

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H04460

研究課題名(和文)超伝導高周波空洞を用いた低分散ビームの生成と透過型電子顕微鏡への適用実証

研究課題名(英文) Demonstration of a low energy dispersion beam using a superconducting RF cavity and its application to a transmission electron microscope

研究代表者

古屋 貴章 (Furuya, Takaaki)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・その他部局等・名誉教授

研究者番号：70156975

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題は、超伝導高周波空洞の優れた特性を応用した10MV級の超高压透過型電子顕微鏡の実現可能性を検証しようというものである。高周波加速では大きなエネルギー分散が問題になるがその解決策として、2モードを重畳させることでフラットな尖塔加速電場を実現する超伝導加速空洞を製作し、そこに光陰極電子銃の短パルス電子ビームを加速することで実現する。本研究では、そのための電子銃、超伝導加速空洞およびそれを制御する2モード高周波制御システム、さらに冷却用クライオスタットの設計・試作を行った。そしてその原理を実証するために既存の300kV透過型電子顕微鏡の電子銃部を置き換えるべく準備を始めている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在の透過型高圧電子顕微鏡は静電型高圧電源を利用しており、加速電圧は2-3MVで装置は大型である。これに対し高周波加速を利用するとコンパクトな10MV級加速が得られるが電子ビームのエネルギー分散が2-3桁大きくなる。この問題が解決できればコンパクトな超高压電子顕微鏡が実現出来ることになる。本研究では高Q値をもつ単一の超伝導空洞内に周波数が丁度2倍の高調波を安定に同時励振することができた。この2つのモードの重畳効果によってフラットな尖塔電圧を実現し、そこに短パルス電子バンチを入射することでエネルギー分散の小さいビームが期待できる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to demonstrate a 10MV-class ultrahigh-voltage transmission electron microscope by applying the excellent properties of a superconducting radio-frequency (RF) cavity. The problem of large energy dispersion in RF acceleration can be solved by injecting and accelerating a short-pulse electron beam from a photo-cathode electron gun into a superconducting accelerating cavity with a flat peak accelerating field achieved by superposition of two resonant modes, TM010 and TM020. In this study, we designed and fabricated an electron gun, a superconducting acceleration cavity, a two-mode RF control system with a mechanical frequency tuner, and a cryostat for cooling. And we are now preparing to replace the electron gun in an existing 300 kV transmission electron microscope to demonstrate the principle.

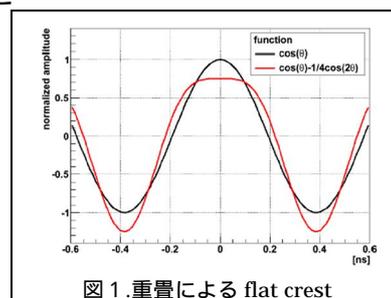
研究分野：加速器科学

キーワード：超高压電子顕微鏡 2モード超伝導空洞 透過型電子顕微鏡 光陰極電子銃

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

従来の透過型高圧電子顕微鏡の電子源ではコッククロフトを使った静電加速を用いて 3MeV 程度のエネルギーを実現しているが、放電対策などで装置規模は十分に大きくなりそれ以上のエネルギーを得るのが難しい。それに対し高周波加速を用いると極めてコンパクトな 10MeV 級の電子源を作る事ができるが、常伝導加速空洞ではパルス動作になるためエネルギー変動が大きくまた大きな高周波源が必要になる。それに対し高い Q 値を持つ超伝導空洞を用いれば精密で安定な連続動作 (CW 運転) が可能になるだけでなく必要な高周波源も数 10W 程度と極めて小さくできる。しかしその場合でも静電加速型に比してエネルギー分散が桁違いに大きくなる難点が残る。この問題に対し本課題では 1 つの空洞に加速モードとその 2 倍の高調波を同時に励振して実効的な尖塔電圧をフラットにすることによって分散を抑える方法を考えた。図 1



### 2. 研究の目的

透過型の超高圧電子顕微鏡を実現するための技術として必要な構成要素を試作し、個々の要素の機能や性能を確認すると共に前述の原理を実証する。そのための構成要素としては 2 モード超伝導空洞とその周波数制御システム、冷却用のクライオスタット、短バンチ生成のための電子銃とその制御である。これらの基礎研究を通じてコンパクトな超高電圧電子顕微鏡の可能性を調べる。

### 3. 研究の方法

本課題では構成要素の試作と機能の実証が目的であり、原理実証試験の最終段階として、既存の 300kV 電子顕微鏡の電子源部分を撤去して光陰極電子銃と 2 モード超伝導高周波空洞に乗せ替えて電子ビームを入射し、下流の収束系を使ってビーム評価を行う計画である。そのために設計では入射する電子を 60kV、超伝導空洞による加速は 240kV に設定した。電子源は ZnSe 基盤を用いた裏面照射型の GaAs であり、顕微鏡に付属の高圧電源を使って 60kV を印加する。一方、空洞に 1.3GHz の TM010 と 2.6GHz TM020 モードを同時に且つ安定に制御する高周波制御システムを構築して周波数や振幅、相互位相の制御機能などを確認する。顕微鏡に搭載する上でその空洞に許される空間はクライオスタットを含めて 800mm であるため、コンパクトなクライオスタットが必要になる。また空洞を地磁気のトラップから守る磁気シールドを装着しなければならない。これらの構成要素を完成させた上で既存顕微鏡に乗せて 2 モードの重畳効果を試験する。

### 4. 研究成果

#### 1) 2 モード超伝導空洞

超伝導空洞共振器の寸法ならびに 2 つのモードの TM010 と TM020 の電場分布を図 2 に示す。電磁場計算コードを使って TM020 の周波数は TM010 の丁度 2 倍に設計してある。しかし純ニオブ板から成型加工されているため、周波数の修正作業が必要である。また空洞内表面の化学的研磨や 4.2K への冷却による熱収縮などが周波数の修正作業をさらに困難にする。

周波数の調整には 2 種類のメカニカルチューナーを用意した。主に TM010 の周波数を動かす全長チューナーと TM020 のためのサブチューナーである。これらで空洞を弾性変形させる。全長チューナーの動力はネジによる機械式であるのに対しサブチューナーはピエゾ素子を用いて図中の矢印の点を押す。

4.2K における空洞の Q 値は計算上は TM010 が  $1.86E+08$ 、TM020 は  $1.00E+08$  であり、共振の半値幅はそれぞれ 7Hz と 26Hz になるが、本件では結合器を調整して負荷 Q 値を  $1E+07$  程度にして半値幅を広くした。

図 3 に空洞単体と低温試験のセットアップを示す。

図 4 は低温での Q 値、図 5 はサブチューナーの効果を示す。互いの動作が干渉するため動作は複雑である。

(冷却による周波数の変化): TM010 は 1.385MHz の up、TM020 は 2.302MHz の up で TM020/TM010 の比は  $1.82E-04$  だけ小さくなった。

(全長チューナー): TM010 を 1.06MHz だけ up すると TM020 は 1.505MHz 下がり周波数 ratio は  $2.408E-04$  up した。サブチューナーには  $80\mu\text{m}$  のピエゾ素子を用意したが 4.2 での冷却下では変

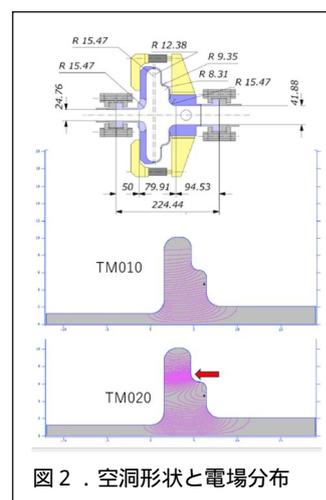


図 2. 空洞形状と電場分布

位が1桁小さくなったため、室温での周波数設定が非常に難しくなった。 piezo素子をフルストローク変えても TM020/TM010 比はわずか  $8.4E-06$  しか変化しない。そのため低温下での微細なチューナー調整が必要になった。

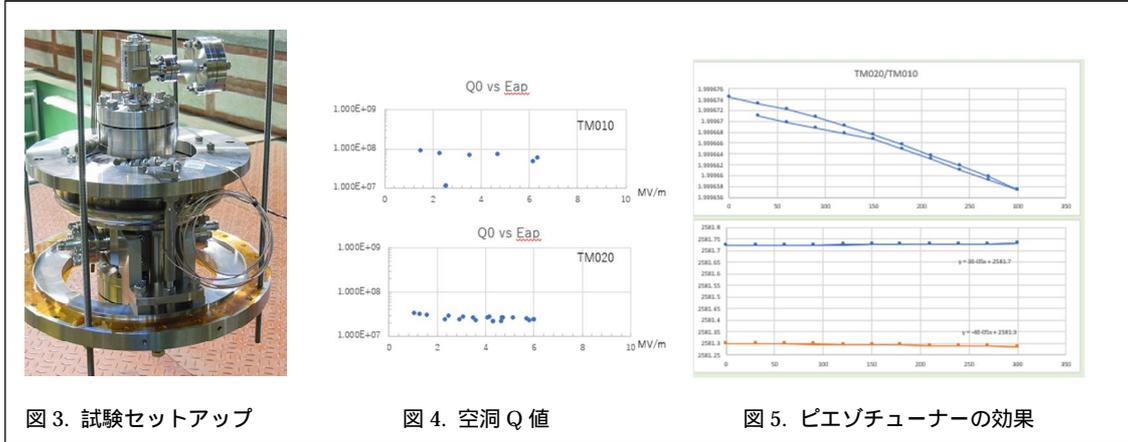


図 3. 試験セットアップ

図 4. 空洞 Q 値

図 5. piezoチューナーの効果

### 2) 高周波制御回路

用意した高周波制御系の概観を図 6 に示す。

空洞内に周波数が 2 倍の高調波を励振するために、1.3GHz の TM010 モードについては揺らぐ空洞周波数を信号発生器が追跡して共振状態を維持する一方でその周波数の 2 逡倍を作ってその周波数に TM020 を piezo素子を使って追従する方式とした。

信号発生器 (SG、アジレント E8663D) から出た 1.3GHz 信号は 2 分岐され一方はそのまま 1.3GHz の増幅器とサーキュレーターを経て空洞へ入力する。空洞からの出力はミキサーを通して SG の DC-FM 端子につないでフェーズロックループを構築した。2 分岐の他方は周波数ダブル (R & K、DB030) を通して 2.6GHz にして増幅して空洞へ導く。増幅された 2.6GHz は 1.3GHz と一緒にコンパイナで合成されて空洞へ入る。2.6GHz の出力はミキサーを通して piezo電源を駆動して TM020 の共振周波数を制御する。空洞の QL 値が  $1E+07$  程度であるため、共振の半値幅は 100Hz 程度である。試験ではこれにより 2 つのモードの並立が実現された。

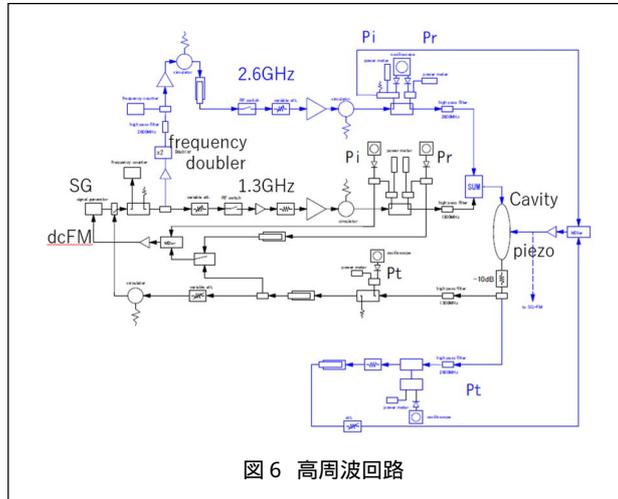


図 6 高周波回路

### 3) クライオスタットの開発

クライオスタットの構造を図 7 に示す。顕微鏡を設置する空間の制限からクライオスタットの高さは 800mm 以内にしなければならず、その制限が構造を複雑にしている。piezoチューナーのストロークが小さかったことから、チューナー全体の再設計が必要であった。

周波数を確認した空洞部の組立はクリーンルーム (ISO クラス 4) で行なった (図 8)。空洞は地磁気がトラップするのを防ぐために厚さ 1.5mm の  $\mu$  メタルの磁気シールドで囲ってある。信号としては、RF ケーブル (2) 温度計 (3) piezo電圧 (2) を装着した。運転温度は 4.2K である。

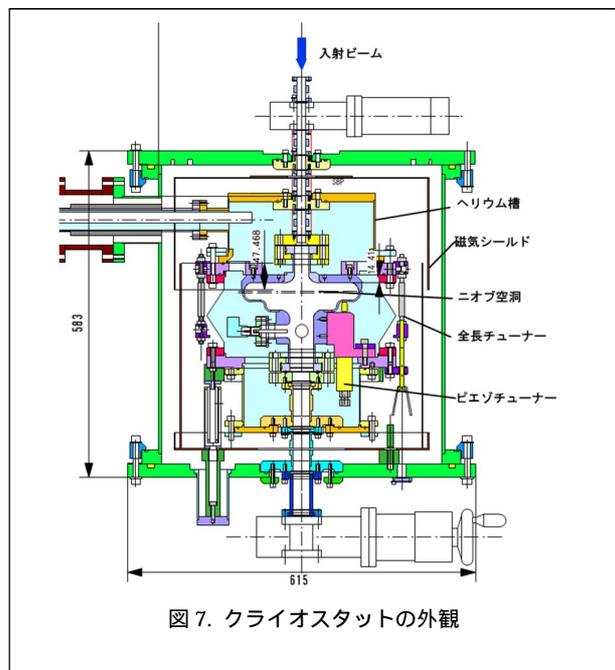
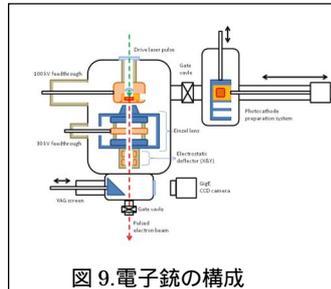


図 7. クライオスタットの外観



#### 4) 電子銃部

電子銃は裏面照射型のフォトカソードである。高輝度電子ビームを得るために有利な方法であり、励起光を焦点距離が短いレンズを通して集光しカソードの裏面から照射する。それにより照射面が  $1-2\ \mu\text{m}$  にできるため輝度は上がる。カソードは GaAs であり基盤には ZnSe を使っている。これは格子定数が GaAs に近いので高品位の GaAs 層をつくることができるからである。



励起光には通常使われる 532nm レーザーを用いる (図 9, 10)。しかしまだ出力試験はできていない。高圧印加試験を前にして 300kV コッククロフトが暴走する事態が発生した。調査の結果は電源自体のトラブルが判明し別の電源とその制御系を用意する必要が生じたからである。

#### 5) 電子顕微鏡

完成した構成要素を使つての原理実証試験をするために古い 300kV の透過型電子顕微鏡を利用する。装備されている熱電子と静電型加速からなる電子銃部を光陰極電子銃と超伝導高周波加速に置き換えた上で下流の収束系を使ってビームの診断をする計画である。その準備として電子銃を外しビーム試験のために放射線対策も行った。しかし上述の高圧電源の不備が判明したためその対応を進めている (図 11)。

#### 6) まとめ

構成要素の準備はほぼ完了したがクライオスタットの冷却と電子銃の高圧試験に至らなかった。高圧電源の準備が完了するのを待って実験を再開する予定である。既存の 300kV 電子顕微鏡を利用しての実証は電子のエネルギーが低く ( $\beta=v/c$ ) は 0.446 から 0.777 であり、空洞内で大きな速度変化が起きるが、2 モード重畳条件への強い依存が見えるはずであり、今後はその効果を調査確認するつもりである。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	山本 将博  (Yamamoto Masahiro)  (00377962)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・准教授   (82118)	
研究分担者	金 秀光  (Jin Xiuguang)  (20594055)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・助教   (82118)	
研究分担者	小林 幸則  (Kobayashi Yukinori)  (40225553)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・教授   (82118)	
研究分担者	東 直  (Higashi Nao)  (70793959)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・助教   (82118)	
研究分担者	Q i u F e n g  (Qiu Feng)  (80740860)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・助教   (82118)	削除：2020年9月30日

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------