

量子電子光学テストベッドの設計と組み立て

Design and Assembly of a Quantum-Electron-Optics Testbed

○奥田優樹*, 高山幸宏*, 三浦茂男*, 岡本洋*

○Yuki Okuda*, Yukihiro Takayama*, Shigeo Miura*, Hiroshi Okamoto*

*秋田県立大学システム科学技術研究科

*Graduate School of Systems Science and Technology, Akita Prefectural University

キーワード: クライオ電子顕微鏡 (cryo-electron microscopy), 超伝導量子ビット (superconducting qubit),
量子計測 (quantum measurement)

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 システム科学技術学部 制御工学研究室
岡本 洋, Tel.: (0184) 27-2088, Fax.: (0184) 27-2187, Email: okamoto@akita-pu.ac.jp

1. はじめに

クライオ電子顕微鏡法 (cryo-electron microscopy, cryoEM) の分解能は電子レンズの収差ではなく、電子線による試料損傷で決まる。なぜなら、試料を損傷しない電子数では画像のショットノイズが大きくなるためである。現状で、cryoEM において試料を高分解能観察するためには同種の分子を多数使用し、平均化処理によって S/N 比を向上させる必要がある。例として、単粒子解析法が挙げられる。しかし、細胞薄片などの特殊な試料や形のばらつく試料には適用が困難である。

CryoEM の分解能を改善するため、超伝導量子ビットを用いた量子電子顕微鏡が提案

された^{1,2)}。超伝導量子ビットと電子の量子もつれを利用し、cryoEM のノイズを従来のショットノイズ限界を超えてハイゼンベルク限界まで下げ得ることが理論的に示されている。

量子電子顕微鏡を実現するために、極低温で磁束量子程度の磁束をトラップした超伝導量子ビットの近傍に電子ビームを通過させる必要がある。本資料では、室温における予備実験の準備状況を報告する*。

2. 超伝導量子顕微鏡

最近提案された超伝導量子ビットの形状を

* 本研究の概要は、日本顕微鏡学会第 74 回学術講演会 (2018/5/29-31, 久留米シティプラザ)にて発表された。

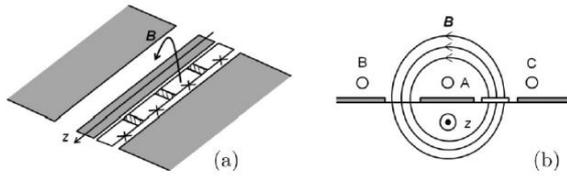


Fig. 1 超伝導量子ビット（参考文献 3 より引用）

Fig. 1 に示す。超伝導量子ビットを動作させるために希釈冷凍機を用いてデバイスを 50 mK 程度に冷却する必要がある。Fig. 1 の超伝導量子ビットはフラックス型（磁束密度 B が Fig. 1 に示されている）であり、これを透過型電子顕微鏡の照射系に配置して微小な磁界を発生させる。その磁束量子の近傍に電子ビームを通過させる。

電子が超伝導量子ビットの近傍を通過した後の「電子+量子ビット系」の状態は、磁束量子が存在する場合には電子の軌道が曲がり、そうでない場合には曲がらないことから、量子もつれ状態となる。この状態を利用して cryoEM の分解能を改善する方法が提案されている^{1,2)}。

3. 室温での原理検証実験にむけて

超伝導量子ビットがトラップする磁束は、本質的に磁束量子 1 個分と小さい。そのため、磁気ノイズを抑えた電子光学の設計が必要となる。これらの技術的課題を踏まえて、磁束量子程度の磁界を計測する室温装置（量子電子光学テストベッド）の設計製作を行う。

我々の実験装置を Fig. 2 に示す。電界放出 (field emission) 型電子銃を使うために超高真空 (ultrahigh vacuum, UHV) 仕様である。Fig. 2 の写真の裏側の CF152 フランジに量子電子光学テストベッドを実装する予定である。実装するためのベースプレートを図. 3 に示す。製作中の量子電子光学テストベッドを Fig. 4

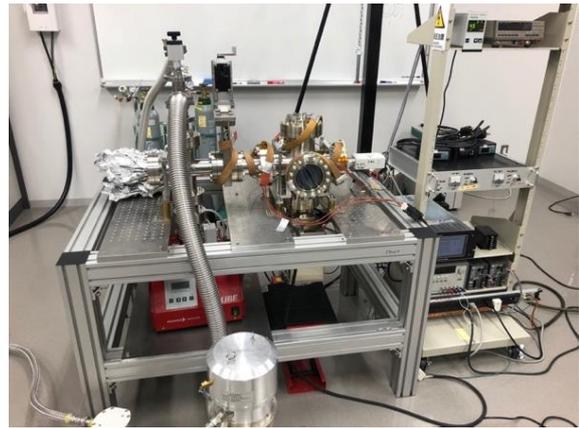


Fig. 2 量子電子光学テストベッドを収めるための UHV システム

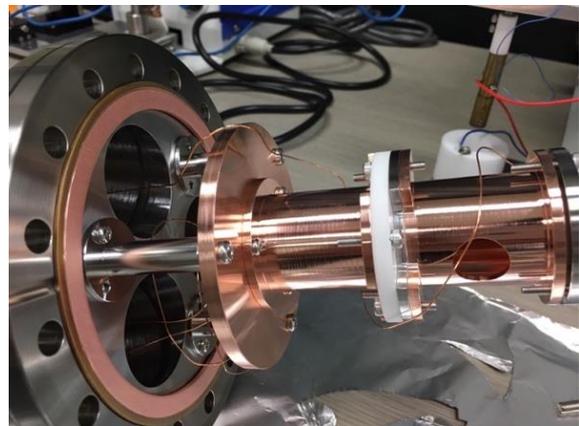


Fig. 3 電子ビームテストユニットを取り出したところ。右側の部分を取り外して、左側のベースプレート上に今回開発している電子光学テストベッドを実装する。

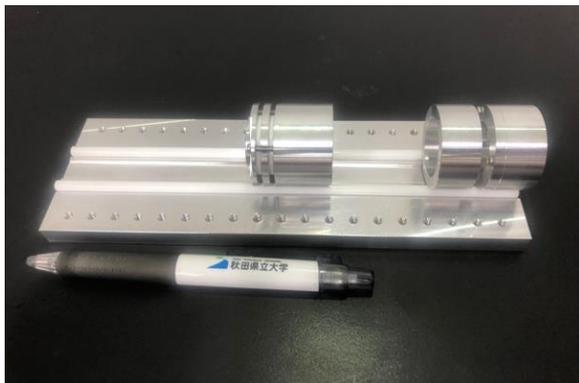


Fig. 4 製作中の量子電子光学テストベッド。電子レンズ、スクリーン、電子線偏向電極などの部品を実験内容に応じて自由に配置できる。

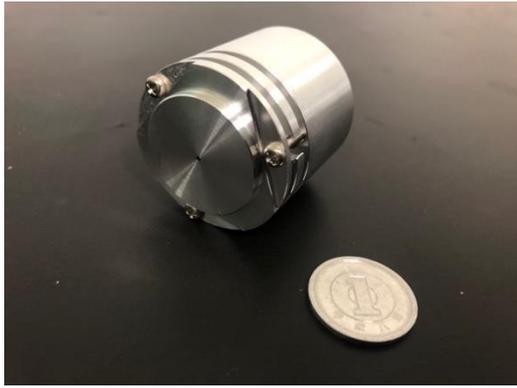


Fig. 5 仮組みした静電レンズ (einzel lens)

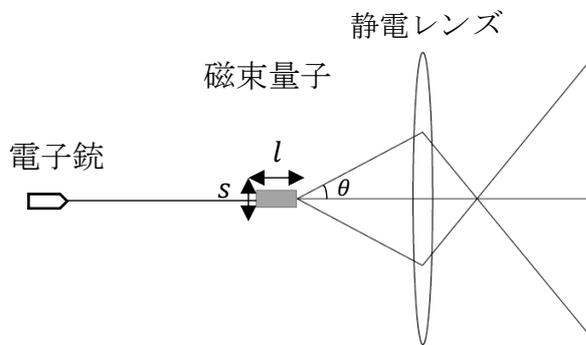


Fig.6 磁束量子程度の磁束による散乱角を静電レンズで拡大する原理図

に示す。また、設計製作中の散乱角拡大用の静電レンズ⁴⁾ (einzel lens) とその設計図を Fig. 5 に示す。材料はアルミニウムであるが、動作確認後、将来的にチタンに移行する考えである。

次に磁束量子による散乱角 θ を求める。電子ビームの運動量変化 Δp は、電子が磁束を通過する時間を Δt とすると

$$\Delta p = F\Delta t = evB\Delta t = ev \frac{\phi_0}{ls} \cdot \frac{l}{v} = \frac{h}{2s} \quad (1)$$

となる。ここで $F, e, v, B, \phi_0, l, s, h$ はそれぞれ電子の受ける力、素電荷、電子の速度、磁束密度、量子磁束、磁束の光軸方向の長さ、磁束の光軸に直交する方向の長さ、プランク定数である。さらに電子の質量と加速電圧をそれぞれ m, V とすると、求める散乱角 θ を得る。

$$\theta = \frac{\Delta p}{p} = \frac{h}{2s\sqrt{2meV}} \quad (2)$$

電子の運動エネルギーを1 keVとすると、散乱角は $\theta \approx 2 \mu\text{rad}$ なので、散乱を観測するためには静電レンズによる拡大が必要である。静電レンズで拡大する原理図を Fig. 7 に示す。

4. 今後の課題

次のステップとして、電子ビームテストユニットに実装する各部品的设计、製作を行い、磁束量子1個を検出できる電子光学系を開発する。このためにはサブnT程度以下の磁束密度ノイズ、最小限の機械振動ノイズを実現する必要がある。

中長期的には、ヘリウム3冷凍機を用いてサブケルビン以下の極低温で動作する量子電子光学テストベッドを開発し、超伝導デバイスと電子ビームを相互作用させる基礎実験を行う。

参考文献

- 1) H. Okamoto: Possible use of a Cooper-pair box for low-dose electron microscopy, Phys. Rev. A **85**, 043810 (2012)
- 2) H. Okamoto and Y. Nagatani: Entanglement-assisted electron microscopy based on a flux qubit, Appl. Phys. Lett. **104**, 062604 (2014)
- 3) H. Okamoto: Full-vortex flux qubit for charged-particle optics, Phys. Rev. A **97**, 042342 (2018)
- 4) G. B. Archard: Focal properties and chromatic and spherical aberrations of the three-electrode electron lens, Br. J. Appl. Phys., **7**, 330/332 (1956)