

## Układ chłodzenia elektrod w wieloelektrodowym źródle wzbudzenia plazmy mikrofalowej

Przedmiotem wynalazku jest układ chłodzenia elektrod w wieloelektrodowym źródle wzbudzenia plazmy mikrofalowej, przeznaczony do intensyfikacji chłodzenia pojemnościowych źródeł wzbudzenia plazmy mikrofalowej stosowanych w różnych technikach analitycznych, zwłaszcza w optycznej spektrometrii emisyjnej i spektrometrii mas.

Źródła wzbudzenia plazmy mikrofalowej są stosowane w różnych technikach analitycznych do wzbudzenia próbki analitycznej podawanej do strefy plazmy. Z uwagi na wysoką temperaturę plazmy, elektrody stosowane w pojemnościowych źródłach wzbudzenia, zwane także antenami, mogą powierzchniowo osiągać wysokie wartości temperatury związane z przewodnictwem cieplnym i radiacją plazmy. Przy przekroczeniu pewnej krytycznej gęstości mocy dostarczanej do jednej elektrody, w zależności od wyżej wymienionych czynników pojawiają się w widmie spektralnym linie analityczne związane z materiałem elektrody, a przy dalszym wzroście gęstości mocy elektroda może nawet ulec zniszczeniu. Opisane procesy ograniczają takie istotne parametry źródła spektralnego jak gęstość elektronowa i temperatury wzbudzenia. Aby móc stosować odpowiednio wysokie parametry źródła niezbędne jest intensywne chłodzenie elektrod.

W typowych mikrofalowych źródłach wzbudzenia, w których wnęka mikrofalowa jest zespolona z generatorem energii mikrofalowej o częstotliwości 2,45 GHz, do chłodzenia wnęki stosuje się instalacje z gazem chłodzącym lub płynem nie absorbującym promienia mikrofalowego. Takim ośrodkiem może być także wodny aerozol, gdyż absorpcja promieniowania przez cząstki wody rozpylone w gazie jest niewielka. W

przypadku zastosowania wody, instalacja chłodząca musi być zlokalizowana poza strefą koncentracji linii sił pola mikrofalowego, na przykład w ściankach wnęki mikrofalowej lub na obwodzie rurki wyładowczej, aby uniknąć nadmiernej absorpcji promieniowania mikrofalowego przez wodę.

Z opisu patentowego US 5568015 znane jest mikrofalowe źródło wzbudzenia plazmy, w którym wnęka generatora plazmy mikrofalowej wykonana jest z dielektryka, a czynnik chłodzący jest doprowadzany zasadniczo spiralnym kanałem pozostającym w kontakcie ze ścianką wnęki i ośrodkiem zewnętrznym nie absorbującym mikrofal. Układ ten umożliwia zastosowanie wody jako czynnika chłodzącego dzięki odpowiedniemu usytuowaniu spiralnego kanału względem linii sił pola mikrofalowego. Rozwiązanie to jest przeznaczone dla źródła wzbudzenia plazmy z pojedynczą elektrodą.

Ze zgłoszenia patentowego PL 385484 znany jest sposób i układ nagrzewania plazmy w wielofazowym układzie elektrodowym. Sposób polega na tym, że co najmniej trzy fale elektromagnetyczne doprowadza się co najmniej trzema identycznymi elementami generatora plazmy do punktów rozmieszczonych symetrycznie na okręgu wokół generowanej plazmy. Wskutek przepływu gazu przez środek okręgu plazma przyjmuje kształt toroidu, którego środkiem podaje się cząstki z zewnątrz. Układ wyposażony jest w najmniej jeden generator mocy i co najmniej trzy identyczne elektrody rozmieszczone symetrycznie na okręgu, w środku którego jest umieszczona rurka wyładowcza generatora plazmy usytuowana prostopadle do układu elektrod. W rurce wyładowczej jest umieszczona rurka doprowadzająca cząstki zewnętrzne do miejsca wzbudzenia plazmy. Stosowane w tego typu źródłach wzbudzenia elektrody mają zwykle długość  $1/4 L$ , albo równą nieparzystej wielokrotności tej długości, gdzie  $L$  jest długością fali mikrofalowej generowanej przez źródło mocy mikrofalowej, przy czym długość elektrody jest mierzona od jej wierzchołka do punktu doprowadzenia mocy. W przypadku gdy punkt doprowadzenia mocy jest przyłączony do elektrody w maksimum fali mikrofalowej, elektroda może mieć także długość  $3/4 L$  lub wielokrotność tej długości.

Wieloelektrodowe źródła wzbudzenia ze sprzężeniem pojemnościowym umożliwiają wytworzenie wirującego pola mikrofalowego i uzyskanie w miejscu wzbudzenia stabilnej plazmy toroidalnej zarówno z gazów szlachetnych, takich jak argon, hel, neon, jak też z takich gazów cząsteczkowych jak wodór, azot tlen, lub z powietrze atmosferyczne. Po wytworzeniu plazmy mikrofalowej temperatura elektrod rośnie w zależności od szybkości

przepływu gazu roboczego przez źródło wzbudzenia oraz materiału i konstrukcji elektrod, a także od trybu pracy zasilania elektrod, impulsowego lub ciągłego. Do chłodzenia elektrod stosuje się powietrze doprowadzane do elektrod przez kanały w korpusie ekranującym elektrody. Pomimo chłodzenia powietrzem, przy dłuższej pracy źródła wzbudzenia elektrody mogą powierzchniowo osiągać wysokie wartości temperatury związane z przewodnictwem cieplnym i radiacją plazmy.

Celem wynalazku jest opracowanie układu chłodzenia przeznaczonego do intensywnego chłodzenia wieloelektrodowego źródła wzbudzenia plazmy mikrofalowej, w którym energia z generatora wysokiej częstotliwości dostarczana jest do strumienia plazmy przez sprzężenie pojemnościowe.

Układ chłodzenia elektrod w wieloelektrodowym źródle wzbudzenia plazmy mikrofalowej, złożony z instalacji doprowadzającej i odprowadzającej czynnik chłodzący do elektrod, przy czym źródło wzbudzenia składa się z co najmniej trzech identycznych elektrod rozmieszczonych symetrycznie względem osi rurki centralnej doprowadzającej próbkę analityczną, zaś elektrody są zamocowane w odizolowanym od nich elektrycznie metalowym korpusie tak, że wierzchołki elektrod są umieszczone przy wylocie rurki centralnej, a ich końce są zwarte w punkcie doprowadzenia mocy ze złączami mikrofalowym osadzonymi w korpusie na przedłużeniu osi wzdłużnej elektrod, które to złącza są połączone ze źródłem mocy mikrofalowej, zwłaszcza o częstotliwości 2,45 GHz, przy czym długość każdej elektrody mierzona od jej wierzchołka do punktu doprowadzenia mocy, wynosi  $1/4 L$ , gdzie  $L$  jest długością fali mikrofalowej generowanej przez źródło mocy mikrofalowej, według wynalazku charakteryzuje się tym, że każda elektroda ma wydrążoną podłużną komorę przepływową na czynnik chłodzący połączoną z metalowymi rurkami bocznymi, pierwszą i drugą, doprowadzającą i odprowadzającą czynnik chłodzący, przy czym zewnętrzne końce tych rurek są zwarte elektrycznie z korpusem, zaś długość każdej rurki bocznej wewnątrz metalowego korpusu, mierzona od miejsca połączenia z elektrodą do ścianki zewnętrznej korpusu  $10$ , wynosi  $1/4 L$ . Ponadto na całej tej długości rurki boczne są odizolowane od korpusu, zaś na zewnątrz korpusu są połączone korzystnie z króćcami, wlotowym i wylotowym.

Inny układ chłodzenia elektrod w wieloelektrodowym źródle wzbudzenia plazmy mikrofalowej, złożony z instalacji doprowadzającej i odprowadzającej czynnik chłodzący do elektrod, przy czym źródło wzbudzenia składa się z co najmniej trzech identycznych elektrod rozmieszczonych symetrycznie względem osi rurki centralnej doprowadzającej próbkę analityczną, zaś elektrody są zamocowane w odizolowanym od nich elektrycznie metalowym korpusie tak, że wierzchołki elektrod są umieszczone przy wylocie rurki centralnej, a ich końce są przedłużone do ścianki zewnętrznej na obwodzie korpusu, a ponadto elektrody są zwarte na obwodzie w punkcie doprowadzenia mocy ze złączami mikrofalowym osadzonymi w korpusie, które to złącza są połączone ze źródłem mocy mikrofalowej, zwłaszcza o częstotliwości 2,45 GHz, przy czym długość każdej elektrody, mierzona od jej wierzchołka do jej końca przy ścianie zewnętrznej na obwodzie korpusu, wynosi  $3/4 L$ , gdzie  $L$  jest długością fali mikrofalowej generowanej przez źródło mocy mikrofalowej, według wynalazku charakteryzuje się tym, że każda elektroda ma wydrążoną podłużną komorę przepływową na czynnik chłodzący z umieszczoną w środku rurką wewnętrzną połączoną z usytuowanym na zewnątrz elektrody króćcem wlotowym, zaś króciec wylotowy jest przyłączony do kanału wewnętrznego w komorze przepływowej utworzonego wokół rurki wewnętrznej, które to króćce są usytuowane na zewnątrz metalowego korpusu, przy czym koniec każdej elektrody jest zwarty z korpusem, odległość punktu doprowadzenia mocy od wierzchołka wynosi  $1/2 L$ , a odległość tego punktu od złącza mikrofalowego osadzonego w korpusie wynosi  $1/4 L$ .

Układ chłodzenia według wynalazku praktycznie nie absorbuje promieniowania mikrofalowego, co umożliwia użycie różnych cieczy chłodzących, w tym wody, jako czynnika chłodzącego do intensywnego chłodzenia elektrod w wieloelektrodowym źródle wzbudzenia plazmy bez strat mocy mikrofalowej.

W przypadku wieloelektrodowego źródła wzbudzenia ze złączem mikrofalowym umieszczonym w osi wzdłużnej elektrody, do środka elektrody nie można wprowadzić wody chłodzącej za pomocą rurki wykonanej z dielektryka, bowiem dielektryk jako materiał stratny sam będzie absorbował część mocy i zacznie się nagrzewać. Spowoduje to straty mocy dostarczanej do plazmy. Aby tego uniknąć, rurki boczne wykonane z metalu powinny mieć długość  $1/4$  długości  $L$  fali mikrofalowej lub jej wielokrotność. W przypadku zastosowania elektrody i rurek bocznych o długości ćwierćfalowej, powstaje

znany z techniki mikrofalowej układ zwany "sękiem" lub podporą ćwierćfalową, który dla mikrofal stanowi impedancję równoległą o wartości nieskończonej.

W przypadku wieloelektrodowego źródła wzbudzenia ze złączem mikrofalowym umieszczonym prostopadle lub pod kątem do elektrody, można wprowadzić wodę chłodzącą przez króćce usytuowane na zewnątrz korpusu. Rurka wewnętrzna może być wykonana z dowolnego materiału, gdyż fala mikrofalowa propaguje się po powierzchni elektrody. W przypadku zastosowania elektrody o długości  $3/4 L$ , jej koniec powinien być usytuowany przy ścianie zewnętrznej korpusu, a punkt doprowadzenia mocy powinien być zwarty z elektrodą w odległości ćwierćfalowej od końca elektrody i od złącza mikrofalowego. W tak wykonanym układzie chłodzenia podczas pracy elektrod powstaje podpora ćwierćfalowa, co umożliwi chłodzenie elektrod wodą bez strat mocy mikrofalowej.

Przedmiot wynalazku jest objaśniony w przykładzie wykonania na rysunku, na którym fig.1 przedstawia wieloelektrodowe źródło wzbudzenia plazmy mikrofalowej w widoku z góry, fig. 2 przedstawia źródło wzbudzenia z fig. 1 w przekroju osiowym Z-Z, fig. 3 przedstawia inną postać wykonania układu chłodzenia w wieloelektrodowym źródle wzbudzenia w przekroju osiowym, a fig. 4 przedstawia inne wieloelektrodowe źródło wzbudzenia plazmy mikrofalowej z układem chłodzenia elektrody w przekroju osiowym.

Jak przedstawiono na fig. 1 i fig. 2, wieloelektrodowe źródło wzbudzenia plazmy mikrofalowej składa się z co najmniej trzech identycznych elektrod 7 rozmieszczonych symetrycznie względem osi rurki centralnej 9 doprowadzającej próbkę analityczną w stanie gazowym, w postaci mieszaniny gazów, lub w postaci aerozolu z gazem roboczym. Elektrody 7 są zamocowane w odizolowanym od nich elektrycznie metalowym korpusie 1 tak, że wierzchołki A elektrod 7 są umieszczone przy wylocie rurki centralnej 9, a ich końce są zwarte w punkcie B doprowadzenia mocy ze złączami mikrofalowym 6 osadzonymi w korpusie 10 na przedłużeniu osi wzdłużnej elektrod 7. Złącza mikrofalowe są połączone ze źródłem mocy mikrofalowej. Przesunięcie fazowe między elektrodami umożliwia uzyskanie wirującego pola mikrofalowego i wytworzenie stabilnej plazmy toroidalnej w strefie wzbudzenia plazmy pomiędzy wierzchołkami elektrod 7. Rurka centralna 9 jest umieszczona wewnątrz rurki wyladowczej 8 usytuowanej koncentrycznie wewnątrz korpusu 10 za pośrednictwem uszczelki pierścieniowej 11. Przez rurkę wyladowczą 8 może być doprowadzone powietrze, gaz roboczy lub gaz osłonowy. W razie

braku rurki wyładowczej 8, jej funkcję może pełnić cylindryczny kanał utworzony przez wewnętrzne ścianki korpusu 10. Rurka centralna 9 i rurka wyładowcza 8 są wykonane z materiału dielektrycznego, zwykle z ceramiki lub kwarcu. Metalowy korpus 10 służy do zamocowania i ekranowania elektrod 7. W skład układu chłodzenia elektrod 7 wchodzi komora przepływowa wydrążona wewnątrz każdej elektrody 7 oraz rurki doprowadzające i odprowadzające czynnik chłodzący.

Jak przedstawiono na fig. 2, układ chłodzenia każdej elektrody 7 składa się z metalowych rurek bocznych 1, 2, pierwszej i drugiej, doprowadzającej i odprowadzającej czynnik chłodzący do komory przepływowej wydrążonej w elektrodzie 7. Rurki boczne 1, 2 są przyłączone do elektrody 7 asymetrycznie po przeciwnych stronach jej obwodu, w różnej odległości od jej wierzchołka A, a zewnętrzne końce D, F rurek, usytuowane przy ścianie zewnętrznej na obwodzie cylindrycznego korpusu 10 są zwarte elektrycznie z korpusem 10. Długość każdej elektrody 7, mierzona od jej wierzchołka A do punktu B doprowadzenia mocy, wynosi  $1/4 L$ , gdzie  $L$  jest długością fali mikrofalowej generowanej przez źródło mocy mikrofalowej. Długość każdej rurki bocznej 1, 2 wewnątrz metalowego korpusu 10, mierzona od miejsca połączenia z elektrodą 7 do ścianki zewnętrznej korpusu 10 jest równa długości elektrody 7, przy czym na całej tej długości rurki boczne 1, 2 są odizolowane od korpusu 10. Końce rurek mogą być zaopatrzone w elementy dystansowe.

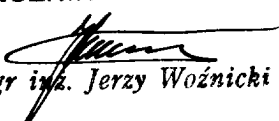
Rurki boczne 1, 2 są połączone na zewnątrz korpusu 10 z króćcami 3, 4, wlotowym i wylotowym. Obie rurki są umieszczone po przeciwnych stronach osi wzdłużnej elektrody 7 i odgięte ukośnie w kierunku ścianki zewnętrznej na obwodzie cylindrycznego korpusu 10. Długość pierwszej rurki bocznej 1 jest wyznaczona przez odległość pomiędzy jej końcem zewnętrznym D a końcem wewnętrznym E przyłączonym trwale do elektrody 7. Długość drugiej rurki bocznej 2 jest wyznaczona przez odległość pomiędzy jej końcem zewnętrznym F a końcem wewnętrznym C przyłączonym trwale do elektrody 7. W przypadku przedłużenia rurki wyładowczej 8 powyżej strefy wzbudzenia plazmy, w jej ściankach bocznych są wykonane otwory na elektrody 7.

Układ chłodzenia przedstawiony na fig. 3 różni się tym, że rurki boczne 1, 2 są przyłączone do elektrody 7 symetrycznie, w tej samej odległości od wierzchołka A. Obie rurki są usytuowane prostopadle do osi wzdłużnej elektrody 7, a ich przeciwległe końce zewnętrzne F, D, doprowadzone do ścianek czołowych korpusu 10, są zwarte elektrycznie

z korpusem 10. Przedstawiona na fig. 3 rurka wyladowcza 8 jest usytuowana poniżej strefy wzbudzenia plazmy i poniżej krawędzi otworu wylotowego w rurce centralnej 9.

Jak przedstawiono na fig. 4, inne wieloelektrodowe źródło wzbudzenia plazmy mikrofalowej składa się z co najmniej trzech identycznych elektrod 7' rozmieszczonych symetrycznie względem osi rurki centralnej 9 doprowadzającej próbkę analityczną. Elektrody 7' są zamocowane w odizolowanym od nich elektrycznie metalowym korpusie 10' tak, że wierzchołki A elektrod 7' są umieszczone przy wylocie rurki centralnej 9 a ich końce są przedłużone do ścianki zewnętrznej na obwodzie korpusu 10'. Ponadto elektrody 7' są zwarte na obwodzie w punkcie B doprowadzenia mocy ze złączami mikrofalowymi 6 osadzonymi w korpusie 10' prostopadle lub pod innym kątem do osi wzdłużnej każdej elektrody 7'. Punkt przyłączenia G złącza mikrofalowego 6 jest usytuowany przy wewnętrznej ścianie czołowej korpusu 10'. Złącza mikrofalowe 6 są połączone ze źródłem mocy mikrofalowej poprzez doprowadzenie mocy 5. Układ chłodzenia składa się z instalacji doprowadzającej i odprowadzającej czynnik chłodzący do elektrod 7'. Każda elektroda 7' ma wydrążoną podłużną komorę przepływową na czynnik chłodzący z umieszczoną w środku rurką wewnętrzną 12 połączoną z usytuowanym na zewnątrz elektrody króćcem wlotowym 3, zaś króciec wylotowy 4 jest przyłączony do kanału wewnętrznego w komorze przepływowej utworzonego wokół rurki wewnętrznej 12. Króćce 3, 4 są usytuowane na zewnątrz metalowego korpusu 10'. Komora przepływowa na końcu elektrod 7' jest zamknięta obsadą H. Długość każdej elektrody 7', mierzona od jej wierzchołka A do jej końca przy ścianie zewnętrznej na obwodzie korpusu 10', wynosi  $\frac{3}{4}L$ , gdzie L jest długością fali mikrofalowej generowanej przez źródło mocy mikrofalowej, odległość punktu B doprowadzenia mocy od wierzchołka A wynosi  $\frac{1}{2}L$ , a odległość elektrody 7' od złącza mikrofalowego 6 osadzonego w korpusie 10' wynosi  $\frac{1}{4}L$ . Końce elektrod 7' są zwarte z korpusem 10', korzystnie poprzez metalową obsadę H. W przypadku zastosowania źródła mocy mikrofalowej o częstotliwości 2,45 GHz, długość L fali mikrofalowej wynosi około 12 cm, a długość elektrody 7' wynosi około 9 cm. Rurka centralna 9 może być umieszczona wewnątrz rurki wyladowczej 8 doprowadzającej powietrze, gaz roboczy lub gaz osłonowy. Obie te rurki są wykonane z materiału dielektrycznego, zwykle z ceramiki lub kwarcu. Rurka wewnętrzna 12 umieszczona wewnątrz elektrody 7' może być wykonana z metalu lub materiału dielektrycznego.

RZECZNIK PATENTOWY

  
mgr inż. Jerzy Woźnicki