

機関番号：14401

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360032

研究課題名 (和文) プラズモニックエッジ構造の光超集束による新光機能素子

研究課題名 (英文) Novel Plasmonic Functional Device by Superfocusing in Edge Structures

研究代表者

高原 淳一 (TAKAHARA JUNICHI)

大阪大学・工学研究科・教授

研究者番号：90273606

研究成果の概要 (和文)：

プラズモニック導波路は金属を用いた光導波路であり、光の回折限界よりずっと微小な領域での光伝送など誘電体光導波路では不可能な機能を実現できる。金属薄膜は最も基本的なプラズモニック導波路である。本研究では金属薄膜を用いて超集束、分散制御によるスローライトや負屈折などの新しい光機能へとつながる現象を見出し、実際に受動機能デバイスを実現した。将来はナノ空間での非線形光学デバイスの効率向上に応用できる。

研究成果の概要 (英文)：

A plasmonic waveguide is an optical waveguide using metal. We are able to realize unique function such as nano-optical waveguide beyond diffraction limit of light which limits dielectric optical waveguide. In this study, we have investigated novel functions of plasmonic waveguide, superfocusing, slow light and negative refraction that are applicable to new functional devices. We have fabricated passive functional plasmonic devices based on a metal film. We are able to utilize them for high efficient nonlinear optical devices in nano-scale.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	6,900,000	2,070,000	8,970,000
2009年度	5,400,000	1,620,000	7,020,000
2010年度	2,000,000	600,000	2,600,000
年度			
年度			
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

研究分野：ナノフォトニクス

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 応用光学・量子光工学

キーワード：プラズモニクス、表面プラズモンポラリトン、プラズモニック導波路、超集束、スローライト、ロングレンジ表面プラズモン、負屈折

1. 研究開始当初の背景

光学顕微鏡の分解能や光回路の微細化は回折限界によって制限される。高屈折率のシリコン光導波路などを用いても光導波路の光ビーム径の限界は 100nm オーダーであり、ナノオーダーの光ビーム径の実現は困難である。我々は 1997 年に負誘電体 (金属) 円柱を伝搬する表面プラズモンポラリトン

(Surface Plasmon Polariton: SPP) を用いると、光ビーム径を回折限界を超えていくだけでも小さくできることを始めて指摘し、光回路の超微細化に応用できることを世界に先駆けて提案した (J. Takahara et al.: Optics Letters, 22, p. 475 (1997))。現在、金属ナノ構造のフォトニクスはプラズモニクスとよばれ世界的に研究が盛んになっている。と

はいえ、プラズモニクスでは微細金属孔における光の異常透過、金属微粒子対などへの強い電場集中による表面増強ラマン散乱分光など特定のトピックスに興味を集中しており、光デバイスへの応用は導波路を除くと少ない。

我々はプラズモニック導波路によるナノ空間の光伝送を研究してきたが、最近T字型分岐の研究において興味深い現象を見出した。それは分岐の交点を金属でふさぐと透過が共鳴的に増加するという予想に反する結果である。詳しい検討の結果、交点をふさぐ突起の端部における電場の集中が原因であることが明らかになってきた。また最近では、テーパ型金属導波路の先端部分において低次元光波の超集束、光の停止などの興味深い現象も見出されている (M. I. Stockman, PRL, 93, No. 13, pp. 137404, 2005)。

デバイス応用の観点からは、金属端での電場の増強を応用することにより、非線形光学デバイスの効率向上が期待できる。そこで、我々はこのような金属端を新たな機能性構造ととらえて「プラズモニックエッジ構造」(図1)と名づけ、それを非線形光学効果と結び付けることにより、全く新しい光機能デバイスを創成したいと考えた。

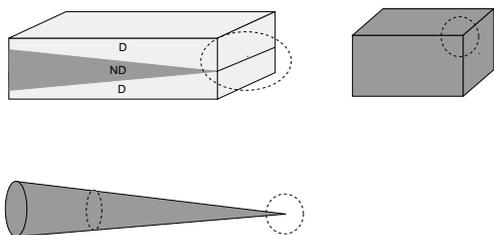


図1 プラズモニックエッジ構造の例 灰色部分は金属(負誘電体)

2. 研究の目的

本研究の目的はプラズモニックエッジ構造における特異な光伝搬の物理を解明し、これを非線形光学と融合させることにより新しい機能を持つ光デバイスを生み出すことである。

3. 研究の方法

研究は(1)基礎となるプラズモニックエッジ構造における物理の解明、(2)プラズモニックエッジ構造を利用した新しい光機能の提案、(3)プラズモニックエッジデバイスの作製と計測、の順で系統的にすすめた。

(1)と(2)に関しては、従来からすすめてきた準変数分離法を駆使した解析的な取り扱いを様々な形状のエッジ構造に適用した。さらに、それに加えて既存の計算機の更新によりシミュレーション環境の改善をすすめた。特に64bit計算機の導入によるメ

モリ空間の増設によって3次元FDTD計算を行える環境を整備した。これにより、理論面においては計画通りに研究をすすめることができた。

一方、(3)の実験に関しては、当初の計画からの変更を行った。研究開始当初はメンブレン基板と電気光学結晶基板を用いて、その基板の上に金属を蒸着してプラズモニックエッジ構造を作製する予定であった。しかし、メンブレン基板の実験は成果が出たものの、電気光学結晶の方はSPPの損失が大きく、非線形効果の計測がうまくいかなかった。

これは、非線形光学効果の利用にはある程度の相互作用長が必要であるが、エッジ構造の金属による損失が大きいため、相互作用長が十分にとれないことが原因と考えられた。そこで、プラズモニック導波路の中でも最も低損失の金属薄膜(IMI構造)におけるロングレンジ表面プラズモン(Long-Range Surface Plasmon Polariton: LRSPP)を利用して研究を行うこととした。

しかし、LRSPPは金属との相互作用が弱く、非線形光学への応用にはあまり適していない。理論的な検討を重ねた結果、フォトニック結晶などの分野で非線形光学の増大が報告されているスローライト(B. Corcoranら、Nature Photon. 2, pp. 465-473, 2008)を利用するというアイデアがうまれた。スローライトは光の群速度が極めて遅く、非線形光学媒質との相互作用を大きくできる。SPPの分散関係をみると波数が発散する周波数を持ち、これがスローライトであることは自明であるが、今まで研究がなかった。我々をこれをプラズモニックスローライト(Plasmonic Slow Light: PSL)と名付けた。

そこで、電気光学結晶の実験は中止し、金属薄膜導波路を用いたLRSPPをベースとしたPSLの研究を行った。プラズモニックエッジ構造におけるPSLの電場増強効果を用いた非線形光学デバイスの創成を試みた。

4. 研究成果

プラズモニクスにおいて金属薄膜は、最も基本的なプラズモニック導波路である。本研究では金属薄膜にプラズモニックエッジ構造を人工的に導入することによって、誘電体光導波路では不可能な新しい機能(超集束や負屈折)を実現できることを示した。また、金属薄膜に穴をあけてエッジ構造を導入するだけで、波数整合をとることなく簡単に平面波とSPPを結合するカップラーとなることを示した。

これらの機能を出すためにはSPPの特異な分散関係の利用が必要であり、損失も大きくなってしまふ。我々はLRSPPを利用することによって、大きな伝送損失をさけながら、PSLによるエネルギー圧縮などの非線形デバイ

ス応用へつながる機能を実現できることを示した。

今までプラズモニック導波路はナノ光ビームの形成を目標に研究がおこなわれてきた。本研究を通じて、プラズモニック導波路がその単純な構造にもかかわらず、誘電体だけではなくユニークな機能を実現できることを明らかにできたといえる。成果の詳細は以下のとおりである。

これらの研究に関連して、12件の招待講演（うち2件は国際会議）を行ったことから国内外で評価されていることがわかる。

(1) テーパー型プラズモニック導波路の基礎と機能

① 準変数分離法を用いてテーパー型プラズモニック導波路のうち、楔形（図2）、放物体および放物筒形状の金属導波路における超集束モードの近似解析解をはじめ得ることに成功した。これによりシミュレーションに頼ることなくテーパー先端部の角度と電磁界強度の関係を厳密に取り扱えるようになった。ナノ領域への光エネルギー集束にとって重要な、金属テーパー構造の解析解に関する系統的な解明に成功したといえる。解析解を得たことの学問的な意義は大きい。

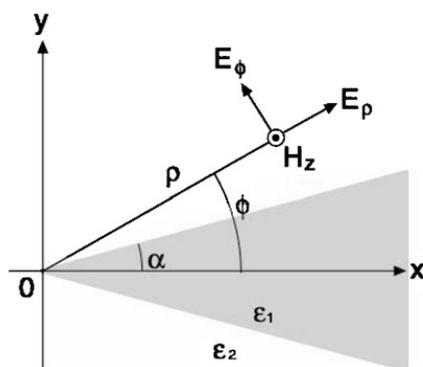


図2 楔形プラズモニック導波路 灰色部分は金属コア、周囲のクラッドは誘電体

② テーパー構造の応用について検討し、ファイバーカップラーへの応用を提案した。光ファイバー端面にコーン状の凹型テーパーを設けたプラズモニックエッジ構造に、ブルズアイ（同心円回折格子）を光アンテナとして追加することにより SPP を増強させ、SPP を媒介してファイバーの高次モードを励起するモード変換器である（図3）。

図4に示すように、コーン構造の有無により出射端におけるモード分布が変化しており、モード変換器としての動作を実証した。これはプラズモニクスとファイバー光学との融合といえ、今後新しい応用展開が可能となる。

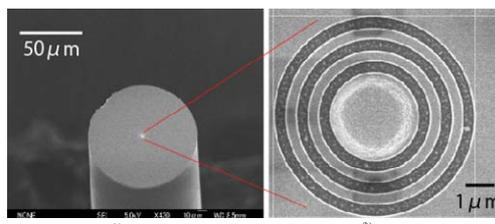


図3 光ファイバー端面に作製したコーン型プラズモニック導波路 ファイバーコアが凹型にへこんでいる（中央の白い部分）

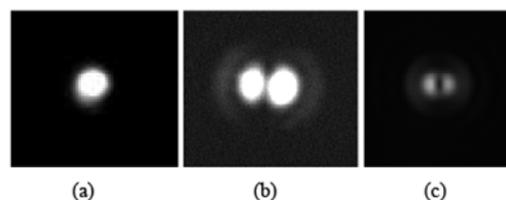


図4 光ファイバーの反対側の出射端におけるモード空間分布 (a)構造なし、(b)コーンのみを形成、(c)コーンと円形回折格子を同時に形成したもの

(2) 開口型ナノ光カップラー

開口型のプラズモニックエッジ構造を用いた新しいナノ光カップラーを提案した。このデバイスは図5に示すようにナノ開口をリング状に配列した構造をとり、照射された光をSPPに変換してリング中央部へ集める機能をもつ。開口型に光を裏面から入力することで、従来の散乱体を用いたものとは異なり、入射光とSPPとの干渉を完全に遮断でき、SPPのみを集光できる特徴をもつ。

開口を円形から扇形に非対称化することにより、平面波（直線偏光）がSPPに変換され、リング中央部に集束できる（図5）。金属薄膜のSPPの波長は真空波長より縮小されていることから、ナノ光デバイスへの光導入へ応用できる。

次に、集束イオンビームによりメンブレン基板上の金薄膜にナノ開口を配列し、ナノ光カップラーを作製した（図6）。中央には観測のために散乱体を置いた。光透過率の測定の結果、円形より扇形開口の方が高い集束特性を持つことが明らかとなった（図7）。

さらに、radial（半径方向）偏光や azimuth（円周方向）偏光ビームに対する応答を実験的に調べたところ、予想に反して azimuth 偏光の方がリング中央部への集束効果が高いことを見出した。これは隣接する扇形エッジ間の結合のためと考えられる。

これは偏光制御光ビームとプラズモニクスとの接点であり、プラズモニクスの新たな展開に道を拓くものである。

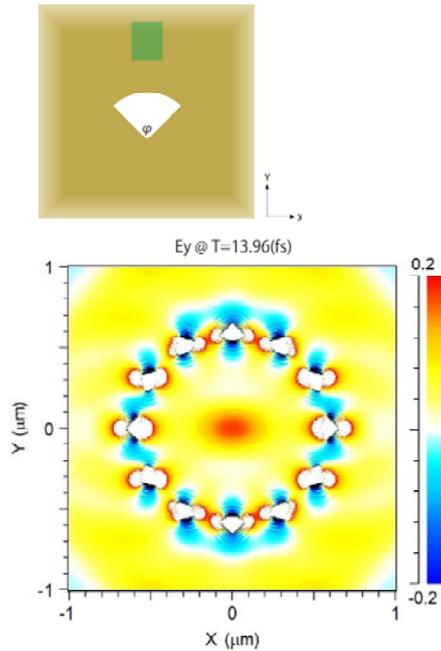


図5 扇形ナノ開口と円形アレイ 直線偏光を照射すると中央部に SPP が集束している。

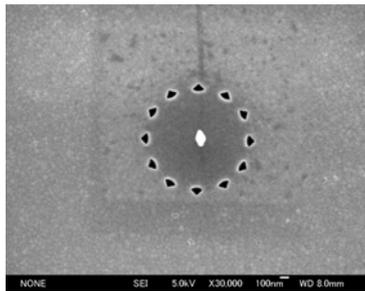


図6 膜厚 100nm の金薄膜に扇形ナノ開口をリング状に配列したナノ光カップラー 中央部は散乱体

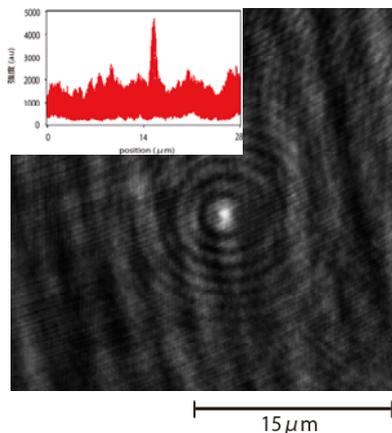


図7 金薄膜裏側から光をあてると、ナノ光カップラーによる SPP の集束によって中央部の散乱体が光る

(3) プラズモニックスローライトによる電場増強

金属薄膜導波路において、群速度が真空中の $1/100$ 以下となるスローライト (PSL) を実現できることを理論的に示した。またその群速度分散から群屈折率 460 において 480fs までのガウシアンパルスを実乱歪なく伝搬可能であることを示した。

PSL は損失が大きい、LRSP と伝搬モードが同じことを利用して、金属薄膜の LRSP から直接 PSL へ結合する方法を提案した。このためには図 8 に示すように誘電体のヘテロ構造を形成し、そこで LRSP から PSL への変換をおこす。このとき時間的な圧縮効果によって 20 倍以上の電場増強を起こすことができることがわかった。金属薄膜をテーパ構造にすることによる空間圧縮と PSL を組み合わせることによって、さらなる電場増強と非線形効果の増大が期待できる。

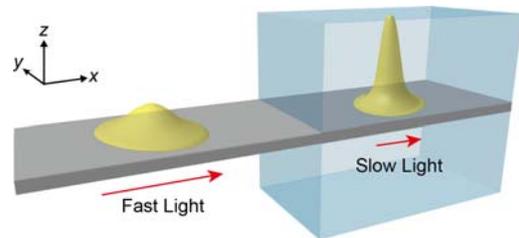


図8 金属薄膜ヘテロ構造による LRSP (fast light) による PSL への変換のイメージ

次に、図 9 に示すように、石英基板上に幅 $5\mu\text{m}$ の金属薄膜を形成しプラズモニック導波路とした。導波路への入射カップラーとして、ナノスリット・アレイ (スリット幅 600nm 、周期 1200nm) を作製した。ナノスリットはプラズモニックエッジ構造ともみなせるので、上から光をあてると SPP の波源となる。このため、外部レーザー光から LRSP への入出力カップラーとして用いることができる。

レーザー光を対物レンズを通してナノスリットに照射した。図 10 に伝送の光学顕微鏡像を示す。図 9 (a) のスリットに垂直偏光のみがテーパ構造先端部において発光が観測された。偏光がスリットに平行な場合と入力カップラーがない場合は先端部の発光は観測されなかった。このことから LRSP の励起と伝搬と集束を観測したといえる。

また、図 11 に示すように、出力カップラーを通して LRSP を外部へ伝搬光として再び取り出すことにも成功した。これによりプラズモニックエッジ構造を利用した LRSP の励起と検出に成功した。

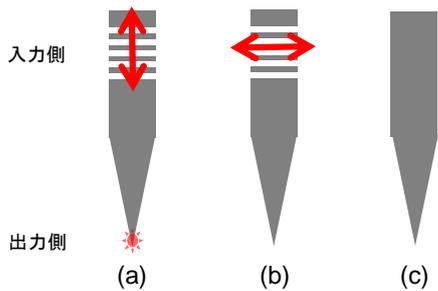


図9 テーパー型金属薄膜導波路 灰色部分は金属 矢印は入射光の偏光方向

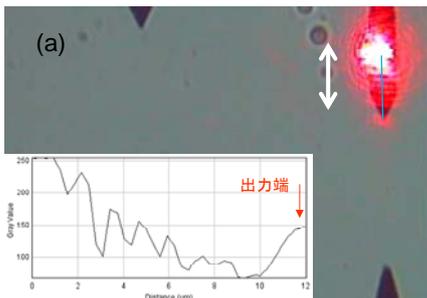


図10 LRSPP 伝送実験の光学顕微鏡像 テーパー先端部への集束が観測できる



図11 LRSPP 伝送実験の光学顕微鏡像 出力カップラーよる外部への取り出しが観測できる

(4) 金属薄膜における負屈折

プラズモニック導波路における負屈折について理論的に解明し、金属薄膜において負屈折を観測する方法を提案した。金属薄膜の伝搬モードは金属ギャップ導波路とは本質的に異なり常に LRSPP が存在するために、伝搬損失の大きな負屈折をおこすモードが低損失の LRSPP によって隠されてしまう。

負屈折するモードは負の位相速度をもつスローライトとみなせる。そこでスローライトパルスの群速度の違いを利用して負屈折を時間的に分離する方法を理論的に提案し、シミュレーションによりこれを観測した(図12)。

負屈折はスーパーレンズなどの新たな機

能への応用が期待されており、プラズモニック導波路を利用することにより、簡単な構造で可視や紫外光での負屈折が実現できる。

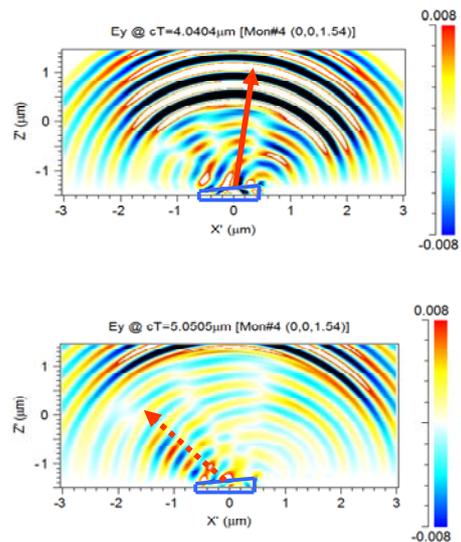


図12 楔形の金属薄膜(膜厚10nmの金)に波長377nmの平面波パルスを入射したときの、屈折シミュレーション(上)正屈折、(下)負屈折(3.4fs後)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計11件)

1) 高原淳一, “ナノプラズモニクス～原理とナノ光集積回路への展望”, 信学技報, PN2010-35 (2011) pp. 49-52.

2) 高原淳一, “プラズモニクスとナノ光集積回路”, OPTRONICS, Vol. 29, No. 341 (2010) pp. 85-89.

3) K. Kurihara, J. Takahara, K. Yamamoto and A. Otomo, “Identifying plasmonic modes in a circular paraboloidal geometry by quasi-separation of variables”, J. Physics. A: Math. Theor., Vol. 42 (2009) pp. 185401-1-38.

4) 高原淳一 “テラヘルツ・ナノプラズモニクス”, 0 plus E, Vol. 32, No. 2 (2009) pp. 180-184.

5) J. Takahara, M. Nishimori and T. Nagatsuma, “Efficient transmission through a plasmonic T-branch with a mesa structure in metal gap optical waveguides”, Proceedings of SPIE 7033 (2008) 70330Y-1-8.

6) K. Kurihara, K. Yamamoto, J. Takahara and A. Otomo, “Superfocusing modes of

surface plasmon polaritons in a wedge-shaped geometry obtained by quasi-separation of variables”, J. Physics. A: Math. Theor., Vol. 41 (2008) pp.195401-1-48.

7) 高原淳一 “テーパー型プラズモニック導波路における低次元光波の超集束”, レーザー研究, Vol.36, No.3 (2008) pp.117-122.

〔学会発表〕 (計 55 件)

1) J. Takahara and K. Kamada, Negative refraction of slow light in metal film plasmonic waveguides, Surface Plasmon Photonics 5(SPP5), Busan, Korea, 2011 年 5 月 16 日.

2) M. Miyata, T. Nagatsuma and J. Takahara, Plasmonic slow light in negative dielectric film, Surface Plasmon Photonics 5(SPP5), Busan, Korea, 2011 年 5 月 19 日.

3) J. Ozaki, H. Murata, Y. Okamura and J. Takahara, Analysis of plasmonic waveguides with light-coupling antennas for electro-optic functional device, Surface Plasmon Photonics 5(SPP5), Busan, Korea, 2011 年 5 月 19 日.

4) 高原淳一、ナノプラズモニクス～原理とナノ光集積回路への展望、電子情報通信学会フォトニックネットワーク研究会、大阪大学コンベンションセンター、大阪府、2011 年 1 月 27 日. 招待講演

5) J. Takahara and K. Kamada, Negative refraction in planar plasmonic waveguides, The International Conference on NANOPHOTONICS 2010, Tsukuba, Japan, 2010 年 6 月 1 日.

6) 高原淳一、プラズモニック導波デバイスの現状と展望、第三回 集積光デバイスと応用技術研究会、ホテル箱根アカデミー、神奈川県、2010 年 2 月 4 日. 招待講演

7) J. Takahara, “Propagation and superfocusing of nonmetallic negative dielectric optical waveguides”, The 7th Asia-Pacific Conference on Near-Field Optics (APNFO-7), Jeju, Korea, 2009 年 11 月 26 日. 招待講演

8) K. Yamamoto, Efficient excitation of superfocusing surface plasmons using phase controlled waveguide mode, MRS spring meeting, Boston, U. S. A., 2009 年 4 月 13 日.

9) J. Takahara, “Low-dimensional optical waves and plasmonic waveguides”, META in Frontiers in Optics / OSA Fall Optics & Photonics Congress, Rochester, U. S. A., 2008 年 10 月 22 日. 招待講演

〔図書〕 (計 3 件)

1) 高原淳一、プラズモンナノ材料の最新技術 (シーエムシー出版、2009) pp.283-288.

2) 高原淳一、光学材料の屈折率制御技術の最前線 (シーエムシー出版、2009) pp.295-303.

3) J. Takahara, “Negative Dielectric Optical Waveguides for Nano-Optical Guiding” in Plasmonic Nanoguides and Circuits, Ed. S. Bozhevolnyi (Pan Stanford Publishing, 2009) Ch.2, pp.33-62.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高原 淳一 (TAKAHARA JUNICHI)
大阪大学・工学研究科・教授
研究者番号：90273606

(2) 研究分担者

久武 信太郎 (HISATAKE SHINTARO)
大阪大学・基礎工学研究科・助教
研究者番号：20362642

(3) 連携研究者

栗原 一壽 (KURIHARA KAZUYOSHI)
福井大学・教育地域科学部・准教授
研究者番号：20270704