

強磁性金属プラズモンによるオンチップ光メモリの開発

Development of On-chip Optical Memories Based on Plasmonics Using Ferromagnetic Metals



清水 大雅 (Hiromasa SHIMIZU, Ph. D.)

東京農工大学 工学府 化学物理工学専攻 教授

(Ph. D, Professor, Department of Applied Physics and Chemical Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology)

応用物理学会、電子情報通信学会、電気学会、IEEE、American Chemical Society

受賞：電子情報通信学会 エレクトロニクスソサイエティ活動功労表彰 (2020 年)、応用物理学会論文賞、JJAP 論文奨励賞 (2005 年)、Material Research Society, Best Paper Nominations (Ribbon Awards), 2004 Fall meeting of Material Research Society (2004 年)、平成 13 年度日本応用磁気学会学術奨励賞(武井賞)受賞(2001 年度)、第 9 回 (2000 年秋季) 応用物理学会講演奨励賞受賞(2000 年度)

清水大雅、アグリバイオ 2022 年 6 月号 研究者の広場「くさび型 Au 薄膜を用いた SPR センサによる揮発性有機化合物の検出」北隆館、2022 年 06 月 20 日、2432-5511

Hiromasa Shimizu(分担執筆)、Physical Sensors: Optical Sensors, in book: Reference Module in Biomedical Sciences, Elsevier、2022 年、978-0-12-822549-3 他

研究専門分野：センサ、光エレクトロニクス、磁気光学

あらまし

シリコンフォトリソグラフィ上に強磁性金属プラズモンによるオンチップ光メモリ実現を目指して研究を行った。シリコン細線導波路の一部に強磁性金属を製膜し、光誘起加熱と磁化状態の光学的読み出しを実現した。オンチップ光メモリ実現に向けた今後の将来展望や様々な応用可能性について紹介した。

1. 研究の目的

本研究の目的はシリコン光導波路に強磁性金属を製膜したプラズモン導波路を作製し、不揮発・高密度・高速動作を実現するオンチップの光メモリを実現することである。また、光が伝搬する領域と記録媒体となる強磁性金属を物理的に接触させ、かつ小型化することで、より低強度の光信号で書き込み可能なメモリを実現することを目的とする。

2. 研究の背景

近年の情報通信技術の発達やデジタル化、クラウドサービスの進展により、情報通信のさらなる高速化が求められている。光ファイバを用いた光通信によって長距離で高速な情報伝達が可能となった一方で信号を送受信するための電子回路やその周辺機器では、電気配線による情報伝送速度が限界近くに達しており、更なる高速化のため、配線を光化する光配線や光集積回路の実現が求められている。また、IT クラウドサービスに関わる消費電力が急増し、空調に必要な電力も含めて、その低減が急務となっている。

現状では、光信号のオンとオフを切り替えるために電気信号が用いられていること、電気回路でコンデンサの役割を果たすメモリ素子[1]の光回路での実現が難しいこと、電気配線による大規模集積回路で使われている素子よりも小さい光素子をいかにして実現するかが大きな課題となっている。Google ドライブに代表されるクラウドサービスでは、熱アシスト磁気記録と呼ばれる方式によって、記録密度の増大が図られている。熱アシスト磁気記録[2]では、記録媒体として強磁性金属合金の CoPt や FePt を使い、レーザ光を集光・照射し加熱することで磁化反転を容易にする方式がとられている。

電気信号の代わりに、光信号を用いた不揮発性の光メモリを実現すること、および、その消費電力を抑えることが鍵である。

なお、本研究助成の実施開始後に、日本シーゲート株式会社から熱アシスト磁気記録の実用化に関する発表があった[3]。本研究助成と関連した研究開発は着実に進歩し、社会に導入されている。

3. 研究の方法

本研究開発前にシリコン細線導波路の一部に強磁性金属 Co を製膜し、光を入力したときの Co 薄膜の抵抗の変化の測定から 221K の温度上昇を観測した[4]。抵抗の測定から温度上昇を見積もる場合、100 nm 程度の比較的厚い Co 薄膜が必要であるが、導波路ヒータ

強磁性金属プラズモンによるオンチップ光メモリの開発

Development of On-chip Optical Memories Based on Plasmonics Using Ferromagnetic Metals

の効率向上には適していないことが明らかになっていった。そこで、図 1 に示すようにシリコン細線導波路からなるリング共振器の一部に強磁性金属 Co を製膜した導波路ヒータにおいて、入力光強度を変化させたときに熱光学効果によって生じる共振波長のシフトを測定することで局所的な温度上昇を見積もった。シリコン導波路ヒータにおいて、発熱効率の向上、入力光強度の低減と小型化が課題である。ヒータ部において発熱量が増大する構造を採用し、リング共振器の共振波長のシフトに着目して上昇温度を評価し、共振器の Q 値との関連について調べた。これまでの研究より、Co と SiO₂ バッファ層の膜厚が薄いほど単位長さあたりの伝搬損失が大きくなることを見積もられていることから、Co 膜厚 30 nm、SiO₂ バッファ層膜厚 50 nm で作製することとした。Si リング共振器(半径 $r = 20 \mu\text{m}$)の一部に導波路ヒータを作製し、発熱に伴う共振波長のシフトの測定から上昇温度を見積もる方針とした。発熱部となる Co の導波路方向に沿った長さを 0.5, 1 μm 、Si 導波路の幅を 400 nm、高さを 250 nm とした。リング共振器の方向性結合器のギャップ g は 300, 400 nm、リング共振器の周回長は 165.7 μm ($r = 20 \mu\text{m}$)とした。2 回の電子線描画、RIE による Si のエッチング、電子ビーム蒸着による Co の製膜とスパッタリングによる SiO₂ の製膜を経て SOI 基板上に導波路ヒータを作製した。

半径 20 μm のリング共振器、方向性結合器のギャップ幅 400 nm、Co 層の長さ 0.5 μm の導波路ヒータにおいて、図 3 に示すように 106 K/mW の発熱効率、および、15 mW 入力時の 894 K の温度上昇が得られた。以上の実験結果から Co 層を磁化反転させるために十分な温度上昇を達成することができた。

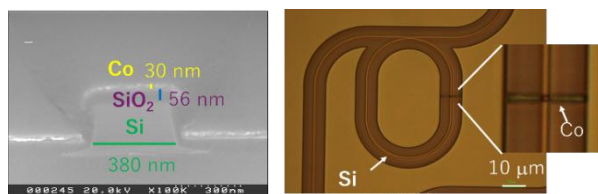


図 1 (左) Si 細線導波路の上部に強磁性金属 Co を製膜した光加熱導波路ヒータの断面電子顕微鏡写真。(右) Si 光加熱ヒータを集積したリング共振器の光学顕微鏡写真。

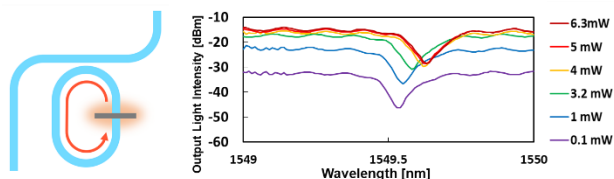


図 2 (左) 光加熱導波路ヒータを集積した Si リング共振器の模式図。(右) 入力光強度を増加させた時のリング共振波長の変化の測定結果。

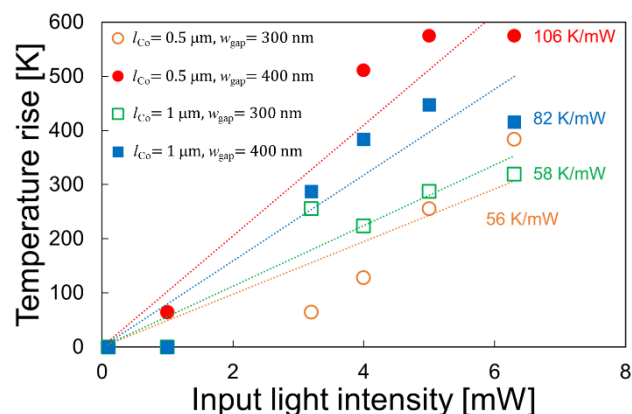


図 3 図 1,2 の導波路ヒータにおける入力光強度と上昇温度の関係

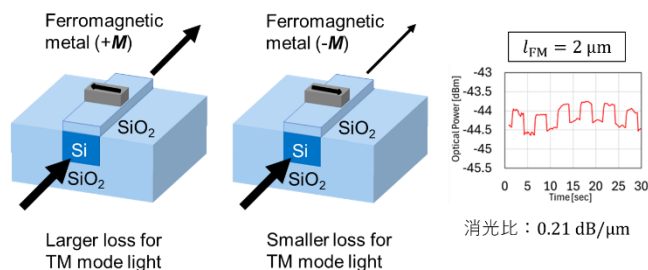


図 4 (左) Si 細線導波路の上部に強磁性金属 FeCo を製膜した磁化状態読み出し用の導波路の模式図。(右) 外部磁界を反転させた時の出力光強度の変化の測定結果。

また図 4 に示すように Si 細線導波路上に厚さ 50 nm の SiO₂ バッファ層を介して長さ 2 μm の強磁性金属 FeCo を製膜した素子において、磁化反転に伴う 0.5 dB の伝搬光強度の変化を測定した。強磁性金属として Co を用いた場合と FeCo を用いた場合を比較すると、FeCo の方が磁化反転に伴う伝搬光強度の変化が

強磁性金属プラズモンによるオンチップ光メモリの開発

Development of On-chip Optical Memories Based on Plasmonics Using Ferromagnetic Metals

大きいことが分かった。

以上の実験結果より、Si 細線導波路上の強磁性金属の局所加熱、および、強磁性金属の磁化反転の光学的な読み出しに成功した。本研究の目標は光誘起加熱による磁化反転の実証であるが、図 1, 2 の導波路ヒータの構造では、強磁性金属の長さの観点から磁化反転の読み出しが困難であった。一方、磁化反転の読み出しに用いた構造では、光と強磁性金属の相互作用が十分でなかった（強磁性金属を製膜する部分の長さを大きくすると、光を伝搬できないことと光誘起加熱効率が低下する）ことから、光誘起加熱の評価には至らなかった。

4. 将来展望

光誘起加熱と読み出しを両立するためには、光強度をより大きくすること、具体的には、素子の外部からレーザ光を導入するのではなく、素子に一体集積する形で光源を内蔵することが有効である。本研究グループでは、2022 年の半導体レーザ国際会議において図 5 に示すような InP 基板上的 InGaAs/InGaAsP 量子井戸活性層からなるリングレーザの一部に強磁性金属を製膜したリングレーザにおいて、Co 層の磁化の反転によって時計回りと反時計回りの発振の切り替えを実現し報告した[5]。この実験結果では、リング共振器に半導体レーザ光源を集積した形であるため、外部の半導体レーザ光源からの光を導入する際の結合損失がなく、光を有効に活用できる。それにより、強磁性金属の光誘起加熱と磁化反転の読み出しの両立が可能になり、オンチップ光メモリの実現が可能になると考えられる。また、光源をリング共振器に集積することで素子全体の小型化が可能になる他、多数の集積化が可能になることから、シリコンフォトニクスにおける熱アシスト磁気記録における記録密度の向上に資すると考えられる。

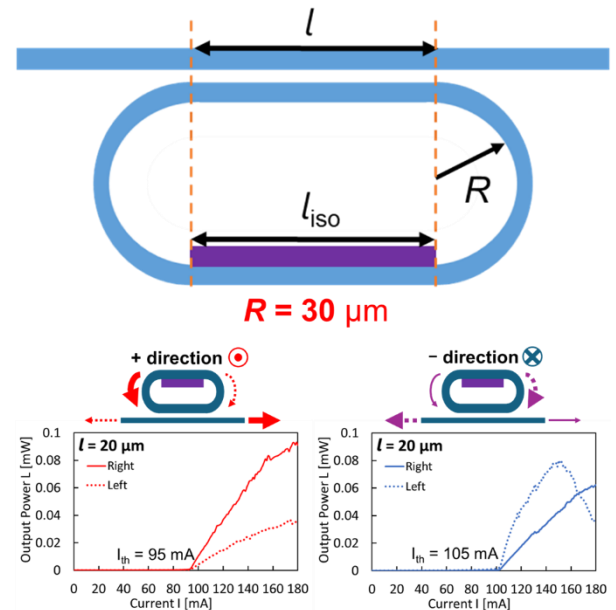


図 5 (上) InP 基板上的 InGaAs/InGaAsP 量子井戸活性層をベースとしたリングレーザと強磁性金属 Co 薄膜を集積した素子の模式図。(下) 外部磁界を反転させた時の電流と光強度の関係の測定結果[5]。

おわりに

本研究では、強磁性金属のプラズモンに基づくオンチップ光メモリの実現に向けて研究を行った。シリコン細線導波路上の強磁性金属 Co の光誘起加熱において 106 K/mW の光誘起加熱効率の実現と最高で 894 K の温度上昇を得た。また、シリコン細線導波路上の強磁性金属 FeCo の磁化反転の光学的な読み出しに成功した。今後の展望として、リング共振器レーザと強磁性金属プラズモンの一体集積化によるオンチップ光メモリの実現の可能性について述べた。

本研究成果は、電気信号によらずに光信号の強弱を制御する光スイッチや、強磁性金属や相変化材料等を加熱し、光信号を記憶するメモリの実現につながる。また、AI、バイオテクノロジー、化学など様々な分野との協業により、書き換え可能な光演算回路への搭載と AI チップへの応用、lab-on-a-chip における加熱機構の付加やオンチップ光センサへの応用が考えられる[6]。

強磁性金属プラズモンによるオンチップ光メモリの開発

Development of On-chip Optical Memories Based on Plasmonics Using Ferromagnetic Metals

用語解説

- *1 熱アシスト磁気記録 磁気記録（ハードディスク）
における記録密度向上のために開発された技術である。ディスク上の記録ビットとして、ディスクに垂直な方向に磁化しやすい強磁性金属である CoPt を用いることで、サイズを小さくしても磁化を保つように工夫しつつ、光を微小な領域に集光するプラズモンによって CoPt を局所的に加熱して磁化反転（記録）させやすくしたものである。
- *2 プラズモン 金属と誘電体の界面における自由電子の集団振動を伴う電磁波の伝搬
- *3 シリコンフォトニクス 主にシリコン基板上の微細な光導波路をベースとした光学全般を指す。電気配線の代わりとなる光配線、半導体レーザと電子回路の集積回路をトランジスタの作製技術を基にして実現を目指す研究分野。
- *4 lab-on-a-chip
化学実験における混合、反応、分離、検出の機能を微小なチップ上に実現した素子。
- *5 オンチップ光センサ
微小なチップの上で、ガス分子の濃度や吸着の様子、水溶液中のたんぱく質の濃度を光の伝搬や発光を通して検出するセンサ。

参考文献

- [1] C. Ríos, M. Stegmaier, P. Hosseini, D. Wang, T. Scherer, C. D. Wright, H. Bhaskaran and W. H. P. Pernice, *Nature Photon* **9**, 725–732 (2015).
- [2] M. T. Kief, and R. H. Victora, *MRS Bull.* **43**, 87 (2018).
- [3] 横山智弘、岩田太郎、「熱アシスト磁気記録 (HAMR) 技術開発と製品化およびその実用化」
2024 年第 85 回応用物理学会秋季学術講演会 17p-A22-4
- [4] N. Ota, T. Miyauchi, and H. Shimizu, *Sensors*, **21**, 1729060, (2021).
- [5] R. Oshikiri, Y. Kobayashi, and H. Shimizu, “Magnetically Switchable Semiconductor Microring Laser with TE-mode Waveguide Optical Isolator”, 2022 28th International Semiconductor Laser

Conference (ISLC),

DOI: 10.23919/ISLC52947.2022.9943434.

[6] 東京農工大学 2021 年 10 月プレスリリース「シリコン光回路とコバルト金属を組み合わせた超小型ヒータ～光集積回路の高密度化・高速化・高機能化に向けて～」

https://www.tuat.ac.jp/outline/disclosure/pressrelease/2021/20211021_01.html

関連文献

N. Ota, K. Shinohara, M. Hasumi and H. Shimizu, “Quantification of 288 K local photothermal heating and miniaturization in Si plasmonic waveguides integrated with resonators”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **62**, 042002 (2023).
H. Shimizu, K. Shinohara, and M. Hasumi, “Improvement of photothermal heating efficiency of Si plasmonic waveguide heaters with ring resonators”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **63**, 050904 (2024).

この研究は、令和 3 年度 S C A T 研究助成の対象として採用され、令和 4 ～ 6 年度に実施されたものです。