

小特集

熱プラズマの産業応用における現状

2. 高周波熱プラズマの電源開発

篠原 己 拔

(日本高周波株式会社)

The Development of Power Supplies for Radio-Frequency Thermal Plasmas

SHINOHARA Kibatsu

Nihon Koshuha Co. Ltd., Yokohama 226-0011, Japan

(Received 26 April 2000)

Abstract

This paper describes the development of the power supply for Radio-Frequency thermal plasmas. Inductively coupled RF thermal plasmas are often used for atomic emission spectroscopy etc. RF power source should be provided by a self-oscillation method, an amplifying method, a vacuum tube method and a semiconductor method, etc. Applied usage dictates the frequency, the electrical power, the control method, the stabilization method, the shield and the load matching circuit, among other things.

Keywords:

radio-frequency thermal plasma, RF power supply, microwave power source, auto-matching, solid-state RF power source

2.1 はじめに

高周波熱プラズマは炎光分析用 ICP (誘導結合型プラズマ) に多く使用されているが, その他産業用としては超微粒子の生成, サーマルスプレーコーティング用等に使用されている [1]. プラズマを発生させる方式としては, 容量結合方式, 誘導結合方式がある. 小型小電力のものは容量結合方式も用いられるが, 熱プラズマ用としては誘導結合方式が主流である. ここでは主として誘導結合方式について概要, 現状, および問題点などについて述べる.

2.2 出力能動素子選定

2.2.1 半導体素子方式

a) トランジスタ方式

熱プラズマ発生装置用の高周波電源には, 出力能動素子として比較的容易に使用できる真空管が多く用いられ

author's e-mail: nikoha-shinohara@mvd.biglobe.ne.jp

る, しかしメンテナンスフリー, 高効率の要求と半導体素子の開発が進み, 大電力高周波電源関係の装置も全固体素子化の方向である. 大きな電力を扱えるトランジスタが開発され, 大電力での全固体素子化の要望が高まり, 実用化が可能となっており, 代表的な使用例を Table 1 に示してある. 熱プラズマ発生用高周波電源は, 使用目的に応じて最適な周波数, 電力等が選ばれるが, 周波数は kHz から数百 MHz 以上, 出力電力も数百 W から数百 kW までにも及ぶ. Table 1 に示したように, トランジスタによる高周波電源は, 出力, 周波数, 効率等, 熱プラズマ発生用高周波電源装置として有効である. 大出力になると, 多数のトランジスタ素子の出力を合成するので [2], コストは高くなる. 分析用 ICP の高周波電源装置では, 数 kW までトランジスタ化された高安定度 (0.1 %) の電源装置が使われており, 安定なプラズマが得られている. コストは多少高くなるが, FET (電界効果ト

Table 1 High frequency power source which uses solid-state component.

Classification	High-frequency heating machine			Radio broadcast transmitter		Low temperature plasma	ICP
Usage	Induction heating or quench etc.			Medium wave	UHF Television	Semiconductor process.	Light Mass analysis
Frequency	10 kHz	100 kHz	1~9 MHz	1 MHz	800 MHz	13.56 MHz	27.12 MHz
Output power	3 MW	100 kW	30 kW	50 kW	30 kW	5 kW	2 kW
Use element	SCR	SI Thyristor	Transistor	Transistor	Transistor	Transistor	Transistor

ランジスタ)を使用すれば、数百 MHz で、数十 kW のものまで可能である。また、トランジスタのスイッチング特性を利用した高効率動作回路を使用して[3], 効率の高い (80~90 %) 装置が可能であり、特に運転コストが軽減できるので産業用として有効な方式である。

b) サイリスタ (SCR) 方式

サイリスタは高電圧大電力の制御が可能である。その制御容量が大きいため誘導加熱装置、焼き入れ装置等の高周波電源装置に実用されている。周波数は数十 kHz 程度が限度であり、数 MHz の周波数を使用する熱プラズマ装置には不向きである。熱プラズマ装置が大型の場合、トーチの径が大きくなり大電力を必要とする装置では、低い周波数で動作させる。SCR は自己消弧不能素子であり、制御性に難点がある。トランジスタ (IGBT) 等の性能向上、大出力化が進み、SCR はあまり使われなくなっている。

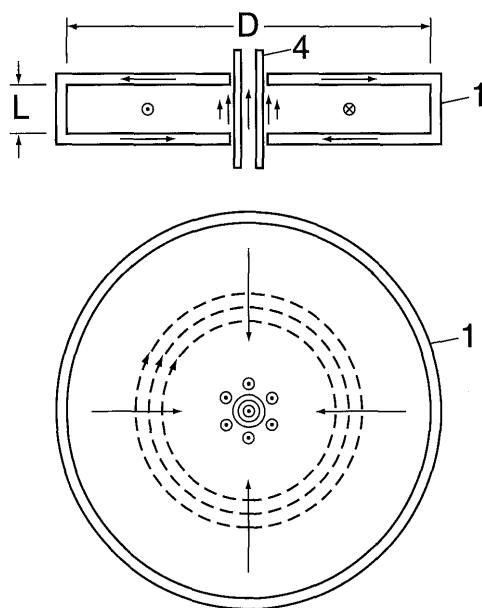


Fig. 1 TM010 mode cavity: The cavity cell(1), diameter(D), height(L), quartz tube(4).

c) マグネトロンマイクロ波電源

Fig. 1, Fig. 2[4]のようなマイクロ波プラズマトーチを使用するには、915 MHz, 2,450 MHz 等の周波数帯のマグネトロンが用いられる。電源装置としては、2,450 MHz 帯は 10 kW まで、915 MHz 帯は約 100 kW 位までのマグネトロンがある[5]。さらに大きい出力を必要とする場合は、マグネトロンを周波数注入同期の方式で並列運転する方法もあり、技術的には可能であるが、同期の方法、出力の制御等、高度な技術を要する。マグネトロンは大電力マイクロ波源として効率も高く (約 50 %), 多くの用途がある。熱プラズマ用電源装置としてはトーチまでの電力伝送は同軸線路または、矩形導波管線路を必要

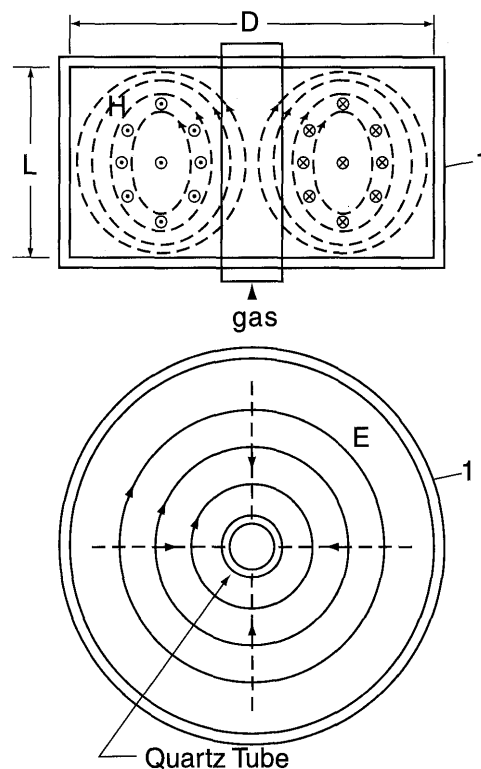


Fig. 2 TE01 mode cavity: The cavity cell(1), diameter (D), height (L), electric field(E).

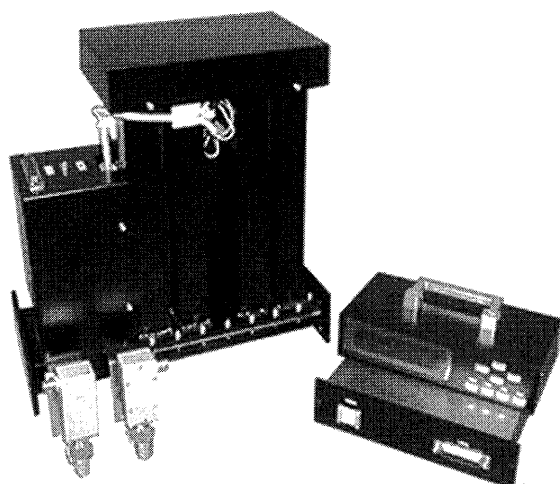


Fig. 3 Microwave auto-matching system.

とするが、負荷とのインピーダンス整合が必要であり、自動整合装置を用いる (Fig. 3).

d) クライストロンマイクロ波電源

クライストロン増幅器は大型のものもあるが、コストが高いので使用例は少ない。電力の制御、周波数安定度等制御性は極めて良い装置が実現できる。

e) その他

MG (電動発電機) 方式、ジャイロトロン方式等もあるが、ここでは詳細については述べない。

2.2.2 空管方式

a) 自励発振方式

自励発振方式は誘導結合型プラズマ電源として、従来から高周波熱プラズマ電源としては主流である[6]。この方式は、負荷コイルが発振機のタンクコイルの一部を形成しているので、負荷プラズマの変動で、周波数やパワーが影響を受ける、負荷の結合を密にすると、引き込み現象を起こして不安定になるので、注意を要する、回路の Q (Quality Factor) を高くして安定に動作させるようにするが、負荷プラズマへの電力効率が低下する、また負荷変動によって周波数が変わるので、電波法の問題も注意しなければならない。周波数の決定、装置のシールド等も設計上考慮せねばならない。

b) 他励増幅方式

小型のものは 27 MHz 帯を使用した炎光分析用プラズマトーチ電源がある。周波数は水晶制御方式により極めて安定であり、高安定なプラズマトーチが実現される。最近は大電力でも他励増幅方式にして、安定なプラズマを作る要求がある。出力段の真空管は三極管、四極管のいずれかが使用される。プラズマトーチは負荷変動が大きいので、動作が安定なグリッド接地方式の増幅器の使用がよい。

熱プラズマ装置では、負荷のガス流、試料の挿入等により、負荷インピーダンスが大きく変わり、インピーダ

Table 2 Vacuum tube for high frequency power source.

Maker \ Output	100 kW	300 kW	500 kW	1,000 kW	
Eimac	4 CW 100,000E $f=110$ (4) (W)	4 CW 300,000G 30 (4) (W)	8973 110 (4) (W)	4 CM 2500KG 130 (4) (W)	Amplifying System
Thomson	TH-581 $f=30$ (4) (W)	TH-573 30 (4) (W)	TH-518 120 (4) (W)	TH-539 30 (4) (W)	
Siemens	RS 2054SK $f=30$ (4) (W)	RS 2042SK 30 (4) (W)	RS 2074SK 30 (4) (W)	RS 2086SK 30 (4) (W)	
Richardson	YD-1212 (3) (W) $f=30$	YD-1342 (3) (W) 30			Self Oscillation System
Maker \ Output	5 kW	10 kW	30 kW	50 kW	
Richardson	YD-1160 (3) (A) $f=30$	YD-1170 (3) (A) 30	YD-1195 (3) (A) 30	YD-1197 (3) (W) 30	Self Oscillation System
Siemens	RS-3010Cj (3) (W) $f=150$	RS-3021-CL (3) (A) 120	RS-3026Cj (3) (W) 120	RS-3061Cj (3) (W) 30	

f = The maximum operation frequency (MHz)

(3) - Triode

(A) - Air cooling

(4) - Tetrode

(W) - Water-cooled

ンスのミスマッチが生ずるので、整合を取らなければならない。最近の良い自動整合装置が開発されているので、これを使用すれば、ガス流量、種類、試料の種類、試料の挿入等の負荷変動にも十分追従させることが可能である。出力電力の制御は、自励発振方式に比べると極めて容易である。自動電力制御方式（APC）と、自動整合回路（AMC）との併用で、フィードバックを行うと良好な安定度のプラズマトーチが得られる。ただし整合回路を用いる場合注意をしなければいけないことは、整合回路の損失が、負荷変動によっても変わることがあり、より正確な電力安定化には、負荷コイルの前で負荷電力の検出を正しく行う必要がある。真空管の選択は、出力電力、周波数等によって選ぶ。Table 2 に代表的な真空管を示してある。他励式は周波数が安定であるので負荷との結合を密にしても、自励発振器方式のような引き込み現象は生じないので、出力段の効率は高くできる（65～75%）が、装置が多少複雑になりコストは高くなる。

2.3 装置の実施例

2.3.1 真空管増幅方式（他励）

熱プラズマ発生用電源装置として自励発振方式が多く使用されているが、良質なプラズマを得るには、安定性、制御性のよい他励式で、自動整合装置を使用し、出力真空管はグリッド接地形増幅器方式を採用するとよい。グリッド接地形は増幅器の利得は下がるが、励振入力インピーダンスが低くなるので、負荷の変動に対して安定な増幅器動作が得られる。真空管の出力はフィーダのインピーダンス（50Ω）に整合させる回路を設け、電力の伝送は同軸管フィーダ（WX-39D）を使用している。自動整合装置は負荷コイルの近くに設けてある。整合回路に取り付けた方向性結合器で、進行波電力と反射電力を取り出し、信号の合成処理をすることにより、 $|Γ|\cos\theta$ 、 $|Γ|\sin\theta$ （ $Γ$ は負荷の反射係数）を算出して、直列容量 $C1$ 、並列容量 $C2$ をコントロールしている。 $C1$ 、 $C2$ の可変範囲で、整合可能なインピーダンス領域が決まる。負荷の変動が、この範囲内にあるよう設計しなければならない。方向性結合器で進行波電力を検出して、前段励振器へフィードバックをかけることにより、出力電力の安定化を図っている。Fig. 4に出力電力に対する負荷インピーダンスの変化の例を示す。この範囲は自動整合装置の整合範囲内にあり、電源装置の出力安定度は1%以内である。なお高周波電源装置の安定化、低リップル化は高周波増幅器の直流電源装置も重要な要素である。

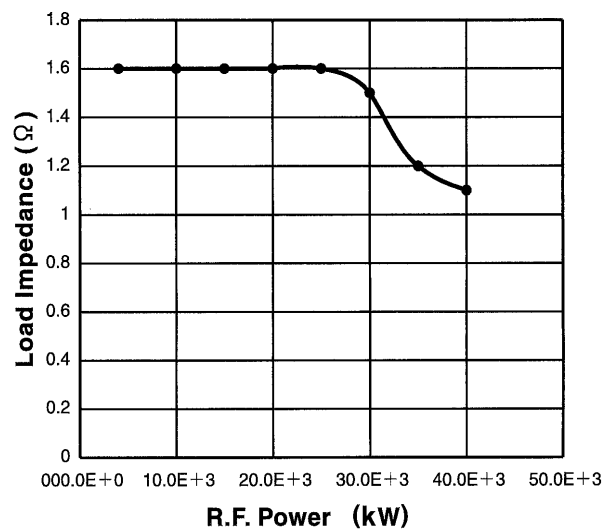


Fig. 4 RF Power vs. Load Impedance.

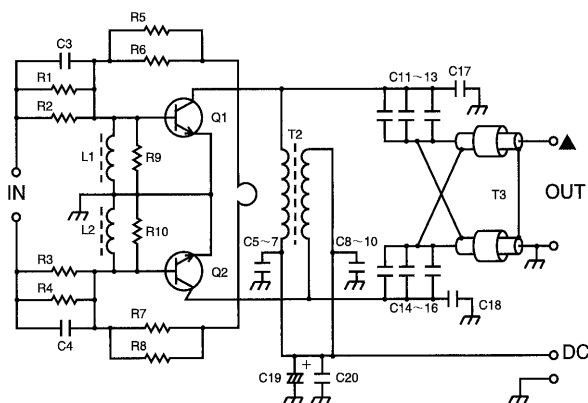


Fig. 5 Transistor power amplifier unit.

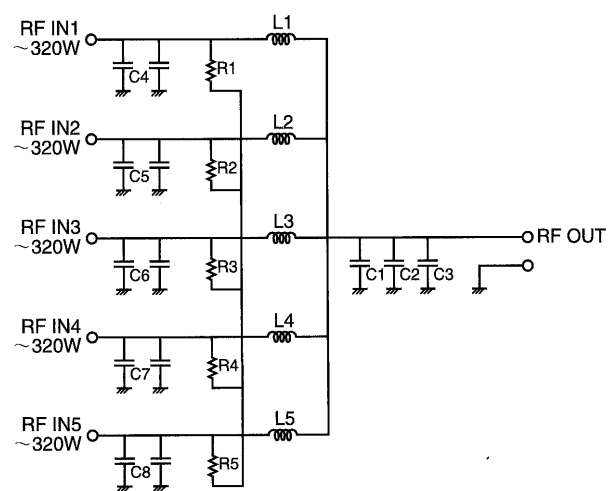


Fig. 6 Power combiner.

2.3.2 トランジスタ方式 (他励)

半導体方式は、メンテナンス、運転コストの点で有利である。トランジスタ方式の高周波電源装置は、数百 W を 1 ユニットとした増幅器基板の出力を、出力合成回路により多数合成して高出力を得るようにしている。Fig. 5 にユニット増幅器の代表的な回路を示す。トランジスタは出力インピーダンスが低いので、T3 の変成器により、インピーダンスを $50\ \Omega$ に変換している。T3 はフェライトコアと同軸線路により構成したもので、インピーダンス整合とバルーン (不平衡平衡変換器) 動作を備えている。T2 に巻いた帰還用巻き線の出力の一部を、R3, R4, R7, R8 の抵抗を通して出力トランジスタ (FET) のゲートに帰還を加えるようにしている。この回路によりトランジスタ増幅器は負荷変動に対して、安定に動作する。トランジスタ, Q1, Q2 のゲートインピーダンスは一般的に大きな容量性負荷であるので、十分低い値で励振する。トランジスタ (FET) は順方向抵抗が低い、この抵抗の温度特性は正であり、ヒートシンクの設計に注意しないと、負荷変動等により熱破壊を起こす。特に負荷の急激な変化に対し十分注意しなければならない。Fig. 6 に出力合成回路を示す。この回路は、5 合成になっている。さらに入力端子を増すことで多くの出力合成ができる。回路の R1 ~ R5 は各出力増幅器のアンバランス吸収用抵抗である。各増幅器の出力レベルと位相が異なっている場合は、この吸収抵抗に電力が加わり、合成損失を生じる。この抵抗に加わる電力、または両端の電圧をモニタすれば、増幅器のアンバランスを監視することができる。L1 ~ L5, C1 ~ C3 により合成回路のインピーダンス整合を取っている。誘導結合型プラズマは、負荷が数ターンのコイルになっているので、負荷コイルに直列にバリコンを挿入した逆 L 型の整合回路を用い、自動整合回路を構成する。

2.3.3 マイクロ波電源装置

マイクロ波を使用した熱プラズマトーチは、各種方法が考案されている。Fig. 1 に示すように容量結合型に属する方法が多い、この方式は、TM010 モードあるいはリエントラントキャビティといわれる。絶縁ガス管 (4) を通してマイクロ波が、プラズマに供給される。マイクロ波電力が大きくなりプラズマの温度が高くなると、プラズマ管の耐電力、耐熱等が問題になる。したがって、あまり大型の熱プラズマ装置には適さない。電力の大型化に対しては文献 [4] の方法がある。この方法では、TE01 モードを使用した共振器を用い、その中心に放電ガス管を配置している (Fig. 2 参照)。この共振器は円周方向

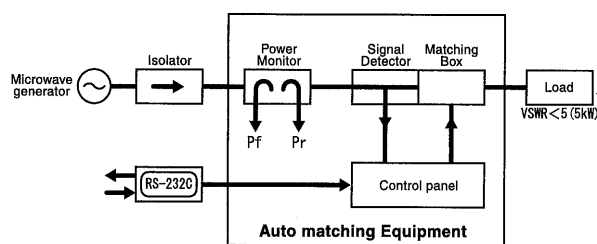


Fig. 7 Microwave power source.

に電界が生じ、共振器の中心部に磁界の最大値があるから、マイクロ波での ICP 動作になる。トーチの構造を工夫すれば、安定な熱プラズマが得られる。この方式は負荷の変動によって共振器の共振周波数が変わるので、共振をとることと、マイクロ波回路の整合を自動整合装置で常に整合させるようにすれば、安定なマイクロ波プラズマがえられる。マイクロ波熱プラズマ装置で、電力が大きくなると、伝送線路は導波管線路になる。導波管を使用するマイクロ波熱プラズマ発生装置では、自動整合装置の耐電力特性が問題となる。容量可変型スタブ整合装置では耐電力の点で難がある。Fig. 3 に示す自動整合装置は、導波管分岐型のリアクタンスを 3 ~ 4 本設けたものである。負荷 VSWR (電圧定在波比) が 10 以内において全位相整合が可能であり、耐電力、耐電圧、ともに十分大きい。マイクロ波電源装置の一例をブロックダイアグラム Fig. 7 に示す。マグネトロン出力からアイソレータを通して自動整合回路に接続している。自動整合回路の動作中に、マグネトロンの負荷が、変化して非整合状態になりモーディング (異常発振) が生じないようにになっている。マイクロ波の場合は波長が短いので、負荷までの線路長が長いとロングライン効果によって不安定になる恐れがあるので、自動整合回路は極力負荷に近い位置に取り付けることが望ましい。プラズマの電力が大きくなると、大型のマグネトロンが必要になるが、915 MHz 帯では 100 kW 程度のものはあるが 2,450 MHz 帯では 10 kW 程度である。さらに大きな電力を必要とするときは、マグネトロンの並列運転を行う方法もある。並列運転する場合は、合成するマグネトロンの周波数、位相、振幅を同じにしなければならない。マグネトロンに外部より信号を加え、PLL (位相同期ループ) 回路等を用いた注入同期が必要である。この方法は出力電力の可変範囲が狭いので、使用方法、出力の制御方法等の工夫を要する。

2.4 まとめ

高周波熱プラズマ用電源装置について各種の方式を述

べた。熱プラズマ用高周波電源装置はトーチや、用途に応じた最適な方式を採用し、熱プラズマ装置全体として必要な性能の実現により、将来産業利用が盛んになることを期待する。

参考文献

[1] T.B. Reed, J. Appl. Phys. 32, 2534 (1961).

[2] 亀山哲也, 坂中健治, 角田達郎, 本江明弘, 福田健三:

化学技術研究所報告 (1991) Vol.86, p.315.

[3] M. Kanda, *Proc. JPN. Symp. Plasma Chem.* (1990) p.3.

[4] 篠原己拔, 吉田豊信: 特公平 6-93397.

[5] 篠原己拔: プラズマ材料科学ハンドブック, 日本学術振興会プラズマ材料科学第153委員会編 (オーム社, 1992).

[6] 篠原己拔: 「高周波による超高温の発生・計測・利用技術に関する調査」報告書, 科学技術庁無機材質研究所編 (1985).