

P O L S K A A K A D E M I A N A U K

INSTYTUT MASZYN PRZEPŁYWOWYCH

**PRACE
INSTYTUTU MASZYN
PRZEPŁYWOWYCH**

TRANSACTIONS

OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

93

WARSZAWA - POZNAŃ 1992

W Y D A W N I C T W O N A U K O W E P W N

PRACE INSTYTUTU MASZYN PRZEPŁYWOWYCH

poświęcone są publikacjom naukowym z zakresu teorii i badań doświadczalnych w dziedzinie mechaniki i termodynamiki przepływów, ze szczególnym uwzględnieniem problematyki maszyn przepływowych

*

THE TRANSACTIONS OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

exist for the publication of theoretical and experimental investigations of all aspects of the mechanics and thermodynamics of fluid-flow with special reference to fluid-flow machinery

RADA REDAKCYJNA – EDITORIAL BOARD

TADEUSZ GERLACH · HENRYK JARZYNA · JERZY KRZYŻANOWSKI
[STEFAN PERYCZ] · WŁODZIMIERZ PROSNAK
KAZIMIERZ STELLER · ROBERT SZEWAŁSKI (PRZEWODNICZĄCY · CHAIRMAN)
JÓZEF ŚMIGIELSKI

KOMITET REDAKCYJNY – EXECUTIVE EDITORS

KAZIMIERZ STELLER – REDAKTOR – EDITOR
WOJCIECH PIETRASZKIEWICZ · ZENON ZAKRZEWSKI
ANDRZEJ ŻABICKI

REDAKCJA – EDITORIAL OFFICE

Instytut Maszyn Przepływowych PAN
ul. Gen. Józefa Fiszerza 14, 80-952 Gdańsk, skr. pocztowa 621, tel. 41-12-71

Copyright
by Wydawnictwo Naukowe PWN Sp. z o.o.
Warszawa 1992

Printed in Poland

ISBN 83-01-10515-1
ISSN 0079-3205

WYDAWNICTWO NAUKOWE PWN – ODDZIAŁ W POZNANIU

Nakład 300+80 egz.	Oddano do składania 14 I 1991 r.
Ark. wyd. 17,5. Ark. druk. 15,625	Podpisano do druku 6 V 1992 r.
Pap. offset. kl. III, 70 g 70×100 cm.	Druk ukończono w lipcu 1992 r.
Nr zam. 158/187	

DRUKARNIA UNIwersytetu IM. A. MICKIEWICZA W POZNANIU

MIECZYŚLAW LUBAŃSKI, TADEUSZ KOPICZYŃSKI, ZENON ZAKRZEWSKI

Gdańsk

Badania eksperymentalne mikrofalowego generatora kolumny plazmy o osiowo jednorodnej koncentracji elektronów *

W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych podstawowych charakterystyk mikrofalowego generatora kolumny plazmy o osiowo jednorodnej koncentracji elektronów.

1. Wstęp

Znane i stosowane dotąd mikrofalowe generatory plazmy mają dwie istotne wady. W generatorach o lokalnym oddziaływaniu pola elektromagnetycznego z plazmą objętość otrzymywanej plazmy jest niewielka. W generatorach o przestrzennym rozłożonym oddziaływaniu pola elektromagnetycznego z plazmą objętość plazmy jest wprawdzie duża, występuje jednakże przestrzenna niejednorodność parametrów plazmy, a w szczególności koncentracji elektronów. Typowym przykładem może tu być np. plazma podtrzymywana falą powierzchniową, otrzymywana przy użyciu struktury typu surfatron lub surfaguide [1].

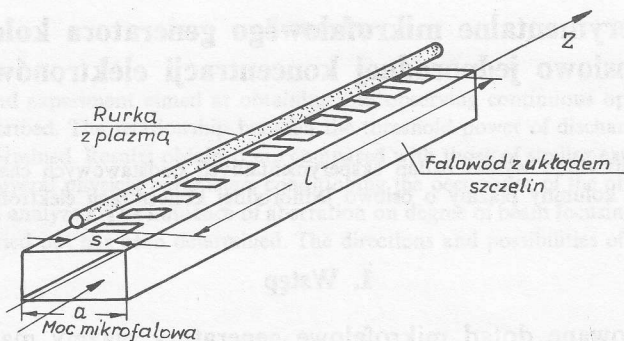
W zastosowaniach technicznych (lasery, technologia cienkich warstw itp.) pożądana jest przestrzenna jednorodność plazmy. Powstała więc myśl opracowania mikrofalowego generatora plazmy o dużej objętości, której parametry byłyby dostatecznie jednorodne przestrzennie.

Realizacja takiego generatora jest możliwa przy użyciu struktury falowodowej stosowanej w technice anten mikrofalowych (Leaky Wave Antenna, LWA). Zasada działania generatora o własnościach wymienionych wyżej polega na jonizacji gazu zawartego w rurce do wyładowań, energią mikrofal wyciekającą ze struktury LWA. Osiową jednorodność kolumny plazmy można osiągnąć dobierając odpowiednio rozkład osiowy promieniowanej przez strukturę LWA mocy mikrofal.

Schemat omawianego generatora przedstawiony jest na rysunku 1. Do realizacji generatora wykorzystano odcinek standardowego falowodu prostokątnego z wyciętym w jego szerszym boku układem poprzecznych szczelin, nad którym jest umieszczona rurka wypełniona gazem pod obniżonym ciśnieniem.

* Praca wykonana w ramach Centralnego Planu Badań Podstawowych nr 02.02 „Pole elektromagnetyczne i mechaniczne w ośrodkach ciągłych”, temat 2.4 „Badania wyładowań w gazie w polu elektromagnetycznym”.

Podłużny rozkład parametrów, powstającej w polu mikrofal plazmy, zależy w istotny sposób od geometrii układu szczelin, od odległości rurki od powierzchni falowodu oraz od bezwzględnej koncentracji elektronów w plazmie. Od geometrii szczelin zależy podłużny rozkład tłumienia fali elektromagnetycznej rozchodzącej się w falowodzie. Innymi słowy, podłużny rozkład parametrów plazmy jest jednoznacznie zależny od podłużnego rozkładu tłumienia fali. Przez odpowiedni dobór rozkładu tłumienia można otrzymać wyładowanie o dowolnym podłużnym rozkładzie koncentracji elektronów, w tym również rozkład osiowo jednorodny.



Rys. 1. Schemat budowy mikrofalowego generatora plazmy

W przedstawionym na rysunku 1 mikrofalowym generatorze plazmy zastosowano jedną z wielu możliwych struktur typu LWA. Inne typy struktur, np. falowód z długą osiową szczeliną w szerszym boku falowodu lub falowód z układem poprzecznych szczelin w węższym boku falowodu, są mniej przydatne, ze względu na skomplikowaną technologię wykonania lub ze względu na stosunkowo małe tłumienie fali elektromagnetycznej.

Objętość plazmy generowanej przy użyciu struktury LWA jest ściśle zależna od częstotliwości źródła mikrofal. Stosując źródła o dostatecznie małej częstotliwości i falowody o odpowiednio dużych rozmiarach można zbudować generator plazmy o dowolnie dużej objętości.

W niniejszej pracy podano wyniki badań eksperymentalnych mikrofalowego generatora plazmy ze strukturą LWA przedstawionego na rysunku 1, przy częstotliwości źródła mikrofal $f = 2,45$ GHz.

2. Uproszczony opis teoretyczny generatora

Jak wspomniano wyżej, osiowy rozkład koncentracji elektronów $n(z)$ w kolumnie plazmy zależy od osiowego rozkładu tłumienia fali elektromagnetycznej $\alpha(z)$ w układzie falowód z układem szczelin – rurka do wyładowań. Funkcja tłumienia fali elektromagnetycznej może być przedstawiona następująco [2]:

$$\alpha(z) = A f_z(z) f_n(\bar{n}), \quad (1)$$

gdzie A jest stałą, $f_z(z)$ – funkcją charakteryzującą własności struktury falowodowej LWA, a $f_n(\bar{n})$ – funkcją charakteryzującą własności plazmy w kolumnie, przy czym $\bar{n}$ oznacza średnią wartość względnej koncentracji elektronów w danym przekroju kolumny.

Funkcje $f_z(z)$ i $f_n(\bar{n})$ można wyznaczyć teoretycznie lub eksperymentalnie dla każdego szczególnego przypadku generatora. Przedmiotem badań był generator o osiowo jednorodnej koncentracji elektronów w kolumnie plazmy, tzn. taki generator, dla którego spełniony jest warunek $n(z) \equiv \text{const}$. W takim przypadku funkcja $f_z(z)$ spełnia [2] równanie różniczkowe:

$$\frac{1}{f_z(z)} \frac{df_z(z)}{dz} = -2A f_n f_z(z) = 0, \quad (2)$$

k którego rozwiązanie ma następującą postać:

$$\frac{1}{f_z(z)} - \frac{1}{f_z(0)} = -2A f_n z, \quad (3)$$

gdzie $f_z(0)$ jest wartością f_z na początku kolumny plazmy.

Dla kolumny plazmy osiowo jednorodnej spełniony jest warunek

$$f_n(\bar{n}) \equiv f_n, \quad (4)$$

gdzie f_n jest wielkością stałą.

Uwzględniając warunek początkowy na tłumienie fali na początku kolumny plazmy $\alpha(0) = \alpha_0$, rozkład osiowy tłumienia fali, na podstawie wzorów (1) i (3), przyjmuje następującą postać:

$$\frac{\alpha(z)}{\alpha_0} = \frac{f_z(z)}{f_z(0)} = \frac{1}{1 - 2\alpha_0 z}, \quad (5)$$

lub

$$\alpha(z) = \frac{1}{2} \frac{1}{L - z}, \quad (6)$$

gdzie

$$L = \frac{1}{2\alpha_0}. \quad (7)$$

L jest maksymalną osiągalną dla danej wartości α_0 długością kolumny plazmy. W warunkach rzeczywistych kolumna plazmy nie osiąga długości L , lecz długość $l < L$, ponieważ, jak wynika z równania (6), dla $z = L$ tłumienie α musiałoby być nieskończenie wielkie. Rzeczywistą długość l kolumny plazmy z wartością L można powiązać wprowadzając pojęcie sprawności przepływu mocy do wyładowania:

$$\eta_l = \frac{P_0 - P(l)}{P_0} = 1 - \exp[-2 \int \alpha(z) dz] = 2\alpha_0 l = \frac{l}{L}, \quad (8)$$

gdzie P_0 jest mocą mikrofalową w przekroju wejściowym kolumny, a $P(l) = P_l$ mocą mikrofalową na końcu kolumny plazmy. Dla danej sprawności η_l i wartości

tłumienia początkowego można wyznaczyć rzeczywistą długość kolumny plazmy l .

Znajomość funkcji (6), którą spełnia tłumienie fali w generatorze dla jednorodnej osiowo kolumny plazmy, umożliwia, teoretycznie rzecz biorąc, wyznaczenie geometrii układu szczelin w falowodzie. Jest to jednakże zadanie bardzo trudne i dotąd nie rozwiązane. Istnieje jedynie rozwiązanie numeryczne dla ściśle periodycznego układu szczelin w szerszym boku falowodu prostokątnego, to znaczy dla przypadku gdy rozkład tłumienia osiowego fali $\alpha(z) = \text{const}$ [3].

Z zależności (6) widać jednakże, że $\alpha(z)$ jest wolnozmienną funkcją z dla $0 < z < \frac{3}{4}L$, czyli dla sprawności wyładowania nie większych niż $\eta_1 = 0,75$. Można więc przyjąć z wystarczającą dla potrzeb praktycznych dokładnością, że dla otrzymania w przybliżeniu osiowo jednorodnej kolumny plazmy tłumienie fali wzdłuż struktury może być stałe. Oznacza to, że w przedstawionej na rysunku 1 strukturze, długości szczelin mogą być jednakowe, co znacznie upraszcza technologię budowy generatora.

Należy jednakże podkreślić, że przedstawione tu zależności, a w szczególności założenie, że $\alpha(z)$ może mieć postać przedstawioną w równości (1) są słuszne wtedy, gdy kolumna plazmy zachowuje się tak jak wolna przestrzeń, to znaczy że cała energia wypromieniowana ze struktury falowodowej jest przez plazmę pochłaniana. Nie może to być spełnione dla dużych koncentracji elektronów w plazmie, gdyż wówczas rurka z plazmą może w istotny sposób wpływać na rozkład pola elektromagnetycznego w obszarze indukcyjnym struktury falowodowej. Dla omawianego generatora założenie (1) jest więc słuszne jedynie w przybliżeniu. Przybliżenie jest tym lepsze im mniejsza jest koncentracja elektronów w plazmie.

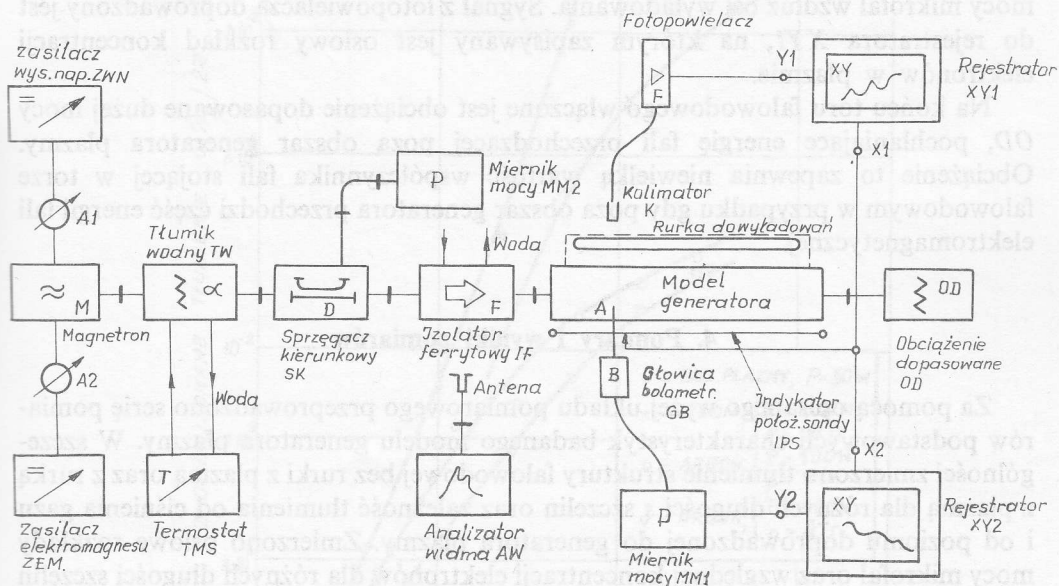
3. Układ pomiarowy

Dla przeprowadzenia badań opisywanego generatora plazmy zestawiony został niekonwencjonalny układ pomiarowy umożliwiający wykonanie pomiarów osiowych rozkładów koncentracji elektronów w plazmie, osiowych rozkładów mocy mikrofal oraz tłumienia fali elektromagnetycznej dla różnych poziomów mocy doprowadzonej do jego wejścia.

Należy zaznaczyć, że w omawianych badaniach eksperymentalnych nie są konieczne pomiary bezwzględnej koncentracji elektronów oraz bezwzględnej mocy mikrofal, gdyż chodzi tu głównie o rozkłady tych wielkości. Miarą względnej koncentracji elektronów w plazmie wyładowania jest natężenie światła emitowanego przez plazmę. Osiowy rozkład względnej koncentracji elektronów można więc otrzymać mierząc, za pomocą fotopowielacza, osiowy rozkład natężenia światła. Rozkład mocy mikrofal można otrzymać mierząc moc sygnału otrzymywanego z przesuwnej sondy elektrycznej sprzężonej z falowodem z układem szczelin stanowiącymi opisywany generator plazmy.

Schemat układu pomiarowego przedstawiony jest na rysunku 2. Źródłem mikrofal jest magnetron M pracujący w sposób ciągły przy częstotliwości sygnału

$f=2,45$ GHz i maksymalnej mocy wyjściowej 0,7 kW. Obwód anodowy magnetronu zasilany jest z zasilacza wysokiego napięcia ZWN o regulowanym i stabilizowanym prądzie, dzięki czemu możliwa jest regulacja mocy wyjściowej magnetronu. Zasilacz ZEM dostarcza prąd do uzwojenia elektromagnesu magnetronu.



Rys. 2. Schemat układu pomiarowego

Na wyjściu magnetronu włączony jest stały tłumik wodny dużej mocy *TW* przeznaczony do redukcji maksymalnego poziomu mocy o około 7 dB. Tłumik ten chłodzony jest wodą w obiegu zamkniętym z wykorzystaniem termostatu *TMS*. Za tłumikiem włączony jest sprzęgacz kierunkowy *SK* umożliwiający pomiar za pomocą miernika *MM2* mocy fali doprowadzonej do generatora plazmy. Za sprzęgaczem włączony jest chłodzony wodą izolator ferrytowy dużej mocy *IF* w celu zabezpieczenia magnetronu od wpływu fali odbitej w torze falowodowym. Do kontroli częstotliwości oraz widma sygnału generowanego przez magnetron przeznaczony jest analizator widma *AW*, do którego sygnał doprowadzony jest z antenki dipolowej słabo sprzężonej z torem falowodowym.

Za izolatorem ferrytowym włączony jest doświadczalny model mikrofalowego generatora plazmy. Jest to odcinek falowodu, którego jedna z szerszych ścianek stanowi wymienną płytę z wyciętym układem szczelin. Pośrodku drugiej przeciwległej ścianki na całej jej długości wycięta jest podłużna wąska szczelina, przez którą wprowadzona jest do falowodu sonda elektryczna A służąca do pomiaru podłużnego rozkładu mocy mikrofal. Do pomiaru rozkładu natężenia światła służy fotopowielacz F , do którego doprowadzony jest przez światłowód sygnał świetlny z kolimatora K , który wraz z sondą A umieszczony jest na przesuwным wózku przemieszczającym się wzdłuż osi falowodu. Z wózkiem sprzężony jest liniowy

potencjometr *IPS* spełniający funkcję indykatora położenia sondy i kolimatora. Napięcie z tego potencjometru doprowadzone jest do wejścia *X* rejestratorów *XY1* i *XY2*. Położenie pisaków w rejestratorach jest liniowo zależne od położenia wózka na falowodzie. Moc sygnału otrzymywanego z sondy mierzona jest miernikiem *MM1* współpracującym z rejestratorem *XY2*, na którym zapisywany jest rozkład mocy mikrofal wzdłuż osi wyładowania. Sygnał z fotopowielacza doprowadzony jest do rejestratora *XY1*, na którym zapisywany jest osiowy rozkład koncentracji elektronów w plazmie.

Na końcu toru falowodowego włączone jest obciążenie dopasowane dużej mocy *OD*, pochłaniające energię fali przechodzącej poza obszar generatora plazmy. Obciążenie to zapewnia niewielką wartość współczynnika fali stojącej w torze falowodowym w przypadku gdy poza obszar generatora przechodzi część energii fali elektromagnetycznej.

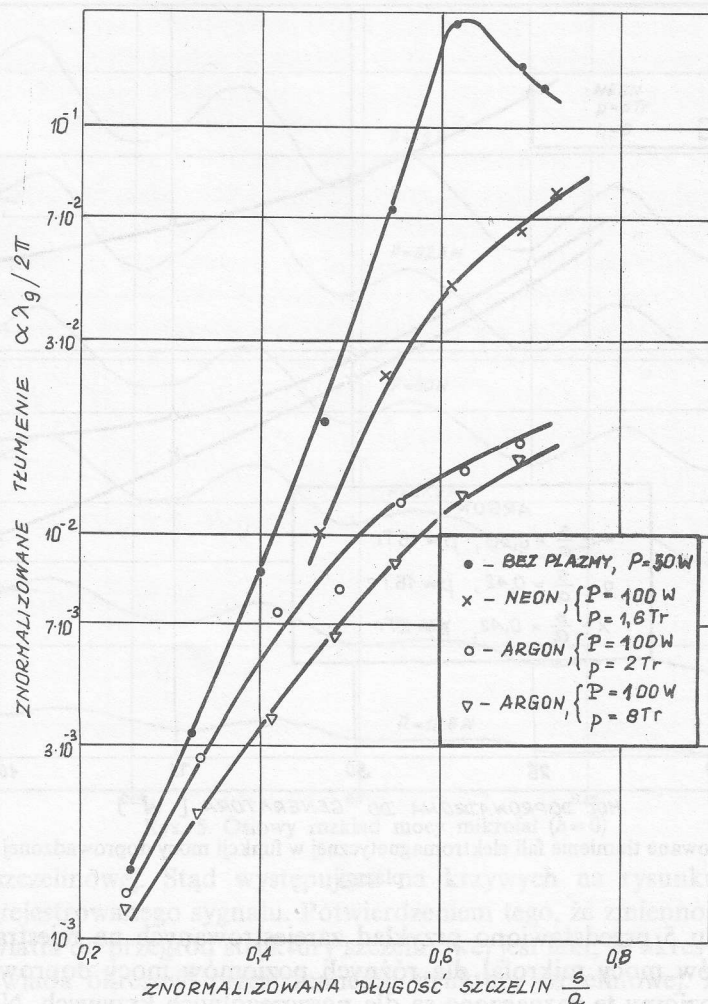
4. Pomiary i wyniki pomiarów

Za pomocą opisanego wyżej układu pomiarowego przeprowadzono serię pomiarów podstawowych charakterystyk badanego modelu generatora plazmy. W szczególności zmierzono tłumienie struktury falowodowej bez rurki z plazmą oraz z rurką z plazmą dla różnych długości *s* szczelin oraz zależność tłumienia od ciśnienia gazu i od poziomu doprowadzonej do generatora plazmy. Zmierzono osiowe rozkłady mocy mikrofal oraz względnej koncentracji elektronów dla różnych długości szczelin i dla różnych odległości rurki do wyładowań od układu szczelin w funkcji wartości mocy doprowadzonej do generatora plazmy. Pomiary wykonano dla wyładowań w neonie oraz argonie przy różnych ciśnieniach gazu, w zakresie od jednego do kilkunastu Torów.

W doświadczalnym modelu generatora wykonanego na podstawie standardowego falowodu $FP72 \times 36$ długość układu szczelin wynosiła 430 mm, szerokość jednej szczeliny 8 mm, a odstęp między szczelinami 5 mm. Długości szczelin w różnych wersjach generatora mieściły się w zakresie od 42 mm do 52 mm, przy czym wszystkie szczeliny w układzie miały jednakową długość.

Zastosowano rurki do wyładowań o średnicy wewnętrznej 10 mm oraz 32 mm. Rurki te zamontowano w generatorze w sposób umożliwiający zmianę ich odległości od układu szczelin w zakresie od 0 do 15 mm.

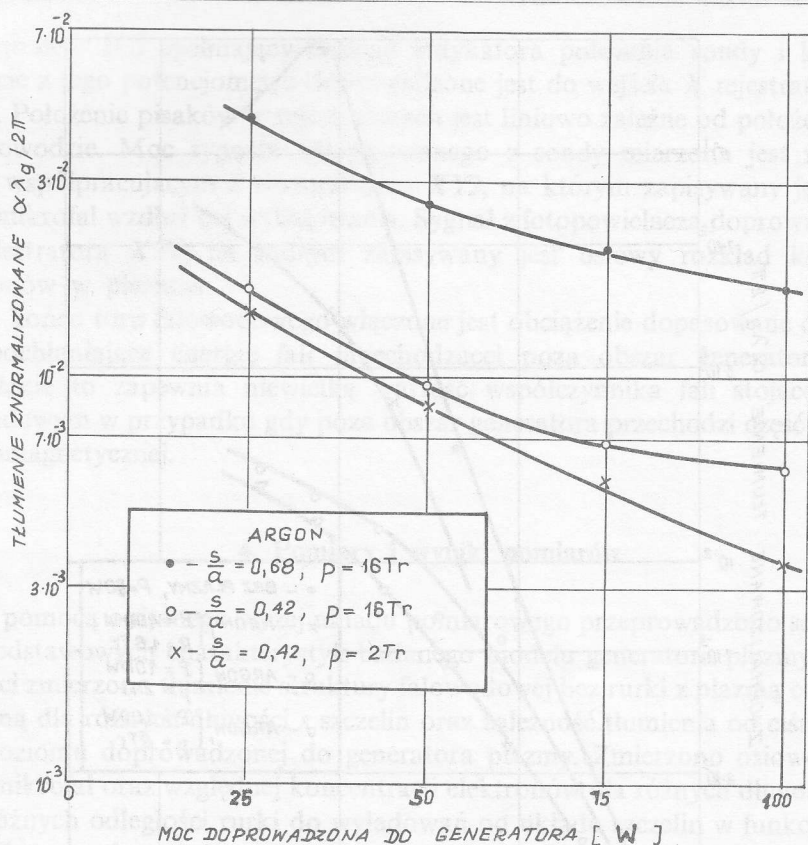
Na rysunku 3 przedstawiono wyniki pomiarów tłumienia fali elektromagnetycznej w opisywanym generatorze w funkcji długości szczelin, w przypadku braku plazmy oraz w obecności plazmy w rurce do wyładowań. Na wykresie tym s/a jest znormalizowaną długością szczelin, gdzie a oznacza szerokość falowodu, a $\alpha\lambda_g/2\pi$ – znormalizowane tłumienie, przy czym λ_g to długość fali w falowodzie; P jest mocą mikrofal w jednostkach umownych, doprowadzoną do generatora plazmy, a p – ciśnieniem gazu do wyładowań. Jak widać z przedstawionego wykresu, tłumienie fali rośnie ze wzrostem długości szczelin, przy czym jest ono największe przy braku plazmy w rurce do wyładowań, a najmniejsze dla wyładowania w argonie. Dla tych



Rys. 3. Znormalizowane tłumienie fali elektromagnetycznej w funkcji znormalizowanej długości szczelin

samych warunków wyładowania koncentracja elektronów w argonie osiąga wartość większą niż w neonie, ze względu na niższy potencjał jonizacji atomów argonu w porównaniu z potencjałem jonizacji atomów neonu. Z tego faktu oraz z omawianego wykresu, na którym widać, że tłumienie fali dla wyładowania w neonie jest większe niż dla wyładowania w argonie wynika, że koncentracja elektronów ma dość istotny wpływ na własności opisywanego tu generatora plazmy.

Wpływ koncentracji elektronów w plazmie na tłumienie fali jest wyraźnie widoczny na rysunku 4, który przedstawia zależność tłumienia fali od mocy mikrofal doprowadzonej do generatora. Ze wzrostem mocy doprowadzonej do generatora rośnie koncentracja elektronów, a tłumienie fali maleje. Obserwowane zjawisko można wytłumaczyć wspomnianym wcześniej wpływem kolumny plazmy na pole indukcyjne struktury szczelinowej.

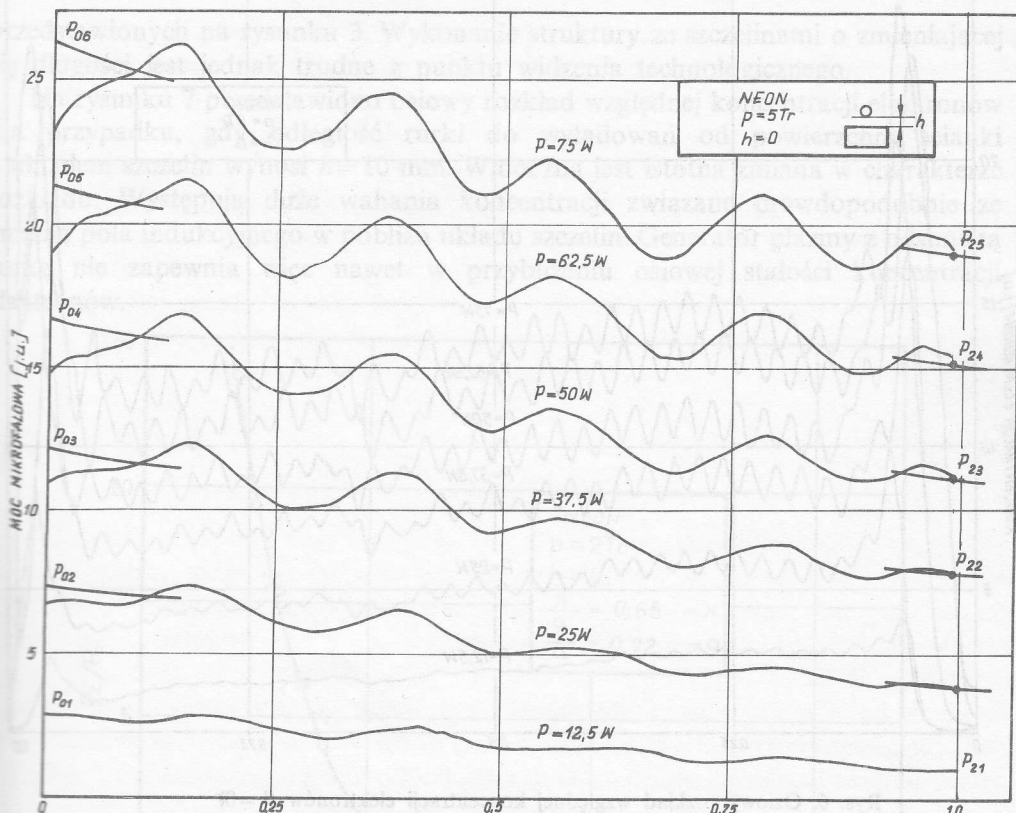


Rys. 4. Znormalizowane tłumienie fali elektromagnetycznej w funkcji mocy doprowadzonej do generatora plazmy

Na rysunku 5 przedstawiono przykład zarejestrowanych na rejestratorze osiowych rozkładów mocy mikrofal dla różnych poziomów mocy doprowadzonej do generatora. Poziomy te zaznaczone są dla poszczególnych krzywych. Na krzywych tych zaznaczone są również początkowe P_0 i końcowe P_1 poziomy mocy mikrofal. Występujące tu wahania mocy spowodowane są falą wsteczną w torze falowodowym pojawiającą się wskutek odbić energii w strukturze szczelinowej oraz wskutek niedoskonałego dopasowania obciążenia dużej mocy do toru falowodowego.

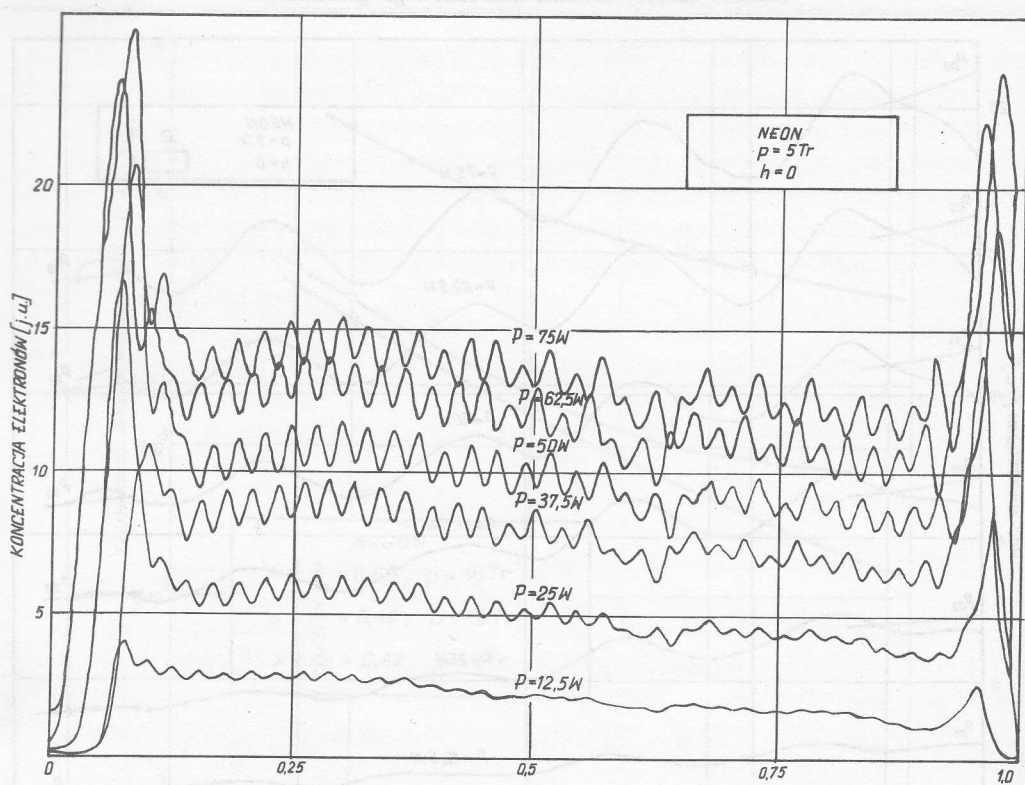
Przykład zarejestrowanych osiowych rozkładów względnej koncentracji elektronów dla tych samych warunków przedstawiono na rysunku 6. Są to rozkłady otrzymane dla przypadku, gdy rurka do wyładowań przylega do ścianki falowodu z układem szczelin ($h=0$).

Jak wspomniano wcześniej, miarą względnej koncentracji elektronów jest natężenie światła emitowanego przez plazmę. Osiowe rozkłady względnej koncentracji elektronów otrzymano rejestrując przy użyciu kolimatora, światłowodu oraz fotopowielacza osiowe rozkłady natężenia światła emitowanego przez plazmę. Światło wpadające do umieszczonego nad rurką do wyładowań kolimatora jest superpozycją światła pochodzącego bezpośrednio z plazmy oraz światła odbitego od przegród

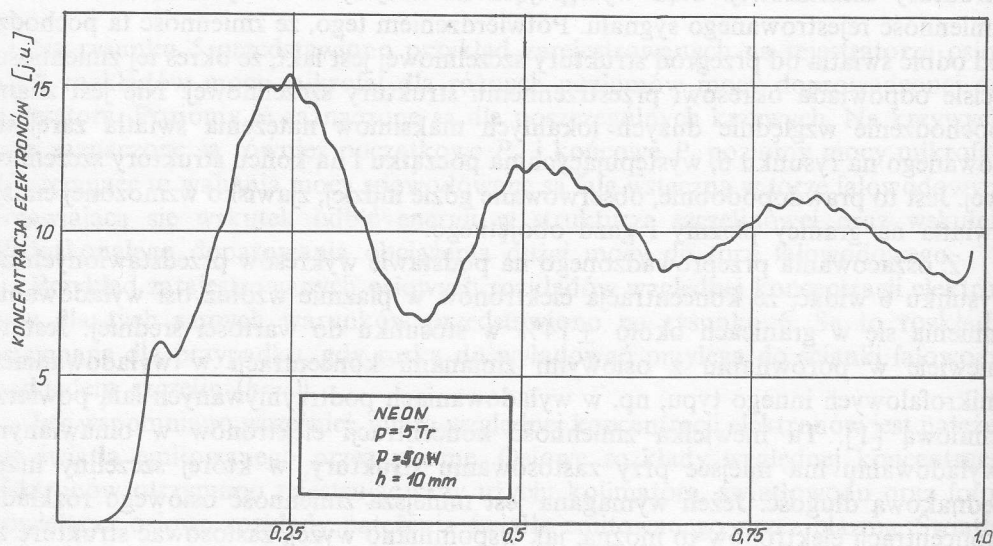
Rys. 5. Osiowy rozkład mocy mikrofal ($h=0$)

struktury szczelinowej. Stąd występująca na krzywych na rysunku 6 okresowa zmienność rejestrowanego sygnału. Potwierdzeniem tego, że zmienność ta pochodzi od odbić światła od przegród struktury szczelinowej jest fakt, że okres tej zmienności ściśle odpowiada okresowi przestrzennemu struktury szczelinowej. Nie jest znane pochodzenie względnie dużych lokalnych maksimum natężenia światła zarejestrowanego na rysunku 6, występujących na początku i na końcu struktury szczelinowej. Jest to prawdopodobnie, obserwowane gdzie indziej, zjawisko wzmożonej emisji światła na granicy plazmy i gazu obojętnego.

Z oszacowania przeprowadzonego na podstawie wykresów przedstawionych na rysunku 6 widać, że koncentracja elektronów w plazmie wzdłuż osi wyładowania zmienia się w granicach około $\pm 14\%$ w stosunku do wartości średniej. Jest to niewiele w porównaniu z osiowymi zmianami koncentracji w wyładowaniach mikrofalowych innego typu, np. w wyładowaniach podtrzymywanych falą powierzchniową [1]. Ta niewielka zmienność koncentracji elektronów w omawianym wyładowaniu ma miejsce przy zastosowaniu struktury, w której szczeliny mają jednakową długość. Jeżeli wymagana jest mniejsza zmienność osiowego rozkładu koncentracji elektronów to można, jak wspomniano wyżej, zastosować strukturę ze szczelinami o zmieniającej się długości, przy czym długości szczelin s mogą być wyznaczone ze znajomości funkcji $\alpha(z)$ oraz zmierzonych charakterystyk tłumienia



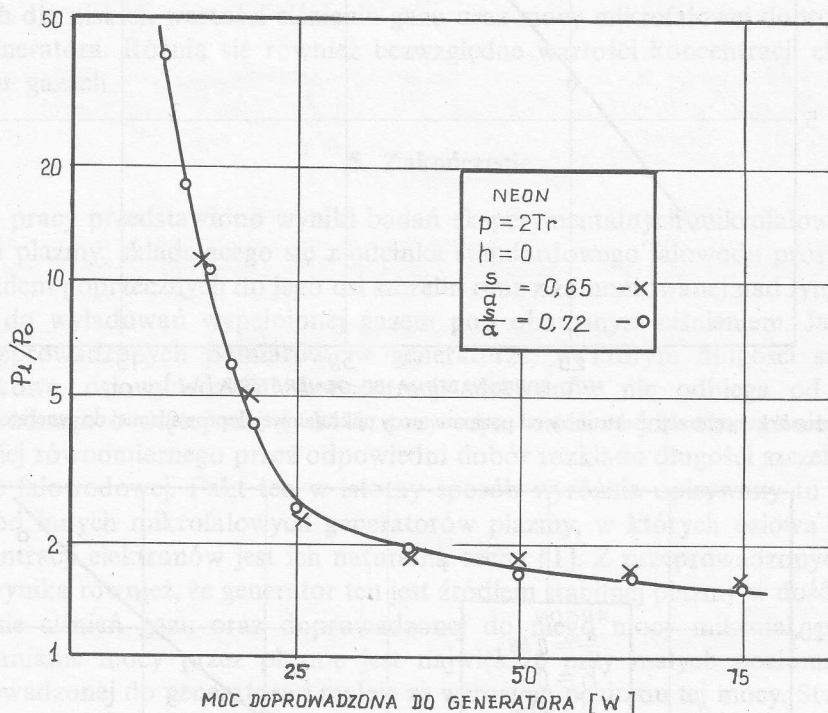
Rys. 6. Osiowy rozkład względnej koncentracji elektronów ($h=0$)



Rys. 7. Osiowy rozkład względnej koncentracji elektronów ($h=10 \text{ mm}$)

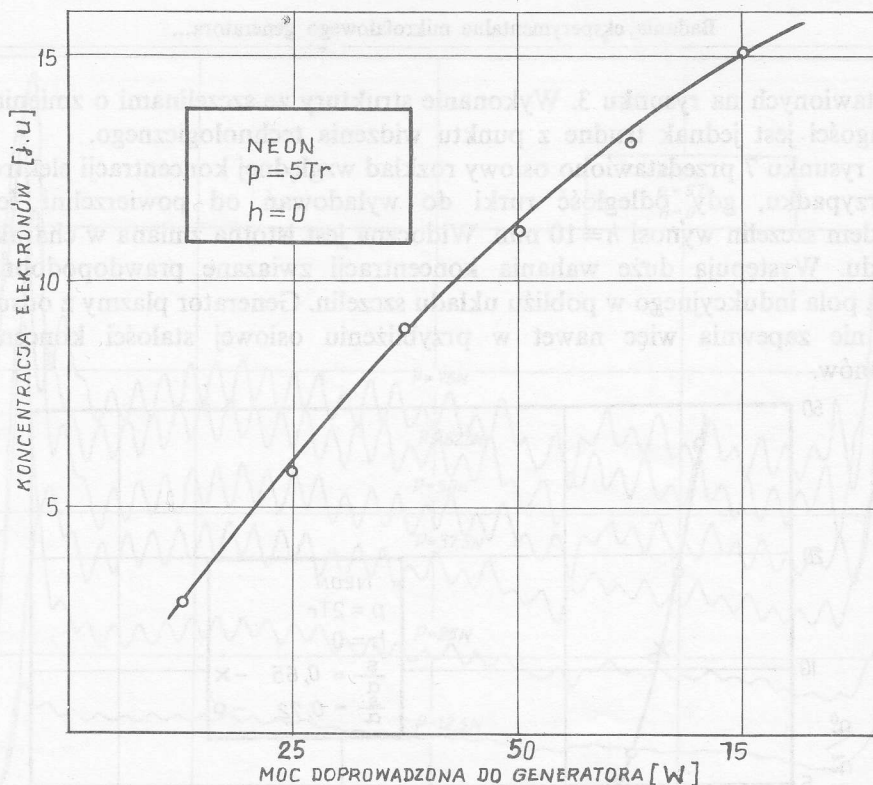
przedstawionych na rysunku 3. Wykonanie struktury ze szczelinami o zmieniającej się długości jest jednak trudne z punktu widzenia technologicznego.

Na rysunku 7 przedstawiono osiowy rozkład względnej koncentracji elektronów dla przypadku, gdy odległość rurki do wyładowań od powierzchni ścianki z układem szczelin wynosi $h = 10$ mm. Widoczna jest istotna zmiana w charakterze rozkładu. Występują duże wahania koncentracji związane prawdopodobnie ze zmianą pola indukcyjnego w pobliżu układu szczelin. Generator plazmy z odsuniętą rurką nie zapewnia więc nawet w przybliżeniu osiowej stałości koncentracji elektronów.

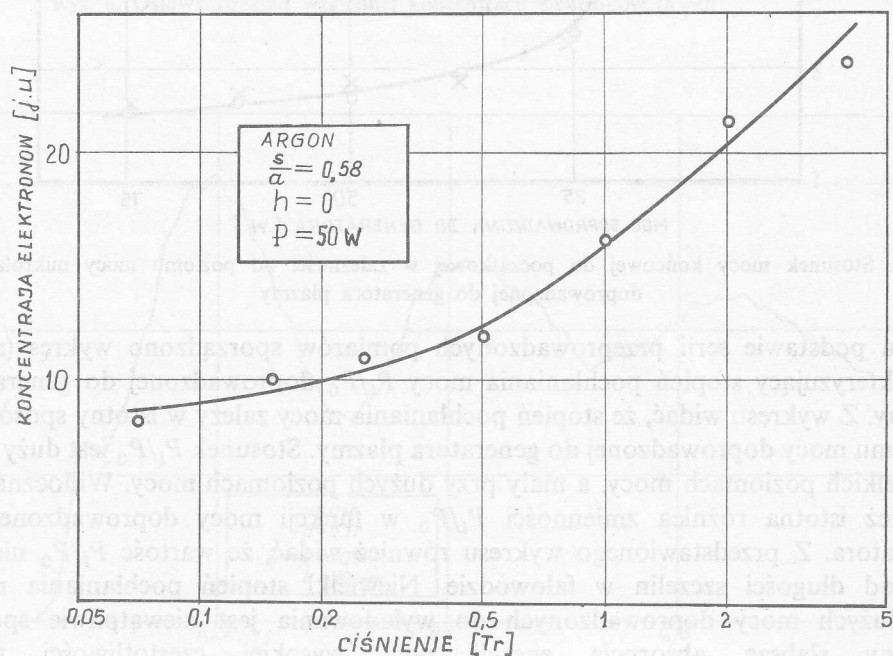


Rys. 8. Stosunek mocy końcowej do początkowej w zależności od poziomu mocy mikrofalowej doprowadzonej do generatora plazmy

Na podstawie serii przeprowadzonych pomiarów sporządzono wykres (rys.8) charakteryzujący stopień pochłaniania mocy P_i/P_0 doprowadzonej do generatora plazmy. Z wykresu widać, że stopień pochłaniania mocy zależy w istotny sposób od poziomu mocy doprowadzonej do generatora plazmy. Stosunek P_i/P_0 jest duży przy niewielkich poziomach mocy, a mały przy dużych poziomach mocy. Widoczna jest również istotna różnica zmienności P_i/P_0 w funkcji mocy doprowadzonej do generatora. Z przedstawionego wykresu również widać, że wartość P_i/P_0 nie zależy od długości szczelin w falowodzie. Niewielki stopień pochłaniania mocy dla dużych mocy doprowadzonych do wyładowania jest niewątpliwie spowodowany słabszą absorpcją energii pola wysokiej częstotliwości przez plazmę ze wzrostem koncentracji elektronów w plazmie. W trakcie pomiarów



Rys. 9. Zależność koncentracji elektronów od poziomu mocy mikrofalowej doprowadzonej do generatora plazmy



Rys. 10. Zależność koncentracji elektronów od ciśnienia gazu

charakterystyk generatora stwierdzono również oczywiste zjawisko skracania się kolumny plazmy dla małych poziomów mocy doprowadzonej do generatora.

Na rysunku 9 przedstawiono zależność względnej koncentracji elektronów od poziomu mocy doprowadzonej do generatora w wybranym przekroju wyładowania, a na rysunku 10 zależność koncentracji elektronów od ciśnienia gazu w rurce do wyładowań.

Pomiary charakterystyk doświadczalnego generatora przeprowadzono dla wyładowań w neonie oraz argonie i nie stwierdzono istotnych różnic w opisywanych tu charakterystykach. Obserwowano jedynie różnice wartości tłumienia fali elektromagnetycznej, oraz różnice dotyczące stabilności wyładowań w wymienionych gazach dla niskich wartości ciśnienia gazu oraz mocy mikrofalowej doprowadzonej do generatora. Różnią się również bezwzględne wartości koncentracji elektronów w obu gazach.

5. Zakończenie

W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych mikrofalowego generatora plazmy, składającego się z odcinka standardowego falowodu prostokątnego z układem poprzecznych do jego osi szczelin oraz z zamontowanej nad tym układem rurki do wyładowań wypełnionej gazem pod obniżonym ciśnieniem. Jak wynika z przeprowadzonych pomiarów, w generatorze, w którym długości szczelin są jednakowe, osiowy rozkład koncentracji elektronów nie odbiega od rozkładu jednorodnego o więcej niż $\pm 14\%$, przy czym możliwe jest otrzymanie rozkładu bardziej równomiernego przez odpowiedni dobór rozkładu długości szczelin w strukturze falowodowej. Fakt ten w istotny sposób wyróżnia opisywany tu generator spośród innych mikrofalowych generatorów plazmy, w których osiowa niestalość koncentracji elektronów jest ich naturalną cechą [1]. Z przeprowadzonych pomiarów wynika również, że generator ten jest źródłem stabilnej plazmy w dość szerokim zakresie ciśnień gazu oraz doprowadzonej do niego mocy mikrofal, przy czym pochłanianie mocy przez plazmę jest największe przy małych poziomach mocy doprowadzonej do generatora i maleje ze wzrostem poziomu tej mocy. Stwierdzono również, że najbardziej równomierny osiowy rozkład koncentracji elektronów osiąga się gdy rurka do wyładowań przylega bezpośrednio do układu szczelin w falowodzie.

Autorzy bardzo dziękują Koledze Zbigniewowi Feilowi za duży wkład pracy w przygotowanie elementów aparatury oraz stanowiska pomiarowego.

Praca wpłynęła do Redakcji w październiku 1987 r.

Literatura

- [1] Z. Zakrzewski, *Ciągłe wyładowanie mikrofalowe w rozrzedzonym gazie*. Zesz. Nauk. IMP PAN nr 159/1077/83, Gdańsk 1983.
- [2] Z. Zakrzewski, M. Moisan, *Synthesis of microwave leaky wave structures capable of sustaining long axially uniform plasma columns*. (w druku).
- [3] R. F. Hyneman, *Closely-spaced transverse slots in rectangular waveguide*. IRE Trans. on Antennas and Propagation, October 1959 pp. 335-342.

Experimental Investigations of a Microwave Generator of Plasma Column with Axially Uniform Electron Density

Summary

A measuring system is described and results are given from experimental investigations of waveguide model of microwave generator of plasma column with axially uniform electron density. Examples of axial microwave power distribution, electron density, power absorption degree for various condition of discharge, and the relationship between the electron density, the gas pressure and power supplied to the generator are presented.

Экспериментальное исследование микроволнового генератора плазменной колонны с аксиально однородной концентрацией электронов

Резюме

В работе представлены описание измерительной системы и результаты экспериментальных исследований модели волноводного микроволнового генератора плазменной колонны с аксиально однородной концентрацией электронов. Представлены примеры осевых распределений мощности микроволн, концентрации электронов, а также зависимость концентрации электронов от давления газа и мощности подводимой в генератор.