

2種類の高周波電界重畳による高電子密度 プラズマの生成

長 濱 治 男*

Creation of High Electron Density Plasma due to Two Kinds of Superposed High Frequency Fields

Haruo NAGAHAMA

Effects of superposing two applied fields with different frequencies on transition voltage V_c from glow-like to arc-like R.F. discharge have been studied by using the inert gas. As a result of experiment, V_c of lower high frequency has dropped by the superposed effect in the low pressure region ($\omega > \nu$) but V_c has not dropped in the high pressure region ($\omega < \nu$).

This paper describes the relation between of plasma electron density of lower high frequency discharge space and superposed upper high frequency powers.

1. まえがき

周波数が13.5 MHzや27 MHzの無線周波数帯の高周波でプラズマを生成する誘導結合型高周波無電極放電は、電極から放出される不純物の影響が除去されるため、近年アモルファス太陽電池やDRAMなど超LSI製造のエレクトロニクス分野および新素材開発のためのプラズマプロセスなどに応用されている一方、オゾンホール生成の原因とされているフロンガスを分解する方法として急速に脚光を浴びている。

筆者は、従来から誘導結合型高周波放電で生成されるグロー状放電およびアーク状放電の放電特性やグロー状からアーク状放電への移行機構および2種類の異なる周波数の高周波電界を重畳させた場合のアーク状放電開始電圧に対する重畳効果について研究を行ってきた^{1)~3)}。重畳効果の実験の結果、低い周波数に高い周波数を重畳した場合、低い周波数のアーク状放電開始電圧 V_c は重畳する高い周波数の電力の増加とともに低下する傾向が得られた。このことは、容量の小さな1台の高周波電源でも周波数の異なる2台の高周波電源を使用することにより、低い電圧でアーク状放電を発生させることが可能になり、低下した電圧分を高めることにより電離度の大きなプラズマが生成できることが可能になる。以上の考えに基づき、今回は、重畳効果によって低下した電圧を低下

*電気工学科

前の値(単独放電での V_c の値)にまで上昇させ、電子密度の変化を測定した。この結果、2台の小容量高周波電源を使用することで、高密度プラズマが生成できることが明らかになった。

2. 実験装置および実験方法

図1は実験装置の略図である。1MHzと13.5MHz高周波発振器の最大高周波出力はそれぞれ2kWおよび2.5kWであるが、出力は電源回路の1次側スライダックの調整で0から最大出力まで連続的に変えることができる。また、13.5MHz高周波発振器の出力は通過形電力計にて計測できる。また、1MHzと13.5MHzコイルは5cm離して巻かれている。放電管は、外径30mmφ、長さ80cmの石英ガラス管で、その両端をリングで真空止めできるアダプターに接合されている。複探針は直径0.5

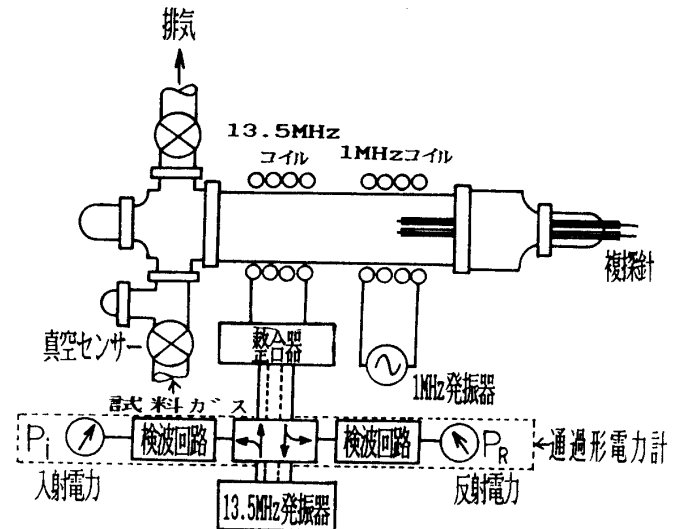


図1 実験装置の概略

mmφのタングステン線を先端の長さが2mmだけ露出させ、その他はガラス細管で被覆絶縁した単探針を2本探針間隔4mmはなして束ねたものである。また、複探針は放電管のZ軸方向に挿入され、その先端は1MHzコイルの中央付近に位置するように調整されている。実験を行う前に真空系を油拡散真空ポンプにて 10^{-5} Torr (1.33×10^{-3} Pa)程度に排気した後、試料ガスとしてネオンガス(純度99.999%)を実験ごとに、所定の高圧に調整して封入する。1MHzに13.5MHz高周波を重畳すると1MHzのアーク状開始電圧 V_c が低下するので、この低下した値を1MHz単独放電時の値まで増加させ、この時の電子密度 n_e を複探針法を用いて測定する。

3. 実験結果

図2は、あらかじめ一定の13.5MHz高周波電力を重畳しておき、1MHzの高周波電圧を0から上昇していき、1MHzのアーク状放電が開始する時の電圧 V_c を重畳電力を変えて測定した結果である。1MHz単独放電の場合の V_c の最小値 V_{cs} よりも低いガス圧領域で、13.5MHz電力を重畳することにより V_c の値が低下する重畳効果がある。しかし、 V_{cs} よりも高いガス圧領域では、13.5MHz電力を重畳しても V_c は低下せず、重畳効果はない。これらの重畳効果の現われ方の違いの原因については、参考文献(3)および研究紀要20号にて述べているので、ここではふれないで置く。重畳効果に関する今までの実験の結果、単一ガスおよび混合ガスを問わず、また2種類の周波数の大きさを問わ

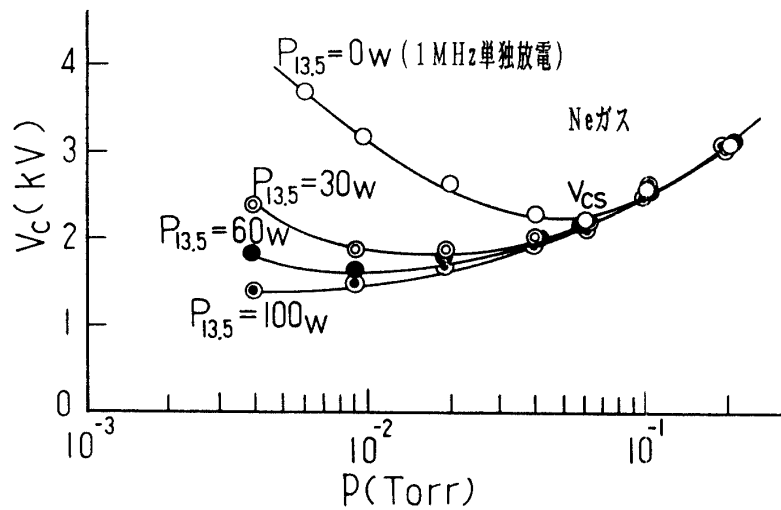


図2 重畳効果による1MHzアーク状放電開始電圧 V_c の低下

ず、低い周波数に高い周波数を重畳させた場合、 V_{cs} 点より低いガス圧領域で低い周波数の V_c が低下する傾向がある。図3は、図2の $p=0.01\text{Torr}$ において重畳する電力 $P_{13.5}$ と V_c の関係を求めたグラフである。 $P_{13.5}$ が0～60 Wの間で V_c に対する低減効果が大きいが、 $P_{13.5}$ をそれ以上加えても余り効果はない。

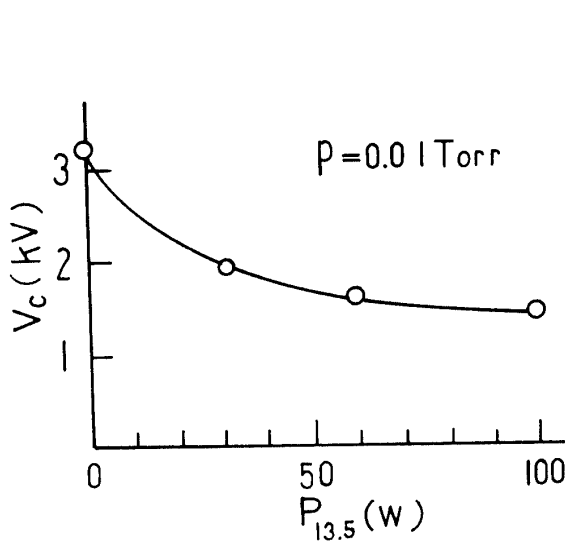


図3 一定のガス圧における $P_{13.5}$ と V_c の関係

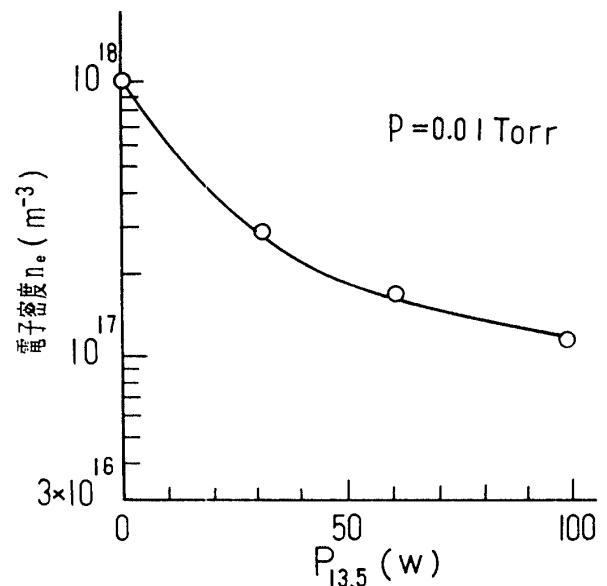


図4 V_c 低下による電子密度の減少

前述したように、低い周波数の1 MHzに高い周波数の13.5 MHzを重畳させた場合図2に図示したように、1 MHzの V_c は単独放電の V_c よりも低下するので、低下した V_c のままの状態における電子密度 n_e を、複探針法により測定した結果が図4である。重畳する13.5 MHz高周波電力 $P_{13.5}$ の増加とともに電子密度は減少しているが、 $P_{13.5}$ が60 W以上では、減少はゆるやかになっている。

図4と図3は同様の減少傾向を示している。この状態のままだと、単独放電の時と比べて電子密度が却って減少しているので、高密度プラズマ生成の目的に反している。

このため、 $P_{13.5}$ を重畳して減少した1 MHzのアーカ放電開始電圧 V_c を1 MHz単独放電の V_c の値にまで上昇させ、その時の電子密度を測定した結果が図5である。低下した V_c を上昇させることにより、電子密度は6.8倍に増加している。0.01 Torr以外のガス圧について同様の実験を行ったが、電子密度はおおむね4.3倍から7.1倍の範囲の増加率となった。本実験では、 $P_{13.5}$ の重畳により一旦低下した V_c を1 MHz単独放電のアーカ放電が発生する電圧の V_c まで上昇させたが、さらに電圧を高周波発振器の限度まで高めていくことは可能であるので、電子密度の増加率を7倍よりもさらに大きく増やすことができる。

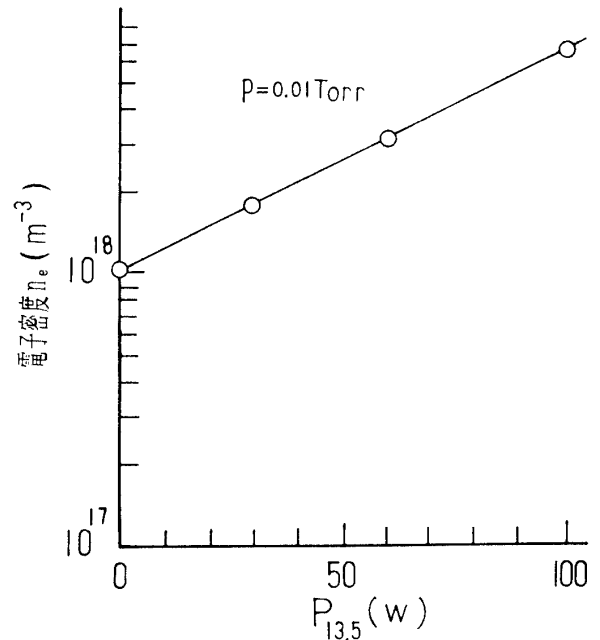


図5 低下 V_c 上昇による電子密度の増加

4. プラズマパラメータ(電子密度と電子温度)の検討

図6は、電子密度の計測と同時に測定した電子温度 T_e と重畳電力 $P_{13.5}$ の関係を示している。電子温度は重畳する $P_{13.5}$ の上昇とともにわずかではあるが減少しているが、ほとんど変わらず一定と言ってよい。電子密度は $P_{13.5}$ の上昇とともに増加したが、電子温度はわずかながら低減している。ここでは、この現象の違いについての検討を行う。

電子は高周波電界からエネルギーを吸収する一方、中性ガス分子との衝突によってエネルギーを失う。電子温度は、電子が単位時間当たり吸収するエネルギーと失うエネルギーの差に依存する⁹⁾。それゆえ、重畳する13.5 MHzの高周波電力 $P_{13.5}$ を上昇していくと、電子の高周波電界からの吸収エネルギーは増加す

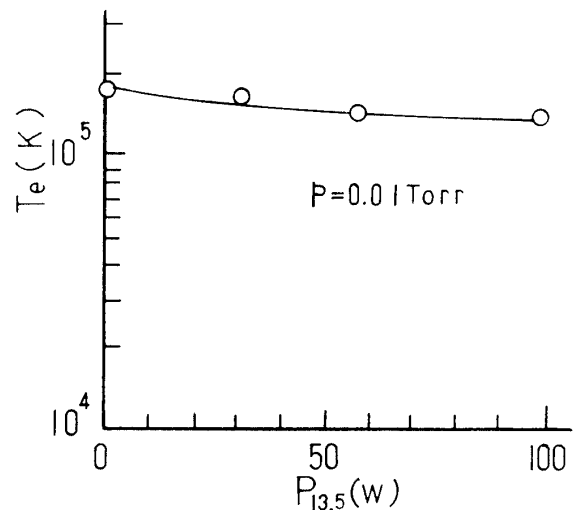


図6 重畳電力 $P_{13.5}$ と電子温度の関係

るが、その一方で電子と中性ガス分子との衝突電離現象が頻繁に起こるので、吸収したエネルギーの大部分は衝突電離に消費される、と考えられる。それゆえ、重畳する $P_{13.5}$ の上昇とともに高周波電界から吸収するエネルギーは増加するが、電子と中性ガス分子との衝突電離に消費されるエネルギーも電子密度の増加に伴い増えるため、結局吸収するエネルギーと消費されるエネルギーの差が少なくなるので電子温度 T_e は高くなり、ほぼ一定の温度になると考えられる。

5. 結 言

気体放電では、ガス圧を決めるとグロー放電、アーク放電にかかわらず放電電圧は決まってくる。このため一種類の周波数の高周波発振器を用いる場合、低いガス圧や高いガス圧領域では放電開始電圧が高くなっていくので、電離度の大きなプラズマを生成するには出力電圧を高くする必要がある。しかし、最大出力電圧の上昇とともに発振器の価格も上昇してゆく。比較的低価格の小容量高周波発振器で高出力発振器並みの電離度を得る目的のため、異なる周波数の2種類の小容量高周波発振器を重畳して用いる方法を採用し、重畳放電を行った場合の電子密度を測定した。重畳する 13.5 MHz の高周波電力 $P_{13.5}$ を重畳することにより低下した 1 MHz のアーク状放電開始電圧 V_c を、 1 MHz 単独でアーク状放電が開始する電圧にまで上昇させ、この場合の電子密度 n_e を複探針法を用いて測定した。この結果、電子密度は最大で7.1倍にまで増加でき、電離度の大きなプラズマを生成できることが分かった。実験では、既存の 1 MHz と 13.5 MHz の2台の高周波発振器を使用した。これ以外の周波数の発振器でもよく、異なる周波数の2台の小容量高周波発振器を用いることにより、高電離プラズマを比較的容易に生成出来る可能性のあることが分かった。

終わりに、終始有益なご助言、ご指導を頂きました関西大学工学部電子工学科教授高元睦夫博士に感謝の意を表わします。

参 考 文 献

- 1) 長濱、福村、高元：電気学会論文誌 A103(1982), 265
- 2) 長濱、福村、高元：電気学会論文誌 A105(1985), 381
- 3) 長濱、福村、高元：電気学会論文誌 A108(1988), 51
- 4) 堤井 信力 : プラズマ基礎工学(内田老鶴園、1986), 239

(平成4年12月16日受理)