

共振器を設置した仮想陰極発振器の特性評価

CHARACTERISTIC EVALUATION OF VIRTUAL CATHODE OSCILLATOR WITH RESONATOR

大賀達朗^{#,A)}, 伊藤智哉^{A)}, 孔純亜^{A)}, 須貝太一^{A)}, 江偉華^{A)}

Tatsuro Ohka^{#,A)}, Tomoya Ito^{A)}, Chunya Kong^{A)}, Taichi Sugai^{A)}, Weihua Jiang^{A)}

^{A)} Nagaoka University of Technology

Abstract

The virtual-cathode oscillator is one of the promising devices being developed as high-power microwave sources. It has the advantages of simplicity and high power capability. However, it has serious problems like low efficiency and frequency stability. In this paper, we have tried to solve those problems by installing a resonator and strengthening microwave interactions. Therefore, microwave measurements of a virtual cathode oscillator with a resonator has been carried out. The measurement result shows that the output of the virtual cathode oscillator can be improved by installing the resonator designed to match the resonant frequency and the oscillation frequency.

1. はじめに

大電力マイクロ波とは 100MW を超える電力を持ったマイクロ波のことである。近年、大電力マイクロ波は加速器において粒子の加速に用いられるほか、エネルギー、宇宙、環境分野など幅広い分野への応用が期待されている。大電力マイクロ波の発生源としてクライストロンやマグネトロンなどと並んで、仮想陰極発振器 (Virtual Cathode Oscillator) という発生方法がある。[1][2]これは、相対論的パルス電子ビームの電流が空間電荷制限電流を超えるときに生ずる固有振動を用いたマイクロ波の発生方法である。仮想陰極発振器は発振機構がシンプルである、発振周波数を1~10GHz程度まで調整可能といった特長を有する。しかし発振効率が低いことや周波数の安定性が悪いという問題がある[3]。本研究は仮想陰極発振器のマイクロ波発振効率の低さを改善することを目的に、共振器の設計を行った。また共振器を設置した際の仮想陰極発振器の出力特性を、従来の場合と比較することで共振器の効果について検討した。

本論文では共振器を設置した場合と従来の仮想陰極発振器の放射電力、周波数特性について比較・検討した結果を報告する。

2. 原理と実験装置

2.1 仮想陰極発振器の構造と原理

Figure 1 に本研究における仮想陰極発振器の構造の模式図を示す。カソードは直径 12cm のステンレスの円盤上に直径 10cm のベルベットを貼り付けている。またアノードはステンレス製のメッシュ(線径:0.6mm)を用いており、透過率は~65%である。アノード-カソード間のギャップは 21mm とした。カソードにパルスの高電圧を印加した際、カソード表面から電子ビームが発生し、電極間の強電界によって電子ビームはアノード方向へ加速される。加速された電子ビームの一部はメッシュ状のアノードを通過しドリフト空間へ到達する。電子ビーム電流が空間

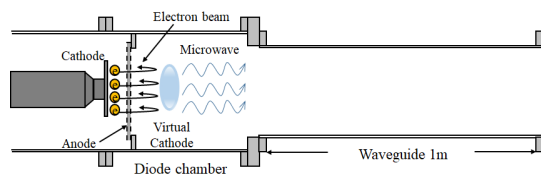


Figure 1: Schematic structure of a virtual-cathode oscillator.



Figure 2: Repetitive pulsed-power generator "ETIGO-IV".

電荷制限電流に達し、空間電荷効果が著しくなると、見かけ上カソードとはほぼ同電位の高いポテンシャル障壁が形成される。この障壁を仮想陰極 (Virtual Cathode) と呼ぶ。この仮想陰極自身の振動や、仮想陰極のポテンシャルを超えることができない電子ビームがカソード-仮想陰極間を往復運動することで、マイクロ波帯域の電磁波を共振・放射する。放射されたマイクロ波は直径 21cm、長さ 100cm の円形導波管を伝搬し、アクリル板を通して空气中に放射される。

2.2 高繰返しパルスパワー発生装置 "ETIGO-IV"

Figure 2 に本研究において仮想陰極発振器をドライブするために使用する高繰返しパルスパワー発生装置 "ETIGO-IV" を示す。定格出力電圧 400kV、定格出力電流 13kA、パルス幅 120ns、繰返し率 1Hz である[4]。

ETIGO-IV のダイオード電圧・電流および ETIGO-IV を用いた仮想陰極発振器のマイクロ波出力の典型的な結果を Figure 3 に示す。マイクロ波の観測には角錐ホーン

[#] t_ohka@stn.nagaokaut.ac.jp

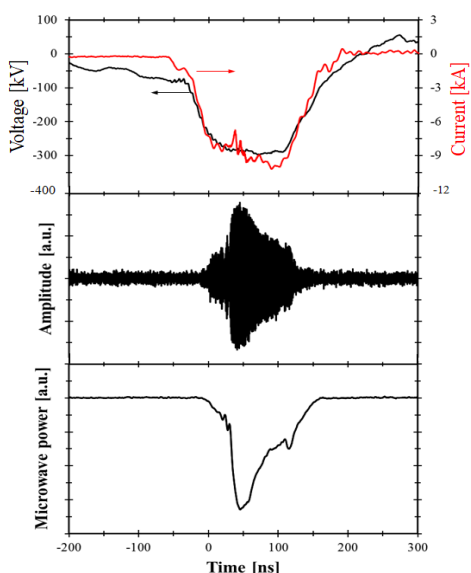


Figure 3: Waveform of diode voltage and current, R-band horn antenna signal, and waveform of obtained by microwave detector.

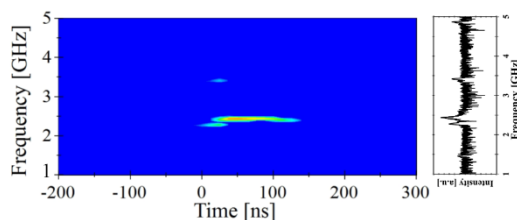


Figure 4: Time-Frequency analysis (TFA) and Fourier transform of the horn antenna signal shown in Figure 3.

アンテナ(R-band: 1.72-2.61GHz)を使用し、同軸 RF ケーブル(TOTOKU TCF500)を通してデジタルオシロスコープ(LeCroy WavePro 760Zi サンプルングレート 40GS/s)によって測定した。それと同時にマイクロ波検波器(Anritsu 75N50B)によってマイクロ波を測定することで mV-dBm 変換によってマイクロ波放射電力を算出した。

Figure 3 に示したダイオード電圧のピークは~300kV、ダイオード電流のピークは~10kA である。放射電力を求めると~60MW であり、マイクロ波発振効率は~1.9%である。またホーンアンテナで受信した信号を周波数解析した結果、ETIGO-IVを用いた仮想陰極発振器の主周波数は~2.5GHz であることがわかっている(Figure 4)。

2.3 共振器の設置

仮想陰極発振器の発振効率を改善させるために共振器の設置が提案されている[5][6]。本研究では、金属の円筒の一端に、電磁波反射板を取り付けることで共振器を構成する。共振器によってマイクロ波電界の相互作用を強めることで、より大きな放射電力が得られる。

Figure 5 に仮想陰極発振器に共振器を設置した場合の原理図を示す。ダイオード側(仮想陰極発振器)からマイクロ波が共振器内へ放射される。放射されたマイクロ波(入射波)が共振器に設置された反射板によって反射される。この反射されたマイクロ波(反射波)とダイオード側からの入射波が共振器内部で重なり、定在波となる。こ

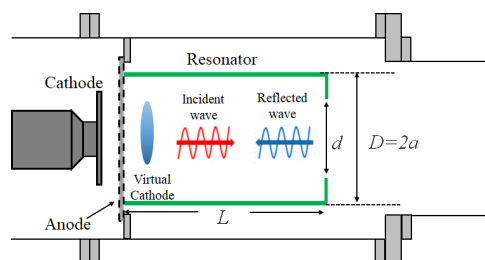


Figure 5: Schematic structure of a virtual-cathode oscillator with resonant cavity.

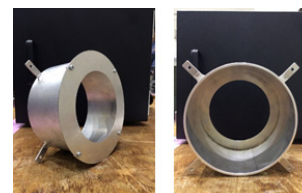


Figure 6: Resonator ($L=80\text{mm}$, $D=144\text{mm}$, $d=110\text{mm}$).

のとき定在波が共振条件を満たすと定在波の振幅が増幅され、電磁波の相互作用がより強くなることでマイクロ波放射電力の向上が期待できる。

3. 実験結果

3.1 共振器の設計

前章にて ETIGO-IVを用いた従来の仮想陰極発振器の主周波数は~2.5GHz と述べた。つまり共振周波数が~2.5GHz となるように共振器を設計することで、マイクロ波発振効率が向上できると考えられる。

本研究では構造単純な円筒型空洞共振器を設計した。今回はアノードの大きさに合わせて円筒の直径を144mm とした。また過去の研究結果から ETIGO-IVによる仮想陰極発振器では TM_{01} モードのマイクロ波が発振していると考えられる。これらのことを考慮して共振器の長さ L を設計していく。

共振器の長さ L が管内波長 λ_g の半分またはその整数倍のとき、すなわち

$$L = (\lambda_g l) / 2 \quad (1)$$

のとき共振が生じる。ここで l は正の整数である。円形導波管を伝播する TM_{nm} 波の管内波長 λ_g は、

$$\frac{1}{\lambda_g} = \sqrt{\left(\frac{1}{\lambda}\right)^2 - \left(\frac{x_{nm}}{2\pi a}\right)^2} \quad (2)$$

なので、(1)式を(2)式に代入して共振波長 λ_c は

$$\lambda_c = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{2L}\right)^2 + \left(\frac{x_{nm}}{2\pi a}\right)^2}} \quad (3)$$

である。従って、 $c=f\lambda$ の関係から共振周波数 f_r は

$$f_r = c \sqrt{\left(\frac{1}{2L}\right)^2 + \left(\frac{x_{nm}}{2\pi a}\right)^2} \quad (4)$$

となる。ここで c は光速、 x_{nm} はベッセル関数 $J_m(x)=0$ の第 n 番目の根であり、 a は共振器の半径である。

(4)式に前述の $f_r=2.5\text{GHz}$ や $a=72\text{mm}$ 、ベッセル関数の値を代入し L について解くと、 $L\sim 80\text{mm}$ と求まった。そこで $L=80\text{mm}$ 付近の共振器 5 種類 ($L=60, 75, 80, 85,$

Table 1: Resonant Frequency

Length of resonator[mm]	Resonant frequency[GHz]
60	2.96
75	2.56
80	2.48
85	2.34
95	2.24

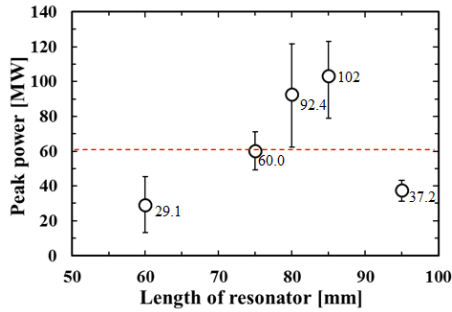


Figure 7: Length of resonator vs peak power characteristic ($D=144, d=110\text{mm}$).

95mm)を作製し、それぞれの場合について特性評価を行った。Figure 6は実際に作製したアルミ製の $L=80\text{mm}$ 、共振器の直径 $D=144\text{mm}$ 、反射板の内径 $d=110\text{mm}$ の共振器である。今回作製した共振器は共振器本体(円筒)と、マイクロ波を反射させるための反射板から成る。反射板は共振器本体から着脱可能であり、内径を変化させることでマイクロ波の出口の大きさを変更可能となっている。また実際に作製した共振器について(4)式から求めた共振周波数を Table 1 に示す。

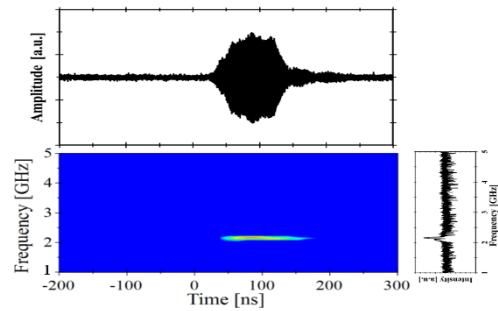
3.2 共振器の長さ L を変化させた場合

実際に作製した 5 種類の共振器をアノードに接触するように設置し、マイクロ波測定、放射電力の算出を行った。なお反射板の内径は 110mm 一定で行った。

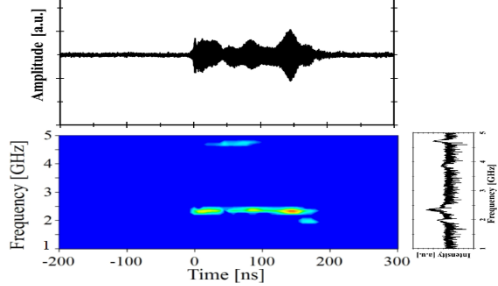
Figure 7 に放射電力を算出した結果を示す。横軸は共振器の長さ $L[\text{mm}]$ 、縦軸は放射電力[MW]である。プロットは各条件で 5 回測定を行った際の放射電力の平均値であり、エラーバーは最大値、最小値を示している。またグラフ上の赤線は共振器を設置しない、従来の仮想陰極発振器の放射電力である。Figure 7 から従来の放射電力を超える結果が得られたのは $L=80, 85\text{mm}$ の場合のみであった。 $L=80\text{mm}$ での放射電力は 92.4MW (主周波数: 2.3GHz)、発振効率 $\sim 3.2\%$ だった。 $L=85\text{mm}$ では 102MW (主周波数: 2.2GHz)、発振効率 $\sim 3.5\%$ であり、従来のおよそ 1.7 倍の出力が得られた。また共振器を設置すると従来よりも主周波数が $100\sim 300\text{MHz}$ 程度低くなる傾向も見られた。特に L が長くなると周波数が低くなる現象が顕著にみられた。しかし $L=85\text{mm}$ の場合は発振した主周波数と Table 1 に示す共振周波数が近づいたため、より大きな放射電力が得られたと考えている。

ここで従来のもより出力が向上する条件と出力が低下する条件を比較するため、測定したマイクロ波波形および、マイクロ波を周波数解析した結果を比較する。

Figure 8(a)のように出力が大きくなる場合は単一の周波数で発振し、マイクロ波の振幅も一定という傾向がよく



(a) $L=80\text{mm}, D=144\text{mm}, d=110\text{mm}$



(b) $L=60\text{mm}, D=144\text{mm}, d=110\text{mm}$

Figure 8: Comparison of microwave and Time-frequency analysis results obtained by using resonators of different lengths.

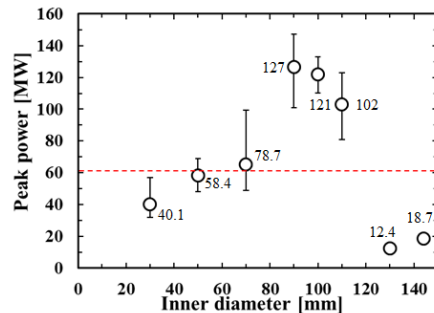


Figure 9: Inner diameter vs peak power characteristic ($L=60\text{mm}, D=144\text{mm}$).

見られた。一方で Figure 8(b)に示すように出力が低くなる場合は発振したマイクロ波が多くの周波数成分を含んでおり、マイクロ波の振幅も不安定である傾向が多くみられた。

3.3 反射板の内径 d を変化させた場合

3.2 項の結果から共振器の長さ $L=85\text{mm}$ でより大きな放射電力が期待できる。そこで前項では反射板の内径 d を 110mm で固定していたが、反射板の内径を変化させることで更なる出力向上が可能か検討した。

今回は内径の値を $30\text{mm}\sim 144\text{mm}$ (反射板無し)まで変更してマイクロ波の測定を行い放射電力の算出を行った。Figure 9 に反射板の内径 d を変化させたときの放射電力を示す。Figure 7 と同様に各条件で 5 回測定を行った際の放射電力の平均値をプロットし、5 回の測定の中での最大値と最小値をエラーバーで表している。また従来の仮想陰極発振器の放射電力を赤線で示している。

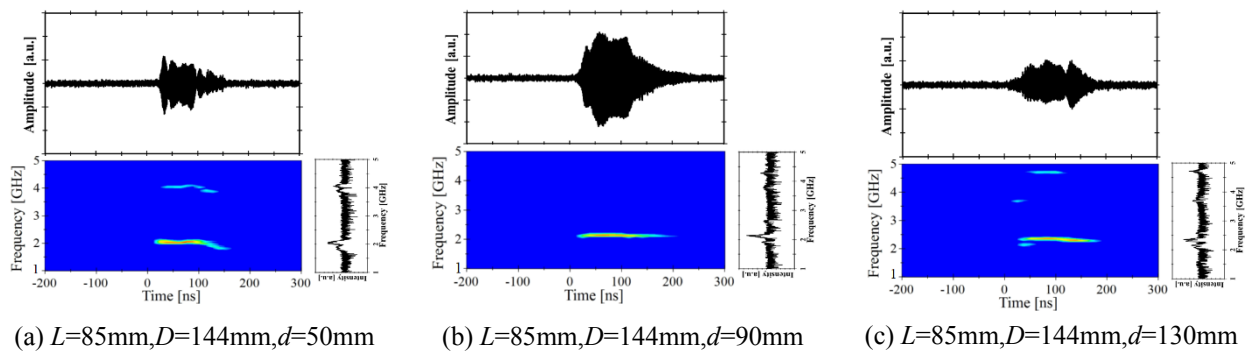


Figure 10: Comparison of microwave waveform and time-frequency analysis results obtained by using resonators of different reflector's inner diameter.

Figure 9 より反射板の内径 d が 90、100、110mm のとき放射電力が 100MW を超え、マイクロ波発振効率も ~4% であり、従来の仮想陰極発振器よりも特に出力が向上したことがわかる。また d の値を 70、50、30mm と小さくしていくと徐々に放射電力が減少していく傾向がみられる。 d が小さくなるにつれて、反射されるマイクロ波が多くなる。反射されたマイクロ波が共振器内に留まった場合、共振器内で徐々に減衰する。従って、空気中に放射されるマイクロ波は少なくなり、測定されるマイクロ波の信号が弱まり放射電力が減少したと考えられる。一方で d の値を 130、144mm のように大きくすると急激に放射電力が低下した。 d が大きい場合、反射されるマイクロ波が少なく、放射されたマイクロ波と反射波の相互作用も弱い。つまり共振器を設置していない従来の仮想陰極発振器とほぼ同じ状態であると考えられる。しかしながら放射されたマイクロ波が、アノードに接触している共振器本体(円筒)内での管内媒質や管壁電流などによる損失によって放射電力が低下したと考える。

反射板の内径 d の変化によるマイクロ波出力の差異をより詳しく見るため Figure 10 に反射板の内径 50mm、90mm、130mm のマイクロ波波形と周波数解析の結果を示した。Figure 10(b) に示したように従来よりも高い放射電力が得られた内径 90~110mm の場合、マイクロ波の振幅が一定でかつ ~2.2GHz 単一の周波数で発振していることが確認できた。この傾向は Figure 8(a) に示した高い放射電力が得られたときのマイクロ波特性とも一致している。高い放射電力が得られる条件では、共振周波数付近で発振したマイクロ波は強い電界の相互作用によって、より大きな放射電力が引き出されるが、共振周波数以外の発振周波数を持つマイクロ波は減衰する。そのため単一周波数で発振し尚且つ、高いマイクロ波放射電力が得られたと思われる。Figure 10(c) のように反射板の内径が大きい場合は Figure 4 に示した従来の仮想陰極発振器に近い周波数特性が得られた。前述したように共振器を設置したとしても d が大きい場合、共振器を設置しない従来の仮想陰極発振器の条件に近い場合、周波数特性には大きな変化がなかったと考えられる。

4. まとめ

本研究は高繰り返しパルスパワー発生装置“ETIGO-

IV”を用いて共振器を設置した仮想陰極発振器による大電力マイクロ波の測定および評価を行った。共振器を設置するにあたり、ETIGO-IV による従来の仮想陰極発振器の主周波数(2.5GHz)と共振周波数が一致するように共振器の設計を行った。設計した共振器を設置して仮想陰極発振器のマイクロ波放射電力を測定したところ、共振器の長さ 85mm のとき最も高い放射電力(102MW) および、マイクロ波発振効率(~3.5%)が得られた。また共振器の長さ 85mm のまま反射板の内径を変化させた場合、反射板の内径 90mm の条件で放射電力 127MW、発振効率~4.4%まで出力が向上した。

本研究で得られた放射電力、発振効率ともに、共振器を設置しない条件に比べておよそ 2 倍向上しており、共振器の設置による仮想陰極発振器の出力向上が可能であることを示している。今後は仮想陰極発振器の出力をより向上させるため、マイクロ波発振周波数と共振周波数をさらに厳密に一致させる。またマイクロ波が損失することなく共振器から導波管へ伝播できるよう反射板の内径を適切に設定するなどの共振器構造の最適化を行う予定である。

参考文献

- [1] D.J.Sullivan, J.E.Walsh, and E.A.Coutsias: “Virtual cathode oscillator (vircator) theory,” *High Power Microwave Sources*, V.Granatstein and I.Alexeff,Eds. Norwood, MA:Artech House, pp.441-505 (1987).
- [2] L.E.Thode,”Virtual-cathode microwave device research: Experiment and simulation,” *High Power Sources*, V.Granatstein and I.Alexeff,Eds. Norwood, MA:Artech House, pp.507-562(1987).
- [3] W. Jiang, “Time-frequency analysis of virtual cathode oscillator,” *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 38, No.6, pp.1325-1328, Jun.2010.
- [4] A. Tokuchi, N. Ninomiya, W. Jiang, and K. Yatsui, “Repetitive pulsed-power generator ‘ETIGO-IV’,” *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 30, No. 5, pp. 1637–1641, Oct. 2002.
- [5] J. Benford, D. Prise, H. Sze, and D. Bromley, “Interaction of a vircator microwave generator with an enclosing resonant cavity,” *Journal of Applied Physics.*, vol.61, 2098(1987).
- [6] V. Baryshevsky, A. Gurinovich, E. Gurnevich, and P. Molchanov, “Experimental study of an axial vircator with resonant cavity,” *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 43, No.10, pp3507-3511, Oct.2015.