金属ナノスラブ導波路における 表面プラズモンの伝送と集束

高原 淳一^{1,2}・宮田 将司³¹大阪大学大学院工学研究科 ☎ 565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1²大阪大学フォトニクス先端融合研究センター ☎ 565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1³大阪大学大学院基礎工学研究科 ☎ 560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3

(2011 年 12 月 15 日受付；2012 年 2 月 13 日掲載決定)

Propagation and Focusing of Surface Plasmon in Metal Nano Slab Waveguides

Junichi TAKAHARA^{1,2} and Masashi MIYATA³¹Graduate School of Engineering, Osaka University, 2-1 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871²Photonics Advanced Research Center (PARC), Osaka University, 2-1 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871³Graduate School of Engineering Science, Osaka University, 1-3 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 560-8531

(Received December 15, 2011 ; Accepted February 13, 2012)

A plasmonic waveguide is a metal optical waveguide that utilizes surface plasmon polaritons propagating at a metal-dielectric interface. The optical beam radius can be reduced to the nanometer order beyond the diffraction limit of light by utilizing a negative dielectric instead of a dielectric. We describe recent progress of our study about metal nano slab waveguides and future perspectives.

KEYWORDS : plasmonic waveguide, superfocusing, long-range surface plasmon, metal slab waveguide, nano-optical integrated circuit

1. は じ め に

プラズモニクスは金属ナノ構造の表面プラズモンポラリトン (Surface Plasmon Polariton : SPP) を利用したフォトニクスである¹⁾。プラズモニクスにおいて中心的な役割をはたすのが金属光導波路、すなわちプラズモニク導波路 (Plasmonic Waveguide : PWG) である。我々は金属光導波路を用いると光ビーム径をナノメートルオーダーの空間 (ナノ空間) まで小さくでき、これをナノ光導波路に応用できることをはじめに指摘した^{2,3)}。この提案を境にして PWG が注目され、現在では PWG はプラズモンデバイスのキーコンポーネントとして世界中で多くの研究がおこなわれている^{4,5)}。プラズモンデバイスはフォトニクスとエレクトロニクスをナノ領域で融合する基盤として、超高速性と微細性を兼ね備えるナノ光

集積回路への応用が期待されている⁶⁾。

プラズモニクスのナノ光集積回路への応用を考える場合は平面型の PWG が適している。Fig. 1 (a) に示す金属細線すなわちスラブ型プラズモニク導波路 (以下スラブ導波路) はその中で最も基本的な構造といえる。本稿ではスラブ導波路における SPP の伝送について我々の研究を中心に紹介する。プラズモニク導波路の原理や最近の研究動向は文献 7 にまとめたので、そちらもあわせて参照されたい。また、各導波路の理論的な詳細は専門書にゆずる⁸⁾。

スラブ導波路の SPP 伝送実験の報告は多数あるが、多くの実験が基板上に金属をのせただけの非対称スラブ構造で行われている^{8,9)}。このため、単なる単一界面の SPP の導波路となっていることが多く、ナノ光導波路とよぶには不十分であった。以下に述べるように対称スラブ構造において界面間の結合 SPP モードを利用すると、原理的にはスラブ導波路をナノ光導波路として利用できる。

Fig. 1. Cross sectional view of planar plasmonic waveguides: (a) a metal slab waveguide and (b) a metal film waveguide.

2. プラズモニック導波路における超集束

PWG は負誘電体 (Negative Dielectric: ND) である金属と誘電体の誘電体・負誘電体 (D/ND) 界面に SPP の状態で光を閉じ込めて伝搬させるので, 多くの界面やチャネル形状が提案されている^{4,8)}。なかでも重要なのが二つの D/ND 界面をもつ金属薄膜 (Insulator-Metal-Insulator: IMI ともよばれる) 導波路と金属ギャップ (Metal-Insulator-Metal: MIM ともよばれる) 導波路である。これらの基本的な PWG は, 複雑な構造の PWG の導波モードを理解する基礎となる³⁾。この二種類の導波路は界面間の距離が波長より十分小さい場合, 各界面の SPP が結合して結合モードが形成される。このため以下に述べるような波数の発散をとまう特徴的なモード特性を示す。

Fig. 1 (b) に示す金属薄膜導波路はスラブ導波路の幅を無限とした極限に相当する。そこではじめに金属薄膜導波路を例にとり, PWG に典型的なモード特性を紹介する。**Fig. 2** は真空波長 $\lambda_0 = 633 \text{ nm}$ における無損失の銀薄膜の膜厚 h に対する伝搬モード特性である^{3,8,9)}。金属薄膜導波路の伝搬モードは TM (Transverse Magnetic field) モードのみであり, h を小さくすると, 各 D/ND 界面の SPP が結合して, 新たな二つの伝搬モード (偶結合と奇結合モード) が形成される。この二つのモードはどちらもカットオフが存在しないが, 正反対の性質をもつ。一つは $h \rightarrow 0$ において等価屈折率 β/k_0 (SPP の進行方向の波数 β を真空波数 k_0 で規格化したもの) が発散するモード (上側の分岐) であり, もう一つは β/k_0 が 1 に漸近するモード (下側の分岐) である。モードの磁場分布をみると, それぞれが奇結合と偶結合の場合に対応している (Fig. 2 挿入図参照)。

Fig. 2. Propagation modes of SPP in a silver film waveguide: Effective index with respect to the film thickness. The relative permittivity of the clad and core are 1 and -19 ($\lambda_0 = 633 \text{ nm}$), respectively. Inset: magnetic field distribution of coupled mode of SPP.

等価屈折率が 1 に漸近するモードは, h を小さくすると電磁場の拡がり (厚さ) は発散し, 大部分のエネルギーは誘電体クラッドに拡がった状態でガイドされる。このためこのモードはナノ光導波路には応用できないが, 損失が非常に小さく, 可視域では数 mm, 近赤外域では数 cm もの伝搬長をもつので, 長距離伝搬表面プラズモン (Long-Range SP: LRSP) とよばれている^{10,11)}。

一方, 等価屈折率が発散するということは, h を小さくすると進行方向の波数 (β) をいくらでも大きくできることを意味する。全波数は保存されるから, このとき導波路と垂直方法の波数 (導波路では虚数である) も同時に大きくなる。これは電磁場の拡がり (厚さ) をいくらでも小さくできることを意味している。このモードは h をナノメートルオーダーにすると電磁場の拡がりも同程度に縮小され, 電磁場がカットオフされことなく狭いナノ空間に閉じ込められた状態で伝搬する。このモードは金属内部に光の場を強く閉じ込めることができるが, 金属のオーム損失の影響で伝送損失が大きいので, LRSP に対応させて短距離伝搬表面プラズモン (Short-Range SP: SRSP) とよぶことがある¹¹⁾。

場の閉じ込め効果の強い SRSP はナノ光導波路への応用にとって重要である。**Fig. 3** に示すように PWG をゆるやかなテーパ構造にして先鋭化すると, 先端部にむかうにつれて SRSP のビーム径がいくらでも小さくなるためにパワー密度が増大し, 著しい電場増強がおきる。この現象は回折限界を超えるナノ空間への集束という意味で超集束 (またはナノ集束) とよばれている。特にテーパ角度 (2α) が小さい場合, すなわち λ_0 に比べて

Fig. 3. Tapered plasmonic waveguides : (a) a metal cone waveguide, (b) metal wedge and tapered metal gap waveguide and (c) a tapered metal slab waveguide.

Fig. 4. (color online). Structure of the sample : (a) cross sectional view, (b) top view of the tapered slab waveguide and (c) top view of the nano slab waveguide.

ゆるやか（断熱的）に導波路が小さくなる場合は，入射した光エネルギーが反射されことなく先端部に集束し，高い電場密度を実現できる。これを断熱的ナノ集束とよぶ¹²⁾。また，先端部では光の群速度が遅くなり 0 に漸近する（スローライト）。この興味深い性質により，超集束の重要性が広く認識されるようになった¹³⁾。超集束を用いるとマクロな系からナノ空間に光を効率的に導入できるため，単一分子デバイスやナノ光デバイスとマクロ系とのインターフェースとしてナノ光カップラー（結合器）への応用が提案されている¹⁴⁾。

ただ注意すべきことは，超集束はどんな PWG でもおきるわけではなく，上に述べた構造を小さくすると波数が発散するような SRSP 的なモード特性（これを以下では超集束モードとよぶ）を持つ構造に限られている。Fig. 3 (a), (b) に示す PWG はいずれも超集束モードをもつが，コーンと楔はどのようなサイズでも常に LRSP

が存在するために，低損失の LRSP が超集束モードを覆い隠してしまう。一方，テーパーギャップにはカットオフがあるため超集束モードのみが存在する。それでは Fig. 3 (c) のような横方向の幅が狭くなるテーパー型スラブ導波路では超集束はおきるのだろうか？答えはそれほど自明ではないので，以下で詳しく調べよう。

3. テーパー型スラブ導波路

テーパー型スラブ導波路を実際に作製し，金属薄膜導波路を伝搬する SRSP の超集束を実験的に試みた。Fig. 4 (a) に示すように膜厚 20 nm の銀を石英ガラス上に SiO₂ 膜に挟み込む形で蒸着し，Fig. 4 (b) のスラブ導波路構造を作製した。一般にスラブ導波路では線幅に対する放射損失と伝搬損失の依存性から，伝送距離が最長となる最適線幅が存在するが，ここでは最適値の 5 μm とした。SPP は非放射モードであり外部光と直接結合しな

Fig. 5. (color online). Far field image and field intensity of He-Ne laser scattered from the tapered metal slab waveguide for (a) parallel and (b) perpendicular polarization with respect to the waveguide.

いので、自由空間から PWG に光を入力したり、取り出したりするためにはカップラーが必要となる。今回はレーザー集光スポットを入力カップラーとして形成したスリットアレイ（幅 600 nm, 周期 1.2 μm ）にあてることにより、SPP のエッジ励起を行っている。この方法は効率は低いものの、SPP を励起することが可能である。測定は光学顕微鏡下で He-Ne レーザー（ $\lambda_0 = 633 \text{ nm}$ ）からのガウスビームを対物レンズ（40 倍, $\text{NA} = 0.65$ ）によりビーム径 8 μm に集光して照射し、SPP 伝搬にともなうテーパエッジからの散乱光を同じ対物レンズによって観測した。

Fig. 5 は偏光方向を変えた時の観測結果である¹⁵⁾。偏光方向はスリットアレイに垂直と平行な場合を比較したが、SPP の偏光方向と一致した垂直偏光の場合のみにテーパ先端部からの散乱光が観測された。先端部からの散乱光はスポット的ではなく拡がっているが、これは超集束によるものだろうか？そこで FDTD (Finite Difference Time Domain) シミュレーションと比較してみよう。**Fig. 6** (a) に示すように、本実験と対応した片側からの励起では SRSP ではなく LRSP が励起されることがわかる。LRSP の伝搬距離は長く、10 μm 以上にわたり伝搬する。しかし、テーパ先端部において LRSP は有限幅のビームとなってそのまま外部に放射されており、先端部での超集束はおきていない。テーパ先端部の幅は波長以下の領域に入っており、金属薄膜の導波モードをもとにした単純な議論はできないが、クラッド部へ大きく広がる電磁場をもつ LRSP 的なモードが先端部を伝搬しているようである。これらのことから **Fig. 5** (a)

Fig. 6. (color online). Simulated results of electric field intensity in tapered slab waveguides: (a) excitation in single side and (b) excitation in both sides with phase difference of π .

の集束部分がスポットにならず、ぼやけたように見えるのは LRSP の有限の波数による回折の影響であり、超集束によるものではないと考えられる。

山本らは楔形導波路の超集束モードの選択的励起が可能なナノ光カップラーを提案している¹⁶⁾。この素子は楔形導波路のクラッドが誘電体光導波路と接続され、各導波路間に位相差 π を与えることにより超集束モードのみを励起して楔形先端部に SPP を超集束できる。そこで、もしスラブ導波路の上下両側から入射光に位相差 π をつけて照射すれば、同様に超集束モード (SRSP) の選択的励起が可能となると考えられる。そこで、位相差 π を与えて上下両側から励起した場合のシミュレーション結果を **Fig. 6** (b) に示す。この場合は **Fig. 6** (a) とは異なり、両側のエッジに沿ってガイドするモードが励起され、先端部に強いスポットが観測されており、超集束がおきている。ただし、モードパターンは複雑であり単純に SRSP によるものとはいえない。このようにテーパ型スラブ導波路で超集束をおこすことは可能であるが、**Fig. 6** (b) に示すように、励起方法を工夫することが必要といえる。

4. ナノスラブ導波路

次に導波路幅 w が λ_0 より十分小さな ($w \ll \lambda_0$) ナノスラブ導波路の伝送実験を行った。**Fig. 4** (c) に示すように、前節に述べた幅 5 μm のスラブ導波路をテーパ構造を介して幅 200 nm のナノスラブ導波路へ結合させ、ナノ光導波路としての伝送を調べた。スラブ導波路には入力カップラーだけでなく、距離を変えて出力カッ

Fig. 7. (color online). Propagation through the nano slab waveguide : (a) far field image (horizontal bar : 5 μm) and filed intensity profile along the waveguide (arrow : the position of the output coupler) and (b) simulated result of electric field intensity.

ブラーを形成している。測定は前節と同じ光学系を用いて、出力カップラーからの散乱光を観測した。

Fig. 7 (a) に観測結果を示す。偏光が SPP (TM モード) の偏光方向と一致する場合のみ出力カップラーからの散乱光が観測されたことから、LRSP が励起され幅 200 nm のナノスラブ導波路の何らかの SPP モードと結合して伝搬したと考えられる。実験からナノスラブ導波路を、長さ 5 μm 以上にわたって SPP が伝搬していることは明らかであり、この比較的長い伝送距離は LRSP 的なモード伝送を示唆している。Fig. 7 (b) に示すシミュレーション結果も定性的には同様の結果を与えている。

スラブ導波路のモードは導波路幅が λ_0 より十分大きい場合は金属薄膜導波路のモードとほとんど違いがないが、特に導波路幅が λ_0 以下の領域に入ると両側のエッジの影響によって薄膜の場合とは大きくモード特性が異なる。具体的にナノスラブ導波路のモード特性はどのようなになっているのであろうか？ スラブ導波路の伝搬モードは Berini により理論的に詳しく調べられている^{17~19)}。スラブ導波路は D/ND 界面が上下左右の 4 つあるので、(金属薄膜導波路の) 上下界面の偶奇性に加えて、横方向の界面の偶奇性による合計 4 通りの組み合わせがある。ここでは横方向が奇結合の場合は励起が難しいので考慮せず、簡単のため横方向が偶結合の場合のみを考えよう。横方向が偶結合の場合について上下方向に偶結合(LRSP)と奇結合(SRSP)の 2 モードを考える。

様々な幅のスラブ導波路 ($h = 20 \text{ nm}$, $\lambda_0 = 633 \text{ nm}$ に固定) について有限要素法によりモード解析を行った結果を **Fig. 8** に示す。実線はナノスラブ導波路、点線は金属薄膜 ($w = \infty$) である。スラブ導波路には横方向の閉じ込めにもなう多くの高次モードがあるが、ここでは横方向が偶結合のモードのうち重要なものについて等価屈折率の実部と虚部の導波路幅依存性を示す。縦方向の閉じ込めで分類すると金属薄膜の LRSP と SRSP に由来するモードがあるが、そのうち伝搬に主に寄与するのが最も低損失の LRSP⁰ (横方向 0 次) モードである。また、SRSP では横方向が 0 次 (SRSP⁰) と 1 次 (SRSP¹) の二つのモードが主なモードである。このうち SRSP⁰ は幅を小さくすると波数が発散するという超集束モードである。

また、**Fig. 9** に各モードの電場分布を示す。Fig. 9 (a), (b) に示す LRSP⁰ は金属薄膜の LRSP と良く似たクラッド部に大きく広がった電場分布をとっている。Fig. 9 (c) の SRSP¹ は $w > \lambda_0$ において縦方向の閉じ込めが強く SRSP とよく似ているが、 $w < \lambda_0$ ではエッジでの局在の影響が大きくなり等価屈折率が減少する (Fig. 8 (a) も参照)。 $w \ll \lambda_0$ となるナノスラブ導波路の領域になると SRSP¹ はカットオフとなり、超集束モードである SRSP⁰ が主要な伝搬モードとなる。

このようなモード解析の結果をふまえると、Fig. 7 (a) の実験ではまず LRSP⁰ が励起され、テーパー部に

Fig. 8. (color online). Propagation modes in the silver slab waveguide with $h = 20 \text{ nm}$ and $\lambda_0 = 633 \text{ nm}$: (a) Real and (b) imaginary part of effective index vs. normalized slab for LRSP^0 , SRSP^0 , SRSP^1 (solid lines), and LRSP , SRSP (dotted lines).

Fig. 9. (color online). Cross sectional distributions of mode electric field in the slab waveguide with $h = 20 \text{ nm}$ and $\lambda_0 = 633 \text{ nm}$ for (a) LRSP^0 with $w = 5 \mu\text{m}$, (b) LRSP^0 with $w = 200 \text{ nm}$, (c) SRSP^1 with $w = 5 \mu\text{m}$ and (d) SRSP^0 with $w = 200 \text{ nm}$.

において w が変化してもわずかに等価屈折率が減少するだけでモードは変化しないまま、 200 nm 幅 ($w/\lambda_0 = 0.32$) のナノスラブ導波路ではカットオフのない LRSP^0 モードとして伝搬していると考えられる。Fig. 9 (b) に示すように、ナノスラブ導波路の LRSP^0 モードの電場分布はクラッドへの拡がりが大きく、半値ビーム径でみると $1 \mu\text{m}$ 程度の閉じ込めしか得られないので、ナノ光

導波路というには無理がある。もし、ナノ光導波路として空間閉じ込めをさらに高めて $10\text{--}100 \text{ nm}$ オーダーのビーム径を得ようとするれば、超集束モードである SRSP^0 モード (Fig. 9 (d)) を利用することが必要となる。

5. 今後の展望

最近の我々の研究を中心として PWG について紹介し

た。超集束やナノ光導波路は誘電体光導波路にはない PWG のユニークな特徴であり、我々はそのような視点で導波路の構造とモードフィールドをみている。スラブ導波路をナノ光導波路として利用する場合には目的に応じた SRSP の選択的励起が不可欠であるといえる。一方、LRSP はナノ光導波路としての応用には向かないが、伝送距離が長く励起が容易であるのでナノ光導波路への光導入の前段階に应用できるほか、クラッドでの場の拡がりを生かしたセンサー応用なども期待されている²⁰⁾。

PWG 研究の今後の方向性として以下の 3 つが考えられる。

- 1) 弱い閉じ込め, 10 μm -10 mm オーダーの長距離伝送
- 2) 強い閉じ込め, 100 nm-10 μm オーダーの短距離伝送
- 3) 強い閉じ込め, かつ長距離伝送

1 については LRSP や（ここでは紹介できなかったが）チャンネルプラズモンなどの低損失なモードを用いた機能素子が多数実現され、着実な進展をみせている⁴⁾。ただし、これらの機能素子は誘電体光導波路でも実現できるものが多く、閉じ込め性能を犠牲にすることはナノ光導波路という PWG の最も大きな特徴を失うことでもある。この方向の応用では PWG を用いる理由を明確にすることが不可欠といえる。2 は我々が提案してきたものであり、発展はゆっくりとしているものの着実に実験レベルが向上している。PWG でなければできない領域といえ、分子素子などへの展開が期待できる。3 は原理的に難しいと考えられてきたが、PWG の閉じ込め性能と損失の間にあるトレードオフをさけるため、ロッドを分割して近接させることにより強い閉じ込めを維持したまま伝搬距離を大きく改善する提案も行われている²¹⁾。理想としては 3 の方向の研究が進展することが望ましい。

プラズモンデバイスとはアクティブ・プラズモニクスの分野が大きく発展をはじめている^{4, 22)}。このような流れの中で今後の PWG 研究は、1 で具体的なアクティブデバイスの実績を着実に積み重ねながら、2 と 3 への挑戦を通じてナノ光集積回路の実現を目指すことが進むべき方向であるように思われる。

謝 辞

共同研究者の鎌田晃史に感謝する。本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究 (B) 20360032 の援助を受けて行われた。

文 献

- 1) 河田 聡 : 応用物理 **80**, 757 (2011).
- 2) J. Takahara, S. Yamagishi, H. Taki, A. Morimoto and T. Kobayashi : Opt. Lett. **22**, 475 (1997).
- 3) J. Takahara and T. Kobayash : Optics & Photonics News **15**, 54 (2004).
- 4) D.K. Gramotnev and S.I. Bozhevolnyi : Nature Photonics **4**, 83 (2010).
- 5) 原口雅宣, 福井萬壽夫, 岡本敏弘 : 光学 **40**, 68 (2011).
- 6) M.L. Brongersma and V.M. Shalaev : Science **328**, 440 (2010).
- 7) 高原淳一 : 応用物理 **80**, 772 (2011).
- 8) S.I. Bozhevolnyi : "Plasmonic Nanoguides and Circuits" (Pan Stanford Publishing, Singapore, 2009).
- 9) E. Verhagen, M. Spasenovic, A. Polman and L. Kuipers : Phys. Rev. Lett. **102**, 203904 (2009).
- 10) M. Fukui, V. So and R. Normandin : Phys. Status Solid. **B91**, K61 (1979).
- 11) 岡本隆之, 梶川浩太郎 : "プラズモニクス～基礎と応用" (講談社, 2010).
- 12) M. Stockman : Phys. Rev. Lett. **93**, 137404 (2004).
- 13) 高原淳一 : レーザー研究 **36**, 117 (2008).
- 14) J. Takahara and F. Kusunoki : IEICE Trans. Electron. **E90-C**, 87 (2007).
- 15) 高原淳一 : 信学技報 **110**, 394, PN2010-35, 49 (2011).
- 16) K. Yamamoto, K. Kurihara, J. Takahara and A. Otomo : Mater. Res. Soc. Symp. Proc. **1182-EE13-05**, 55 (2009).
- 17) P. Berini : Opt. Lett. **24**, 1011 (1999).
- 18) P. Berini : Opt. Express **7**, 329 (2000).
- 19) P. Berini : Phys. Rev. **B61**, 10484 (2000).
- 20) A. Degiron, P. Berini and D.R. Smith : Optics & Photonics News **19**, 28 (2008).
- 21) S. Kawata, A. Ono and P. Verma : Nature Photonics **2**, 438 (2008).
- 22) P. Berini and I. De Leon : Nature Photonics **6**, 16 (2012).