

3. 誘導結合プラズマ

中村 圭二, 菅井 秀郎
(名古屋大学大学院工学研究科)

Inductively-Coupled Plasma

NAKAMURA Keiji* and SUGAI Hideo

Graduate School of Engineering, Department of Electrical Engineering, Nagoya University, Nagoya 464-8603, Japan

(Received 16 December 1997)

Abstract

This paper briefly reviews the diagnostics of inductively-coupled plasmas (ICP) from the viewpoint of power-transfer efficiency ξ , which is the ratio of net power deposited into plasma to total power into the matching network. The ICP is produced by a conventional external antenna and a plasma-immersed internal antenna. The measurements of ξ reveal that, even in ICPs, the power transfer to the plasma is governed by capacitive coupling in the low-density region ($< 10^9 \text{ cm}^{-3}$), but that an inductive coupling becomes dominant as the electron density increases. The measured density dependence of ξ agrees with the theoretical dependence predicted by an equivalent circuit model with a stochastic heating process taken into account. The internal antenna has a higher power transfer efficiency than the external antenna. A significant density jump observed in the external antenna is caused by the mode transition between a capacitive and an inductive discharge, and a mechanism for the density jump is explained well in terms of the density dependence of the power-transfer efficiency.

Keywords:

inductive coupling, capacitive coupling, stochastic heating, power transfer efficiency, density jump

3.1 はじめに

誘導放電は“無電極放電”とも呼ばれ、以前から原子発光分析、プラズマトーチのほか、重合膜の作製などにも用いられてきた。その中で、1980年代後半に入ってから、この誘導結合型プラズマ (ICP) がプロセスの分野で見直されるようになった。それは、数十 mTorr 以下の比較的低い圧力でも密度が高く、かつ大口径のプラズマが得られることがわかってきたからである[1,2]。

ICP の最大の特徴は電磁石などを必要とせず無磁場で動作できる点にある。そのため、装置の縦と横の比、すなわちアスペクト比が大きくなり、大口径にもかかわらず比較的コンパクトな装置にできる。また薄膜の微細加工の観点からも無磁場での動作は、磁場とプラズマの相

互作用に起因して発生するデバイスダメージの問題を回避できるなどのメリットがある (ただし、最近では磁場以外の原因でも発生することがわかってきている)。

誘導結合プラズマでは、字のごとく、高周波電流により発生する誘導電界がプラズマ生成の主役である。しかし、実際のプラズマ源では誘導電界の他に、アンテナ導体に印加する高周波電圧による静電界も同時に発生しており、インダクティブな誘導結合とキャパシティブな静電結合が混在している。この静電結合はアンテナ周りの誘電体材料のスパッタリングを引き起こし、プロセス劣化の原因となる[3]。また従来から、プラズマ密度が低いときは静電結合により (Eモード放電)、密度が高いときは誘導結合により (Hモード放電) プラズマが生成

*corresponding author's e-mail: nakamura@nuee.nagoya-u.ac.jp

されているといわれているものの、この2つの結合がそれぞれどの程度プラズマ生成に寄与しているか、あまり十分理解されていない。

本講座では、アンテナ形式による違いを比較しながらICPのプラズマ生成特性を示し、ICPにおけるアンテナ-プラズマ結合形態を明らかにするための実験や解析例を紹介する。さらに、プラズマを生成する際にしばしば問題となっている密度ジャンプについて、アンテナ結合の観点から考察してみたい。

3.2 アンテナ形式

アンテナコイルに高周波電流を流して誘導結合プラズマを生成するのに、様々なタイプのアンテナが用いられている。いくつかの例を Fig. 1 に示す。(a) は真空容器の外側に設置された平面型のスパイラルアンテナで、ウェハ-のプロセスにはシート状のプラズマで十分であるという発想から生まれたものである。このアンテナを用いて生成されたICPは、TCP (Transformer Coupled Plasma) とも呼ばれている。一方、(b) はプラズマの内部に挿入される形のアンテナで、(a) に比べてプラズマに接する誘電体の面積が少ないので、そこからの不純物発生は最小限に抑えられる。この他に、誘電体チューブに巻きつけるヘリカルアンテナや、アンテナインピーダンスを低減させるためにいくつかのスパイラルアンテナを並列接続したマルチスパイラルアンテナなどもあるが、大別するとICP用のアンテナは真空容器の外に置く外部アンテナ方式と、容器内部に設置する内部アンテナ方式に分けることができる。

3.3 プラズマ生成特性[4]

内径 50 cm の真空容器の中に内部アンテナ (直径 18 cm, 1 回巻き) を、また厚さ 2 cm の石英窓を介して大気側に外部アンテナ (内部アンテナとまったく同じサイズ) を設置し、外部アンテナと内部アンテナの違いを比較した。Fig. 2 はアルゴン 2 mTorr における放電用高周波パワー (13.56 MHz) と電子密度の関係を示している。パワーとともに内部アンテナではなめらかに密度は上昇していくが、外部アンテナでは 200 W 付近で 1 桁程度電子密度が急激にジャンプする。ジャンプ後の密度は内部アンテナとほぼ同じである。この密度ジャンプの現象はガス圧力を変えたときにも観測される。Fig. 3 に示すように、0.2 mTorr から 10 mTorr まで圧力を上げると内部アンテナでは電子密度はなめらかに変化するのに対し、外部アンテナでは 0.2 mTorr から 1 mTorr の

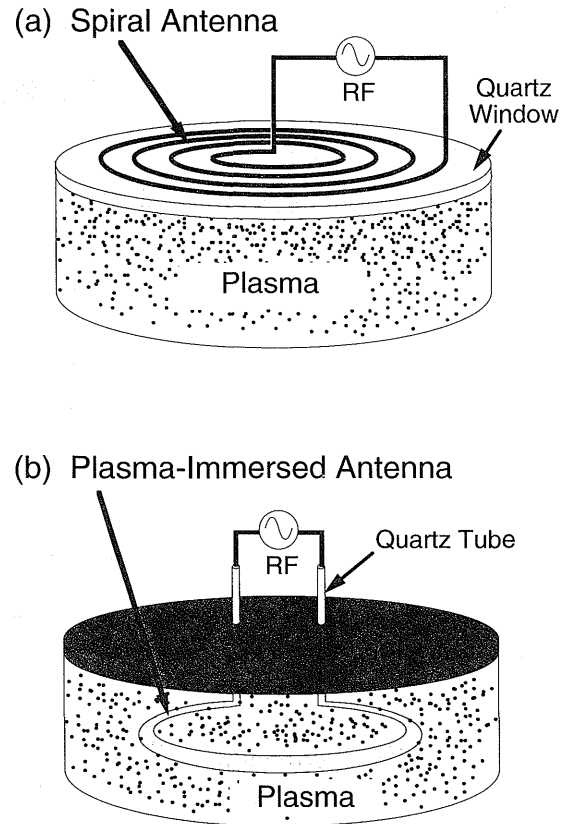


Fig. 1 Various antennas for ICP.

間でやはり急激に電子密度が上昇する。密度ジャンプの発生メカニズムは第3.5項で述べる。安定かつ広いプロセスの領域を確保するには、このような密度ジャンプをできるだけなくし、プラズマを連続的に制御できるのが望ましいので、特に外部アンテナでは注意を要する。

3.4 静電結合および誘導結合によるパワー吸収 [4]

前節で示した密度ジャンプに深い関わりをもつ静電結合と誘導結合を評価するために、プラズマへのパワー伝送効率について考えてみよう。電源からの高周波パワーは、整合器を介してアンテナに供給され、通常、反射がゼロになるように整合器を調整する。このとき、整合器に送られた正味のパワー P_{RF} が、すべてプラズマにはいるわけではないことに注意しなければならない。すなわち、アンテナまたは整合器には抵抗分があるのでジュール損失が発生しており、そこでの損失パワー P_{loss}

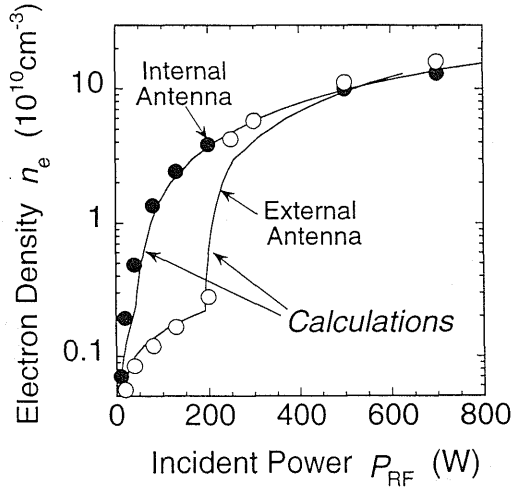


Fig. 2 Power dependence of electron density n_e .

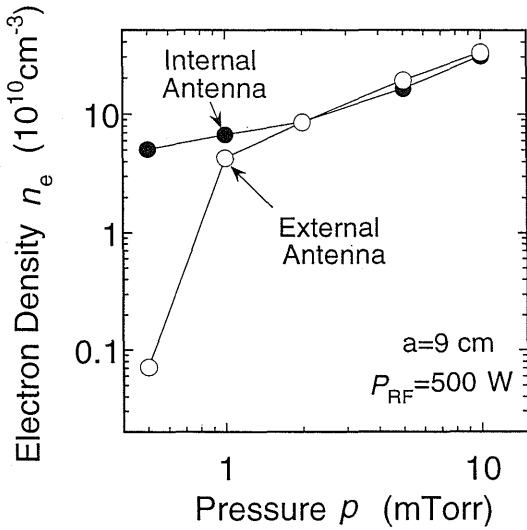


Fig. 3 Pressure dependence of electron density n_e .

を入射パワー P_{RF} から差し引いたパワーがプラズマに吸収される正味のパワー P_{abs} となる。したがってこの放電系全体のパワー伝送効率 ξ は

$$\xi = P_{abs}/P_{RF} = (P_{RF} - P_{loss})/P_{RF} \quad (1)$$

と定義することができる。

Fig. 4 は、そのパワー伝送効率 ξ と電子密度の関係を表しており、Fig. 4(a) は実験から得られたものである。図中の○と●はテストアンテナ法を用いたときの結果である。たとえば外部アンテナの ξ (●) を求める場合、数百 W のパワーにより内部アンテナでプラズマを生成しておき、外部アンテナに小さなパワー ($P_{RF}=3$ W) を加えてアンテナ電流 I_{RF} を測定する。予め測定してお

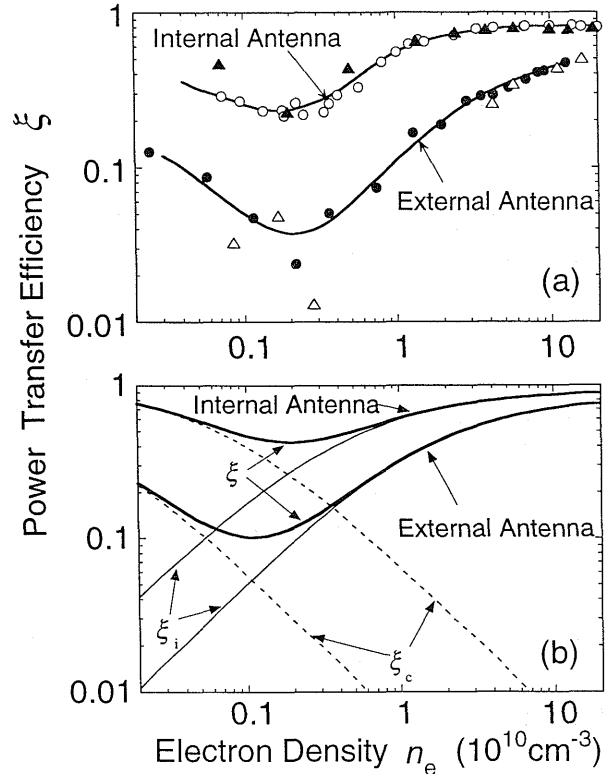


Fig. 4 Relationship between power transfer efficiency ξ and electron density n_e .

いたアンテナ抵抗 R_a を使い、プラズマに吸収されたパワーを $P_{abs} = P_{RF} - P_{loss} = P_{RF} - R_a I_{RF}^2$ より計算して ξ を求める。内部アンテナの ξ (○) を求める場合も外部アンテナの時の場合と同様にして、外部アンテナを放電に、そして内部アンテナをテストアンテナに用いる。

この結果より、内部アンテナの方が数倍程度パワー伝送効率がよく、内部アンテナも外部アンテナも $n_e = 2 \times 10^9$ cm^{-3} 付近で ξ は極小値をとることがわかる。また、外部アンテナに静電シールドを施すと $n_e < 2 \times 10^9$ cm^{-3} での効率 ξ が著しく減少したので、極小値よりも低い密度領域では主に静電結合でパワーが吸収され、それより高い密度では主として誘導結合でパワーが入ることがわかった。一方、数百 W のパワーを印加して放電用アンテナに用いたときの外部アンテナおよび内部アンテナの効率 ξ (それぞれ△, ▲) も Fig. 4(a) にあわせてプロットすると、テストアンテナとして用いた場合とほぼ一致しており、数百 W 程度ならばパワー供給に伴う非線形効果はほとんど無視できることがわかる。

このようなパワー伝送率は Fig. 5 に示すような等価回路によっても計算できる。たとえば誘導結合について考えてみると、外部アンテナの場合、アンテナ電流に

よって生じる誘導電界はアンテナ電流と同じ θ 方向を向いているので、アンテナ直下のドーナツ状のプラズマ領域（厚さは表皮深さ程度）に渦電流が流れる。すなわちこの結合は、アンテナを1次巻線、ドーナツ状プラズマを2次巻線 (L_p, L_e, R_p) とするトランス結合と見なすことができる。1次巻線におけるアンテナのインダクタンス L_a と抵抗 R_a は既知なので、2次巻線におけるプラズマ抵抗 R_p （衝突加熱および無衝突統計加熱を考慮）、プラズマ電流の形状によって決まる幾何学的インダクタンス L_g 、電子の慣性インダクタンス L_e および巻線間の相互インダクタンス M を計算し、Fig. 5(a)の等価回路を解析すると、誘導結合によるパワー伝送効率 ξ は Fig. 4(b)の細かい実線のようになる。一方、アンテナ導体に印加された高周波電圧 V_{RF} が誘電体窓のキャパシタンス C_d およびシースキャパシタンス C_s を通してプラズマ抵抗 R_s に分圧されるので、静電結合によるパワー伝送効率 ξ_c も Fig. 5(b)の等価回路の解析より Fig. 4(b)の細かい破線のように計算できる。最終的に両者を合わせた全体としての効率 ξ ($=\xi_1+\xi_c$) は Fig. 4(b)太い実線のようになり、Fig. 4(a)の実験データとよく一致している。

これらの解析結果から、外部アンテナと内部アンテナで最も異なるのは、アンテナとプラズマ間の相互インダクタンスにあることが示された。すなわち、内部アンテナの方がアンテナ周りにできるほとんどの磁力線がプラズマと鎖交するため、プラズマとの相互インダクタンスが大きい。したがって、内部アンテナのパワー伝送効率が高い理由は、プラズマ内に誘導電流を流すためのアンテナ電流を小さくでき、アンテナでのジュール損失が抑えられる点にある。このようにプラズマへのパワー伝送効率を高くするには、プラズマ-アンテナ間の相互インダクタンスを高めるとともに、アンテナ抵抗をできるだけ小さくして、ジュール損失を減らすことが重要である。

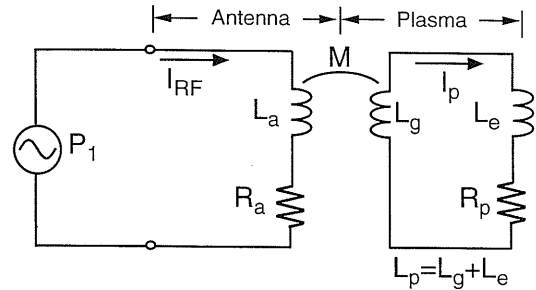
3.5 密度ジャンプの発生機構[4]

密度ジャンプのメカニズムについて考察するために、まずプラズマにおけるパワーバランスについて考えてみる。定常状態では、整合器に供給される正味のパワー P_{RF} のうちプラズマに伝送されるパワー $P_{tr} = \xi P_{RF}$ ($\xi(n_e)$ は Fig. 4に示すように電子密度 n_e の関数) はプラズマで損失するパワー P_{dis} と等しいので、

$$P_{RF}/\xi(n_e) = P_{dis} \quad (2)$$

であり、損失パワー P_{dis} としてイオンによる壁での損

(a) Inductive Coupling



(b) Capacitive Coupling

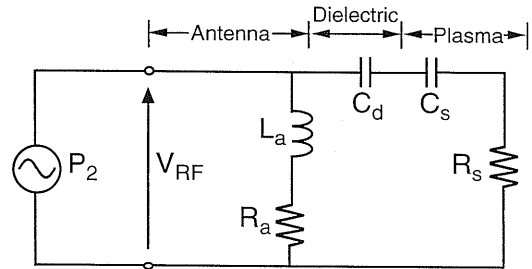


Fig. 5 Equivalent circuit model for (a) inductive coupling and (b) capacitive coupling.

失を考えると、

$$P_{dis} = (eu_B \epsilon_T A W) n_e \quad (3)$$

と書ける。ただし u_B はボーム速度、 ϵ_T は1個のイオンが壁へ持ち去る全エネルギー[5]、 A_W は壁の面積である。したがって、式(2)、(3)より P_{dis} を消去すると式(4)の非線形方程式が得られる。

$$n_e = \xi(n_e) (eu_B \epsilon_T A W)^{-1} P_{RF} \quad (4)$$

これを数値的に解くと、Fig. 2中の実線で示すような n_e と P_{RF} についての理論曲線が得られ、実験結果をよく説明している。

このことを模式的に示したものが Fig. 6である。Fig. 6では、 P_{tr} と P_{dis} が電子密度 n_e の関数として示されており、これらの直線の交点が $P_{RF} (= P_{tr}/\xi)$ における密度 n_e を与える。たとえば P_1 から P_6 まで上昇させたとき、Fig. 6は両対数グラフなので、 P_{tr} は $\xi(n_e)$ と同じ形の密度依存性を保ったまま上にシフトしていく。このとき P_1 から P_3 までRFパワーを上昇させて交点1, 2, 3で得られる電子密度の増加割合に比べて、 P_3 から P_4 まで上昇させたときの密度増加割合が大きくなっている。

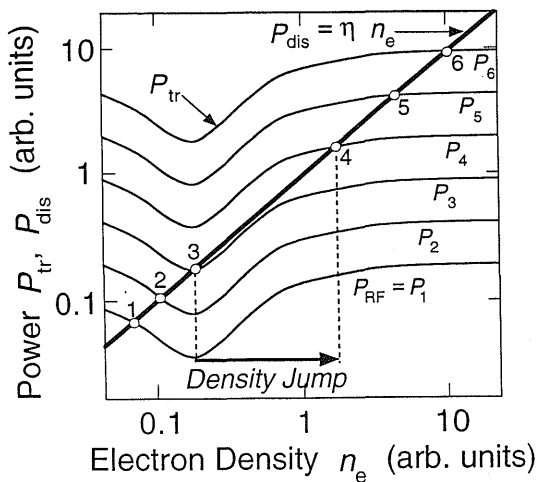


Fig. 6 Mechanism of density jump.

これがプラズマの生成機構が静電結合から誘導結合に移るのに伴う密度ジャンプの発生メカニズムである。密度ジャンプは P_{tr} の傾きが P_{dis} の傾きよりも大きくなるときに発生し、その傾きの差が大きいほど、激しい密度ジャンプとなる。実際、Fig. 4 に示したパワー伝送効率 ξ から明らかのように、傾きの差は、顕著な密度ジャンプが観測される外部アンテナの方が内部アンテナよりも大きくなっている。

3.6 おわりに

内部アンテナおよび外部アンテナで誘導結合プラズマを生成し、そこでのアンテナ・プラズマ結合について述べた。低密度領域では主に静電結合が、また高密度領域では誘導結合が支配的であり、特に外部アンテナで観測された密度ジャンプは、パワー吸収機構が静電結合から誘導結合に移るときに生じることが示された。ここではアンテナ結合の指標としてプラズマへのパワー伝送効率を用いたが、これは実際のプロセス用プラズマ源においても簡単に導入できる指標の一つであり、最適なアンテナ設計をして高効率な密度制御を行う上で有用であろう。

今後さらに誘導結合プラズマの用途を広げるには、静電結合の抑制・制御が一つのカギとなる。内部アンテナと外部アンテナを比較すると、内部アンテナの方が大きなパワー伝送効率を持っているにもかかわらず電子密度

は外部アンテナと同程度であった。この原因の一つは、内部アンテナでは誘導結合とともに静電結合も強いためにプラズマ電位が上昇し、プラズマにおける損失パワーが大きいことがあげられる [4]。いいかえれば、静電結合の抑制により高密度化が期待できる。一方、現在の誘導結合プラズマでは、低電位の安定なプラズマを得るために、石英などの絶縁物によりアンテナ導体をプラズマから隔てており、これはアンテナとの静電結合を制御していることに他ならない。しかしこの方法をそのままメタルのような導電性薄膜のプロセスに適用した場合、絶縁物が導電膜で覆われてしまい、渦電流損などにより誘導結合によるプラズマへのパワー供給が阻害される。最近これを打破するために、高周波電流が流れるアンテナ導体に直流電流を重畳することにより、磁氣的に静電結合を抑制する方法が提案され、絶縁物を用いなくても低電位で安定な高密度プラズマが得られることが示された [6]。このように、新しいプロセスに誘導結合プラズマを応用していくには、これからも静電結合の制御法の開発が重要であろう。

紙面の都合で十分紹介できなかった部分については、最近の ICP に関する解説やレビューを参照していただきたい [7, 8]。

参考文献

- [1] J.B. Keller, *Abstr. 42nd Gaseous Electronics. Conf.*, Palo Alto p.193 (1989).
- [2] T. Shirakawa, H. Toyoda and H. Sugai, *Jpn. J. Appl. Phys.* **29**, L1015 (1990).
- [3] H. Sugai, K. Nakamura and K. Suzuki, *Jpn. J. Appl. Phys.* **33**, 2189 (1994).
- [4] K. Suzuki, K. Nakamura and H. Sugai, *Plasma Sources Sci. Technol.* **7**, 13 (1998).
- [5] M.A. Lieberman and A.J. Lichtenberg, *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*, New York, Wiley (1994).
- [6] K. Nakamura, Y. Kuwashita and H. Sugai, *Jpn. J. Appl. Phys.* **34**, L1686 (1995).
- [7] J. Hopwood, *Plasma Sources Sci. Technol.* **1**, 109 (1992).
- [8] 菅井秀郎: *応用物理* **63**, 559 (1994).