

## 波長多重通信用ナノスケール波長フィルタの開発

研究代表者 岡本 浩 行 阿南工業高等専門学校 制御情報工学科 准教授  
 共同研究者 山口 堅 三 香川大学 工学部 助教

### 1 はじめに

情報通信技術の発展やインターネットのインフラストラクチャとしての重要性増加により、通信トラフィックは増大し続けている[1]。また電力供給に関する問題から情報通信機器の低電力化が求められるようになってきている[2]。情報通信網の高速化・低電力化を実現する方法として光による通信があり、その技術の1つに光波長多重通信技術がある。光波長多重通信技術には多数の光デバイスが必要であり、その中でも波長を取り扱うことのできる光波長フィルタは非常に重要な役割を持つ。そのため、光波長フィルタに関する研究は活発に行われており、既に数十 $\mu\text{m}$ のサイズで実現されようとしている。しかし、光波長多重通信技術に用いられる光集積回路の高機能化実現に向けて、素子のさらなる微小化が求められている。しかし、現在実現されようとしている素子にとって光の波長を超える微小化は光の回折限界により実現は難しい。そこで光の回折限界を超えることのできる表面プラズモンポラリトン(SPPs)をデバイスに用いることで光の波長を超えるデバイスの微小化が可能となる。SPPsを用いた導波路や共振器の研究は活発に行われており、様々な構造のデバイスが提案されている[3]。フィルタとして用いられる共振器についても多数の構造が提案され、作製および評価されている。共振器としては高いQ値を持つウィスパーリングギャラリーモードを利用したリング共振器やディスク共振器が提案され[4-8]、数十 $\mu\text{m}$ のサイズで作製および評価されている。ただし、これらの構造はさらなる微小化が必要である。また構造の微小化により、結合部分が短くなるため結合強度が低下する。よって微小化とともに発生する結合強度の低下を改善する必要がある[9]。

我々はサイズの微小化を実現でき、また微小化に伴う結合強度の低下に対応できる構造としてレーストラック型を提案し、最適な構造を求めるために時間領域差分(FDTD)法により、数値解析を実施した。数値解析により求められた構造について集束イオンビーム技術を用いて作製し、その構造の評価を実施した。また、レーストラック共振器の問題点であるQ値について、改善できる構造としてダブルレーストラック構造を提案し、FDTD法により、評価を実施した。

### 2 レーストラック型共振器の設計

図1にFDTD法により解析を行った構造を示す。レーストラック型共振器は作製に複雑な処理を必要としないトレンチ構造を用いる。

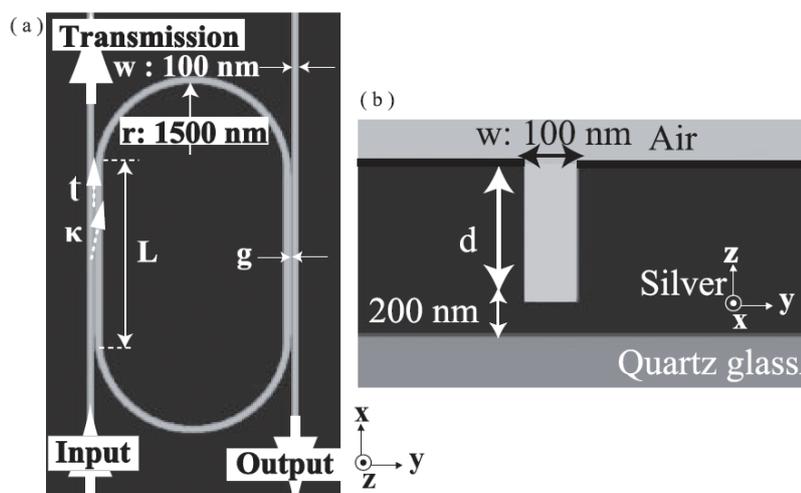


図1 レーストラック共振器構造 (a)  $x-y$  平面, (b)  $y-z$  平面

レーストラック共振器および導波路の屈折率は1.0、基板の屈折率は石英ガラスと同じ1.45とした。その他の領域についてはドルーデモデルで表現される銀とした。ドルーデモデルのパラメータは周波数が無限大のときの比誘電率は6.0、プラズマ角周波数は $1.5 \times 10^{16} \text{ rad/s}$ 、衝突周波数は $7.7 \times 10^{13} \text{ rad/s}$ とした。レーストラック共振器および導波路の幅は100 nm、レーストラック共振器の曲線部分の半径は1500 nmとした。石英ガラスと構造の間隔は200 nmである。また、レーストラック共振器と導波路の間隔 (g) は金属のスキンドepsより短くしなければいけない。導波路の幅が100 nm波長が1550 nmの場合、スキンドepsは21.3 nmとなるため、gの値は20 nmとした。

### 2-1 トレンチ構造の深さ

トレンチ構造を伝搬するトレンチチャネルプラズモンポラリトン(CPPs)は構造の深さに影響される。また、効率を高くするため損失を可能な限り削減する必要がある。高次のトレンチCPPsは他のSPPsモードと結合しやすく、損失増大の原因となることから導波路は基本モードのみ伝搬できるように設計する必要がある。我々は導波路の幅が100 nmの場合に基本モードのみ伝搬できる深さを求めた。その結果導波路の幅が100 nmの場合に基本モードのみ伝搬できる深さは600–1800 nmとなる。図2にトレンチCPPsを10 μm伝搬させたときの損失と深さの関係をFDTD法により求めた結果を示す。深さが500 nmより浅い場合は損失が大きい。深さが600 nmを超えると損失が小さくなる。これは計算により求めた結果と等しい。これらの結果より、トレンチ構造の深さは800 nmとした。

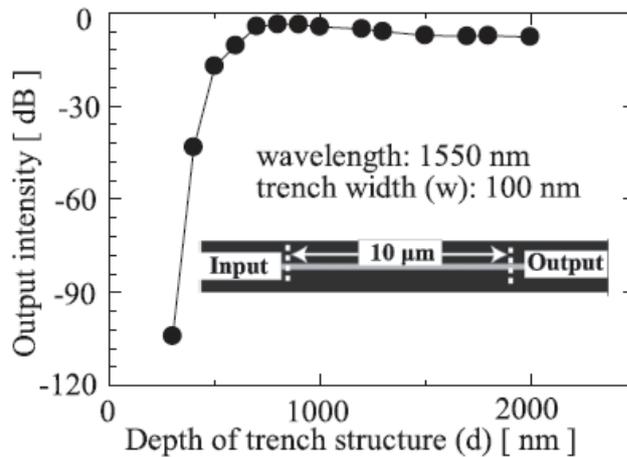


図2 トレンチ構造の深さと損失の関係

### 2-2 レーストラック共振器の直線部分の長さ

レーストラック共振器の結合係数はレーストラック共振器の直線部分の長さの影響を受ける。図1 (a) に示すレーストラック共振器の直線部分Lを長くすることで導波路とレーストラック共振器の結合係数は大きくなる。しかし、Lを長くすると結合領域およびトレンチCPPsの伝搬に伴う損失が増大する。適切な長さを求めるため、図3に示す構造を用いてLの長さを0–3000 nmまで変化させて、Outputにおける電界強度を確認した。導波路の幅は100 nm、トレンチ構造の深さは800 nm、2本の導波路の

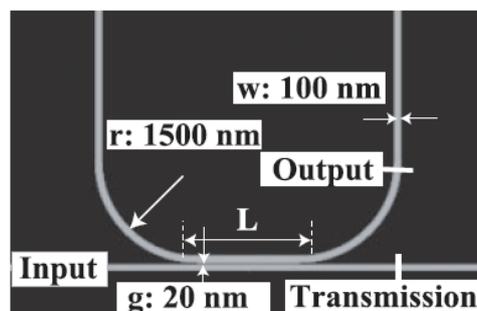


図3 レーストラック共振器の直線部分の長さとの結合係数の関係を調査するための構造

間隔は20 nmとした。図4にOutputでの出力と結合係数、透過係数およびq（結合部分における損失を除いた割合）を示す。レーストラック共振器の直線部分が0-1500 nmの範囲では結合係数および出力強度はLが長くなるに伴い増加している。また透過係数は減少している。一方、Lが1500 nmを超えると、結合係数および出力強度はほぼ一定の値となる。よってLの値を1500 nmとした。

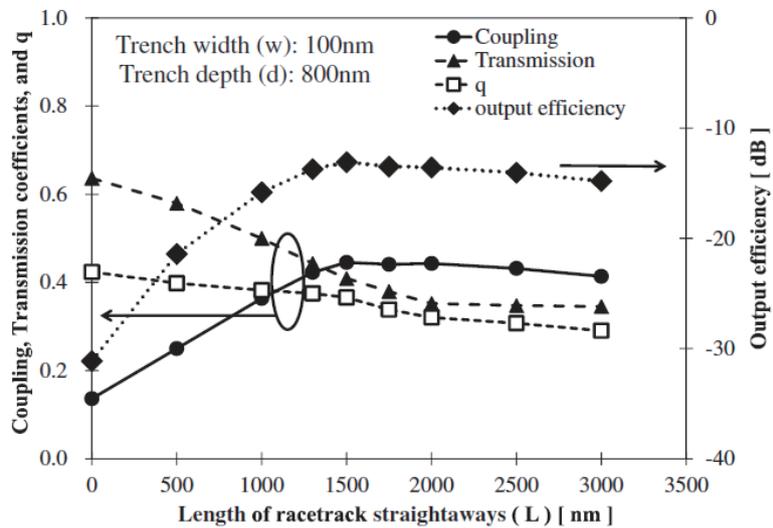


図4 レーストラック共振器の直線部分の長さとお出力強度の関係

### 2-3 設計したレーストラック共振器の波長特性

設計したレーストラック共振器 (L : 1500 nm, d : 800 nm) の波長特性をFDTDにより求めた。図5にレーストラック共振器の波長特性を示す。実線および破線はレーストラック共振器の出力強度と透過強度をそれぞれ示す。点線は半径1500 nmのリング共振器における出力強度を示す。レーストラック共振器の出力は波長1340 nm, 1460 nm, 1590 nmでピークとなり、それぞれの出力は-16 dB, -15 dB, -16 dBとなる。一方リング共振器の出力は1350 nm, 1520 nmでピークとなり、それぞれの出力は-42 dB, -45 dBである。この結果からリング共振器と比較して同じ程度のサイズのレーストラック共振器の出力は30 dB程度の改善が可能であることが分かる。リング共振器の波長1520 nmにおけるQ値は84である。レーストラック共振器の波長1460 nmにおけるQ値は38である。リング共振器と比較して、レーストラック共振器のQ値は大きく低下する。これは直線部分と曲線部分におけるモードの不一致や直線部分における損失の増大が原因であると考えられる。

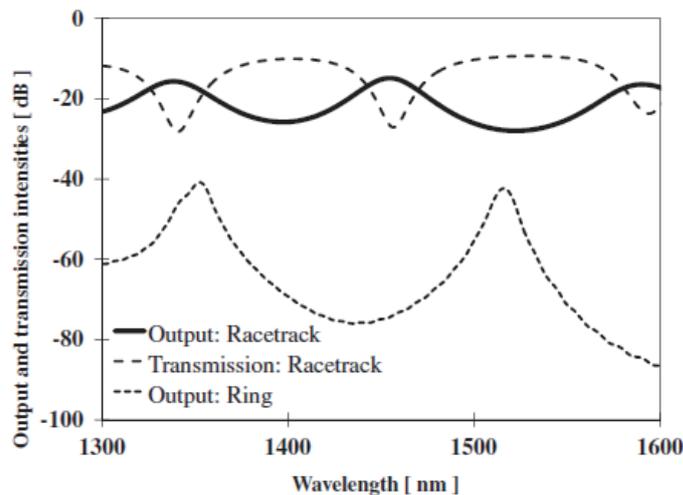


図5 設計したレーストラック共振器の波長特性

### 3 トレンチ型レーストラック共振器構造の作製

トレンチ型構造の特徴として作製の手順が数ステップで作製可能であり、トレンチ型レーストラック共振器を次に示す手順で実際に作製した。最初に石英ガラス基板に銀を1000nm程度蒸着する。次にFIBを用いて銀の層をレーストラック形状に掘る。図6に作製したトレンチ型レーストラック共振器を示す。レーストラック共振器および導波路の幅は100nm、深さは500nmとした。またレーストラック共振器の曲線部分の半径は1500nm、直線部分の長さは1000nm、レーストラック共振器と導波路の間隔は50nmである。可視光領域において評価を実施するため、作製した構造は可視光領域においてトレンチCPPsを伝搬できる構造とした。また、入力および出力ポートとして1000nmの正方形を作製した。

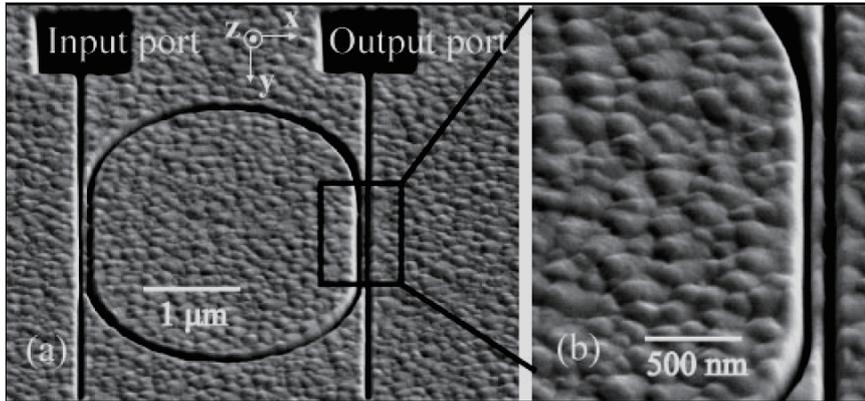


図6 作製したトレンチ型レーストラック共振器

### 4 作製した構造のシミュレーション

作製したトレンチ型レーストラック共振器構造についてFDTD法により可視光領域における波長特性を求めた。図7(a)に出力ポートにおける出力強度の波長特性を示す。波長特性については波長638nmにピークを持つ。波長638nmのQ値は62である。評価では波長633nmの光を用いるため、図7(b)、(c)は波長633nmの光の偏光状態をそれぞれ(b)TM、(c)TEとした光を入力ポートに入射した

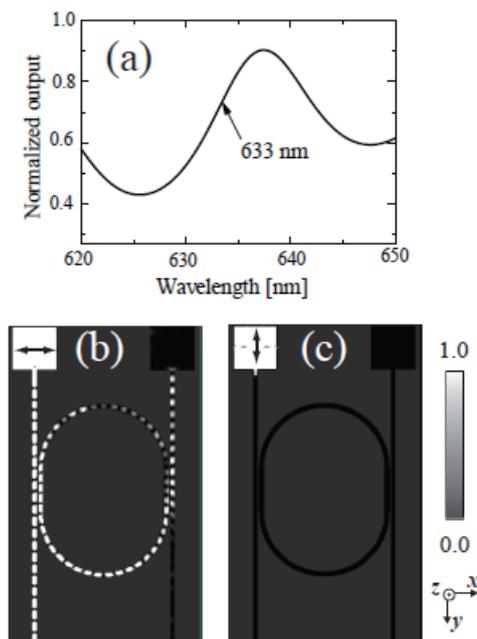


図7 作製した構造のシミュレーション結果 (a)波長特性, 波長633nmの光を入射した場合の電界強度分布(b)TM, (c)TE

場合の電界強度分布を示す。波長特性では波長 633 nm ではピークではないが、図 7 (b) からはトレンチ CPPs がレーストラック共振器内を伝搬し、出力側の導波路に結合している。この結果より、偏光状態を TM とした波長 633 nm の光を用いた場合、作製したレーストラック共振器がプラズモン共振器として動作すると考えられる。TE 偏光の光を入射した図 7 (c) では、入力ポートからトレンチ CPPs が導波路に伝搬しておらず、レーストラック共振器にもトレンチ CPPs は伝搬していない。評価では入力する光の偏光状態を TM, TE で切り替え、その結果を比較することで作製した構造がプラズモン共振器として動作することの確認が可能である。

## 5 レーストラック共振器の評価

波長 633 nm の光を用いて、作製したレーストラック共振器がプラズモン共振器として動作することを確認するため、評価を実施した。図 8 に示す光学系を用いて評価を行った。光源として He-Ne レーザを用いて、偏光状態をポーライザで制御する。偏光状態を制御された光は偏波保持ファイバーによりレーストラック共振器の入力ポートに照射される。

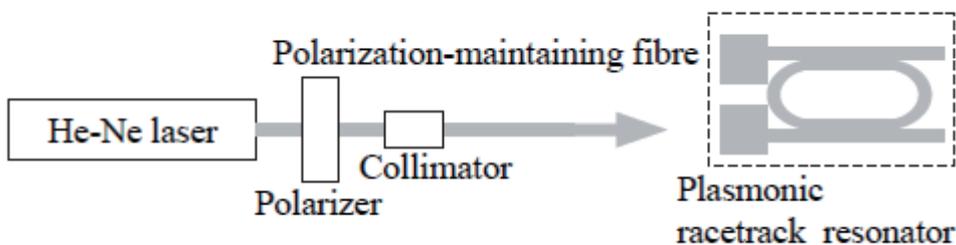


図 8 レーストラック共振器の評価に用いた光学系

図 9 に評価時の光学顕微鏡像 (a) はレーストラック共振器、(b) は TM 偏光入射、(c) は TE 偏光入射をそれぞれ示す。図 9 (b) に示す TM 偏光入射の場合、レーストラック形状を確認することができる。これはレーストラック共振器内で伝搬しているトレンチ CPPs からのストリーク光を捉えた結果であると考えられる。つまり、作製したレーストラック共振器はプラズモン共振器として動作していると考えられる。一方 TE 偏光入射の場合、レーストラック形状は確認できない。この結果は図 7 (c) のシミュレーション結果とよく一致しており、作製したトレンチ型レーストラック共振器はプラズモン共振器として動作すると考えられる。

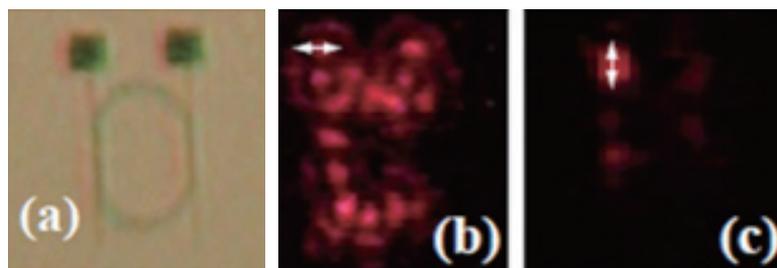


図 9 評価時の光学顕微鏡像

(a) レーストラック型共振器, (b) TM 入射時, (c) TE 入射

## 6 ナノサイズのトレンチ型レーストラック共振器作製

### 6-1 構造の作製

図 6 に示す構造はレーストラック共振器の曲線部分の半径は 1500 nm であり、これはシリコンマイクロリング共振器で実現されているサイズである。よってさらなる微小化が必要であるため、レーストラック

共振器の曲線部分の半径が500 nmの構造を作製した。図10に作製したレーストラック共振器を示す。作製方法については図6に示す構造と同じ方法で作製した。レーストラック共振器および導波路の幅、深さは100 nm、500 nm、レーストラック共振器の直線部分の長さは1000 nmとした。

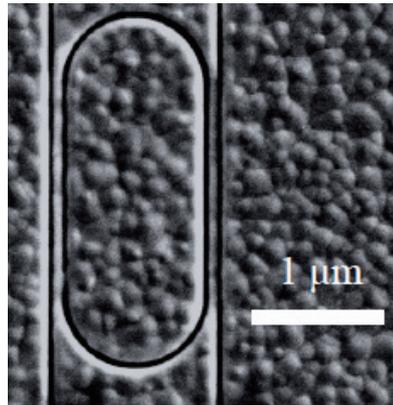


図10 ナノサイズのトレンチ型レーストラック共振器

### 6-2 構造のシミュレーション

作製した構造の特性を調査するため、FDTD法を用いて可視光領域におけるシミュレーションを行った。図11にシミュレーションを行った構造 (a) x-y平面, (b) y-z平面, (c) 波長特性, (d) 波長633 nmの光を入射したときの電界強度分布をそれぞれ示す。図11(c)に示す波長特性ではピーク波長は630 nmである。評価では波長特性のピーク波長ではないが波長633 nmを用いる。図11(d)に波長633 nmの光を入射した場合の電界強度分布を示す。図11(d)からトレンチCPPshはレース

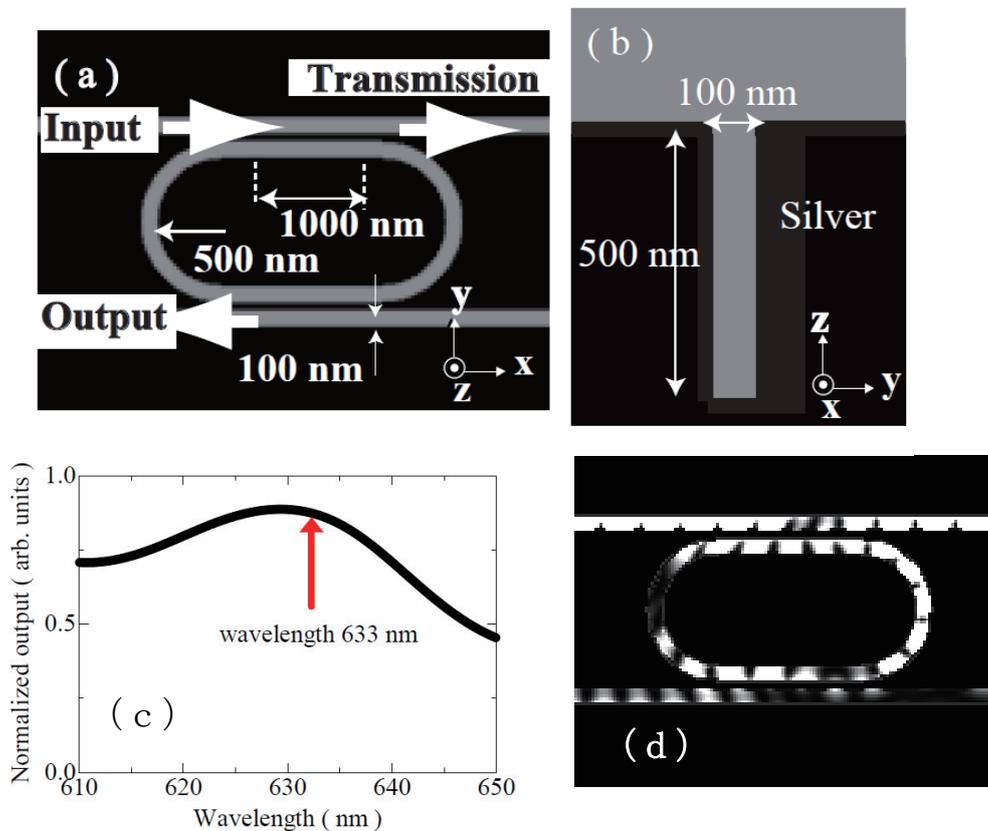


図11 レーストラック共振器構造 (a) x-y平面, (b) y-z平面  
(c) 波長特性, (d) 波長633 nmの光を入射した場合の電界強度分布

トラック共振器内を伝搬し、出力側の導波路に結合されている。よって、作製したレーストラック共振器はプラズモン共振器として動作すると考えられる。波長630 nmにおけるQ値については30以下であり、レーストラックの曲線部分の半径が1500 nmの構造と比較すると大幅に低下している。これは半径を小さくすることで放射損失などによる損失が増大したことが原因であると考えられる。Q値については何らかの改善が必要である。

### 6-3 構造の評価

作製した構造についてプラズモン共振器として動作することを確認するため、波長633 nmの光を用いて評価を行った。図12に評価に用いた光学系を示す。光源はHe-Neレーザを用い、先端を先鋭化したファイバーにより入力ポートに入射することで評価を実施した。

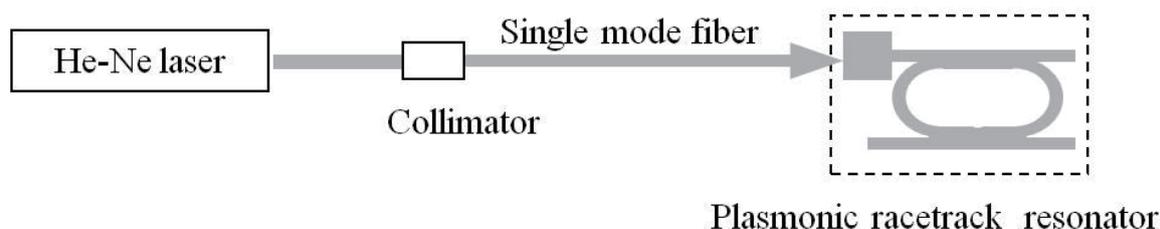


図12 ナノサイズのレーストラック共振器の評価に用いた光学系

図13に評価時の光学顕微鏡像(a)作製したレーストラック共振器、(b)波長633 nmの光を入射した時を示す。図13(b)ではレーストラック形状を確認できる。これはレーストラック共振器内を伝搬するトレンチCPPsからのストリーク光であると考えられる。よって、作製したナノサイズのレーストラック共振器はプラズモン共振器として動作していると考えられる。

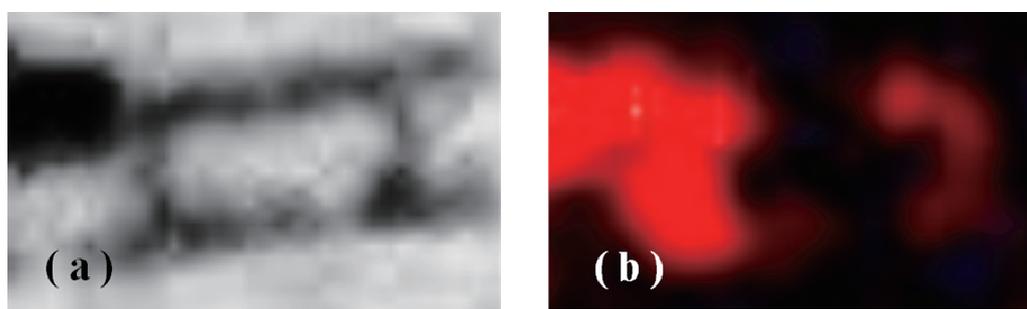


図13 ナノサイズのレーストラック共振器像評価時の光学顕微鏡像

(a) ナノサイズレーストラック共振器、(b) 波長633 nmを入射した時

## 7 Q値の改善

トレンチ型のレーストラック共振器についてFDTD法を用いたシミュレーション結果より、レーストラック共振器はQ値が低下するという問題がある。これは直線部分と曲線部分におけるモードの不一致や直線部分における損失の増大が原因であると考えられる。さらにナノサイズの場合は放射損失などの損失が増大するため、さらにQ値は低下する。Q値は共振器にとって重要なパラメータであり、デバイスとして用いるためには改善が必要である。Q値を改善するため、図14(a) x-y平面、(b) y-z平面にそれぞれ示す構造についてFDTD法を用いて評価を行った。評価では二つのレーストラック共振器構造の間隔(s)を360-680 nmの範囲で変化させてsがQ値に与える影響を確認した。

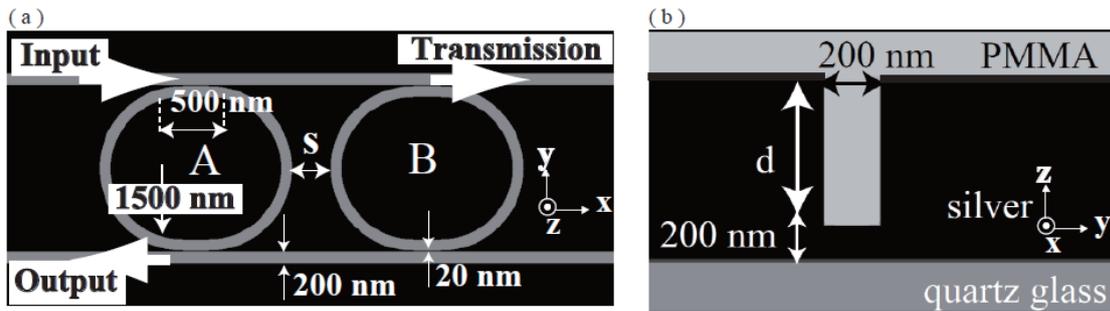


図14 Q値改善のためのダブルレーストラック構造

図15に二つのレーストラック共振器構造の間隔 ( $s$ ) と波長特性で波長1550 nm付近のピーク波長におけるQ値の関係を示す。実線がダブルレーストラック構造のQ値であり、破線は1つのレーストラック共振器構造のQ値である。 $s$ の値が600 nmの場合にQ値は57であり、1つのレーストラック共振器のQ値の1.8倍程度の値となった。 $s$ の値が400–520 nmのQ値は17である。

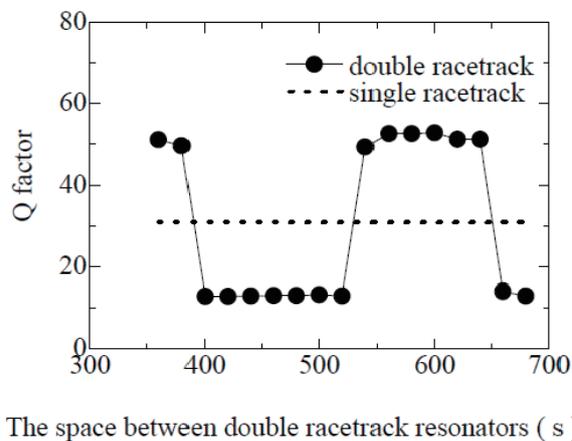


図15 Q値とダブルレーストラック共振器間隔の関係

図16に  $s$ の値が600 nmのダブルレーストラック共振器構造の波長特性を実線で、1つのレーストラック共振器の波長特性を破線で示す。ダブルレーストラック共振器と1つのレーストラック共振器の出力強度はほぼ同じで-7 dB程度である。またダブルレーストラック共振器の波長特性は波長1560 nmおよび1610 nm付近でディップを持つ。このようなディップが生じることでダブルレーストラック共振器のQ値が高くなる。

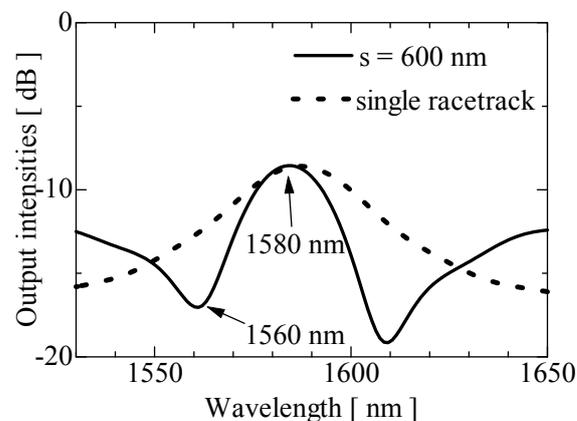


図16  $s = 600$  nmの時のダブルレーストラック共振器構造の波長特性

## まとめ

本研究では、波長多重通信に用いられるナノスケールの波長フィルタとしてトレンチ構造のナノプラズモニックレーストラック共振器開発を目的として研究を実施した。まず、通信波長帯域においてレーストラック共振器曲線部分の半径が1500nmの構造の結合効率が最も高くできる構造について、FDTD法を用いて解析を行った。解析の結果、トレンチの深さが800nm、レーストラック共振器の直線部分の長さが1500nmの時に最も結合効率を高くできることを明らかにした。次に設計した構造を実験するに当たり可視光領域での実験が効率良く行えることから、同じ設計手法を用いて設計した可視光領域（波長600nm付近）における最適な構造を設計し、作製した。作製した構造はトレンチの深さは500nm、レーストラック共振器の直線部分の長さは1000nmとした。作製した構造について、波長633nmの光の偏光状態を制御した光を入射することでプラズモン共振器として動作することを確認した。次にナノスケールにおけるプラズモニックレーストラック共振器（レーストラック共振器の直線部分の半径は500nm）の開発を行い、波長633nmの光を用いてプラズモン共振器として動作することを確認した。プラズモニックレーストラック共振器の問題は低いQ値であり、実際に波長多重通信で用いる場合には改善が必要である。そのため、Q値を改善する構造としてダブルレーストラック共振器構造を提案し、FDTD法により特性の評価を行った。解析の結果、ダブルレーストラック共振器構造はQ値を1.8倍程度改善でき、結合効率は1つのレーストラック共振器とほぼ同じであることが明らかになった。

本研究では数値解析を用いて可視光領域において適切な設計のナノスケールプラズモニック共振器開発を行い、波長633nmの光を用いてプラズモン共振器として動作することを確認した。しかし、波長多重通信で用いられている通信波長領域での評価は行っていない。通信波長領域については数値解析により評価を実施し、通信波長領域における適切な設計のプラズモニックレーストラック共振器は通信波長領域においてプラズモン共振器として動作することを明らかにしている。本研究で作製・評価されたナノスケールプラズモニックレーストラック共振器は従来の波長フィルタと比較して1/100以下の面積であり、この構造を波長フィルタとして用いることで、光集積回路の集積密度が向上することが可能であり、高機能光集積回路の実現が可能であると考えられる。

## 【参考文献】

- [1] 総務省, "我が国のインターネットにおけるトラフィック総量の把握", 報道資料(2011).
- [2] K. Sato et al., J. Opt. Commun. Netw., Vol. 1, A81 (2009).
- [3] 高原淳一, 応用物理, 第80巻, 772 (2011).
- [4] S. Randhawa et al., Appl. Phys. Lett., 98, 161102 (2011).
- [5] B. Min et al., Nature, 457, 455(2009).
- [6] V. S. Volkov et al., Nano Lett., 7, 880 (2007).
- [7] Z. Han, Photon. Nanostr. Fundam. Appl., 8 pp. 172-176 (2010).
- [8] X. Wang et al., J. Appl. Phys., 107 124517 (2010).
- [9] T. Holmgaard et al., Opt. Express, 17, 2968 (2009).

## 〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
Experimental demonstration of plasmonic racetrack resonators with a trench structure	Applied Physics B	2012年(accepted)
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
レーストラック構造におけるプラズモン共振器の開発	平成23年度電気関係学会四国支部連合大会	2011年9月
溝型プラズモン共振器の設計	応用物理学会 中国四国支部 2011年度支部学術講演会	2011年7月
Design of plasmonic racetrack resonators	Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 50,	2011年7月

with a trench structure	092201 (2011)	
Characteristics of plasmonic racetrack resonator in a trench structure	International Conference on Nanophotonics 2011	2011年5月
Characteristics of plasmonic racetrack resonators in a ditch structure	International conference on Surface Plasmon Photonics (SPP5)	2011年5月