

## DESIGN STUDY OF A TRIODE-TYPE THERMIONIC RF GUN

Takumi Shiiyama<sup>1)</sup>, Koichi Kanno<sup>2)</sup>, Kai Masuda<sup>1)</sup>, Heishun Zen<sup>1)</sup>, Satoshi Sasaki<sup>1)</sup>, Toshiteru Kii<sup>1)</sup>, Hideaki Ohgaki<sup>1)</sup>,  
Eiji Tanabe<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Institute of Advanced Energy, Kyoto University

Gokasho, Uji, Kyoto, Japan, 611-0011

<sup>2)</sup> AET, INC.

2-7-6 Kurigi, Asaoku, Kawasaki, Japan, 215-0033

### Abstract

We propose a triode type thermionic RF gun with an additional small cavity that provides initial acceleration phase nearby the cathode independent of the main cavity phase in order to suppress back-bombardment effect. Results from PIC simulations show that the back-bombardment power can be reduced more than 80% and the peak current of the output electron beam will be improved greatly by supplying a moderate RF power of tens kW to the additional small cavity. A prototype design of a triode type thermionic RF gun was completed. The cavity parameters, namely the quality factor, shunt impedance, and coupling coefficient of the additional cavity with an RF feed coaxial cable were designed. The predicted output beam characteristics would lead to promise the first lasing of the KU-FEL.

## 三極管構造熱陰極型高周波電子銃の設計

### 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) の入射器に4.5空胴の熱陰極型高周波電子銃を使用しているが、この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、陰極を過熱するback-bombardment現象が問題となっている。そこで我々はこの問題を解消する三極管型熱陰極の概念を提案<sup>[1][2]</sup>している。本論文では、これまでのシミュレーションにおいて三極管型で避けられなかった横方向エミッタンスの増加を防ぐ熱陰極形状の設計や、三極管型熱陰極への高周波電力の供給能力とチューニングカーブを考慮したカップリング係数 $\beta$ 、Q値の選定についてまとめる。

### 2. 三極管型熱陰極

三極管型熱陰極とは、熱陰極を備えた追加小空胴を従来の熱陰極に換えて設置し、追加小空胴と電子銃の本体空胴の電界をそれぞれ独立に制御し、陰極からの電子の引き出しと本体空胴での加速とを独立に行うものである。図1に従来型と三極管型の陰極付近の模式図を示す。

通常の高周波電子銃では第1空胴の電界で陰極からの電子の引き出しと加速を行う構造となっているが、三極管型では電子銃の第1空胴と熱陰極の間にアイリスを設置して第1空胴と追加小空胴とを高周波的に遮断し、追加小空胴に電子銃本体空胴と独立な高周波電界を誘起する。この追加小空胴に誘起す

る電界の位相と振幅を適切に調整し、第1空胴で電子が逆流しない位相で電子を引き出す事でback-bombardment現象による陰極の加熱を軽減するのが三極管型である。

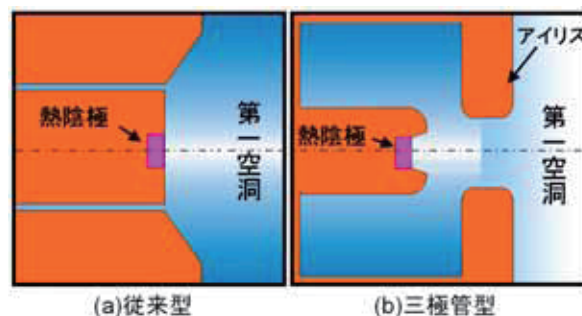


図1 従来型(a)と三極管型(b)の陰極付近の拡大模式図による比較

### 3. 粒子シミュレーション手法

本研究では軸対象2次元の粒子軌道解析コード<sup>[3]</sup>を使用し、三極管型熱陰極を設計した。初めに、今回用いた解析コードについて説明する。

まず、空胴内に誘起される軸対称固有モードを計算するコードであるKUEMS<sup>[3]</sup>にて電子銃本体と追加小空胴の固有モードを求める。次に、2次元粒子軌道解析コードであるKUBLAI<sup>[3]</sup>を用いて、陰極のマウント位置や形状、電界強度、電子銃本体空胴の高周波電界と追加小空胴の高周波電界との位相差などを変えて、電子軌道を計算した。その結果から、逆流して陰極に衝突する電子の電力、生成ビームの

横方向エミッタンス、縦方向エミッタンス、ピーク電流などを求めた。

#### 4. 三極管型熱陰極の設計

これまでの数値解析研究<sup>[4]</sup>で従来型熱陰極の位置から-6mm付近に陰極をマウントし、位相差を150度程度にすることで、逆流電子を削減し、横方向エミッタンスの増加を最小限に抑えることができるという結果が得られている。そこで本研究では、陰極位置はこの位置に固定して、三極管型熱陰極で問題となってきた横方向エミッタンス増大への対策として wehnelt構造を採用することとした。今回設計する熱陰極の陰極付近の拡大図を図2に示す。図2中の陰極深さ $d$ 、wehnelt角度 $\theta$ をそれぞれ独立のパラメータとし、電子銃から出力される電子ビームの輝度を最大とするための陰極形状の最適化を行った。ただし、陰極表面電流密度は $80\text{A}/\text{cm}^2$ 、追加小空胴の空胴電圧は $30\text{kV}$ 、電子銃の本体空胴の $4.5$ 空胴の空胴電圧は $10\text{MV}$ とした。また、電子ビームの評価は $4.5$ 空胴電子銃の出口で行った。

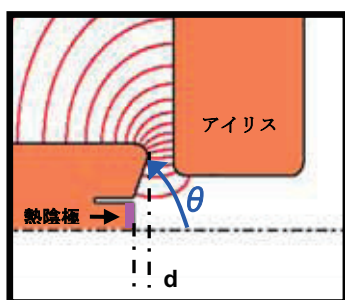


図2 Wehnelt構造を採用した三極管型熱陰極の拡大図

陰極付近の形状を変え、それぞれの形状について追加小空胴に誘起される電界と電子銃本体の加速電界との位相差を最適化し、得られる電子ビームを解析した。逆流電子の電力を8割以上削減できる形状についてのみ結果をまとめたのが図3である。図3より、陰極表面電流密度が $80\text{A}/\text{cm}^2$ の場合にはwehnelt角度 $\theta$ を $40$ 度とすることで横方向エミッタンスの増加を防ぎ、輝度を従来型熱陰極の $15$ 倍程度まで高めることが可能だとわかる。表1は実機製作を考慮し、電界が均一にかかるよう形状を変更した設計での電子ビームの特性である。表1より三極管型熱陰極の導入によって、横方向エミッタンスを維持したまま逆流電子の電力を9割削減、ピーク電流を $10$ 倍程度、輝度を $15$ 倍程度にすることが可能であると判明した。またこの時、陰極深さ $d$ は $1.6\text{mm}$ 、陰極径は $2\text{mm}$   $\phi$ 、 $1$ マイクロバンチあたりの電荷は $77\text{pC}$ とした。

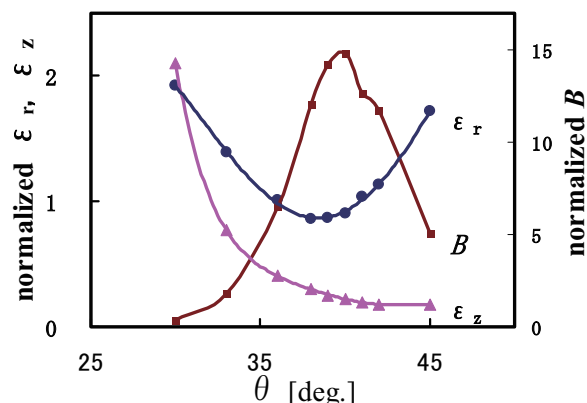


図3 Wehnelt角度に対する三極管型熱陰極の特性  
 $4.5$ 空胴出口で横方向及び縦方向rmsエミッタンス $\epsilon_r \cdot \epsilon_z$ と輝度 $B$ を計算、従来型で規格化して表示

表1 従来型と三極管型の電子ビームの比較

	従来型	三極管型
$P_{\text{back}}$ [kW]	36	3.6
$I_{\text{peak}}$ [A]	17	114
$\epsilon_r$ [ $\mu\text{mm} \cdot \text{mrad}$ ]	2.5	2.0
$\epsilon_z$ [psec MeV]	0.046	0.012
$B$ [ $\text{A}/(\mu\text{mm} \cdot \text{mrad})^2 \cdot \text{keV}$ ]	0.27	1.6

#### 5. 等価回路モデルによる空胴特性の検討

今回製作する三極管用追加小空胴には共振周波数を調整するための温度調整機構やチューナ等は設けず、代わりに高周波電力を分岐供給する同軸ケーブルと空胴とのカップリング係数 $\beta$ を整合がとれる値よりも大きく(over coupling)することで、周波数特性をなだらかにして対応する。また、共振の鋭さを表す無負荷の $Q$ 値( $Q_0$ )についても同様の目的で、必要であれば $Q_0$ を低く設計する必要がある。ただし、追加小空胴に供給できる高周波電力は使用する同軸ケーブルの耐圧限界から $40\text{kW}_{\text{peak}}$ となるため、必要電力に注意しながら $\beta$ と $Q_0$ を決定しなければならない。

周波数特性の検討には高周波電力源、導波管、追加小空胴、電子ビームを表した図4の等価回路モデルを用い、追加小空胴に必要な投入電力や、追加小空胴の周波数特性などを求めた。

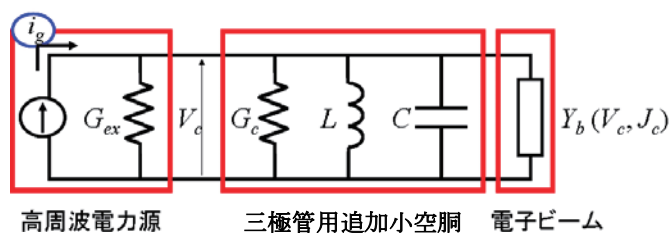


図4 等価回路モデル

等価回路モデルにおいて空胴電圧 $V_c$ は(1)式、クラ

イストロンを表す電流源の最大値  $I_g$  は(2)式となる。

$$V_c = \frac{I_g}{(G_c + G_b + G_{ex}) + j(B_c + B_b)} \quad \dots(1)$$

$$I_g = \sqrt{8G_{ex}P_{in}} \quad \dots(2)$$

追加小空洞及び電子ビームで消費される電力  $P_c$  は、入射電力  $P_{in}$  から外部負荷で消費する電力を差し引けばよいので、(3)式のようになる。

$$P_c = \text{Re} \left[ \frac{1}{2} (V_c^* I_g - G_{ex} V_c^* V_c) \right] \quad \dots(3)$$

反射高周波電力  $P_{ref}$  は入射高周波電力  $P_{in}$  から消費される高周波電力  $P_c$  を差し引いた値なので(4)式となり、これより高周波電力の反射率を求めることができる。

$$P_{ref} = P_{in} - P_c \quad \dots(4)$$

$$\frac{P_{ref}}{P_{in}} = 1 - \frac{P_c}{P_{in}} \\ = 1 - \frac{4(G_c + G_b)G_{ex}}{(G_c + G_b + G_{ex})^2 + (B_c + B_b)^2} \quad \dots(5)$$

(5)式において、ビームアドミタンス  $G_b$ 、 $B_b$  は粒子軌道解析によって、空洞のアドミタンス  $G_c$ 、 $B_c$  は固有モード解析によって求められる空洞パラメータと動作周波数によって与えられるため、(1)(2)式より空洞電圧  $V_c$  の周波数特性を、(5)式より電力反射率  $P_{ref}/P_{in}$  の周波数特性を描くことができる。

## 6. 必要投入電力の計算

三極管用の追加小空洞に必要な投入電力の計算にも図4の等価回路モデルを用いた。(1)(2)式より、カップリング係数  $\beta$  と必要な投入電力  $P_{in}$  との関係性を求めたところ、陰極表面電流密度  $80\text{A}/\text{cm}^2$ 、追加小空洞の空洞電圧  $30\text{kV}$  の時、図5のような関係となった。投入電力  $P_{in}$  を最小とする  $\beta$  は  $9.6$ 、この時の投入電力  $P_{in}$  は約  $17\text{kW}$  で、既設の高周波電力分岐供給系統(最大  $40\text{kW}$ ) に余裕があることも判明した。この余裕の範囲で、先に述べたとおり投入電力を反射(over coupling)もしくは損失(Q値を下げる)させて、チューナ等を省略可能とする。

## 7. カップリング係数 $\beta$ 及びQ値の決定

現在製作を予定している形状の場合、追加小空洞を無酸素銅で製作すると  $Q_0$  は約  $4000$ 、シャントインピーダンス  $R/Q$  は  $63\Omega$  となる。

図6にビームアドミタンス  $Y_b$  を考慮して描いたチューニングカーブを示す。投入電力は  $40\text{kW}$  とし、実線が空洞電圧  $V_c$ 、破線が高周波電力の反射率  $P_{ref}/P_{in}$  で、カップリング係数  $\beta$  が  $9.6$  (best much) の場合、 $15 \cdot 20$  (over coupling) の場合、空洞をステンレスで製作し  $Q_0$  を低く ( $Q_0=1000$ ) した場合、についてカーブを描いている。図6からわかるように空洞を銅で製作した場合、即ち  $Q_0$  を  $4000$  程度で固定し、 $\beta$  を大きくするとカーブがなだらかになるとともに  $V_c$  のピークが低くなっていく。これまで粒子シミュ

レーションで前提条件としていた空洞電圧  $V_c=30\text{kV}$  を満たす周波数帯をできるだけ広くとることを考えると、 $\beta=15 \sim 20$  程度が適当である。また、空洞の材質を変更して  $Q_0$  を低くし、チューニングカーブをなだらかにする事も可能ではあるが、図6を見る限りでは  $Q_0$  を低くするよりも  $\beta$  を大きくとる方が  $V_c$  を高くできるため、今回は空洞を銅で製作し、 $\beta$  を  $15 \sim 20$  (over coupling) とする。

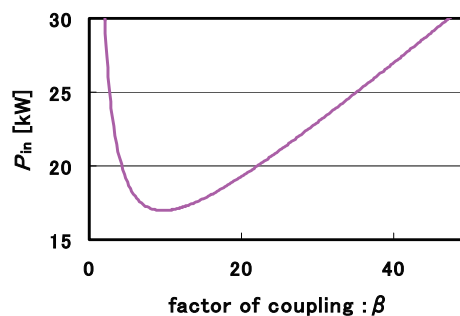


図5 カップリング係数  $\beta$  と必要投入電力  $P_{in}$

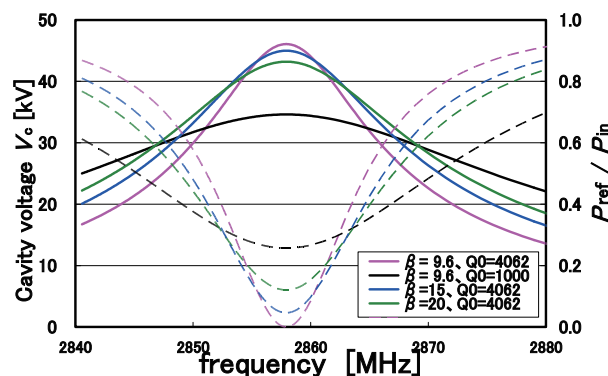


図6 ビームアドミタンス  $Y_b$  を考慮した三極管用追加小空洞のチューニングカーブ

## 8. まとめ

三極管型熱陰極の形状と位相差を現在使用している電子銃に最適化することで、逆流電子の電力を9割程度削減するとともに、電子ビームの短バンチ化による飛躍的なピーク電流の増加が見込めることが判明した。また、 $\beta$ 、 $R/Q$ 、 $Q_0$  を決定し、現在は決定した  $\beta$  を実現するカップラ部分の設計に着手しており、本年度中に実機を製作する予定である。

### 参考文献

- [1] E. Tanabe, “マイクロミニチュアRF電子銃”, Proc of Linear Accelerator Meeting in Japan, August 7-9, 2002
- [2] K. Kusakame, et al., “Particle Simulation of Thermionic RF Gun with Triode Structure”, Proc of the 30th Linear Accelerator Meeting in Japan, July 20-22, 2005
- [3] K. Masuda, “Development of Numerical Simulation Codes and Application to Klystron Efficiency Enhancement”, a dissertation of Ph. D. Kyoto University
- [4] K. Masuda, et al., “DESIGN STUDY OF RF TRIODE STRUCTURE FOR THE KU-FEL THERMIONIC RF GUN”, Proc of FEL2006