

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 12 日現在

機関番号：56101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22510131

研究課題名（和文） ナノサイズのリング共振器による光波長フィルタの開発

研究課題名（英文） Development of optical filters using nano-scale ring resonators

研究代表者

岡本 浩行 (OKAMOTO HIROYUKI)

阿南工業高等専門学校・制御情報工学科・准教授

研究者番号：60390506

研究成果の概要（和文）：我々は表面プラズモンポラリトンを利用したレーストラック型共振器を開発した。開発した共振器はトレンチ型の構造を適用し，レーストラックの曲線部分の半径は 500nm である。このサイズはこれまでに報告されたプラズモニック共振器の中では最も小さい。ただし，レーストラック形状とすることで共振器として重要なパラメータである Q 値が低下するため，これに対する対策としてレーストラック共振器を 2 つ並べる構造を提案した。提案した構造では Q 値は 1 つの場合と比較して 1.5 倍程度改善できることが明らかになった。

研究成果の概要（英文）：We have developed a plasmonic racetrack resonator. The trench structure is adopted for the resonator. The radius of the curved portion of the racetrack is 500 nm. The size of the resonator is the smallest size ever reported. However, the quality factor of the resonator decreases when the shape of the structure is racetrack. We have proposed the double racetrack resonator structure for improving the quality factor. The double racetrack resonator can increase the quality factor as 1.5 times.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2012 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学，マイクロ・ナノデバイス

キーワード：プラズモニック共振器，レーストラック構造，表面プラズモンポラリトン

1. 研究開始当初の背景

通信環境の急速な発展によるインターネット利用者の増大により通信トラフィックは急増している。基幹ネットワークにおける通信トラフィックは年率で 1.5～2 倍の増加となっている。しかし，現在の発光・受光素子を仲立ちとする電子回路では，動作速度や消費電力，発熱の問題により，増加する情報量に対応できる高速化を行うことは不可能

である。ネットワークの高速化に対応するために光のみでネットワークを構築するフォトニックネットワーク実現に向けて，光デバイスに関する様々な研究が進められている。フォトニックネットワークを構成する素子の一つとしてマイクロリング共振器がある。マイクロリング共振器は光素子の中でも波長を取り扱うことのできる光波長フィルタとして非常に重要な役割を担う。我々はマイ

マイクロリング共振器を光波長フィルタとして用いることで既存の集積回路と比較すると大幅な高速化・高集積化が可能となることを理論的に確認した。ただし、光デバイスのさらなる高集積化が必要となった場合、マイクロリング共振器のサイズを小さくすると損失が大幅に増大し、光波長フィルタとして使用できない。また素子サイズがナノサイズとなると、光の回折限界のため、導波光を用いてデバイスを動作させることは非常に難しい。光の回折限界の問題を解決するため、導波光の代わりにナノ領域に光エネルギーを伝搬させるための手法としてよく用いられる表面プラズモンポラリトンを利用することで、マイクロリング共振器の原理をそのままナノサイズのリング共振器に適用できる。しかし結合効率などの問題からナノサイズのリング共振器に関する報告はほとんどない。我々は数値解析を行い、リング形状ではなくレーストラック形状とすることで結合係数を大きくすることができ、効率的に結合できることを明らかにした。

2. 研究の目的

次に示す2つの項目を本研究の目的とする。

(1) ナノサイズのリング共振器（レーストラック形状）の開発を行う。開発を行う構造などは事前にシミュレーションなどにより解析を実施し、容易に作製できる構造とする。

(2) ナノサイズのリング共振器（レーストラック形状）の評価を実施し、作製した構造の光波長フィルタとしての特性を評価する。

3. 研究の方法

(1) レーストラック型共振器の最適な構造を求めるために時間領域差分 (FDTD) 法により、解析を行った。解析を行った構造を図1に示す。解析を行った結果、レーストラック型共振器の曲線部分の半径を1500nmとした場合、直線部分は1500nm、導波路およびレーストラック共振器の幅は100nm、深さは800nmとしたときに最も出力強度を大きくすることが明らかになった。

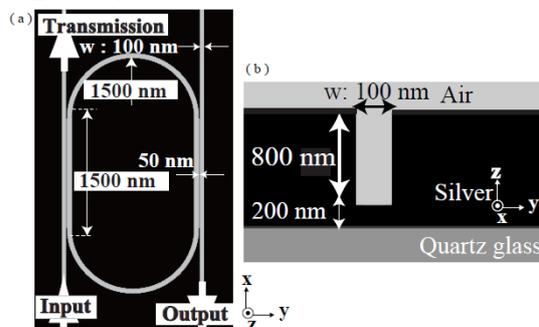


図1 解析に用いた構造 (a) x-y 平面, (b) y-z 平面

図2に図1に示す構造の波長特性を示す。

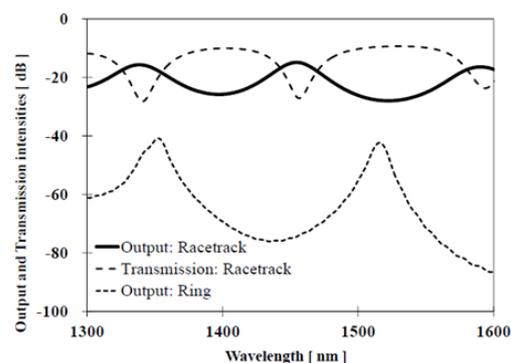


図2 プラズモニックレーストラック型共振器の波長特性

レーストラック共振器の出力強度のピーク波長は1340nm, 1460nmで出力強度はそれぞれ-16dB, -15dBである。この結果からリング形状の出力強度と比較するとレーストラック型共振器の出力強度は50倍程度増加することが明らかになった。

(2) ナノサイズのレーストラック型プラズモニック共振器は次の手順により作製した。まず石英ガラス基板に銀薄膜を生成する。次に集積イオンビーム加工により銀薄膜をレーストラック形状に掘る。この2つのステップにより構造の作製は可能である。図3(a)に作製したプラズモニックレーストラック共振器構造、図3(b)に結合部分を拡大した走査電子顕微鏡 (SEM) 像を示す。

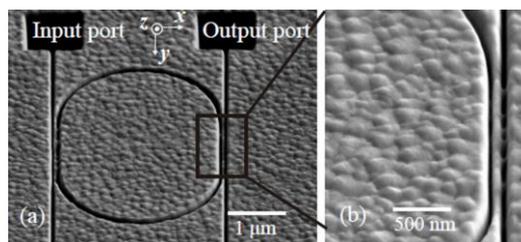


図3 SEM像 (a) レーストラック共振器 (b) 結合部分を拡大

図3に示すレーストラック型共振器の曲線部分の半径は1500nm、直線部分は1500nmとした。導波路およびレーストラック共振器の幅は100nm、深さは500nmとした。図1に示す構造は通信波長域1550nm付近における最適な構造であり、まず評価を行うのは可視光域である600nm付近の波長とするため、設計を行った構造と異なる値で構造を作製した。レーストラック共振器と導波路の間隔は50nmとした。入出力ポートは一辺100nmの正方形であり、深さは500nmとした。

4. 研究成果

(1) FDTD 法により求めた図 3 に示す構造の波長特性を図 4 に示す。

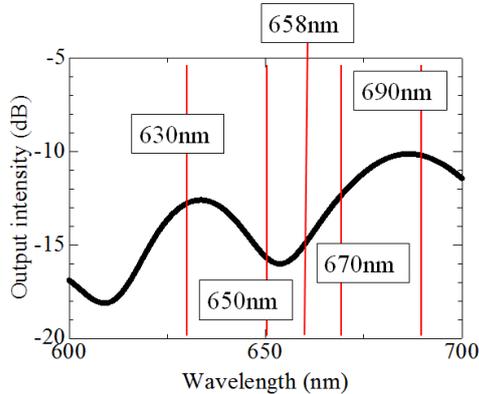


図 4 図 3 に示す構造の波長特性

図 4 の出力強度のピーク波長は 633nm, 686nm で出力強度はそれぞれ -12dB, -10dB である. この構造に半導体レーザを用いて波長 630nm, 650nm, 658nm, 670nm および 690nm の光を入射したときの光学顕微鏡像を図 5 に示す.

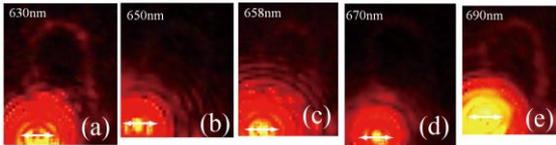


図 5 評価時の光学顕微鏡像 (a) 630nm, (b) 650nm, (c) 658nm, (d) 670nm, (e) 690nm

図 5 より波長 630nm および波長 690nm を入射したときにレーストラック型共振器の形状を確認することができることから, これらの波長入射時に SPPs が共振器内を伝搬していると考えられる. その他の波長の場合はレーストラック型共振器の形状は確認できないことから SPPs は伝搬していないと考えられる. この結果と図 4 に示す波長特性を比較すると共振する波長付近 (633nm, 686nm) でレーストラック型共振器内を SPPs が伝搬しており, 実験結果と解析結果は良く一致していると考えられる. よって, サイズが $3\mu\text{m}$ 程度のプラズモニックレーストラック型共振器の開発に成功したと考えられる.

(2) 次に本研究の目的であるナノサイズのプラズモン共振器の開発のため, レーストラックの曲線部分の半径が 500nm の共振器の作製を行った. 図 6 に作製したプラズモニックレーストラック共振器構造と結合部を拡大した走査電子顕微鏡 (SEM) 像を示す. また図 7 に図 6 に示す構造の波長特性を FDTD 法により求めた結果を示す. ピーク波長は 630nm 付近であり, He-Ne レーザの発振波長である 633nm 付近であることから, He-Ne レーザを用いて評価を実施した.

レーザを用いて評価を実施した.

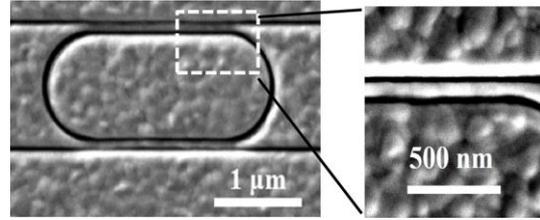


図 6 曲線部の半径が 500nm のプラズモニックレーストラック型共振器

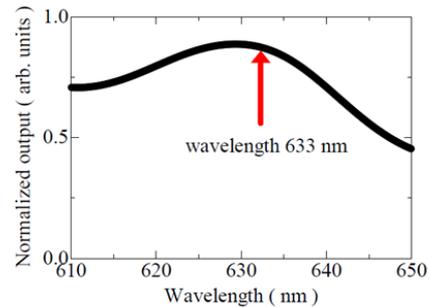


図 7 図 6 に示す構造の波長特性

図 8(a) レーストラック型共振器, 図 8(b) に評価時の光学顕微鏡像をそれぞれ示す. 図 8(b) にはレーストラック構造を確認できることから SPPs が共振器内を伝搬していると考えられる. つまり波長 633nm の光を入射したことでプラズモニックレーストラック型共振器内を SPPs が共振していると考えられる. 図 7 に示す波長特性と比較するとピーク波長である 630nm 付近の波長を入射することで共振していることから, 実験結果と解析結果は良く一致していると考えられる.

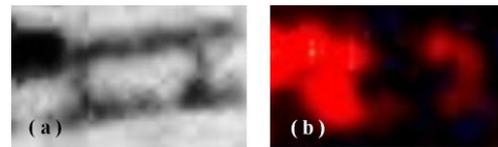


図 8 (a) プラズモニックレーストラック型共振器光学顕微鏡像 (b) 波長 633nm 入射時のプラズモニックレーストラック型共振器光学顕微鏡像

(3) ナノサイズのプラズモニックレーストラック型共振器の開発はできたが, 共振器の特性を示す重要なパラメータである Q 値はレーストラック型とすることで大幅に低下することが明らかになっており, 何らかの改善が必要となった. そこで出力強度は低下させず, Q 値のみ改善できる構造としてダブルレーストラック共振器を提案した. 図 9 にダブルレーストラック構造を示す.

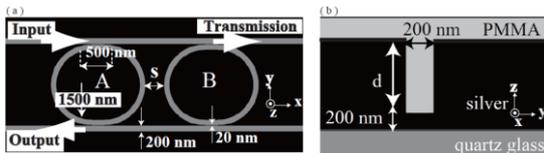


図9 ダブルレーストラック構造 (a) x-y 平面
(b) y-z 平面

図9に示す構造の出力強度は次の式で与えられる。

$$\text{Output} = \left| A + \frac{AB^2 e^{-i2\theta}}{1 - A^2 e^{-i2\theta}} \right|^2$$

$$\text{ここで } A = \frac{-\kappa^2 e^{-i\phi/2}}{1 - t^2 e^{-i\phi}}, \quad B = t + \frac{-\kappa^2 t e^{-i\phi}}{1 - t^2 e^{-i\phi}}$$

$$, \quad t = \sqrt{1 - \kappa^2}, \quad \theta = \beta(s + 2r + 2L),$$

$$\phi = 2\pi(r + L)\beta \quad \text{である。}$$

レーストラック共振器の曲線部分の半径は1500 nm, 直線部分の長さは500 nmとした。sが600 nmの場合に式から求めたQ値は65となる。次にFDTD法により3次元での解析を行った。導波路およびレーストラックの幅と深さはそれぞれ200 nmと700 nm, 導波路とレーストラックの間隔は20 nmとした。図10に3次元FDTD法により求められたOutputポートにおける出力の波長特性を示す。FDTD法により求められたQ値は57であり, シングルレーストラック共振器構造と比較してQ値は1.5倍高くなる。sを変化するとレーストラック共振器Bからレーストラック共振器Aに結合されるSPPの位相差が変化する。sが600 nmの場合に出力が小さくなる波長である1560 nmと1610 nm付近ではSPPはOutputポートへの出力を弱めあうように結合する。一方, 波長1580 nmでは出力を強めあうよう結合するため, 出力は大きくなる。

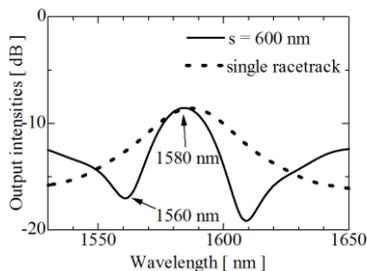


図10 ダブルレーストラック構造波長特性

図11にs = 600 nmで入力波長を変えたときの電界強度分布を示す。図11(a)は波長1560 nmおよび図11(b)は波長1580 nmの光を入射したときの電界強度分布である。波

長1560 nmの場合は出力側導波路からレーストラック共振器AにSPPが結合する部分でOutputポートへの出力が小さくなっており, 波長1580 nmの場合はOutputポートへの出力が大きくなっていることが分かる

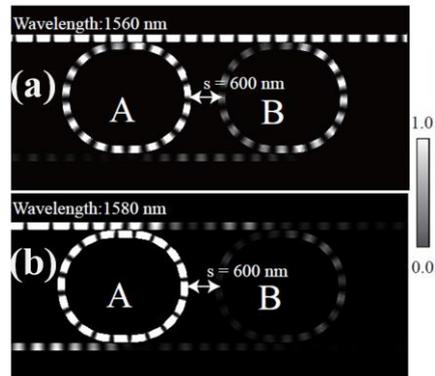


図11 ダブルレーストラック電界強度分布
(a) 波長1560 nm, (b) 波長1580 nm

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① Hiroyuki Okamoto, Sei Onishi, Mai Kataoka, Kenzo Yamaguchi, Masanobu Haraguchi, and Toshihiro Okamoto “Characteristics of Double Plasmonic Racetrack Resonator to Increase Quality Factor”, *Optical Review*, 査読有り, Vol. 20, pp. 26-30 (2013).
DOI: 10.1007/s10043-013-0005-6
- ② Hiroyuki Okamoto, Kenzo Yamaguchi, Masanobu Haraguchi, and Toshihiro Okamoto “Experimental demonstration of plasmonic racetrack resonators with a trench structure”, *Applied Physics B - Lasers and Optics*, 査読有り, Vol. 108, pp. 149-152 (2012).
DOI: 10.1007/s00340-012-5081-y
- ③ Hiroyuki Okamoto, Kenzo Yamaguchi, Masanobu Haraguchi, Toshihiro Okamoto, and Cheng Sun, “Design of plasmonic racetrack resonators with a trench structure”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 査読有り, Vol. 50, 092201 (2011).
DOI: 10.1143/JJAP.50.092201

[学会発表] (計 11 件)

- ① 岡本浩行, “プラズモニックレーストラック共振器の作製”, 第73回応用物理学会学術講演会, 2012年9月, 松山
- ② Hiroyuki Okamoto, “Development of

plasmonic racetrack resonators with a trench structure”, SPIE 8457, Plasmonics: Metallic Nanostructures and Their Optical Properties X, 845723, Aug., 2012, United States of America.

- ③ Hiroyuki Okamoto, “Fabrication of plasmonic racetrack resonators with a trench structure”, International Conference on Nanophotonics 2012 (ICNP2012), May 2012, China.
- ④ 岡本浩行, ”ダブルレーストラック共振器構造の評価”, 第59回応用物理学関係連合講演会講演会, 2012年3月, 新宿
- ⑤ Hiroyuki Okamoto, “Characteristics of plasmonic racetrack resonators in a ditch structure”, The 5th International conference on Surface Plasmon Photonics (SPP5), May. 2011, Korea.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡本 浩行 (OKAMOTO HIROYUKI)
阿南工業高等専門学校・制御情報工学科・
准教授
研究者番号：60390506

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

松井 真二 (MATSUI SHINJI)
兵庫県立大学・高度産業技術研究所・教授
研究者番号：00312306

原口 雅宣 (HARAGUCHI MASANOBU)
徳島大学・ソシオテクノサイエンス研究
部・教授
研究者番号：20198906

山口 堅三 (YAMAGUCHI KENZO)
香川大学・工学部・材料創造工学科・助教
研究者番号：00501826