

スパイラル状コイルによる高周波放電プラズマの 管軸方向電子密度分布と電界強度分布

長 濱 治 男*

On Axial Distributions of Electron Density and Electric Field Strength of R.F. Discharge Plasma caused by the Spiral Heating Coil

Haruo NAGAHAMA

It has been observed experimentally that He-Ne laser powers passed through transitional stages during transitions from weak glow-like to intense arc-like R.F. discharges are increased. But the amplification factor A is small, maximum value of A is 1.05. So in order to improve the amplification factor, the spiral heating coil is specially made. In this paper the relations between the electron density distribution and the discharge configuration and the electric field strength in axial direction of R.F. discharge plasma caused by spiral coil are discussed.

1. まえがき

誘導結合型高周波放電がグロー状からアーク状へ移行する過渡状態（以後、 $G \rightarrow A$ 移行と略記する）では、高周波に対するプラズマの等価コンダクタンス σ が負になる。この不安定性のためにプラズマ中の高周波電界の振幅が増幅され、この強い電界により電離が促進される結果、アーク状放電に移行する。この $G \rightarrow A$ 移行状態中では、印加高周波以外の多くの種類の空間電荷振動がプラズマ中に励起されている。この状態のプラズマに外部からマイクロ波を入射し、プラズマを透過した透過マイクロ波電力を測定した結果、電力が増大することを実験的に確かめた¹⁾。高周波放電プラズマを周波数の高いマイクロ波からレーザの領域のすべての電磁波に対する増幅器として応用する目的で、波長632.8 nm、出力15 mWのHe-Neガスレーザを入射し、プラズマを透過してきた透過レーザの電力をpin形Siホトダイオードを介し光パワーメータで測定した結果、透過レーザの電力がわずか1.05倍であるが増大していることが、実験的に確認された²⁾。

レーザとプラズマの相互作用を活発にさせ増幅率を高める目的で、レーザの伝播方向と同じ方向にプラズマ電子密度の勾配を強制的に発生させることのできるスパイラル状の加熱コイルを作った。この巻線半径の異なるスパイラル状のコイルを用いて誘導結合型高周波放電プラズマを生成し、放電管の管軸方向の電子密度分布および放電の発光形態を測定した。また、スパイラル状コイルを一種のアンテナとみなし、ポインティングベクトルの式からスパイラル状コイル直下の管軸方向の電界強度分布を求めた。また、電子密度分布と発光形態および電界強度分布の定性的関係を検討した結果よい一致が得られた。

2. 実験装置および実験方法

図1は実験装置の概略図である。放電管は外径30 mm ϕ 、長さ800 mmの石英ガラス管で両端をOリングで真空止めできる金属製アダプターに接合されている。スパイラル状コイルは、直径6 mm ϕ の軟銅パイプを最大内径71 mm ϕ 、最小内径35 mm ϕ 、巻き数8回、長さ7 cmに巻いたものである。また、複探針は直径0.5 mm ϕ のタングステン線を先端の長さが2 mmだけ露出させ、それ以外の部分はガラス細管で被覆絶縁した単探針を2本探針間隔4 mm離して束ねたものであり、スパイラル状コイル直下の放電管軸方向の電子温度分布および電子密度分布の測定に使用する。13.5 MHz高周波発振器の出力は0から2 kWまで連続的に可変することができる。また、この出力は通過形電力計にて計測することができる。試料ガスは純度99.999%のHeガスとNeガスを用いている。

* 電気工学科

スパイラル状コイル直下の管軸方向の電子温度および電子密度分布の測定は、スパイラル状コイルの最大内径位置 (Z_0) と最小内径位置 (Z_7) および Z_4 位置から 4 cm コイル内に入った位置 (Z_4) の 3 か所で、複探針法により行う。実験を行う前に真空系を油拡散真空ポンプにて 1.0×10^{-5} Torr (1.33×10^{-3} Pa) 程度に排気した後、試料ガスを所定のガス圧に調整して封入する。その後、所定の電力になるよう 13.5 MHz 高周波発振器を動作させ、上記 3 箇所の電子密度、電子温度分布の測定および放電の発光形態の観測を行う。

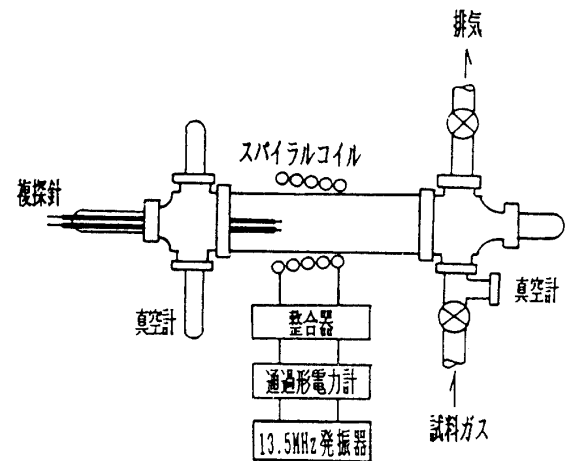


図1. 実験装置の概略図

3. 実験結果

図2は、プラズマの吸収電力 P_a ($=$ 高周波発振器の入射電力計の指示値 P_i - 反射電力計の指示値 P_r) が 80 W、試料ガスが He ガスと Ne ガスの場合のスパイラル状コイル直下の放電管の管軸方向電子密度分布の測定結果の一例である。He ガス、Ne ガスの場合とも、スパイラル状コイルの最小内径位置 (Z_7) での電子密度が高く、最大内径位置 (Z_0) での電子密度が低くなっている。最小内径位置 (Z_7) から最大内径位置 (Z_0) の方向に電子密度の勾配が生じている。図3、4は He ガスおよび Ne ガスの場合のスパイラル状コイル直下の各位置における電子密度とプラズマの吸収電力 P_a の関係の測定結果である。同じプラズマの吸収電力のとき、スパイラル状コイルの Z_7 位置の電子密度が高く、 Z_0 位置の電子密度が低いことがわかる。図5は、He、Ne ガスを用いた場合のスパイラル状コイル直下の管軸方向の電子温度分布の測定結果である。コイルの最小内径位置 (Z_7) では電子温度が高

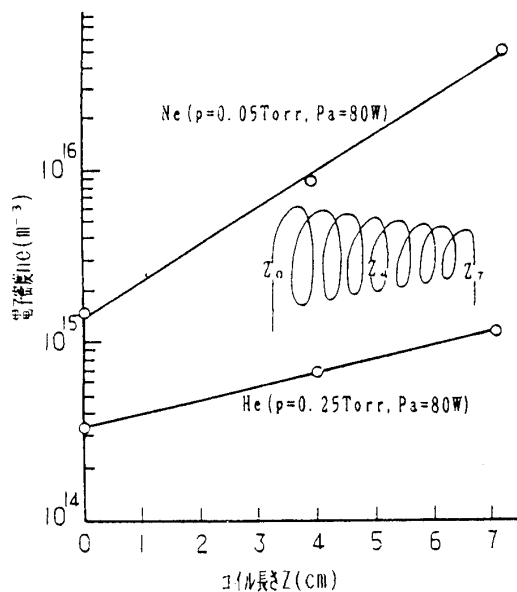


図2. 電子密度の管軸方向分布

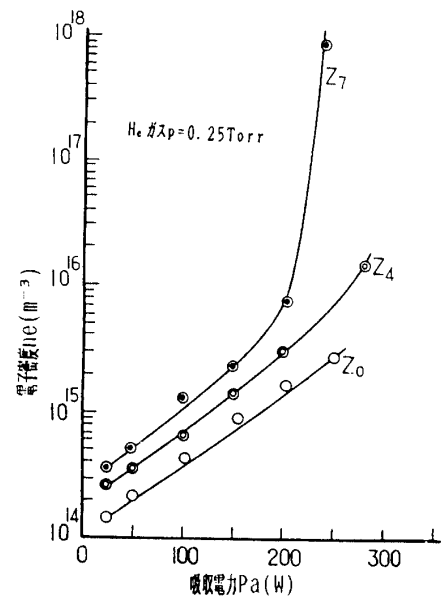


図3. 電子密度とプラズマの吸収電力の関係

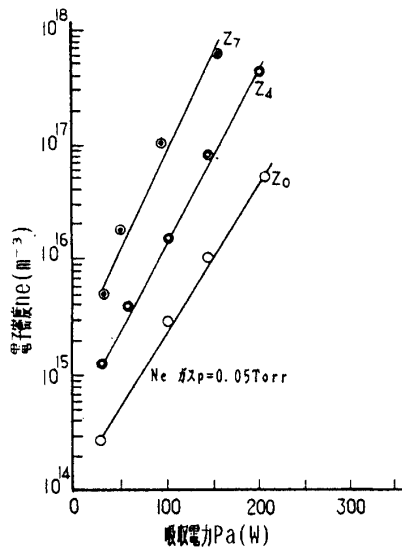


図4. 電子密度とプラズマの吸収電力の関係

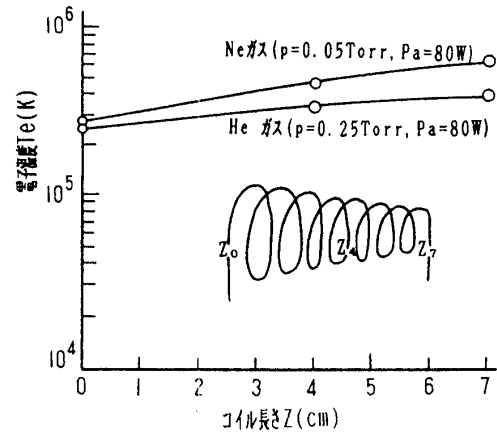


図5. 電子温度の管軸方向分布

く、最大内径位置 (Z_0) では電子温度が低く、最小内径位置から最大内径位置に向けて電子温度の勾配が生じている。電子温度は、プラズマ電子が単位時間当たり高周波電界から吸収するエネルギーと衝突によって消失するエネルギーの差に依存するので、最小内径位置で電界強度が大きくなることが推察される。また、図6は放電の発光形態の写真である。スパイラル状コイルの最小内径位置 (Z_7) での半径方向の発光領域の広がりほぼ全域で、最大内径位置 (Z_0) では放電管軸の中心付近だけであり、 Z_7 位置から Z_0 位置に向けて放電の発光状態に傾きが生じている。この発光形態の違いは電離状態の違いに基づくものであるので、コイル最小内径位置の電界強度が大きく、最大内径位置の電界強度が小さくなる結果と考えられる。

4. 検 討

実験結果からスパイラル状コイルの最小内径位置 (Z_7) の電界強度が大きく、最大内径位置 (Z_0) の電界強度が小さくなることが推察された。このため、どの程度の電界の傾きが生じているかを、スパイラル状コイルを一種のアンテナとみなし、ポインティングベクトルの式からスパイラル状コイル直下の放電管壁上の電界強度分布式を導出し調べる。

ポインティングベクトル P は

$$P = E \times H \quad (1)$$

である。

今、高周波電磁界は時間的に $\exp(j\omega t)$ で振動しているとする、高周波電界 E_1 は

$$E_1 = E_{10} \exp(j\omega t) \quad (2)$$

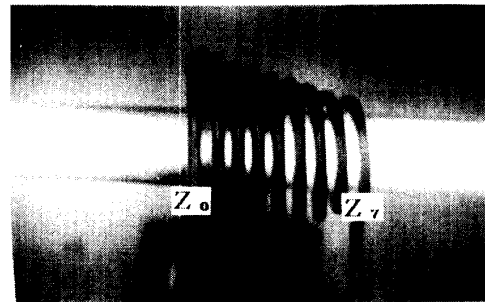


図6. スパイラル状コイルと放電の発光形態
(Heガス、 $p=0.25$ Torr、 $P_a=30$ W)

で、高周波磁界 H_1 はMaxwell の電磁方程式 $r \circ t E = - \partial B / \partial t$ より

$$H_{1z} = j \frac{1}{\mu_0 \omega r} (E_{1\theta} + r \frac{\partial E_{1\theta}}{\partial r}) \quad (3)$$

で表すことができる。

また、Maxwell の電磁方程式

$$\left. \begin{aligned} r \circ t E &= - \mu_0 \frac{\partial H}{\partial t} \\ r \circ t H &= \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} + J \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

を円筒座標系で解くことから

$$\frac{\partial^2 E_{1\theta}}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\xi} \cdot \frac{\partial E_{1\theta}}{\partial \xi} + (1 - \frac{1}{\xi^2}) E_{1\theta} = 0 \quad (5)$$

のベッセルの微分方程式が得られる。ただし、 $\xi = A r$ 、 $A = \omega / c$ である。 $r = a$ (ただし、 a は放電管の半径)

で、 $E_{1\theta} = E_a$ (ただし、 E_a は放電管壁部の電界強度) の境界条件で (5) 式を解くと、

$$E_{1\theta} = E_a \frac{J_1 \left(\frac{r \omega}{c} \right)}{J_1 \left(\frac{a \omega}{c} \right)} \quad (6)$$

が得られる。ただし、 c は光速である。また、(6) 式を (3) 式に代入すると、

$$H_{1z} = j \frac{E_a}{\mu_0 c} \cdot \frac{J_0 \left(\frac{r \omega}{c} \right)}{J_1 \left(\frac{a \omega}{c} \right)} \quad (7)$$

が得られる。(6)、(7) 式を (1) 式に代入することから、 $r = a$ の放電管壁部におけるポインティングベクトルの大きさ P は、

$$P = |E| \cdot |H| = E_a^2 \cdot \sqrt{\epsilon_0 / \mu_0} \cdot \frac{J_0 \left(\frac{a \omega}{c} \right)}{J_1 \left(\frac{a \omega}{c} \right)} \quad (8)$$

となる。

13.5 MHz の高周波電力は、放電管上に巻かれたコイルからプラズマに供給されている。そして、この電力は高周波発振器の入射電力計 P_i で測定されているので、

$$P_i = 2 \pi a l_n P \quad (9)$$

の関係が成り立つ。ただし、 l_n はコイルの長さである。それゆえ、(8)、(9) 式から

$$P = \frac{P_i}{2 \pi a l_n} = E_a^2 \cdot \sqrt{\epsilon_0 / \mu_0} \cdot \frac{J_0 \left(\frac{a \omega}{c} \right)}{J_1 \left(\frac{a \omega}{c} \right)} \quad (10)$$

が得られる。

今、実験条件は $f = 13.5$ MHz、 $a = 1.5$ cm であるので、 $a \omega / c \ll 1$ となるから、ベッセル関数 J_0 および J_1 は

$$\left. \begin{aligned} J_0(a \omega / c) &\cong 1 \\ J_1(a \omega / c) &\cong a \omega / 2 c \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

の近似式で表わされるようになるので、(10) 式を E_a についての式に書き直すと、

$$E_a = \left(\frac{\mu_0 f P_i}{2 l_n} \right)^{1/2} \quad (\text{V/m}) \quad (12)$$

が得られる。しかし、スパイラル状コイルでは、巻線半径が場所によって異なっているから、このことを考慮しなければならない。このため、 l_n にコイルの長さ 7 cm と最小内径位置 (Z_7) を基準に Z_4 および Z_0 位置までの長

さの比を代入し、(12)式を計算すると最小内径位置(Z_7)、中間位置(Z_4)および最大内径位置(Z_0)における電界強度 E_a を求める式として、

$$E_{a0} = 2.91 \sqrt{P_i} \quad (\text{V/m}) \quad (13)$$

$$E_{a4} = 4.37 \sqrt{P_i} \quad (\text{V/m}) \quad (14)$$

$$E_{a7} = 11.07 \sqrt{P_i} \quad (\text{V/m}) \quad (15)$$

が得られる。

図7は、図6のプラズマの吸収電力 P_a が30Wのとき、入射電力 P_i は120Wになるので、この値を(13)式から(15)式にそれぞれ代入し、 Z_7 、 Z_4 、 Z_0 位置における電界強度の値を求めた結果である。最小内径位置(Z_7)の電界強度は最大内径位置(Z_0)のそれよりも3.8倍大きく、最小内径位置から最大内径位置に向けて電界の傾きが生じている。この電界の傾きは、放電管軸方向の電子密度分布および発光形態と定性的によく傾向が一致している。

図8は、図6の放電形態の写真を福井工業大学画像処理システム(PIAS-Ⅲ)にて、発光強度の濃淡が明確になるように画像処理したものである。最小内径位置における半径方向の発光の広がり最大内径位置での発光の広がりを比較してみると、最小内径位置の発光領域は最大内径位置のそれよりも約3.75倍広がっている。この値はポインティングベクトルから求めたスパイラル状コイル直下の電界強度分布を調べた図7から得られた3.8倍の値と極めてよく一致している。

しかし、実際放電管内部に生じる高周波電界はコイルと放電管との結合度等に影響されるので、理論的に算出し図7に表示した値よりも小さくなるものと思われる。

5. 結 言

誘導結合型高周波放電プラズマとHe-Neガスレーザとの非線形相互作用によるHe-Neガスレーザの増幅について研究を行なっているが、その増幅度は極めて小さい。このため、レーザとの相互作用を強め増幅度を高める目的で、レーザの伝播方向と同じ方向にプラズマ電子密度の勾配を強制的に発生させるための巻線半径の異なるスパイラル状の加熱コイルを製作した。スパイラル状コイル直下の放電管軸方向の電子密度分布を測定した結果、コイルの最小内径位置から最大内径位置に向けて電子密度勾配が生じていることがわかった。また、このコイルを一種のアンテナとみなし、ポインティングベクトルの式からスパイラル状コイル直下の放電管壁部の電界強度を求める式を導出した。そして、電界強度の管軸方向分布を算出し、スパイラル状コイル内の管軸方向の発光形態と定性的に比較した結果、電界強度分布と発光形態はよく一致することがわかった。

今後はこのスパイラル状コイルを用いてHe-Neガスレーザの増幅実験を行い、スパイラル状コイルの効果を確認していきたい。

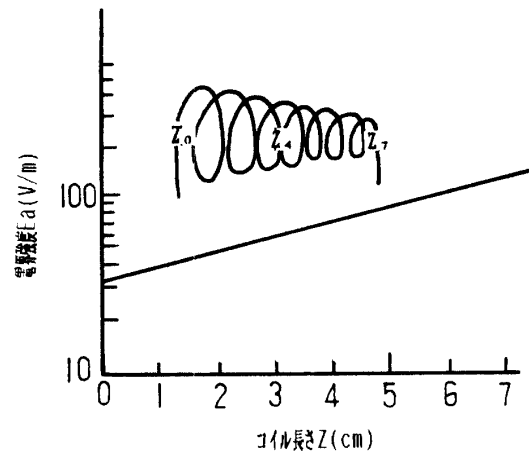


図7. 放電管軸方向電界強度分布
 ($P_i = 120\text{W}$ の場合の計算値)



図8. 画像処理後の放電の発光形態

本研究は、福井工業大学特別研究費制度で行われたものであることを明記し、深く感謝致します。また、終始有益なご助言、ご指導頂きました関西大学工学部電子工学科教授高元曄夫博士に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 長濱、高元：核融合研究、61巻4号(1989)、258
- 2) 長濱、高元：平成4年度電気関係学会北陸支部連合大会、A-64

(平成5年12月9日受理)