

金属細線による光のガイド

高原 淳一・小林 哲郎

光ビームは回折限界のために光波長程度より小さくしぼることはできない。このことが光集積回路の微小化を妨げている。これは電子回路が電磁波の波長よりずっと小さいこととは対照的である。もし回折限界なく光をガイドできれば、光集積回路を今の電子的な集積回路程度の大きさに構成できると考えられる。

筆者らは、光波長よりはるかに細い金属細線を用いて光を回折広がりなく伝搬させる方法を提案してきた。筆者らはこれを1次元光波伝送路と名づけ、その特性を理論的に解析している。本稿では、1次元光波伝送路の概念について述べ、その特性の概要を紹介する。

1. 負誘電体と表面波

負誘電体と誘電体との界面には surface plasmon polariton (SPP) と呼ばれる表面波が存在することが知られている。負誘電体とは負の誘電率をもつ物質のことで、金属は光周波数で負誘電体となる。SPP は界面に局在し、界面の両側で指数関数的に減衰する TM (transverse magnetic field) 波である (図1(a))。また、負誘電体薄膜では各界面の SPP の結合モード (Fano モード) が存在し、その中には膜厚をいくら薄くしてもカットオフをもたない伝搬モードがある (図1(b))¹⁾。このモードのビーム厚は、膜厚を薄くするに伴い波長より十分小さい領域まで薄くなる。このとき波数ベクトルは界面に平行方向は実数で、垂直方向は虚数となる。すなわち、波数ベクトル3成分のうち実数が2つ、虚数が1つであるので、筆者らはこれを2次元光波伝送路と呼んでいる。

筆者らの提案した伝送路は、2次元光波伝送路を小さく巻き込み線状にしたものである (図2)²⁾。このとき波数ベクトルは線路方向のみ実数であり、実数成分は1つ、虚数成分2つとなるので、筆者らはこれを1次元光波伝送路と名づけた。こうすると光ビームの厚さだけでなく、全体を波長より十分小さい領域に閉じ込めることができる。そもそも、光ビームを回折限界以下に集束できないのは、自由空間中の光は波数ベクトルの3成分すべてが実数の3次元光波であるためである。波数保存則より各波数成分は上限値

をもつので、フーリエ変換から3次元光波のビーム幅には最小値が存在することが示される。誘電体光導波路中の光は見かけ上は1次元であるが、実際は3次元光波である。このため導波路幅のみ小さくしても、ビーム幅をそれに伴いいくらか小さくすることはできない。一方、1次元光波伝送路では、この回折限界以下に光を集束することができる。これは波数ベクトル成分に虚数を含むために、

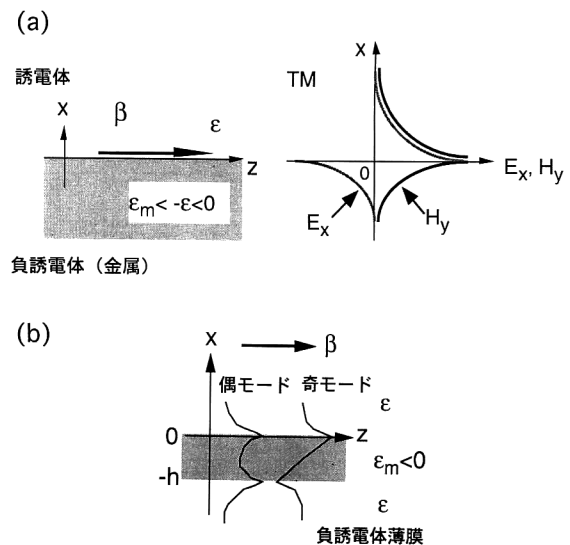


図1 (a) 表面波の界分布, (b) 負誘電体薄膜の結合モード。

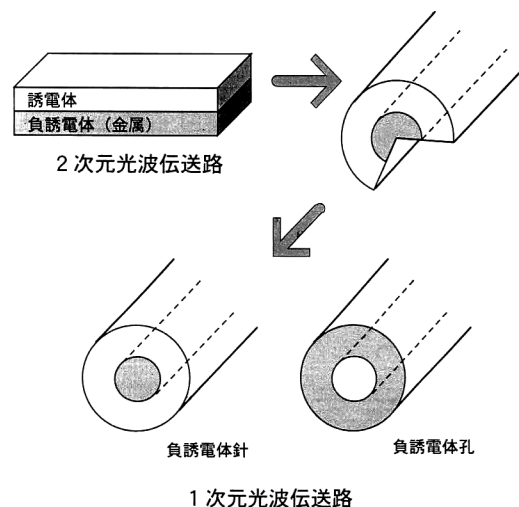


図2 2次元光波伝送路から1次元光波伝送路へ、1次元光波伝送路の例として負誘電体針、負誘電体孔を示す。

大阪大学大学院基礎工学研究科 (〒560 豊中市待兼山町 1-3)
E-mail: takahara@ee.es.osaka-u.ac.jp

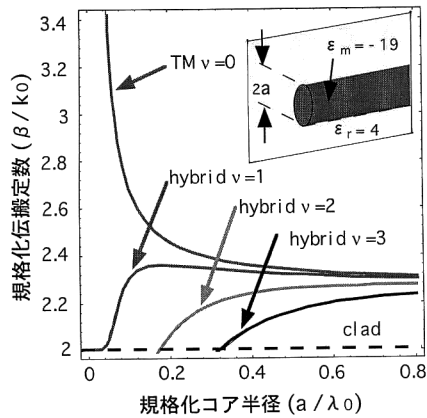


図3 伝搬定数のコア半径依存性と負誘電体針の模式図。

波数保存則を満たすのに各波数成分が上限値をもつ必要がなく、いくらでも大きな値をとりうるからである。

1次元光波伝送路には図2に示すものの他にも多くの種類があるが、いずれも負誘電体・誘電体界面を巻き込んだ構造をとる²⁾。負誘電体針については、すでに20年以上前から研究があったようであるが³⁾、近年の近接場光学の発展に伴い、再びこの系に大きな興味もたれている⁴⁾。筆者らの研究はこれらの研究と重なる部分もあるが、独立に異なった観点から行われたものであり、1次元光波の概念や導波路としての積極的な取り扱いは独自のものである。

2. 1次元光波伝送路の伝搬特性

1次元光波伝送路のうち、ここでは図2の負誘電体針の伝搬特性を紹介する。図3は負誘電体針におけるSPPの伝搬モードであり、4つのモードの伝搬定数 β のコア半径 a に対する依存性を示す。ここで、光波長633 nm、コアに無損失の銀($\epsilon_m = -19$)、クラッドに誘電体($\epsilon_r = 4$ (屈折率2))を考えている。図3から最低次のTMモードと1次ハイブリッドモードについては、コア半径を小さくしてもカットオフがないことがわかる。また、各モードのビーム半径 w のコア半径依存性を図4に示す。図4にこのときの電磁界分布の模式図を示すが、電磁界強度はコア、クラッドとも半径方向に変形ベッセル関数的減衰をする。

図3, 4からTMモードは $a \rightarrow 0$ で伝搬定数が無限大に近づくとともに、ビーム半径がいくらでも細くなることがわかる。負誘電体針にはSPPから出発してコア半径をいくら小さくしても遮断されない伝搬モードが存在することになる。また、1次ハイブリッドモードのビーム幅は、いったん最小値をとったあと $a \rightarrow 0$ で非常に大きくなり発散する。これより自由空間中に波長より十分小さい(目に見えない)金属針を置き、このモードを励振すると、光ビームはあたかも回折広がりがなく自由空間中をガイドされていくという興味深い性質を示すことがわかる⁵⁾。

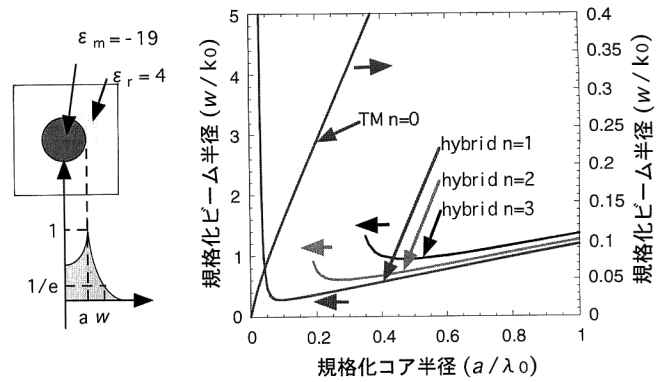


図4 ビーム半径のコア半径依存性と界分布の模式図。

現実の金属は理想的な負誘電体ではなく、誘電率として負の実部のほかに小さな虚部をもっており、これが伝送損失の原因となる。TMモードの場合は、伝送損失はコア径を小さくしてゆくと急激に増大するが、具体的な数値例として、コア直径20 nmのときビーム直径33 nm、伝送損失3 dB/410 nmとなる。超微細光素子への応用においては、回路長だけ損失を少なく伝搬できればよいので、この損失は許容できるといえる。

3. 将来の展望—超微細光集積回路の実現

1次元光波伝送路を用いると光ビーム幅に波長による制限がなくなるため、光素子の超小型化が可能となる。これに非線形光学材料と組み合わせて機能性をもたせれば、光集積回路の超微細化が可能となろう。また、近接場光学顕微鏡プローブのさらなる微細化にも応用できる。このような応用のためには、興味あるモードの励起方法、金属の伝送損失の低減方法、ナノメートル径の金属細線の作製プロセスなどの課題があるが、これらは今後の研究が待たれる。

文 献

- 1) J. J. Burke, G. I. Stegeman and T. Tamir: "Surface-polariton-like waves guided by thin, lossy metal films," Phys. Rev. B, **33** (1986) 5186-5201.
- 2) J. Takahara, S. Yamagishi, H. Taki, A. Morimoto and T. Kobayashi: "Guiding of a one-dimensional optical beam with nanometer diameter," Opt. Lett., **22** (1997) 475-477.
- 3) C. Ashley and L. C. Emerson: "Dispersion relations for non-radiative surface plasmons on cylinders," Surf. Sci., **41** (1974) 615-618. その他の過去の文献については4)中の文献を参照のこと。
- 4) 近接場光学顕微鏡への応用については、例えば、L. Novotny and C. Hafner: "Light propagation in a cylindrical waveguide with a complex, metallic, dielectric function," Phys. Rev. B, **50** (1994) 4094-4106.
- 5) 山岸 傑, 高原淳一, 北川勝浩, 森本朗裕, 小林哲郎: "極細金属細線($\ll \lambda_0$)により光をガイドする", 第57回応用物理学学会学術講演会予稿集 (1996) 8a-PA-12.

(1997年8月26日受理)