

Cold Testing of a Coaxial RF Cavity for Thermionic Triode RF Gun

Masato Takasaki^{#1}, Kai Masuda¹, Keiichi Ishida¹, Naoki Kimura¹, Satoshi Ueda¹, Kyouhei Yoshida¹, Ryota Kinjo¹, Yong-Woon Choi¹, M. A. Bakr¹, Taro Sonobe¹, Toshiteru Kii¹, Kazunobu Nagasaki¹, Hideaki Ohgaki¹

¹Institute of Advanced Energy, Kyoto University
Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011

Abstract

We use thermionic rf gun to oscillate KU-FEL. However, use of thermionic rf gun leads to inherent back-bombardment effect, which not only limits the macro-pulse duration, but also degrades the electron beam quality. In order to reduce the back-bombardment electrons, we developed a thermionic triode rf gun with coaxial rf cavity whose length is much shorter than the rf wavelength as the first cell. Simulation result showed that the back-bombardment power was expected to be reduced by more than 80% without loss of beam brightness. The cold test has been conducted and we derived cavity parameters, namely the resonance frequency, quality factor, and coupling coefficient of coaxial cavity with an rf feed coaxial cable from this result. In this report, we show the consideration of effective shorted position of coaxial cavity and bandwidth which achieve cavity voltage 30 kV.

三極管型熱陰極高周波電子銃用同軸共振空洞のコールドテスト

1. はじめに

京都大学エネルギー理工学研究所では、赤外自由電子レーザー装置 (KU-FEL : Kyoto University Free Electron Laser) の電子銃に 4.5 空洞の熱陰極型高周波電子銃を使用している。熱陰極電子銃では、陰極から引き出された電子の一部が逆流して陰極に衝突し、陰極を加熱する back-bombardment 現象が問題となっている。これを改善するために、電子銃に三極管構造を取り入れることで back-bombardment 現象を減少させることができるというシミュレーション結果を得ている^[1]。今回、試作機でのコールドテストにより得た共振周波数、無負荷の Q 値 (Q_0 値)、カップリング係数 β を用いて、共振空洞の実効的な短絡面の位置とデザインした空洞電圧を達成できる周波数帯域幅の考察を行った。

2. 三極管型熱陰極高周波電子銃について

従来型と三極管型の高周波電子銃は陰極付近のみが異なるので、陰極付近の拡大模式図を図 1 に、それぞれの構造における、電子銃内の電子位置の時間変化を図 2 に示す^{[1][2]}。

従来型の高周波電子銃は、熱陰極が電子銃の第 1 空洞に設置されており、第 1 空洞の電界で電子が引き出されると同時に加速される。これに対して三極管型は、従来型において陰極が設置されていた箇所に高周波の波長と比べて非常に小さい追加共振空洞を設置し、第 1 空洞の電界 E_1 と独立した電界 E_0 を誘起する。この電界 E_0 の位相と振幅を適切に調整す

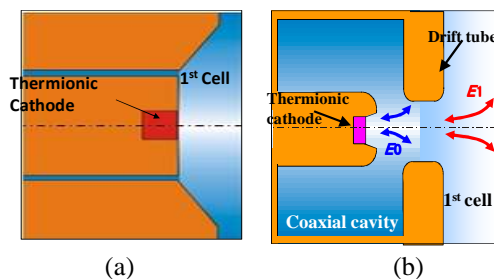


図 1 (a)従来型と(b)三極管型の陰極付近の拡大模式図による比較

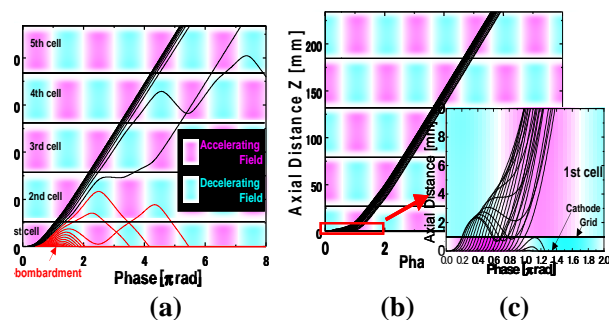


図 2 (a)従来型、(b)三極管型、(c)三極管型陰極付近の拡大図の電子銃内の電子位置の時間変化比較

ることで、第 1 空洞で電子が逆流しない位相で陰極から電子を引き出し、back-bombardment 現象による陰極の過熱を軽減する。電子銃の第 1 空洞と追加共振空洞の高周波の遮断はドリフトチューブと呼ばれる円筒状のアーチャーにより行っている。三極管部分の電界 E_0 により引き出された数十 keV の電子は無電界に近い状態のドリフトチューブを通過すると同時に E_0 と E_1 によって群集化され、さらに電子

[#] tkskmst@iae.kyoto-u.ac.jp

銃の本体空洞で数 MeV まで加速される。電子の引き出し、群集化、加速を同じ電界で行う従来型に対して、電子の引き出しと加速を独立の電界で行い、あらかじめ群集化された状態で高周波加速される点が三極管型熱陰極高周波電子銃の特徴である。

3. 同軸共振空洞の設計

同軸共振空洞は、同軸空洞と同軸導波管を同心として、内導体を柱状の支持板で支える方式(図 3)を採用しており、熱陰極のヒーターリード線は柱状支持板の中を通すこととした。高周波電力は図 3 の左側からテーパ管、柱状支持板で区切られた 2 つの半月形カップリング孔を通して共振空洞に供給される^[3]。

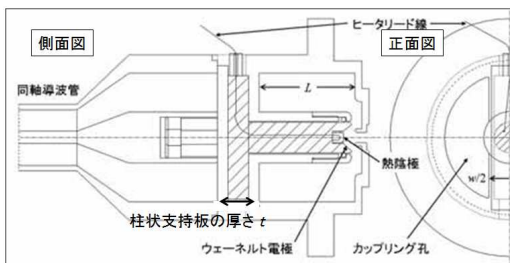


図 2 熱陰極付き同軸共振空洞の断面形状

表 1 に設計したそれぞれの値を示す^[2]。既設の 4.5 空洞熱陰極型高周波電子銃に三極管構造を導入するため、これまで陰極が設置されていた部分に収まるようコンパクトな構造にする必要があった。そのため、共振周波数を調節するための温度調節機構や廃熱のための冷却機構を導入せず、高周波電子銃本体空洞壁面との熱接触による冷却効果のみとしている。また、共振周波数を調整するチューナーは設けず、代わりにカップリング係数 β を大きく (over couple) 設定することで広い周波数帯域に対応できるよう試みた。すなわち $\beta=20$ となるように図 3 中の共振空洞長 L 、柱状支持板の厚み t を 3 次元解析コード MW Studio を用いて調整した。また、空洞への入力電力は使用する同軸ケーブルの最大容量を表しており、40 kW とした。空洞電圧 $V_c = 30$ kV は粒子シミュレーションの結果から得られた典型的な運転条件として与えた値である。

表 1 設計した電子銃のパラメータ

共振周波数	2856 MHz
無負荷の Q 値(Q_0)	4000
Q 値	200
カップリング係数 β	20
共振空洞長 L	19.62 mm
空洞電圧 V_c	30 kV 以上
共振空洞への入力電力	40 kW
柱状支持板の厚さ t	8 mm

4. コールドテスト結果と考察

図 3 の同軸導波管の左端に同軸真空コネクタを介して同軸ケーブルを接続して高周波電力を導入し反射特性を測定した(図 4 の黒線)。図 4 から、共振周波数以外の部分においても反射率 P_{ref}/P_{in} が 1 になっていないことが分かる。この原因を調べるため、図 3 に示されたカップリング孔をふさいで反射特性を測定した結果、図 4 の赤線の結果を得た。この結果より、共振空洞より上流側に赤線に相当する損失があることがわかった。この要因としては同軸導波管に設けた真空排気用の穴や、同軸真空コネクタとカップリング孔との間の同軸導波管部分での共振による損失が考えられる。反射特性(図 4 の黒線)からカップリング孔より上流側での反射特性(図 4 の赤線)を補正した値を三極管用共振空洞の反射特性として図 5 に示す。また、この共振特性から計算したパラメータを表 2 示す。

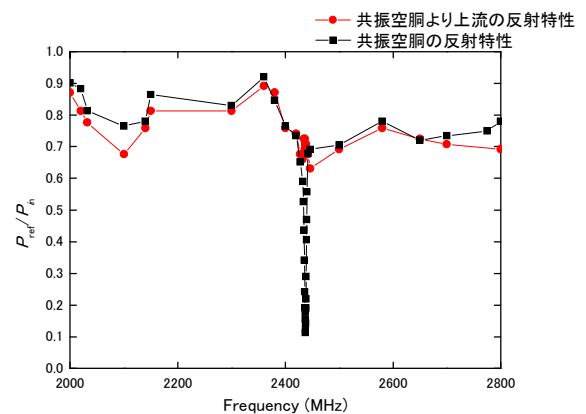


図 4 三極管用共振空洞の反射特性

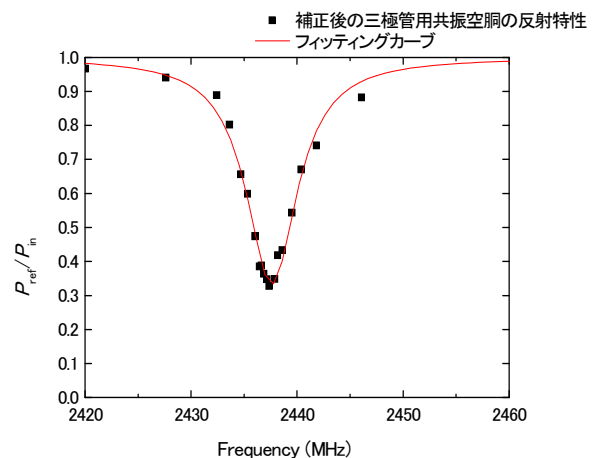


図 5 補正後の三極管用共振空洞の反射特性

表 2 コールドテスト結果

共振周波数	2438 MHz
Q_0 値	1974
Q 値	418.3
カップリング係数 β	3.72

図 3 のカップリング孔より右側の空洞においては、カップリング孔の厚み t の範囲に実効的な短絡面を持つ、軸対象に近い共振モードが励起されることが期待される。このことを確かめるため、2次元固有モード解析コード(KUEMS)^[4]を用いて、実効的な共振空洞長 $L_{\text{eff}} (L < L_{\text{eff}} < L + t)$ の軸対象共振モードの共振周波数と、試作機の共振周波数の測定値とを比較した(図 6)。これより、実験で得られた共振周波数となる共振空洞長 L_{eff} の値は 23.2 mm であり、 L に比べ 3.63 mm 長いことがわかる。よって図 3 において、共振空洞の実効的な短絡面は、柱状支持板の右端から 3.63 mm 左側にあると考えられる。この値は $t = 8$ mm よりも小さく、期待していた通り柱状支持板の中間あたりに実効的な短絡面があるということがわかった。

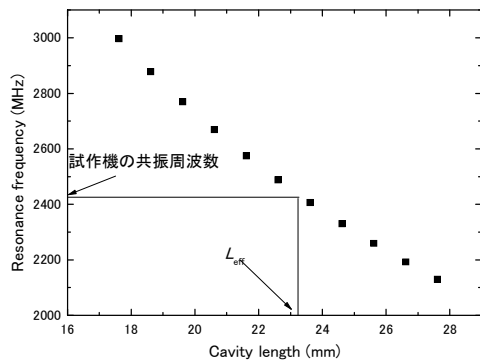


図 6 共振空洞長に対する共振周波数

また、コールドテストの結果、設定値に比べて Q 値が大きく、 Q_0 値と β 値が小さいという結果となった。 β 値がデザイン値に比べてとても小さいので、許容周波数帯域幅が大幅に減少することが予測される。コールドテストで得た空洞パラメータをもとに計算した、周波数に対する空洞電圧 V_c の依存度を図 7 に示した。ここで、入力電力は 40 kW で一定とし、また典型的な運転条件において、粒子シミュレーションで得られたビームローディングを仮定した。この結果から、空洞電圧が 30 kV 以上となる周波数範囲は設計値では 22 MHz 程度あったのに対して、コールドテストで得た値では 11.5 MHz 程度となった。設計値の結果に比べて試作機では許容周波数範囲が狭く、約半分になったことがわかる。

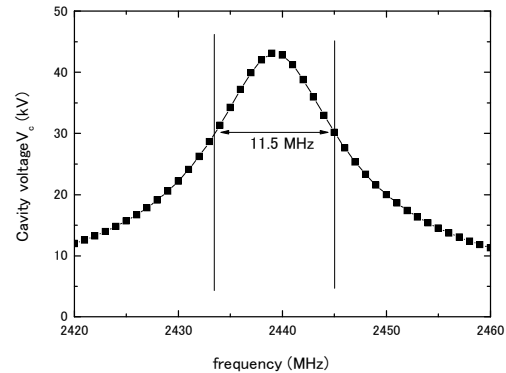


図 7 コールドテストで得た値による周波数に対する空洞電圧特性

5. まとめ

三極管型熱陰極高周波電子銃用の同軸共振空洞を製作した。導波管とのカップリング方法として、同軸共振空洞の背面から同軸導波管を同心に接続し、内導体を柱状の支持板で支える方法を採用した。

コールドテストを行った結果、期待通り、この柱状支持板部分に実効的な短絡面を持つ軸対象に近い共振モードが励起されていることが分かった。また、得られた反射特性から、 Q_0 と β 値を評価したところ、それぞれ $Q_0 = 1974.27$ 、 $\beta = 3.72$ であった。

次にこれらの空洞パラメータと、典型的な運転条件におけるビームローディングの計算値を用いて、入力電力を 40 kW として必要な空洞電圧 $V_c > 30$ kV が得られる周波数帯域幅を評価したところ、11.5 MHz 程度で設計値のほぼ半分になっていることがわかった。

今後、熱陰極の過熱や大電力の入力、電子ビーム生成時の共振周波数の変化などを計測し、この周波数帯域幅で十分かどうかを調べる必要がある。その後、周波数帯域幅が十分でなければ十分な周波数帯域幅を得られ、かつ電子銃本体の 2856 MHz が共振周波数となるように調整した共振空洞を再設計することで試作 2 号機を製作予定である。

参考文献

- [1] K. Kusukame, et al., "Particle Simulation of Thermionic RF Gun with Triode Structure", Proceedings of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 30th Linear Accelerator Meeting in Japan (July 20 – 22, 2005, Tosu, Japan)
- [2] T. Shiiyama, et al., "DESIGN STUDY OF A TRIODE-TYPE THERMIONIC RF GUN", Proc of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and 32nd Linear Accelerator Meeting in Japan (August 1-3, 2007, Wako, Japan)
- [3] K. Masuda, et al., "三極管型熱陰極高周波電子銃の開発" 日本原子力学会 2008 年春の年会予稿
- [4] K. Masuda, et al., IEEE Trans. MTT, **46**-8(1998)1180