

クライオ光陰極高周波電子銃用 RF 入力カプラー構造のシミュレーション

Simulation of RF-input coupler structure for cryogenic photocathode RF-gun

○高塚健人¹, 田中俊成², 境武志², 中尾圭佐², 野上杏子², 稲垣学²* Kento Takatsuka¹, Toshinari Tanaka², Takeshi Sakai², Keisuke Nakao², Kyoko Nogami², Manabu Inagaki²

Abstract: The cryogenic C-band photocathode RF-gun operating at 20 K is under development at LEBRA in Nihon University. The RF-gun consists of the 2.6-cell cavity with the resonant frequency of 5712 MHz. The bead-pull measurement of the electric field distribution on the cavity axis has suggested that there is a possibility that a non-axisymmetric mode (e. g., TE_{11} mode) is excited in the circular waveguide. In addition, the existence of TE_{11} mode was confirmed by the calculation with the 3D-electromagnetic field simulation code, CST STUDIO. By adjusting the dimensions of the irises placed in the rectangular and the circular waveguides of the coupler by the CST STUDIO simulation, the fraction of the TE_{11} mode field in the circular waveguide was reduced to less than 10% of that in the current design. The improvement in the coupler design has also reduced the standing wave amplitude in the rectangular waveguide.

1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設では、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) による文部科学省「光・量子融合連携研究開発プログラム」の「光・量子ビーム技術の融合・連携促進のための基盤技術開発」の委託研究に基づき、20 K で動作させる 2.6 セルから成る π モード C バンド (5712 MHz) 光陰極高周波 (RF) 電子銃の開発を進めている。KEK での超精密加工により製作された試験空洞は、室温 23.5 °C 及び 20 K での低電力試験結果、2 次元電磁界計算コード SUPERFISH によるシミュレーションをほぼ再現できた^[1]。さらに SUPERFISH と 3 次元電磁界コード CST STUDIO^[2]を用いて、RF 入力カプラーを備えた低電力試験空洞を設計し、製作を行った。RF 入力には、矩形導波管と円形導波管及び伝送モードを変換するモード変換器で構成されるカプラーを検討している。カプラー付き試験空洞の室温における測定では、共振周波数が予定より 600 kHz ほど低かったが、Q 値と結合係数に関してはほぼ計算と一致した。しかしビーズプル法による軸上電界測定の結果、円形導波管部に非軸対称な電磁界モード (TE_{11} モード) が存在している可能性があり^[3]、さらに CST STUDIO の計算からも TM_{01} モードに対して無視できない強度の TE_{11} モードが存在していることが示唆された。 TE_{11} モードでは電子は軌道に対して垂直方向に力を受けるため、円形導波管部の TE_{11} モード成分を減らすようカプラー構造の改良が必要となった。そこで CST STUDIO を用いて矩形及び円形導波管のアイリスの寸法を調整し軸上電界分布を最適化した結果、 TE_{11} モード成分を大幅に減少させることができた。また 2.6 セル空洞を含めたカプラー計算では、矩形導波

管部に電子ビームの加減速が無視できない強い電場が存在したため、その電場を低減させた。本論文では、寸法調整を行った RF 入力カプラーを用いた 2.6 セル RF 電子銃空洞の電磁界シミュレーション結果について報告する。

2. シミュレーション方法

CST STUDIO を用いて 2.6 セル空洞を除いたカプラーのみの 3 次元仮想モデルを作製し、カプラー内を伝搬する電磁界の計算を行った^{[4][5]}。本計算では Figure 1 に示されるモデルと調整パラメータを用いて、円形導波管部での TE_{11} モードの成分が小さくなるようなカプ

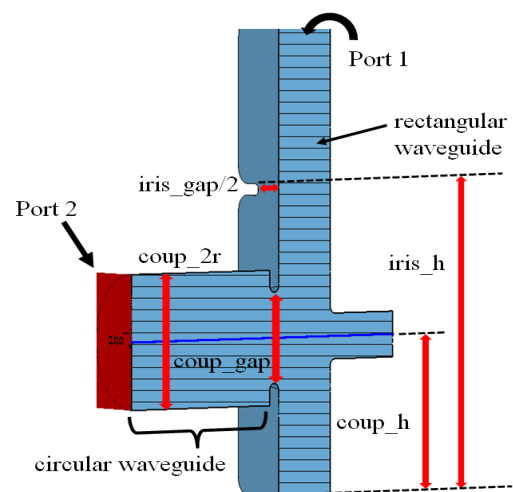


Figure 1: Cross-sectional view of the coupler in 3D-model for the calculation using CST STUDIO. The red arrows indicate the dimensional parameters used for reducing TE_{11} mode in the circular waveguide. The blue line indicates the circular waveguide central axis. The port 2 is defined as RF-output plane and the port 1 (RF-input plane) is on the top side of the rectangular waveguide.

1 : 日大理工・院 (前)・量子 Graduate School of Science and Technology, CST., Nihon-U.

2 : 日大・教員・量科研 Institute of Quantum Science, Nihon-U. 3 : 日大・PD・量科研 Institute of Quantum Science, Nihon-U.

ラー構造を求めた。軸上電界分布において円形導波管の軸に垂直方向の成分を TE_{11} モード、平行方向の成分を TM_{01} モードと同定して解析を行った。

3. シミュレーション結果

3 - 1 カプラー計算

CST STUDIO によりカプラー寸法を調整した結果を **Figure 2** に示す。 TM_{01} モードに対して約 18% 占めていた TE_{11} モードの成分が約 1.5% まで減少しており、現寸法におけるより 1/10 程度まで小さくなっていることが確認できる。

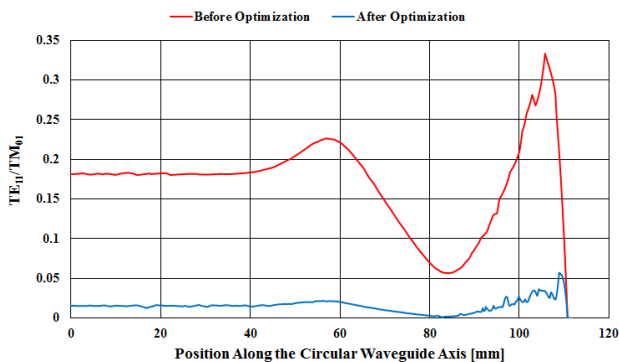


Figure 2: Amplitude ratio of TE_{11} mode to TM_{01} mode on the circular waveguide axis. The red line shows the ratio for the current coupler dimensions, while the blue line shows the ratio after adjustment.

3 - 2 カプラー付き 2.6 セル空洞計算

最適化したカプラーに 2.6 セル空洞を接続し、再度 π モードの軸上電界分布を計算すると、矩形導波管のアイリスで囲われた領域で振幅の大きい定在波が立っていることが確認できた (**Figure 3** : 赤線)。この定在波は位相によっては電子ビームの加速に大きな影響を与える可能性がある。さらにこの領域での壁損失は、空

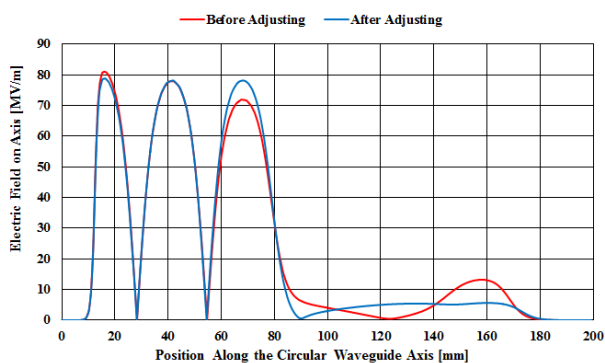


Figure 3: The π -mode electric field distribution at 20 K on the cavity axis. The red line shows the distribution after the adjustment of the coupler design only, while the blue line shows the distribution after adjustment of the cavity and coupler design including the 2.6-cell cavity.

洞の加速効率を低下させるため、定在波の振幅は小さくしておく必要がある。そこで 2.6 セル空洞を含めた寸法の再調整を行った。その結果を **Figure 3** (青線) に示す。矩形導波管部に立っていた定在波の振幅は調整前の約 1/2 まで減少していることが確認できる。現寸法及び調整後の寸法の RF 特性は **Table 1** のようになった。結合係数と Q 値は若干低下したものの、他の RF 特性に関してはよく一致している。

Table 1: Calculated RF Characteristics of the 2.6-cell Cavity with the Coupler at 20 K

Characteristics	Design	
	Present	Adjusted
π -mode resonant frequency	5.71199	5.71169
Coupling coefficient	19.84	19.27
Q_0 (Unloaded Q value)	63344	62862
Q_L (Loaded Q value)	3039	3101

4. まとめ

CST STUDIO によるカプラーの寸法調整により、円形導波管部を伝播する TE_{11} モードを大幅に減少させることができた。

2.6 セル空洞の計算においては矩形導波管部に、電子ビームの加速に大きな影響を及ぼす可能性のある強い電場が存在していたが、2.6 セル空洞を含めた寸法調整で低減することができた。

謝辞

本研究開発は、文部科学省「光・量子融合連携研究開発プログラム」の「光・量子ビーム技術の融合・連携促進のための基盤技術開発」の支援を受けて行った。

5. 参考文献

- [1] T. Tanaka, et al., “Basic Design of a 20K C-band 2.6-cell Photocathode RF Gun”, IPAC2014, p. 658-659
- [2] <http://www.cst.com/>
- [3] T. Tanaka, et al., “RF Input Coupler for 20 K Cooled C-band 2.6-cell Photocathode RF Gun”, IPAC2015, p.2522-2525
- [4] Y. Taniguchi et al., “Development of X-band Thermionic RF Electron Gun using Choke Structure”, Proc. Ann. Meeting of Particle Society of Japan, (2008), p. 954-956
- [5] 谷口善洋, “平成 20 年度 修士論文 コンプトン散乱単色 X 線源のための熱陰極高周波電子銃の高性能化”, p.84-99, 東京大学大学院