

仮想陰極発振器における電子ビームの挙動と大電力マイクロ波の発生解析

ANALYSIS OF ELECTRON BEAM BEHAVIOR AND HIGH-POWER MICROWAVE GENERATION IN VIRTUAL CATHODE OSCILLATOR

ファムフータン^{A)}, 高橋龍世^{A)}, 大久保汐音^{A)}, 加葉田駿^{A)}, 長尾和樹^{B)}, 須貝太一^{A)}, 江偉華^{A)}
Huu Thanh Pham^{A)}, Ryusei Takahashi^{A)}, Shion Okubo^{A)}, Shun Kabata^{A)},
Kazuki Nagao^{B)}, Taichi Sugai^{A)}, Weihua Jiang^{A)}

^{A)} Nagaoka University of Technology

^{B)} National Institute of Technology, Oyama College

Abstract

Research of the electron beam behavior in a Virtual cathode oscillator(Vircator) using ETIGO-IV (Repetitive Pulsed Power Generator) was conducted. The characteristics of high-power microwaves produced by the virtual cathode oscillator were also performed. The vircator generates a microwave by interaction with beam modulation and electric field around the virtual cathode. It has the advantage of a simple structure and a wide frequency band. However, the problem with the vircator is that it is low in efficiency and has an unstable frequency. In this study, two detectors, a large detector and a small detector, were used to measure the electron beam in the vircator, and the behavior of the electron beam was analyzed. The results of the two types of detectors showed the existence of virtual cathode oscillation. The characteristics of high-power microwaves produced by the vircator were obtained.

1. はじめに

マイクロ波は、周波数範囲が1 GHz~30 GHzの電磁波の一種である。マイクロ波のうち、ピーク電力が100 MW以上のものは大電力マイクロ波(High-power Microwaves: HPM)と呼ばれ、荷電粒子の加速や核融合のプラズマ加熱に応用されている[1, 2]。大電力マイクロ波発生装置は、クライストロン、マグネトロン、仮想陰極発振器(Virtual Cathode Oscillator: Vircator)などがある[3, 4]。

Vircatorは、1~100 GHzの周波数帯でギガワットレベルの出力が可能である[5]。Vircatorの利点としては、他のHPM発生装置に比べて構造が簡単のため、保守や運用が容易なことがあげられる。比較的広い周波数帯で発振が可能である。欠点としては、マイクロ波の発振効率が数パーセントしかなく、発振周波数が安定しないことがある[6-8]。

Figure 1は、Vircatorの基本構成を示す。Vircatorは大電流電子ビームによる空間電荷効果を利用した発振器である。真空中で陰極・陽極ギャップに高電圧パルス

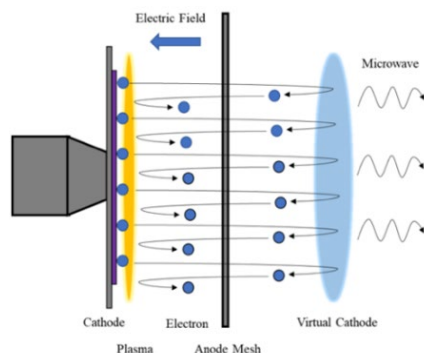


Figure 1: Principle of the virtual cathode oscillator.

を印加することにより、陰極表面にプラズマが生成する[9]。電界により電子は光速まで加速され、陽極を通過してドリフト空間に入る。ドリフト空間の電子ビームが空間電荷制限電流に達すると、陰極とほぼ同じ高い電位障壁を持つ仮想陰極が形成される。仮想陰極は、透過された電子の一部を陽極に向かって反射する。仮想陰極の電位を超えることができない電子ビームが実際の陰極と仮想陰極の間を行き来すると、マイクロ波が発生する[10]。

本研究では Vircator における電子ビームの挙動と透過電子ビーム電流の変調を理解するために、大小 2 つのディテクタを使用して、評価を行った。また、同時に Vircator における大電力マイクロ波の測定を行い、それらを比較した。

2. 実験システム

2.1 高繰り返しパルスパワー発生装置

本研究で大強度電子ビームを発生するために、Fig. 2に示す高繰り返しパルス電力発生器「ETIGO-IV」が使用された。「ETIGO-IV」の標準的な出力パラメータは、定格出力電圧 400 kV、定格出力電流 13 kA、パルス幅 120 ns、繰り返し率 1 Hz である[11]。

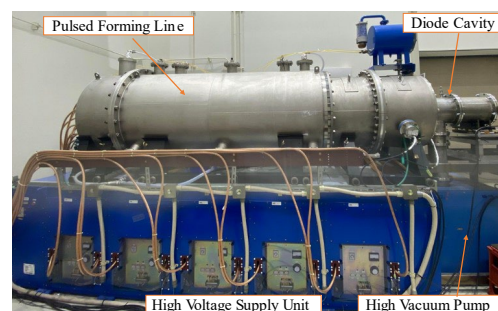


Figure 2: Repetitive pulsed-power generator ETIGO-IV.

2.2 電子ビームの測定

Figure 3 は、電子ビームダイオードとディテクタの実験システムを示す。2つのディテクタは、仮想陰極の下流に設置する。

ディテクタ大は、通過した電子ビーム電流を観測する。直径 240 mm、厚さ 7 mm のアルミニウム円盤をアノード面と平行になるように金属軸を用いて設置し、2本の金属軸を通して接地する。金属軸に CT を設置し、同軸ケーブルを通してコレクタに流れる全電子ビーム電流の測定が可能となる。

ディテクタ小は、電子ビーム電流に含まれる高周波成分(変調)を測定する。セミリジッドケーブル測定器はコレクタと同様に使用する。実使用ではコレクタ円盤の中央にセミリジッドケーブル断面の大きさの穴を開け、先端が飛び出ないように固定する。ディテクタは、1~5 GHz の範囲で電子ビーム電流変調を測定するために必要な時間応答を備える。測定された電流変調は、高速フーリエ変換(FFT)と短時間フーリエ変換(STFT)により周波数特性を解析した。

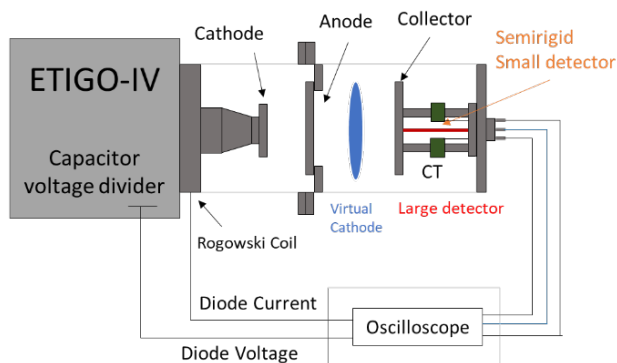


Figure 3: Experimental setup of electron beam diode and detector.

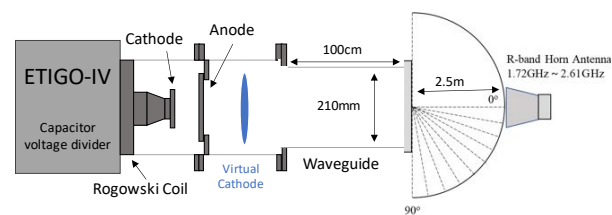


Figure 4: Experimental setup of microwave.

2.3 マイクロ波の測定

Figure 4 にマイクロ波の測定システムを示す。発生したマイクロ波は、導波管端部より放出される。発生されたマイクロ波は直径 21 cm、長さ 100 cm の円形導波管を伝搬し、アクリル製の出力窓(厚さ 20 mm)を通じて放射される。なお、ETIGO-IV でドライブされる Vircator のマイクロ波は TM モードである。

このマイクロ波は、ホーンアンテナ(1.72~2.61 GHz)、RF ケーブル(TOTOKU TCFS00)、減衰器、高周波検波器を通してデジタルオシロスコープ(LeCroy Wave-Pro 760Zi)を用いて測定を行った。マイクロ波は導波管の延長線上を 0°として、90°まで 10°ごと、導波管の先端から 2.5 m の位置で変調信号を測定し、高速フーリエ変換(FFT)と短時間フーリエ変換(STFT)によりマイクロ波の

周波数特性を解析した。また、オシロスコープに入力された信号を mV-dBm 変換によって各度でのマイクロ波電力密度を算出、空間積分することでマイクロ波電力を算出した。

2.4 パラメータ設定

陰極には、Fig. 5 に示す直径 12 cm、厚さ 8 mm の円柱状のステンレス鋼を使用し、起毛生地“ベルベット生地”(厚さ 1 mm、外径 100 mm、内径 30 mm)を貼り付けた。Fig. 5 に陽極は、直径 17 cm、透過率が約 65%のステンレス製メッシュを専用した。陰極と陽極の間隔(A-K gap)は 20 mm に設定した。電子ビームの測定で、陽極とコレクター間の距離(A-C gap)は 40 mm から 90 mm まで 10 mm ごとに変化させた。ETIGO-IV コンデンサの充電電圧は 22 kV に設定した。

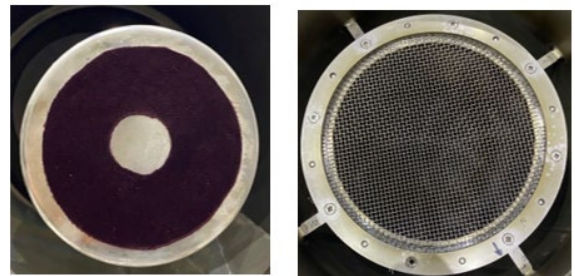


Figure 5: Cathode and Anode condition.

3. 実験結果

Figure 6 にダイオードの電圧と電流の典型的な波形を示す。ピーク電圧は約 290 kV に達し、ピーク電流は約 11 kA に達する。

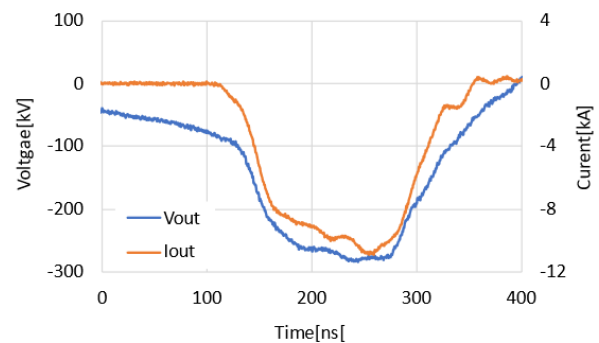


Figure 6: Typical waveform of diode voltage and current.

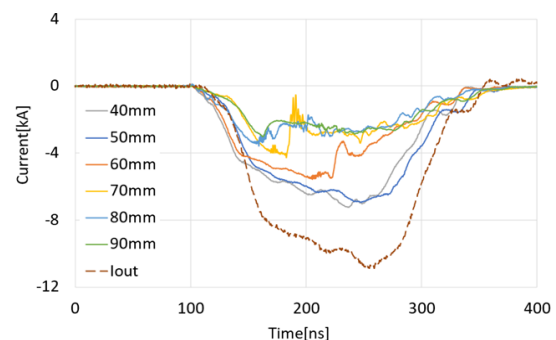


Figure 7: Waveform of transmitted beam current measured by the large detector.

3.1 電子ビームの測定

3.1.1 デテクタ大の結果

Figure 7 にデテクタ大で測定された透過電流の波形を示す。また、測定された透過電流から計算される電荷量を Fig. 8 に示す。Figure 9 にはデテクタ大の電荷量とダイオードの電荷量の割合を示す。電荷量はダイオード電流とデテクタ大で測定された透過電流を積分することによって計算した。A-C gap 40~50 mm の条件では、デテクタ大の電荷量の割合は~66%であり、陽極の透過率(65%)とほぼ一致した。一方、A-C gap 60 mm 以上では、A-C gap が大きくなるにつれて透過電子ビーム電流(デテクタ大の出力)が減少する。これは、仮想陰極電位による反射電子ビームの増加により透過電子ビーム電流が減少するためである。

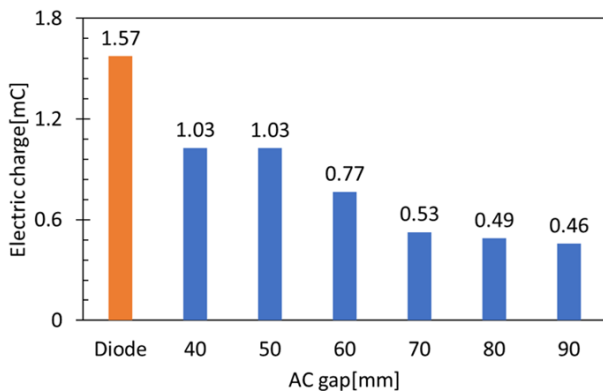


Figure 8: Large detector electric charge.

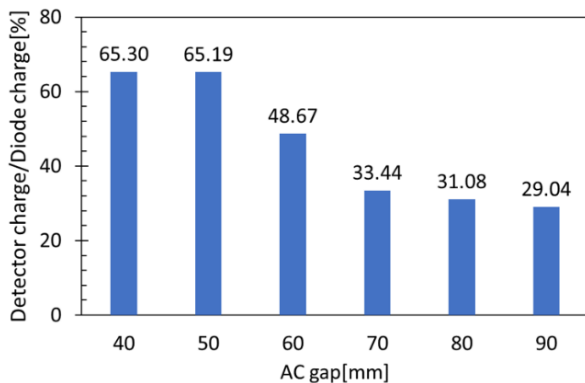


Figure 9: Large detector electric charge as a percentage of diode electric charge.

3.1.2 デテクタ小の結果

Figure 10 と Fig. 11 にデテクタ小で測定された透過電子ビーム電流波形を示す。Figure 10 に示すように A-C gap が 40~50 mm の場合、測定された透過電子ビーム電流は高周波成分を含まない。また、Fig. 11 に示すように A-C gap が 60 mm 以上の場合、高周波成分を含む透過電子ビーム電流が観測され、時間周波数分析(STFT-FFT)の結果により、その振動周波数は 2.2 GHz、3.2 GHz、4.5 GHz である。これより、電子ビーム電流が変動されていると言える。

空間電荷効果により、理論的には、仮想陰極を形成するは、A-C gap がダイオードギャップ(A-K gap)の少な

くとも 2.82 倍長くなければならないことが分かっている。デテクタ小の高周波成分は、A-C gap が 2.82d A-K より大きい条件で表れるので、この振動は仮想陰極によるものであると言える。

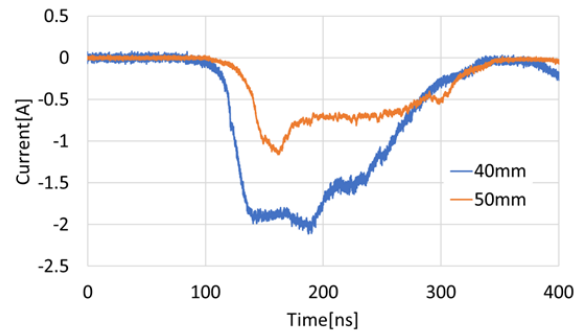


Figure 10: Small detector waveform(A-C gap: 40~50 mm).

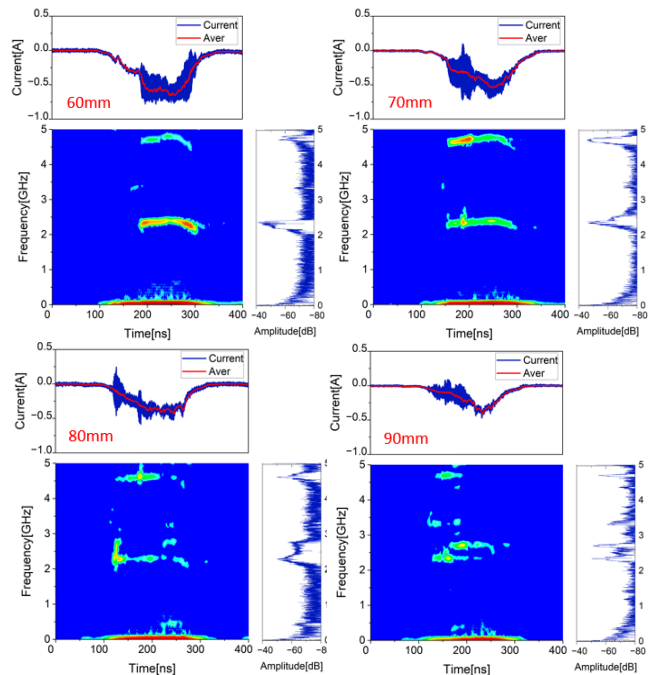


Figure 11: Small detector waveform and Frequency Analysis results (A-C gap 60~90 mm).

3.2 マイクロ波の測定

Figure 12a はマイクロ波測定時のダイオード電圧と電流を示す。ピーク電圧は約 295 kV、ピーク電流は約 10 kA に達する。ダイオード電圧と電流により、ダイオードエネルギーは約 360 J と計算される。Figure 12b, c はマイクロ波の電解信号とマイクロ波電力を示す。マイクロ波の最大電力は約 53.31 MW、マイクロ波のエネルギーは約 3.91 J である。よって、マイクロ波の変換効率は約 1.08% である。

Figure 12d はマイクロ波の周波数特性を示す。マイクロ波のおもな振動周波数は約 2.2 GHz、3.2 GHz であり、デテクタ小で測定される透過電子ビーム電流の振動周波数とほぼ一致することが分かる。

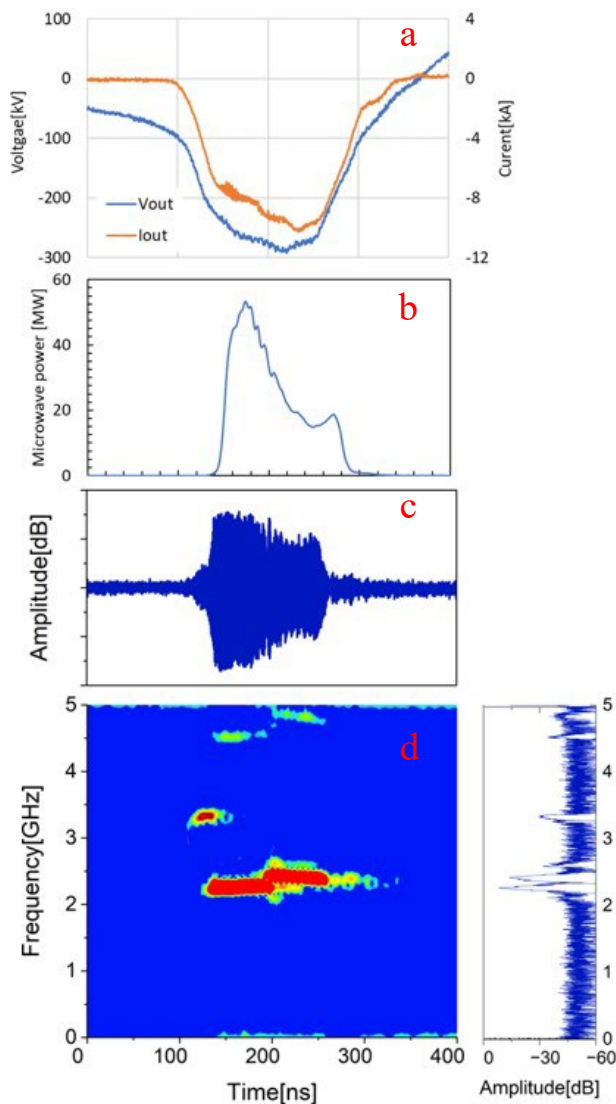


Figure 12: Waveform of diode voltage and current, microwave, microwave power, and frequency spectrum.

4. まとめ

Viricator における電子ビームの挙動を分析するために、2 つのディテクタによって透過電子ビーム電流の振幅と変調を測定した。ディテクタ大によって測定された透過電子ビーム電流は、2.82d A-K よりも大きい A-C gap の条件の場合 A-C gap が増加するにつれて減少する傾向がある。これは、仮想陰極の形成による電子ビームの反

射によるものである。ディテクタ小では、透過電子ビーム電流の変調を測定した。電子ビーム電流変調の周波数は、主に ~ 2.2 GHz、 ~ 3.2 GHz、4.5 GHz である。この振動は、2.82d A-K よりも大きい A-C gap の条件で表れ、空間電荷効果からの理論とよく一致するので、仮想陰極が形成されたと考えられる。

大電力マイクロ波測定の実験では、振動周波数約 2.2 GHz、3.2 GHz のマイクロ波が出力された。これはディテクタ小の電子ビーム電流変調の周波数とほぼ等しい。これより、仮想陰極発振器のマイクロ波発振はビーム電流変調は関連すると言える。

参考文献

- [1] R. F. Hoeberling, M. V. Fazio, "Advances in virtual cathode microwave sources," IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 34, no. 3, pp. 252–258, Aug. 1992.
- [2] S. D. Korovin *et al.*, "Pulsed power-driven high-power microwave sources," Proc. IEEE, vol. 92, no. 7, pp. 1082–1095, Jul. 2004.
- [3] S. H. Gold, G. S. Nusinovich, "Review of high-power microwave source research," Rev. Sci. Instrum., vol. 68, no. 11, pp. 3945–3974, Nov. 1997.
- [4] W. Jiang *et al.*, "High power microwave generation by a coaxial virtual cathode oscillator," IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 27, no. 1, pp. 1538–1542, Oct. 1999.
- [5] R. J. Barker, E. Schamiloglu, "High-Power Microwave Sources and Technologies," Wiley-IEEE Press, 2001.
- [6] V. D. Selemir *et al.*, "Key ideas and main milestones of research and development of microwave generators with virtual cathode in RFNC-VNIIEF," IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 48, no. 6, pp. 1860–1867, Jun. 2020.
- [7] N. S. Frolov *et al.*, "High-efficiency virtual cathode oscillator with photonic crystal," Appl. Phys. Lett., vol. 113, no. 2, Art. no. 023503, Jul. 2018.
- [8] S. Mumtaz *et al.*, "Enhancing the power of high power microwaves by using zone plate and investigations for the position of virtual cathode inside the drift tube," Phys. Plasmas, vol. 25, no. 10, Art. no. 103113, Oct. 2018.
- [9] W. Jiang *et al.*, "Mechanism of microwave generation by virtual cathode oscillation," Phys. Plasmas, vol. 2, no. 3, pp. 982–986, Mar. 1995.
- [10] S. A. Kitsanov *et al.*, "A vircator with electron beam premodulation based on high-current repetitively pulsed accelerator," IEEE Trans. Plasma Sci., Vol. 30, No. 1, pp. 274–285, Feb. 2002.
- [11] A. Tokuchi *et al.*, "Repetitive pulsed power generator 'ETIGO-IV,'" IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 30, no. 5, pp. 1637–1641, Oct. 2002.