

## 高透過率アノードを用いた仮想陰極発振器の特性評価と最適化

### CHARACTERISTIC EVALUATION AND OPTIMIZATION OF VIRTUAL CATHODE OSCILLATOR WITH HIGH TRANSMITTANCE ANODE

長尾 和樹<sup>#</sup>, 高津 航, Pham Van Thuan, 桜井 一哉, 芦澤 和, 久野 裕由, 須貝 太一, 江 偉華  
Kazuki Nagao<sup>#</sup>, Wataru Takatsu, Pham Van Thuan, Kazuya Sakurai, Wataru Ashizawa, Hiroyoshi Kuno, Taichi Sugai,  
Weihua Jiang  
Nagaoka University of Technology

#### Abstract

The Virtual Cathode Oscillator (Vircator) is one of the methods to generate high power microwaves. Simplicity not needing external magnetic fields, and high-power capabilities are some of the advantages of Vircators. However, low efficiency is a serious problem. In the Vircator driven by ETIGO-IV generator, it is known that electron beam, 40% is lost at the mesh anode with a transmittance of 65%. By using a high transmittance anode, it is considered that the losses at the anode and scattering of electron beam occurred by attacking anode decreased and microwave output improved. In this research, the characteristics of the microwave and losses at the anode were measured with high transmittance wire/mesh anodes.

#### 1. はじめに

100MW を超えるピーク電力をもつ大電力マイクロ波 (High Power Microwave: HPM) は、加速器において粒子の加速に用いられるほか、エネルギーや宇宙、防衛など様々な分野への応用が期待されている[1, 2]。HPM の発生源の一つとして、仮想陰極発振器 (Virtual cathode oscillator : Vircator) が挙げられる。Vircator は相対論的電子ビームを用いた HPM 源で、単純な構造で GW 級の HPM を発生でき、さらには電極構造や電極間距離を変化させることで、0.5~数 10GHz の広い周波数範囲での発振が可能である特徴を持っている。

Figure 1 に仮想陰極発振器の基本的な構造を示す。カソードにパルス高電圧が印加されるとカソード表面にプラズマが発生し、電極間の電界によってプラズマから引き出された電子は加速され、加速された電子はアノードを透過してドリフト空間に入射される。電子ビームがドリフト空間を伝搬できる限界条件である空間電荷制限電流を超えようとする、見かけ上カソードとほぼ同電位のポテンシャル障壁 (仮想陰極) が形成される。このポテンシャルに捕捉された電子はカソード-アノード-仮想陰極間を往復運動することでマイクロ波が発生する。仮想陰極は後続の電子ビームによって維持される不安定なものである。仮想陰極自身が時間的・空間的に振動することによってもマイクロ波は発生する。このように Vircator では 2 つの発生機構によってマイクロ波が発生する[3]。

Vircator の問題点として、低い発振効率や周波数の不安定性などがあり、今なお多くの大学や研究所で研究が行われている。マイクロ波変換効率の低さの要因として、アノードには薄いフォイルや金属メッシュがよく使われるが、電子ビームがアノードを透過する際に生じるビームの損失や、ビームの散乱に起因するものと考えられている。先行研究によると、ETIGO-IV を用いた Vircator において、発生した電子ビームの約 4 割がア

ノードを通過する際に失われていることが分かっている[4]。そこで、高透過率のアノードを用いることで、アノードを透過する際に発生するビーム損失を減らすことができ、マイクロ波出力改善につながると考えられる。本論文では、高透過率のメッシュ・ワイヤー状アノードを用いたマイクロ波について特性評価を行った結果を報告する。

#### 2. 実験装置

本研究において Vircator をドライブする電源として、高繰り返しパルスパワー発生装置“ETIGO-IV”を用いた (Fig. 2)。出力電圧は 400kV、出力電流は 13kA、パルス幅は 120ns、繰り返し率 1Hz である[5]。ダイオードチャンバー内のカソードは直径 12cm のステンレスの円板に直径 10cm のベルベットを貼り付けている。アノードは、直径 0.6mm のステンレス製のメッシュ及びワイヤーを用いた (透過率~65%, 80%, 85%, 90%, 95%)。電極間距離は 21mm とした。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気中に放射される。

Figure 3 に実験システムの概略図を示す。ETIGO-IV のダイオード電圧およびダイオード電圧は本体の容量分圧器とログスキーコイルを用い、同軸ケーブルを通してオシロスコープ (LeCroy WavePro760Zi) 上で観測した。マイクロ波は出力窓から 2.5m 先に設置した角錐型ホーンア

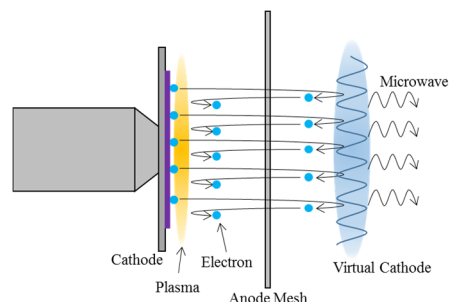


Figure 1: Principle of the virtual cathode oscillator.

<sup>#</sup> k\_nagao@stn.nagaokaut.ac.jp



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

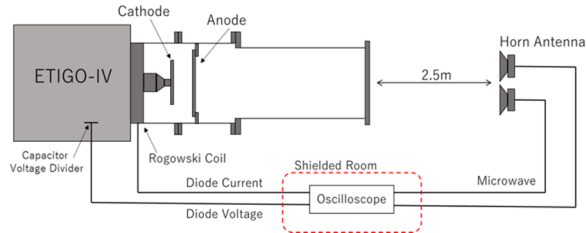


Figure 3: Schematic structure of experimental system.

アンテナ(R-band: 1.72-2.61GHz)で受信し、高周波ケーブル(TOTOKU TCF500)を通してデジタルオシロスコープ(LeCroy WavePro 760Zi, サンプリングレート: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)を通してマイクロ波を測定し、mV-dBm 変換によってマイクロ波放射電力を算出した。Figure 4 に典型的なダイオード電圧、ダイオード電流、マイクロ波波形と、マイクロ波電力波形を示す。ダイオード電圧のピークは $\sim 300\text{kV}$ 、ダイオード電流のピークは $\sim 10\text{kA}$  である。マイクロ波の放射電力は $\sim 60\text{MW}$  であり、マイクロ波発振効率は $\sim 2\%$ であった。マイクロ波の主周波数は $2.5\text{GHz}$  であることが、ホーンアンテナで受信した信号を周波数解析した結果から確認された (Fig. 5)。

### 3. 実験結果

#### 3.1 マイクロ波電力密度の角度分布

導波管正面から $2.5\text{m}$ 離れた地点に設置されたホーンアンテナを水平 $\theta$ 方向 $0^\circ$ として水平に $10^\circ$ 刻みで $90^\circ$ まで移動させた際の各地点のマイクロ波受信電力密度を Fig. 6 に示す。アノードの構造、透過率によらず正面から $20^\circ$ の地点で最大となり、 $30^\circ$ 以降では減少に転じる。透過率 $85\%$ 、 $20^\circ$ の角度において、従来の $65\%$ メッシュアノードの場合より高い電力密度が得られたが、アノード構造によらず高透過率アノードは従来と比較して全角度で低い傾向がある。また、 $60^\circ$ 以降の電力密度は、従来の $65\%$ メッシュアノードの場合と比較して低く、導波管正面に近い角度に集中してマイクロ波放出されている。

#### 3.2 マイクロ波電力、エネルギー特性

透過率及び構造の異なるアノードをについて、それぞれマイクロ波測定、放射電力測定を行った。Figure 7, Fig. 8 に透過率、アノード構造の違いによるマイクロ波のピーク電力と放射電力測定結果を示す。

Figure 7 よりメッシュアノードにおいては、透過率が $85\%$ より高くなるとピークパワーは減少し、透過率 $95\%$ で

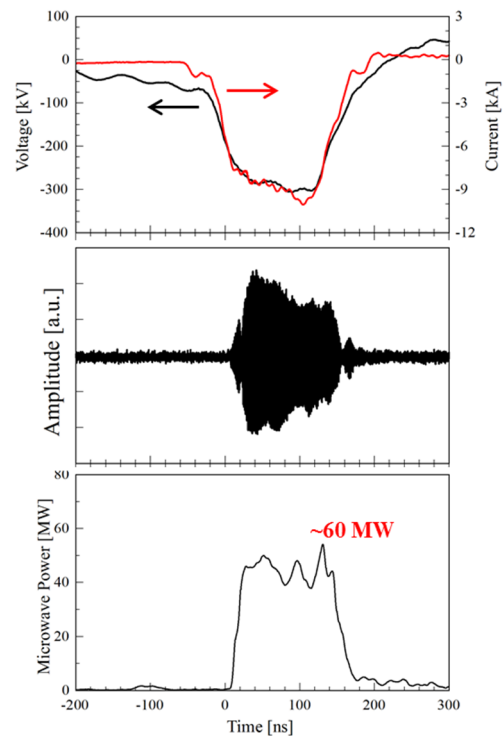


Figure 4: Waveform of diode voltage and current, microwave, and microwave power.

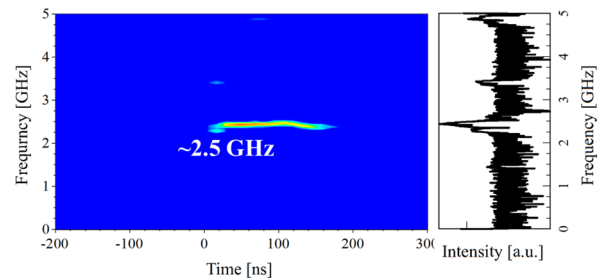


Figure 5: Time-Frequency analysis (TFA) and frequency spectrum of microwave shown in Figure 4.

はマイクロ波の発振を確認できなかった。ワイヤーアノードに関しては、透過率 $85\%$ の時にピークパワーは最大( $\sim 40\text{MW}$ )となり、透過率の上昇とともに減少した。透過率 $95\%$ ではメッシュアノード同様に、マイクロ波の発振を確認できなかった。Figure 8 において、マイクロ波エネルギーも透過率の上昇によって減少した。Figure 6 の電力密度が最大となった透過率 $85\%$ のメッシュアノードは、従来の透過率 $65\%$ のメッシュアノードと比較して、ピークパワー $\sim 70\text{MW}$  が得られたが、エネルギーは $\sim 4\text{J}$ と、従来の透過率 $65\%$ のメッシュアノードの半分程度の値となった。透過率が上昇するとマイクロ波発振時間は減少しており(Fig. 9)、トータルマイクロ波エネルギーは減少した。

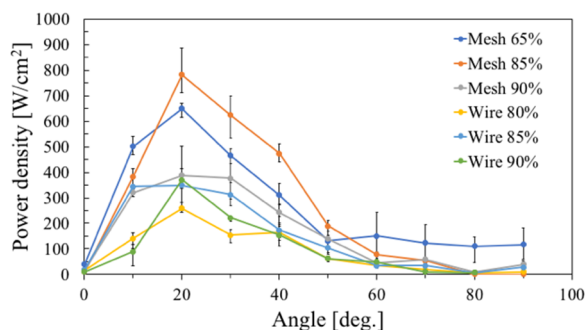


Figure 6: Angular distribution of microwave power density.

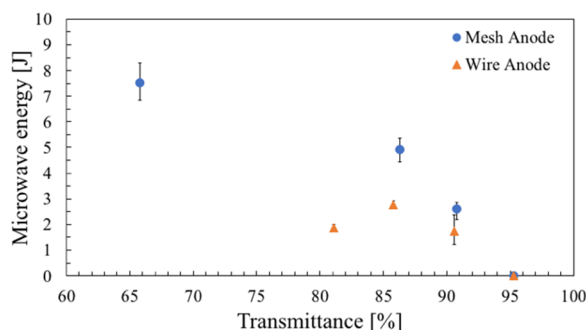


Figure 8: Transmittance vs. microwave energy characteristic.

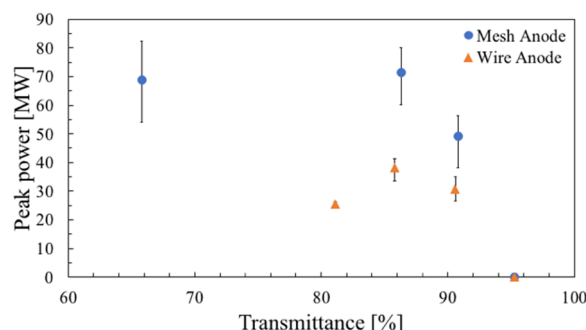


Figure 7: Transmittance vs. peak power characteristic.

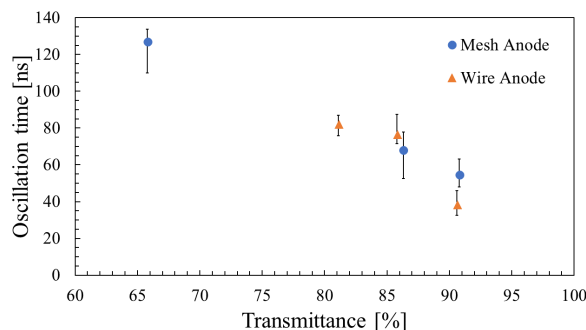


Figure 9: Transmittance vs. microwave oscillation time.

### 3.3 マイクロ波の周波数特性評価

アノードの構造と透過率の変化によるマイクロ波出力の変化を見るために、Fig. 10 に透過率 85%, 90% のメッシュ及びワイヤーアノードのマイクロ波波形と時間周波数解析の結果を示す。透過率およびアノード構造によらず、主発振周波数は~2.5GHz である事が確認できた。Figure 5 の結果と比較して、複数の周波数で発振していることが確認できる。

Vircator の発振機構は先述のとおり、電子の往復運動によるものと仮想陰極自身の振動によるものの 2 つがある。一般的に、仮想陰極自身の発振によるマイクロ波の周波数は往復運動によって発振するマイクロ波の周波数のおおよそ 2 倍である。そのため、4-5GHz 帯で発振しているマイクロ波は仮想陰極自身の振動によるものであると考えられる。ETIGO-IV を用いた Vircator でよく用いられる透過率 65% を用いた場合のマイクロ波の時間周波数解析(TFA)結果を見ると(Fig. 5), まず 3.5GHz 付近で発振し、その後 2.5GHz で発振している。また、周波数スペクトルでは、仮想陰極自身の発振を示す約 5GHz での発振があったことが示されているが、TFA 結果では、とても弱いことが確認できる。

Figure 10(a), (c) に示す透過率~85% のメッシュ/ワイヤーのアノードを用いた場合に観測されたマイクロ波の TFA 結果を見ると、まず~3.5GHz で発振しその後、主発振周波数よりも少し低い~2.2GHz で強く発振した後に主発振周波数の~2.5GHz で強く発振している。また、透過率~90% の場合(Fig. 10(b), (d)) では、主発振周波数よりも低い周波数で発振後に主発振周波数の~2.5GHz で強く発振している。透過率 90% のメッシュアノードでは、主

発振周波数より 1GHz 低い周波数で発振後に主発振周波数で発振していることが確認された。

### 3.4 アノードの透過率変化によるインピーダンス変化

Vircator において、仮想陰極が形成されるために必要な空間電荷電流は Child-Langmuir の関係から与えられる。Equation (1) は既存の実験システムの制限のなかで必要とされる電流密度  $J$  を電極間距離  $d$  と電極間の加速電圧  $V$  から概算するために用いられる[6, 7]。

$$J = \frac{4}{9} \epsilon_0 \sqrt{\frac{2e}{m}} \cdot \frac{V^{3/2}}{d^2} \quad (1)$$

理論的インピーダンス  $Z$  は、Eq. (1) から Eq. (2) で表される[6-8]。

$$\begin{aligned} Z &= \frac{V}{I} = \frac{V}{J \cdot A} \\ &= \frac{V}{\frac{4}{9} \epsilon_0 \sqrt{\frac{2e}{m}} \cdot \frac{V^{3/2}}{d^2} \cdot A} \\ &= 0.429 \times 10^6 \cdot \frac{d^2}{A} \cdot \frac{1}{\sqrt{V}} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 $A$  は電子ビームの放出面積である。

電極間距離が 21mm, ベルベットの直径 10cm, 加速電圧 300kV のとき、Eq. (2) から導かれる理論的インピーダンスは、44Ω である。Figure 11 にダイオード電圧と電流から求めたインピーダンスと理論値インピーダンスを示す。Equation (2) から求めた理論的インピーダンスは加速電圧  $V$  の 1/2 乗に反比例し、加速電圧の上昇とともに減少する。実験で得たダイオード電圧と電流の比から求められたインピーダンスは、加速電圧の上昇とともに増加し、

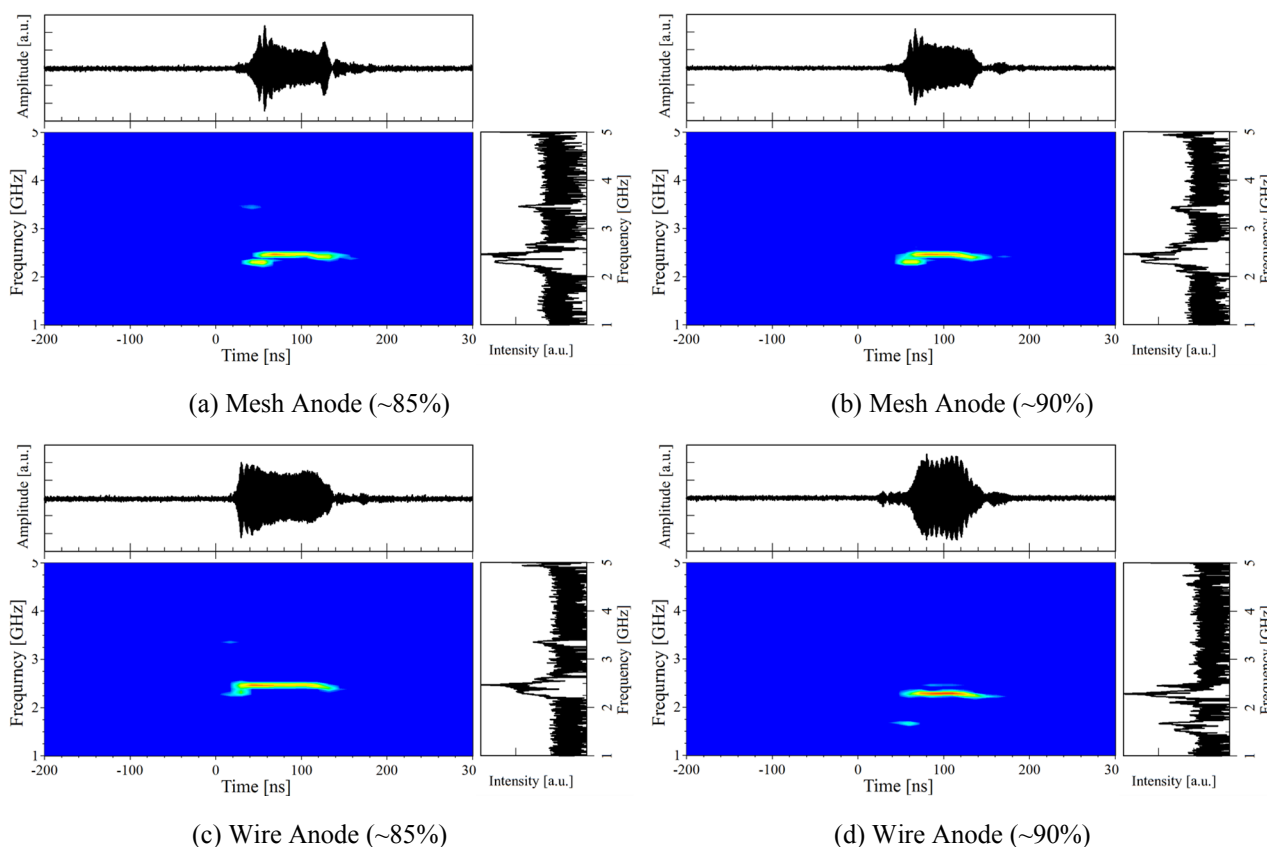


Figure 10: Comparison of microwave waveform and time-frequency analysis results.

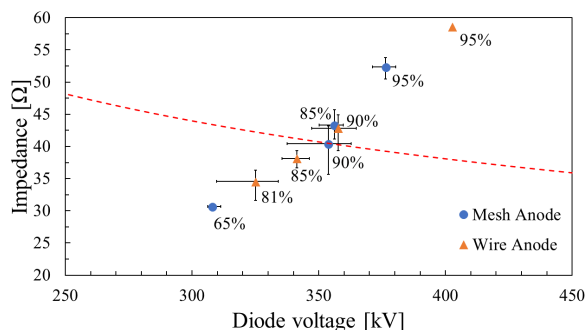


Figure 11: Impedance measured voltage and current.

また透過率の上昇に伴って加速電圧も上昇している。

観測されたマイクロ波のピーク電力が高かった透過率 65%と 85%のメッシュ状アノードの結果を比較すると、透過率 65%のメッシュアノードの実験結果から求めたインピーダンスは  $30\Omega$  と理論値の 60%程度の値となったが、透過率 85%のメッシュアノードでは、おおよそ理論値に近いインピーダンスの値となった。ワイヤーアノードに関しては、全体的に理論インピーダンス値に近い傾向はあるものの、メッシュアノードよりピークパワー、エネルギー効率が低くなる傾向が得られた。Figure 9 のマイクロ波発振時間の関係と Fig. 11 から、インピーダンスが低いほどマイクロ波発振時間が長いことが確認できた。

### 3.5 アノードでの電子ビーム損失

高透過率アノードを用いることで電子ビームがアノード

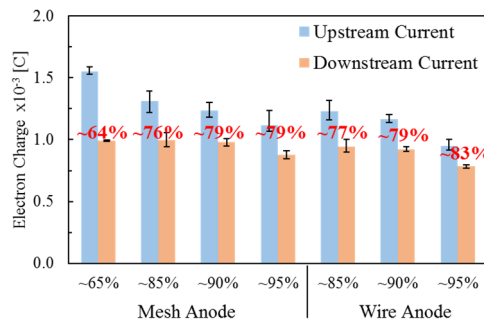


Figure 12: Electron beam loss at the anode.

を透過する際に生じるビームの損失を測定した。電子ビーム損失は、上流(アノードを透過前)と下流(アノードを透過後)の電子ビーム電流を測定し、総電荷量を計算することで損失を測定した。上流電流は、ETIGO-IV に内蔵されているログスキーコイル、下流電流は導波管を取り外し、ダイオードチャンバーに分流器と電子ビームコレクタを取り付けて測定した。Figure 12 に測定した結果を示す。平均して 20%がアノードを透過できず、損失になっていることが確認された。また、ビーム損失は透過率に依存して減少しないことが確認された。

## 4. 結論, まとめ

高透過率のメッシュ・ワイヤー状アノードを用いた Vircator の特性を評価した。メッシュ状アノードにおいて、ピークパワーは透過率 85%より大きくなると急速に低下し



た。発振時間は透過率の上昇とともに短くなるため、マイクロ波エネルギーは低下した。一方、ワイヤーアノードを用いたマイクロ波特性評価においては、透過率 85%においてピークパワーエネルギーが最大となった。透過率 95%のメッシュ/ワイヤーアノードにおいてはマイクロ波発振が確認できなかった。ダイオード電圧と電流の比で表されるインピーダンスは、透過率上昇に伴って上昇した。アノードにおける電子ビーム損失の測定において、透過率増加によって電子ビーム損失が減少しないことが分かった。

## 参考文献

- [1] W. Jiang *et al.*, “Theory of the virtual cathode oscillator,” *Physics of Plasmas*, Vol. 8, No. 8, 2001, pp. 3781-3787.
- [2] W. Jiang “Time-Frequency Analysis of Virtual-Cathode oscillator”, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol. 38, No. 6, 2010, pp. 1325-1328.
- [3] M. Onoi *et al.*, “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, pp. 12-19.
- [4] T. Ito *et al.*, “Behaviour electron beam in virtual cathode oscillator”, *Proc. of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, 2017, pp. 982-985.
- [5] A. Tokuchi *et al.*, “Repetitive Pulsed-Power Generator “ETIGO-IV”,” *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol. 30, No. 5, 2002, pp. 1637-1641.
- [6] Y. Chen *et al.*, “Cathode and Anode Optimization in a Virtual Cathode Oscillator”, *IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 14, No. 4, 2007, pp. 1037-1044.
- [7] J. Benford *et al.*, “High Power Microwaves, 2nd ed.”, New York: Taylor & Francis, 2016.
- [8] M. Elfsberg *et al.*, “Experimental Studies of Anode and Cathode Materials in a Repetitive Driven Axial Vircator”, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol. 36, No. 3, 2008, pp. 688-693.