

Sposób i układ nagrzewania plazmy

Przedmiotem wynalazku jest sposób i układy nagrzewania plazmy, która jest zdolna do przyjmowania próbek przeznaczonych do plazmowej obróbki chemicznej lub termicznej, wzbudzanych lub jonizowanych dla celów analizy emisyjnej lub analizy masowej, pochodzących z zewnętrznego układu podawania próbek: podajnika, parownika, rozpylacza itp.

Problem penetracji plazmy cząstkami materiałów proszkowych rozwiązany został w znanych plazmotronach-pistoletach do natryskiwania plazmowego, w które są wyposażane w usytuowaną prostopadle względem dyszy plazmotronu, rurkę do wstrzykiwania cząstek przyspieszonych w dodatkowym strumieniu gazu. Moce plazmotronów do natryskiwania plazmowego zazwyczaj przekraczają poziom 10-20kW dzięki czemu plazma nie gaśnie nawet wtedy, gdy wstrzykiwane cząstki zakłócają przepływ prądu anodowego znajdując się na drodze pomiędzy katodą i anodą plazmotronu.

Plazmą o z góry przewidzianym i wcześniej wyznaczonym obszarze, przez który nie przepływa prąd elektryczny, jest znana z techniki wielkich częstotliwości plazma sprzężona indukcyjnie ICP (Inductively Coupled Plasma). Plazma ta jest wytwarzana w układzie, w którym generator jest dołączony do kilkuzwojowego induktora, który może stanowić obciążenie wzmacniacza liniowego lub element obwodu oscylatora mocy, zaś wewnątrz induktora umieszczona jest rura kwarcowa z przepływającym gazem. W układzie tym wyładowanie zachodzi bez udziału jakichkolwiek elektrod i posiada charakterystyczny naskórkowy rozkład prądów wielkiej częstotliwości (w.cz) z zerem na osi plazmy. Materiał do plazmy ICP podawany jest wzdłuż osi plazmy, czyli właśnie tam, gdzie indukowany prąd ma wartość zerową. Przepływ gazu i materiału wzdłuż osi plazmy indukcyjnej powoduje powstanie poosiowo-usytuowanego chłodniejszego kanału. Z uwagi na ten chłodniejszy kanał i rozkład prądu o plazmie indukcyjnej mówi się jako o plazmie toroidalnej. Dzięki toroidalnemu kształtowi wyładowania spektrometry ICP z plazmą sprzężoną indukcyjnie przy mocach poniżej 1kW gwarantują wysoki stosunek sygnału do szumu pozwalając na oznaczanie śladów pierwiastków. Łatwość wprowadzania materiałów do plazmy sprawia także, że urządzenia plazmy indukcyjnej o mocach powyżej 1MW, są z powodzeniem stosowane

w przemyśle.

Próby stworzenia korzystnych warunków wprowadzania próbek są podejmowane także w innych źródłach plazmy. Znane są doniesienia nt. uzyskiwania toroidalnego kształtu plazmy w źródłach mikrofalowych. W pracy: M.R. Hammer'a, *A magnetically excited microwave plasma source for atomic emission spectroscopy with performance approaching that of the inductively coupled plasma*, *Spectrochimica Acta Part B* 2008 vol. 63, s. 456-464, rurka z plazmą umieszczona została w falowodzie prostokątnym w obszarze maksimum pola magnetycznego, prostopadle do węższej ścianki falowodu. Jednak tak uzyskana plazma nie może być krótsza od połowy fali (ok. 6 cm), co stanowi niekorzystne ograniczenie gęstości energii. Generowanie bardziej skupionego wyładowania w polu magnetycznym mikrofal nie jest proste. Gdyby podjąć próbę zastąpienia falowodu induktorem, czyli gdyby spróbować powtórzyć warunki ICP, to przy grubości ścianek rurki wyładowczej rzędu 1 mm przy minimalnej praktycznej średnicy rurki ok. 6 mm, obwód jednego zwoju induktora musiałby mieć długość prawie 30mm. Taki jednozwojowy induktor nie może być uznany za skupiony, gdyż przy typowej częstotliwości grzewczej 2, 45GHz długość 30 mm stanowi już ćwiartkę długości fali.

Spośród innych znanych źródeł plazmy, charakteryzujących się wysoką stabilnością wyładowania trzeba tutaj przypomnieć palnik współosiowy, w którym plazma jest wytwarzana jako przedłużenie przewodu środkowego w linii współosiowej. Różne konstrukcje palników współosiowych znane są z literatury drugiej połowy XX wieku. Przy niskich mocach plazmę zainicjowaną na końcu linii współosiowej stosuje się jako źródło wzbudzenia dla celów analitycznych. Okazało się bowiem, że sprzężenie plazmy z przewodem środkowym nie wymaga emisji elektronów z metalu i nawet bez stosowania chłodzenia sprzężenie z plazmą ma charakter pojemnościowy. Dlatego tak generowaną plazmę zalicza się do plazm typu CMP (*Capacitive Microwave Plasma*). Plazma generowana na końcu elektrody znalazła szerokie zastosowanie w procesach CVD (*Chemical Vapour Deposition*) m.in. do wytwarzania sztucznych diamentów

Zastosowanie jednoelektrodowych palników współosiowych do celów analityki chemicznej jest generalnie ograniczone, gdyż toroidalny kształt plazmy CMP uzyskuje się jedynie w pobliżu powierzchni elektrody tam, gdzie cząstki są wprowadzane do

plazmy przez specjalnie ukształtowaną dyszę.

Znane są też ze stosowania, układy bez-elektrodowych wnęk plazmowych zwanych MIP (Microwave Induced Plasma) stanowiących strojone wnęki rezonansowe wyposażone w rurkę wyladowczą wewnątrz której wytwarzane jest wysokie natężenie pola dostateczne do zainicjowania i utrzymania plazmy, zwykle stabilizowanej przepływem gazu poruszającym się symetrycznym strumieniem, którego jedna składowa jest skierowana wzdłuż rurki. Próby uzyskania toroidalnego kształtu plazmy w różnych układach MIP są liczne, zwłaszcza dotycząc uzyskania plazmy helowej [Jankowski i inni, Proc. Winter Conference on Plasma Spectroscopy 2008].

Problemy wprowadzania do plazmy materiałów stałych w postaci proszków lub granulatów, ciekłych w postaci cieczy lub aerozoli, czy też par lub gazów o różnym składzie chemicznym, które mają być poddawane analizie lub obróbce termicznej i chemicznej, w plazmie o z góry zadanej kształcie, są w znacznym stopniu nierozwiązane zwłaszcza w przypadku tzw. plazmy zderzeniowej. W warunkach plazmy zderzeniowej wymiana energii plazmy z otoczeniem powoduje, że zamiast plazmy wypełniającej naczynie reaktora lub rurę wyladowczą, mamy zwykle do czynienia z pojedynczym skupionym plazmoidem, który nie wypełnia całego obszaru i do utrzymania jego stabilnego położenia jest potrzebny specjalnie ukształtowany wymuszony przepływ gazu. Podawanie materiałów próbek czy reagentów do takiej plazmy jest zawsze trudne, gdyż zakłóca jej stan termodynamiczny i prowadzi do powstawania niestabilności lub takiej zmiany geometrii plazmy, że wymiana energii z zewnętrznymi cząstkami staje się mało efektywna. Dzieje się to w ramach tzw. samo-uzgadnianego układu plazma-pole, w których plazma obdarzana obcymi cząstkami przyjmuje stan minimum energii, co powoduje jednoczesną zmianę rozkładu pola elektromagnetycznego, a co za tym idzie zmienia przestrzenny rozkład gęstości plazmy, czyli zmienia jej geometrię lub położenie. Ponieważ plazma jest ośrodkiem o gęstości energii znacznie wyższej od otoczenia i dopóki nie uformuje się w niej co najmniej jeden kanał o obniżonej temperaturze, do którego można wprowadzać cząstki z zewnątrz, dopóty wszelkie materiały omijają wyladowanie, są od niego odbijane lub są roznoszone po jego peryferiach, co stanowi trudność dostarczania jakichkolwiek materiałów do plazmy. Ponadto ustalony stan minimum energii układu, ustala się samoistnie, jednak zwykle wtedy, gdy cząstki nie penetrują plazmy w dostatecznym

stopniu.

Jednym z kierunków poszukiwań rozwiązania tego problemu, są miniaturowe źródła wzbudzenia znajdujące zastosowanie w spektroskopii. W przypadku spektroskopii mas źródło plazmy ma za zadanie jonizację próbki. W źródłach dla analityki chemicznej ważny jest stosunek sygnału analitycznego do szumu (S/N). Wysoki stosunek S/N zwykle daje się uzyskać wtedy, gdy plazma posiada własności tzw. plazmy toroidalnej, która jest stabilna i posiada chłodniejszy kanał przez który wraz z gazem może być podawany materiał próbki, który następnie podlega wzbudzeniu wskutek wymiany energii cząstek znajdujących się w kanale z otaczającą go gorętszą plazmą.

Drugim kierunkiem poszukiwań są źródła plazmy większej mocy przydatne do prowadzenia procesów technologicznych, w których materiał poddawany procesowi musi się do plazmy skutecznie dostać i ulec tam nagrzanemu i przereagowaniu. W tych przypadkach nie maksymalizuje się stosunku S/N, lecz sprawność energetyczną. Chodzi o to aby ilość przekazywanej do procesu energii była zbliżona do całkowitej energii wydzielanej w plazmie. Ostatecznie jednak ocenie podlega wydatek energii dostarczanej do plazmy mierzony w stosunku do masy produktu wyjściowego i z uwzględnieniem jego ceny rynkowej.

Z przytoczonej analizy znanych rozwiązań wynika, że realizacja skupionego induktora, który mógłby być użyty do zrealizowania źródła plazmy sprzężonej indukcyjnie ICP, na mikrofalach stanowi nierozwiązany problem techniczny. Technicznym celem realizowanym dzięki zastosowaniu wynalazku jest generowanie takiego układu plazmy składającej się z jednego lub większej liczby wyładowań plazmowych, w którym konfiguracja geometryczna oraz rozptyw prądów pozwalają na zaistnienie, co najmniej jednego kanału, zwłaszcza toroidalnego, przeznaczonego do wprowadzania cząstek z zewnątrz bez zgaszenia plazmy, czy zaburzania jej stabilności.

Istota sposobu nagrzewania plazmy, według wynalazku, 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, przy czym w geometrycznym środku okręgu wskutek przepływu gazu prostopadle przez środek okręgu, tworzy się chłodniejszy kanał plazmy, w wyniku czego plazma przyjmuje kształt toroidu, którego

środkiem podaje się cząstki z zewnątrz.

Korzystnie, co najmniej trzy szybkozmienne fale elektromagnetyczne doprowadza się jednocześnie do co najmniej trzech elementów generatora plazmy.

Korzystnym jest gdy, co najmniej trzy szybkozmienne fale elektromagnetyczne doprowadza się sekwencyjnie do co najmniej trzech elementów generatora plazmy w postaci elementów sprzęgających albo do co najmniej trzech elementów generatora plazmy w postaci elektrod, przy czym okres powtarzania sekwencji jest współmierny z czasem życia plazmy.

Korzystnie, w generatorze mocy generuje się jedną szybkozmienną falę elektromagnetyczną, którą w dzielniku mocy dzieli się na co najmniej trzy identyczne szybkozmienne fale elektromagnetyczne.

Korzystne jest to, że w jednym generatorze mocy generuje się jedną szybkozmienną falę elektromagnetyczną, którą w dzielniku mocy dzieli się na co najmniej trzy identyczne szybkozmienne fale elektromagnetyczne, po czym w przesuwnikach fazy przesuwają się ich fazy tych fal o kąt równy ilorazowi kąta pełnego przez ilość wydzielonych fal elektromagnetycznych.

Korzystne jest również to, że co najmniej trzy szybkozmienne fale elektromagnetyczne doprowadza się jednocześnie do co najmniej trzech elementów generatora plazmy w postaci elektrod symetrycznie zanurzonych w plazmie i rozmieszczonych na okręgu usytuowanym na peryferiach generowanej plazmy.

Korzystnie, szybkozmienne fale elektromagnetyczne doprowadza się jednocześnie do co najmniej trzech elementów generatora plazmy w postaci elementów sprzęgających rozmieszczonych wzdłuż co najmniej jednej linii, wzdłuż której emituje się jednorodne współfazowe pole elektromagnetyczne nagrzewające plazmę.

Korzystnie, szybkozmienne fale elektromagnetyczne doprowadza się jednocześnie do co najmniej trzech elementów generatora plazmy w postaci elektrod zanurzonych w plazmie i rozmieszczonych wzdłuż co najmniej jednej linii, wzdłuż której emituje się jednorodne współfazowe pole elektromagnetyczne nagrzewające plazmę.

Korzystnie, co najmniej trzy szybkozmienne fale elektromagnetyczne doprowadza się do co najmniej trzech elementów generatora plazmy, rozmieszczonych symetrycznie na okręgu, z których każdy jest indywidualnym źródłem plazmy

wyposażonym w elektrody, po czym co najmniej trzy tak wygenerowane plazmy łączą się w jedną większą plazmę, w wyniku czego, przyjmuje ona kształt toroidu, którego środkiem podaje się cząstki z zewnątrz.

Układ do nagrzewania plazmy według wynalazku, ma co najmniej jeden generator mocy połączony z co najmniej trzema identycznymi i symetrycznie na okręgu rozmieszczonymi elementami generatora plazmy.

Korzystnie, elementami generatora plazmy są elementy sprzęgające rozmieszczone symetrycznie względem osi generowanej plazmy lub elektrody zanurzone w plazmie i rozmieszczone symetrycznie względem osi generowanej plazmy.

Elektrody korzystnie, są elektrodami paskowymi pozostającymi w kontakcie z plazmą.

Korzystnym jest również, gdy elementami generatora plazmy są indywidualne źródła plazmy rozmieszczone symetrycznie względem osi generowanej plazmy.

Układ korzystnie, ma jeden generator mocy, który połączony jest poprzez rozdzielacz mocy z co najmniej trzema elementami generatora plazmy, korzystnie poprzez co najmniej dwa przesuwniki fazy.

Korzystnym jest, gdy przesuwniki fazy stanowią odcinki przewodnic falowych.

Korzystnie, jest również gdy generatory mocy są generatorami wysokonapięciowymi.

Korzystne jest to, że pomiędzy dzielnik mocy i co najmniej trzy elementy generatora plazmy włączone są elementy odwracalne hybrydowe i/lub nieodwracalne pasywne i/lub czynne, korzystnie wzmacniacze mocy. Korzystnie elementem odwracalnym hybrydowym jest sprzęgacz mocy z obciążeniem dopasowanym, elementem nieodwracalnym pasywnym jest izolator ferrytowy lub cyrkulator pracujący w układzie izolatora z obciążeniem dopasowanym, a elementem czynnym jest wzmacniacz mocy.

Korzystnie, obwód separujący stanowi człon separujący lub układ kluczujący korzystnie zawierający przełączniki.

Korzystnym jest to, że elementy generatora plazmy rozmieszczone są symetrycznie wzdłuż co najmniej jednej linii.

Główną zaletą techniczną wynalazku, jest otrzymywanie plazmy toroidalnej przez co rozwiązuje problem techniczny występujący przy stosowaniu plazm

wyładowań elektrycznych, zwłaszcza dotyczący plazm pobudzanych energią wielkich częstotliwości lub mikrofal i generowanych przy wyższych niż próżnia, ciśnieniach i rozwiązuje problem wprowadzania do plazmy materiałów stałych (proszków, granulatów) lub ciekłych (cieczy, aerozoli), które mają być poddawane analizie lub obróbce termicznej i chemicznej a także uzyskiwanie wyładowań o zadanym kształcie. Sposób pozwala też na uzyskanie bardzo stabilnej plazmy już przy mocach 200 W i to w helu, który jako gaz plazmo-twórczy jest szczególnie kapryśny. Potwierdziły to eksperymenty z trzema elektrodami wolframowymi przy częstotliwości 2450MHz (mikrofałe) a także przy częstotliwości 27MHz (fale w.cz. zakresu fal krótkich) Sposobem według wynalazku, generuje się plazmę, która jest zasilana z wielu źródeł mocy w taki sposób aby uzyskać korzystny toroidalny kształt plazmy, która dzięki temu może przyjmować obce cząstki z zewnątrz.

Dostatecznie symetryczne nagrzewanie plazmy toroidalnej zapewnia składowa magnetyczna pola mikrofalowego wytwarzana za pomocą wielo-zwoju cylindrycznego lub o kształcie lejka, którego długość liniowa może być większa od ćwierci długości fali, dzięki symetrycznie po obwodzie rozłożonemu zasilaniu z kolejnych generatorów. Zastosowanie generatorów prądów szybkozmiennych utworzonych poprzez podział mocy, które są połączone z plazmą za pomocą kontaktów pojemnościowych metal-plazma w bardzo małej wzajemnej odległości, pozwala na wytworzenie plazmoidów zlewających się w jedną plazmę o kształcie toroidalnym.

Sposób pozwala na też na otrzymanie plazmy toroidalnej o własnościach zbliżonych do plazmy ICP, a wytwarzanej za pomocą pola mikrofalowego, którego składowa magnetyczna jest indukowana współfazowo w symetrycznie względem osi plazmy rozmieszczonych obszarach poprzez ułożenie w tych obszarach dostatecznie krótkich względem długości fali odcinków przewodów-pętli z prądem, oddzielonych od plazmy barierą dielektryczną, które są podłączone do generatorów mocy mikrofalowej, zwłaszcza zsynchronizowanych ze sobą co do fazy. W tym przypadku zastosowane zostały niepełne zwoje wykonane z przewodu, którego całkowita długość równa np. 10 mm, które zostały rozmieszczone symetrycznie ponieważ pojedynczy niepełny zwój, nie mógł by wytworzyć pola magnetycznego o dostatecznym stopniu symetrii.

Układ nagrzewania plazmy pozwala także na uzyskanie innej plazmy, zwłaszcza generowanej w polu mikrofalowym w celu uzyskania określonej na przykład płaskiej

lub liniowej geometrii wyładowania, w której jeden wymiar plazmy jest porównywalny z długością fali mikrofalowej. W takim przypadku uzyskiwanie plazmy bez niekontrolowanych obszarów przegrzań (ang. hot spots) i niedogrzań jest problematyczne. Zastosowanie podziału mocy, izolatorów ferrytowych i płaszczyzn minikondensatorów o wymiarach dużo mniejszych od długości fali pozwala, wykorzystując wynalazek, na zbudowanie układów, w których elektrody podzielone na elementarne płytki, zapewniają generowanie jednorodnego pola plazmowego, niezależnego dla każdej płytki i nie zniekształcanego falami odbitymi, które są pochłaniane w izolatorach.

W nowym układzie następuje skuteczne oddziaływanie plazmy z materiałem próbki, która jest dostarczana do obszaru plazmy bez jej wygaszenia i zakłócenia stabilności nagrzania oraz pozwala na uzyskanie dostatecznej energii wymaganej w procesie fizykochemicznym. Układ nadaje się do miniaturyzacji w postaci układu scalonego z trzema paskowymi liniami (strip-lines) schodzącymi się do wspólnej dziurki wydrążonej w centralnym punkcie płytki szafirowego podłoża tak, że wyładowanie powstające w trójkącie pomiędzy narożami przykrywa dziurkę, do której doprowadzane są reagenty. Wyładowanie może być tutaj także bezelektrodowe wówczas, gdy schodzące się paskowe linie pokrywa się cienką płytką kwarcową, ewentualnie z dziurką pośrodku.

Nowy układ nadaje się, w szczególności do podgrzewania plazmy stosowanej zarówno do obróbki materiałów, jak również w spektroskopii i do analizy masowej. W takiej nowo wytworzonej wielofazowej plazmie, rozpływ gęstości prądów następuje pomiędzy elementy generatora plazmy. Ponadto pole to rotuje, czyli jakby otacza plazmę z każdej strony, zawsze pozostawiając wolny środek, co ma szczególnie duże znaczenie, w źródłach wzbudzenia dla spektroskopii emisyjnej, w której próbki podawane są środkiem i mocno podgrzewane w plazmie, a następnie poza plazmą świecą swoim widmem emisyjnym, podobnie zachowują się próbki podczas dostarczania jonów do analizy masowej. Rozwiązanie to, w odpowiedniej skali, nadaje się również do niszczenia dioksyn, rozbijania niepożądanych związków, czy też syntezy chemicznej. Sposobem według wynalazku uzyskuje się pożądane rozproszenie lub znaczne skupienie energii w punkcie z jednoczesną rotacją pola. Przykładowo dla fali TEM skupianie pola może zachodzić między przewodami odległymi o przykładowo

0,1 mm, co w innych układach współmiernych z długością fali nie jest zwykle możliwe gdyż minimalne odległości pomiędzy minimum a maksimum fali przy częstotliwościach 915MHz i 2450MHz (czyli w obrębie tzw. grzewczych pasm mikrofalowych) wynoszą po kilka centymetrów.

Przedmioty wynalazku są objaśnione w przykładach realizacji i na rysunku, na którym fig. 1 przedstawia schemat blokowy układu nagrzewania plazmy z przekrojem przez generator plazmy i jego widokiem w rzucie aksonometrycznym, fig. 2 - generator plazmy zasilany czterema pętlami magnetycznymi w widoku aksonometrycznym i z góry, fig. 3 - generator plazmy zasilany sześcioma pętlami magnetycznymi, fig. 4 - generator plazmy z układem pętli magnetycznych w postaci pięciozwoju, fig. 5 - generator plazmy z układem pętli magnetycznych w postaci cztero-zwoju zasilanego liniami paskowymi naniesionymi na wspólne podłoże, fig. 6 - generator plazmy z układem pętli magnetycznych w postaci trójzwoju w kształcie leja, fig. 7 - generator plazmy z czterema elektrodami zasilanymi z dzielnika usytuowanego wewnątrz linii współosiowej, fig. 8 - generator plazmy z trzema elektrodami zasilanymi z dzielnika usytuowanego wewnątrz linii współosiowej, fig. 9 - układ nagrzewania plazmy z dziesięcioma elektrodami do wywarzania pola wzdłuż plazmy wzbudzanej w laserze gazowym, fig. 10 - układ nagrzewania plazmy z czterdziestoma elektrodami do wywarzania pola z dużą powierzchnią plazmy jednorodnej, fig. 11 - generator plazmy z czterema współosiowymi palnikami wyposażonymi w elektrody, fig. 12 - generator plazmy z trzema przewodnicami falowymi w postaci linii paskowych, fig. 12a - generator plazmy zawierający dwa zestawy przesunięte względem siebie wzdłuż rury wyładowczej z trzema elektrodami usytuowanymi planarnie każdy, fig. 13 - generator plazmy z trzema elementami sprzęgającymi, fig. 14 - generator plazmy z czterema elektrodami usytuowanymi planarnie, fig. 15 - schemat blokowy układu nagrzewania plazmy zasilany generatorami o różnych częstotliwościach, fig. 16 - schemat blokowy układu nagrzewania plazmy zasilany jednym generatorem z podziałem mocy, fig. 17a - schemat blokowy układu nagrzewania plazmy wyposażony w człon separujący, fig. 17b - schemat blokowy układu nagrzewania plazmy wyposażony w układ kluczujący, a fig. 18 - schemat blokowy układu nagrzewania tzw. zimnej plazmy wyposażony w przełącznik palcowy zasilający sześć elektrod wysokonapięciowych.

Przykład 1

Sposób nagrzewania plazmy polega na tym, że w generatorze G o częstotliwości 915MHz generuje się falę elektromagnetyczną o mocy $P = 900\text{W}$, którą w dzielniku mocy S dzieli się na trzy identyczne fale elektromagnetyczne, każda o mocy mikrofalowej równej wartości mocy $P_1 = P_2 = P_3 = 300\text{W}$, wynikającej z podziału całkowitej mocy P, przy czym fale te doprowadza się z zachowaniem kąta $\varphi_1, \varphi_2 = \varphi_1$ i $\varphi_3 = \varphi_1$ fazowego za pomocą linii współosiowych składających się z ekranu i przewodu środkowego, do złącza trzech podobnych linii współosiowych będących elementami generatora plazmy, aż do punktów rozmieszczonych symetrycznie na okręgu wokół generowanej plazmy PL. W osi symetrii rozgałęzienia trzech linii generatora plazmy, wykonany jest otwór, przez który przeprowadzona jest rurka wyladowcza RW. Zwarte do ekranu odcinki przewodów środkowych trzech linii są połączone do trzech wyjść dzielnika mocy S i zasilane równymi, współfazowymi porcjami mocy $P_1, P_2 = P_1, P_3 = P_1$, co wywołuje współfazowy przepływ prądu przez przewody środkowe przebiegające przy ścianie rurki wyladowczej RW i powstanie wewnątrz rurki współfazowego pola magnetycznego o orientacji wektora indukcji magnetycznej wzdłuż osi rurki RW, w wyniku czego w geometrycznym środku okręgu wskutek przepływu gazu prostopadle przez środek okręgu, tworzy się chłodniejszy kanał plazmy PL, natomiast plazma PL przyjmuje kształt toroidu, którego środkiem podaje się próbki cząstek z zewnątrz.

Przykład 2

Sposób nagrzewania przebiega jak w przykładzie pierwszym z tą różnicą, że moc P wygenerowaną w generatorze mocy G_1 , w dzielniku mocy S dzieli się na cztery identyczne fale elektromagnetyczne o jednakowych mocach $P_1, P_2 = P_1, P_3 = P_1$ i $P_4 = P_1$, po czym w czterech przesuwnikach fazy PF_1, PF_2, PF_3 i PF_4 , przesuwają się ich fazy o kąty $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ i φ_4 , każdy równy 90° odpowiadający ilorazowi kąta pełnego przez ilość wydzielonych fal elektromagnetycznych. Następnie wygenerowane szybkozmienne fale elektromagnetyczne doprowadza się do czterech elementów generatora plazmy w postaci elementów sprzęgających CE_1, CE_2, CE_3, CE_4 , które są rozmieszczone symetrycznie i generują plazmę PL.

Przykład 3

Sposób nagrzewania przebiega jak w przykładzie pierwszym z tą różnicą, że trzy szybkozmienne fale elektromagnetyczne doprowadza się sekwencyjnie do trzech elementów generatora plazmy w postaci elektrod E_1, E_2, E_3 , przy czym okres

powtarzania sekwencji jest współmierny z czasem życia plazmy PL. Ponadto elektrody E_1 , E_2 , E_3 są symetrycznie zanurzone w plazmie PL i rozmieszczone na okręgu usytuowanym na peryferiach generowanej plazmy PL.

Przykład 4

Sposób nagrzewania plazmy polega na tym, że w generatorze mocy G generuje się szybkozmienną falę elektromagnetyczną, którą w dzielniku mocy S dzieli się na dziesięć identycznych fal elektromagnetycznych, które następnie doprowadza się jednocześnie do dziesięciu elementów generatora plazmy w postaci elementów sprzęgających CE_1 , CE_2 , CE_3 , ..., CE_{10} rozmieszczonych wzdłuż jednej linii, wzdłuż której emituje się jednorodne współfazowe pole elektromagnetyczne nagrzewające plazmę PL. Sposób ten jest szczególnie przydatny do stosowania w laserze gazowym.

Przykład 5

Sposób nagrzewania przebiega jak w przykładzie czwartym z tą różnicą, że szybkozmiennne fale elektromagnetyczne doprowadza się jednocześnie do dziesięciu elektrod E_1 , E_2 , E_3 , ..., E_{10} zanurzonych w plazmie PL i rozmieszczonych wzdłuż jednej linii, wzdłuż której emituje się jednorodne współfazowe pole elektromagnetyczne nagrzewające plazmę PL.

Przykład 6

Sposób nagrzewania przebiega jak w przykładzie czwartym z tą różnicą, że szybkozmiennne fale elektromagnetyczne doprowadza się jednocześnie do czterdziestu elementów sprzęgających CE_1 , CE_2 , CE_3 , ..., CE_{40} rozmieszczonych symetrycznie po osiem wzdłuż pięciu linii prostych względem siebie równoległych, a emituje się jednorodne współfazowe pole elektromagnetyczne i wywarza pole o dużej powierzchni z plazmą PL jednorodną.

Przykład 7

Sposób nagrzewania przebiega jak w przykładzie pierwszym z tą różnicą, że cztery szybkozmiennne fale elektromagnetyczne doprowadza się do czterech elektrod E_1 , E_2 , E_3 i E_4 , indywidualnych źródeł plazmy P_1 , P_2 , P_3 , P_4 , po czym cztery tak wygenerowane plazmy łączą się w jedną większą plazmę PL, w wyniku czego, przyjmuje ona kształt toroidu, którego środkiem podaje się cząstki z zewnątrz.

Przykład 8

Układ nagrzewania plazmy, ma generator G_1 o częstotliwości 915MHz o mocy

$P = 900\text{W}$, połączony z wejściem dzielnika mocy S dzielącego moc P z generatora G na trzy identyczne fale elektromagnetyczne każda o mocy mikrofalowej P_1, P_2, P_3 równej 300 W . Trzy wyjścia dzielnika mocy S połączone są za pomocą linii współosiowych składających się z ekranu i przewodu środkowego do złącza trzech podobnych linii współosiowych, przy czym przewody środkowe każdej z linii współosiowej są połączone wewnątrz linii z ekranem w punktach wzajemnego połączenia kolejnych ekranów tych trzech linii. W osi symetrii rozgałęzienia trzech linii wykonany jest otwór, przez który przeprowadzona jest rurka wyładowcza RW . Zwarte do ekranu odcinki przewodów środkowych trzech linii są połączone do trzech wyjść dzielnika mocy S i zasilane równymi, współfazowymi o fazowych kątach $\varphi_1, \varphi_2 = \varphi_1$ i $\varphi_3 = \varphi_1$, z porcjami mocy P_1, P_2, P_3 , co wywołuje współfazowy przepływ prądu przez przewody środkowe przebiegające przy ścianie rurki wyładowczej RW i powstanie wewnątrz rurki RW współfazowego pola magnetycznego o orientacji wektora indukcji magnetycznej wzdłuż osi rurki RW , w wyniku czego tworzy się plazma PL , która przyjmuje kształt toroidu z chłodniejszym kanałem wytworzonym wskutek przepływu gazu. Środkiem toroidalnej plazmy PL podaje się próbki w postaci cząstek z zewnątrz.

Przykład 9

Układ nagrzewania plazmy wykonany jak w przykładzie ósmym z tą różnicą, że cztery równe wartości mocy mikrofalowej P_1, P_2, P_3, P_4 z czterech wyjść dzielnika mocy S połączonego torami z ekranem o przekroju prostokątnym, doprowadzane są do ścianki rurki wyładowczej RW . Zastosowanie torów z ekranem o przekroju prostokątnym ułatwia praktyczną realizację układu.

Przykład 10

Układ nagrzewania plazmy wykonany jak w przykładzie ósmym z tą różnicą, że sześć równych wartości mocy mikrofalowej $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6$ z sześciu wyjść dzielnika mocy S połączonego sześcioma liniami mikrofalowymi zasila współfazowo sześć pętli. Współosiowe linie mikrofalowe połączone są wspólnym ekranem, wewnątrz którego jest umieszczona rurka wyładowcza RW z plazmą PL toroidalną ułożoną wzdłuż osi rurki RW . Przewody środkowe linii mikrofalowych są maksymalnie zbliżone do rurki wyładowczej RW i tworzą pętle o płaszczyznach prostopadłych do osi rurki wyładowczej RW ponadto przewody te są zwarte do ekranu w miejscu dołączenia ekranu następnej linii współosiowej. Pętle są źródłami pola o dominującej składowej

wektora pola magnetycznego skierowanego wzdłuż osi plazmy PL.

Przykład 11

Układ nagrzewania plazmy ma generator plazmy z układem pętli magnetycznych w postaci pięciozwoju, do którego doprowadzanych jest pięć równych wartości mocy mikrofalowej z dzielnika mocy S. W układzie tym pobudzenie plazmy PL realizuje się za pomocą induktora o ułamkowej ilości zwojów usytuowanego wewnątrz ekranowanej linii współosiowej. Moc mikrofalowa P z generatora G poprzez gniazdo współosiowe jest dołączona do wydrążonego przewodu wewnętrznego, wewnątrz którego jest umieszczona rurka wyładowcza z plazmą PL wytwarzaną w argonie domieszkowanym próbką w postaci aerozolu wodnego. Na odcinku krótszym od $\frac{1}{4}$ długości fali, wydrążony przewód linii współosiowej jest pozbawiony części ścianki tak, że tworzy regularny pięciozwoj o wysokości równej $\frac{1}{4}$ obwodu wydrążonego przewodu. W miejscu przyłączenia pięciozwoju od strony zasilania mikrofalowego powstaje naturalnie uformowany dzielnik mocy S, który dzieli moc P na pięć równych części, które następnie są propagowane wzdłuż poszczególnych zwojów pięciozwoju o ułamkowej ilości zwojów. Każdy ze zwojów wytwarza pole magnetyczne sumujące się wewnątrz rurki wyładowczej RW, zbliżone rozkładem do pola skupionego induktora.

Przykład 12

Układ nagrzewania plazmy stanowi urządzenie do generowania plazmy ICP przy częstotliwości mikrofalowej 2450MHz, i jest wykonany jak w przykładzie jedenastym z tą różnicą, że cztery równe wartości mocy mikrofalowej P_1 , P_2 , P_3 , P_4 z czterech wyjść dzielnika mocy S, czterema torami paskowymi ułożonymi symetrycznie na okrągłym, ceramicznym podłożu dielektrycznym DI, kierowane są do czterech pasków metalu nawiniętego na kwarcową rurkę wyładowczą RW lub naniesionymi w postaci czterech pasków warstwy złota, na rurkę RW. Paski te tworzą czterozwoj, przy czym sumaryczna długość pojedynczego przewodu jest równa około $\frac{1}{2}$ długości fali (6 cm). Ponadto układ generatora plazmy jest obudowany ekranem EK.

Przykład 13

Układ nagrzewania plazmy wykonany jak w przykładzie jedenastym albo dwunastym z tą różnicą, że plazmę PL wytwarza się wewnątrz trójzwoju stanowiącego układ elektrod E_1 , E_2 i E_3 o kształcie spiralnego leja, za pomocą prądów z trzech

generatorów G_1 , G_2 i G_3 o przesuniętych częstotliwościach lub fazach. Korzystne jest zastosowanie mocy mikrofalowej P_1 , P_2 , P_3 o częstotliwości roboczej 2450MHz lub 915MHz. Cechą charakterystyczną takiej konfiguracji przewodów jest inicjacja wyładowania w miejscu zbliżenia elektrod E_1 , E_2 i E_3 oraz szybki około 10 m/s ruch plazmy PL w kierunku trzech źródeł zasilania. Za pomocą opisanego układu elektrod E_1 , E_2 i E_3 otrzymuje się też stabilne wyładowanie w argonie płynącym wewnątrz rurki wyładowczej RW kwarcowej o średnicy 10 mm usytuowanej na wspólnej osi ze spiralnym lejem.

Przykład 14

Układ nagrzewania plazmy, w którym generator plazmy ma cztery elektrody E_1 , E_2 , E_3 i E_4 zasilane mocą P z generatora mocy G poprzez dzielnik mocy S . Generator plazmy w tym układzie otoczony jest ekranem EK i stanowi układ czterech palników plazmowych, których elektrody E_1 , E_2 , E_3 i E_4 są rozmieszczone symetrycznie i równolegle do osi generowanej plazmy PL. Układ ten jest szczególnie przydatny do nagrzewania plazmy, w mieszaninie metanu i wodoru przy ciśnieniu roboczym 80 mbar i przepływie metanu 0,10 l/min oraz wodoru 2,5 l/min w obecności śladów pary wodnej.

Przykład 15

Układ nagrzewania plazmy, który stanowi wnęka CMP (Capacitive Microwave Plasma), wykonany jak w przykładzie czternastym z tą różnicą, że ma generator plazmy z trzema elektrodami E_1 , E_2 i E_3 wykonanymi z prasowanego wolframu spawalniczego o średnicy drutu 1,5 mm i zasilanymi z dzielnika mocy S usytuowanego wewnątrz linii współosiowej. Elektrody E_1 , E_2 i E_3 ustawione są w stos i na rozwartym końcu tworzą równoboczny trójkąt o boku 2,5 mm, osadzony u podstawy na metalowej wywiniętej rurce, która stanowi element toru współosiowego. Próbką przepływa rurką ceramiczną poprzez metalową rurkę, która jest wywinięta na zewnątrz na długości 27 mm i do której dochodzi energia z anteny A umocowanej w bocznej ścianie ekranu elektrycznego EK . W tej samej płaszczyźnie umocowany jest strojnik pojemnościowy TU służący do zestrojenia częstotliwości wnęki do rezonansu. Gaz roboczy hel podawany jest w ilości 300 ml/min, za pomocą stycznie do ekranu przymocowanej rurki o średnicy 5mm.

Przykład 16

Układ nagrzewania plazmy wykonany jak w przykładzie ósmym, z tą różnicą że generator plazmy ma dziesięć elektrod $E_1, E_2, E_3, \dots, E_{10}$ do nagrzewania plazmy PL, przy czym elektrody $E_1, E_2, E_3, \dots, E_{10}$ usytuowane są wzdłuż plazmy PL. Układ ten jest szczególnie przydatny do stosowania w laserze gazowym.

Przykład 17

Układ nagrzewania plazmy wykonany jak w przykładzie ósmym, z tą różnicą, że szybkozmienne fale elektromagnetyczne doprowadza się jednocześnie do czterdziestu elementów sprzęgających $CE_1, CE_2, CE_3, \dots, CE_{10}$ rozmieszczonych symetrycznie po osiem wzdłuż pięciu linii prostych względem siebie równoległych, i wytwarza jednorodne pole o dużej powierzchni nagrzewające plazmę PL.

Przykład 18

Układ nagrzewania plazmy o podwyższonej mocy, ma generator plazmy z czterema współosiowymi palnikami plazmowymi wyposażonymi w elektrody E_1, E_2, E_3, E_4 . Generator plazmy wykonany jest w postaci cylindrycznej rury reaktora plazmowego z radialnie do jego ściany umocowanymi czterema plazmowymi palnikami współosiowymi. Strumienie plazmy wytwarzane w każdym z palników są sumowane w kanale reaktora i poruszają się zgodnie z kierunkiem przepływu gazu roboczego, zaś próbka jest podawana za pomocą rurki umieszczonej na osi reaktora.

Przykład 19

Układ nagrzewania plazmy ma generator plazmy z trzema przewodnicami falowymi w postaci linii paskowych L_1, L_2, L_3 doprowadzającymi moc mikrofalową P_1, P_2, P_3 , naniesionymi na kołowe ceramiczne podłoże dielektryczne DI, na które od dołu naniesiona jest metalizacja ME, na podłożu umieszczona jest płytką kwarcowa PK, a nad nią ekran EK. Układ ten stanowi wnękę trójpaskową MIP.

Przykład 20

Układ nagrzewania plazmy, w którym generator plazmy ma sześć elektrod E_1, E_2, E_3, E_4, E_5 i E_6 zestawionych wzdłuż rury wyladowczej RW na dwóch piętrach po trzy elektrody E_1, E_2, E_3 na pierwszym piętrze i trzy elektrody E_4, E_5, E_6 na drugim. Elektrody E_1, E_2, E_3, E_4, E_5 i E_6 zasilane są mocą mikrofalową P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 i P_6 z przesunięciem kąta fazowego $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5$ i φ_6 . Układ ten w szczególności przeznaczony jest do plazmowego reformingu paliw. Atmosfera w węglowodorach jest redukcyjna i nie przeszkadza kontakt elektrod E_1, E_2, E_3, E_4, E_5 i E_6 z plazmą PL nawet

przy dużych (10-20kW) mocach w wyładowaniu. Zamiast elektrod E_1, E_2, E_3, E_4, E_5 i E_6 prętowych można tutaj użyć elektrod w kształcie spiral lejkowych.

Przykład 21

Układ nagrzewania plazmy ma generator plazmy z trzema elementami sprzęgającymi ES_1, ES_2, ES_3 doprowadzającymi moc mikrofalową P_1, P_2, P_3 symetrycznie z trzech stron plazmy PL. Układ ten jest układem trzyfazowym typu MIP.

Przykład 22

Układ nagrzewania plazmy ma generator plazmy z czterema elektrodami E_1, E_2, E_3, E_4 usytuowanymi planarnie, w którym prostopadle do układu elektrod E_1, E_2, E_3, E_4 umieszczona jest rurka podajnika próbek osadzona w rurce wyładowczej RW i od niej krótsza. Układ ten jest czterofazowym układem elektrodowym.

Przykład 23

Układ nagrzewania plazmy wykonany jak w przykładzie ósmym albo dziesiątym z tą różnicą, że ma $N = 6$ generatorów mocy $G_1, G_2, G_3, \dots, G_N$, połączonych poprzez $N = 6$ elementów nieodwracalnych pasywnych w postaci izolatorów ferrytowych $IS_1, IS_2, IS_3, \dots, IS_N$, z sześcioma identycznymi i symetrycznie na okręgu rozmieszczonymi elementami generatora plazmy.

Przykład 24

Układ nagrzewania plazmy wykonany jak w przykładzie ósmym albo dziesiątym z tą różnicą, że ma sześć generatorów mocy $G_1, G_2, G_3, \dots, G_6$ połączonych poprzez sześć elementów nieodwracalnych pasywnych w postaci cyrkulatorów $CI_1, CI_2, CI_3, \dots, CI_6$ pracujących w układzie izolatora, z sześcioma identycznymi i symetrycznie na okręgu rozmieszczonymi elementami generatora plazmy.

Przykład 25

Układ nagrzewania plazmy wykonany jak w przykładzie ósmym albo dziesiątym z tą różnicą, że cztery wyjścia dzielnika mocy S poprzez cztery przesuwniki fazy PF_1, PF_2, PF_3, PF_4 , połączone szeregowo z czterema cyrkulatorami CI_1, CI_2, CI_3, CI_4 pracującymi w układzie izolatora, połączone są z czterema identycznymi i symetrycznie na okręgu rozmieszczonymi elementami generatora plazmy, przy czym cztery cyrkulatory CI_1, CI_2, CI_3, CI_4 podłączone są za pomocą czterech linii współosiowych o takiej samej długości L_0 , z czterema elementami generatora plazmy zasilanymi mocą mikrofalową P_1, P_2, P_3, P_4 , z przesunięciem kąta fazowego $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$. Ponadto każdy

cyrkulator CI_1, CI_2, CI_3, CI_4 mikrofalowy jest wyposażony w takie samo obciążenie dopasowane Z_0 , zdolne do pochłonięcia całej mocy odbitej w danym torze. Jeden z torów jest wyposażony w detektor mocy odbitej PR, która przy symetrii obciążeń jest jednakowa w pozostałych torach. Korzystnie przesunięcie fazowe pomiędzy poszczególnymi wyjściami wynosi $360/4$ stopni kątowych.

Przykład 26

Układ nagrzewania plazmy wykonany jak w przykładzie ósmym albo dziesiątym z tą różnicą, że na wejściu ma lokalny oscylator LO połączony z wejściem członu separującego SE, którego $N = 10$ wyjść połączonych jest przez $N = 10$ przesuwników fazy $PF_1, PF_2, PF_3, \dots, PF_N$ i $N = 10$ elementów czynnych w postaci wzmacniaczy mocy $PA_1, PA_2, PA_3, \dots, PA_N$ z $N = 10$ elementami generatora plazmy zasilanych mocą mikrofalową $P_1, P_2, P_3, \dots, P_N$.

Przykład 27

Układ nagrzewania plazmy wykonany jak w przykładzie dwudziestym szóstym z tą różnicą, że wyposażony jest w układ kluczujący sterujący sześcioma sygnałami kluczującymi $SY_1, SY_2, SY_3, \dots, SY_6$ kierowanymi przez sześć przełączników $K_1, K_2, K_3, \dots, K_6$ do sześciu kluczowanych generatorów $KG_1, KG_2, KG_3, \dots, KG_6$, z których sześcioma liniami transmisyjnymi $LS_1, LS_2, LS_3, \dots, LS_6$ moc mikrofalowa $P_1, P_2, P_3, \dots, P_6$ jest podawana do sześciu elementów generatora plazmy.

Przykład 28

Układ nagrzewania plazmy wykonany jak w przykładzie dwudziestym szóstym z tą różnicą, że przesuwniki fazy $PF_1, PF_2, PF_3, \dots, PF_{10}$ stanowią odcinki przewodnic falowych $L_1, L_2, L_3, L_4, \dots, L_{10}$.

Przykład 29

Układ nagrzewania plazmy wykonany jak w przykładzie ósmym albo dziesiątym z tą różnicą, że na wejściu ma przetwornicę wysokonapięciową HV, która przez przełącznik K_1 palcowy zasila sześć elektrod $E_1, E_2, E_3, \dots, E_6$ generatora plazmy, korzystnie z barierą dielektryczną.

Przykład 30

Układ nagrzewania plazmy wykonany jak w przykładzie ósmym albo dziesiątym z tą różnicą, że generatory mocy $G_1, G_2, G_3, \dots, G_6$ są generatorami wysokonapięciowymi.

Do zasilania elementów generatora plazmy według wynalazku, stosuje się jako źródło mikrofalowe zarówno jeden generator G połączony z dzielnikiem mocy jak też źródło złożone z wielu generatorów mocy $G_1, G_2, G_3, \dots, G_N$ o jednakowych lub przypadkowo różnych częstotliwościach $f_1, f_2, f_3, \dots, f_N$ (Fig. 15). Generatory mocy $G_1, G_2, G_3, \dots, G_N$ wyposażone na przykład w magnetrony mikrofalowe i zabezpieczone przed falą odbitą izolatorami ferrytowych $IS_1, IS_2, IS_3, \dots, IS_N$, dostarczają na wyjściu moce $P_1, P_2, P_3, \dots, P_N$, które zasilają elementy generatora plazmy, powodują przypadkową rotację pola, które generuje plazmę PL. Zastosowanie jednego generatora mocy G_1 z dzielnikiem mocy S daje równe porcje mocy mikrofalowej $P_1, P_2, P_3, \dots, P_N$, o tej samej fazie, natomiast włączenie przesuwników fazy $PF_1, PF_2, PF_3, \dots, PF_N$ sprawia, że fazy pomiędzy porcjami mocy mikrofalowej $P_1, P_2, P_3, \dots, P_N$, zawsze zachowują stałe odstępny, co pozwala na uzyskanie stabilnej i toroidalnej plazmy PL. Realizację źródeł równych mocy wyjściowych przesuniętych w fazach w technice charakterystycznej dla nadajników radiowych przedstawia Fig 17a. Sygnał z lokalnego oscylatora LO stanowiący źródło sygnału małej lub średniej mocy jest poprzez człon separujący SE doprowadzony za pośrednictwem przesuwników fazy $PF_1, PF_2, PF_3, \dots, PF_N$ do wzmacniaczy mocy $PA_1, PA_2, PA_3, \dots, PA_N$, na których wyjściu osiąga równe poziomy mocy $P_1, P_2, P_3, \dots, P_N$, korzystnie o fazach rozłożonych równomiernie w kącie pełnym, co powoduje rotację pola nagrzewającego plazmę PL toroidalną. Efekt pseudo-rotacji pola można zrealizować poprzez cykliczne i sekwencyjne kluczkowanie sygnałów dostarczanych do wejść kolejnych wzmacniaczy mocy $PA_1, PA_2, PA_3, \dots, PA_N$ (fig. 17b). Lokalny oscylator LO o dowolnym przebiegu czasowym, może być tutaj wykonany bezpośrednio jako źródło mocy odseparowane od kolejnych wyjść na przykład za pomocą transformatorów. Za pomocą kluczkowanych generatorów $KG_1, KG_2, KG_3, \dots, KG_N$ zakończonych liniami transmisyjnymi $LS_1, LS_2, LS_3, \dots, LS_N$ na kolejnych wyjściach torów mocy $P_1, P_2, P_3, \dots, P_N$ otrzymuje się ciągi impulsów mono- lub bipolarnych zwłaszcza wysokonapięciowych w odpowiedzi na sygnały sterujące $SY_1, SY_2, SY_3, \dots, SY_N$ przełączane przełącznikami elektronicznymi $K_1, K_2, K_3, \dots, K_N$. Podobne działanie uzyskuje się poprzez zastosowanie wielofazowego źródła mocy złożonego z kluczkowanych generatorów mocy $KG_1, KG_2, KG_3, \dots, KG_N$, również wysokonapięciowych, sterowanych odpowiednimi sygnałami sterującymi, kluczkowanymi elektronicznie. Sygnały $SY_1, SY_2, SY_3, \dots, SY_N$ mogą stanowić poziomy

logiczne np. TTL lub być bezpośrednio źródłami napięć zasilania generatorów.

W nowym układzie idea wielofazowej plazmy PL łukowej wraz z koncepcją bezprądowego centralnego obszaru plazmy PL, została przeniesiona do zakresu częstotliwości radiowych lub mikrofal. Tak zdecydowane podniesienie częstotliwości pracy układu nagrzewania plazmy przede wszystkim pozwala uniknąć łuku elektrycznego oraz pozbawia elektrody $E_1, E_2, E_3, \dots, E_N$ zanurzone w plazmie PL spełniania roli emiterów. W układzie możliwe jest także stosowanie płaszczyzn pojemnościowych lub elementów bez-elektrodowych, działających na przykład poprzez ścianę rury wyładowczej RW, sprzęgających dostarczaną moc $P_1, P_2, P_3, \dots, P_N$ z plazmą PL. Przy symetrycznym rozmieszczeniu elektrod $E_1, E_2, E_3, \dots, E_N$ lub elementów bez-elektrodowych oraz przy zabezpieczeniu równomiernego przesunięcia o kąt $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_N$ fazowy napięć je zasilających, otrzymuje się wirujące pole elektryczne wraz z korzystnym ograniczeniem do minimum prądów wewnątrz generowanej plazmy PL. Układ umożliwia też, budowanie generatora plazmy wyposażonego w co najmniej trzy palniki plazmowe większych mocy, z których każdy jest zasilany z innej fazy. Łatwo wykazać geometrycznie, że w układzie przy ilości faz większej od 6 gros prądów plazmy PL, będzie przepływać pomiędzy elektrodami $E_1, E_2, E_3, \dots, E_N$, jeśli będą one równomiernie rozłożone na okręgu. Dzięki możliwości zaistnienia bezprądowego obszaru na osi takiego układu, daje się wprowadzić do środka plazmy przeznaczony do obróbki materiał nawet przy znacznych poziomach mocy. Istnieje też możliwość budowania układów wielofazowych piętrowych, które mogą zapewnić zarówno pracę przy przemysłowych poziomach energii jak też gwarantować możliwość przeprowadzania wysokoenergetycznych objętościowych procesów chemii plazmowej.

Wymaganą częstotliwość pracy mogą już zapewnić generatory $G_1, G_2, G_3, \dots, G_N$ małej mocy, zaś przesunięcia fazowe można wytworzyć za pomocą różnorodnych przesuwników fazy, których rolę mogą także spełniać odcinki linii transmisyjnych. Napięcia poszczególnych faz można do wymaganego poziomu wzmacnić za pomocą półprzewodnikowych wzmacniaczy mocy $PA_1, PA_2, PA_3, \dots, PA_N$, w układzie według wynalazku, zabezpieczonych izolatorami ferrytowymi $IS_1, IS_2, IS_3, \dots, IS_N$. Drugim sposobem jest zastosowanie generatora $G_1, G_2, G_3, \dots, G_N$ dużej mocy i zastosowanie dzielnika mocy S a następnie przesuwników fazy $PF_1, PF_2, PF_3, \dots, PF_N$. Rolę dzielników mocy a zarazem przesuwników fazy $PF_1, PF_2, PF_3, \dots, PF_N$, zwłaszcza przy

parzystej ilości faz mogą spełniać sprzęgacze kierunkowe.

Zastosowanie izolatorów $IS_1, IS_2, IS_3, \dots, IS_N$ lub cyrkulatorów $CI_1, CI_2, CI_3, \dots, CI_N$ pozwala całkowicie uniezależnić się od fal odbitych tak w zakresie utrzymania zadanych stałych wartości kątów $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_N$ fazowych jak i niezakłóconej precyzji dzielników mocy S . Nie mniej ważne jest także osiągnięcie stabilnej i bezpiecznej pracy generatora mocy G_1 , który dzięki izolatorom $IS_1, IS_2, IS_3, \dots, IS_N$ lub cyrkulatorom $CI_1, CI_2, CI_3, \dots, CI_N$ nigdy „nie zobaczy” mocy odbitej, nawet przy całkowitym braku obciążenia na przykład przed zapłonem plazmy PL wyładowania. Jedno z dopasowanych ramion cyrkulatora $CI_1, CI_2, CI_3, \dots, CI_N$ zastosowanego w układzie wielofazowym według wynalazku można dodatkowo wyposażyć w detektor i użyć go jako monitora dopasowania energetycznego. Pełna izolacja ramion dzielnika i niezakłócony podział mocy oraz kontrolowany kąt $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_N$ fazowy, pozwalają na wykorzystanie nowego sposobu do wytwarzania pól elektromagnetycznych współfazowych zapewniających pobudzanie układów liniowych takich jak na przykład wyładowczy laser gazowy lub rozległych płaskich generatorów plazmy PL , a generalnie stwarzających możliwość wymuszania pola elektrycznego w plazmie PL , zwłaszcza pola współfazowego.

Edvard Penke

Wykaz oznaczeń na rysunku:

$CE_1, CE_2, CE_3, \dots, CE_N$ - element sprzęgający
 $E_1, E_2, E_3, \dots, E_N$ - elektroda
 $G_1, G_2, G_3, \dots, G_N$ - generator mocy
 S - dzielnik mocy
 $PF_1, PF_2, PF_3, \dots, PF_N$ - przesuwnik fazy
 $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_N$ - kąt
 $P_1, P_2, P_3, \dots, P_N$ - moc
 $IS_1, IS_2, IS_3, \dots, IS_N$ - izolator ferrytowy
 $PA_1, PA_2, PA_3, \dots, PA_N$ - wzmacniacz mocy
 $L_1, L_2, L_3, \dots, L_N$ - przewodnica falowa
 P - moc generatora
 $CI_1, CI_2, CI_3, \dots, CI_N$ - cyrkulator mikrofalowy
 PR - detektor mocy odbitej
 LO - lokalny oscylator
 SE - człon separujący
 $KG_1, KG_2, KG_3, \dots, KG_N$ - kluczowany generator
 $LS_1, LS_2, LS_3, \dots, LS_N$ - linia transmisyjna
 $SY_1, SY_2, SY_3, \dots, SY_N$ - sygnał sterujący
 $K_1, K_2, K_3, \dots, K_N$ - przełącznik
 $f_1, f_2, f_3, \dots, f_N$ - częstotliwość
 HV - przetwornica wysokonapięciowa
 TU - strojnik pojemnościowy
 EK - ekran
 RW - rurka wyładowcza
 TP - tor paskowy
 ME - metalizacja
 DI - podłoże dielektryczne
 WR - obszar wzbudzenia
 PK - płytka kwarcowa
 PL - plazma
 Z_0 - obciążenie dopasowane
 L_0 - długość linii
 A - antena

