

クライオ光陰極高周波電子銃用高周波空洞のための電磁界シミュレーション

SIMULATION OF ELECTROMAGNETIC FIELD FOR 20K COOLED PHOTOCATHODE RF GUN

中尾圭佐^{#,A)}, 田中俊成^{A)}, 境武志^{A)}, 野上杏子^{A)}, 稲垣学^{A)}, 高塚健人^{B)}, 長島涼子^{B)}, 早川建^{A)}, 早川恭史^{A)}, 高富俊和^{C)}, 福田将史^{C)}, 吉田光宏^{C)}, 照沼信浩^{C)}

Keisuke Nakao^{#,A)}, Toshinari Tanaka^{A)}, Takeshi Sakai^{B)}, Kyoko Nogami^{A)}, Kento Takatsuka^{B)}, Ryoko Nagashima^{B)}, Ken Hayakawa^{A)}, Yasushi Hayakawa^{A)}, Toshikazu Takatomi^{C)}, Masahumi Fukuda^{C)}, Mitsuhiro Yoshida^{C)}, Nobuhiro Terunuma^{C)}

^{A)} LEBRA, Nihon University

^{B)} Institute of Quantum Science, Nihon University

^{C)} KEK

Abstract

The 20K cooled C-band 2.6-cell photo-cathode rf gun has been under development in LEBRA since 2013. There is an experimental suggestion that a high Q factor at -197 °C degrades as a result of high peak RF magnetic field caused by high power operation. In order to improve the rf property of the cavity and to investigate if the peak magnetic field can be suppressed by choosing appropriate dimensions of the cavity, simulations of the cavity have been carried out for a variety of combinations of the cavity dimensions using an electromagnetic field simulation code SUPERFISH. From the result of the calculations, the cavity dimensions have been optimized for the mode separation and the shunt impedance. However, the maximum magnetic field on the cavity surface has not shown a significant change for the cavity structure employed in the calculation.

1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設(LEBRA)では、2013年度より絶対温度 20K で動作する、クライオ光陰極高周波電子銃の開発を進めている。2013 年度に高純度 6N8 銅材を用いて C バンド 2.6 セルピルボックス型試験空洞を作成し、常温及び低温 (21K) における低電力 RF 特性の測定を行った。その結果、設計に用いた電磁界シミュレーションコード SUPERFISH で計算した結果と良く一致することが確かめられた。

また 2014 年度には、大電力試験を見据えた RF 入力カップ付き低電力試験用空洞を作成した。この空洞の常温における低電力試験では、共振周波数が計算値と比して 600kHz 程度低くなったものの、結合係数および Q 値は概ね一致した。

しかし無酸素銅で製作されたピルボックス型空洞の、液体窒素温度における大電力試験で、ピーク磁場強度がおよそ 1000 ガウスより大きくなると、急激に Q 値が下がることが報告されている[1]。この原因として、マルチパクタの可能性が指摘されているが、空洞の表面電流による発熱で銅の温度が上昇することで、局所的に銅の抵抗値が上昇することも原因として考えられる。そこで実機に向けた設計の方針の 1 つとして、空洞の形状によって空洞表面の磁場の強さを低くすることが可能かを検討した。

2. 2.6 セル高周波空洞

今回のシミュレーションに用いた、Cバンド2.6セル

[#] nakao@lebra.nihon-u.ac.jp

高周波空洞の外形図を Figure 1 に示す。2.6 セルの空洞の後に、長さ約 30mm の円筒導波管を接続している。

パラメータとして、Figure 1 に示すように、高周波空洞のディスクの穴の半径を a 、各空洞のシリンダの半径を b_1 、 b_2 、 b_3 、ディスクの穴に付けた曲面の半径を R_a 、シリンダ部とディスクの接合部に付けた曲面の半径を R_b とする。円筒導波管の半径は、 b_3 とし、ディスクの穴には平坦部を作っていないため、ディスクの厚さは $2R_a$ に一致する。 a を 7mm から 10mm まで 0.5mm 間隔で、 R_a を 1.8mm から 2.4mm まで 0.2mm 間隔で、 R_b を 7mm から 10mm まで 1mm 間隔で設定し空洞の π モード共振周波数が 5712MHz になるよう、後述する方法で b_1 から b_3 を調整し、112 パターンの空洞を計算した。これらの空洞の Q 値、

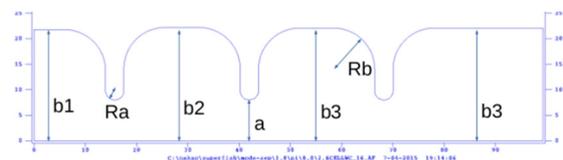


Figure 1: Variables of 2.6 cell C-band rf cavity in the SUPERFISH calculation.

磁界の最大値を SFO ファイルから取得し、また円筒導波管を除いた範囲の電場を積分しシャントインピーダンスをそれぞれ計算した。さらに近接モードとの分離を確認するために、同じ寸法での $\pi/2$ モードの共振周波数を求めた。計算に用いるメッシュサイズは 0.1mm 以下とした。

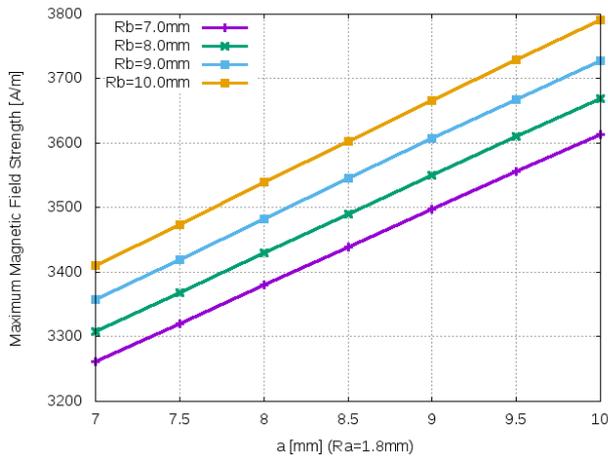


Figure 2: Maximum magnetic field vs. disk iris radius a for different R_b values.

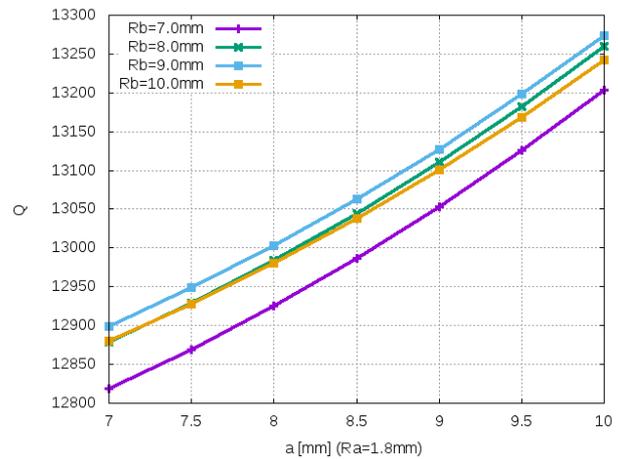


Figure 4: Q factor vs. disk iris radius a for different R_b values.

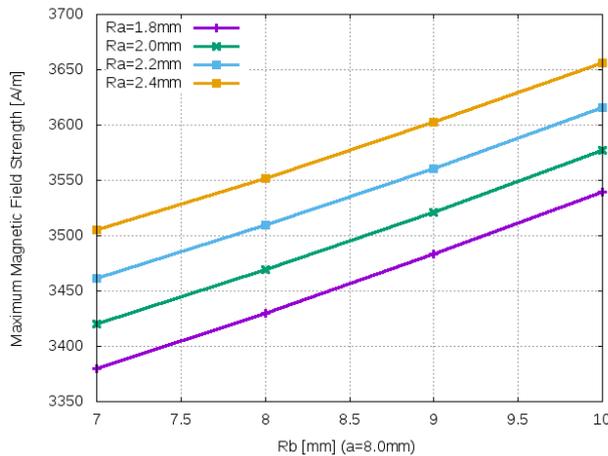


Figure 3: Maximum magnetic field vs. R_b for different R_a values.

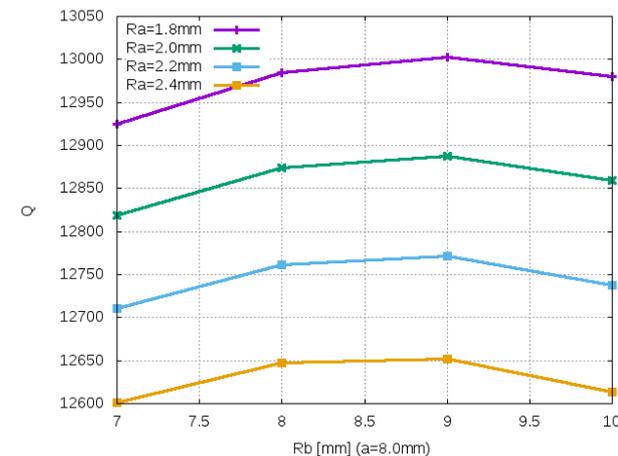


Figure 5: Q factor vs. R_b for different R_a values.

3. シミュレーションの自動化と計算環境

本研究では、シミュレーションの数が膨大になることが考えられたため、当初よりシミュレーションの自動化を行った。SUPERFISH を使って計算を行うためには、AF ファイルに空洞の寸法および境界条件等を入力し、それをコマンドライン引数として AUTOFISH.EXE を実行する。よって AF ファイルの自動生成、AUTOFISH.EXE の起動、SFO ファイルから計算結果の取得ができれば、自動化は可能である。そこで、プログラミング言語 Python を用いて、 a 、 R_a 、 R_b を指定すると π モードの共振周波数が 5712MHz になるように b_1 から b_3 までの値を探すプログラムを作成した。AF ファイルの生成は、Python の標準ライブラリに含まれている、string.Template クラスを用いてあらかじめ作成しておいたテンプレートに値を挿入することで生成し、AUTOFISH.EXE の実行には、subprocess.call 関数を用いた。

2.6セル空洞のサイズを決定する手順は以下の通りである。まず、メッシュサイズが 0.3mm 程度の 0.6セルの空洞を作成し、バイナリサーチアルゴリズムを用いて b_1 を変化させ、共振周波数が 5712 ± 0.0003 MHz になる b_1 を見つける。その b_1 を初期値にして、メッシュサイズが 0.1mm 以下の 0.6セル空洞を作成し、バイナリサーチで b_1 を決定する。同様に、1.0セル、1.6セル、2.6セル+円筒導波管にこの方法を適用することで、 b_1 から b_3 を決定することができる。

シミュレーションに使用した PC は、64bit Microsoft Windows8.1 が動作する RAM を 32GByte 搭載した、クロックが 4GHz の 4 コア 8 スレッドの Intel Core i7 である。また、SUPERFISH は現在の PC の性能からみるとあまりメモリを使用しないが、ディスクアクセスが多いため、アクセス速度の速い SSD を用いた。

この環境を用いると、1つの 2.6セル加速空洞の寸法を決定するのにおよそ 1 時間かかった。AUTOFISH.EXE 実行時、メッシュの作成に失敗することもあり、いくつか手作業での調整が必要だった

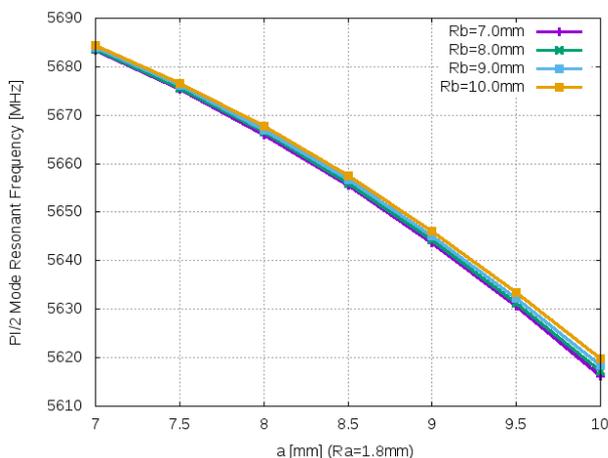


Figure 6: $\pi/2$ mode resonant frequency vs. disk iris radius a for different R_b values with π mode frequency fixed to 5712 MHz.

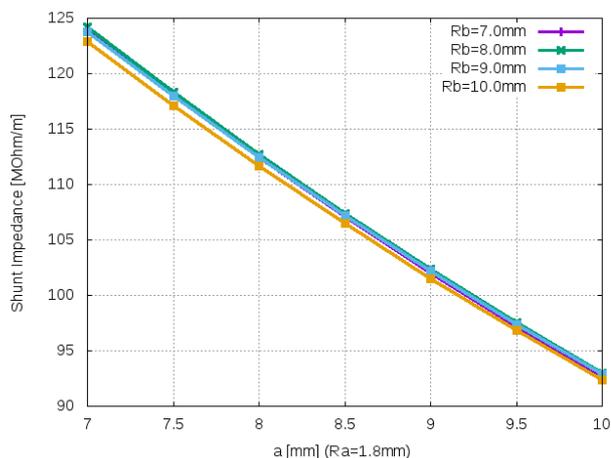


Figure 8: Shunt impedance vs. disk iris radius a for different R_b values.

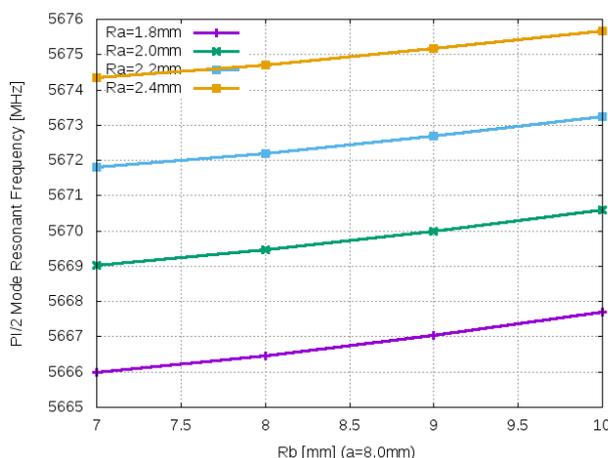


Figure 7: $\pi/2$ mode resonant frequency vs. R_b for different R_a values.

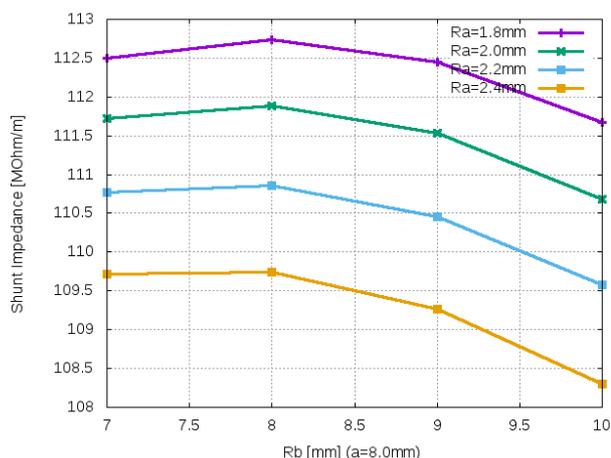


Figure 9: Shunt impedance vs. R_b for different R_a values.

ものの、すべての組み合わせを計算するのに要した時間は、半日から1日程度であった。

4. 結果

シミュレーション結果を Figure 2 から Figure 9 に示す。空洞表面の磁界の最大値は、 R_b が大きくなるほど大きくなっているが、5%程度しか変化していない。また、 R_a が小さくなると磁界の最大値は小さくなるが変化量は4%程度と小さい。空洞表面の磁界が最大になる場所は、Figure 1 の1セル目の左端の銅板表面で、空洞中心軸から16.8mm 付近の位置であった。

ディスクの穴径が大きくなるにしたがって、Q 値が大きくなる。また、 R_a が小さくなると Q 値が上がる。Q 値に対する R_b の寄与は小さいが、 $R_b=9\text{mm}$ で最大値をとっている。

隣接モードである $\pi/2$ モードの共振周波数は、 a が大きくなるにつれて5712MHzからの分離が良くなる。また R_a が小さくなると分離が良くなり、 R_b の寄与は

ほとんどない。シャントインピーダンスは、ディスクの穴径に強く依存しており、穴径が小さいほど大きくなる。 R_a を小さくするとシャントインピーダンスが上がるが、その変化は3%程度である。また、 R_b の寄与は1%程度であるが、 $R_b=8\text{mm}$ で最大値をとっている。

5. 結論

R_a を小さくする、すなわちディスクを薄くすると、空洞内の空間の体積が増加することで、 $\pi/2$ モードの共振周波数が下がり、Q が大きくなるため RF 加速空洞を製作するうえで有利である。また、ディスクの穴径 a を大きくすると、Q が大きくなるが、シャントインピーダンスが下がる。一方、今回の計算に採用した構造とパラメータの範囲では R_b を変化させても空洞表面の磁界の強さ、Q 値、隣接モードとの分離、シャントインピーダンスに、数%程度の変化しか見られなかった。

これらの結果から、 $\pi/2$ モードの共振周波数の差を 40MHz 以上にとり、シャントインピーダンスの低下を避けることを優先すると、 $a=8\text{mm}$ 、 $R_a=1.8\text{mm}$ 、 $R_b=8\text{mm}$ がほぼ最適なパラメータと考えられる。今後、この空洞のサイズをもとに 3 次元での電磁場シミュレーションおよびビーム加速シミュレーションを行う予定である。

謝辞

本研究は、文部科学省「光・量子融合連携研究開発プログラム」の「小型加速器による小型高輝度 X 線源とイメージング基盤技術開発」の支援を受けて行われた。

参考文献

- [1] A. H. EcEuen, et al., "HIGH POWER OPERATION OF ACCELERATOR STRUCTURES AT LIQUID NITROGEN TEMPERATURE", IEEE Transaction on Nuclear Science, Vol. NS-32, No.5, October 1985, pp.2972-2974.