

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^{#,A)}, 田中俊成^{B)}, 境武志^{B)}, 中尾圭佐^{B)}, 野上杏子^{B)}, 稲垣学^{B)}, 早川建^{B)}, 早川恭史^{B)},
照沼信浩^{C)}, 高富秀和^{C)}, 福田将史^{C)}, 吉田光宏^{C)}

Kento Takatsuka^{#,A)}, Toshinari Tanaka^{B)}, Takeshi Sakai^{B)}, Keisuke Nakao^{B)}, Kyoko Nogami^{B)}, Manabu Inagaki^{B)},
Ken Hayakawa^{B)}, Yasushi Hayakawa^{B)}, Nobuhiro Terunuma^{C)}, Toshikazu Takatomi^{C)},
Masafumi Fukuda^{C)}, Mituhiro Yoshida^{C)},

^{A)} Graduate School of Science and Technology, Nihon University

^{B)} Laboratory for Electron Beam Research Application (LEBRA), Nihon University

^{C)} High Energy Accelerator Research Organization, KEK

Abstract

The cryogenic C-band photocathode RF-gun operating at 20K 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 test cavity with the RF input coupler consisting of a circular waveguide and a mode converter from rectangular TE₁₀ to circular TM₀₁ mode was manufactured in KEK. 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 (f. g., TE₁₁ mode) is excited in the circular waveguide. In addition, the existence of TE₁₁ mode was confirmed by the calculation with the 3D-electromagnetic field simulation code, CST STUDIO. By adjusting the designs of the irises placed in the rectangular and the circular waveguides of the coupler by the CST STUDIO simulation, the fraction of the TE₁₁ mode in the circular waveguide was reduced to less than 10% of that in the current design. The simulation of the 2.6-cell cavity with the adjusted coupler design has resulted in the same RF properties except for the electric field distribution on the axis of the circular waveguide and the rectangular waveguide.

1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設では、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」の委託研究に基づき、20 K まで冷却して動作させる、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試験空洞を製作し、室温 23.5 °C および 20 K における低電力試験の結果、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 次元電磁界計算コード CST STUDIO 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 (WRJ5) と円形導波管及び伝送モードを変換するモード変換器から成るカプラーを試している。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約 600 kHz 低かったが、Q 値と結合係数についてはほぼ計算と一致した。しかしピ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が存在している可能性があり^[2]、さらに CST STUDIO^[3]の計算による円形導波管部の軸上電界分布から TM₀₁ モードに対して無視できない強度の TE₁₁ モードが存在しているこ

とが示唆された。この電磁界モードを通過する電子は軌道に対して垂直方向に曲げられてしまうため、円形導波管部に TE₁₁ モードが混在しないようなカプラー構造への改善が必要となった。そこで CST STUDIO を用いて矩形導波管及び円形導波管のアイリスの寸法を調整し軸上の電場分布を最適化した結果、TE₁₁ モードの成分を大幅に減少させることができた。本論文では、寸法調整を行った RF 入力カプラーを用いた場合の 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計算を行った^{[4][5]}。本計算で用いたモデルと調整パラメータを Figure 1 に示す。ただし、波が伝搬する空間は真空 (青色) であるとした。矩形導波管のアイリスの高さ *iris_h*、開口幅 *iris_gap* および円形導波管の直径 *coup_2r*、円形導波管のアイリスの高さ *coup_h*、直径 *coup_gap* の値をパラメータとすることにより、円形導波管部での TE₁₁ モードの成分が小さくなるようなカプラー構造を模索した。ここではモード変換のみの計算であるため、VSWR 最小かつほぼ 1 となる周波数が 5712 ± 1 MHz に入るよう調整を行った。ただし 23.5 °C の寸法においてパラメータの値を変え、寸法比

cskn14006@g.nihon-u.ac.jp

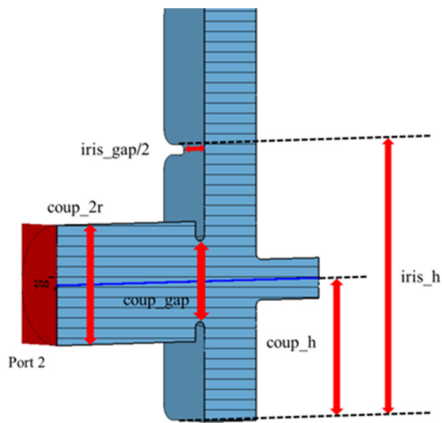


Figure 1: Cross-sectional view of the coupler in 3D-model for the calculation using CST STUDIO. The red arrows indicate the dimensional parameters used for reducing TE₁₁ mode in the circular waveguide and adjusting the VSWR-minimum frequency in the coupler to 5712±1 MHz. The blue line indicates the circular 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.

[23.5 °C]/[20 K]=1.0033529^[6]を用いて 20 K の寸法にスケールリングした後、周波数を調整した。その際、それぞれの温度に対して電気伝導度のみを設定し直した。RF 入力用として矩形導波管にポート 1 (計算するモード数: 1)、出力用として円形導波管にポート 2 (モード数: 2) を定義した。ここでのモード数は、ポート 1 では TE₁₀ モード、ポート 2 では TE₁₁ モードと TM₀₁ モードに対応している。ポートを定義することでその面での反射電力は吸収され、いかにも導波管が無限に繋がっているかのような状況で計算することができる。Figure 1 の青線は円形導波管の中心軸に沿って描かれており、軸上電界分布を計算する座標指定のために利用した。軸上電界分布において円形導波管の軸に対して垂直方向成分を TE₁₁ モード、平行方向成分を TM₀₁ モードと同一し解析を行った。調整後のカプラー寸法で 2.6 セル空洞を繋いで行った計算では、2.6 セル空洞

の端面は RF 出力面ではなく、ショート面に設定した。

3. シミュレーション結果

3.1 カプラー計算

CST STUDIO によりカプラーの寸法を調整し計算した結果、軸上の TM₀₁ モードに対する TE₁₁ モードの電界振幅比は Figure 2 のようになった。Figure 2 の赤線はカプラーの寸法を調整する前の、実際に製作したカプラーに対する計算における振幅比であり、青線は調整後のそれを表している。円形導波管では、波は進行波であるため振幅は一定であるが、矩形導波管部のアイリスで囲まれた領域付近では振幅が一定でない様子が確認できる。Figure 2 から、円形導波管部では、現状のカプラーの寸法では TM₀₁ モードに対する TE₁₁ モードの振幅の割合が約 18% である。しかし調整後は、その割合が約 1.5% まで減少しており、TE₁₁ モードの成分は現寸法での値の 1/10 程度まで小さくなっている。

Figure 3(a), (b) に電界分布アニメーションのスナップショットを示す。それぞれ調整前と調整後を表している。調整前では電場の節が円形導波管の中心軸上になく、TE₁₁ モードと TM₀₁ モードが混在し

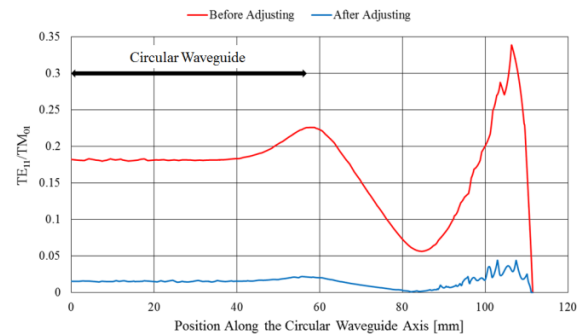


Figure 2: Amplitude ratio of TE₁₁ mode to TM₀₁ mode on the circular waveguide axis. The red line shows the ratio for the current coupler dimensions, while the blue line shows the ratio after adjustment. The black two-headed arrow is corresponding to the region of the circular waveguide.

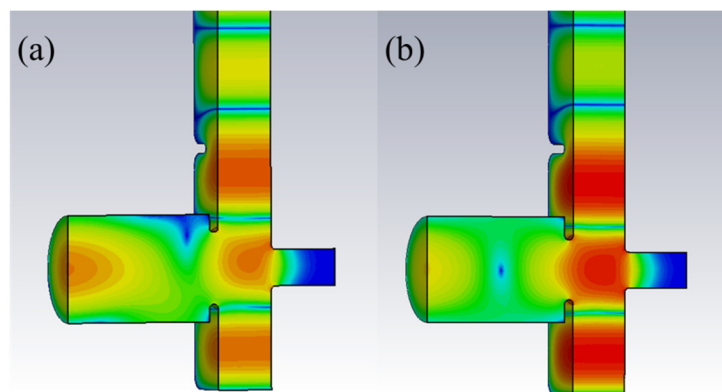


Figure 3: Example of the electric field distributions in the couplers calculated using CST STUDIO. (a): Result from the dimensions in the present coupler. (b): Result from the coupler adjusted in this study.

た非軸対称な電場分布になっていた。調整後は、対称性が改善されれば TM_{01} モードで伝搬しているように見える。

調整前後のカプラーの RF 特性を Table 1 に示す。ここで S-パラメータの括弧内は、ポート 1, 2 のモード数に対応している。例えば、 $S_2(1),1(1)$ はポート 1 から入力した TE_{10} モードに対してポート 2 で TE_{11} モードとして出力される電圧比を示している。Table 1 の $S_2(1),1(1)$ 、 $S_2(2),1(1)$ によると、円形導波管を伝搬しているモードは主に TM_{01} モードであることが確認できる。また $S_1(1),1(1)$ から、RF 入力面ポート 1 への反射は小さく、ここでのモード変換の効率が高いと言える。

Table 1: Calculated RF Characteristics of the Coupler

Characteristic	Before adjustment	After adjustment
$S_1(1),1(1)$	0.52510291	0.013151396
$S_2(1),1(1)$	0.32581993	0.035349553
$S_2(2),1(1)$	0.78557482	0.99341041
VSWR	3.211439	1.0266533

3.2 カプラー付き 2.6 セル空洞計算

3.1 で得られた寸法のカプラーに 2.6 セル空洞を接続して再度シミュレーションを行った結果、現寸法及びカプラー調整後の RF 特性は Table 2 のようになった。ただし、2.6 セル空洞の寸法は現寸法のままであり、周波数調整も行っていない。Table 2 に示した RF 特性では、Q 値が若干低下した以外には大きな変化は見られない。

Table 2: Calculated RF Characteristics of the 2.6-cell Cavity with the Coupler at 20 K

Characteristic	Design	
	Present	Adjusted
π -mode resonant frequency	5.712	5.71093
Coupling coefficient	19.85	19.795758
Q_0 (Unloaded Q value)	64600	62877
Q_L (Loaded Q value)	3100	3023.5493

次に、RF 電子銃としての設計値である定格入力 RF 4 MW としたときの 20 K における π モード軸上電界分布を Figure 4 に示す。本計算では矩形及び円形導波管のアイリスの開口幅を狭めたため、アイリスで囲まれた領域では振幅の大きい定在波が存在しているが、現寸法と比べて円形導波管部での電界が小さくなっていることから、円形導波管部での電界による加減速の影響を抑えられることが期待できる。また 2.6 セル空洞部の電界最大値がセルごとに異なっているが、共振周波数も含めて今後パラメータ調整を行うことで改善する必要がある。

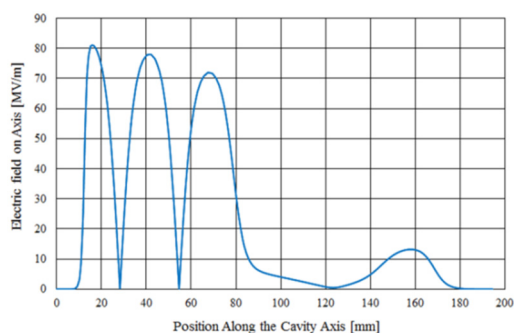


Figure 4: The π -mode electric field distribution at 20 K on the cavity axis after the adjustment of the coupler design. The source RF power is assumed to be 4 MW.

4. まとめ

ビーズブル法による軸上電界分布測定の結果および CST STUDIO の計算から、円形導波管部に非軸対称なモードが存在していることが判明した。

そこで CST STUDIO を用いて 2.6 セル空洞を除いたカプラーのみでの電磁界シミュレーションを行い、矩形導波管と円形導波管の寸法を調整することで、 TE_{11} モードの成分を現寸法における値の 10% 以下に小さくすることができた。また S-パラメータからも TE_{11} モードが円形導波管をほとんど透過せず、進行波として TM_{01} モードが伝搬しており、RF 入力面での反射波も小さいという結果が得られた。つまり本計算で設計されたカプラーは TE_{10} モード - TM_{01} モード変換器として期待できる。

カプラーのみの計算で得られたパラメータに基づいて、カプラー付き 2.6 セル RF 電子銃空洞のシミュレーションを行ったところ、現寸法のカプラーによる空洞とほぼ同等の RF 特性が得られた。しかし円形導波管と矩形導波管における電界分布が大きく異なる。この点については、さらにパラメータ調整を行い検討していく予定である。

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。

参考文献

- [1] T. Tanaka, et al., "BASIC DESIGN OF A 20K C-BAND 2.6-CELL PHOTOCATHODE RF GUN", <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2014/papers/mopri030.pdf>
- [2] T. Tanaka, et al., "RF INPUT COUPLER FOR 20 K COOLED C-BAND 2.6-CELL PHOTOCATHODE RF GUN", <http://jacowfs.jlab.org/conf/y15/ipac15/prepress/WEPWA015.PDF>
- [3] <http://www.cst.com/>
- [4] Y. Taniguchi et al., Proceeding of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Higashihiroshima, Japan(2008)p.954;http://www.pasj.jp/web_publish/pasj5_1am33/contents/PDF/TP/TP115.pdf
- [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

- [6] T. Sakai, et al., “クライオ光陰極高周波電子銃用試験空洞の高周波特性”, Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Aug. 9-11, 2014