

# 金属ギャップ導波路における 2次元光波の伝送とモード変換

## *Propagation and Mode Conversion of Two-Dimensional Optical Waves in Metal-Gap Waveguides*

楠 文経\* 四谷 任\*\* 高原 淳一\*\*\*  
Fuminori Kusunoki Tsutom Yotsuya Junichi Takahara

小林 哲郎\*\*\*\*  
Tetsuro Kobayashi

(2006年6月2日 受理)

Metal-gap waveguides are studied numerically to investigate propagation properties of guided two-dimensional (2D) optical waves. The waveguide consists of a dielectric film sandwiched between two semi-infinite metals. When the middle dielectric film is sufficiently thin, surface plasmon polaritons (SPPs) associated with each metal-dielectric boundary become coupled, resulting in coupled modes of SPPs. These modes are classified as 2D optical waves and are useful to produce nanoscale optical beams without cutoff. We employed finite-difference time-domain method and demonstrated that 2D optical waves can be confined and guided by two different guiding mechanisms. A novel guiding method by low-refractive-index cores as well as conventional index guiding by high-refractive-index cores is shown to be effective for confining and guiding 2D optical waves. We also show numerically that mode conversion of 2D optical waves using tapered metal-gap waveguides engenders efficient focusing and increased amplitude of 2D optical waves.

キーワード：ナノフォトニクス, 回折限界, 表面プラズモン, 2次元光波, 金属ギャップ導波路

### 1. はじめに

近年, ナノフォトニクス分野の研究の発展とともに, 回折限界を超えた光波制御を目指した研究が盛んに行われている. 回折限界は光が波の性質をもつことから生じ, 波長より小さな領域に光を閉じ込めることができない. そのため, 光回路は電子回路のような微細化が困難であり, 真の意味での「ナノフォトニクス」にはまだ到達していない.

我々は, この回折限界の制限を受けない光波として低次元光波の概念を提案し, これまで研究を行ってき

た<sup>1,2)</sup>. 例えば, 誘電体薄膜を金属で挟んだ金属ギャップ構造中を伝搬する電磁波モードは, 2次元光波に分類することができる. この2次元光波の波長は誘電体層の膜厚で自在に制御でき, 膜厚を薄くすることで2次元光波の波長はどこまでも小さくなる. つまり, 通常の光と違いカットオフがなく, 回折限界以下のビーム径をもつ光ビームが得られる.

本稿では, 数値解析により求めた金属ギャップ導波路中の2次元光波の伝搬特性について述べる. まず, 金属ギャップ導波路を伝搬する2次元光波の性質について簡単に述べる. 次に, 2次元光波を閉じ込める手法として2つの方法を示す. 高屈折率コアを用いた全反射に基づく手法と, 低屈折率コアを用いた全く新しい手法について述べ, 数値解析によりその効果を実証する. 最後に, テーパー型金属ギャップ導波路を用いた2次元光波のモード変換について述べ, 2次元光波

\* 情報電子部 電子・光材料系

\*\* 情報電子部

\*\*\* 大阪大学大学院基礎工学研究科

\*\*\*\* 元 大阪大学大学院基礎工学研究科

(現: 大阪大学先端科学イノベーションセンター)

のエネルギーを効率良く収束させる方法を示す。

## 2. 金属ギャップ導波路における2次元光波

ここでは、金属ギャップ導波路における2次元光波の特性について簡単に述べる。図1挿入図のような、誘電体薄膜を金属で挟んだ金属ギャップ構造を考えると、誘電体-金属界面に表面プラズモンポラリトン(SPP)が存在する。表面プラズモンとは、金属表面に誘起された電荷のプラズマ振動を量子化したものであり、金属表面を伝搬する電子密度波(プラズモン)である。表面プラズモンは周りに存在する電磁波と結合し、光と物質の結合系であるSPPを形成する。誘電体層の膜厚 $t$ が十分薄いと2界面におけるSPPが結合し、SPPの結合モードが形成される<sup>3,4)</sup>。SPPはTMモードであるため、SPPの結合モードもTM偏光である。この結合モードは、誘電体-金属界面から離れるに従い強度が指数関数的に減衰し、光波の次元の定義<sup>2)</sup>から2次元光波である。

特性方程式より得られる規格化伝搬定数のギャップ幅依存性を図1に示す。なお、ここでは金属として損失のない金を想定し、その比誘電率を $\epsilon = -9.51$ とした。また、真空波長 $\lambda_0 = 632.8$  nmの光が $z$ 方向に伝搬しているとし、 $y$ 方向には一様であるとした。誘電体層の屈折率が $n = 1.46$ 、及び $n = 1.0$ の場合の計算結果が示されている。例えば、 $t = 100$  nmのとき、規格化伝搬定数は $n = 1.46$ の場合が $k_z/k_0 = 1.99$ 、 $n = 1.0$ の場合が $k_z/k_0 = 1.32$ となる。つまり、誘電体層の屈折率が大きいほど規格化伝搬定数も大きくなる。ここで注目すべ

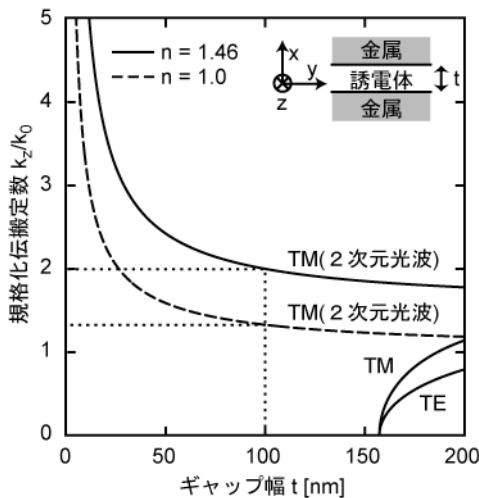


図1 金属ギャップ構造における規格化伝搬定数のギャップ幅依存性

Dependence of the normalized propagation constant on the gap distance for metal-gap waveguides

き点は、他の伝搬モードと違い2次元光波にはカットオフがなく、どのギャップ幅に対しても伝搬モードが存在することである。ギャップ幅を小さくすると2次元光波の規格化伝搬定数が大きくなり、伝搬定数を構造により容易に制御することができる。また、ギャップ幅を小さくすることで2次元光波の波長はどこまでも小さくなり、回折限界を超えた微小領域に光を伝搬させることが可能となる。

## 3. 高屈折率コアを用いた2次元光波の導波

前章で述べた2次元光波の特性を利用し、ここでは高屈折率コアのある金属ギャップ導波路について述べる。図1より、中間層である誘電体の屈折率が大きいほど、規格化伝搬定数が大きくなるのが分かる。規格化伝搬定数が大きいほど位相速度は小さくなるので、光ファイバなどの誘電体光導波路と同様の原理で、2次元光波が屈折率の高いコアに沿って伝搬すると考えられる<sup>5)</sup>。

2次元光波が高屈折率コアに沿って伝搬することを示すために、図2のような金属ギャップ導波路について解析を行った。ここでは、中間誘電体層の膜厚を $t = 100$  nmとし、コア及びクラッドの屈折率をそれぞれ $n_1 = 1.46$ 、 $n_2 = 1.0$ とした。また、 $y$ 方向のビーム径はコア幅 $d$ に依存するが、等価屈折率法によりビーム径が最小になるコア幅を求め、 $d = 150$  nmとした。この構造における2次元光波の伝搬特性を調べるために、有限時間差分領域(FDTD)法を用いたシミュレーションを行った。なお、ここでは金の損失を考慮し、比誘電率は $\epsilon = -9.51 + 1.21i$ とした。また、導波路の入射口の上部( $z = -50$  nm)に $+z$ 方向に伝搬するTM偏光の平面波を配置し、エンドファイア法によりギャップ構造内に2次元光波を励起した。

シミュレーション結果を図3に示す。電界振幅 $E_x$ の瞬時値分布を示してあり、2次元光波が $x$ 方向だけでなく $y$ 方向においても閉じ込められて伝搬している様子が分かる。図3(b)より $y$ 方向におけるビーム幅は

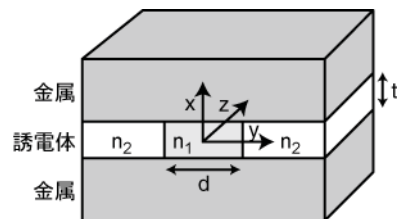


図2 コアのある金属ギャップ導波路

Schematic of the metal-gap waveguide with cores

270 nm と求まり、等価屈折率法で求まる値 (275 nm) と良く一致した。この y 方向における閉じ込めは、屈折率差に基づく全反射を利用したものであり、閉じ込めの原理上、ビーム幅はコア幅より大きくなる。つまり、2次元光波の一部はクラッドを伝搬している。

将来の光回路への応用を考えると、直線部分だけでなく曲がり導波路においても光を導波する必要がある。そこで、コアが直角に曲がっている場合のシミュレーションを行った。シミュレーション結果を図4に示す。なお、図中の白実線はコアとクラッドの境界を示す。この結果を見ると、直角曲がり部までは2次元光波がコアに沿って伝搬しているが、直角曲がり部で2次元光波がクラッドに漏れていることが分かる。コアとクラッドの屈折率差を大きくすることで曲げ効率を改善することができると思われるが、コアだけでなくクラッドにも伝搬モードが存在する限り、クラッドへの光の漏れを完全に防ぐことは困難だと考えられる。

#### 4. 低屈折率コアを用いた2次元光波の導波

高屈折率コアを用いた2次元光波の導波について前節で述べたが、直線部分では効率良く導波できるのに対し、直角曲がり部では光がクラッドに漏れることが分かった。フォトニック結晶導波路のようにクラッド

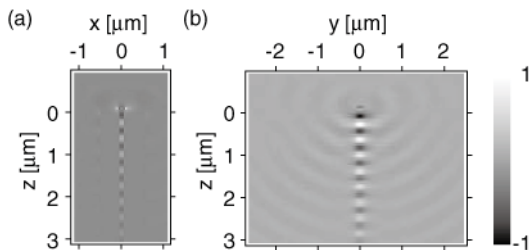


図3 (a) x-z 面 ( $y = 0$ ) 及び (b) y-z 面 ( $x = 0$ ) における電界  $E_x$  の瞬時値分布

Electric field  $E_x$  distributions in (a) the x-z plane at  $y = 0$  and (b) the y-z plane at  $x = 0$

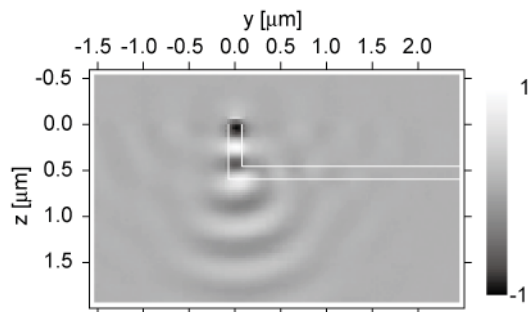


図4 直角曲がり導波路における電界  $E_x$  の瞬時値分布

Electric field  $E_x$  distribution in the y-z plane at  $x = 0$  for a waveguide with a sharp 90° bend

に伝搬モードが存在しない状態を作り出すことができれば、直角曲がりにも対応できると考えられる。これを実現するための手法として、ここでは低屈折率コアを用いた新たな導波方法<sup>9)</sup>について述べる。

2節での解析と同様に無損失の金を想定したときの、金属ギャップ構造における規格化伝搬定数のギャップ幅依存性を図5に示す。なお、今回は誘電体層の屈折率が  $n = 3.5$ 、及び  $n = 1.0$  の場合の計算結果を示している。一界面での SPP の存在条件は  $n < \epsilon^{1/2}$  であるため、 $n = 3.5$  の場合はこの条件を満たさない。そのため、通常の場合 ( $n = 1.0$ ) の場合と分散曲線の様子が大きく異なることがわかる。 $n = 1.0$  の場合はすべてのギャップ幅に対して2次元光波が存在するのに対し、 $n = 3.5$  の場合はある膜厚以下でのみ2次元光波が存在する。

ここで注目すべきことは、 $n = 3.5$  のときに TM 偏光に対してギャップ (図5中灰色部分) ができることである。そこで、図2のような金属ギャップ導波路に対し、中間層膜厚を  $t = 100$  nm、コア及びクラッドの屈折率をそれぞれ  $n_1 = 1.0$ 、 $n_2 = 3.5$  とすると、図5より2次元光波はコアでのみ存在が許されることが分かる。また、クラッドでは2次元光波だけでなく TM 偏光自体の存在が許されないために、2次元光波はクラッドに漏れることなくコア内に強く閉じ込められると考えられる。このような低屈折率コアのある金属ギャップ導波路に対して FDTD シミュレーションによる解析を行った。なお、コアの幅は  $d = 350$  nm とした。このコア幅のとき、ビーム幅が高屈折率コアの場合 ( $d = 150$  nm) とほぼ等しくなる。シミュレーション結果を図6に示す。なお、図中の白実線はコアとクラッドの境界を示す。こ

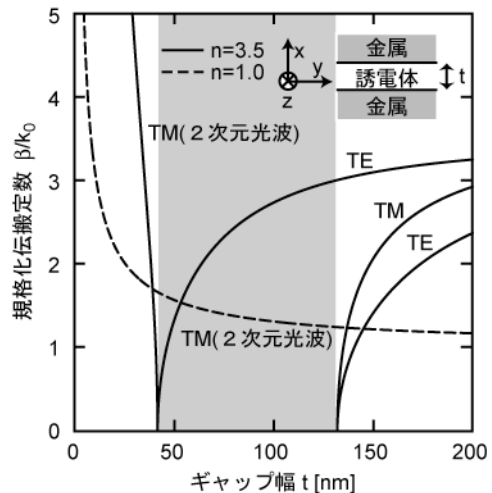


図5 金属ギャップ構造における規格化伝搬定数のギャップ幅依存性

Dependence of the normalized propagation constant on the gap distance for metal-gap waveguides

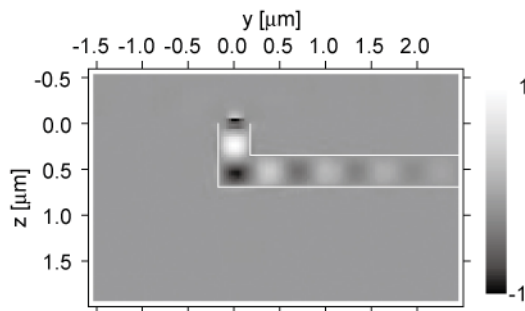


図6 直角曲がり導波路における電界  $E_x$  の瞬時値分布  
Electric field  $E_x$  distribution in the  $y$ - $z$  plane at  $x = 0$  for a waveguide with a sharp  $90^\circ$  bend

の結果を高屈折率コアの場合（図4）と比べると、直線部分だけでなく直角曲がり部でも2次元光波がコアに沿って導波していることが分かる。クラッドに伝搬モードが存在しないためにコア内へ2次元光波が強く閉じ込められ、直角曲がり部でもクラッドに光が漏れることなく伝搬することが実証された。

## 5. テーパー型金属ギャップ導波路における2次元光波のモード変換とエネルギーの収束

ここまで、金属ギャップ導波路を伝搬する2次元光波をコアに閉じ込める方法について述べてきた。図1に示すように、誘電体層の膜厚を薄くすることで2次元光波の波長はどこまでも小さくなり、回折限界以下の光導波が可能となる。しかし、波長の小さな2次元光波は伝搬定数が非常に大きく、通常の光で励起するのは困難である。例えば、プリズムを使った全反射減衰（ATR）法で2次元光波を励起する場合、励起可能な2次元光波の規格化伝搬定数はプリズムの屈折率に制限されてしまう。この問題を解決する手法として、図7のようなテーパー型金属ギャップ導波路が有用である。

2次元光波を励起する部分の膜厚  $t_1$  は比較的大きくしておき、ATR法などで励起可能な膜厚にする。テーパー部分で徐々に膜厚を小さくし、最終的に所望の膜厚  $t_2$  にする。ここでは、金属として銀を想定し、比誘電率は  $\epsilon = -15.87 + 1.08i$  とした。また、膜厚はそれぞれ  $t_1 = 160$  nm,  $t_2 = 50$  nm とし、テーパーの始点と終点をそれぞれ  $z_1 = 1$   $\mu$ m,  $z_2 = 2$   $\mu$ m とした。y方向に電磁界は一様、電磁界成分は  $(E_x, H_y, E_z)$  のみとして、2次元FDTD法による解析を行った。

FDTDシミュレーションにより得られた  $x = 0$  における電界振幅  $E_x$  の瞬時値分布を図8に示す。この結

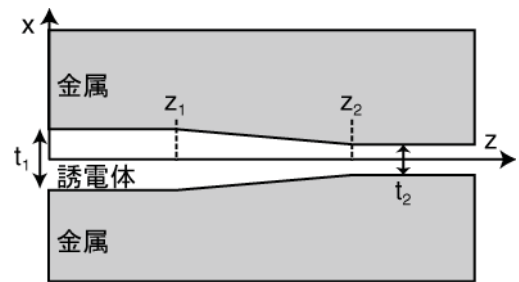


図7 テーパー型金属ギャップ導波路

Schematic diagram of the tapered metal-gap waveguide

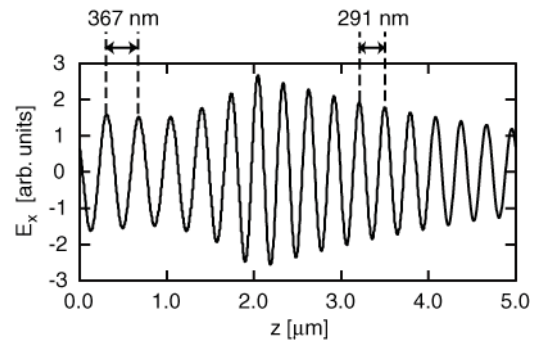


図8 電界の瞬時値分布

Electric field  $E_x$  distribution in the  $z$  direction

果より、テーパー部に到達する前の2次元光波の波長は367 nmであり、テーパー部を伝搬した後での波長は291 nmであることが分かる。これらの値は特性方程式から得られるそれぞれの膜厚に対する計算値とよく一致し、テーパーにより2次元光波のモードが変換されたといえる。また、テーパー部分で電界強度が大きくなっているが、オーム損失による減衰より電場の収束による増強の方が勝っているためである。

次にテーパー長の最適化を行った。テーパー型導波路においては、ギャップ幅の変化が急な場合、反射による損失が顕著になる。一方、その変化が波長に対して十分小さいとき、断熱的なモード変換<sup>7)</sup>が行われ反射による損失は無視できる。ここで考えている金属ギャップ導波路は金属による損失があり、導波路長を長くとりすぎると、反射による損失は無視できるがオーム損失による減衰が顕著になる。そのため、非断熱的なモード変換の方が有利だと考えられ、種々のテーパー長に対してシミュレーションを行い、最適なテーパー長を求めることにした。

テーパー長 ( $z_2 - z_1$ ) を75 nm ~ 1000 nmの間で変化させてシミュレーションを行った。シミュレーション結果を図9に示す。図9はテーパーの終端部 ( $x = 0, z = z_2$ ) における平均電界強度をプロットしたものであり、テーパー長を変化させると、その強度は振動することが分かる。これはテーパー部において入射光と反射光

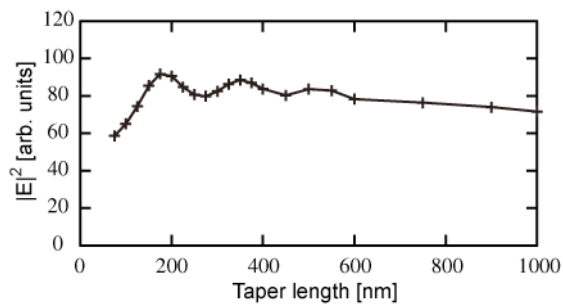


図9 平均電界強度のテーパ長依存性

Taper length dependence of average electric field intensity

が干渉し、定在波のような波が立っているためだと考えられる。この結果より、テーパ長が 175 nm のときに電界強度が最も大きくなることが分かった。このテーパ長に対する平均電界強度分布のシミュレーション結果を図 10 に示す。なお、比較のためにテーパがなく膜厚が一定 ( $t = 160$  nm) の場合の結果も示してある。テーパの終端部での強度はテーパがない場合に比べおよそ 5 倍になっていることが分かる。ここで示したシミュレーション結果より、テーパ構造を用いると 2 次元光波のモード変換が行われ、局所電場強度の増大が得られることが分かった。テーパ終端部の膜厚をさらに薄くすることで、より大きな電場の増強が期待できる。

## 6. まとめ

金属ギャップ導波路を伝搬する 2 次元光波の伝搬特性について、FDTD 法による数値解析結果を中心に述べた。2 次元光波を導波する手法として、高屈折率コア及び低屈折率コアを用いた方法を示し、直線部分においてはどちらの手法でも効率良く導波させることができた。しかし、直角曲がり部においては両者の違いが大きく現れた。高屈折率コアを用いた場合は、直角曲がり部でクラッドに 2 次元光波が漏れるのに対し、

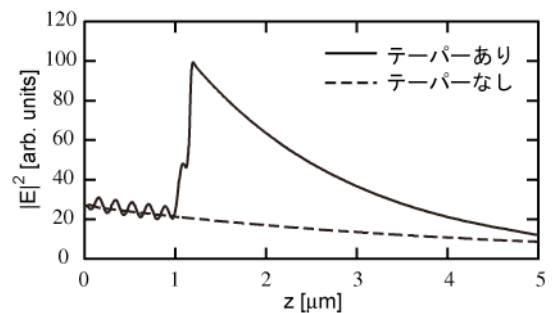


図 10 最適なテーパ長 (= 175 nm) 及びテーパなしの導波路に対する平均電界強度分布

Distribution of average electric field intensity for the waveguide with the best taper length of 175 nm and for without taper

低屈折率コアを用いた場合は、クラッドに光が漏れることなく導波できることが分かった。低屈折率コアを用いた場合、クラッドに伝搬モードが存在しないため、曲がり部でも効率よく導波できる。また、テーパ型金属ギャップ導波路における 2 次元光波の伝搬特性についての解析結果も示し、2 次元光波のモードが変換されることを明らかにした。2 次元光波のエネルギーが収束されることで、局所電場強度の増大が得られることも分かった。

## 参考文献

- 1) J. Takahara and T. Kobayashi: Opt. Photon. News, **15**-10 (2004), p.54
- 2) J. Takahara, S. Yamagishi, H. Taki, A. Morimoto and T. Kobayashi: Opt. Lett., **22** (1997) p.475
- 3) E. N. Economou: Phys. Rev., **182** (1969) p.539
- 4) J. J. Burke, G. I. Stegeman and T. Tamir: Phys. Rev. B, **33** (1986) p.5186
- 5) F. Kusunoki, T. Yotsuya, J. Takahara and T. Kobayashi: Appl. Phys. Lett., **86** (2005) p.211101-1
- 6) F. Kusunoki, T. Yotsuya and J. Takahara: Opt. Express, **14**, 12 (2006) p.5651
- 7) M. I. Stockman: Phys. Rev. Lett., **93** (2004) p.137404-1