

平成30年6月28日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03596

研究課題名(和文)超伝導高周波加速を用いた小型超高压電子顕微鏡の原理実証

研究課題名(英文)Feasibility study of compact high-voltage TEM using a superconducting RF cavity

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・加速器研究施設・研究員

研究者番号：70156975

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,700,000円

研究成果の概要(和文)：超伝導高周波空洞を利用してコンパクトな超高压透過型電子顕微鏡(TEM)を実現するための基礎実験である。1空洞に2モード(TM010とTM020)を同時励振するメリットをシミュレーションで証明し、そのときの2つのモードの振幅と位相の最適条件を求めた。電子銃陰極にはZnSe基盤にGaAs層を付けて裏面照射が可能な高量子効率を有するものを準備した。電子銃部にはビーム診断装置をセットし現在は放射線対策を進めている。加速のためのニオブ空洞を製作し、周波数が正確に2倍の高調波を実現した。その計測を進めながら収納するクライオスタットの設計を進めた。

研究成果の概要(英文)：As a feasibility study of a compact high-voltage TEM using a superconducting RF cavity, computer simulation was given to a specially designed cavity in which two modes were simultaneously excited, TM010 and TM020. The results showed the suppressed energy dispersion and the optimum parameters of both modes to obtain the best performance. A photo cathode of GaAs was prepared and a beam diagnostic system was also assembled. The test cavities were fabricated and cooled not only to measure the cavity performance but to establish the RF and frequency tuning system to obtain the TM020 frequency of just double of that of TM010. At a same time, the basic design of a cryostat was carried out.

研究分野：総合理工

キーワード：超高压電子顕微鏡 光陰極電子銃 高周波加速 超伝導空洞

1. 研究開始当初の背景

透過型電子顕微鏡 (TEM) は、物質内部のサブナノ構造を直接イメージ化することができる装置として、生物学や材料学など、様々な分野で重要な役割を担っている。一般に普及している 100 kV 級の TEM 観察では、観察対象を 100 nm 程度まで薄くスライスするなどの加工が必要であるが、これにより試料が持つ本来の構造は損なわれる。元の姿に近い TEM 像を取得するためには、より厚い試料で観察する必要があるが、数 100 kV 程度では電子ビームの散乱が顕著になり、十分なコントラストが得られない。従って、透過力の強い高エネルギーの電子ビームが必要になる。

大阪大学に設置されている超高圧電子顕微鏡では、3 MV で厚さ 10 μm 程度までの試料を観察できるが、静電加速による MV 級超高圧 TEM は大規模構造になるため、日本国内でも数ヶ所にしかない。さらに、静電加速方式では放電限界が存在するため、3 MV よりも高い加速電圧を達成することは不可能である。

本研究グループは高周波加速方式を採用した TEM (SRF-TEM) の開発研究を行っている。これにより従来では達成不可能だった高い加速電圧をよりコンパクトに実現することができる。実現すれば高周波加速の繰り返し周波数と同期した電子パルスで観察することで、ピコ秒時間分解能をも獲得できることになる。

2. 研究の目的

20 MV/級の加速電界を有する超伝導高周波空洞を透過型電子顕微鏡 (TEM) に適用すると、従来の静電型とは比較にならない程コンパクトな超高圧電子顕微鏡が実現できる。この電界を得るための高周波電力は 10 W 程度で済むため高周波装置も極めて小さくなるだけでなく、連続波運転をすることによって高精度の高周波制御が可能になり電界の安定度も増す。一方、高周波加速の弱点であるエネルギー分散の問題については、光陰極で作る極短パルス電子ビームを、単一空洞内に加速モードとその 2 倍高調波モードを重畳して作る尖塔が平坦な加速電界を用いて加速することで解決できる。

本研究グループは、上記機能を有する電子銃および超伝導高周波加速空洞を試作し、その基本性能を調査するとともに、現有の従来型 300 kV-TEM の電子銃及び加速部をそれに換装することによって本機能の原理を実証しようとするものである。

3. 研究の方法

まず始めに、2 つのモードを重畳して平坦な尖塔電圧を作るための周波数と振幅の条件を計算する。入射エネルギーは現存する TEM に合わせるため 60 keV に設定した。その結果電子が空洞内で速度を変えるため、2 つの

モードの振幅と位相差が電子ビームのエネルギー分散に大きく影響する。その許容誤差と期待される分散を計算した。

次に、2 つのモード周波数を完全に 2 倍にするための空洞設計を進めた。2 つのモードの周波数を別々に調整するための空洞形状の最適化計算を行った。その上でニオブ製超伝導空洞を試作し、低温下での周波数調整の実施方法を調査した。ここでは 2 つのモードを制御するための高周波制御の手段が必要になる。

これらと同時に短パルス電子銃を実現するために、光陰極と電子銃およびレーザーの準備を行った。

最後に、以上の構造と機能を満足する空洞を収容するためのクライオスタットの設計を行う。

4. 研究成果

1) beam dynamics simulation による two-mode acceleration の有効性の検証
従来の高周波加速方式では振動電場による加速のため、energy spread が静電加速方式よりも増大してしまう。そこで我々は特別な形状を持つ two-mode cavity を開発した。これは 1.3 GHz の共振周波数を持つ TM010 と呼ばれる基本モードに対し、その 2 倍の共振周波数 (2.6 GHz) を持つ TM020 を基本モードに重畳し、energy spread の増大を抑制することができる。我々は General Particle Tracer を用いて beam dynamics simulation を実施した。その結果を表 1 にまとめた。従来の one-mode 加速では、energy spread は 1.75×10^{-4} まで増大するが、two-mode 加速では 7.91×10^{-6} まで抑制できることがわかった。表 1 の各加速方式でエネルギー広がりを最小化するような加速電場と位相について、表 2 にまとめた。

表 1 300 keV のシミュレーション結果

	T	dT	dT/T
1-mode	330 keV	57.6 eV	1.75E-04
2-mode	272 keV	2.19 eV	7.91E-06

表 2 300 keV 加速の高周波最適条件

	TM010 振幅	TM010 位相	TM020 振幅	TM020 位相
1-mode	6.98MV/m	0.456rad	-	-
2-mode	7.46MV/m	0.454rad	7.20MV/m	0.500rad

図 1 にそれぞれ energy spread を最小にするときの加速エネルギーの変化について示した。Two-mode acceleration の場合、two-mode cavity 内で一度減速され、その後また加速されていることがわかる。

また、位相・振幅の設定値に対する誤差裕度についても simulation を実施した。表 3 には 300 kV の two-mode 加速において、 1.0×10^{-4} と 4.0×10^{-5} の energy dispersion を達成するために必要な各モードの位相・振幅の制御安定度に対する要求をまとめた。これ

らについては KEK, cERL で採用しているデジタル・フィードバック・システムを応用することで、表4のような安定度を達成できることを実証した。

表3 2-mode 300keV 加速の必要安定度

Target	TM010 振幅	TM020 振幅	TM010 位相	TM020 位相
1 E-04	0.010%	0.037%	0.320deg	0.120deg
4 E-05	0.004%	0.014%	0.150deg	0.055deg

表4 RF の安定度の実測値

Mode	振幅安定度	位相安定度
TM010	12 ± 3 ppm	0.04 ± 0.01mdeg
TM020	5 ± 4 ppm	0.03 ± 0.01mdeg

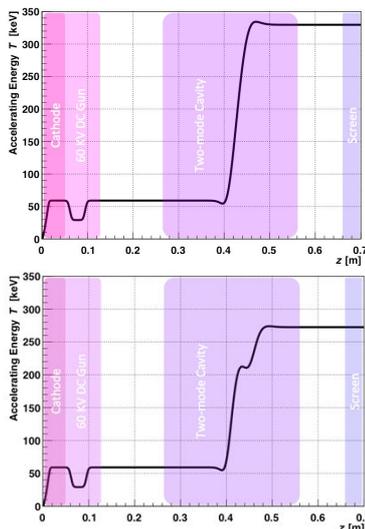


Fig. 1: The variation of the accelerating energy T for the optimal 300 kV one-mode acceleration (up) and two-mode (bottom).

2) ZnSe 基板を用いた新しい裏面照射型フォトカソードの開発

裏面照射型フォトカソードは電子ビームの超高輝度を実現するために不可欠である。輝度の向上は励起光の集光により、電子ビームの生成面積を小さくすることで実現できる。図2に示すように、従来の表面照射型に比べ、新しい裏面照射型では、焦点距離の短いレンズを使って、励起光をフォトカソードの表面に直径 1~2 μm まで収束することができ、輝度の大幅な向上が可能である。我々のグループは、GaP 基板を用いて、励起光裏面照射型フォトカソードを作製し、 $2 \times 10^7 \text{ Acm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ の超高輝度を達成している。この値は表面照射型フォトカソードの 10000 倍である。

一方、GaP 基板は電子ビームを生成する活性層である GaAs と格子不整合度が大きいため、高品質の結晶成長が不可能である。また、GaP のバンドギャップ 2.26 eV で、加速器でよく使われている 532 nm (エネルギー: 2.33 eV) のハイパワー、短パルスのレーザー光の透過が不可能である。これらの問題を解決するために、新しい ZnSe 基板を提案、導入した。ZnSe は II-VI 型半導体であり、格子定数が GaAs と非常に近い。また、バンドギャップ

が 2.7 eV と大きいため、532nm のレーザー光を用いても裏面照射が可能になる。

フォトカソード試料は MOVPE 法より作製した。ZnSe 基板の酸化膜除去処理に工夫することで、ZnSe 基板上に高品質の GaAs 層の作製に見事に成功した。作製した試料は 532 nm の励起光で 5.5% の高い量子効率を得られた。この成果は大事な一歩で、今後電子顕微鏡や加速器への応用が期待される。

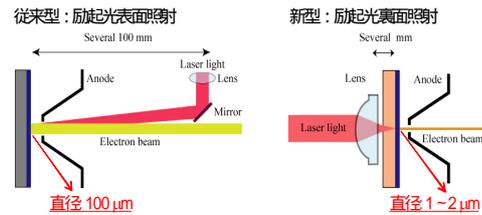


図2 従来型と新型フォトカソードでのレーザー照射方法

3) 電子銃開発

電子銃で発生した電子ビームの輝度(エミッタンス)を評価するため、ビーム輸送系および評価系を構築した。ビーム輝度の評価は図3のレイアウトに示すように電子銃に内蔵している静電レンズの焦点距離を変化させ、静電レンズからのドリフト距離 $L[\text{m}]$ 下流にあるスクリーン上のビームサイズを計測することによって評価できる。シミュレーションでは、電子銃電圧 40kV において、静電レンズを 5~25kV の範囲をスキャンすることによって図4に示すような2次関数が得られ、フィッティング係数からエネルギーで規格化されたエミッタンスを見積もることができる。我々が開発した電子銃の形状、静電レンズの形状を元にシミュレーションコードによるビームの軌道計算を行いスクリーン上のビームサイズの変化から、見積もられた規格化エミッタンスは約 $3 \times 10^{-8} \text{ [m rad]}$ となり、計算コード上で実測できない位相空間から直接求められるエミッタンスとほぼ一致し、図5のセットアップで実験的にも測定が可能なることを確認した。

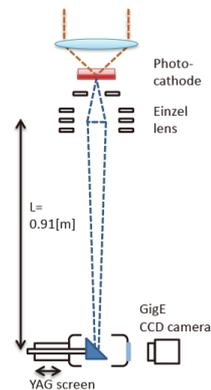


図3: ビーム輝度評価系のレイアウト

図3に対するセットアップは完了したものの、ビーム試験を安全に実施するためには放射線遮蔽およびビームを安全に停止させるためのインターロックシステムが必要不可欠であるため、その準備を進めている段階で本研究課題の期間が終了となった。

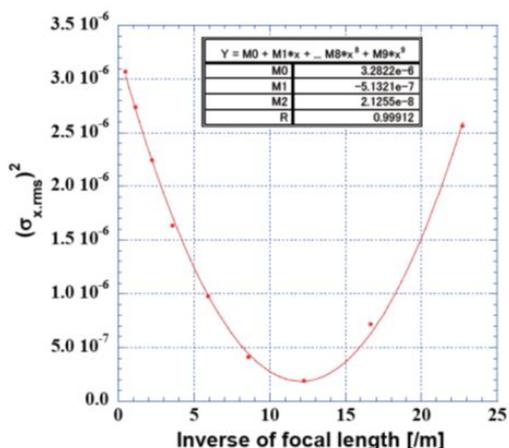


図4：ウェストスキャン法による輝度評価（シミュレーション）

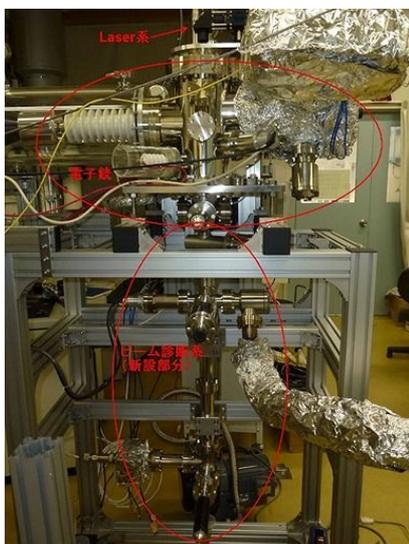


図5：構築したビーム輝度評価系

4) 空洞開発

4-1) 空洞設計

空洞には1.3 GHzのTM010加速モードおよび2.6GHzのTM020を重畳させた。ともに加速軸に電場を持ち、これらを適切な位相で足し合わせるにより尖塔が実効的に平坦な合成加速電場をつくることことができる。周波数の調整については、TM010は全長の変化に敏感であり、他方TM020の周波数はセル端板部の変形に対してTM010よりも敏感に反応することから、全長変化を与えるチューナーと端板部を変形させるチューナーとを併用する方式とした。最終的に決定した形状を図6に示す。

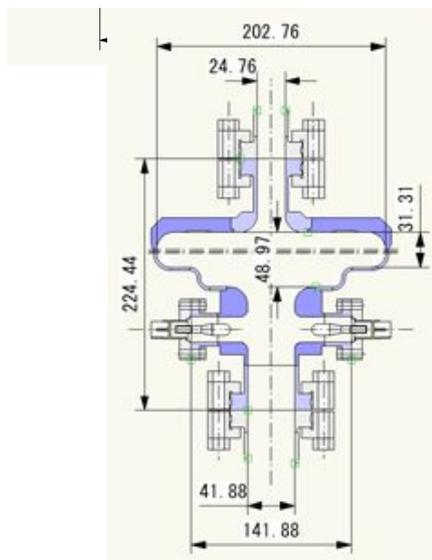


図6 2モード空洞の形状

4-2) 空洞製作

ニオブ製空洞は図7のように7つの部品を電子ビームで溶接して製作した。



図7 ニオブ製空洞部品

電子ビーム溶接の歪みにより周波数がずれたため、歪みを最小にする溶接、歪みを修正するための溶接など、種々の溶接条件を明らかにする必要があった。なお、最終的な赤道部溶接の前の半割り状態の空洞に80μmの電解研磨を施した。赤道部溶接後は真空炉で800度の焼鈍処理をした上で20μmの化学研磨を仕上げ処理として施した。図8は空洞単体の性能確認のためのヘリウム冷却計測のセットアップである。2つのRFプローブを持ち、全長を変えるネジ式のTM010チューナーとセル端板部を押してTM020を調整するためのpiezo素子チューナーを備えている。



図8 空洞単体性能評価セットアップ

4 - 3) 性能評価試験

図9は性能計測に用意したアナログとデジタルのRFシステムである。これらはsuperKEKB,やcERLで使われており、その運転状況を参考にした。アナログではFM変調による周波数フィードバックでTM010をロックした上で、周波数ダブラを用いて2倍の周波数を作り、それにTM020の周波数をpiezoチューナーを使ってロックするという2重の周波数制御をする。デジタルシステムでは2つのモードをそれぞれ個別にロックするというものであり、両者を安定度を比較することができるようにした。さらにアナログではTM010モードを自励発振させ、その共振周波数をダブラを使って2倍にしてpiezoでTM020を制御する方式の試験も行った。図10は#3空洞を使って極低温で得られたpiezoチューナーを駆動したときの2つの周波数の可動範囲を示す。220vのとき比は2になる。



図9 デジタルとアナログ高周波系

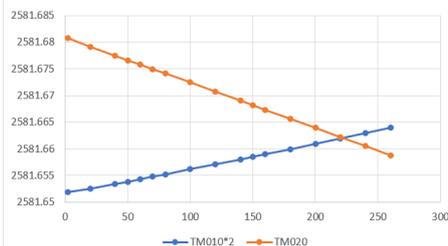


図10 piezo電圧に対するTM010とTM020の周波数変化。(TM010を2倍にして表示)

図11は4.2Kで計測した#2空洞のQ値である。

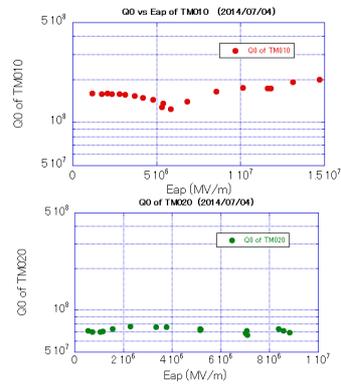


図11 空洞Q値。TM010(上)とTM020(下)

5. クライオスタット設計

4.2Kでの運転を想定して設計を進めた。最終的には2Kに減圧して運転することにより、空洞Q値を上げ高周波損失をワット級まで下げていることを考えている。既存のTEMに装着するため空間の制限は厳しく、クライオスタットの全高は800mmである。また断熱設計だけでなく、磁気シールドや組立工程、ビーム軸を見失わない機能などの要求もあり、構造は複雑になる。ビームは垂直下向きに加速されTEMの収束系へ入射する。空洞の性能や要求事項を確かめながら設計を進めており、現在は図12になっている。これにヘリウムデューワーが接続される。

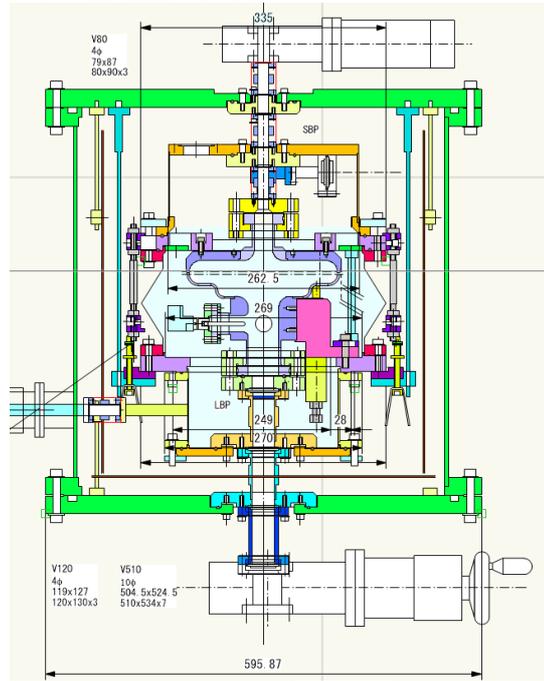


図12 クライオスタットの設計案

6. まとめ

これまでに個々の要素技術開発を積み上げてきており、それぞれは性能確認試験の段階に達している。今後は全体を組み上げ、ヘリウムと窒素の冷却系を整備した後、実際のビームを加速してそのビーム診断を行うことが残った。

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)

[雑誌論文](計 1 件)

Xiuguang Jin, 他
“New photocathode using ZnSe substrates with GaAs active layer”
JJAP、査読有、56 巻、2017
DOI:http://doi.org/10.7567/JJAP.56.036701

[学会発表](計 6 件)

金秀光
“Development of high performance spin-polarized photocathode and its applications”
The 11th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices, ALC '17, 2017

古屋貴章 他
“Long-term Operation Experience with Beams in compact ERL Cryomodules”
The 18th International conference of RF superconductivity, 2017

西脇みちる、古屋貴章 他
“Operation status of superconducting accelerating cavity and development of SiC damper for SuperKEKB”
The 14th Annual Meeting of Particle accelerator society of Japan, 2017

東直、古屋貴章、榎本收志、道園真一郎、他
“The development of cavity frequency tracking type RF control system for SRF-TEM”
IPAC2015, 2015

東直、古屋貴章、山本将博、榎本收志、道園真一郎、金秀光 他
“超伝導加速技術を応用した透過型電子顕微鏡の開発・研究の概要と現状”
日本顕微鏡学会際 71 回講演会, 2015

東直、古屋貴章、山本将博、榎本收志、道園真一郎、金秀光 他
”超伝導高周波加速方式 TEM の開発”
日本物理学会 2015 年秋期大会, 2015

[図書](計 1 件)

東直
“Development of a transmission electron microscope adopting two-mode superconducting RF accelerating cavity for achieving low energy dispersion”
東京大学大学院博士論文, 2017

6. 研究組織

(1)研究代表者

古屋 貴章 (FURUYA Takaaki)

高エネルギー加速器研究機構
加速器研究施設 研究員
研究者番号：70156975

(2)研究分担者

山本 将博 (YAMAMOTO Masahiro)
高エネルギー加速器研究機構
加速器研究施設 助教
研究者番号：00377962

金 秀光 (Jin Xiuguang)
高エネルギー加速器研究機構
加速器研究施設 助教
研究者番号：20594055

道園 真一郎 (MICHIZONO Shinichiro)
高エネルギー加速器研究機構
加速器研究施設 教授
研究者番号：80249903

榎本 收志 (ENOMOTO Atsushi)
高エネルギー加速器研究機構
加速器研究施設 研究員
研究者番号：90150010

東 直 (HIGASHI Nao)
高エネルギー加速器研究機構
加速器研究施設 特別助教
研究者番号：70793359