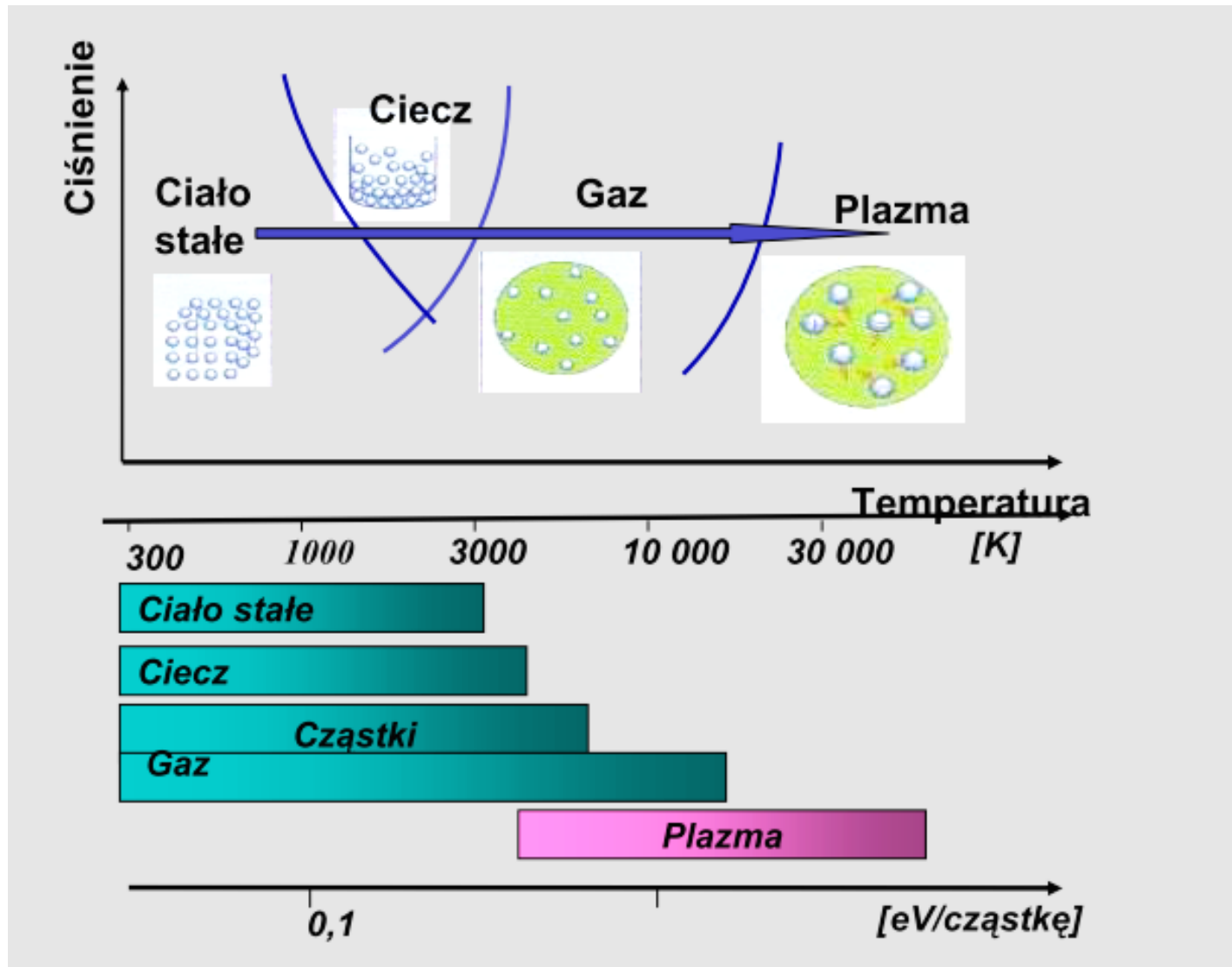


# Nagrzewanie plazmowe

Opracował i przedstawia

Dr inż. Piotr Urbanek.

# Stany skupienia materii



# Rodzaje plazmy

## Plazma gorąca



Jądro słońca



Korona słońca



Wiatr słoneczny



Reaktor jądrowy

## Plazma zimna



Zorza polarna



Wyładowania atmosferyczne

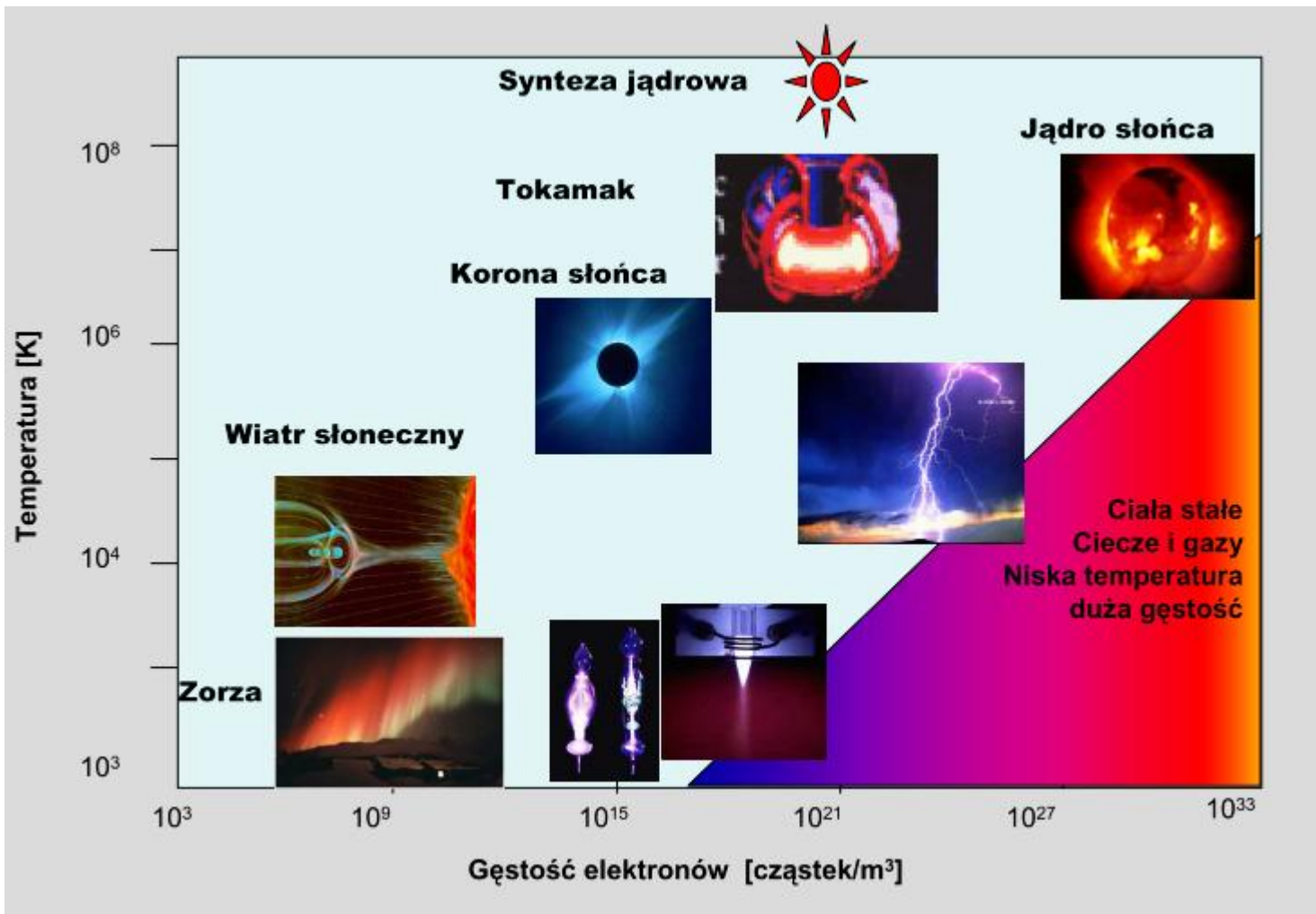


Neony



Plazmotrony

# Miejsca występowania plazmy



# Plazma

W warunkach ziemskich plazma występuje rzadko. Można ją spotkać w

- wyładowaniach atmosferycznych,
- płomieniu,
- łuku elektrycznym (jest to wyładowanie w gazie np. powietrzu między dwoma elektrodami węglowymi lub metalowymi)
- lampach wyładowczych - świetlówki (lampy rtęciowe) i lampy neonowe.
- doświadczalnych reaktorach plazmowych

W lampach wyładowczych wysoką temperaturę mają tylko elektrony, natomiast atomy i jony mają temperaturę pokojową lub tylko nieco podwyższoną. Znalazło to szerokie zastosowanie w technice.



Zorza polarna



Wyładowania atmosferyczne



# Co to jest plazma?

Rozróżniamy trzy stany materii – **stały, ciekły i gazowy**. Do czwartego stanu materii może być zaliczona **plazma**.

Każdy z tych stanów charakteryzuje **energia wiązania** i **energia kinetyczna** cząstek materii.

Dany stan istnieje tylko wtedy, gdy średnia **energia kinetyczna** cząstek materii jest mniejsza niż **energia wiązania** charakterystyczna dla tego stanu.

Przejście od jednego do drugiego stanu następuje zwykle stopniowo.

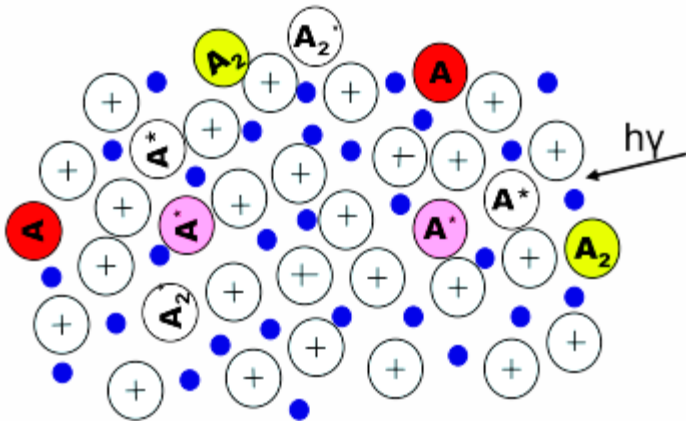
**Plazmą** nazywa się mieszaninę obojętnych elektrycznie cząstek gazowych z równolicznymi ładunkami ujemnymi i dodatnimi o pewnej minimalnej koncentracji, zajmującą obszar o wymiarze liniowym większym od tzw. promienia Debeya

# Plazma – opis fizyczny

Plazma mieszanina gazowa elektrycznie obojętna w skład, której wchodzi: elektrony, jony, atomy i cząsteczki wzbudzone i cząsteczki obojętne oraz fotony.

W stanie plazmy znajduje się ponad 99% materii tej części Wszechświata, która znajduje się w obszarze dostępnym dla ludzkiej obserwacji.

Opór elektryczny plazmy, inaczej niż w metalach, maleje ze wzrostem jej temperatury.



Liczba cząstek zjonizowanych:

$$n_e = n_{j1} + n_{j2} + n_{j3} + \dots + n_{jn}$$

Stopień jonizacji:

$$\alpha = \frac{n_e}{n_0} \text{ - stopień jonizacji}$$

# Plazma – opis fizyczny.

**Plazmą** nazywa się mieszaninę obojętnych elektrycznie cząstek gazowych z równolicznymi ładunkami ujemnymi i dodatnimi o pewnej minimalnej koncentracji, zajmującą obszar o wymiarze liniowym większym od tzw. promienia Debeya.

**Promień Deby'a**, rozumiany jest jako kulista chmura ładunków różnoimiennych, lecz tak rozłożonych, że bliżej środka tej kuli znajdują się ładunki o znaku przeciwnym do ładunku w samym centrum.

Promień Debye'a **rośnie wraz z temperaturą i maleje wraz ze wzrostem ładunku i koncentracji** otaczających go cząstek.

**Promień Debya** charakteryzuje ważną właściwość plazmy, polegającą na osłanianiu się przed wpływem pól zewnętrznych dla utrzymania neutralności wewnątrz obszaru plazmowego.

**Zwykle wyróżnia się dwa rodzaje plazmy:**

- 1. Niskotemperaturową** (znamionuje niewielki stopień koncentracji ładunków elektrycznych i średnie energie kinetyczne jej najbliższych cząstek, tzn. elektronów, nie przekraczające 20 eV. ). Wykorzystywana w technice.
- 2. Wysokotemperaturową** (materia o wysokim stopniu jonizacji oraz z energiami kinetycznymi elektronów większymi niż 20 eV.).



# Plazma – opis fizyczny.

O tym, czy zjonizowany gaz ma właściwości **plazmy**, decyduje nie tylko temperatura i koncentracja cząstek naładowanych, ale też najmniejszy rozmiar przestrzeni wypełnionej plazmą. Czym mniejszy jest to obszar, tym w danej temperaturze koncentracja jonów powinna być większa. Wystarczy jedna para elektron-jon na 100 000 cząstek neutralnych, by mieszanina taka stała się niezłym przewodnikiem, co uzasadnia zaliczenie jej do plazmy

**Plazma** silnie oddziałuje z zewnętrznym polem elektrycznym i magnetycznym. Jest również dobrym przewodnikiem prądu elektrycznego. Opór elektryczny plazmy maleje wraz ze wzrostem temperatury i w wysokich temperaturach plazma jest lepszym przewodnikiem niż metale.

Każda substancja w odpowiednio wysokiej temperaturze może przejść w stan plazmy w wyniku termicznej jonizacji. W bardzo wysokich temperaturach (powyżej miliona Kelwinów) materia jest już całkowicie zjonizowana i taki stan materii występuje w jądrze Słońca i innych gwiazd. Wtedy w przypadku atomów lekkich istnieją tam tylko jądra atomowe i elektrony.

Plazmą jest również obszar międzygwiazdny. Choć temperatura przestrzeni wynosi zaledwie 3K (-270°C), ale zajmuje ogromny obszar (dużo większy od promienia Debye'a), jest to więc też stan plazmy. Jak się szacuje plazma jest najczęściej spotykanym stanem materii we Wszechświecie i stanowi 99% znanej materii Wszechświata.

# Plazma – opis fizyczny.

**Progowa wartość energii kinetycznej**, po przekroczeniu której materia zaczyna przechodzić w stan plazmy, jest rzędu 0,2 eV. Jest ona mniejsza od minimalnej wartości energii jonizacji, która charakteryzuje pary cezu (3,88 eV). Wartość ta jest związana z istnieniem tzw. **jonizacji kumulatywnej** (stopniowej, schodkowej), której ulegają wzbudzone atomy pozostające w stanach metastabilnych. Przechodzenie w stan plazmy kończy się, gdy z atomów oderwane zostają ostatnie elektrony zlokalizowane na powłokach najbliższych jądra atomu. Wiąże się to z energią jonizacji o wartości 2 MeV. Oderwanie od atomu pierwszego, najłabiej z nim związanego elektronu, nazywa się **jonizacją jednokrotną**. Oderwanie następnych, już znacznie silniej związanych elektronów, nazywa się **jonizacją wielokrotną**. Po oderwaniu wszystkich elektronów uzyskuje się mieszaninę wolnych jąder i elektronów zwaną **nugazem**, w której wartości energii wiązania są zawarte w przedziale 2 - 200 MeV.

# Plazma

W skali energetycznej cząstce o trzech stopniach swobody ruchu (w kierunkach każdej z trzech osi układu współrzędnych), mającej energię 1 eV, można przypisać **temperaturę 7736 K** zgodnie z zależnością:

$$T = \frac{2}{3} \frac{E}{k}$$

przy czym:  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K - stała Boltzmannna;

$E$  - energia cząsteczki przy założeniu, że  $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19}$  J

Stąd też często przyjmuje się, że górną granicą temperatury **plazmy niskotemperaturowej** jest wartość z przedziału **(20 ÷ 100) • 10<sup>3</sup> K**

**Plazmę wysokotemperaturową** utożsamia się ze środowiskiem o temperaturze rzędu **milionów kelwinów**, występującą np. w reakcjach termojądrowych, we wnętrzu słońca.

Przypisywanie plazmie jednoznacznie określonej temperatury ma sens wyłącznie przy ciśnieniach dostatecznie wysokich, w których średnie energie kinetyczne poszczególnych składników plazmy, a więc i ich temperatury są prawie równe.

# Plazma

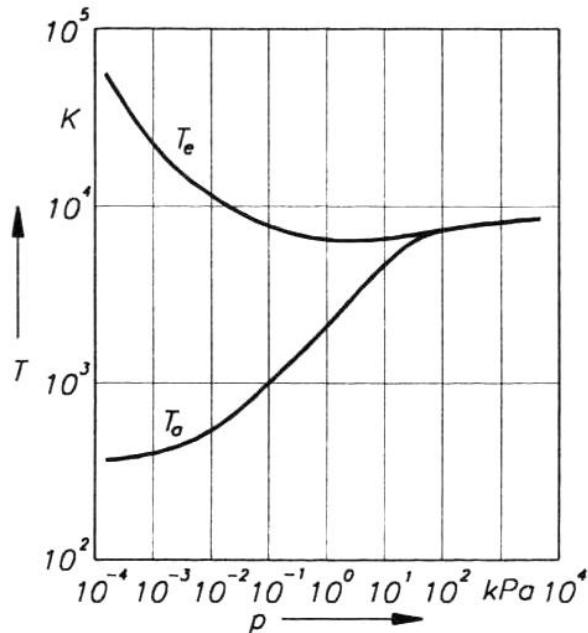
$$T_e \approx T_w \approx T_j \approx T_a$$

$T_e$  - temperatura elektronów,

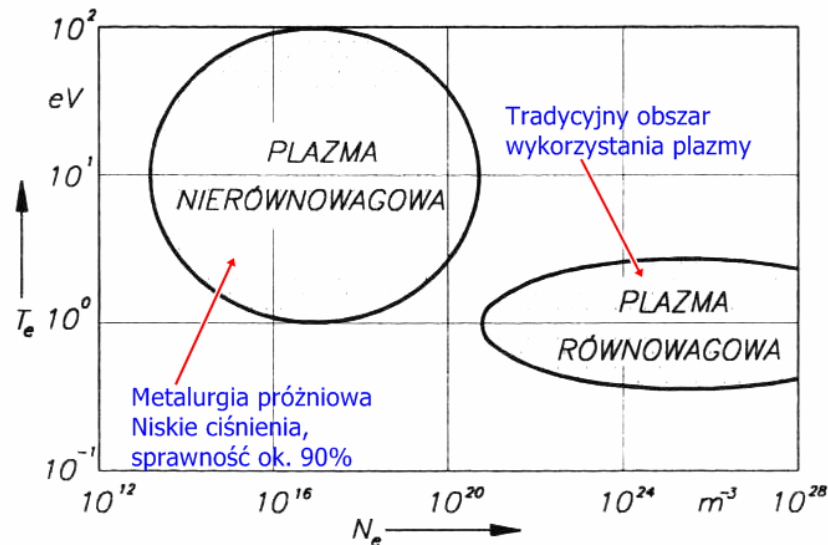
$T_w$  - temperatura atomów i tworów wieloatomowych wzbudzonych,

$T_j$  - temperatura jonów,

$T_a$  - temperatura cząstek neutralnych (atomów, tworów wieloatomowych).



Temperatury elektronów  $T_e$  i cząstek neutralnych  $T_a$  w funkcji ciśnienia podczas wyładowania elektrycznego w parach rtęci.



Wykorzystanie plazmy do celów technologicznych wymaga regulacji jej parametrów w szerokich zakresach. Staje się to możliwe wówczas, gdy plazmie generowanej kosztem energii elektrycznej nadaje się postać strumienia, co przy wysokiej temperaturze tego medium zapewnia także dużą koncentrację mocy sięgającą  $40 \text{ kW/cm}^3$

# Mechanizmy nagrzewania plazmowego

Bezpośrednie

Ciepło wytwarza się w składnikach gazu roboczego (plazmogenego), np. gdy wchodzi one ze sobą w reakcje chemiczne bezpośrednio w strumieniu plazmy bądź tuż po jego opuszczeniu.

Pośrednie

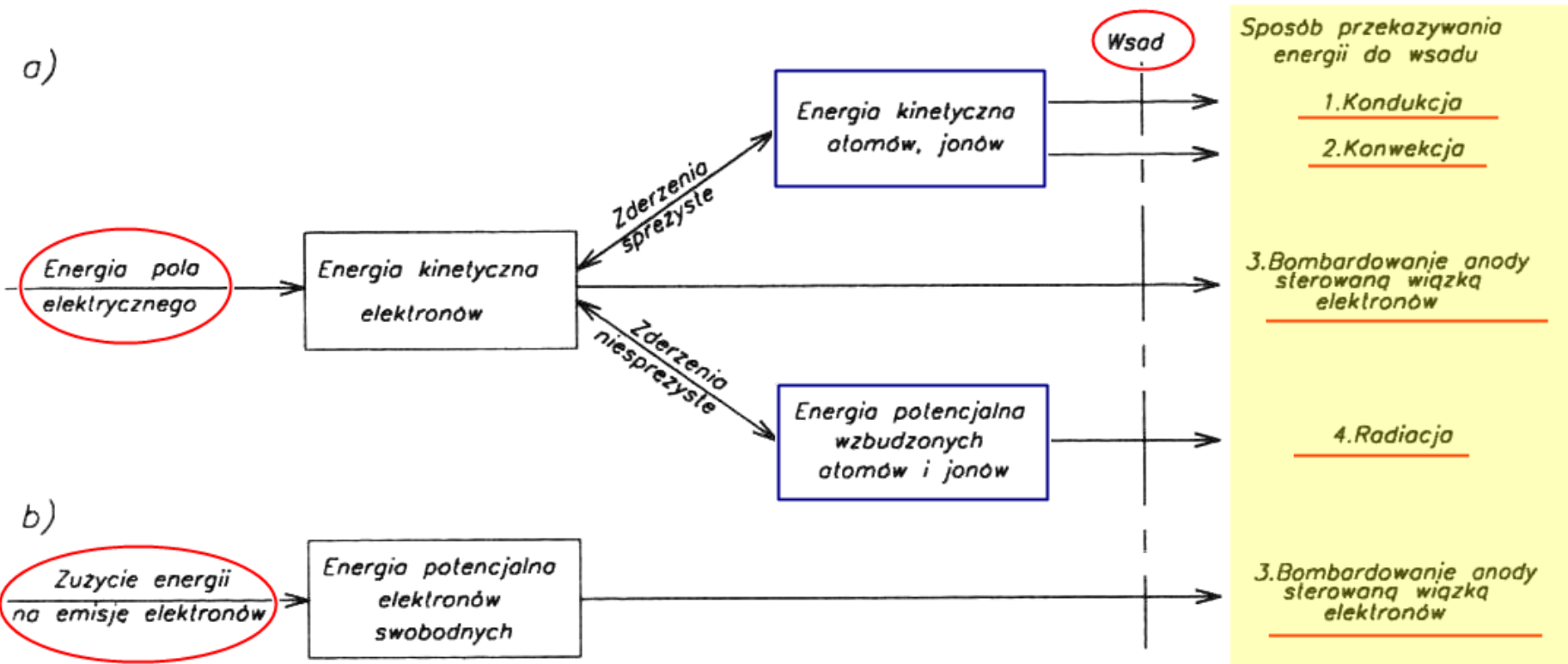
Występuje w przypadku wprowadzenia do strumienia plazmy chociażby substratów w postaci stałej (proszki).

Złożone

W trakcie przepływu przez strumień plazmy substraty nagrzewane pośrednio ulegają przemianom, powodujących jonizację ich składników.

Intensyfikacja nagrzewania plazmowego sprowadza się zwykle do konieczności maksymalizacji: temperatury gazu roboczego, wydajności czynnika roboczego bądź obu tych wielkości równocześnie.

# Mechanizmy nagrzewania plazmowego

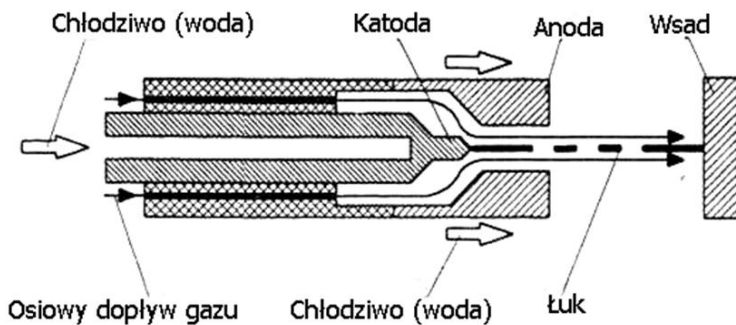


W pierwszej fazie wzrasta energia kinetyczna elektronów kosztem pola elektrycznego → elektrony oddają ją atomom i jonom w wyniku zderzeń sprężystych i niesprężystych → wzrost energii kinetycznej atomów i jonów (a więc i ich temperatur  $T_a$  i  $T_j$ ) → wzrost energii potencjalnej wzbudzanych atomów, które spontanicznie lub w wyniku zderzeń od wzbudzają się lub ulegają rekombinacji → skutkuje to promieniowaniem energii w postaci linii spektralnych lub widma ciągłego.

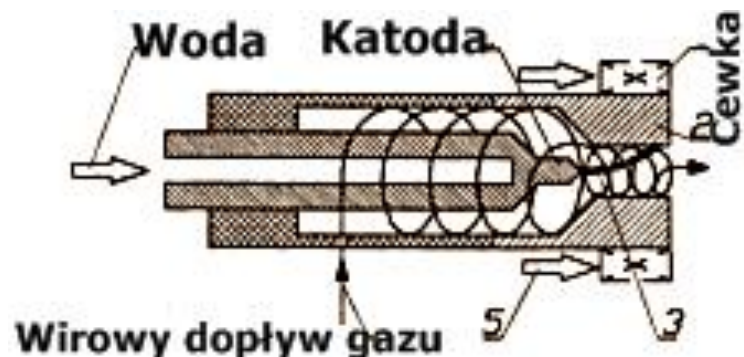
# Generowanie plazmy niskotemperaturowej

## Plazmotrony łukowe

P. z katodą prętową



Laminarny dopływ gazu roboczego (argonu)

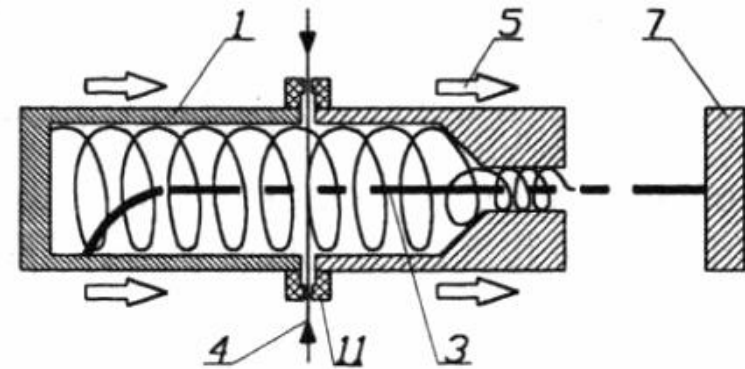
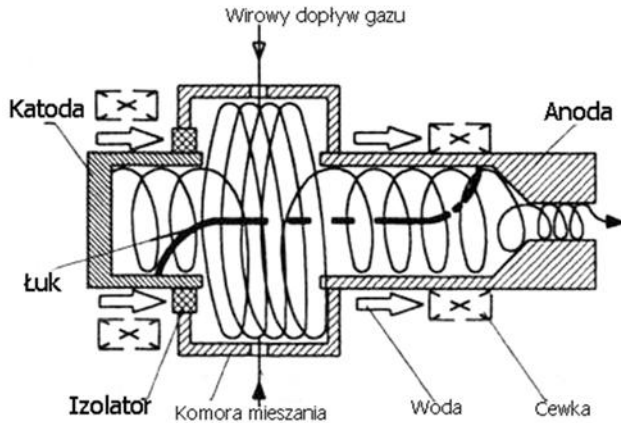


Wirowy dopływ gazu roboczego (argonu)

*Klasyfikacja ze względu na konstrukcję plazmotronów.*

# Generowanie plazmy niskotemperaturowej

## Plazmotrony z elektrodami cylindrycznymi



Katoda cylindryczna. Dopływ gazu do komory mieszania. **Łuk wewnętrzny.**

Katoda cylindryczna. Wirowy dopływ gazu. **Łuk zewnętrzny.**

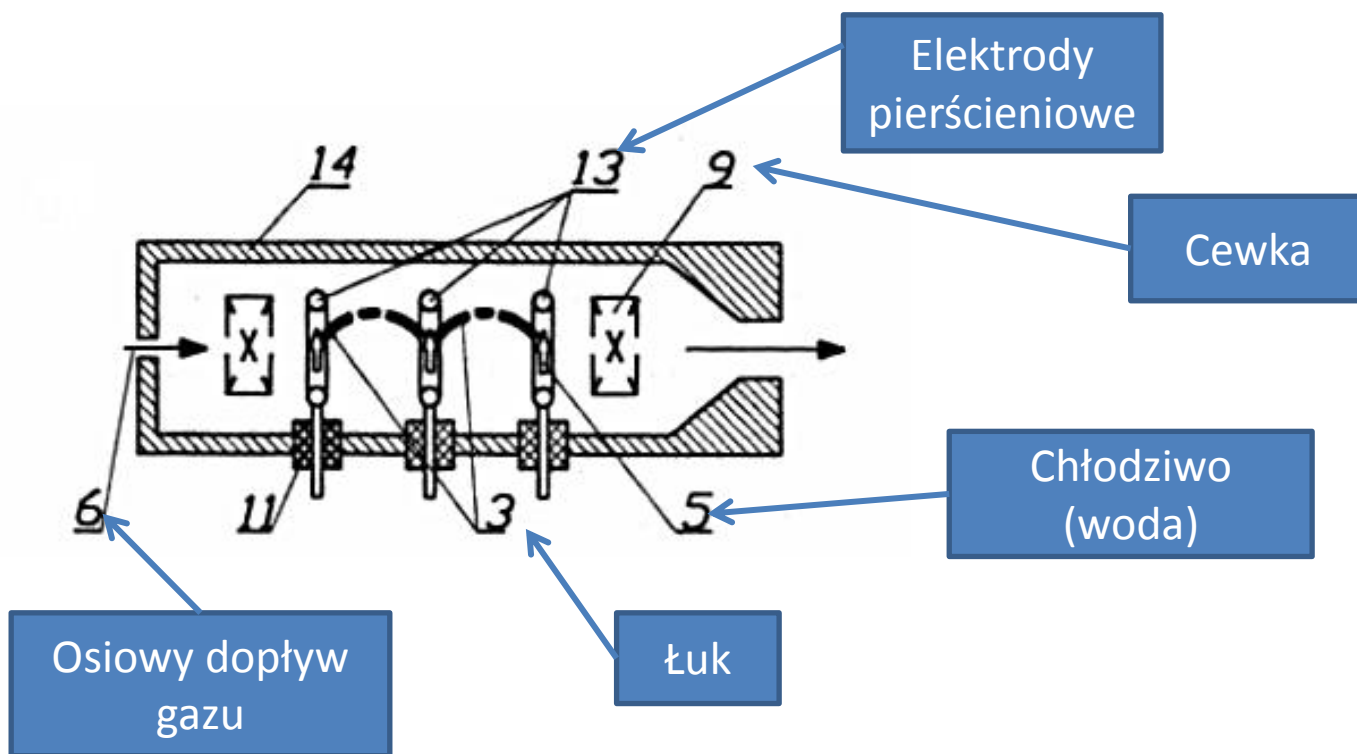
Moc > 100 kW. Duża prędkość gazu (do 1250 m/s). Wysokie ciśnienia (do 10 Mpa).  
Długie łuki (rzędu kilku metrów)

*Klasyfikacja ze względu na konstrukcję plazmotronów.*



# Generowanie plazmy niskotemperaturowej

## Plazmotrony z elektrodami pierścieniowymi

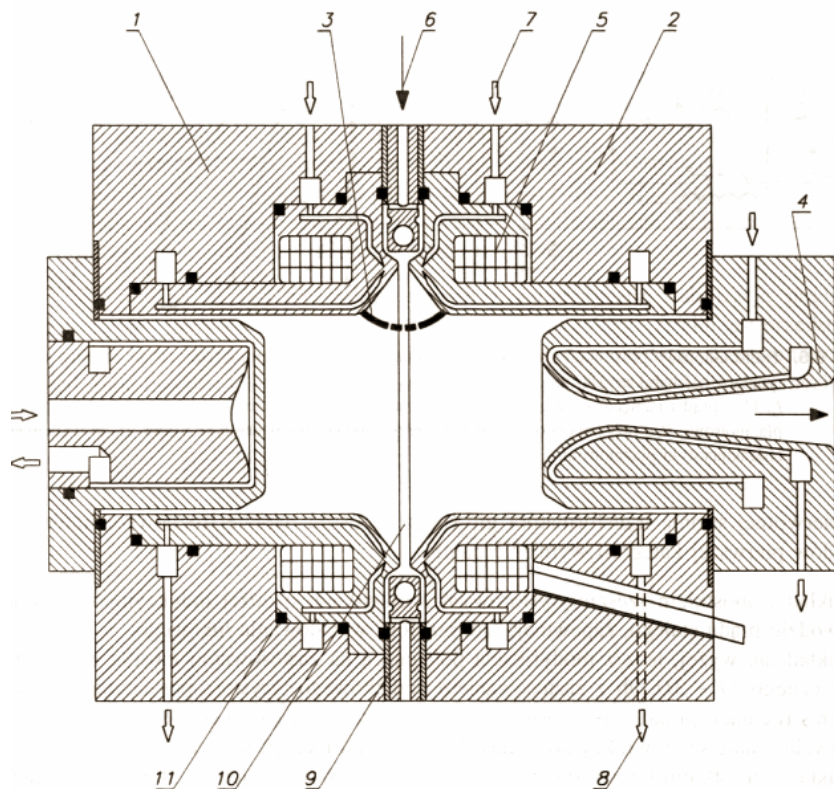


Łuk występuje w nich między dwoma, trzema lub czterema elektrodami rurowymi chłodzonymi wodą i umieszczonymi w komorze wyładowczej. Rotację łuku uzyskuje się poprzez właściwe doprowadzenie gazu lub przy użyciu zewnętrznego pola magnetycznego. Charakteryzuje się wysokimi napięciami pracy i dużymi natężeniami prądów.

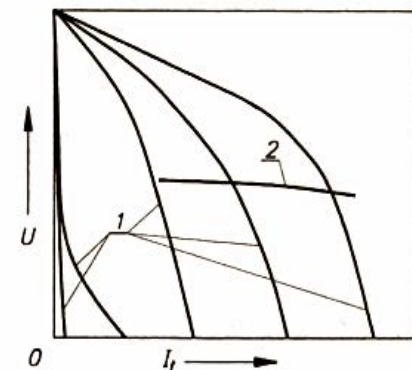
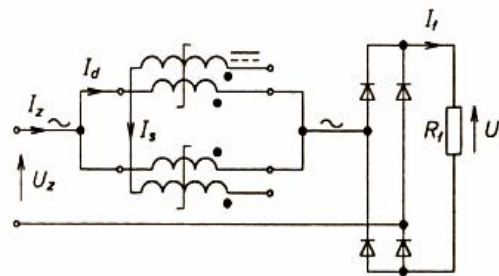
*Klasyfikacja ze względu na konstrukcję plazmotronów.*

# Generowanie plazmy niskotemperaturowej

Plazmotron ze współosiowymi elektrodami cylindrycznymi



1 — miedziana katoda, 2 — miedziana anoda, 3 — łuk, 4 — dysza, 5 — cewka magnetyczna, 6 - doprowadzenie gazu roboczego, 7 - dopływ wody chłodzącej, 8 - odpływ wody chłodzącej, 9 - izolator, 10 - szczelina pierścieniowa oddzielająca katodę i anodę, 11 - uszczelka

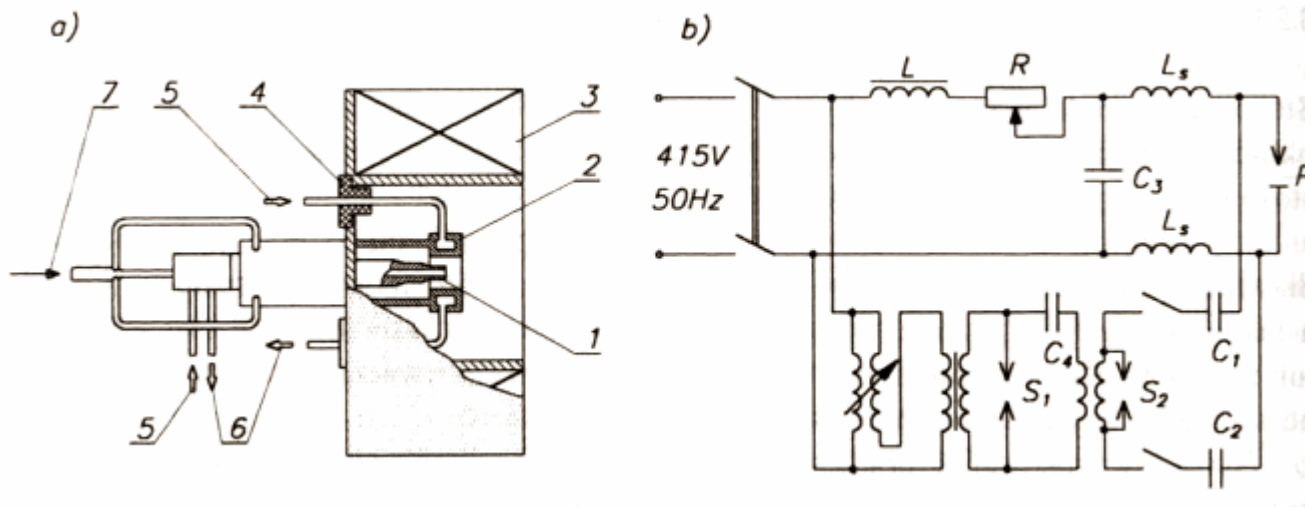


Moce rzędu kilku MW. Proste i tanie układy zasilania (transduktorowo – prostownikowe lub tyrystorowe)

*Klasyfikacja ze względu na konstrukcję plazmotronów.*

# Generowanie plazmy niskotemperaturowej

Plazmotrony jednofazowe prądu przemiennego z dodatkową jonizacją gazu wielką częstotliwością

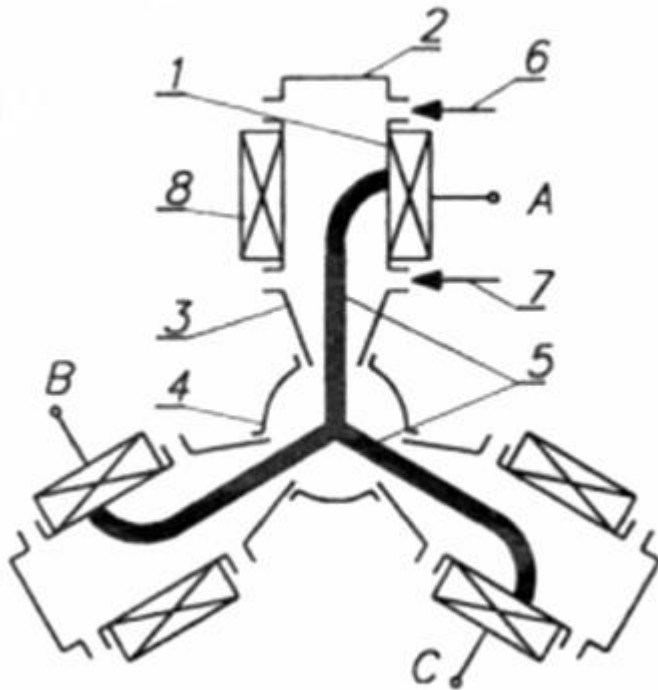


1,2- elektrody; 3 - cewka; 4 - przepust izolacyjny; 5 - dopływ wody; 6 - odpływ wody; 7 - gaz;

$L$ ,  $R$  - elementy do stabilizacji i regulacji parametrów wyładowania łukowego;  $L_s$ ,  $C_3$  - elementy filtra dolnoprzepustowego, chroniące główne źródło zasilania przed wysokim napięciem w.cz.;  $S_1$ ,  $S_2$  - iskierniki obwodu w.cz.;  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  - elementy dwustopniowego obwodu w.cz.;  $P$  - plazmotron

# Generowanie plazmy niskotemperaturowej

## Plazmotrony trójfazowe prądu przemiennego



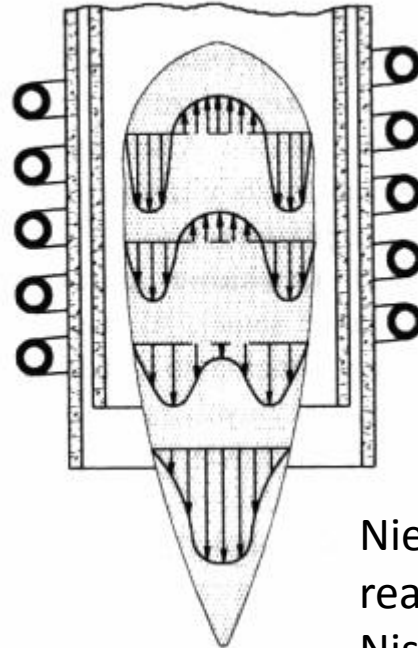
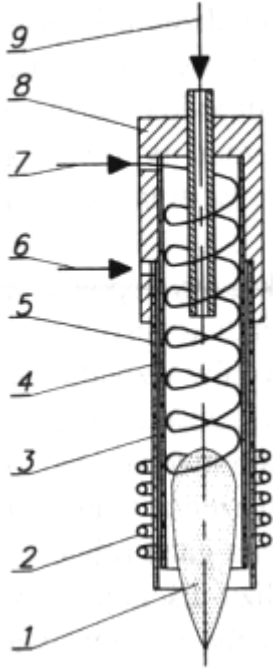
1 - elektroda cylindryczna, 2 - dno komory wyładowczej, 3 - konfuzor, 4 - komora mieszania, 5 - łuki, 6 - dopływ gazu (10%), 7 - główny dopływ gazu (90%), 8 - cewka magnetyczna

**Konfuzor** jest to przewód o przekroju zmniejszającym się równomiernie w kierunku przepływu czynnika (w tym przypadku plazmy)

Trzy identyczne komory łukowe, usytuowane w stosunku do siebie symetrycznie pod kątem  $120^\circ$  oraz jedną komorę mieszania. Komorę łukową tworzy elektroda cylindryczna oraz odizolowane od niej elektrycznie dno i konfuzor. Przez izolatory styczne jest wprowadzany do komór gaz roboczy, co zapewnia stabilizację gazową łuku. Główną część gazu (90%) wprowadza się przez izolator umieszczony między elektrodą i konfuzorem. Pozostała część gazu, wprowadzana w strefie dna, zapobiega przerzuceniu się łuku na ten element. Nagrzany gaz wypływa z komory mieszania przez dyszę o osi prostopadłej do powierzchni rysunku. Elektrody, konfuzory, komora mieszania oraz dysza chłodzone są wodą.

# Generowanie plazmy niskotemperaturowej

## Plazmotrony indukcyjne



1 - plazmoid, 2 - wzbudnik, 3 - zewnętrzna rura komory plazmotronu, 4 - przestrzeń między rurami, 5 - wewnętrzna rura komory plazmotronu, 6 - wlot gazu chłodzącego, 7 - wlot gazu roboczego, 8 - głowica, 9 - wlot wsadu

Częstotliwości pracy: 1÷30 MHz,  
wyjątkowo 960Hz

Nie posiadają elektrod, dzięki czemu składniki reakcji są czystsze.  
Niska prędkość gazu (0,3 m/s), dzięki czemu wydłuża się czas przebywania substratów w plazmie.  
Temperatury plazmy: 8000÷13000K

Intensyfikacja nagrzewania plazmowego sprowadza się zwykle do konieczności maksymalizacji:

- temperatury gazu roboczego,
- wydajności tego czynnika roboczego bądź obu tych wielkości równocześnie.