

リング電極方式容量結合型高周波放電に対する 2種類の高周波電界の重畳効果 (その1)

長 濱 治 男*

Effects of Applying Two Kinds of R. F. Fields on Capacitively Coupled R. F. Discharges with ring-like Electrodes (Part 1)

Haruo Nagahama

In a inductively or capacitively coupled r.f. discharge by a single frequency, the transition voltage V_c or power P_c from glow to arc discharge depends on the gas pressure p . When superposing two applied fields with different frequencies at the same time, if V_c decreases comparing with the value of single-frequency discharge, r.f. discharge plasma with high ionization state can be easily generated.

In a medium vacuum capacitively coupled r.f. discharge, effects of superposing two applied fields with different frequencies, that is, 2MHz and 13.5MHz have been studied. As a result, V_c of 2MHz side has decreased by the superposed effects in the low pressure region ($\omega > \nu$), but V_c has not decreased in the high pressure region ($\omega < \nu$). Variations of P_c by the superposed effects in the discharge space of 13.5MHz side have not been able to observe in all pressure region.

1.はじめに

容量結合型および誘導結合型高周波放電は、電極材料から出る不純物の混入が避けられて、純粋なガスでのプラズマが生成できる有用な方法であるので、プラズマ化学やプラズマ CVD などに応用され重要視されている¹⁾にもかかわらず、十分に高周波放電機構や高周波放電プラズマの基礎研究が行われていない。

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放電とアーク放電の放電特性^{2),3)}およびグロー放電からアーク放電への移行機構^{4),5)}の研究を行ってきた。

従来行ってきた単一周波数の高周波放電では、ガス圧を定めると、グロー放電からアーク放電へ移行する放電開始電圧の値が決まるので、高電離状態のプラズマを生成するには高出力の電源が必要となる。このため、電源の高出力化を図らずに、高電離状態のプラズマを生成する方法として、異なる2種類の高周波電界を同時に重畳して印加する方法を提案し、この方法で行った誘導結合型高周波放電についての実験結果をすでに報告した⁶⁾。誘導結合型高周波放電は、Fig.1(a)に図示するように、放電管に数巻きのワークコイルを巻きつけ高周波電流を流したとき、Z方向

* 電気電子工学科

に生じる磁束密度 B_z が図中に示したマクスウェルの電磁方程式に基づく θ 方向の電界 E_θ を誘起させるので、この電界を利用してプラズマを生成する放電方法であり、別名磁界結合型とも呼ばれている。ここで、 ω_2 と ω_{13} は実験で用いる低い周波数の 2MHz と高い周波数の 13.5MHz の角周波数を表わす。また、リング電極方式容量結合型高周波放電は、Fig1(b)に図示するように、リング状電極を距離 d だけ離して放電管に配置し電極間に交流電圧を印加したとき、1つのリングで囲まれた閉曲面は等電位面となるので、交流電圧によって分極電荷が発生し、その分極電荷によって放電管軸方向(Z 方向)に発生する交流の静電界 E_z を利用してプラズマを生成する放電方法であり、別名電界結合型とも呼ばれている^{7, 8)}。

文献6で報告したが、Fig.1(a)に図示するように2つのワークコイルを隣接するように配置し、2種類の異なる周波数の高周波電流をそれぞれのワークコイルに流して、高周波放電に対する2種類の高周波電界の重畳効果の実験を行う場合、 ω_{13} 側で発生した磁束密度 B_{1z} はそのままの大きさで ω_2 側に伝わるのではなく、距離が離れているため途中で減衰するので、 ω_2 側のワークコイルと鎖交する磁束密度を B_{13z} とすると、 ω_2 側のワークコイルでは、 ω_2 側で発生した B_{2z} と B_{13z} が磁氣的に和動結合されている。それゆえ、重畳効果が単に磁束密度の和が加わるだけであれば、周波数の高い方にも低い方にも効いてくるはずであるが、実験の結果低い周波数に高い周波数を重畳した場合だけ、低い周波数側のアーク放電開始電圧 V_c が単独放電の値よりも低下し、重畳効果がみられた。この重畳効果が生じる原因として、重畳する高い周波数の高周波電界が放電を支配するガス分子と電子との衝突周波数 ν に影響を与えるためであることがわかった。

今回は、Fig.1(b)に図示するように2組のリング電極にそれぞれ異なる2種類の周波数の高周波電界を印加し、 ω_2 側では電界 E_{2z} と E_{13z} が和動的に結合されているような場合の重畳放電を行い、誘導結合型高周波放電と放電機構や結合方法が異なる容量結合型高周波放電においても、重畳効果が生じるかどうかを調べる実験を行った。ただし、 E_{2z} は ω_2 側リング電極で生じる電界、 E_{13z} は ω_{13} 側のリング電極で生じる電界 E_{13z} が途中で減衰して小さくなった電界である。実験は、0.266Pa~266Pa のガス圧範囲で、2MHz と 13.5MHz の異なる2種類の高周波電界を同時に重畳して印加し、リング電極方式容量結合型高周波放電のグロー放電からアーク放電に放電状態が移行する 2MHz 側のアーク放電開始電圧 V_c および 13.5MHz 側のアーク放電開始電力 P_c の測定

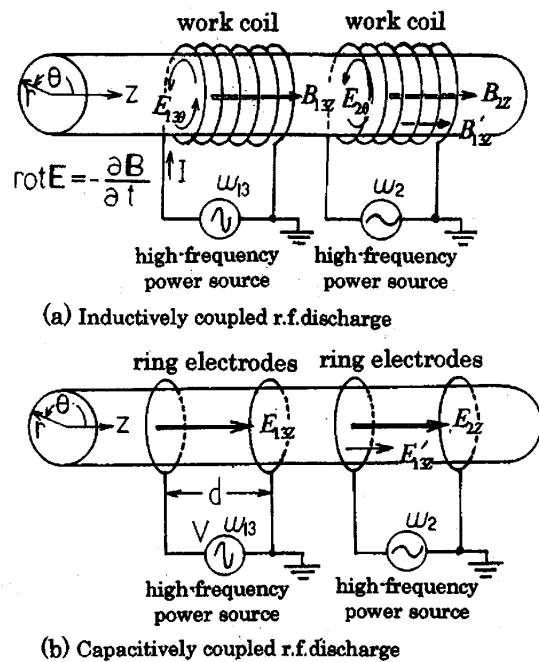


Fig.1 The ways of applying of the electric fields in the two kinds of r.f. electrodeless discharges.

を行った。この結果、2MHzに13.5MHzを重ねた場合、V字形状をした放電特性の最小点よりも低いガス圧領域で2MHz側の V_c が低下し、重畳効果があったが、最小点よりも高いガス圧領域では V_c の低下は少なく、重畳効果の影響は小さかった。また、13.5MHzに2MHzを重ねた場合にはすべてのガス圧領域で重畳効果はなく、 P_c は低下しなかった。重畳効果を調べる実験を行った結果、放電機構や結合方法が全く異なっているにもかかわらず、誘導結合型高周波放電と容量結合型高周波放電は重畳効果に対して同じ傾向を示すことが明らかになったので報告する。

2. 実験装置および実験方法

Fig.2は実験に用いた放電管および2MHz発振器と13.5MHz発振器の概略図である。放電管は内径30mmφ、長さ80cm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アダプターに接合されている。2MHz用および13.5MHz用リング電極は内径40mmφである。いずれの電極も低電位側は固定、高電位側は1cm間隔で移動できる可動式になっている。最大電極間距離は5cmであるが、実験は4cmに調整して行った。また、2MHzと13.5MHzのリング電極間距離も4cmで行った。

2MHz発振器は最大出力2.5kW、

最大使用電圧7kV、発振周波数1.95MHzで、13.5MHz発振器は最大出力2.5kWである。2台の発振器とも陽極同調形発振回路のため、発振出力波形は図中の写真のように60Hzで振幅変調されている。図示のように同軸ケーブルで発振器、通過形電力計および整合器をつなぎ、整合器に13.5MHz用リング電極を接続している。通過形電力計は往路側電力 P_i (プラズマへの入射電力)と帰路側電力 P_R (プラズマ表面からの反射電力)とプラズマへ注入された後吸収されずに透過して帰ってくる透過電力 P_t の和である)とを同時に測定する電力計であり、往路、帰路電力の検波出力端子がついている。それゆえ、 P_i および P_R を通過形電力計で測定することからプラズマの吸収電力 $P_A(=P_i - P_R)$ が求まる。2MHz発振器の出力端子は陽極同調形回路を構成しているLC並列共振回路のインダクタンス L から引き出されている。誘導結合型高周波放電の場合には、ワークコイルはインダクタンス L の一部を構成しているので、発振には何ら支障がない。しかし、容量結合型高周波放電の場合、並列共振回路のインダクタンス L に等価的に容量 C を持つリング

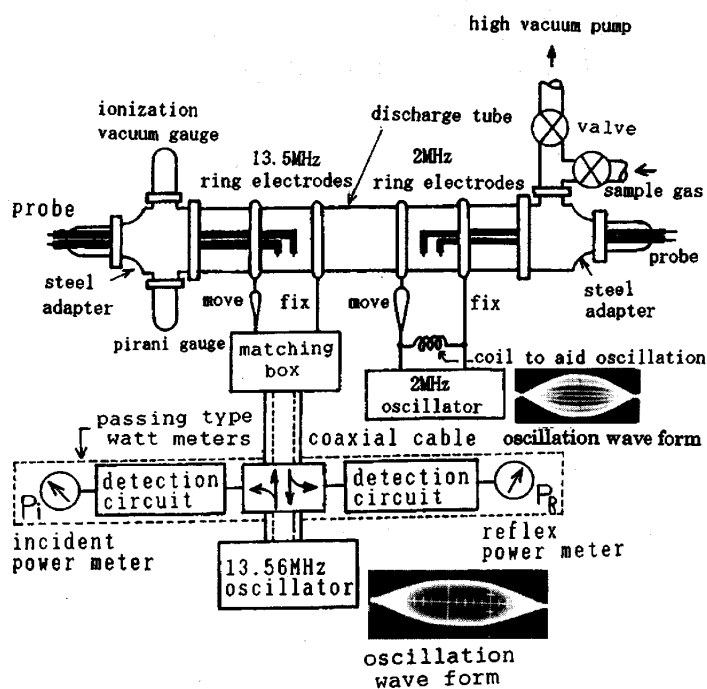


Fig.2 Experimental apparatus.

電極を直列に接続することになるので、このままでは発振しない可能性がある。このため、陽極同調形回路のインダクタンス L にリング電極を接続しても、発振が起こり、かつ並列共振回路の両端電圧がほぼリング電極に印加されるように工夫を凝らした、補助コイル付きのリング電極を製作した⁹⁾。かぎ形探針をプラズマ中に挿入することにより、発光強度の弱いグロー放電から Fig.3 に示すような発光強度の強いアーク放電に放電状態が急に移行する場合、Fig.4 で図示するような特有の波形が探針に誘起され、アーク放電開始が確認できる。

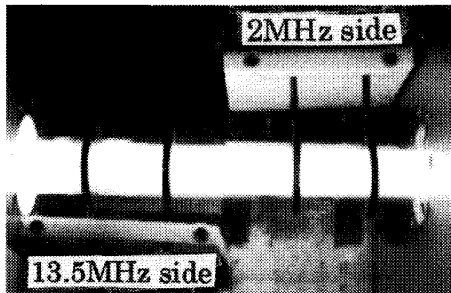


Fig.3 Light intensity of arc discharge.

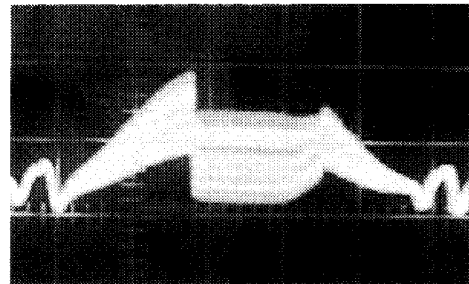


Fig.4 Photograph of induced voltage
at the case of glow → arc transition.

探針形状をかぎ形にしたのは、リング電極方式容量結合型高周波放電では、電界方向は放電管の管軸方向と平行である¹⁰⁾ため、電気力線を切りやすくするためである。探針は直径 $0.5\text{mm}\phi$ のタングステン線を先端の 1mm だけ露出させ、その他はガラス細管で被覆絶縁されている。実験を行う前に油拡散真空ポンプで放電管全体を $1.33 \times 10^{-3}\text{Pa}$ 程度に排気している。圧力の確認は電離真空計で行っている。また、試料ガスは、純度 99.999% の Ne ガスおよび He ガスを用い、実験ごとに所定のガス圧に封入する。ガス圧の確認はピラニ真空計で行っている。

2MHz に 13.5MHz を重畳し、13.5MHz の重畳効果を調べる場合、試料ガスのガス圧 p を一定にし、まず通過形電力計で測定した 13.5MHz の吸収電力 P_A がある一定値になるように、13.5MHz 高周波発振器の出力を調整する。次に、2MHz のリング電極への印加電圧を徐々に上げてゆき、2MHz 側に挿入されたかぎ形探針に誘起される電圧波形が、Fig.2 中に示した 60Hz の振幅変調波形から Fig.4 で示した波形になった時のリング電極に印加した電圧 V_c を測定する。重畳する 13.5MHz の電力 P_A を 200W まで順次増加させ、これをパラメータとして 2MHz 側の V_c を測定し、これを各ガス圧について行う。

13.5MHz に 2MHz を重畳し、2MHz の重畳効果を調べる場合、試料ガスのガス圧 p を一定にし、まず重畳する 2MHz のリング電極に印加する電圧が一定値になるよう、2MHz 高周波発振器の出力を調整する。次に、13.5MHz の電力を徐々に増してゆき、13.5MHz 側に挿入されているかぎ形探針に誘起されるアーク放電開始特有の波形をオシロスコープで観測する。この時の 13.5MHz 高周波発振器の入射電力計の指示値 P_i を測定し、この値をアーク放電開始電力 P_c とする。重畳する 2MHz の電圧を 3kV まで順次増加させ、これをパラメータとして 13.5MHz 側の P_c を測定し、これを各ガス圧について行う。

3. 実験結果

3.1 2MHzに13.5MHzを重畳した場合の V_c の変化

Fig.5は、試料ガスがNeガスの場合で、どのガス圧においても重畳する13.5MHzの電力 P_A が一定になるよう13.5MHz高周波発振器の出力を調整して保ち、この状態で2MHz側の V_c を各ガス圧について測定した結果である。 V_c の最小値 V_{cmin} (図示のように $p=80\text{Pa}$ における V_c の値) 点より低いガス圧領域においては、 V_c は重畳する13.5MHz高周波電力の増加とともに単独放電(図中○印の特性曲線)の値よりも低下している。例えば、ガス圧が20Pa、重畳電力が200Wのときには約2.7kVも V_c が低下していて、13.5MHzの重畳効果が著しく現れている。

また、重畳する13.5MHz電力の増加とともに、 V_{cmin} 点は低いガス圧側に移動している。しかし、 V_{cmin} 点から200Pa程度の高いガス圧領域においては、 V_c は低下するが、その低下する量(例えば、ガス圧が133Pa、重畳電力が200Wのときには0.8kV)はガス圧が高くなるに従い減少していて、重畳効果の影響は小さいことがわかる。また、実験に用いた最大ガス圧の266Paでは、 V_c は低下せず、重畳効果は現れていない。

Fig.6は、試料ガスがHeガスの場合の実験結果である。 V_c の最小値 V_{cmin} (図示のように $p=106\text{Pa}$ における V_c の値) 点より低いガス圧領域においては、Neガスの場合と同様、重畳する13.5MHz電力の増加とともに V_c は単独放電(図中○印の特性曲線)の値よりも低下している。また、 V_{cmin} 点は重畳する13.5MHz電力の増加とともに低いガス圧側に移動している。

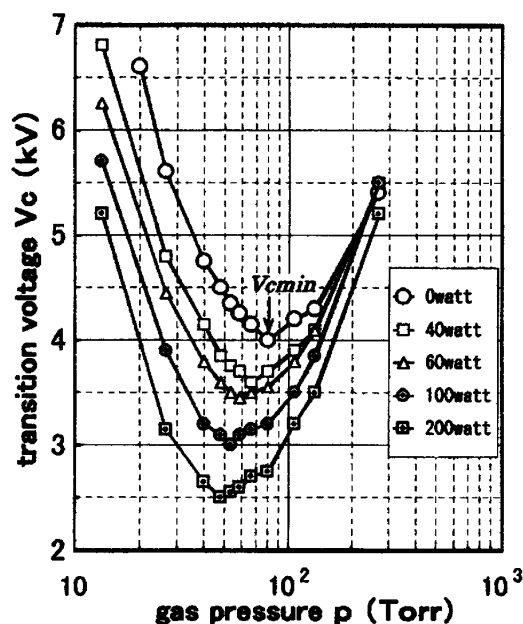


Fig.5 V_c in 2MHz side of superposed 2MHz and 13.5MHz discharges(Ne gas).

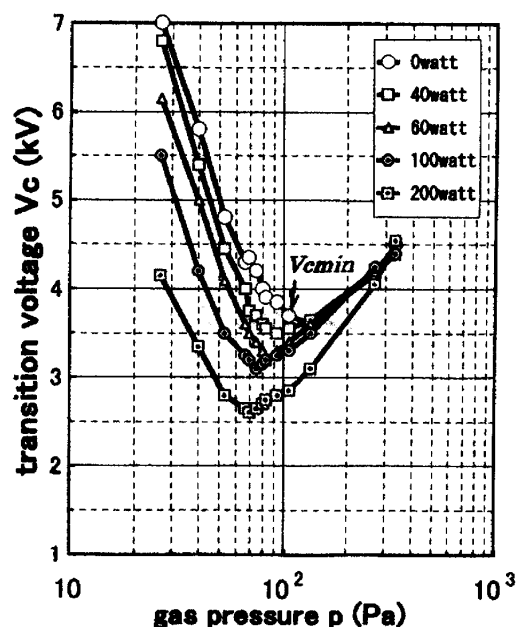


Fig.6 V_c in 2MHz side of superposed 2MHz and 13.5MHz discharges(He gas).

3.2 13.5MHz に 2MHz を重畳した場合の P_c の変化

Fig.7 は、試料ガスが Ne ガスの場合で、どのガス圧においても重畳する 2MHz のリング電極への印加電圧が一定になるように 2MHz 高周波発振器の出力を調整して保ち、この状態で 13.5MHz 側のアーク放電開始電力 P_c を測定した結果である。重畳する 2MHz の電圧を 3kV まで増加させても、13.5MHz 側の P_c はすべてのガス圧領域において低下せず、重畳効果はみられない。

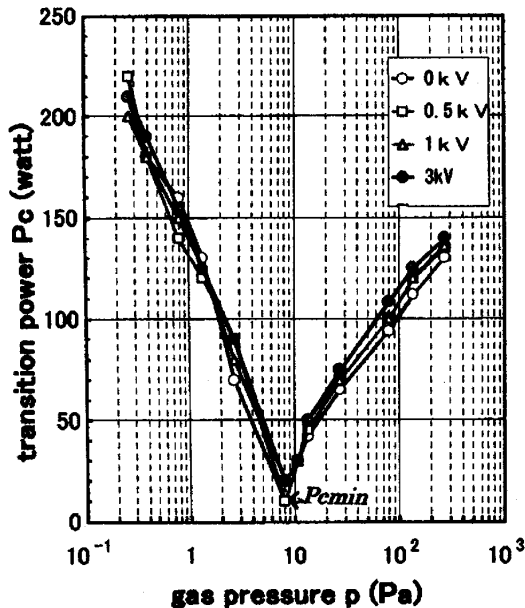


Fig.7 P_c in 13.5MHz side of superposed 2MHz and 13.5MHz discharges (Ne gas).

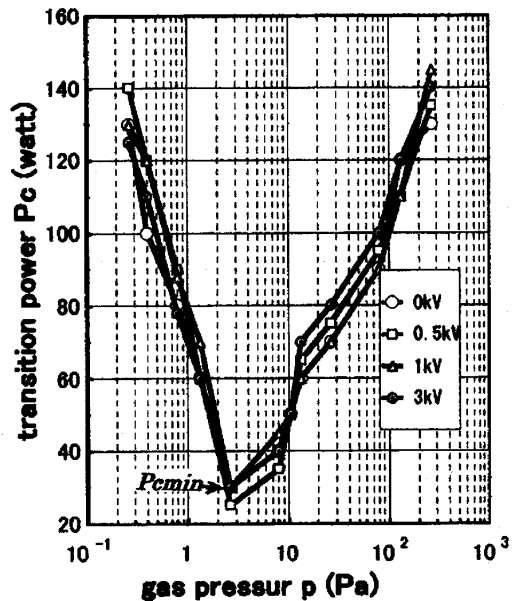


Fig.8 P_c in 13.5MHz side of superposed 2MHz and 13.5MHz discharges (He gas).

また、 P_c の最小値 P_{cmin} 点は重畳する 2MHz の電圧を増加させても移動しない。また、Fig.8 は、試料ガスが He ガスの場合の実験結果である。Ne ガスと同様の傾向が得られている。

4. 結言

隣接して配置した 2 組のリング電極に、2MHz と 13.5MHz の異なる 2 種類の高周波電界を同時に重畳して印加し、誘導結合型高周波放電と放電機構や結合方法が全く異なる容量結合型高周波放電におけるグロー放電からアーク放電に移行する 2MHz 側の電圧 V_c と 13.5MHz 側の電力 P_c の測定を行い、まだ明らかにされていないリング電極方式容量結合型高周波放電の重畳効果を調べるための実験を行った。その結果、2MHz に 13.5MHz を重畳した場合、V 字形の放電特性の最小点よりも低い $\omega > \nu$ の条件を満たすガス圧領域で 2MHz 側の V_c が低下し、重畳効果が現れた。しかし、最小点よりも高い $\omega < \nu$ を満たすガス圧領域では重畳効果の現れ方が小さく、また 13.5MHz に 2MHz を重畳した場合のすべてのガス圧領域では重畳効果はなかった。

また、重畳効果は、試料ガスの種類には無関係であることがわかった。

さらに、実験に使用した 2MHz と 13.5MHz の周波数および実験に用いた 0.266Pa から 266Pa

のガス圧範囲では、放電機構や結合方法が全く異なっているにもかかわらず、誘導結合型も容量結合型も同じ傾向を示すことが判明した。

本実験で用いた周波数以外およびガス圧範囲外では、重畳効果がどのように現れるかは不明であるから、今後、さらに実験的に明らかにしていかなければならない。また今回は、紙面の都合で、重畳効果の有無の原因についての考察を行えなかったため、次回に譲ることとする。

参 考 文 献

- 1)堤井信力:プラズマ基礎工学(内田老鶴園、東京都、1986)1版、2章、p.68
- 2)高元暉夫、向山亨、長濱治男:電気学会誌、91(1971)、p.753
- 3)長濱治男、高元暉夫:真空、32(1989)、p.20
- 4)福村隆志、長濱治男、高元暉夫:電気学会論文誌、A97(1977)、p.243
- 5)長濱治男、福村隆志、高元暉夫:電気学会論文誌、A103(1983)、p.265
- 6)長濱治男、福村隆志、高元暉夫:電気学会論文誌、A108(1988)、p.51
- 7)明石和夫、服部秀三、松本修:光・プラズマプロセッシング(日刊工業新聞社、東京都、1986)、
1版、5章、p.105
- 8)林泉:プラズマ工学(朝倉書店、東京都、1987)、1版、3章、p.27
- 9)長濱治男、是安博之、高元暉夫:電気関係学会関西支部連合大会、京都、1995、p.G20
- 10)長濱治男:電気関係学会関西支部連合大会、大阪、2002、p.G17

(平成14年12月3日受理)