

平成 21 年 5 月 29 日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間： 2007 ～ 2008

課題番号：19740148

研究課題名（和文） RF 電子銃の先端的研究

研究課題名（英文） Advanced study of RF electron gun

研究代表者

今井 貴之 (IMAI TAKAYUKI)

東京理科大学・総合研究機構・プロジェクト研究員

研究者番号：70408756

研究成果の概要：

近年、RF（高周波）電子銃は高輝度電子源として加速器等で広く用いられている。陰極の種類がいくつかあり、さらなる高性能化を図るべく個々に盛んに研究されているが、各々に課題がある。本研究では、生成した電子を加速する「加速空洞」の構造まで含め、相補的で、より実用的な RF 電子銃を目指した先端的研究に取り組んだ。加速空洞の詳細な設計、製作、調整を行い、電子ビーム生成実験を行った。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,600,000	0	2,600,000
2008 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	210,000	3,510,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：加速器、RF 電子銃、自由電子レーザー

1. 研究開始当初の背景

高周波 (RF) 電子銃は、小型、高輝度な電子源として、加速器、自由電子レーザー (FEL)、X 線源等で数多く利用されはじめていて、さらなる高性能化が期待されていた。特に研究開始当初は、加速器分野において、光陰極型の研究開発が盛んに行われていた。

一方、研究代表者が所属する東京理科大学・赤外自由電子レーザー研究センターにおいては、小型中赤外自由電子レーザーの電子源として、熱陰極型を用い、既にレーザー発振に成功し、FEL を利用した研究に光供給を行っていた。しかし、中赤外自由電子レーザー

の更なる高性能化を目指すため、さらには研究センターに設置されていたもう一台の遠赤外自由電子レーザーの発振に向けて、RF 電子銃の研究開発の必要性が高かった。光利用実験に供することのできる FEL での熱陰極型 RF 電子銃の経験を生かしつつ、先端的な RF 電子銃の研究に取り組んだ。

2. 研究の目的

RF 電子銃に関する研究開発項目としては、「電子銃の陰極に関する項目」と「高周波加速空洞列に関する項目」がある。本研究は、既に個々で行われている RF 電子銃の研究に

において直面している（特にそれぞれの陰極について）問題点を加速空洞まで含めて相補的に捉え、実用的な RF 電子銃の可能性を模索する、RF 電子銃の先端的研究である。以下に具体的に述べる。

陰極については、主に「熱陰極」、「電界放出型冷陰極」、「光陰極」に分類される。従来広く使われ、東京理科大学の自由電子レーザー建設時には、唯一の FEL 用小型 RF 電子銃の解と言えたのが、「熱陰極」である。低電圧で電子の取出しが可能である一方、ヒーターが必要であり熱的な安定性が問題になる。また近年では、カーボンナノチューブ等の「電界放出型冷陰極」が高輝度電子源として注目されているが、通常行われているような単純にマイクロ波電力をカーボンナノチューブ表面に印加するような設計では、先端の極端な温度上昇で性能が発揮されない。

そこで、通常とは異なる加速空洞を取り入れることで問題の解決を図る。本研究では、陰極から取り出した電子を高周波加速する空洞列として、Disk-And-Washer(DAW)型を採用した。その利点は後述するが、DAW 型 RF 電子銃を設計、製作し、東京理科大学の遠赤外自由電子レーザー装置に設置して、既の実績のある熱陰極を用いて電子ビームを生成することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では DAW 型空洞を製作した。その DAW 型空洞の特長は「シャントインピーダンスを高くできるため、小電力で加速電界を高くできる」、「空洞間の結合が外軸側で決まるため、結合度が大きく、共振周波数の調整が全体の一つで済む」、「結合度が外軸側で決まるため、内軸を非常に狭く、かつ陰極に近づけられ、低 β 部の加速セルを薄くして、電子の通過時間を非常に短くでき、RF 電子銃で問題の戻り電子を減らす事ができる」などがあげられる。

以下に、研究の方法について、項目ごとに述べる。

(1) DAW 型空洞の設計

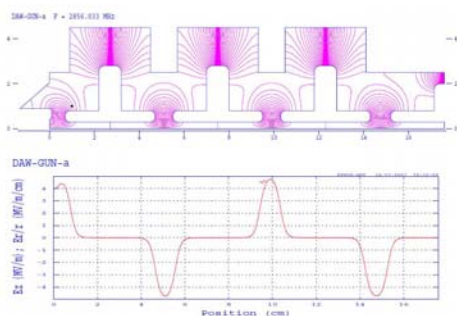


図 1 DAW 型空洞設計シミュレーション結果

空洞の設計については、要求される電子ビームのパラメータから軸上の電界強度、加速距離、DAW 型空洞では電磁場の影響を受けない部分（ノーズと呼ぶ）の距離を決定し、各空洞の形状を決定する。設計には電磁場シミュレーションを行い、その結果を図 1 に示す。

また、設計した空洞の形状を用い、電子ビームのトラッキング計算もを行い、エミッタンス 13mm-mrad、バンチ長 1ps 等の結果が得られている（図 2）。

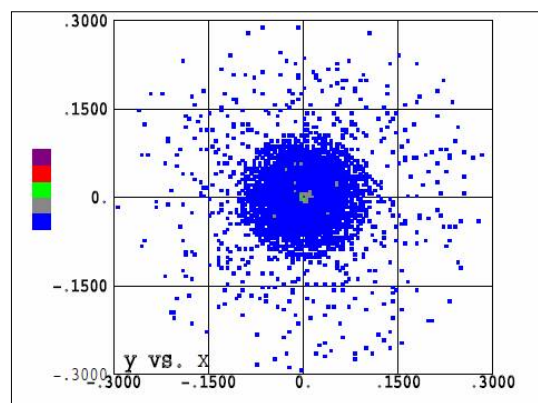


図 2 電子銃出口での電子ビームの分布 (シミュレーション)

RF の供給については、導波管からの TE_{10} モードを TEM モードのみ入射させるように、ステップ構造とテーパ構造を両立したカプラの構造とした。

その他、DAW 型空洞で問題となる Disk の固定については、電磁場シミュレーションの結果から、影響が少ない部分に支柱を配置する工夫をした。

図 3 に設計した DAW 空洞の断面図を示す。

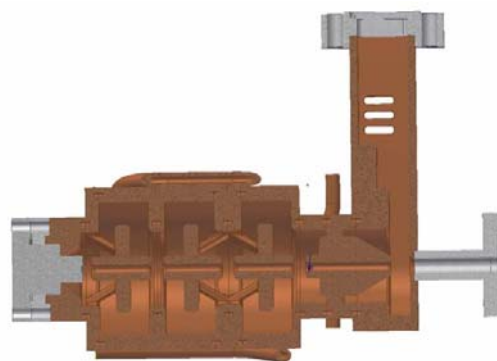


図 3 DAW 型空洞断面図

(2) 空洞製作他

空洞部品を製作、組み立て、共振周波数の測定、調整加工を行い、最終的に完成にいたる。DAW型空洞の特長であるが、結合度が大きく、共振周波数の調整が容易である。実際カソード部分の位置調整用のディスクの厚みにより共振周波数の最終調整を行った。高周波特性の測定結果は次節に示す。

(3) ビームラインへの設置

完成したDAW型空洞は、東京理科大学赤外自由電子レーザー研究センターの遠赤外自由電子レーザー装置の電子源として、設置された。図4に設置された写真を示す。



図4 設置されたDAW型空洞RF電子銃

4. 研究成果

(1) 空洞の高周波特性

前節(2)で述べた、低電力測定によるDAW型空洞の高周波特性を図5、表1にまとめる。

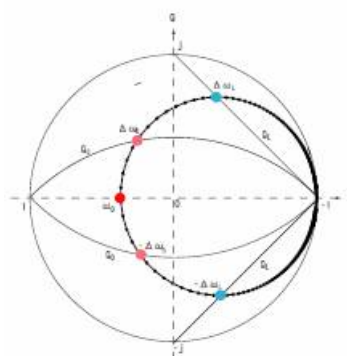


図5 DAW型空洞の高周波特性(スミスチャート)

表1 DAW型空洞の高周波特性

共振周波数	2856MHz
Q_0	7134
Q_L	2456
Q_{ext}	3744
結合度	1.91

(2) 高周波電力の投入

前節で述べたとおり、詳細な電磁場シミュレーションによる設計、製作、低電力による高周波特性の評価を行った上で、電子ビーム生成実験を行うべく、ビームラインに設置しても、即時に電子ビーム生成に必要な高出力の高周波をできない。洗浄等処理を施しても空洞表面には、微細な突起や分子の付着等が存在し、放電が起こるためである。そこで真空値や放電の様子を観察しながら、徐々に高周波を投入するエージングに取り組んだ。パルス幅は1μsecに固定し、パルスの繰返しと尖頭値を変化させながらエージングを進めた。その結果、最終的に投入できた高周波出力での様子を図6に示す。

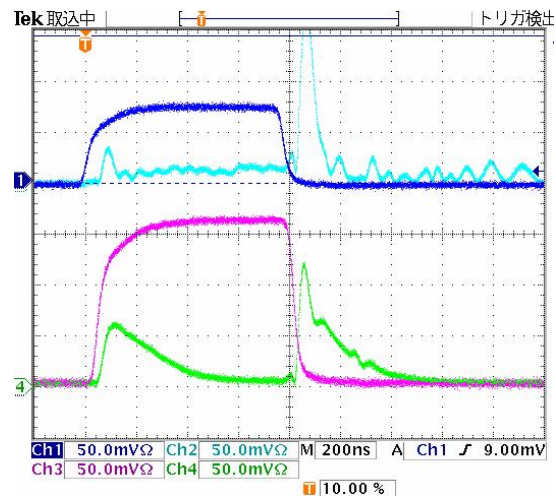


図6 高出力の高周波を投入した際の入射・反射波形。DAW型空洞の入射はch3(赤)、反射はch4(緑)。

(3) 電子ビーム生成実験

上記の条件で、電子ビームの生成実験を行い、電子ビームの生成、確認を行った。図7に電子銃下流のスクリーンモニターで測定した電子ビームのスポットを示す。なお、新たにDAW型空洞を加速空洞に用いた本電子銃

では、確実に電子ビームが生成できるよう、理科大自由電子レーザーで実績のある熱陰極 (LaB₆単結晶) を用いた。



図7 スクリーンモニター上の電子ビームのスポット

現時点では、電子ビームの特性を測定する測定系が整備されていないため、定量的な評価にまで至っていないが、今後改良等を行っていく予定である。

(4) 今後の展望

加速空洞に DAW 型空洞を用いた電子銃の開発については、過去にいくつか例があるが、本格的に、また実用的に使用されている例は、調べた限り見当たらない。本研究で製作した DAW 型空洞 RF 電子銃が生成した電子ビームの性能評価に着手し、RF 電子銃の高性能化を目指し今後も研究を推進する。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 2 件)

1 今井貴之、Disk-and-Washer 型空洞を用いた RF 電子銃の開発研究(II)、第 22 回日本放射光学会年会、2009 年 1 月 11 日、東京大学本郷キャンパス

2 今井貴之、Disk-and-Washer 型空洞を用いた RF 電子銃の開発研究、第 21 回日本放射光学会年会、2008 年 1 月 14 日、立命館大学びわこ草津キャンパス

6. 研究組織

(1) 研究代表者

今井 貴之 (IMAI TAKAYUKI)

東京理科大学・総合研究機構・プロジェクト研究員

研究者番号：70408756

(2) 研究分担者
()

研究者番号：

(3) 連携研究者
()

研究者番号：