

The Development of New Electron Microscope Using Superconductive RF Acceleration

N. Higashi^{A)}, T. Furuya^{B)}, M. Yamamoto^{B)}, Y. Funahashi^{B)}
K. Ueno^{B)}, A. Enomoto^{B)}, Y. Kamiya^{B)}, M. Kuriki^{C)}, S. Yamashita^{D)}

^{A)}Graduate School of Science, The University of Tokyo
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0033

^{B)}High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-0801

^{C)}ADSM, Hiroshima University
1-3-1 Kagamiyama, Higashihiroshima, Hiroshima, 739-8530

^{D)}International Center for Elementary Particle Physics
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0033

Abstract

We aim at developing a new type of transmission electron microscope (TEM) using the key technology of superconducting RF acceleration that has been established at KEK and elsewhere. This microscope can have higher voltage than ever and operate in pulse mode, so that it may give us an opportunity for exploiting new application of electron microscopy. For RF acceleration to be applicable to electron microscopes, however, the energy dispersion $\Delta E/E$ must be very small, for example, less than 10^{-5} , while it is usually larger than 10^{-4} in accelerators. To obtain such a small $\Delta E/E$, we have designed the world's first cavity in which two resonant modes are simultaneously excited. The development will be done in two steps. First we will develop a small prototype, a proof-of-principle microscope, using an existing 300keV TEM at KEK. Thus, we are able to concentrate mainly on developing photo-cathode gun and superconducting cavity. The next step is to develop a 5 MV-class microscope, the world highest voltage TEM, which may require a new type of lens system. A computer simulation has shown that the prototype microscope is able to achieve energy dispersion small enough to operate in TEM mode. Further, the cavity components have already been fabricated. The electron beam welding (EBW) of cavity is now under way at KEK.

超伝導高周波加速方式を用いた電子顕微鏡の開発

1. はじめに

現在 KEK では、超伝導高周波加速を用いた高圧電子顕微鏡の開発が行われている。これは、既存の電子顕微鏡で採用されている静電加速の代わりに、KEK 等で確立された技術、超伝導高周波加速を用いることにより、既存の電子顕微鏡では到達不可能な超高電圧を実現し、合わせて高分解能を目指そうというものである。

現在、産業技術総合研究所から譲渡された 300kV 透過型電子顕微鏡 (TEM) が KEK 内に設置されている (図 1)。この光学系を活用し、主に電子銃部と加速部の開発に集中することで、コストを抑えて原理実証を行う。この原理実証では、既存の TEM と同じエネルギーの 300kV の加速電圧を実現することを目指す。その後世界最高電圧の 5MV 級 TEM を、光学系を含めて開発する予定である。この原理実証は 2013 年度内に完了する予定である。

前回の報告 [1] では、加速空洞の基本設計に基づいたビーム・ダイナミクスのシミュレーションの結果から、我々の空洞が電子顕微鏡として必要な仕様を十分満たすことを示した。今回はさらに電子銃部も含めたシミュレーションを行い、電子銃が生成するビームが電子顕微鏡に適しているかを調べるとともに、様々なパラメータ・スキャンを行い、カソードにおけるビームサイズの



図 1: KEK 内の ERL 開発棟に設置された 300kV 透過型電子顕微鏡 (TEM 型、H-9000)

影響や、RF の振幅・位相の制御誤差の裕度についても調べた。一方で、既に空洞製作が進行中であり、現在電子ビーム溶接に必要な諸条件を決定したところである。

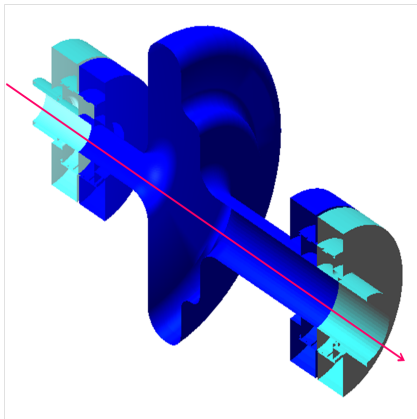


図 2: 低エネルギー分散を実現する超伝導空洞。1.3GHz(TM₀₁₀) とその 2 倍高調波である 2.6GHz(TM₀₂₀) の 2 つのモードが共振する。

2. 計画の概要

2.1 目的

我々の開発目的は、KEK 等で既に確立されている技術である超伝導高周波加速方式を採用して、既存の加速電圧を超える超高压電子顕微鏡を開発することである。この開発は原理実証と 5MV 級 TEM 開発の、2 つの開発フェイズに分ける。

RF 加速を用いる利点は、既存の電子顕微鏡が採用している静電加速とは異なり、コンパクトな施設で容易に高電圧を達成することができる点である。さらに超高压の実現は従来よりも厚い試料の観察を可能にする。一方、電子のド・ブロイ波長をより短くすることが可能となり、超高分解能の実現が期待される。また、パルスによる観察は高時間分解能をも可能にする。今回は超伝導空洞を採用しており、パワーロスが少なく済むため CW 運転が可能となる。従って、従来の電子顕微鏡による DC 運転と比較できる電流強度を確保することができ、RF 制御もより安定して行うことができる。

この開発の主要な課題は、電子顕微鏡に適用するためにエネルギー分散が $\Delta E/E \sim 10^{-5}$ 程度以下であるビームが求められる点である。しかし現行の加速器技術では小さくても $\Delta E/E \sim 10^{-4}$ 程度であるため、我々はこれを実現するために、既存の形状とは全く異なる超伝導加速空洞を設計した。

2.2 低エネルギー分散を実現する加速空洞

我々は低エネルギー分散を実現させるために、1.3GHz の共振周波数を持つモード (TM₀₁₀) とその 2 倍の 2.6GHz の共振周波数を持つモード (TM₀₂₀) が共存する空洞を設計した (図 2)。2 つのモードが共存することにより、バンチにエネルギーを与える電場をフラットにすることができ、その結果 $\Delta E/E$ を従来の 1 モードのみによる運転に比べてより小さく抑えることが可能となる。

2.3 電子銃

譲渡された TEM は DC の熱電子銃を用いており、RF 加速空洞と共に使用することはできない。そこで現在

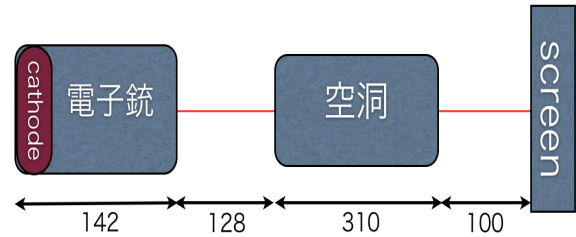


図 3: シミュレーションでの配置。図中の単位は mm。"screen"はシミュレーション結果を比較する位置である。

ERL 計画で開発中のものを電子顕微鏡用に転用することとした。これは GaAs-GaP カソードを採用する背面照射型フォトカソード電子銃であり、極低エミッタンスでサイズの小さい電子ビームを生成することができる [2] [3]。

2.4 RF 制御

低エネルギー分散の実現には、空洞のフィードバックが重要である。従来のフィードバックは設計値の周波数の RF を空洞に投入し、それに合わせて空洞の共振周波数を調整する方法をとってきた。しかし今回は 2 つのモードが共存するので、1 つのモードに対する共振周波数調整がもう一方に影響を与えてしまう。従って今回は TM₀₁₀ の共振周波数に合わせた RF とその 2 倍高調波を空洞に投入し、空洞の TM₀₂₀ 共振周波数を制御するデジタル方式を採用する予定である。

3. 開発の現状

現在、開発はビーム・ダイナミクスのシミュレーションと空洞の製作の 2 つが並行して行われている。

3.1 ビーム・ダイナミクスのシミュレーション

今回は基本設計が完了していた加速空洞が電子顕微鏡の要求を満たすかどうかを調べた。ビームの初期条件については、ビームサイズ 400 μ m、バンチ長 20ps、1 バンチの総電荷を 10fc と仮定した。シミュレーションには General Particle Tracer(GPT)を用い、空間電荷効果についても考慮した。空洞に関しては 4 つのパラメータ (2 つのモードに対するそれぞれの振幅と位相) があり、エネルギー分散を最小にするように最適化を行った。GPT は最適化として滑降シプレックス法を採用している。この結果、 $\Delta E/E = 5.0 \times 10^{-5}$ 、最大輝度 5.1×10^5 A/cm².str となり、我々の空洞が電子顕微鏡の要求を満たしていることを示した。

今回はさらに電子銃から求められるビームの初期条件を考慮してシミュレーションを行い、我々の電子銃が電子顕微鏡に適するかを調べた。また、チェンバーなどを考慮し、空洞と電子銃の配置は図 3 のように置いた。

ビームの初期条件は、ビームサイズ 50 μ m、バンチ長 20ps、総電荷を 0.1fc と仮定した。総電荷は前回の 1/100 だが、これは空間電荷効果を小さくし、 $\Delta E/E$ とエミッタンスを小さくするためである。この条件で改

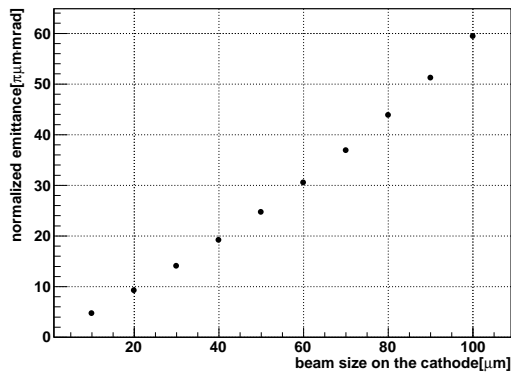


図 4: カソード半径に対するエネルギー分散の変化

めてパラメータの最適化を行った。この結果、空間電荷効果がない場合は $\Delta E/E = 3.5 \times 10^{-5}$ 、ある場合は $\Delta E/E = 3.7 \times 10^{-5}$ となり、我々が計画している電子銃が空洞と合わせて TEM の要求を満たすことがわかった。なお、ここでエネルギーは運動エネルギーのことであり、

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta \gamma}{\gamma - 1} \quad (1)$$

と定義している。一方、最大輝度は $6.4 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ str と前回に比べ全電荷が 1/100 であるのに対し、最大輝度は 1/8 程度の減少に留まっている。これはビームサイズが小さくなったことによるエミッタンスの縮小に起因する。このことはビームの質をあまり落とすことなく、カソードの寿命が延び、さらに試料へのダメージを減らすという利点となる。

次にカソード上でのビームサイズに対する規格化エミッタンスの変化を調べた (図 4)。図 4 よりビームサイズとエミッタンスがほぼ比例関係であることより、 $10 \mu\text{m}$ から $100 \mu\text{m}$ の範囲ではあまり空間電荷効果が効かないことがわかる。エネルギー分散の変化についても、 $10 \mu\text{m}$ から $100 \mu\text{m}$ の範囲では 3% 程度しか変化しなかった。

さらに今回は、RF の振幅・位相の制御誤差のエネルギー分散に対する影響を調べた。TM₀₂₀ モードの振幅と位相の変位に対するエネルギー分散の変化をそれぞれ図 5、図 6 に示す。図 5 より振幅が最適値に比べて 1.5% 程度でエネルギー分散が 1.0×10^{-4} を超える。一方、図 6 より位相に関しては最適値から 0.5 度程度変位したところで 1.0×10^{-4} 程度となる。なお、現在 KEK における ILC の RF 制御において達成されている振幅と位相のフィードバックは、それぞれ 49ppm、15mdeg. である [3]。従ってこれを適用すれば我々は十分に低いエネルギー分散を得ることができると考えている。

3.2 空洞の製作

シミュレーションと並行して超伝導加速空洞の製作が進められている。今回設計した空洞は 2 つの共振周波数を持つ。そのため、周波数チューニングは従来の 1 モードの場合に比べると難しくなる。従って我々の空洞は、メカニカルノイズなどに対する強度確保のためのインゴット削り出しの厚いものと、周波数チューニング

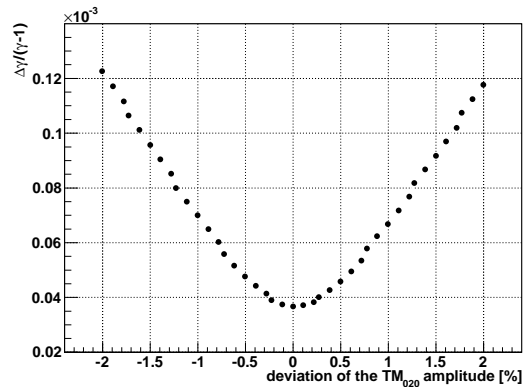


図 5: TM₀₂₀ モードの振幅の変位に対するエネルギー分散の変化

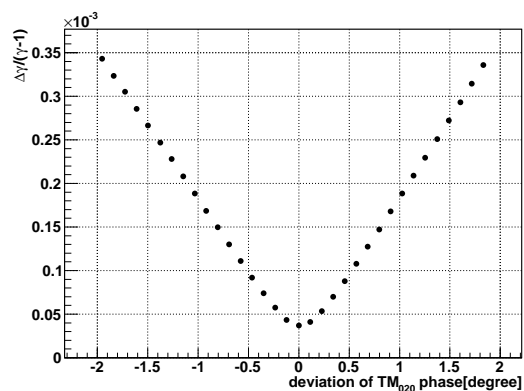


図 6: TM₀₂₀ モードの位相の変位に対するエネルギー分散の変化

のための従来用いていた焼鈍しプレス加工されたものと 2 種類のニオブ材を用いる (図 7)。また、表面加工として電解研磨 (EP) を行う予定であるが、今回はコストを抑えるためにハーフセルの状態で行い、その後セルの赤道面の電子ビーム溶接 (EBW) を行う。従って、今回の EBW の条件出しは以下のケースについてそれぞれ求める必要があった。

1. インゴットとインゴットの溶接 (EP 前)
2. インゴットとプレスの溶接 (EP 前)
3. インゴットとプレスの溶接 (EP 後)

1. に関しては 3.1mm 厚の材料を、ビード幅が 5mm 以内になるような溶接を行う必要が設計上あった。この細かいビード幅を得るために溶接機の電圧を普段使っている 120kV から 140kV にした。この結果、溶接ビームがより深くまで入り、ビード幅 3.8mm で 3.1mm 厚という分厚いニオブを溶接することができた。また、インゴットが持つような大きい粒界での溶接や粒界の境界で問題が無いことを確認した (図 8)。

2. に関しては、粒界の大きさの異なる材料を溶接するという問題がある。これについて条件出しをしたところプレス同士の溶接の場合と変わらなかった。



(a) インゴットからの削り出し



(b) 2.8mm 厚のプレス加工

図7: 空洞はメカニカル・ノイズに対する強度確保のため、2種類の材料によって製作される。



図8: インゴットから切り出したニオブ材に対してEBWを行った。粒界の境界をまたがってもビードに大きな変化は見られなかった。

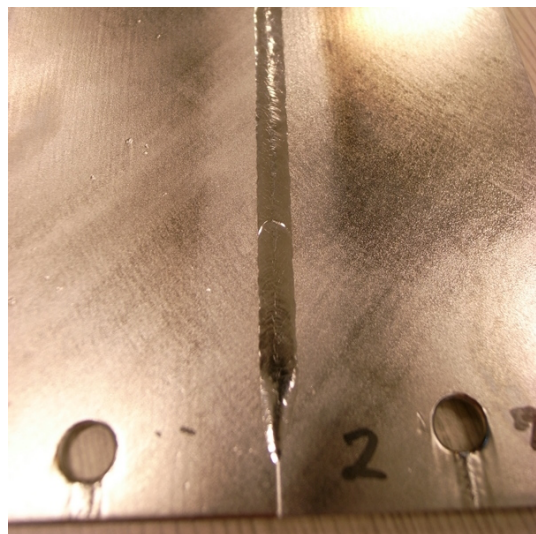


図9: CPにより角がとれた2枚のニオブ材を溶接する。

3. について、今回はハーフセルの状態でEPするという特殊なケースである。そのために溶接面の角が削れ、溶接自体に影響が及ぶのではないかと考えられた。このため、サンプルを化学研磨(CP)によって表面研磨し、そのサンプルを溶接するテストを行った。研磨量はCP前後のサンプルの質量変化から $100\mu\text{m}$ 程度と見積もった。条件出しの結果、溶接機の電流値は表面処理無しでの最適値である 18mA から 16mA まで下げた時にきれいなビードが安定して得られることがわかった(図9)。

現在、これらの条件出しの結果を生かして実際の空洞製作に移っている。

4. まとめ

現在、KEKにおいて超伝導高周波加速を用いた高圧電子顕微鏡の開発が行われており、現在その原理実証を行なっている。GPTを用いたシミュレーションから我々の設計した電子銃と空洞が実際に電子顕微鏡の要求を満たすことを確認でき、空洞については製作段階に入っている。この原理実証が完了し次第、5MV級TEMの

開発へ移行する予定である。

参考文献

- [1] M. Kuriki, et al., "EXTREMELY LOW ENERGY SPREAD BEAM GENERATION BY DUAL MODE SUPERCONDUCTING ACCELERATOR", Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (August 1-3, 2011, Tsukuba, Japan)
- [2] N. Yamamoto, et al., "Thermal emittance measurements for electron beams produced from bulk and superlattice negative electron affinity photocathodes", J. Appl. Phys 102, 024904(2007)
- [3] N. Yamamoto, et al., "High brightness and high polarization electron source using transmission photocathode with GaAs-GaAsP superlattice layers", J. Appl. Phys 103, 064905(2008)
- [4] S. Michizono, et al., "PERFORMANCE OF LLRF SYSTEM AT S1-GLOBAL IN KEK", Proceedings of IPAC2011, San Sebastián, MOPC157(2011)