

2種類の高周波電界の重畳効果に対する スペクトル分析からの一考察

長 濱 治 男*

Spectral Analytical Study of Superposed Effect at Two Kinds of High Frequency Electric Fields

Haruo Nagahama

In a medium vacuum capacitively coupled high frequency 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. Here, V_c or P_c is transition voltage or power from glow to arc discharge.

In this report it analyzes a frequency in above mentioned superposed effects, using Spectrum Analyzer and a considering of the result is reported.

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、図1.(a)に図示するように、放電管に数巻きのコイルを巻きつけ高周波電流を流した時、Z方向に生じる磁束密度 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方法であるので、別名磁界結合型とも呼ばれている。

* 電気電子工学科

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の角周波数を表す。また、リング電極方式容量結合型高周波放電は、図1.(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、図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_{13z} はそのままの大きさを 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。

また、図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 の測定を行った。この結果、2MHzに13.5MHzを重畳した場合、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

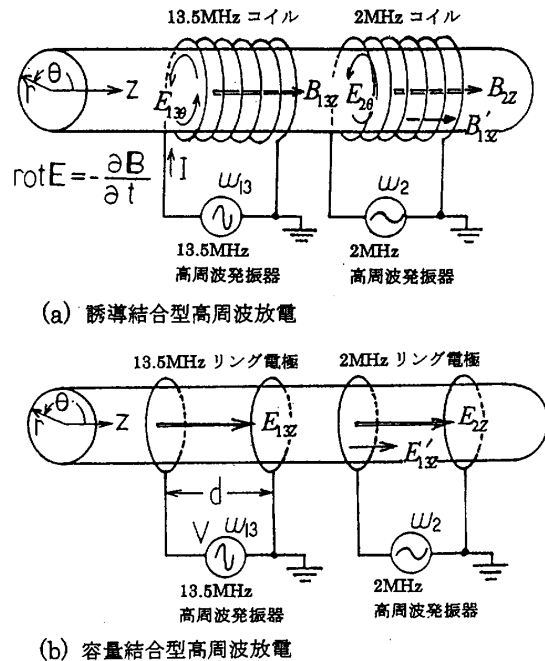


図1. 誘導結合型、容量結合型高周波重畳放電の2種類の電界のかかり方

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 を重畳し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。これらの実験結果は、すでに福井工業大学研究紀要 33 号で報告した⁹⁾。

今回は、これら重畳効果の現れ方の違いを調べるため、重畳時のプラズマ中に生じる各種周波数成分の振動の振幅を、スペクトラム・アナライザを用いて測定した。この結果、高い周波数 13.5MHz と低い周波数 2MHz の 2 種類の振動による非線形効果を推定できる結果が得られたので報告する。

2. 実験装置および実験方法

図 2 は実験装置の概略図である。放電管は内径 30mm ϕ 、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 40mm ϕ 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。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 P_r 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

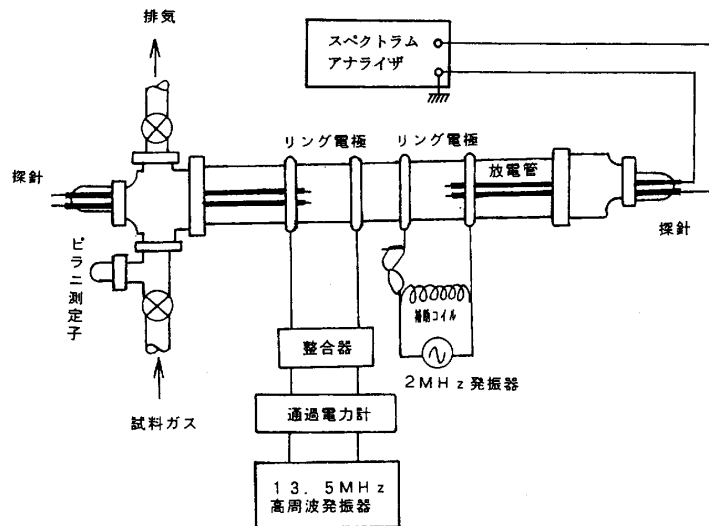


図 2. 実験装置

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¹⁰⁾。2MHz 高周波と 13.5MHz 高周波を同時に重畳した時のプラズマ中に生じる各種周波数成分の振動電圧の測定には探針を用い、探針に誘起した振動電圧をスペクトラム・アナライザ(アドバンテスト社製、TR4120)にて分析する。探針は直径 0.5mm ϕ 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 1.33×10^{-3} 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 高周波に 13.5MHz 高周波を重畳し、重畳する 13.5MHz 高周波の影響を調べる場合、2MHz 側の探針とスペクトラム・アナライザを同軸ケーブルで接続し、その後、2MHz リング電極に印加する電圧は 3.5kV 一定に調整して保ち、重畳する 13.5MHz の高周波電力を 0、40、60、100watt と順次増加させ、その都度、スペクトル分析を行う。また、13.5MHz に 2MHz 高周波を重畳し、重畳する 2MHz 高周波の影響を調べる場合、探針は 13.5MHz 側の探針を使用する。13.5MHz 高周波発振器の入射電力が 80watt 一定に出力調整して保ち、2MHz リング電極に印加する電圧を 0、0.5、1、3kV と順次増加させ、その都度、スペクトル分析を行う。

3. 実験結果

3.1 2MHz、13.5MHz 重畳時の周波数スペクトル

図 3 は、試料ガスが He、ガス圧 p が 80Pa、2MHz リング電極への印加電圧 E_p が 3.5kV、重畳する 13.5MHz の入射電力 P_i が 40watt の場合で、2MHz 側の探針を用いて各種周波数成分の振動電圧 V_f の周波数スペクトルを測定した結果の一例である。ただし、SCAN Time は 1ms/DIV、BAND WIDTH は 30kHz、DISPERSION/DIV は 20kHz、REFERENCE LEVEL を 20dB、さらに VERT/DIV を 10dB に調整している。また、スペクトルの振幅がスケールオーバーしないようにスペクトラム・アナライザの減衰器を調整しているので、写真の振幅は相対値を表している。それゆえ、振動電

圧 V_f は dB 単位で表示されている。なお、周波数が 0 の位置で大きなスペクトルが見られるが、これは周波数が 0 Hz の位置を示す 0 マーカーである。測定の結果、1.95MHz(この周波数を 2MHz と呼んでいる)、13.7MHz(この周波数を 13.5MHz と呼んでいる)、ービート波(11.75MHz)、およ

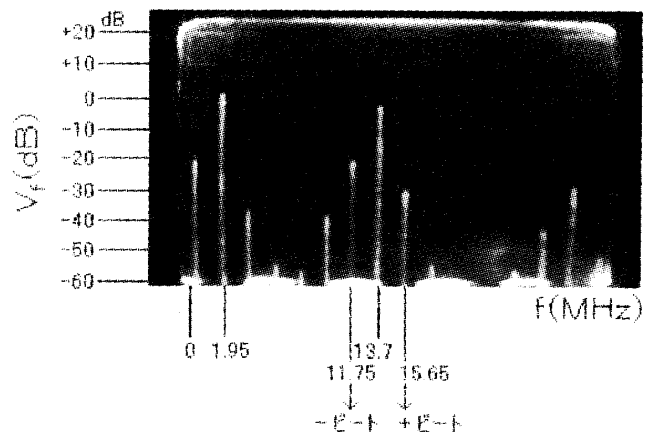


図 3. 2MHz、13.5MHz 重畳時の周波数スペクトル
(He ガス、 $p=80$ Pa, $E_p=3.5$ kV, $P_{13.5}=40$ W)

び+ビート波(15.65MHz)等多くのスペクトルが見られる。本実験では、2MHz と 13.5MHz の基本波と-ビート波、+ビート波の振幅に着目して重畳効果をスペクトル的に調べるため、図中にこれらのスペクトルの周波数値を表示した。

振動成分の振幅の傾向は、試料ガスを Ne ガスに変えたり、ガス圧 p を変えたり、また重畳する 13.5MHz の入射電力 P_i を変化させても変わりなかった。さらに、13.5MHz に 2MHz 高周波を重畳する実験を行い、13.5MHz 側の探針を用いて周波数スペクトルを測定した場合においても、2MHz, 13.5MHz の基本波成分と-ビート波、+ビート波以外にも多くのスペクトル成分が見られ、これらスペクトルの振幅の傾向は 2MHz に 13.5MHz を重畳した場合とほぼ同様であった。

3.2 2MHz に 13.5MHz を重畳した場合のスペクトルの振幅

本実験で用いたスペクトラム・アナライザでは、振動電圧 V_f は dB 単位で相対的に表示されているため、振幅の読み dB 値を volt 単位の値に変換する必要がある。

電圧利得を表す式

$$Y = 20 \log_{10} \left(\frac{V_f}{V_1} \right) \quad (\text{dB}) \quad (1)$$

より、今 $V_1 = V_f$ の時 0(dB)になるので、基準値を $V_1=1(\text{V})$ とおくと、任意の $Y(\text{dB})$ 値に対する振動電圧値 $V_f(\text{V})$ は、

$$V_f = 10^{-\left(\frac{Y}{20}\right)} \quad (\text{V}) \quad (2)$$

より求めることができる。それゆえ、スペクトルの振幅の測定結果を(2)式を用いてボルトに変換して解析を行った。図4は、2MHz 高周波電圧 E_p を 3.5kV 一定に保ち、これに重畳する 13.5MHz の入射電力 P_i を 100watt まで重畳していった場合に、2MHz 側の探針で測定した基本波とビート波のスペクトルの振幅と 13.5MHz 重畳電力 $P_{13.5}$ の関係を示した結果である。

図から明らかなように、2MHz の電圧は 3.5kV 一定であるにもかかわらず、プラズマ中の 2MHz の振動電圧 V_2 は 13.5MHz の重畳を増すに従い増加している。また、13.5MHz の振動電圧 $V_{13.5}$ は重畳する電力 $P_{13.5}$ が増加するに従い大きくなっていくのは当然であるが、その増加の割

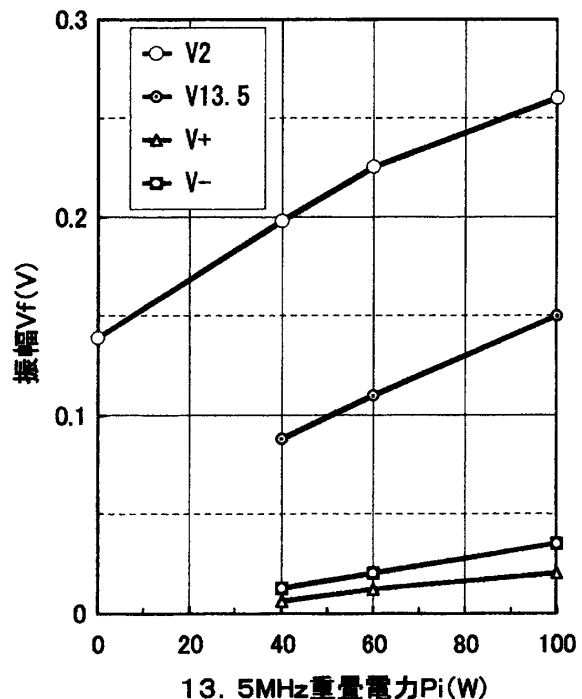


図4. 2MHz に 13.5MHz を重畳した場合のスペクトルの振幅
(He ガス, 80Pa, $E_p=3.5\text{kV}$ 一定)

合は V_2 と比べて少しゆるやかである。また、普通+ビート波と-ビート波の振動電圧 V_+ と V_- は同じである¹⁾が、実測結果は V_+ が小さい。

図5は、13.5MHzの入射電力 P_i を 80 watt 一定に保って、これに 2MHz の電圧 E_p を重畳していった場合、13.5MHz 側の探針で観測される振動スペクトルと重畳した 2MHz 高周波電圧 E_p の関係を示すグラフである。13.5MHz 高周波電力 $P_{13.5}$ は 80watt 一定であるにもかかわらず、プラズマ中の振動電圧 $V_{13.5}$ は 2MHz の重畳電圧 E_p を増していくことによって、かえって減少している。逆に、 $V_{13.5}$ が減少する範囲で、 V_2 の増加の割合が少し大きくなっている。また、4図と同様に、+ビート波の振幅 V_+ は-ビート波の振幅 V_- よりも小さいことが分る。それゆえ、4図の場合と同様に、重畳によって 13.5MHz 高周波の $V_{13.5}$ と+ビート波の振動の振幅 V_+ が減少し、2MHz の振動の振幅 V_2 が増大していると考えることができ、13.5MHz と+ビート波から低い周波数の 2MHz 高周波へエネルギーが移る物理的機構があると考えられる。

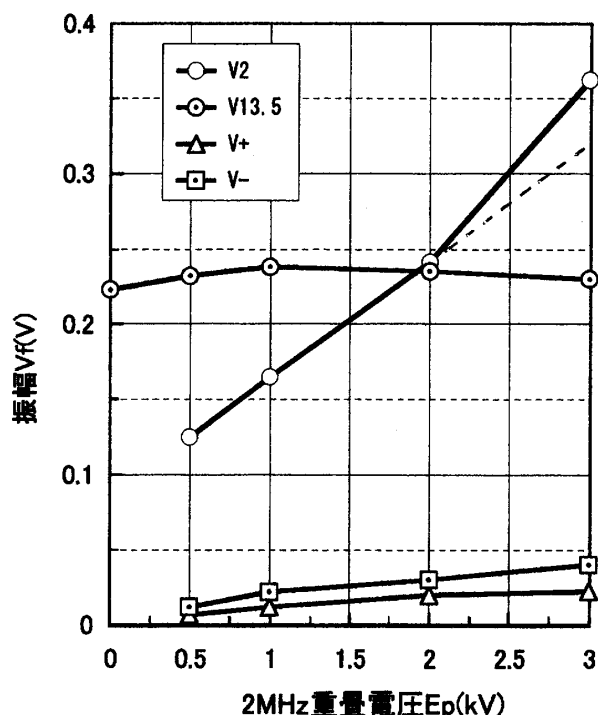


図5. 13.5MHzに2MHzを重畳した場合のスペクトルの振幅
(He ガス, 133Pa, $P_i=80W$ 一定)

4. 2種類の高周波電界の非線形相互作用からの考察

2MHzに13.5MHzを重畳した場合、V字形状をした放電特性(パッシェン曲線)の最小点より低いガス圧領域で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 の低下はなく、重畳効果の影響は小さかった。また、13.5MHzに2MHzを重畳した場合には、すべてのガス圧領域で P_c は低下しなく、重畳効果はない、との実験結果が得られた。

異なる2種類の周波数の高周波電界の重畳の仕方により、重畳効果の現われ方に違いが観られたので、この違いを調べるため、2MHzと13.5MHzの2種類の高周波電界を重畳させた場合のプラズマ中に生じている各種周波数成分の振動電圧 V_f 、特に2MHzと13.5MHzの基本波(V_2 と $V_{13.5}$)とこれらのビート波(-ビート波 V_- と+ビート波 V_+)のスペクトルに注目し、スペクトルの振幅を測定した。

図1.(b)に示したように、2MHzリング電極、13.5MHzリング電極を隣接して配置し、それぞ

れの電極に高周波電圧を印加し重畳しているので、2MHz リング電極、13.5MHz リング電極からそれぞれの周波数の高周波電界が発生しているが、実際にはこれら2種類の周波数の高周波電界が合成された状態になっている。電子は2種類の周波数の電界を同時に感じて運動するから、電子とプラズマ生成用の中性試料ガス分子との衝突はこれら2種類の周波数の合成された衝突になると考えられ、複雑な現象になると思われる。

また、2MHz と 13.5MHz の2種類の基本波の高周波が互いに干渉し合うので、当然ビート波が発生する。普通、-ビート波 V_- と +ビート波 V_+ の振幅は等しい¹¹⁾。しかし、実測したスペクトルの結果、-ビート波 V_- の振幅は+ビート波 V_+ の振幅よりも大きいことが判明した。

また、一種類の周波数の高周波電圧を単独に印加した場合でも、非線形現象が発生する¹²⁾ ことを実験的に見出し電気学会論文誌に発表した。

さらに、図4において、2MHzの印加電圧は3.5kV一定であるから、当然プラズマ中の振動電圧 V_2 (図中○-線)も一定であるはずであるが、測定結果では重畳する13.5MHzの高周波電力 P_i の増加とともに増えていっている。このことは、2MHzの振動 V_2 が他の振動からエネルギーを供給された結果である、と考えられる。また、13.5MHzの振動電圧 $V_{13.5}$ (図中●-線)は P_i の増加とともに増えていっているのは当然であるが、しかし、その増加の割合は V_2 と比べて少し緩やかである。このことは、13.5MHzの振動がエネルギーを放出した可能性のあることが考えられる。さらに、+ビート波の振動 V_+ が-ビート波の振動 V_- よりも、振幅が小さくなった測定結果から、+ビート波のエネルギーが放出され、その放出したエネルギーを他の振動が吸収した、との可能性も考えることができる。

さらに、図5においても、+ビート波の振動 V_+ が-ビート波の振動 V_- よりも、振幅が小さくなる測定結果が得られた。また、重畳する2MHzの電圧 E_p の増加とともに2MHzの振動電圧 V_2 も増大しているが、13.5MHzの振動電圧 $V_{13.5}$ (図中●-線)が減少する範囲で V_2 の増え方は少し大きくなっている。また、13.5MHzの入射電力 P_i は80watt一定であるから、当然プラズマ中の振動電圧 $V_{13.5}$ も一定であるはずであるが、測定結果では、 V_2 の増え方が大きくなる範囲でかえって減少する、との結果が得られた。

スペクトルの振幅の測定結果から、上述したような線形現象では説明できないような結果が得られ、プラズマ特有の非線形現象の生じた可能性があることが考えられる。非線形現象として、高い周波数(13.5MHz)の振幅 $V_{13.5}$ と+ビート波の振幅 V_+ は減

少し、低い周波数(2MHz)の振幅 V_2 は増加する、とのスペクトル分析実験の結果にもとづき、13.5MHzの高い周波数の振動から+ビート波(15.65MHz)を通して2MHzの低い周波数の振動にエネルギーが移動するような図6に示す『二振動の非線形効果』を考えた。

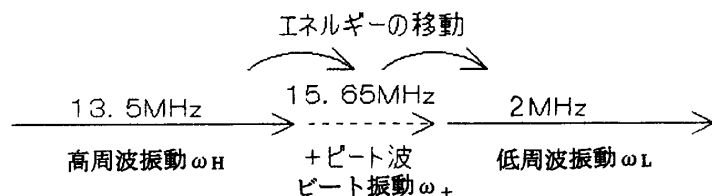


図6. 二振動の非線形効果による
低周波側振動の励起現象の説明図

それゆえ、重畳効果が発生する理由として、高い周波数(13.5MHz)のエネルギーが+ビート波を通して低い周波数(2MHz)に移動する非線形相互作用のため、低い周波数の振動 V_2 が励起され大きくなるため、電離が促進される。このため、2MHz の電離衝突周波数が増大するので、2MHz 側のプラズマのコンダクタンスの負性化を助長させるように作用するため、2MHz の V_c を低下させたのではないかと考えている。

5. まとめ

2MHz に 13.5MHz を重畳した場合、放電特性(パッシェン曲線)の最小点より低いガス圧領域で 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 の低下はなく、重畳効果の影響は小さかった。また、13.5MHz に 2MHz を重畳した場合には、すべてのガス圧領域で P_c は低下しなく、重畳効果はない、との実験結果が得られた。この違いを調べるため、2MHz と 13.5MHz の 2 種類の高周波電界を重畳させた場合の、プラズマ中に生じるスペクトルの振動電圧 V_f 、特に 2MHz と 13.5MHz の基本波(V_2 と $V_{13.5}$)とこれらのビート波(-ビート波 V_- と +ビート波 V_+)に注目し、スペクトルの振幅を測定した。この結果、13.5MHz の高い周波数の振動から+ビート波(15.65MHz)を通して 2MHz の低い周波数の振動にエネルギーが移動するような、『二振動の非線形効果』が生じているため、2MHz 側の V_c が低下する、との重畳効果が現れたと考えている。さらに実験を行い、この二振動の非線形効果理論を確認してゆきたい。

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:福井工業大学研究紀要、第33号、第一部(2003)、p.23
- 10)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
- 11)日本放送協会編:新ラジオ技術教科書 基礎編 (日本放送協会、東京都、1960)、11章、p.209
- 12)長濱治男、福村隆志、高元暉夫: 6) に同じ

(平成15年12月1日受理)