

# 仮想陰極発振器を用いた滅菌用大電力マイクロ波発生 における発振条件の考察

橋本好幸\*

## Some Conditions of High Power Microwave Generation in a Virtual Cathode Oscillator for Sterilization

Yoshiyuki HASHIMOTO\*

### ABSTRACT

Biological applications with a high-power pulsed microwave (HPM) produced by VIRCATOR has been studied. A coaxial compact Marx generator (-180kV, 16Ω, 50ns) and a point pinch diode are used for the generation of a relativistic electron beam. From calculation results, the HPM frequency was found to be dependent on diode gap length. In case of a cathode radius of 10 mm and a diode voltage of 100-300kV, HPM frequency was calculated to be about 18 GHz.

*Keywords* : High-Power Microwave, Virtual Cathode Oscillator, Coaxial Marx Generator, Sterilization

### 1. はじめに

近年、生体に対するパルス高電界の印加やプラズマの照射によって、細胞に刺激を与えることで、生体の活性化やガンの抑制を行う研究が行われ、その成果に期待が寄せられている<sup>(1)-(3)</sup>。

一方、パルスパワー装置を用いた仮想陰極発振器で発生するマイクロ波 (High Power Pulsed Microwave: HPM) は、短パルス (数十ナノ秒)・大電力 (数十MW) という特徴を有するため、加速器や宇宙からの無線送電等の応用を想定し研究されてきた<sup>(4),(5)</sup>。

そこで、我々はこの HPM を生体に照射することで、パルス高電界やプラズマ照射と同様に、生体の活性化が可能ではないかと考えた。また、HPM は高周波であるために、細胞膜の内部 (細胞質) にまで浸透するので、生体刺激の効果が大きいことが期待される。その上、HPM のパワーを大きくすることで、細胞の死滅も可能であると予想され、滅菌等への応用も考えられる。

本論文では、仮想陰極発振器を用いた HPM 発生方法の概要および、本実験で使用する同軸マルクス電におけるマイクロ波の発生条件を算出した結果について報告する。

### 2. 仮想陰極発振器によるマイクロ波の発生

図 1 に仮想陰極発振器 (Virtual Cathode oscillator: VIRCATOR) の概略図を示す。高電圧パルスをダイオードに印加すると、陰極から相対論的電子ビーム (Relativistic Electron Beam: REB) が発生する。その REB が陽極を通り抜けて、ビーム電流が空間電荷制限電流

$$I_{SC} = \frac{2\pi\epsilon_0 mc^3}{e} \left( \frac{r_c}{d_g} \right)^2 (\gamma_0^{1/2} - 0.8471)^2 \dots\dots\dots(1)$$

を超えると仮想陰極が形成される<sup>(6)-(8)</sup>。ここで、 $\epsilon_0$  は

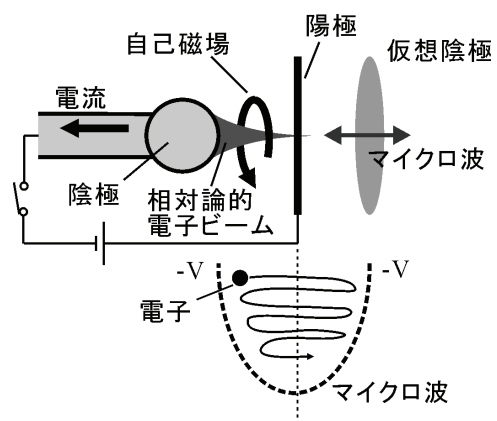


図 1 仮想陰極発振器の原理

\* 電子工学科 教授

真空の誘電率,  $m$  は電子の質量,  $c$  は光速  $e$  は電子の電荷,  $r_c$  は陰極の半径, および  $d_g$  はダイオードのギャップ長を示す。また,  $\gamma_0$  は相対論的因子で,

$$\gamma_0 = 1 + \frac{eV}{mc^2} \dots\dots\dots (2)$$

である。ここで,  $V$  は電子の加速電圧である。

また, 電極間にイオンビームが存在した場合の空間電荷制限電流 (バイポーラ空間電荷制限電流) は,

$$I_{BSC} = 1.86I_{SC} \dots\dots\dots (3)$$

で与えられる。

次に, ビーム電流がさらに増加すると電子ビームがピンチを始める。この時のビーム電流は,

$$I_C = \frac{2\pi mc}{\mu_0 e} \left( \frac{r_b}{d_g} \right) (\gamma_0^2 - 1)^{3/2} \dots\dots\dots (4)$$

で与えられる。上式で  $\mu_0$  は真空の透磁率, また,  $r_b$  は電子ビームの半径である。

仮想陰極が生じると, 図1に示すようにポテンシャルの井戸が形成され, その井戸内を電子が往復運動する。この往復運動によって, 周波数が

$$f_{ref} \propto \frac{V^{1/2}}{d_g} \dots\dots\dots (5)$$

となるマイクロ波は発生する。また, 仮想陰極は REB によって維持されるため, 電子ビームの流入量が増えると, 仮想陰極自身が時間的にも空間的にも振動し, この振動からもマイクロ波が発生する。この場合, 発生するマイクロ波の周波数は,

$$f_{osc} = \frac{c}{2\pi d_g} \ln \left\{ \gamma_0 + (\gamma_0^2 - 1)^{1/2} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

で与えられる<sup>(9)-(13)</sup>。

### 3. 実験方法および装置の概要

図2に実験装置の概略図を示す。REB を生成する電源には, 小型の同軸マルクス装置を用いる。小型同軸マルクスは, コンデンサーバンクユニットと充電抵抗の6組を円筒容器に縦方向に並べて構成する。コンデンサーバンクユニットは, セラミックコンデンサ (村田製作所 DHS-N4700, 40kV, 2nF) 2個を直列接続したもの26組を, 並列に接続して構成し, 耐圧は80kVで合成容量は26nFである。

ダイオードには, ポイントピンチダイオードを用いる。陰極はステンレス球(直径10~20mm程度)を用い, 陽極はアルミ箔, ステンレス金網または穴あき板を使用する。真空容器は, ロータリポンプとターボ分子ポンプにより  $10^{-4}$ Pa 程度まで排気する。同軸マルクスを高電圧充電器で充電し, 高電圧パルサーでギャップスイッチをトリガーすると REB が生成されマイクロ波が発生する。発生したマイクロ波は, 円筒導波管を通過してその先端に取り付けられたホーンアンテナによって金網シールドされたマイクロ波照射室へと導かれる。

発生したマイクロ波は, 円筒導波管に設置したピックアッププローブでその信号を検出する。ピックアッププローブは, SMA コネクタと探針で構成され, その出力を, マイクロケーブルを経て分波器に導き2つの信号に分割する。一方の信号は, 同軸アッテネータで減衰させた後にクリスタルディテクターで検波し, その信号をオシロスコープで観測する。また他方の信号は, 同軸導波変換機で信号変換を行い, 矩形導波管を伝播させた後に, クリスタルディテクターで検波し, オシロスコープで観察する。長さ  $L$  の矩形導波管を通過するに要するマイクロ波の伝播時間  $t$  は,

$$t = \frac{L}{c \left\{ 1 - (f_c/f)^2 \right\}^{1/2}} \dots\dots\dots (7)$$

で与えられる。ここで,  $f_c$  は導波管の遮断周波数,  $f$

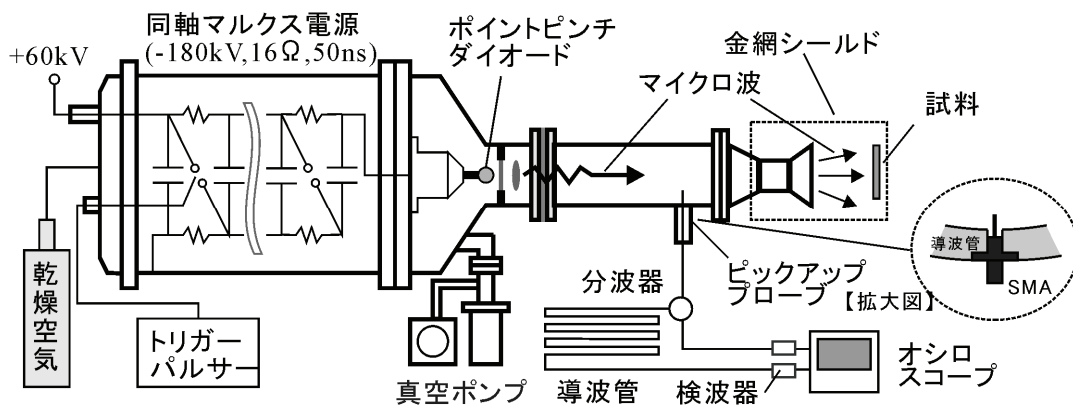


図2 実験装置の概略図

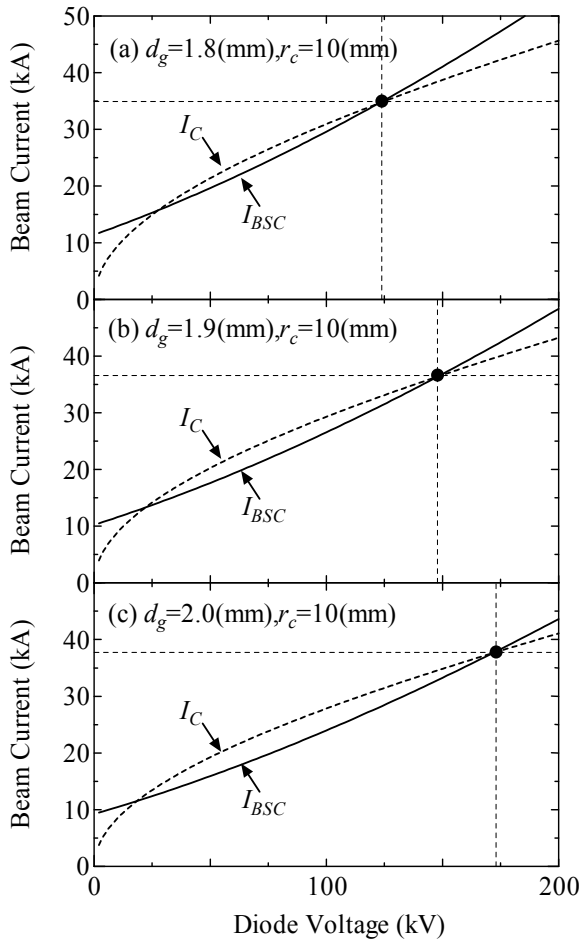


図3 陰極半径  $r_c=10\text{mm}$  と固定した場合のダイオード電圧とバイポーラ空間電荷制限電流  $I_{BSC}$  および臨界電流  $I_C$  の計算結果で(a) はギャップ長  $d_g=1.8\text{mm}$ , (b) は  $d_g=1.9\text{mm}$  および(c) は  $d_g=2.0\text{mm}$  の場合

はマイクロ波の周波数である。よって、(7)式とオシロスコープで観測した導波管通過前と導波管通過後の検出時間差から、仮想陰極発振器で発生したマイクロ波の周波数を算出することができる。

#### 4. マイクロ波発生条件の算出およびその考察

ダイオードの陰極半径およびギャップ長の概算を求めるために、理論式を用いて、マイクロ波の発生条件を算出した。

図3および図4は、 $r_b=r_c$  として(3)式および(4)式から求めた各ダイオード電圧における  $I_{BSC}$  および  $I_C$  の計算結果である。図3は、陰極半径  $r_c=10\text{mm}$  と固定し、(a) はダイオードのギャップ長を  $d_g=1.8\text{mm}$ , (b) は  $d_g=1.9\text{mm}$ , そして(c) は  $d_g=2.0\text{mm}$  とした場合のそれぞれの算出結果を示す。過去の実験結果より、仮想陰極発振器でのマイクロ波が発生するポイントは、 $I_{BSC}=I_C$  であった。そこで、図3の結果において  $I_{BSC}=I_C$  となるダイオード電圧  $V_D$  とビーム電流  $I_B$  をマイクロ波発

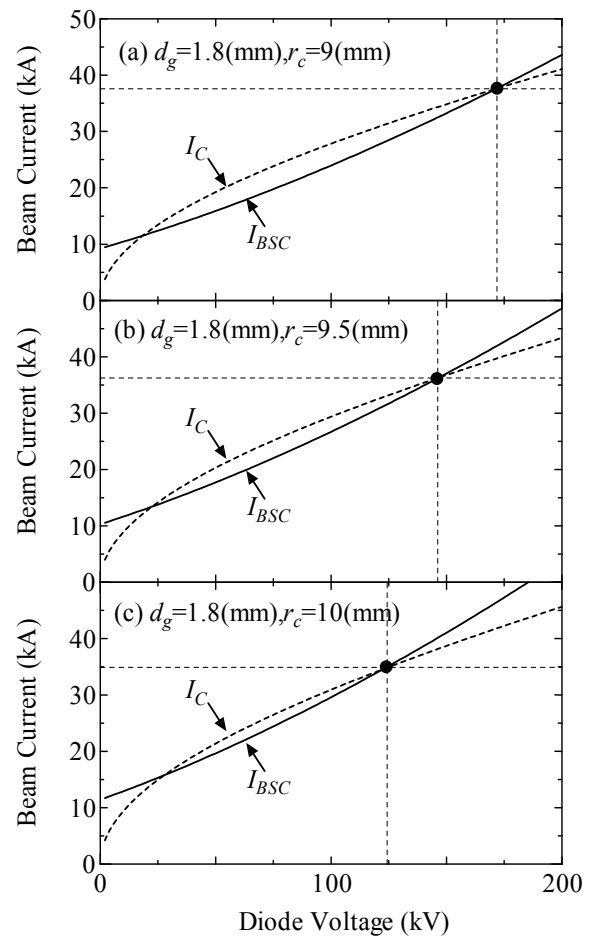


図4 ダイオードギャップ長  $d_g=1.8\text{mm}$  と固定した場合のダイオード電圧とバイポーラ空間電荷制限電流  $I_{BSC}$  および臨界電流  $I_C$  の計算結果で(a) は陰極半径  $r_c=9.0\text{mm}$ , (b) は  $r_c=9.5\text{mm}$  および(c) は  $r_c=10.0\text{mm}$  の場合

生の閾値と仮定すると、(a)  $d_g=1.8\text{mm}$  のとき  $V_D=124\text{kV}$  で  $I_B=35\text{kA}$ , (b)  $d_g=1.9\text{mm}$  のとき  $V_D=148\text{kV}$  で  $I_B=37\text{kA}$ , (c)  $d_g=2.0\text{mm}$  のとき  $V_D=174\text{kV}$  で  $I_B=38\text{kA}$  であることが分かる。この結果より、ダイオードのギャップ長が短い方が、マイクロ波を発生するダイオード電圧およびビーム電流の閾値は下がることがわかる。また、ダイオード電圧の閾値は、ギャップ長の変化に大きく依存していることもわかる。

次に、図4は、ダイオードのギャップ長  $d_g=1.8\text{mm}$  と固定し、(a) は陰極半径を  $r_c=9.0\text{mm}$ , (b) は  $r_c=9.5\text{mm}$ , そして(c) は  $r_c=10.0\text{mm}$  とした場合のそれぞれの算出結果を示す。図4においても図3と同様に  $I_{BSC}=I_C$  をマイクロ波発生の閾値と仮定すると、(a)  $r_c=9.0\text{mm}$  のとき  $V_D=172\text{kV}$  で  $I_B=37\text{kA}$ , (b)  $r_c=9.5\text{mm}$  のとき  $V_D=146\text{kV}$  で  $I_B=36\text{kA}$ , (c)  $r_c=10.0\text{mm}$  のとき  $V_D=124\text{kV}$  で  $I_B=35\text{kA}$  であることが分かる。この結果より、陰極半径が大きい方が、マイクロ波を発生するマイクロ波

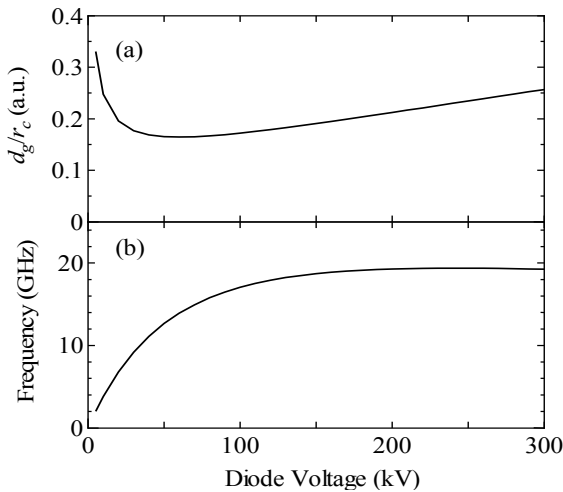


図5  $I_{BSC}=I_C$ とした場合のダイオード電圧に対する (a)  $d_g/r_c$ の計算値および(b) マイクロ波の発振周波数の計算値（導波管 WRJ-10 の場合）

を発生するダイオード電圧およびビーム電流の閾値は下がることがわかる。以上の結果より、マイクロ波の発振条件は、ダイオードのギャップ長および陰極半径の微小な変化に大きく依存することがわかる。

次に、図5は、 $r_b=r_c$ と仮定して(3)~(5)式から、ダイオード電圧を変化させて  $I_{BSC}=I_C$ となるギャップ長  $d_g$ と陰極半径  $r_c$ の比を計算した結果である。図5(a)より、本実験で実現可能なダイオード電圧が 100~300kV の領域では、 $d_g/r_c$ の値は 0.2~0.25 となることがわかる。

図5(b)は、陰極半径  $r_c=10\text{mm}$ として図5(a)の条件を満足するようにギャップ長  $d_g$ を選んだ場合に、仮想陰極で発生する HPM の周波数を(7)式より算出した結果である。図5(b)より、ダイオード電圧が 100~300kV では、HPM の発振周波数はあまり変化がなく、18GHz 近辺であることがわかる。

## 5. まとめ

パルスパワー装置を用いた仮想陰極発振器で発生する短パルス・大電力マイクロ波を用いた生体の活性化および滅菌処理について研究を行っている。研究を始めるに際して、同軸マルクス出力電圧、陰極半径およびギャップ長の概算を求めるために、理論式を用いてマイクロ波の発生条件を算出した。それらの結果を以下にまとめる。

- 1) 陰極半径を固定した場合、仮想陰極発振器によるマイクロ波発生の閾値となるダイオード電圧およびダイオード電流は、ダイオードギャップ長を短くすると小さくなることがわかった。また、ダイオードギャップ長を固定した場合は、マイクロ波発生の閾値電圧と電流は、陰極半径が大きくなると小さくなることがわかった。

- 2) ダイオード電圧が 100~300kV の領域では、マイクロ波が発振する  $d_g/r_c$ の値は 0.2~0.25 となることがわかった。
- 3) 陰極半径  $r_c=10\text{mm}$ とした場合、ダイオード電圧が 100~300kV の範囲でマイクロ波の発振周波数は約 18GHz であることがわかった。

## 謝辞

本研究は科研費(23560350)の助成を受けたものである。

## 参考文献

- (1) 勝木 淳他：「パルス高電界の生体作用と先端的医療応用」、プラズマ・核融合学会誌, Vol.87(10), pp.710-714, 2011.
- (2) 吉野 功他：「銀電極を用いた高電圧パルス殺菌装置による種々の菌に対する不活性化効果」、静電気学会誌, Vol.34(2), pp.81-86, 2010.
- (3) 勝木 淳他：「バイオエレクトリクスー パルス高電圧の生体作用とバイオ・医療応用」、静電気学会誌, Vol.33(4), pp.142-147, 2009.
- (4) M. Yatsuzuka, Y. Hashimoto, M. Sato, I. Ohta, T. Kaneko, S.Nobuhara and T.Tazima : “High-Frequency, High-Power Microwave Generation by a Virtual Cathode Oscillator”, J. Phys. Soc. Jpn., Vol.60, No.2, pp.352-355,1991.
- (5) M. Yatsuzuka, K. Nagakawa, Y. Hashimoto, O. Ishihara and S.Nobuhara : “Electron Beam Behavior in an Axially-Extracted Virtual Cathode Oscillator”, IEEE Trans. Plasma Science, Vol.22, No.5, pp.939-944, 1994.
- (6) H. R. Jory and A. W. Trivelpiece : “Exact Relativistic Solution for the One-Dimensional Diode”, J. Appl. Phys., Vol.40, No.10, pp.3942-3926, 1969.
- (7) R. B. Miller : “An Introduction to the Physics of Intense Charged Particle Beams”, Plenum Press, New York and London, pp.31, 1982
- (8) J. Benford, J. A. Swegle and E. Schamiloglu : “High Power Microwaves”, Taylor and Francis, New York, 2007.
- (9) W. Woo : “Two-Dimensional Features of Virtual Cathode and Microwave Emission ”, Phys. Fluids, Vol.30, pp.239-244, 1987.
- (10) J. Benford, H. Sze, W. Woo, and B. Harteneck : “Virtual-cathode oscillator emission by a pinched diode”, Phys. Rev. Lett., vol.56, No.4,pp.344-346, 1986.
- (11) H. Sze, J. Benford and W. Woo : “High-power Microwave Emission from a Virtual Cathode Oscillator”, Laser and Particle Beams, Vol.5, Part 4, pp.675-681, 1987.
- (12) S. Burkhart : “Multigigawatt microwave generation by use of a virtual cathode oscillator driven by a 1-2 MV electron beam”, J. Appl. Phys., vol. 62, No. 1, pp.75 - 78,1987.
- (13) D. Price, D. Fittinghoff, J. Benford, H. Sze and W. Woo : “Operation Features and Microwave Characteristics of the Vircator II Experiment”, IEEE Trans. Plasma Science, Vol.16, No.2, pp.177-184, 1988.