

# DESIGN OF A COAXIAL RF CAVITY FOR THERMIONIC TRIODE RF GUN

Hidekazu Imon#, Torgasin Konstantin, Kai Masuda, Ryota Kinjo, Yong-woon Choi, Kyohei Yoshida, Omer Mohamed, Hani Negm, Marie Shibata, Kyohei Shimahashi, Kensuke Okumura, Heishun Zen, Toshiteru Kii, Kazunobu Nagasaki, Hideaki Ohgaki  
Institute of Advanced Energy, Kyoto University  
Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011

## Abstract

A thermionic triode rf gun is being developed to mitigate the adverse effect of electron back-bombardment onto the cathode inherent in conventional rf guns. A coaxial rf cavity with a thermionic cathode on the inner rod of the coax was designed and fabricated, which is to be installed in an existing conventional rf gun to configure the rf triode structure. The low power test results from the prototype coaxial rf cavity revealed the resonant frequency dependence on the thermionic cathode set on the inner electrode of the coaxial cavity, on the cavity temperature, and the length of the stub for frequency adjustment. Design refinement has been done based on these prototype test results in order to meet the resonant frequency requirement.

## 三極管型熱陰極高周波電子銃のための同軸共振空洞の設計

### 1. はじめに

京都大学自由電子レーザー施設 (KU-FEL) では熱陰極 RF 電子銃を採用している。熱陰極 RF 電子銃は一般に、DC 電子銃や光陰極 RF 電子銃と比べて、高電圧スタンドやバンチャ部、ドライブレーザが不要なためコンパクトで運転が容易かつ安価、数十倍以上の高繰り返し周波数で電子バンチを生成可能で高い平均電流が得られる、などの特徴を備えている。

一方で、熱陰極と RF 加速を組み合わせていることに起因する以下のような欠点があり、自由電子レーザー用の電子源としての利用の妨げになっている。すなわち、熱陰極より引き出された電子の一部が逆

加速されて陰極に衝突し、陰極温度を一定に保つことが不可能となり、数  $\mu\text{sec}$  以上の長パルス運転が困難である (back-bombardment 効果)。本研究の目的は、熱陰極 RF 電子銃におけるこの欠点を解決して KU-FEL の高性能化に資することにある。

KU-FEL 用の熱陰極 RF 電子銃は動作周波数 2.856 GHz で、熱陰極を設置した 1 つの 1/4 波長空洞 (図 1(a)) と、引き出された電子ビームを 9 MeV まで加速する後段の 4 つの半波長空洞の 4+1/2 空洞からなる。電子銃に設置された熱陰極からは、図 1(a) のような 1/4 波長の第 1 空洞に誘起された高周波電界によって電子が引き出されるが、そのうちの約 50% は第 1 空洞出口まで到達せず、一部は陰極に逆加速されて衝突して back-bombardment 効果を引き起こす。

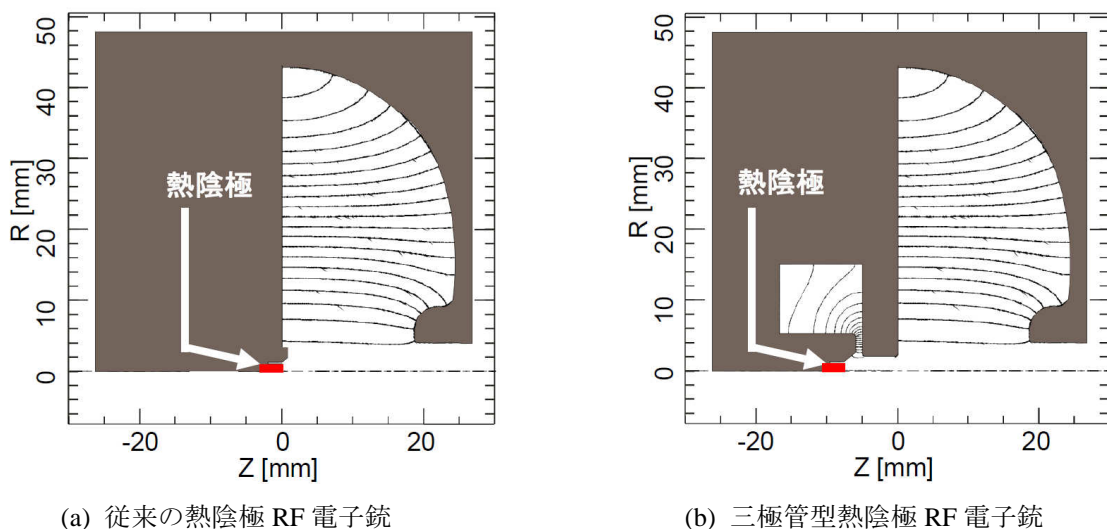


図 1 : RF 電子銃第 1 空洞と追加同軸共振空洞の軸対称固有モード

# hidekazu.imon@iae.kyoto-u.ac.jp

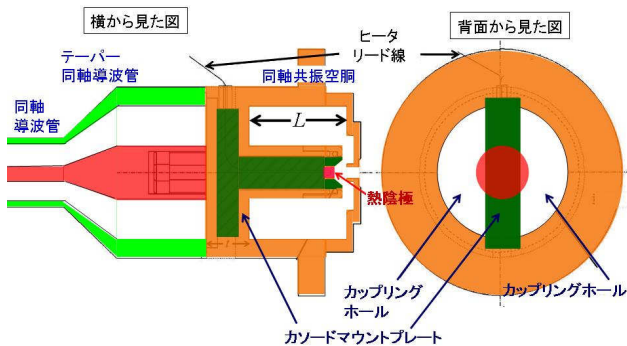


図 2：三極管型 RF 電子銃用の熱陰極内蔵同軸共振空洞、同軸導波管とカップラ

三極管型熱陰極 RF 電子銃<sup>[1]</sup> (図 1(b)) は、既設の熱陰極に換えて、熱陰極を備えた小型の同軸共振空洞を設置し、これに RF 電子銃本体とは位相・大きさとも独立に制御された数十 kW 程度の RF 電力を供給することで、陰極への逆流電子を削減しようとするものである。

これまでに、軸対称 2 次元の粒子シミュレーションにより、図 1(b)のような追加同軸共振空洞と熱陰極付近のウェーネルト電極形状の設計を行った。その結果、逆流電子ビーム電力を 90%削減でき、同時に生成ビームの短バンチ化によりエミッタンスを劣化させることなく高ピーク電流が得られるとの結果を得た<sup>[2]</sup>。次に、図 2 に示すような同軸導波管とのカップラ構造を設計し<sup>[2]</sup>、試作機を製作して低電力 RF 試験を行った<sup>[3]</sup>。その結果、同軸共振空洞 (図 2 中のカソードマウントプレートの右側) での共振が得られ、Q 値とカップリングも要求を満たす値が得られた一方で、共振周波数は既設 4.5 空洞 RF 電子銃の動作周波数と大きく食い違い、空洞の再製作が必要であることが分かった<sup>[3, 4]</sup>。また、同軸共振空洞の内導体に備えられた熱陰極の加熱により共振周波数が大きく変化するため、熱陰極の動作温度範囲も考慮して、改良機の空洞設計や周波数調整機構の導入を検討する必要があることも分かった<sup>[4]</sup>。

本報告では、試作機の実験結果を示し、上記のような検討を加えた改良機の設計について述べる。

## 2. 試作機の実験

図 2 に同軸共振空洞の試作機の断面形状を示す。RF 電力は、図中の左側から同軸導波管、テーパ同軸導波管を通し、カソードマウントプレートで仕切られた 2 つの半月形のカップリングホールを通して同軸共振空洞に導かれる。カソードマウントプレートは図中左右いずれからの RF 電力も一部反射し、右側の同軸共振空洞部に、その形状で決まる周波数の共振を起こす。同軸共振空洞に設置された熱陰極のヒータへの電力供給のためのヒータリード線は、カソードマウントプレート内を通して空洞外に導かれている。これらを、既設の熱陰極に代えて、既設 4.5 空洞 RF 電子銃本体背面の真空内に設置することで、三極管型 RF 電子銃を構成する。

前述の通り、この試作機の共振周波数は既設 4.5 空洞 RF 電子銃本体空洞の共振周波数と大きく食い違ったため、同軸空洞の再製作が必要である。再製作する改良機の設計のため、この試作機を用いて、共振周波数の熱陰極温度依存性と空洞温度依存性を調べ、さらに、周波数調整機構の導入を検討した。

### 2.1 共振周波数の熱陰極温度への依存性

図 3 に熱陰極加熱実験により得られた熱陰極温度と共振周波数の室温からの変化との関係を示す。熱陰極の温度が 1290K~1570K 程度の範囲内での電子銃の運転を想定しており、この範囲内での共振周波数は室温に対して、0.26%~0.42%低下している。

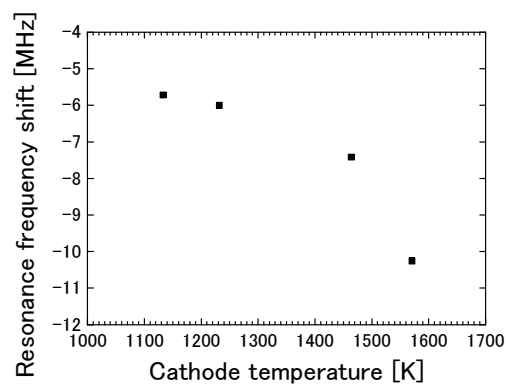


図 3：熱陰極温度と共振周波数の室温からの変化との関係

### 2.2 共振周波数の空洞温度への依存性

図 4 に空洞加熱実験により得られた空洞温度と共振周波数との関係を示す。共振周波数は、電子銃の動作温度の 60°C で、室温に対して 0.1%低下していることが分かる。

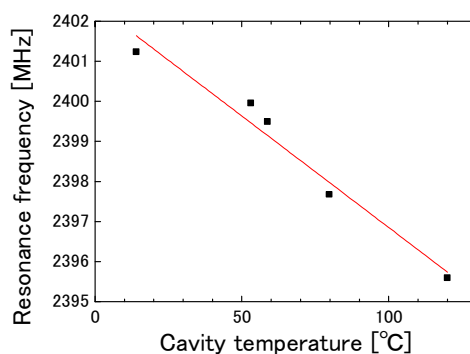


図 4：空洞温度と共振周波数との関係。直線は測定点の最小自乗フィッティング。

### 2.3 共振周波数調整機構の導入

共振周波数の調整のため、図 5 に示すようなスタブ・アジャスタを導入した。

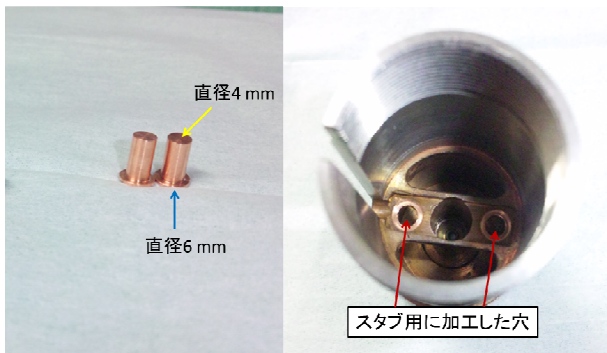
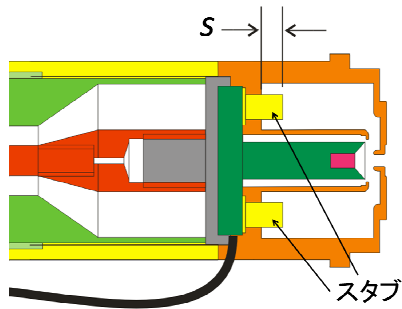


図 5：共振周波数調整のためのスタブ・アジャスタの断面模式図と写真。模式図に示したスタブ長  $s$  の異なるスタブを挿入することで共振周波数を変化させ、調整する。

図 6 に 4 通りの長さの異なるスタブを用いて行った実験により得られた、スタブ長  $s$  と共振周波数との関係を示す。このスタブ・アジャスタを導入することで、スタブ長  $s$  を 1 mm 増やす毎に共振周波数を約+11 MHz シフトすることができ、6mm のスタブを導入することで最大約+70 MHz 程度の共振周波数のシフトを調整することができることが分かった。

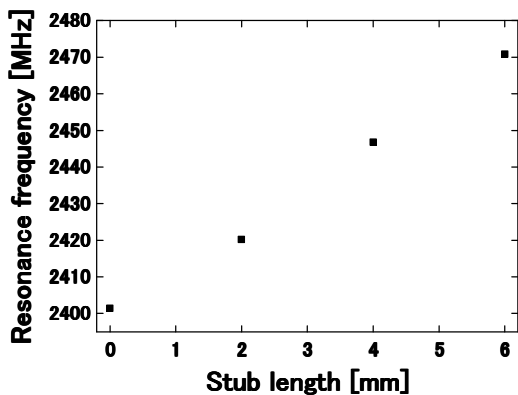


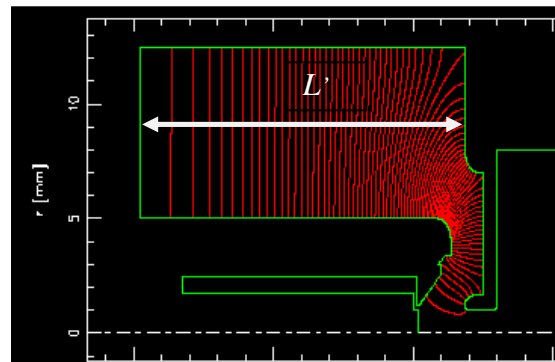
図 6：スタブ長  $s$  と共振周波数との関係

- 熱陰極温度への依存：0.26%~0.42%の低下
- 空洞温度への依存：0.1%の低下
- ビームローディング：1MHz 以下の上昇
- 周波数調整スタブ：最大+70MHz 程度の調整が可能

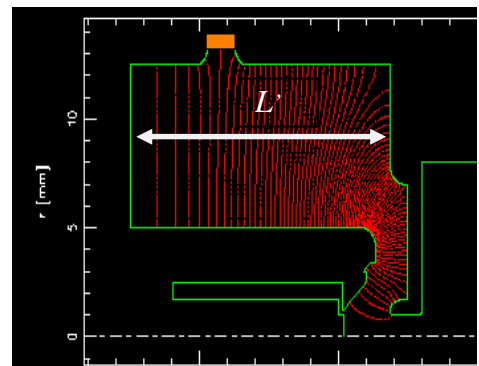
上から 3 つの要因の合計で、改良機の 2.856 GHz 付近では、室温での共振周波数に対して共振周波数は 9~15 MHz 程度低下すると予想される。そこで、スタブ長  $s = 1$  mm のスタブを用いて電子銃の動作周波数 2.856 GHz に調節できるように、室温での共振周波数の設計値を 2.858 GHz とした。

### 3.1 同軸共振空洞の共振モード計算

実際はカソードマウントプレート付近は 3 次元形状であるが、図 7 のように軸対称 2 次元での固有モード解析により共振周波数の計算を行った。図 7 に (a) 試作機と (b) 改良機の場合の固有モード計算例を示す。試作機の実験結果と比較した結果、後述の通り、実効的な短絡面はカソードマウントプレートのほぼ真ん中にあることがわかり、これは予想通りであった。改良機では、空洞部をガスケットで分ける方式とした。また改良機的设计では、他の部分の形状は変えずに図 2 中の  $L$  の長さを変えて共振周波数を調整した。



(a) 試作機



(b) 改良機

図 7：同軸共振空洞の基本モード

## 3. 改良機的设计

共振周波数に変化をもたらす要因を次にまとめる。

### 3.2 空洞長の決定

カソードマウントプレートの左端、真ん中、右端

の3点に短絡面がある場合それぞれについてプロトタイプで共振周波数を計算した。実験結果は、短絡面が真ん中より 0.02mm 左側にある場合に相当した。改良機でも同様に短絡面が真ん中付近にあると考え、その場合に共振周波数が 2.858GHz になるよう空洞長  $L$  を 14.59 mm とした。このとき、改良機についても同様に3点について共振周波数を計算し、表1にまとめた。改良機の計算結果に幅があるのは、ガスケットのつぶれ具合により空洞長が変わることを考慮したものである。

表 1：同軸共振空洞試作機と改良機設計の共振周波数[MHz]の比較

|                    | prototype | new design |
|--------------------|-----------|------------|
| cavity length, $L$ | 19.20 mm  | 14.59 mm   |
| calc.              | Left      | 2155       |
|                    | Center    | 2439       |
|                    | Right     | 2813       |
| exp.               | 2437      |            |

#### 4. まとめ

熱陰極 RF 電子銃の課題である back-bombardment 効果を引き起こす逆流電子ビームを削減することを目的とした三極管型 RF 電子銃のための追加同軸共振空洞について、試作機による試験結果に基づいて改良機的设计を行った。

試作機において低かった共振周波数を RF 電子銃の動作周波数に一致させるため、同軸共振空洞の空洞長を短くすると共に、スタブの空洞内への挿入長を調整することで共振周波数を調整することとした。

現在、この設計に基づいて、改良機の製作を進めている。

#### 参考文献

- [1] K. Kanno, et al., "Design of Back-bombardment-less Thermionic RF gun", Japanese Journal of Applied Physics Vol. 41 Suppl. 41-1 (2002) 62-64
- [2] K. Masuda, et al., "Development of Thermionic Triode RF Gun", Proceedings of 31<sup>st</sup> International Free Electron Laser Conference, Liverpool, UK, Aug. 23-28, 2009
- [3] M. Takasaki, et al., "Cold Testing of a Coaxial RF Cavity for Thermionic Triode RF Gun", Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Himeji, Japan, Aug. 4-6, 2010 (in Japanese)
- [4] M. Takasaki, "Design and Characterisation of a Coaxial RF Cavity for Thermionic Triode RF Gun", Master Thesis, Graduate School of Energy Science, Kyoto University, March 2011 (in Japanese)