku, gdy gazem roboczym będzie metan lub inny węglowodor, wprowadzany razem z osłonowym azotem.

W używanym magnetronowym generatorze mikrofal około 70% energii elektrycznej pobieranej z sieci energetycznej przekształcana jest na energię

mikrofal. Zatem artykuł przedstawia optymalizację transferu tychże 70% energii, na którą mają wpływ omówione parametry konstrukcyjne. Wydajność wytwarzania wodoru rośnie ze wzrostem mocy absorbowanej ($P_A \approx P_I - P_R$) mikrofal w plazmie [5]. Zatem należy zadbać, aby moc fali odbitej P_R była jak najmniejsza, co było celem przeprowadzonej optymalizacji.

Wyniki analizy numerycznej pokazują, że kryterium optymalizacji zostanie spełnione dla konfiguracji II MMP (z blokiem i klinem, bez wkładki teflonowej) dla $\varphi_1 = 20$ mm (rys. 2b), oraz dla konfiguracji I MMP (z wkładką teflonową, blokiem i klinem) dla $l_w = 47$ mm i $\varphi_1 = 25$ mm (rys. 3a). Należy tutaj podkreślić, że konfiguracje MMP bez wkładki teflonowej muszą posiadać rurę kwarcową, która jak wspomniano w rozdziale drugim niniejszego artykułu, jest podatna na uszkodzenia termiczne. Rozsądnym wydaje się wybór konfiguracji omawianego MMP bez rury kwarcowej.

Badania zostały zrealizowane w ramach projektu rozwojowego NCBiR NR14-0091-10/2010.

LITERATURA

1. Jasiński M., Mizeraczyk J., Zakrzewski Z.: Measurements of neutral gas temperature in microwave torch plasmas at atmospheric pressure, Czechoslovak Journal of Physics, v. 52, pp. 421-426, 2002.
2. Czyłkowski D., Jasiński M., Mizeraczyk J., Zakrzewski Z.: Argon and neon plasma columns in continuous surface wave microwave discharge at atmospheric pressure, Czechoslovak Journal of Physics, v. 56, pp. B684-B689, 2006.
3. Kolacinski Z., Szymanski L., Raniszewski G., Wiak S.: Plasma synthesis of carbon nanotubes for electrical and electronic engineering, Przegląd Elektrotechniczny 12b, 2012.
4. Jasiński M., Dors M., Nowakowska H., Mizeraczyk J.: Hydrogen Production via Methane Reforming using various Microwave Plasma Sources, Chemicke Listy 102, pp. 1332-1337, 2008.
5. Jasiński M., Dors M., Mizeraczyk J.: Applications of atmospheric pressure microwave plasma source for production of hydrogen via methane reforming, European Physical Journal D, 54, n.2, pp. 179-183, 2009.
6. Nowakowska H., Jasiński M., Mizeraczyk J.: Electric Field Distribution and Energy Transfer in Waveguide-Based Axial-Type Microwave Plasma Source, Proceedings of Comsol Conference, Hannover 2008.
7. Nowakowska H., Jasiński M., Mizeraczyk J.: Optymalizacja transferu energii w mikrofalowym generatorze plazmy zasilanym falowodowo, Przegląd Elektrotechniczny, 07, 2010.
8. Sobański M., Jasiński M., Mizeraczyk J.: Optymalizacja mikrofalowego generatora plazmy o strukturze współosiowej zasilanego falowodem, Przegląd Elektrotechniczny, 10b, 2012.
9. Hrycak B., Czyłkowski D., Jasiński M., Mizeraczyk J.: Charakterystyki strojenia współosiowego mikrofalowego generatora plazmy w argonie, azocie i metanie pod ciśnieniem atmosferycznym, Przegląd Elektrotechniczny, 11b, 2012.

Rękopis dostarczono dnia 11.03.2013 r.

NUMERICAL ANALYSIS
OF MICROWAVE PLASMA MODULE
FOR HYDROGEN PRODUCTION

Michał SOBAŃSKI, Mariusz JASIŃSKI
Jerzy MIZERACZYK

ABSTRACT *Microwave plasma module (MPM) is used for hydrogen production via conversion of hydrocarbons. We present optimization of energy transfer in the waveguide-supplied coaxial-line-based MPM. The MPM operates at atmospheric pressure and frequency of 2.45 GHz. The MPM is terminated with movable plunger which plays the role of the tuning element. Tuning characteristics are defined as the dependence of the P_R/P_I as a function of the position l_s of the movable plunger, where P_R and P_I are power reflected and power incident, respectively. The powers P_R and P_I are measured in input plane of the MPM.*

Optimization has been performed using Comsol Multiphysics software. The main construction elements which have been optimized are the length of the shorted coaxial line section, the diameter of the inner conductor of coaxial line and finally the height of the reduced height waveguide section.

Keywords: *microwave plasma module, microwave plasma source, microwave discharges, hydrogen production*

Mgr inż. Michał SOBAŃSKI jest absolwentem Wydziału Elektrycznego Akademii Morskiej w Gdyni. Tytuł magistra inżyniera w specjalności Radioelektronika otrzymał w 2010 r. Od 1 stycznia 2010 r. pracuje na stanowisku asystenta w Instytucie Maszyn Przepływowych im. Roberta Szwalskiego Polskiej Akademii Nauk.



Dr inż. Mariusz JASIŃSKI jest absolwentem Wydziału Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej Politechniki Gdańskiej. Stopień doktora otrzymał w 2003 r. w Instytucie Maszyn Przepływowych im. Roberta Szwalskiego Polskiej Akademii Nauk, gdzie aktualnie pracuje. Od 1 stycznia 2006 r. pełni funkcję Kierownika Zakładu Energetyki Wodorowej.

Prof. dr hab. inż. Jerzy MIZERACZYK otrzymał dyplom magistra inżyniera na Politechnice Gdańskiej w 1966 r., stopień doktora na Uniwersytecie Gdańskim w 1975 r. oraz doktora habilitowanego na Politechnice Gdańskiej w 1988 r. Stopień naukowy profesora otrzymał z rąk Prezydenta RP w 1997 r. Aktualnie jest Kierownikiem Ośrodka Techniki Plazmowej i Laserowej Instytutu Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk w Gdańsku.

