

The Design of DAW Structure for RF Electron Gun

T. Hiramatsu^{*A)}, T. Imai^{B)}, M. Yoshida^{C)}, J. Chiba^{A)}, M. Enomoto^{C)}

^{A)} Faculty of Science and Technology, Tokyo University of Science 2641 Yamazaki, Noda, Chiba, 278-8510

^{B)} FEL-TUS:IR-FEL Research Center of Tokyo University of Science 2641 Yamazaki, Noda, Chiba, 278-8510

^{C)} High Energy Accelerator Research Organization 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

We develop a RF-gun for FEL in IR FEL Research Center of Tokyo University of Science. By adopting the DAW structure, we can choose a small diameter of the drift tube, and reduce backbombardment and decide the cavity geometry such as beam pipe length arbitrarily. In this report, we introduce a newly designed RF-GUN which utilized these advantages to the maximum.

DAW 型 RF 電子銃の設計

1, はじめに

本研究の目的は、東京理科大学にある赤外自由電子レーザー研究センター（以下、FEL-TUS）の遠赤外領域の自由電子レーザー（以下、FIR-FEL）に導入することを念頭に、新しい RF 電子銃を開発することである。このレーザーは未だ発振が成功しておらず、我々はこの原因を電子銃にあると推測している。

現在用いられている電子銃の問題点は二つある。ひとつは熱カソードが原因であるアウトガスの問題である。もうひとつは RF 電子銃に共通の問題である電子の返り (BackBombardment) である。前者については、特にカソード交換時のエージング時間短縮につながり、熱による放出を防ぐため冷陰極を用いることにする。後者については、グリッド付カソードと Disk-and-Washer 型加速空洞 [1] を採用することで back-bombardment の軽減を図る方針である。本発表では、Disk-and-Washer 型加速空洞の設計について報告する。

2, DISK-AND-WASHER 構造について

今回電子銃の加速空洞構造に採用した Disk-and-Washer 型（以下、DAW 型）加速空洞のは概略図を図 1 に示した。図の左にカソードがあり右を加速管方向としている。今回、空洞内部にある三つの円盤を「ディスク」とし、ディスクの作る電子走路を「ビームパイプ」として話を進めていく。電子はパイプ同士の間を通るとき加速される。

i) ビームパイプ径の縮小

DAW 構造はその特徴として、ビームパイプとエネルギー輸送路が独立していることにある。エネルギーの輸送がディスクの外側で行われるので、ビームパイプ径を絞ることができる。パイプ径を絞ることでパイプが作る鏡像電荷の影響によって空間電荷効果を緩和できる。すなわち、RF 電子銃の利点である低エミッタンスをより効果的にすることができる。

ii) Back-Bombardment の軽減

カソードから出た電子が電子銃内で減速しカソードに戻ってしまう、いわゆる電子の返り (Back-Bombardment) の原因は空洞内に励振される電場の時間変化である。空洞内を通る電子が、電場位相変化によって減速位相に乗ってしまうために、Back-Bombardment が起こる。これを解決するためには電場位相が減速位相になる前に電子が加速空間を通り抜けるように、電子と電磁場の相互作用時間を減らすことが有効である。DAW 型構造では、結合が外側にあるので、電子が加速される領域であるビームパイプ間の距離を短くすることかでき、その結果、この相互作用時間を減少させることができる。

iii) 自由度の高い設計

一般的に加速管を製作する際に問題になるのは結合係数である。DAW における結合定数は非常に大きい。このことは隣り合う空洞の設計やチューニングを簡素化できることを意味する。DAW 型加速空洞であれば構造上すべての空洞において結合定数がほぼ変わらないので、製作するとき調整が少なくすむ。

3, 空洞設計

今回設計する電子銃は FEL-TUS の性能に準拠したもの [2] である。電子銃に求められる性能を表 1 にまとめる

3-1 ディスク部における考案

期待する電場分布を形成する設計値を割り出すため、SUPER FISH を用い、それら空洞の電気的特性を求めた。そのときの電場強度をグラデーションで示したものが図 2 である。

DAW 型構造の設計で重要な問題は Disk を固定する方法である。多くの過去の論文では [3] では L 字型の細い支柱を用いている。支柱を細くする理由は、空洞に励振する電場に影響を与えない、また結合係数に影

*j6206621@ed.noda.tus.ac.jp

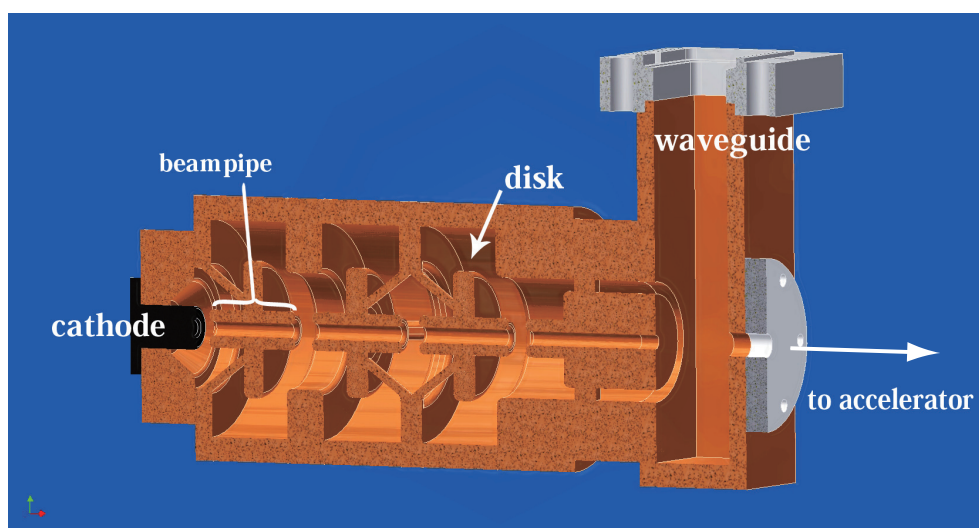


図 1: 本研究で設計した DAW 型 RF 電子銃概略図

表 1: FEL-TUS で用いられている電子銃情報

| | |
|---------------|------------------|
| 共振周波数 | 2856 MHz |
| エネルギー | 2 MeV |
| 電流値 | 500 mA |
| クライストロン繰返し運転数 | 5 Hz |
| マイクロパルス | 0.35 ns |
| マクロパルス | 10 μ s |
| カソード金属 | LaB ₆ |
| エミッタンス | 11 π mm-mrad |
| カソード径 | 6 mm |

冷が必要なほどのエネルギーが与えられないことが分かった。そのため今回はディスク部分に水冷を行わなくてよい。

ディスク間距離については、前述したように電極が近ければ近いほど Back-Bombardment が減るが、その分電極に電界が集中してしまうことが問題になってくる。今回は 100MV/m を超えない範囲で、最も電極を近づけた。

3-2 エネルギー供給の考案

DAW 構造は、電子加速部以外では同軸ケーブルと同様の TEM モードが励振している電場分布になる。そのため、エネルギーを TEM モードで入力することで軸対称でないモードを空洞内に励起しないよう抑制できる。そこで我々は空洞へのエネルギー供給を図 1 のように導波管との磁場結合を用いて空洞にエネルギーを与える。今回製作する電子銃の Q 値は 10000 程度であることから、導波管の電磁場強度が電子に与える影響は問題にならないくらい小さいとしてよい。

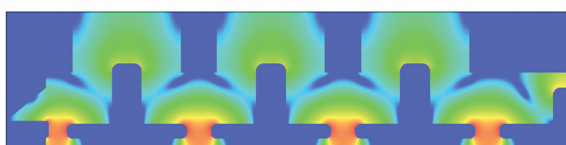


図 2: グラデーションで示された 2 次元電場分布図。横軸が z 軸、縦軸が空洞半径

響を与えないという二点が考えられる。しかし、支柱を細く作ることによって振動や熱によるパイプのゆがみ・電場分布のずれが問題になる。そのため水冷方式についても考慮せねばならなかった。

我々がこの問題を解決するために用いた方法は先ほど求めた電場分布図からより電場の少ない部分を割り出し、その場所を支柱に割り当てるということである。図 2 に示されているような電場の弱い部分に金属を置いても電場への影響はない。この場所を利用して支柱を太く作りディスクの固定を強化した。また、支柱を太く作り得たことと、作成した電子銃を設置する予定の FEL-TUS の運転が 5Hz・マクロパルスで 10 μ s であるために、ディスク部には電解が集中するものの水

3-3 形状の決定

MW-Studio を用いて三次元シミュレーションをした。その結果を図 3 に表す。これは図 2 に示した結果と同様の分布になっている。

製作後の空洞チューニングを考えると、電気的な境界(今回はディスク電極間中心)を境に空洞の対称性が必要になる。このため図 3 のように支柱をディスク間で対称になるように配置した。

実際の製作時には図 4 のように全てを disk 形状と Washer 形状に分割したものを削りだし、ロウ付けする。

以下には今回設計した空洞のパラメータをまとめた。

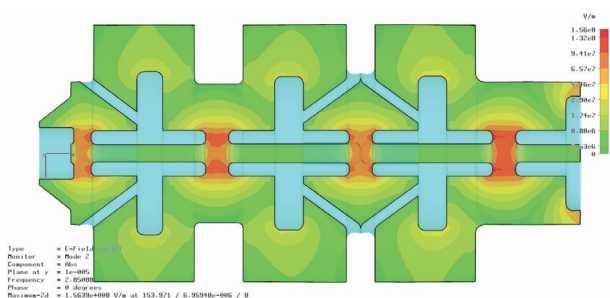


図 3: MW-Studio での三次元電場分布図

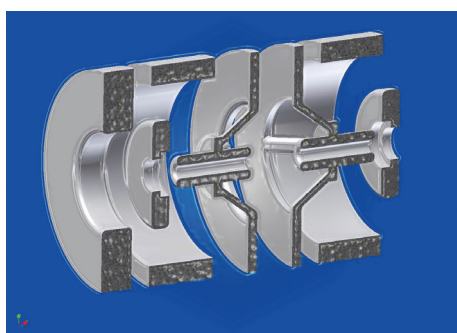


図 4: Disk と Washer の形状

表 2: DAW 型電子銃の設計値

| | |
|-------------------|-----------|
| 全長 | 178 mm |
| 半径 | 45 mm |
| 平均電場強度 | 12 MV/m |
| ディスク間加速距離 | 7 ~ 8 mm |
| ディスク間平均電場強度 | 40 MV/m |
| 空洞最大電場強度 | 100 MV/m |
| Q 値 | 9300 |
| Stored energy | 0.39 J |
| Power dissipation | 750 kW |
| Shunt impedance | 34 MOhm/m |

3. 粒子飛跡計算

PARMELA によって粒子トラッキングシミュレーションを行った。DAW 構造での計算結果を、既存の電子銃 [4] と比較して表 2 に表す。

表 3: PARMELA による電子ビームパラメータ

| | 既存空洞 | DAW 型 |
|--------|-----------|-----------|
| 電子通過割合 | 51% | 60% |
| エミッタンス | 32mm-mrad | 13mm-mrad |
| バンチ長 | 5ps | 1ps |

現在 FEL で用いられている電子銃において、カソードから放出される電子の約 51% が散乱やカソードに戻ることなしに通過している。一方、今回設計した DAW 型電子銃であると約 60% が通過している。つま

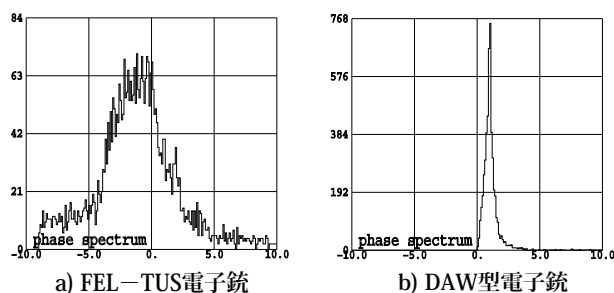


図 5: 電子銃末端でのバンチ長比較図。単位は縦軸が個数、横軸が位相

り 10% 程度の改善が見られた。この数値がそのまま Back-Bombardment の減少を表すのではないが、確実に減少していることを示している。

エミッタンスについては同じカソード径を用いて現在は 30mm-mrad であるのに対し、13mm-mrad にまで向上できた。今回最終的に FEL で得たいレーザーがサブミリ波であることからエミッタンスについての詳細な議論はせず、DAW を用いる利点の一つとしてここで述べておく。

4. まとめ

RF 電子銃の根源的な問題である Back-Bombardment を軽減するためにこの DAW 型加速空洞を採用した。本研究ではディスク固定やエネルギー供給といった諸問題に対して対処ができた。またシミュレーションでも確かめられたように、その構造上の利点から短バンチングや低エミッタンスへとつながり、簡素な構成・設備で高性能な電子銃を設計することが可能となった。空洞製作後には、この空洞を利用してカソード部分の研究を進め、より高性能な電子銃開発を目指す。

REFERENCES

- [1] V.G.Andreev, "Study of High-Energy Proton Linac Structure" Proc. of 1972 Proton Linac Conference ,LA-5115,P144
- [2] 小池英仁,"FEL-SUT における遠赤外自由電子レーザーの設計・製作", Proc. of the 27th Linear Accelerator Meeting in Japan, 8P-3
- [3] 例えば H.Ao.et al., "BIPERIODIC DISK-AND-WASHER CAVITY FOR ELECTRON ACCELERATION", Proc. of the 1998 Linear Accelerator Conference, Chicago, P255-257 (1998)etc.,
- [4] F. Oda .et al., "The on axis coupled structure type RF gun", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 429 (1999) 332-335.