

## 仮想陰極発振器における電子ビームの挙動

### BEHAVIOR OF ELECTRON BEAM IN VIRTUAL CATHODE OSCILLATOR

伊藤 智哉<sup>#,A)</sup>, 大賀 達朗<sup>A)</sup>, 孔 純亜<sup>A)</sup>, 須貝 太一<sup>A)</sup>, 江 偉華<sup>A)</sup>  
Tomoya Ito<sup>#,A)</sup>, Tatsuro Ohka<sup>A)</sup>, Chunya Kong<sup>A)</sup>, Taichi Sugai<sup>A)</sup>, Weihua Jiang<sup>A)</sup>  
<sup>A)</sup> Nagaoka University of Technology

#### Abstract

Research for the generation of high power microwave, Virtual cathode oscillator (Vircator) operated by “ETIGO-IV” has been studied. The purpose of this research is to elucidate the microwave generation mechanism in the Vircator. A shunt for measuring the downstream electron beam in the Vircator was fabricated. Behavior of the electron beam when oscillating was confirmed by measuring the electron beam current in the beam traveling direction and the divergent electron beam current using a cup. The microwave was generated 30 ns after the rise of the upstream current. At that time, it was confirmed experimentally that the electrons in the downstream electron beam were reflected and decreased by the virtual cathode.

#### 1. はじめに

マイクロ波とは周波数が1~30GHzの電磁波のことを指し、中でも100MW以上の電力である大電力マイクロ波(High Power Microwave: HPM)は加速器や無線送電といった分野への応用が期待されている。

HPM発生源にはKlystronやMagnetron等様々な種類があり、仮想陰極発振器(Virtual cathode oscillator: Vircator)もその一つである。仮想陰極発振器は他の発生装置と比較し、外部磁場が不要で構造が簡単、周波数の調整が可能、数MW~数GWの発生が可能という利点を持つ。反面、変換効率が高くて数十%と低く、発振メカニズムに不明な点が多いという欠点も併せ持っている[1]。

本研究は仮想陰極発振器の発振メカニズムを定量的に解明することを目的に、電子ビーム電流を測定する測定器を製作し、発振時の電子ビームとマイクロ波の関連性を調査する。

#### 2. 発振原理

Figure 1に仮想陰極発振器の基本的な構造を示す。仮想陰極発振器は冷陰極とメッシュ若しくは金属箔の陽極を用いる。電極間にパルス高電圧を印加すると陰極表面にプラズマが形成される。電子は電極間の電界によって陽極方向に加速され、陽極を通り抜けドリフト空間に到達する。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、空間電荷効果により仮想陰極(Virtual cathode)を形成する。仮想陰極は陰極とほぼ同じポテンシャルを持っているため後続の電子はこのポテンシャル障壁を超えることができずに反射される。反射された電子は再び陽極方向に加速され、結果として電子は陽極を中心とした往復振動を行う。又、仮想陰極自身は時間的・空間的に不安定でありこれ自身も振動する。これらの振動によりマイクロ波が発生する[2]。

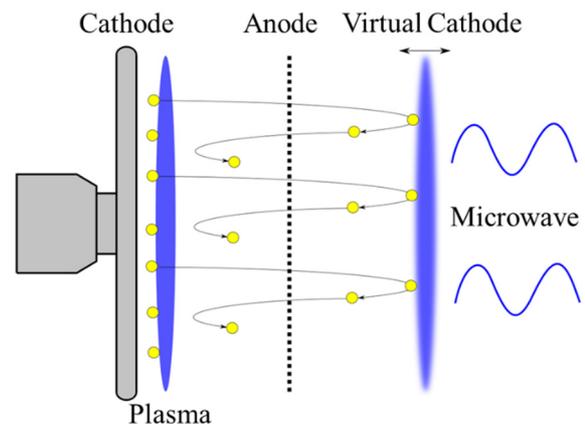


Figure 1: Principle of Virtual cathode oscillator.

#### 3. 実験装置

##### 3.1 電子ビーム電流測定用分流器

Figure 2、Figure 3に電子ビーム電流測定用の分流器の外観と等価回路を示す。分流器は先端に直径24cmの電子ビームコレクタを備えている。コレクタは4本のねじパイプ(合成インダクタンス127.8nH)で固定され、ねじパイプの長さを変えることでコレクタの位置を変更することが可能となる。根元には同心円状に分流抵抗(金属皮膜抵抗、2Ω)が100並列で配置されている。ねじパイプが固定されている部分とグラウンド電位であるフランジとの間にアクリル板2mmを挟み絶縁し、電子ビームが分流抵抗を通ることで生じる電位を測定することで電子ビーム電流を測定することが可能となる。

Figure 2の等価回路からオシロスコプの終端抵抗を50Ω、測定電圧を $V_{out}$ とすると電子ビーム電流 $I_b$ は

$$I_b = \frac{V_{out}}{50} + \frac{V_{out}}{R_{//}} \quad (1)$$

で表される。ここで $R_{//}$ は分流抵抗2Ω、100並列の合成抵抗(0.02Ω)である。図中のインダクタンス $L$ 、 $L_p$ は出力波形の歪成分として影響を及ぼす。

<sup>#</sup>t\_ito@stn.nagaokaut.ac.jp

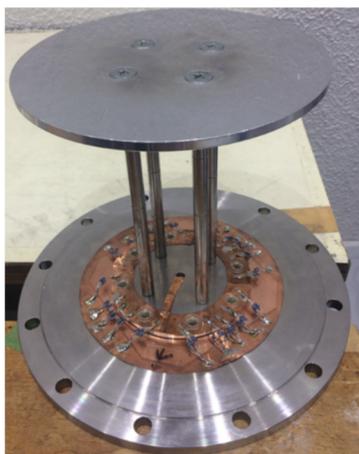


Figure 2: Electron beam shunt.

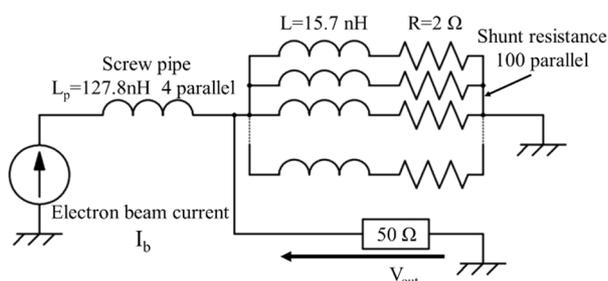


Figure 3: Equivalent circuit of electron beam shunt.

### 3.2 実験環境

本研究では高繰り返しパルスパワー発生装置“ETIGO-IV”を用いて仮想陰極発振器を動作させている。(Figure 4 参照)定格電圧 400 kV、定格電流 13 kA、パルス幅 120 ns、繰り返し率 1 Hz である[3]。

“ETIGO-IV”の出力端に設置する仮想陰極発振器と分流器の概略図を Figure 5 に示す。カソードは直径 12 cm のステンレス円盤の上に直径 10 cm のベルベットをエポキシ系接着剤で接着している。アノードはステンレスメッシュ(透過率約 65.8 %)を円状に切り抜いたものをリング状の固定具によって固定したものを使用する。アノード-カソードギャップは 21 mm である。

電極間の電圧、陽極上流の電子ビームは“ETIGO-IV”本体の容量分圧器とログスキーコイル、下流の電子ビームは分流器を用いて測定を行う。それぞれの信号は同軸ケーブルを通してオシロスコープ(Lecroy WavePro 760Zi)上で観測する。

マイクロ波を観測する場合、Figure 5 の分流器を先端部にアクリル窓を備えた円形導波管(直径 21 cm、長さ 1 m)に変更する。発生したマイクロ波は出力窓から 2.5 m 離れた位置に設置したホーンアンテナ(帯域 1.72-2.61 GHz)で受信し高周波ケーブル(TOTOKU、TCF500)、検波器(Anritsu 75N50B)を介してオシロスコープで観測される。ホーンアンテナは導波管の正面を 0° とした場合の 20° の位置に設置される。

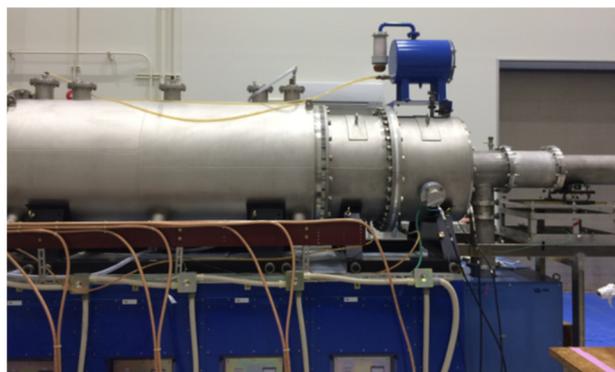


Figure 4: Repetitive pulsed-power generator “ETIGO-IV”.

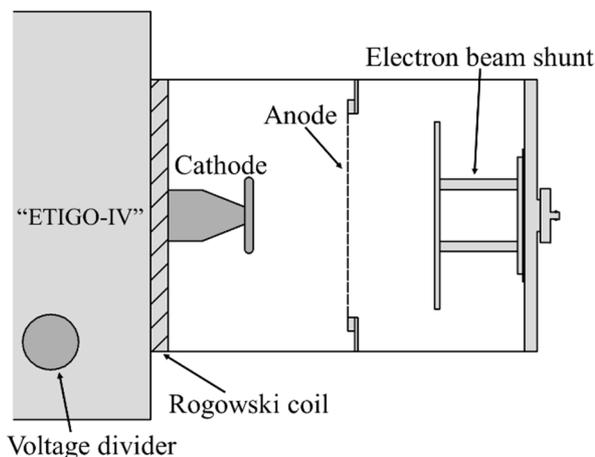


Figure 5: Schematic structure of Virtual cathode oscillator and electron beam shunt.

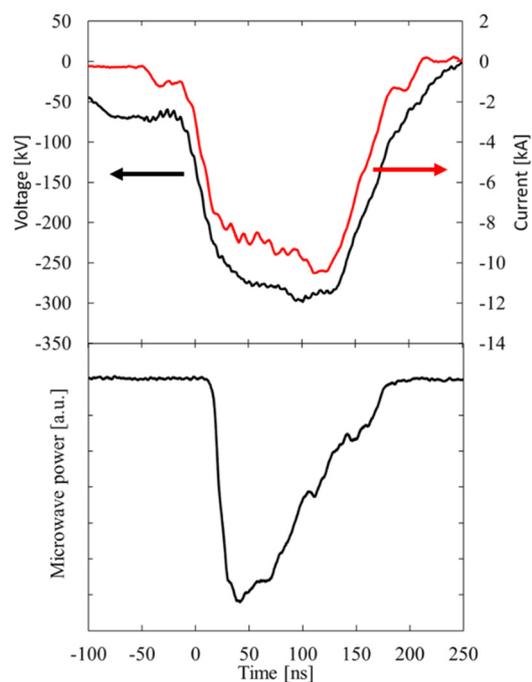


Figure 6: The typical experiment result. (Top: Diode voltage and Diode current. Bottom: Microwave power.)

## 4. 実験結果

### 4.1 典型的な実験結果

Figure 6 に“ETIGO-IV”の典型的な電子ビームダイオードの電圧・電流波形とマイクロ波の電力波形を示す。グラフより電圧の最大値は約 300 kV、電流の最大値は約 11 kA、マイクロ波のピーク電力は約 60 MW、効率は約 1.9 %であった。マイクロ波は電流の立ち上がりから約 30 ns 後に立ち上がる。

### 4.2 ビーム進行方向の電流分布測定

電子ビームコレクタをビーム進行方向に変化させた場合の下流の電子ビーム電流を測定した。アノード-コレクタギャップを 10 mm から 100 mm まで離散的に変化させた場合の分流器の代表的な波形を Figure 7 に示す。又、各アノード-コレクタギャップにおける電流最大値 (“ETIGO-IV” 3 ショットでの絶対値の平均) を Figure 8 に示す。ここで “0 mm” の値は アノード-コレクタギャップが 10 mm での “ETIGO-IV” 本体のログスキーコイルで測定された陽極上流の電子ビーム電流である。Figure 7 においてアノード-コレクタギャップが 70 mm の時に電流がある値まで上がってから急激に減少しているのは仮想陰極が形成され、電子が反射されたことを示唆していると考えられる[4]。Figure 8 から、10 mm から 40 mm の間で電流が変化しないのはアノードメッシュとコレクタを同電位の平行平板とみなした場合、理論上電極間距離の 2 倍より短いところでは仮想陰極が形成されないためであると考えられる。これは Figure 7 の結果を見ても波形の変化がないことから分かる。50 mm, 60 mm で電流の減少が見られるが波形の変化が大きくないことから電子ビームの自己電界による発散によりビームの一部がコレクタに当たらなかったためであると思われる。70 mm 以降では電子ビームの発散と仮想陰極形成に伴う電子の反射により電子ビーム電流が減少すると考えられる。0 mm から 10 mm の間は電子ビームがアノードメッシュを通過する際にメッシュの透過率によって減少するものと考えられる。

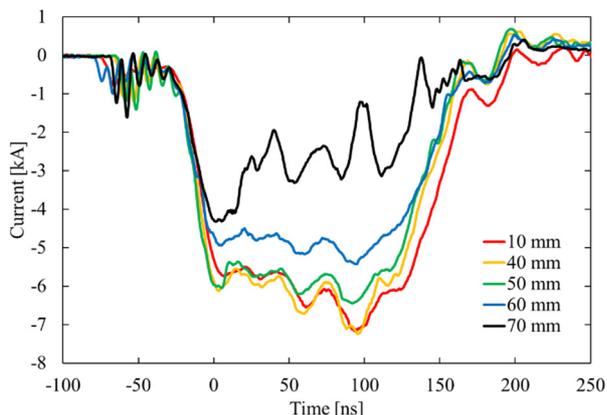


Figure 7: Waveform of downstream to beam progression direction.

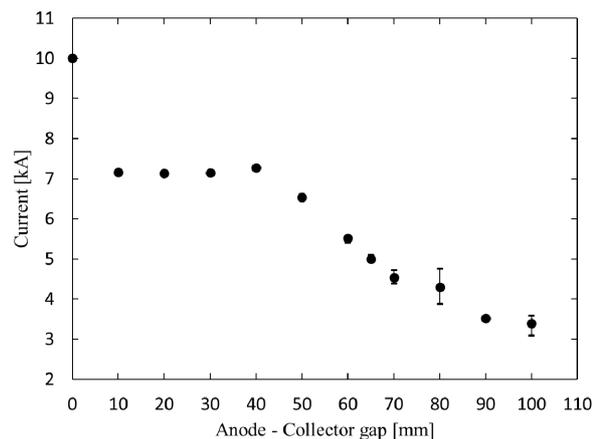


Figure 8: The current distribution to beam progression direction.

### 4.3 発散する電子ビームの測定

4.2 においてアノード-コレクタギャップが 70 mm 以降で仮想陰極による電子の反射とビーム自身の発散によって電流値が減少すると述べた。ここで分流器のコレクタを Figure 9 に示すようなカップに変更し発散する電子ビームの測定を行った。アノードとカップ底面との距離を 100 mm とし、カップ側面の長さを 20 mm, 40 mm, 60 mm, 80 mm とした場合の電流波形を Figure 10 に示す。カップを長くしていくと電流値が上がっていくことが分かり、この増加はビームの発散によるものである。仮想陰極形成時のほぼ全ての下流の電子ビームを測定していると考えられるカップ 80 mm の電流波形を時間積分して下流の総電荷量を計算すると  $5.8 \times 10^{-4}$  C で、これはログスキーコイルで測定して得た上流の総電荷量  $15.0 \times 10^{-4}$  C の約 38% となる。以上から、仮想陰極発振器の動作時に陰極から放出される電子の約 4 割が下流側で損失していると考えられる。その他の電子は陽極を往復している間に運動エネルギーをマイクロ波に変換しメッシュに吸収されるもの、メッシュを固定しているリングに吸収されるもの、発散により陰極側のダイオードチャンバーにあたって吸収されるものが考えられるがこれ具体的な割合は今後測定を行っていく。

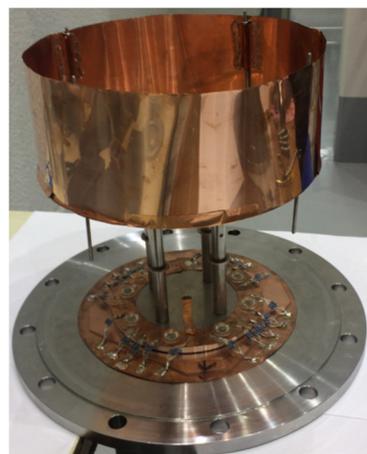


Figure 9: Appearance of cup for measurement of divergence beam.

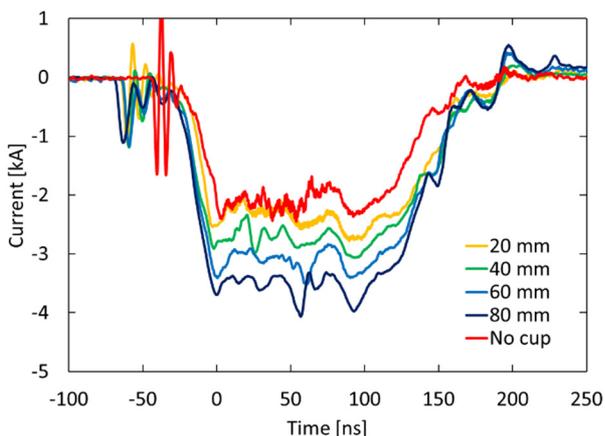


Figure 10: Waveform of downstream to divergence beam.

#### 4.4 電子ビームとマイクロ波の関係

Figure 11 に典型的実験波形で示したマイクロ波波形に平面コレクタをアノード-コレクタギャップ 70 mm に配置した場合の上流と下流の電流波形を合わせたものを示す。グラフから、マイクロ波は電流の立ち上がりから約 30 ns 後に立ち上がる。つまり、仮想陰極が形成されることが考えられる。下流の電子ビーム電流はマイクロ波の発生とともに減少が見られるが、これは仮想陰極が形成されたことにより電子が反射され、電流の減少が起こったと考えられる。その後の下流の電子ビームは仮想陰極によって電流が制限されることに加え電子ビームの発散により上流の傾向とは異なる傾向を示すと考えられる。

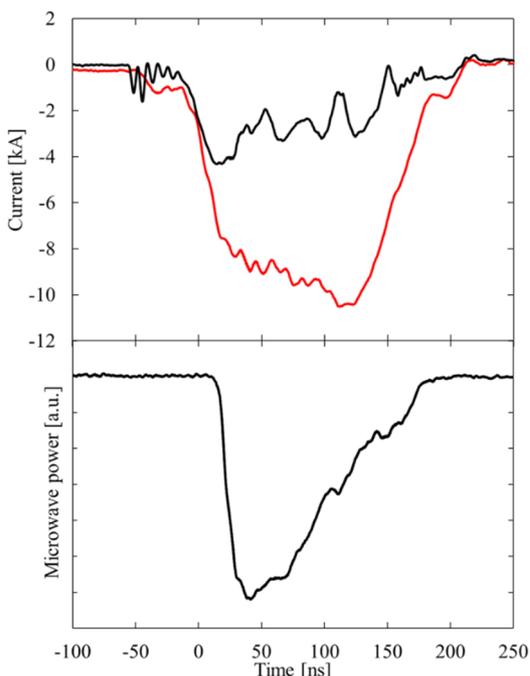


Figure 11: Time relationship between electron beam and microwave. (Top: Upstream and downstream current. Bottom: Microwave.)

#### 5. まとめ

本研究は仮想陰極発振器の発振メカニズムを解明することを目的に電子ビーム電流を測定する分流器を製作し、発振時の電子ビーム電流を測定した。ビームの進行方向に対しての電流分布においてコレクタの位置が 70 mm 以降に設置すると仮想陰極の形成を確認した。コレクタ部にカップをつけることで発散する電子ビーム電流を測定することが可能となり、下流において約 40 %の電子ビームが発振に寄与されないことが分かった。下流の電子ビームとマイクロ波の時間的關係からマイクロ波は電流の立ち上がりから約 30 ns 後に立ち上がり、下流の電子ビームが減少しその後制限されることから仮想陰極の形成により電子が反射されることを確認した。

今後は電子ビームのエネルギーからマイクロ波へのエネルギーの変換に関する詳細を調査していく。

#### 参考文献

- [1] W.Jiang, "Time-Frequency Analysis of Virtual-Cathode Oscillator", IEEE Trans. Plasma Science, Vol.38, No. 6 1325-1328 (2010).
- [2] J.Benford, J.Sweifle, "High-Power Microwaves" Norwood, MA, Artech House (1992).
- [3] A.Tokuchi, N.Ninomiya, W.Jiang, K.Yatsui, "Repetitive Pulsed-Power Generator "ETIGO-IV"" , IEEE Trans. Plasma Science, Vol 30, No. 5, 1637-1641(2002).
- [4] M.Onoi, M.Yamabuchi, M.Yatsuzuka, "金属メッシュ陽極による仮想陰極発振器の出力改善と多ショット化", IEEJ Trans. FM, Vol. 123, No. 1 (2003).