磁気光学トラップの位置制御に向けた 補正磁場コイルとその制御回路の作製と評価

丹治研究室 学部4年 堀江遥斗

1 序論

1-1 研究の背景

現在、量子力学の原理を用いた技術が注目されており、 その例として量子暗号通信[1]や量子コンピュータ[2]が挙 げられる。このような技術を実用化するためには、単一光 子を任意のタイミングで発生させられる、オンデマンドな 単一光子発生が重要だと考えられている。そこで、当研究 室では、光共振器中における冷却原子のリュードベリ集団 励起状態を用いたオンデマンドな単一光子発生を目指し ている。

1-2 研究の目的

本研究では、磁気光学トラップ(MOT)によりトラップ される原子集団の位置制御に向けて、コイルとその制御回 路の作製と評価を行う。上述のような単一光子発生のため には、原子集団を光共振器モードへと空間的に重ねること が必要となる。MOT においては、アンチヘルムホルツコ イルにより作り出される四重極磁場が0となるコイル対の 中心で原子集団がトラップされるが、地磁気や周辺機器に よる磁場、重力などの影響により、トラップされる位置が 理想的な位置からずれる。これにより、原子集団が光共振 器モードと重ならなくなってしまうため、トラップの位置 を外部磁場により補正する必要がある。本研究では、その 外部磁場を発生させるための電流制御回路の設計および 作製を行い、実際に原子集団の位置制御を行うことを目的 とする。

2 MOT

磁気光学トラップ (MOT) とは、ドップラー冷却と、四 重極磁場によるゼーマンシフトを利用した復元力の併用 により、気体原子を冷却し捕捉する手法である。この節で は、その原理について説明する。

2-1 ドップラー冷却

図1のように、速度 v で動いている原子の両方向から原 子の共鳴角周波数 ω_0 よりもわずかに低い角周波数 ω のレ ーザー光を照射する。このとき、原子が感じる周波数は、 ドップラー効果により、レーザー光 1 については $\omega(1 - v/c)$ となって ω_0 から遠ざかり、レーザー光 2 については $\omega(1 + v/c)$ となって ω_0 に近づく。原子による光子の吸収 は共鳴条件 ($\omega = \omega_0$)が満たされるときに最も強くなるこ とから、レーザー光 2 をレーザー光 1 より強く吸収させる ことができる。この吸収による運動量変化が ħk であるの に対し、自然放出時の反跳は、光子がランダムな方向に放 出されることから、平均して 0 となる。したがって、原子 には運動方向と反対方向に正味の摩擦力が生じる[3]。



図1:ドップラー冷却

2-2 ゼーマンシフトを利用した復元力と MOT

MOT では、一対のアンチヘルムホルツコイルと六方向 から照射される円偏光レーザーを用いる。



図 2:磁気光学トラップ

図 3:四重極磁場

原子のエネルギー準位は、アンチヘルムホルツコイルによ り発生する四重極磁場によって図4に示すようなゼーマン 分裂を起こす。ここに、光軸に対して互いに逆向きの円偏 光である σ^+ 偏光と σ^- 偏光のレーザー光を対向させて入 射させる。



図4:四重極磁場中の原子のエネルギー準位図

原子は、遷移の選択則から、 σ^+ 偏光の光を吸収したときに は磁気量子数 $M_j = 1$ の励起状態へ、 σ^- 偏光の光を吸収し たときには磁気量子数 $M_j = -1$ の励起状態へとそれぞれ 遷移する。そのため、レーザー光の周波数が原子の共鳴周 波数よりもわずかに低い場合、原子の位置が z > 0のとき には σ^- 偏光、z > 0のときには σ^+ 偏光の光による遷移が より共鳴へと近くなり、それぞれ σ^- 偏光、 σ^+ 偏光の光が 吸収されやすくなる。これにより原点方向へと向かう復元 力を生み出すことができる。さらに、負の離調のレーザー 光によるドップラー冷却効果を同時に生じさせることが できるため、MOT では原子を冷却しながら原点(磁場B =0)の位置にトラップすることができる[3][4]。

3 MOT の補正磁場

3-1 補正磁場の発生機構

補正磁場の発生には、図5に示すような三対の長方形の コイルを用いる。



図5:三対の長方形のコイル

これらのコイルが作る磁場は式(3.1)に示すビオ・サバール の法則により導出できる。A面を例として、コイル対が中 心軸上、及び中心付近に作る磁場を求めると、それぞれ式 (3.2)、式(3.3)のようになる。

$$dH = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{Idl \times r}{r^3} \tag{3.1}$$

$$H_{A} = \frac{2Ia_{1}a_{2}n_{A}}{\pi} \left\{ \frac{\frac{1}{a_{1}^{2} + (a_{3} + 2x)^{2}} + \frac{1}{a_{2}^{2} + (a_{3} + 2x)^{2}}}{\sqrt{a_{1}^{2} + a_{2}^{2} + (a_{3} + 2x)^{2}}} + \frac{\frac{1}{a_{1}^{2} + (a_{3} - 2x)^{2}} + \frac{1}{a_{2}^{2} + (a_{3} - 2x)^{2}}}{\sqrt{a_{1}^{2} + a_{2}^{2} + (a_{3} - 2x)^{2}}} \right\} (3.2)$$
$$H_{A0} = \frac{4Ia_{1}a_{2}n_{A}}{\pi\sqrt{a_{1}^{2} + a_{2}^{2} + a_{3}^{2}}} \left(\frac{1}{a_{1}^{2} + a_{3}^{2}} + \frac{1}{a_{2}^{2} + a_{3}^{2}}\right) (3.3)$$

3-2 コイルの制御回路

本研究で用いるコイルは、配置と巻き数により、500 mA の電流によって、約1Gの磁場を発生させられるように設 計されている。また、制御回路は最終的にはコンピュータ で制御を行えるようにする必要がある。これらを踏まえる と、制御回路には

・正負のどちらの電流も出力できる

・±500 mA までの電流を出力できる

・入力電圧により、出力電流を制御できる

という条件が課される。

これらの条件を満たすために、プッシュプル回路を用い ることとした。プッシュプル回路は、図 6 に示すように、 入力電圧 $V_{in} > 0$ のときには N チャネルの MOSFET が動 作して電流を流れださせ、 $V_{in} < 0$ のときには P チャネル の MOSFET が動作して電流を引き込む。



図 6: プッシュプル回路動作時の電流の流れ

4 実験

4-1 プッシュプル回路の設計と作製

制御回路の各素子の値を決定するために、まずは図7の サンプル回路[5]を基に、回路シミュレーションソフト LTspice 上でプッシュプル回路を作製し、 R_1 、 R_2 、 V_{cc} につ いて検討した。



図 7:サンプル回路[5]

R₂について検討する際には、出力部分にコイルの代わりに 抵抗を接続し、その両端電圧から出力されている電流値を 計算した。また、V_{cc}、R₁については図9に示すシミュレー ション結果を用いて、クロスオーバー歪みが発生せずに、 より大きな電流を出力できるという条件を課すことによ り値を決定した。



以上により、 $R_1 = 3k\Omega$ 、 $R_2 = 10k\Omega$ 、 $V_{cc} = 18V$ と決定した。

4-2 オペアンプを用いた非反転増幅回路の設計と作製

4-1 節での検討結果を基に、プッシュプル回路を組み込 んだ非反転増幅回路を設計し、LTspice を用いてシミュレ ーションを行った。このときの回路図を図 10 に示す。ま た、入力電圧を正弦波状に変化させた時の出力電流のシミ ュレーション結果を図 11 に示す。



図 10: 非反転増幅回路 図 11: 各入力電圧に対する出力電流 このシミュレーションより、オペアンプの増幅能力の限界 から、出力電圧が一定値よりも大きくならず、電流が不十 分であることが分かった。そこで、補正磁場コイルの抵抗 値をより小さくすることで 500 mA以上の出力電流を取り 出すことを考えた。まず、改良したコイルを制御回路につ ないだ際に、どのくらいの電流を流せるのかを計算した。 その結果を図 12 に示す。



C 面の回路についてはわずかに 500 mA に到達していない が、500 mA は余裕を持った設計値であるため、このままで も1Gの磁場を発生させることができると判断した。

4-3 補正磁場コイルの改良

前述のとおり、コイルの抵抗値をより小さくするために、 新しくコイルを巻き直した(図 13)。改良後のコイル対の 抵抗値を表1に示す。



図 13:改良後のコイル

表1:改良後のコイル対の抵抗値

A 面[Ω]	B 面[Ω]	C 面[Ω]
7.4	14.6	17.6

改良した各コイル対に 500 mA の電流を流したときに発生 する磁場を、中心軸上で位置を変化させながら測定した結 果を図 14、16、18 に、コイル対の中心となる位置での電 流変化に対する磁場変化の測定結果を図 15、17、19 にそ れぞれ示す。



A 面と C 面については、測定値が理論値よりも大きくなっ た。特に、C 面については、コイルに流れていた電流値を 正しく測定できていなかった可能性が考えられる。しかし ながら、定性的には正しい傾向が観測され、また必要な大 きさの磁場が得られることが分かった。

4-4 MOT の位置制御

最後に、作製したコイルを、MOTの実験系に組み込み、 A面のコイル対に電流を流したときのMOTの移動距離を CMOSカメラにより撮影した画像から計算により求めた。 その結果を図 20 に示す。



図 20: コイル対に流す電流の変化に対する MOT の位置変化 A 面のコイル対に ±500mA の電流を流すことで、±0.6mm 程移動させることができ、理論値とよく一致していること が確認できた。なお、エラーバーは、画像から原子集団の 中心を求める際の誤差を表している。また、理論曲線は、 A 面の二つのコイルの巻き数がわずかに異なることの効果 と、周辺磁場の影響によるオフセットを含めたフィッティ ングにより求めたものである。

5 まとめと今後の展望

本研究では、MOT の位置制御に向けて MOT の中心磁 場を補正するためのコイルと制御回路の作製と評価を行 った。制御回路はすべてのコイル対で正常に動作し、 ±500 mA 程度以上の電流を出力させることができた。また、 コイルについては、±500 mA の電流を流した際に、1 G 以 上の磁場を発生させることができた。さらに、これらのコ イルを用いて補正磁場を発生させることで MOT が移動す ることを、一軸方向について確認することができた。

今後の展望としては、A 面と同様に B 面と C 面のコイ ル対によって原子集団が移動することを確認する。また、 D/A コンバータを利用したコンピュータ制御により、光共 振器モードと重なるように原子の位置を制御することを 目指す。

参考文献

- Omer K.Jasim, Safia Abbas, El-Sayed M. El-Horbaty, & Abdel-Badeeh M. Salem. (2015). Quantum Key Distribution: Simulation and Characterizations. Procedia Computer Science, 65, 701-710.
- [2] Nandhini S, Harpreet Singh, & Akash U N. (2022). An extensive review on quantum computers. Advances in Engineering Software, 174, 103337.
- [3] M.Fox. (2012). 量子光学(木村達也訳). 丸善出版.
- [4] 久我隆弘. (2003). 量子光学. 朝倉書店.
- [5] マルツエレック株式会社. "MOSFET による増幅の基礎". マ ル ツ オ ン ラ イ ン .
 <u>https://www.marutsu.co.jp/select/list/detail.php?id</u>
 =200, (2022-10-28).