MOT ビーム生成に向けた光集積回路内の電場分布特性の評価

岸本研究室 2233044 斉藤央樹

1. 研究の背景・目的

量子気体の研究において、ボース・アインスタイン凝縮体(BEC)の生成が必要となるが、その前段階として原子を冷却・捕獲するための手段として磁気光学トラップ(MOT)と呼ばれる手法が存在する。 MOTには、一般的には幅広の平行光レーザーが用いられるが、大型の光学素子を用いるため装置全体の小型化を目指す場合にボトルネックとなってくる。この問題点を解決するための方法として、近年は回折格子 MOT(GMOT)などといった手法の検討が行われている[1]。しかし、この方法においても少なくとも 1 本のビームを拡大するためのスペースが必要となり、小型化に向けた更なる改良の余地が残されている。最近になって光集積回路の技術を用いて、自由空間に幅広なビームを放出するビーム変換器の作成を行う例が存在している。そこで、本研究は、MOTに適するサイズにビームを拡張するコンパクトなモード変換器の作成に向けた光集積回路内の電場分布特性の評価を行うことを目標とする。

2. 原理

2.1 光集積回路

光集積回路は微細加工技術を用いてシリコン基板上に超微細な光学素子を作成し、それを集積した光回路である。シリコンウエハ上にパターニングする技術の精密化により小さく高効率な光集積回路が作成されている。光の光集積回路への結合や出力方法として、端面接触型のファイバー接続やブラッググレーティング結合の方法があげられる。ブラッググレーティングは、屈折率が光の波長程度の周期で人工的に変調されている光学材料であり、この周期構造を用いて光を自由空間と光集積回路の間で結合することで光の入出力可能となる。また、エバネッセント光を利用して光集積回路内の導波路間の結合も調整可能なため、複数のグレーディングを1つのチップ上に作成するなど、集積化が可能となっている。

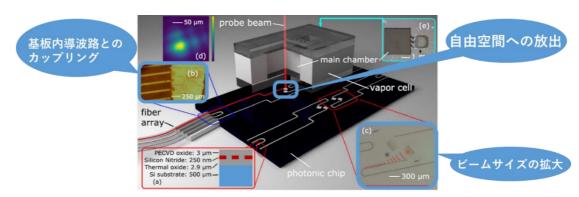
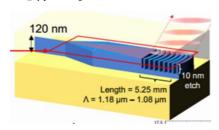


図1 フォトニックチップとその応用例[2]

3. 内部構造に関する検討

本研究では、光集積回路から自由空間に MOT ビームを放出させることを目的としており、特に光集積回路の中でシングルモードの導波路から 2 次元ビームに拡張させていく過程での各箇所での損失を見積もることを目指す。そこで、今回は、図 2 に示す設計手法 A、B の構造に着目し、比較検討を行う。設計手法 A、B はどちらも 2 段階の構造である。1 段階目は、導波路内モードから 1 次元のガウシアン

ビームへの拡張を行う。 2 段階目で 2 次元ガウシアンビームへの拡張、自由空間へのビーム放出を行う。 どちらの装置も ⁸⁷Rb の MOT 装置に使用することを念頭に置いて作成されているため、挿入する 光の波長は 780nm である。今回は、導波管内モードから 1 次元ガウシアンビームの拡張部についての シミュレーションを行った。



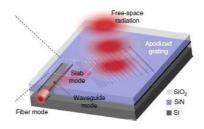
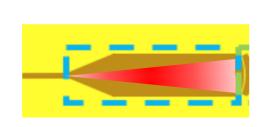


図 2 比較する変換器の模式図(左:設計手法 A[3] 右:設計手法 B[4])

設計手法 A では、図 3 に示すようにテーパー型構造でビームを 1 次元ガウシアンビームに拡大する。 導波路から 1 次元ガウシアンへの変換における透過率は 85%である。設計手法 B では第一段階でエバネッセント結合を用いた方法が採用される。導波路とスラブ導波路とのギャップサイズを変化させることでスラブ導波路に入射するビームパワーを調節する。これにより放射角 $\theta_{tilt}=28.12^\circ$ で図 3 右図に示すような 1 次元のガウシアンビームが放射される。この構造における変換効率は、理想的には 100%となるように設計されている。しかし参考文献中において、シミュレーションによる結果及び実験で評価された効率の記載は存在しない。そのため、今回自分たちでシミュレーションを行い、効率を確認する必要があった。



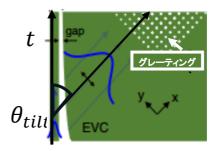


図3 設計手法 A の断面図[5]と設計手法 B の断面図[6] 表1 各装置のビーム拡大面積

	設計手法 A	設計手法 B
Input	$0.44\mu\mathrm{m}^2$	$0.075~\mu\mathrm{m}^2$
Output	7.5 mm²	$160\mu\mathrm{m}^2$
変換値	1.987×10 ⁷ 倍	3.4×10 ⁵ 倍

出力されるビームサイズを設計手法ごとに比較するために表1を作成した。得られるビームサイズは最大でも mm スケールであり、十分な原子数を得る MOT に用いるビームサイズとしては不十分である。ビームサイズを最低でも cm スケールにするためには、シミュレーションで損失の起源を知ることが必要である。

4. シミュレーション

4.1 シミュレーション方法について

シミュレーションは有限差分時間領域(FDTD)法を用いた。FDTD 法は、対象物を Perfectly matched layer (PML) [7]と呼ばれる吸収体で囲み、これを境界条件として内部を差分化することによ りマクスウェル方程式を計算する方法である。差分化する際には電場と磁場の3次元格子がそれぞれ 1/2 周期ずらして配置する。これは Yee 格子[7]と呼ばれ電場要素の周囲に磁場の渦が存在することで、 マクスウェル方程式の計算条件を満たす。今回のシミュレーションにおいては導波路にカップリングす る光の電磁場を光源とし、この場所からの距離をzとする。

また、挿入した光はTE₀₀モードに設定した。

4.2 設計手法 A におけるシミュレーション

参考論文より図4に示すようにテーパー形状を作成し、 シミュレーションを行った。電場の観測は光の進行方向に 対して一定の間隔で観測モニター (図4の赤線部分断面) を設置して行った。3次元のFDTDはPCメモリの上限か ら、シミュレーションはz = 125.6 μm 地点まで行われてい

 (μm)

図 4 設計手法 A の形状と測定範囲 る。また、入射した光のモードが高次モードまで分裂するかを 確かめるシミュレーションも行った。この計算は2次元のFDTDで行われたので、シミュレーション は $z = 856.4 \mu m$ 地点まで行われている。

4.3 設計手法 B におけるシミュレーション

参考文献中の実際の装置の一部写真から全体の大きさを算出 し、図5に示す形状を作成した。電場の観測は導波路とスラブ 導波路にそれぞれ観測モニター (図中赤線部分) を設置した。 観測された電場強度分布から、光の入射角を算出した。また、 直線導波路内に残存する光の割合と、スラブ導波路に挿入され る光の割合を計算した。3次元モードではPCメモリの上限か ら、シミュレーションは z=126.6 μm 地点まで行われている。

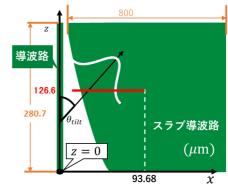


図 5 設計手法 B の形状と測定範囲

5. 実験結果

5.1 設計手法 A におけるシミュレーション

図 6 は、 $z=5.3 \mu$ m 地点における電場強度分布である。 $z=5.3 \mu$ m 地点と比較し、z=125.6 μ m 地点ではビーム径は約 150 倍程度にな ることが確認できた。また。1/e² 幅でビームの拡張率を先行論文と 比較し、一致することを確認した。モード分裂の測定では $z=5.3\,\mu$ m 地点において角度が59.03度のテーパーではすでに多数のモー

ドへの分裂が発生していることが確認できた。

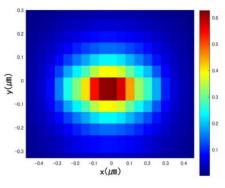


図6 $z = 5.3 \mu m$ 地点における電場強度分布

図7のグラフは、テーパーの角度が9.992度の形状と先行論文に基づいた形状(59.03度)におけるモード分裂の様子である。テーパー角度を小さくすることでモード分裂が抑えられることが確認できた。テーパードファイバーにおいて、モードの分裂を防ぎつつモードの拡張を行うための断熱的条件の考え方[8]を参考にし、同じ断熱的変化のための条件式(式(1))を今回のようなテーパー形状に対して当てはめてモード分裂の抑制具合を確認した。

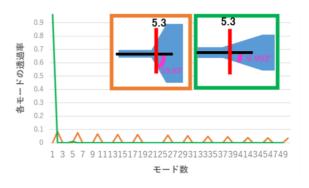


図 7 $z = 5.3 \mu m$ 地点のモード分裂の様子

$$\theta = \operatorname{Tan}^{-1}(R\frac{n_{eff1} - n_{eff2}}{\lambda}) \tag{1}$$

ここで、Rはテーパー長さ、 n_{eff1} , n_{eff2} はそれぞれコア、クラッドの屈折率である。この式を用いて図 8に示すような形状を作成し、シミュレーションを行った。図 9のグラフの赤線は、図 8の拡大図における赤点の位置での内部モードの様子を示す。またオレンジの線も同様に、図 8の拡大図におけるオレンジの点での位置の内部モードの様子を示している。結果として、赤点の位置ではモード分裂が発生しないことが図 9 から確認できる。このことにより、赤点とオレンジ点の間で断熱追随が崩れ、モード分裂が生じ始めていることがわかる。ただ、この結果から部分的ではあるものの、赤点までは内部モードの分裂を防ぐ理想的な形状を作成することが出来たと結論できた。また、今後は、今回の導波路の形状に合ったさらに正確な断熱的条件に基づいて、テーパー形状を設計すればモード分裂が抑制されたモード変換器が設計可能な指針が得られた。

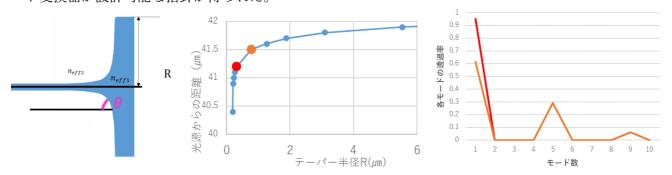


図8 理想的なテーパー形状とその拡大図

図9理想的なテーパー形状におけるモード分裂

5.2 設計手法 B におけるシミュレーション

図 10 と図 11 はスラブ導波路側のモニターで観測された光の電場パワー分布である。スラブ導波路においては、光が進むにつれてスラブ側に入射していく様子を確認することができた。また、この時の入射角度を中心の位置が移動した距離から算出したところ $\theta_{tilt}=27.03^{\circ}$ という結果が得られた。

図 12 に示すグラフは設計手法 B において、直線導波路に残存する光とスラブ導波路に入射する光の割合を測定した結果である。赤で示す線が直線導波路に残存する光の割合 P_2 であり、光源からの垂直距離が大きくなるにつれて 1 次関数的に減少していくことが確認できる。また、 P_2 が減少するにしたがって水色の線で示すスラブ導波路への光の挿入率 P_3 が上昇していくことも確認された。ここで、 P_2 と P_3 を足し合わせた結果をグラフ内の緑の線にて示している。その結果、黒色の線で示されている導波路単体で測定した光の残存割合 P_1 と同様の値をとることが確認できている。この結果について図 14 から図 16 を用いて説明を行う。

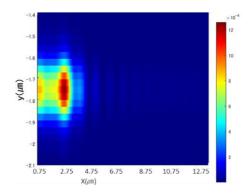


図 10 スラブ導波路の電場強度分布(z=19.8 µ m)

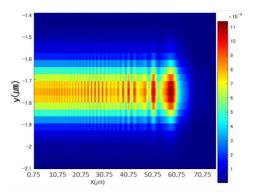


図 11 スラブ導波路の電場強度分布(z=126.6 µm)

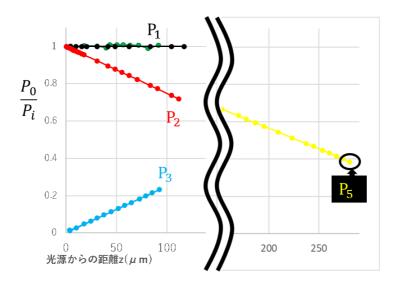


図 12 導波路とスラブ導波路における光の割合

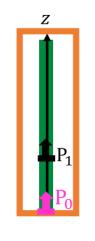


図 13 P₁の測定

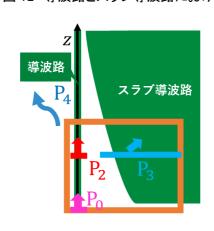


図 14 P2, P3の測定

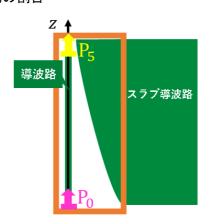


図 15 P₅の測定

図 14 において、挿入した光の電場強度 P_0 に対して、導波路単体の測定した光の残存割合 P_1 は同じ値をとる。図 15 に示す直線導波路に残存する光の割合 P_2 と、スラブ導波路への光の挿入率 P_3 を合算した結果が P_1 と一致する。これは P_4 で示すような変換時における損失が存在しないということである。図 16 において示す通り導波路の終点まで FDTD 領域に含んで計算した結果が P_5 である。図 13 に示す通り P_5 は $z=280.7\mu m$ において約 4 割のパワーが導波路に残る結果となった。結果として、導波路からスラブ側に

ビームパワーが損失なく流入することは確認されたが、直線導波路本体に 4 割程度のパワーが残ることが確認された。

6.まとめと今後の展望

MOT に適するサイズにビームを拡張するコンパクトなモード変換器を作成することを本研究の目標とし、変換器の内部構造に関する検討を行った。現在主流である構造は、2段階に分けてファイバーモードからのビーム拡張を行うものである。今回は一段階目の導波路内モードから1次元のガウシアンビームへの拡張において用いられている構造について、損失を確認するためのシミュレーションを行った。確認した構造は2つである。

1つは導波路内モード単純なテーパー型構造でビームをスラブモードに適応したガウシアンビームに拡大する方法である。シミュレーションを行った結果ビームはテーパー内でモード分裂を起こしていることが確認できた。モードの分裂を少なくするための角度の条件を先行論文から確認しシミュレーションを行った。その結果、97%のパワーが分裂せずに進行していくビーム変換器をシミュレーションすることができた。2つ目の構造は導波路モードからスラブガウシアンビームへの変換にエバネッセント結合を用いた方法である。この論文では導波路とスラブ間のギャップサイズを変化させることで位置ごとにスラブ導波路に流れるパワーを調整することで、適切なビーム形状と放射角度を作成する。この構造における損失はないものの、導波路には約4割のパワーが残ることがシミュレーションにより確認された。

参考文献

- [1] McGehee, William R., et al. "Magneto-optical trapping using planar optics." New Journal of Physics 23.1 (2021): 013021.
- [2] Hummon, Matthew T., et al. "Photonic chip for laser stabilization to an atomic vapor with 10-11 instability." Optica 5.4 (2018): 443-449.
- [3] Kim, S., Westly, D.A., Roxworthy, B.J. *et al.* "Photonic waveguide to free-space Gaussian beam extreme mode converter." *Light Sci Appl* **7**, 72 (2018).
- [4] Isichenko, Andrei, et al. "Photonic integrated beam delivery for a rubidium 3D magneto-optical trap." Nature Communications 14.1 (2023): 3080.
- [5] Chauhan, Nitesh, et al. "Photonic integrated Si3N4 ultra-large-area grating waveguide mot interface for 3d atomic clock laser cooling." *2019 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*. IEEE, 2019.
- [6] Ropp, Chad, et al. "Integrating planar photonics for multi-beam generation and atomic clock packaging on chip." *Light: Science & Applications* 12.1 (2023): 83
- [7] Yu, Chin-Ping, and Hung-Chun Chang. "Yee-mesh-based finite difference eigenmode solver with PML absorbing boundary conditions for optical waveguides and photonic crystal fibers." Optics Express 12.25 (2004): 6165-6177.
- [8] Ravets, S., et al. "Intermodal energy transfer in a tapered optical fiber: optimizing transmission." *JOSA A* 30.11 (2013): 2361-2371