

ブレード回折格子を用いた磁気光学トラップの検討

先進理工学科 応用物理工学コース 岸本研究室

1313072 笹野 国光

1. 背景と目的

原子干渉計、原子時計を用いた精密測定や量子コンピュータの実装には、極低温の原子集団をアトムチップ上に生成し、操作する方法がよくとられる[1]。その前段階として従来から必要とされてきたのが磁気光学トラップ(MOT)による原子の捕獲・冷却である。特に3次元のトラップでは複数本(通常4~6本)の入射光が必要とするが、必要となる光学素子は多くなり、ビーム1本1本の強度や偏光状態を等しく制御する手間と調整のたびに生じる再現性の難しさがある。そのため、当研究室では単一の光源からの光をPBS等で3本に枝分かれさせつつ、折り返すことでミラーと波長板を併用して直交する各軸上で対抗する向きの円偏光を得ている。前述の問題解決を目指した別の手法としてP(ピラミッド)MOT[2]である。これはピラミッド型にくぼんだミラーを用意し、そこに通常と同じく四重極磁場を印加した上で適切な円偏光を垂直入射する構成のMOTである。各ミラーでの反射の度に光の伝搬方向に対する円偏光の向きが反転するため、自動的に3次元的な捕獲・冷却を達成できる。必要な入射光が1本のみであることから、上で述べた実験上の手間や困難は大きく解消される。だがこの方法は、生成される原子集団がくぼみの中にあるため、原子数が上げづらいことや光学的なアクセスが悪い、といった欠点があった[3]。それをさらに改善したのがG(グレーティング)MOT[4]である。これは反射素子としてミラーの代わりに回折格子を用いる方法で、1本の入射光と3本以上の回折光で3次元的な捕獲・冷却を実現する。生成される原子集団の周りの空間をPMOTと比べて広くとれることから、上で述べた2つの欠点を克服している。さらに反射素子が平面的なものに代わったことから、微細加工の難度、時間、コストが抑えられるという利点もある。

本研究ではGMOTにブレード型の回折格子を用い、先行研究とは異なる最適な条件があるかを検討する。

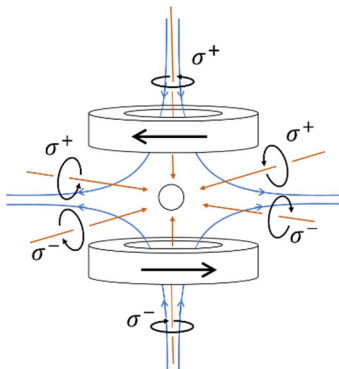


図 1. MOT の概略図

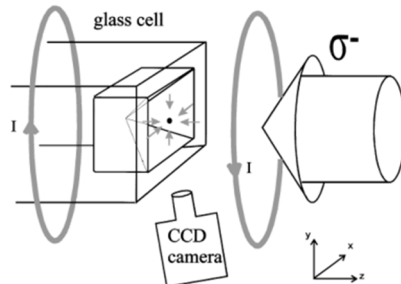


図 2. PMOT の概略図[2]

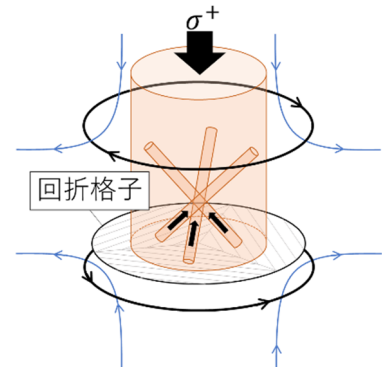


図 3. GMOT の概略図

2. GMOT の原理と先行研究

2.1 捕獲力

GMOTでは回折格子へ垂直入射する光と、複数本(ここでは3本の場合を扱う)の回折光が交わる。対称性から、動径(r)方向では自動的に輻射圧のつり合いが取れるが、軸(y)方向については満たすべき条件がある。今、 y 軸を通る入射光の強度が I_0 だとすると、回折光の強度は I_0 に回折効率 R 、 y 軸への射影成分 $\cos \theta$ 、回折方向に関するビーム径の圧縮の項 $1/\cos \theta$ 、および回折光の本数3を掛けた $3RI_0$ になる。そのため軸方向のつり合い条件は $R = 1/3$ のみであり、かつ原子にかかる輻射圧が等方的になる $\theta=70.5^\circ$ が理想的とされていた。実際に最初のGMOTの実験では、それらの条件に近い $R = 32.2\%$ (真空セルの透過分を含む)かつ $\theta = 69.4^\circ$ で行われた[4]。その結果、ビーム強度のガウス分布の影響で原子のつり合い位置が磁場のゼロ点から下へずれた。これは冷却効果の低減につながるだけ

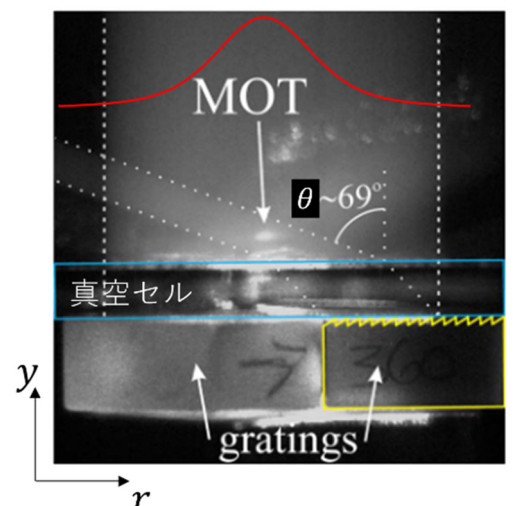


図 4. 横から見た GMOT の図[4]

でなく、セルの内壁に近づいたことで原子数の低下の原因ともなり、好ましくない。

2.2 冷却力

ドップラー温度以下の冷却では原子を感じる偏光成分(σ^+ , σ^- , π)の割合が到達温度に影響する。GMOT では各ビームのペアが角度をもって交わっていることから $\sigma^+ - \sigma^-$ の偏光勾配冷却だけでなく他の冷却機構も効くと考えられ、先行研究[3]では $\sigma^+ - \pi$ および $\pi - \sigma^-$ の二光子ラマン遷移も影響していると考察している。GMOT では今のところ $3.0 \pm 0.7 \mu\text{K}$ [5]の冷却温度が最低となっており、そこで用いられた回折格子は回折角 40° 、0 次回折効率約 3%、1 次回折効率約 40%で、回折後に円偏光が 93%以上保たれるものだった[6]。

3. 回折格子の選定

先行研究[3][4][5][6]を踏まえて、GMOT に最適な回折格子は回折角が 70° より小さく、回折効率が 33%より大きく(真空セルの透過分を含む)、回折の前後で円偏光の崩れが小さいものであると考え、現在 Thorlabs 社のブレード回折格子 GR25-0610(ブレードのピッチ $d = 1667\text{nm}$, ブレードの傾き $\theta_B = 17.5^\circ$)の使用を検討している。いま挙げた 3 条件をこの回折格子が満たすことを以下に示す。

$\lambda = 780\text{nm}$ の光を入射角 $\alpha = 0^\circ$ で照射した場合、($m =$)1 次回折光の角度 θ が 70° より小さくなる d の値は

$$d(\sin \alpha + \sin \theta) = m\lambda \quad (1)$$

から $d > 833\text{nm}$ と決まる。また、高い回折効率を得るため 1 次回折光に強度が集中するブレード型を採用した。カタログに記載の回折効率(図 5)はリトロー配置におけるものであるため、今回の 0° 入射の条件には当てはまらない。そこで単一のブレードに 780nm の光を 0° 入射した際の反射光強度 I の比例係数を

$$I \propto \{d \text{sinc}(kd\theta)\}^2 \quad \left(\text{ただし } kd\theta = \frac{2\pi d \sin \theta_B - \sin(\theta - \theta_B)}{\lambda} \right) \quad (2)$$

から求めて、GR25-0610 と先行研究[4]で用いられた回折格子(回折効率 45.3%、 $d = 833\text{nm}$, $\theta_B = 26.7^\circ$)との比較を行った。その結果、図 6 のように GR25-0610 の単ブレードの反射光強度は先行研究[4]の回折格子に比べ、 $2.2/0.5 \sim 4.4$ 倍程度と見積もれた。単ブレードを周期的に並べ、ピッチ d の違いを考慮しつつ同じ大きさの回折格子として比べた場合にも GR25-0610 の方が $2.2/(0.5 \times 2) \sim 2.2$ 倍程度の 1 次回折光強度が得られると見

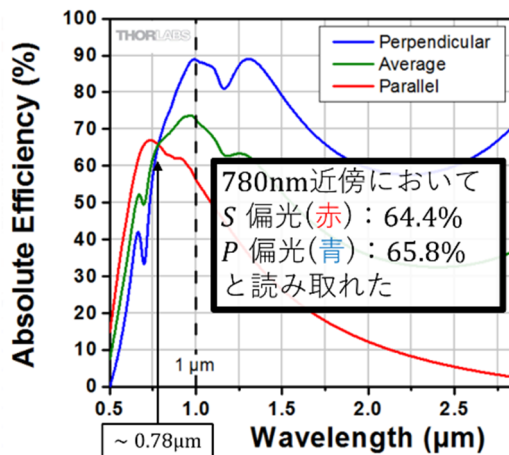


図 5. GR25-0610 の偏光別回折効率のグラフ (Thorlabs 社ウェブサイトより)

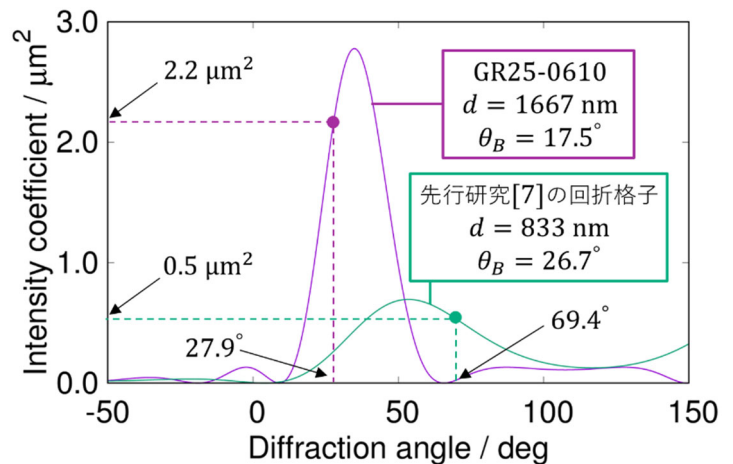


図 6. 単ブレードに 780nm の光が $\alpha = 0^\circ$ で入射した時の反射光強度の比例係数のグラフ(実線)。 27.9° 、 69.4° は各回折格子に対する一次回折角。

積もりができた。そこで、この回折格子を用いて

GMOT を行った場合、原子集団のつり合い位置が磁場

ゼロ点から真空セルの内壁に向かってずれる問題が解消されるかどうかを、入射光と回折光 3 本の輻射圧の大小関係を計算することで確かめた。このとき真空セルの厚み 3mm 、透過率 84.3% 、真空セルと回折格子との距離 0.5mm 、磁場勾配 10G/cm と設定した。計算結果は図 7 の通りである。入射光の半径ははじめ 11.5mm としており、そこから入射光と回折光が交差する領域の y 軸上の長さが計算できる。より多い原子を捕獲するため、その領域の中心に磁場のゼロ点を合わせたが、先行研究[4]と同様にビーム強度のガウス分布の影響で原子は磁場のゼロ点からズレた位置に捕獲されるという結果が出た。これを受けて、ビーム半径を変えて同様の計

算を行っていったところ、図7の青線のとおり、ビーム半径7.5mmかつ磁場のゼロ点をセルの内壁から5.9mm離れた箇所に合わせたときに磁場のゼロ点と原子の捕獲位置が一致した。このように、1/3より回折効率を大きめに、かつ回折角を70°小さくすることによって、最適なMOT条件の実現のための各種パラメータの調節をする余裕ができることが分かった。また、回折時の円偏光の崩れはS・P偏光別の回折効率の差と、入射時90°だった各S・P偏光間の位相差の変化から生じる。なお、ここでは電場の振動方向と回折格子の溝の方向が垂直なものがS偏光、平行なものがP偏光という定義に従っている。位相差は実際に測定しなければ分からないが、偏光別の回折効率の差は図5から比較的少ないことが読み取れた。

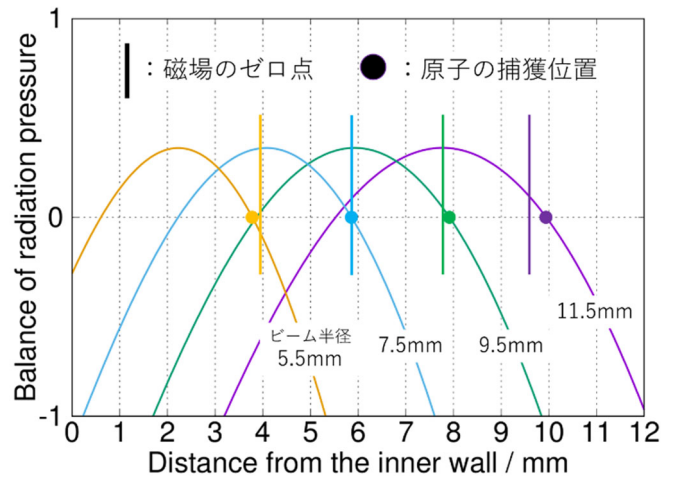


図7. GR25-0610を使用した場合の磁場のゼロ点と原子のつり合い位置との関係。なお、ビーム半径は中心と強度がピークの1/e²倍になる点との距離。

4. 実験方法

選定した回折格子について、S・P偏光別の回折効率、回折角、円偏光回折後にS・P偏光間に生じる位相差変化を測定した。図8、図9にその概略図を示す。光源には⁸⁷Rb原子のD₂遷移に対応する780nmのECDLを用いた。

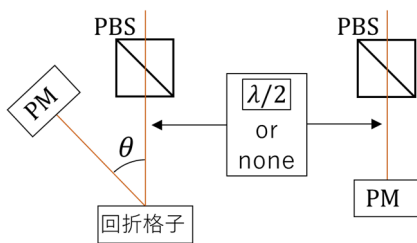


図8. 偏光別回折効率および回折角の測定

S偏光の回折効率は、PBSを透過した水平偏光のパワーを回折前および回折後についてパワーメータ(PM)で測り、それらの比から求めた。

次にPBSの直後にλ/2板を設置して鉛直偏光を生成し、S偏光と同様の手順でP偏光の回折効率を求めた。回折角θはPBSの透過光が回折格子に入射した点と回折先の適当な点の座標を定盤の上にとり、三角比から求めた。S・P偏光間の位相差変化φ_{SP}では、PBSの透過光をλ/4板に通して出来るだけ円偏光に近づけ、回折格子に入射させた。回折先には検光子(回転マウントに取り付けたPBS)とPMを置いた。検光子の角度に応じた透過光のパワーを測ることで、楕円偏光となった回折光のパワーの水平・鉛直成分(それぞれP_S、P_Pとする)およびパワーが極大となる方位角ψがわかる。φ_{SP}はP_S、P_P、ψを用いて次式から求めた。

$$\phi_{SP} = \cos^{-1} \left(\frac{P_S - P_P}{2\sqrt{P_S P_P}} \tan 2\psi \right) \quad (3)$$

また、回折格子の切断加工を見越して、以上の測定を光学素子クリーナー(First Contact, Photonics Cleaning Technologies社)を塗布・剥離した後についても行った。3本の回折光を交差させるために、図10右側のように回折格子を3つマウントする予定だが、市販品であるGR25-0610は始め正方形の状態であるため、不要な部分をカットする必要がある。その際発生する粉塵が回折格子の表面に付着すると光学特性に著しい悪影響を与えるため、それを防ぐために、光学素子クリーナーを保護膜として塗布した上で行う。この保護膜は始め液状だが、塗布してからしばらく経つと固まり、剥がせるようになる。回折格子の加工にかかる時間を短くて30分、長くて60分と見積もっていることから、塗布後それらの時間だけ待ったのち剥離した状態で回折

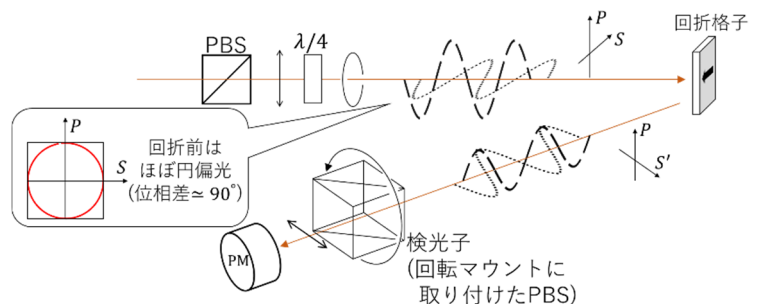


図9. S・P偏光間の位相差変化の測定。ここでは電場の振動方向が回折格子の溝に平行な方をP、垂直な方をS偏光と定義している。

効率・回折角・位相差変化の測定を行った。さらに塗りムラを考慮して、回折格子の内側と外側とでレーザーの当てる部分を分けて測定を行った。

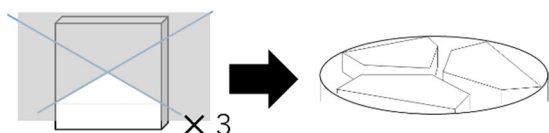


図 10. 想定している回折格子の加工案とマウントの構成

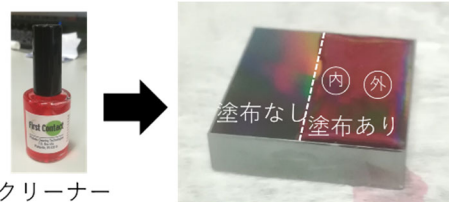


図 11. 光学素子クリーナー塗布前後の様子

5. 実験結果

前項の測定結果を表 1 に示す。また、円偏光回折後の楕円偏光の様子を図 12 に示す。未塗布状態の偏光別回折効率の不確かさは測定値の分散から計算したものである。位相差の不確かさは未塗布、塗布・剥離後いずれについても生成した円偏光の楕円率を考慮したもので、未塗布状態のみ測定値の分散からの算出値も含まれている。30分(外側)の位相差が突出して 90° に近く、かつ不確かさが小さくなっているが、これは図 9 の位相差測定時の方位角 ψ の記録ミスによるものと考えている。回折角の不確かさは測定時に座標をとったビームの入射点と回折先の照射点の位置の不確かさがそれぞれ 0.5cm ずつ生じていると見積もり、算出したものである。

表 1. GR25-0610 の光学特性測定結果

保護膜の有無	回折効率(S 偏光) / %	回折効率(P 偏光) / %	円偏光回折後の位相差 / deg	回折角 / deg
未塗布	67.5 ± 0.2	62.9 ± 0.2	77 ± 8	29.0 ± 0.6
30分(内側)	67.3	61.5	80 ± 5	28.5 ± 0.6
30分(外側)	67.1	62.4	88.3 ± 0.8	28.1 ± 0.6
60分(内側)	67.6	63.3	76 ± 9	29.7 ± 0.6
60分(外側)	67.0	62.4	82 ± 5	28.9 ± 0.6

カタログから読み取った回折効率(図 5)は P 偏光の方が高かったが、測定すると保護膜の有無にかかわらず、いずれも S 偏光の方が高い結果となった。この大小関係の逆転は実験条件がリトロ配置と 0° 入射とで違ったために起きたものと考えている。

6. まとめと今後の展望

位相差の測定時に生成した円偏光が 5% ほどの楕円率をもっており、不確かさの主な原因となっているため、今後は更に精度よく円偏光を作る。また、回折角は測定方法が悪く、測定値と不確かさ共に信頼性が低いため、方法の見直しをした上で再測定が必要である。

今回得られたパラメータを軸方向の輻射圧の式に代入することにより、真空セルの厚みなどの定まったある条件下での最適なビーム径などが計算できるようになった。今後はそれを参考に実験系を用意し、GMOT の生成・評価を目指す。

参考文献

- [1] J. MEMS **18**, 347, (2009), [2] Opt. Lett. **21**, 1177 (1996),
 [3] Nature Nanotech. **8**, 321 (2013), [4] Opt. Lett. **35**, 3453
 (2010), [5] Scientific Reports **7**, 384 (2017), [6] J. Opt. Soc. Am. B **33**, 1271 (2016),

謝辞

本研究を進めるにあたり、米田仁紀先生と米田研究室の道根百合奈様より多大なご協力をいただきました。心より御礼申し上げます。

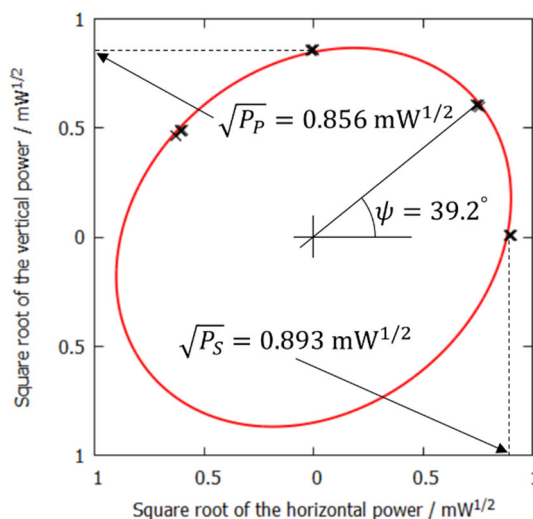


図 12. 保護膜未塗布状態での回折後楕円偏光