

量子電子顕微鏡の原理検証用超小型 STEM の研究

Ultra-compact STEM for testing the principle of quantum electron microscopy

○樋口 琢己*, 宮村 峻介*, 奥田 優樹*, 岡本 洋*
○Takumi Higuchi*, Shunsuke Miyamura*, Yuki Okuda*, Hiroshi Okamoto*

*秋田県立大学
*Akita Prefectural University

キーワード：電子顕微鏡(electron microscope), 超伝導量子ビット(superconducting qubit), 生物試料観察(biological sample observation)

連絡先：〒015-0055 秋田県由利本荘市土谷字海老ノ口 84-4
秋田県立大学 知能メカトロニクス学科 電気エネルギー応用工学研究室 岡本洋
Tel : 0184-27-2088, Fax : 0184-27-2187, E-mail : okamoto@akita-pu.ac.jp

1. はじめに

電子顕微鏡は大きく分けて 2 種類存在する。1 つ目は電子線で試料の表面を走査し、二次電子を測定することで観察する、走査型電子顕微鏡(SEM)。2 つ目は試料に電子線を照射し、透過した電子を測定することで観察する、透過型電子顕微鏡(TEM)である [1]。TEM の一種である走査透過型電子顕微鏡(STEM)と呼ばれる装置は、電子線で試料の表面を走査し、透過した電子を測定する仕組みになっている。

電子顕微鏡が抱える問題点として、生物試料を観察する際に生じる、電子線による組織の破壊が挙げられる。一方、損傷を防ぐために電子線を弱くすると、ショットノイズにより、得られる像の解像度が低くなってしまふ。この問題を解決する手法として、量子技術を利用することで、既存の電子顕微鏡よりも少ない電子の照射で試料の像を得ることができる、量子電子顕微鏡(QEM)[2,3]の研究が進められている。

本研究では、量子電子顕微鏡の原理検証

を行うための超小型 STEM の作成を目的としている。

2. 量子電子顕微鏡

量子電子顕微鏡にはいくつか方式があるが、共通して用いられている原理がある。原理のイメージを Fig.1 に示す。矢印が確率振幅、正方形が検出確率を表している。Born の規則によると、量子力学における確率は、確率振幅の絶対値の 2 乗であることが知られている。5 個の電子を用いる場合、Fig.1 の左側のように各確率振幅ごとに確率を得るよりも、右側のように確率振幅を足し合わせてからのほうが、大きい確率を得ることができる。

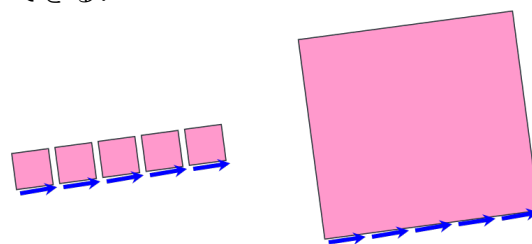


Fig. 1 量子電子顕微鏡原理イメージ

量子電子顕微鏡の手法には、Multi-pass 式と Qubit 式の 2 つが存在する。前者はスタンフォードやパークレー、香港で、後者は量子ビットを使用したものが秋田とトルコで、光を利用したものがカナダで研究が進められている。我々が作製を目指しているのは、Qubit 式の中でも、量子もつれ状態を利用した新型の STEM である。Fig.2 に Qubit 式 QEM の構成を示す。

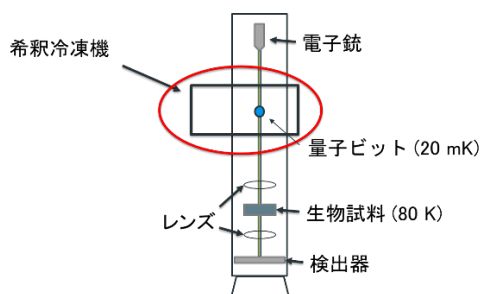


Fig. 2 QEM の構成[4]

大まかな構造は既存の電子顕微鏡と同じだが、大きく異なるのが量子ビットと希釈冷凍機の存在である。量子ビットは量子もつれを利用するために使用する。この量子ビットは 20 mK 以下の極低温下で動作する。そのため、極低温環境を実現するために、希釈冷凍機を使用する。

Qubit 式 QEM の長所は、Multi-pass 式に使用される 300 kV のミラーのような高エネルギーの装置が不要である点と、非弾性散乱への対処やユニバーサル化の可能性が挙げられる。

反対に、希釈冷凍機を TEM に入れる必要がある点や、量子効率の高い電子検出器が必要である点が短所として挙げられる。

3. 原理検証実験

極低温下での原理検証をトルコの Sabanci 大学の研究室と協力して行う予定である。概要としては、Sabanci 大学が所有する希釈冷凍機に、我々が作成する小型の STEM を入れて実験を行うというものである。

希釈冷凍機は量子ビットの動作が可能となる mK までの冷却が可能であるが、パワーは弱いため、内部で熱が発生するとすぐ

に温度が上昇してしまう。そのため、内部に入れる STEM からの発熱を抑える必要がある。

原理検証実験で TEM ではなく STEM を使用する理由として、TEM で使用されている検出器が極低温下で使用困難である一方、STEM ではファラデーカップが利用でき、極低温下でも動作することが挙げられる。また、TEM に比べて電気配線も少ないため、ヒートリークを抑えることもできることも挙げられる。

4. 実験装置

我々が所有する真空装置とパルスチューブ冷凍機をそれぞれ、Fig.3, Fig.4 に示す。真空装置は STEM の動作確認のために使用しており、内部に光学装置を取り付けることができるようになっている。パルスチューブ冷凍機は小型 STEM を作成したのち、2K 程度での検証実験の際に使用する。

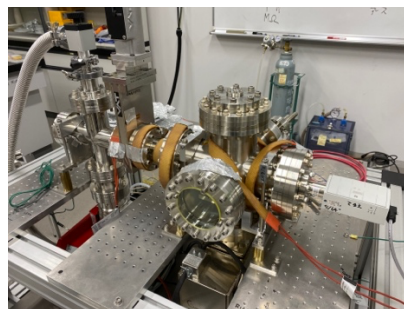


Fig. 3 真空装置

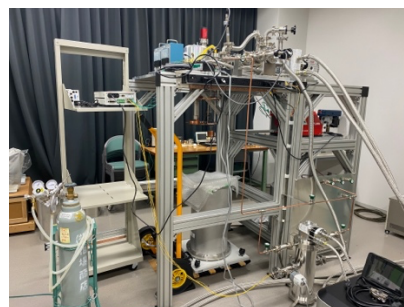


Fig. 4 パルスチューブ冷凍機

トルコの協力グループ (Sabanci Univ. Kaya 研究室) が所有する希釈冷凍機用プローブを Fig.5 に示す。Fig.3 の真空装置に比べ、かなり小さいサイズとなっている。原理検証実験のために、このプローブ内部に収まる STEM の作成が必要である。

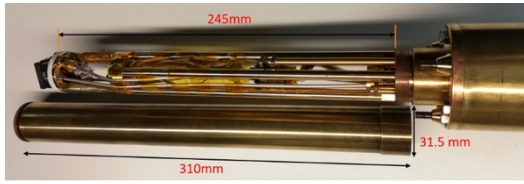


Fig. 5 希釈冷凍機用プローブ

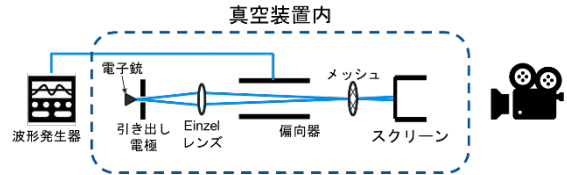


Fig. 8 実験のイメージ

電子光学テストベッドを Fig.6 に示す. テストベッドには電子銃や引き出し電極, 静電レンズなどの電子顕微鏡の光学装置を取り付けることができ, 配置を自由に変えることができる.

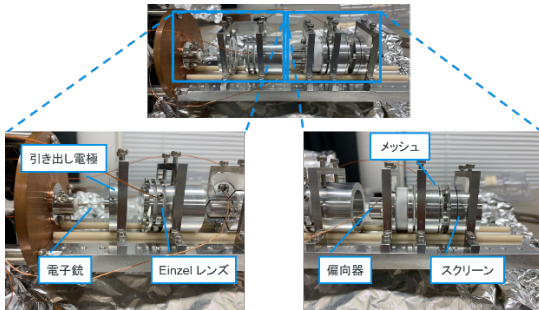


Fig. 6 電子光学テストベッド[5]

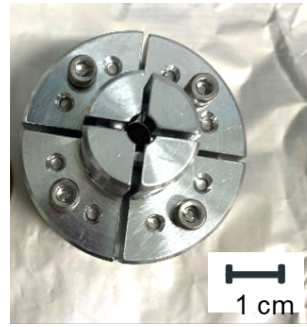


Fig. 9 偏向器[6]

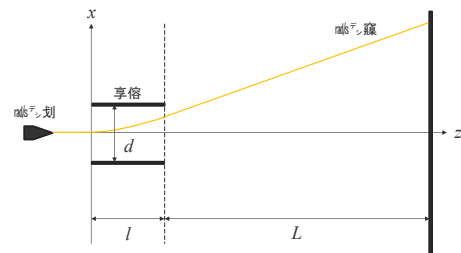


Fig. 10 電子の軌道

5. 予備実験

小型 STEM の構成のイメージを Fig.7 に示す. 波形発生器から偏向器に電圧を印加し, 試料表面を走査する. 透過した電子をファラデーカップで受け, 生じる電流を測定する. 波形発生器の制御と電流の測定は AD 変換器で行う.

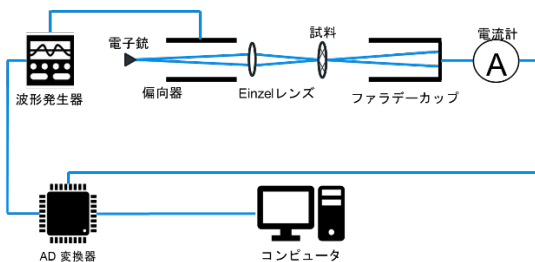


Fig. 7 小型 STEM の構成

本研究では FPGA を用いたスキャンの動作確認を行った. 実験のイメージを Fig.8 に示す. ファラデーカップではなくスクリーンを使用し, 目視による観測を行った. 使用した偏向器と, 電子の軌道のイメージをそれぞれ Fig.9, Fig.10 に示す.

光軸 z の周囲に 4 個の電極からなる偏向器を配置する. 極板の電圧を変化させることで電子の軌道を制御することができる. 電子は極板間を通過している間, 電場の向きと反対方向に力を受ける. 簡単のため, x 方向のみの平行平板型の偏向器を考える (Fig.10). 極板の長さを l , 極板から試料までの長さを L , 極板間の距離を d , 電子の加速電圧を V , x 軸方向の極板間に生じる電位差を ΔV_x とする. $z=L$ ($l \ll L$) における座標 x は,

$$x \approx \frac{Ll}{2d} \frac{\Delta V_x}{V}$$

となる.

波形発生器として FPGA を用いた. FPGA は, プログラマブル・ロジック・デバイス (PLD) の一種であり, ハードウェアでありながら, ユーザーが手元で回路を自由に, 何度でも書き換えることができるといった, ソ

フトウェアのような一面も持ち合わせている[7].

FPGA に設計した回路により, 試料を走査するデジタル信号を発生する. 走査を実現するための走査信号として, 縦軸に三角波, 横軸に階段波を用いる. FPGA からのデジタル信号は, D/A 変換回路によってアナログ信号に変換する. FPGA から発生させた走査信号を, Fig.11 に示す.

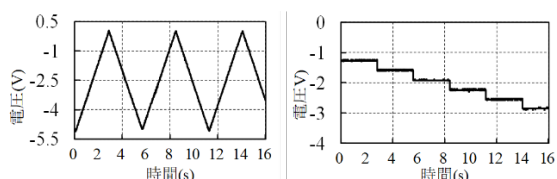


Fig. 11 走査信号

実験の様子を Fig.12 に, 実験時に印加した信号についてのデータを Table.1 に示す.

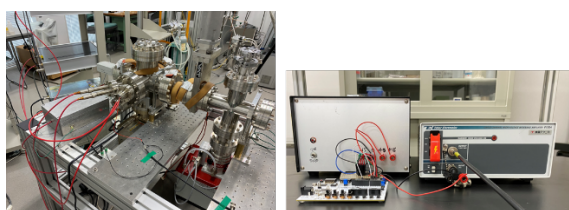


Fig. 12 実験の様子

Table. 1 印加した信号

V_{pp}	125[V]
波形	鋸波
周波数	358[mHz]
偏向角度	13.6°

本実験では 1 方向への鋸波の印加のみ行った. 目視での動作確認のため, 周波数はミリオーダーとした.

実験の結果, 計算で求めた偏向角度と同等の電子ビームの偏向を確認することができ, 走査の基本動作を確認することができた.

6. 結言

量子電子顕微鏡は生物試料観察における未来の顕微鏡であり, 世界でも研究が進められている. 本研究では極低温用の超小型 STEM の作製を進めており, FPGA を用いた走査装置の基本動作確認まで進んでいる.

今後はファラデーカップを用いた測定や小型化を進め, 2K での動作確認を行い, 将来的には極低温での実験に進む.

本研究の遂行にあたり助言等を頂いた, Marek Malac 氏と Darren Homeniuk 氏(NRC カナダ)に感謝します. 本研究の一部は科研費(基盤 C, 19K05285)により支援された.

参考文献

- [1] 奥 健夫, これならわかる電子顕微鏡 マテリアルサイエンスへの応用, 化学同人, 2004.
- [2] P. Kruit et al. Ultramicroscopy **164**, 31 (2016).
- [3] H. Okamoto, Possible use of a Cooper-pair box for low-dose electron microscopy, Phys. Rev. A **85**, 043810(2012).
- [4] 西村 匡平, 令和元年度卒業論文 電界放出型電子銃の超小型化, 秋田県立大学, 2020.
- [5] 奥田 優樹, 令和元年度修士論文 量子電子顕微鏡の電子光学系の特性評価, 秋田県立大学, 2020.
- [6] 宮村 峻介, 令和 3 年度卒業論文 小型走査透過型電子顕微鏡用の偏向器の作製, 秋田県立大学, 2022.
- [7] 天野 英晴, FPGA の構成と原理, オーム社, 2016.