

## 高密度光集積回路へ向けた金属光配線技術

片桐 祥雅\*・中野 義昭\*\*、\*\*\*\*・小林郁太郎\*\*・光岡 靖幸\*\*\*

### Metal Optical Wiring Technology for High-Density Phonic Integrated Circuits

Yoshitada KATAGIRI\*, Yoshiaki NAKANO\*\*, Ikutaro KOBAYASHI\*\* and Yasuyuki MITSUOKA\*\*\*

Great interest has been focused on novel optical waveguides innovating on conventional dielectric waveguides, to achieve advanced high-density optical integrated circuits with various functions including optical signal processing. A candidate is the one using light propagation on metal surfaces. This surface lightwave is based on coupling between photon and surface plasmon, and it has some remarkable features such that it can exist in a narrow cavity in thickness less than wavelength and that it also can pass through sharp bent corners. In this paper we explain the propagation mechanism and show some experimental results on the novel waveguides.

**Key words:** optical integration circuit, optical waveguide, surface plasmon, metal stripe, plasmon polariton

光ファイバーによる大容量伝送技術の確立と高機能・低価格の個人情報端末の普及を背景に IT (information technology) は急速な発展を遂げた。しかしさらなる進展のため、通信の超高速・大容量のみならずフルメッシュアーキテクチャーに代表されるような IP 網に適したネットワークの実現がキャリアサービス会社にとって急務となっている。このようなネットワークではノードにおける膨大なデータ処理が課題であり、その解決策のひとつとして高密度波長多重 (DWDM) 技術を基盤とする光学的ノード処理 (たとえば光クロスコネクタ) が鋭意検討されている。しかしながら、DWDM では電気・光学を含め多種多様の部品を必要とするため、それらをコンパクトに収容する高密度光集積回路の実現が望まれている。

以上の背景のもとで、PLC (planar lightwave circuit) 技術を基盤とした種々の光集積回路の検討が進められている。導波路の曲げ部分における放射損失により曲げの曲率半径の最小値が制限されることが回路の微細化の障害であり、これを除去するための検討が進められている。そのひ

つつは、半導体とガラスとの大きな高屈折率差による強い閉じ込めを利用し、光集積回路の配線に必要な急峻曲げを実現しようとするものである。その典型は Si をコアとする導波路を SOI (silicon on insulator) 基板に形成したもので、サブミクロンの直径をもつコアで曲率半径 10 数  $\mu\text{m}$  で低損失の曲げが実現されている。また化合物半導体 (たとえば InPGaAsP) 導波路基板を用いた光集積回路では、半導体の高屈折率性により最小曲率半径を低減して従来の石英系 PLC と比較して大幅な小型化が実現されている。さらに、導波路の能動的機能を積極的に利用することにより導波路と同時にゲートスイッチ、変調器、検出器、光増幅器等の光学素子の集積化が可能となり、種々の処理機能を有する光集積回路が実現されつつある。

このような試みにもかかわらず、真に必要なノード処理機能を考えると、従来の電子 IC と同等の高密度集積化が光集積回路にも望まれる。しかし、誘電率閉じ込めに基づく半導体光集積回路は従来と同様に最小曲げ半径が制限され、それが将来の高密度光集積への障壁となると懸念され

\* 日本電信電話株式会社 NTT 通信エネルギー研究所 (〒243-0198 厚木市森の里若宮 3-1)

\*\* 東京大学大学院工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1) \*\*\*\*E-mail: nakano@ee.t.u-tokyo.ac.jp

\*\*\* セイコーインスツルメンツ株式会社高塚事業所 (〒270-2222 松戸市高塚新田 563)

る。このため、屈折率による光閉じ込めの原理を革新し、高密度光集積回路を実現する新たな導波機構および導波路が必要となるのである。

このような導波機構として注目されるのが、光波の金属表面に沿った伝搬である。金属表面または金属誘電体界面が光が伝搬する現象は、誘電体表面を伝搬するエバネセント波と同様に古くから経験的に知られていた。しかし、マクスウェル方程式から導出される界面に光波が局在する条件を物理現象に結びつけることにより、光の表面伝搬の機構を金属の表面プラズモンと誘電体のフォトンとの相互作用が本質であると結論付けて明確に説明できるようになった<sup>1-3)</sup>。このような光の表面伝搬の機構は、マイクロ波、ミリ波に適用されている表面ストリップ線路の概念を光領域に発展させたものと同等であり、回折限界を超える波長以下の領域への光の閉じ込めを可能とするのみならず、新たな機能（たとえば急峻な曲げ）を実現できる可能性をもっている。本稿では、この新たな導波機構の原理を解説し、これに基づいた光導波路の最近の筆者らの試みについて紹介する。

## 1. 界面局在の原理

界面に垂直な方向には電場と磁場の大きさが指数関数的減衰を示す関数がマクスウェル方程式の解のひとつであるためには、磁場ベクトルが界面に沿った TM 波であること、および界面を挟む2つの誘電体の誘電率の実数部が互いに逆符号であることが必要条件である。この純数学的表面局在波の存在条件を物理的に理解するため、図1に示すモデルを使って説明する。金属-誘電体界面に沿ってはじめに伝搬光（z 方向）が誘電体側の自由空間にあったとする。電場ベクトルは界面に対して垂直であり、金属表面にわずかに浸透して表面電子を振動させる。電子は電場に沿って界面に垂直な方向に振動するが、界面近傍では電子はポテンシャル障壁により金属内に強く束縛されているので運動が阻止される。これにより金属表面で電子の粗密領域が形成される。粗密の周期は光の電場の振動周期に一致し

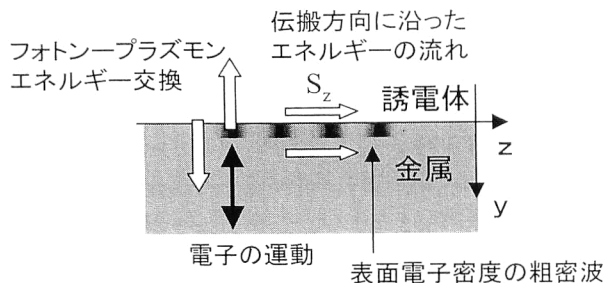


図1 金属-誘電体界面を伝搬する SP 波。

ており、界面に沿った電子の粗密波が励起される。このようにして光波は表面の電子の粗密波と結合状態を形成する。ただし、光波と電子の粗密波は同じ方向に同じ速度で伝搬しなければならないという整合条件が課せられている。

さて、この結合波が表面局在波であることは次のようにして理解できる。電子の粗密波は自由電子ガス中を伝搬する波であって、その比誘電率は電子の運動により発生する分極から

$$\epsilon = 1 - \frac{N_e}{m\epsilon_0\omega^2} \quad (1)$$

となる。ここで  $\omega$  は光の角周波数、 $N_e$  は電子数密度、 $m$  は電子の質量である。この式から明らかなように電子数密度が高い媒質では誘電率は負となり得る。このとき、上記の結合波はマクスウェル方程式の局在条件を満足する表面局在波であることがわかる。

結合波の性質を図1にもどって考えてみる。電子の粗密波の励起により、結合前の TEM 波は伝搬方向に沿った電場ベクトル成分をもつ TM 波となっている。電場の垂直成分と磁場との外積ベクトルの方向は誘電体領域および金属領域ともに等しい伝搬方向を示し、その大きさ ( $S_z$ ) はエネルギーの流量に相当する。伝搬方向成分の電場と磁場との外積ベクトルの方向は、光の振動周期ごとに反転し、界面を介したエネルギーの交換量に相当する。量子力学的には、誘電体側のフォトンと金属側の表面プラズモンにより場がエネルギーを交換していると解釈できる。この交換により、光波の金属表面への結合力が生まれると考えられる。

以上説明した表面局在波は、金属以外にも負の誘電率を示す物質であればその表面に存在できる。種々の媒質について表面波が存在する可能性を表1にまとめた。媒質1は正の誘電率を示す通常の誘電体で、多くの誘電体や半導体が含まれる。この媒質を伝搬する電磁波のエネルギー量子はフォトンである。一方、媒質2は負の誘電率を示す媒質の候補群である。誘電体および半導体の一部には非対称結晶構造を有するものがあり、電場の振動により誘起された

表1 異種材料界面に電磁波が局在する可能性がある組み合わせ。

	材 料	結合する励起子	誘電率の符号 (実数部)
媒質 1	誘電体	フォトン	正
	半導体		
媒質 2	誘電体	ポラリトン	負
	半導体	ポラリトン	
	金 属	プラズモン・ポラリトン	

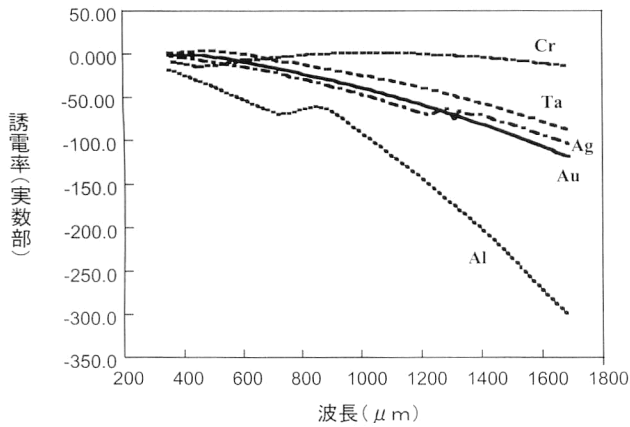


図2 種々の金属の誘電率.

表2 貴金属のおもな物性.

元 素	Cu	Ag	Au
有効電子数	0.37	0.89	0.73
電子数密度×10 <sup>22</sup> cm <sup>-3</sup>	8.5	5.8	5.9
電気抵抗×10 <sup>-6</sup> Ω cm	1.7	1.6	2.4

格子振動が形成する分極により誘電率が負となりうる。さらにこのような半導体が自由キャリアを含む場合にはキャリアの粗密波によるプラズモンが発生し、前記の励起子と結合した表面プラズモン-ポラリトンが励起される。この励起子は、誘電体側の光子との結合対象である。

## 2. 伝搬損失と材料の選択

2つの媒質の界面に局在波が形成される条件は、前章で述べたように、媒質の分類的呼称にかかわらず誘電率が負となることであった。たとえば、金属-誘電体界面の表面プラズモンと光子の結合波 (SP 波) を考えた場合、金属には誘電率の実部が負でその大きさが大きいこと、すなわち、強い金属性を示すことが要求される。しかし、数百 THz 程度の光の周波数領域でこのような金属性はこれまで議論されることが少なく、改めて金属性を評価する必要があった。図2に種々の金属膜の誘電率 (実数部) を示す。Crの誘電率はほぼゼロで光学的には金属性は低い。一方、貴金属であるAuをはじめAg, Taは良好な金属性を示す。また、Alは貴金属よりもさらに金属性が強い。このように誘電率に着目して注意深く材料を選択すればSP波の伝搬を可能とする材料を選択できる。

さて、金属の誘電率が負であることから伝搬損失は生じない。これは伝搬定数が純虚数となるためである。損失が発生するためには数学的に金属の誘電率は複素数でなければならない。このため電子伝導率 (または抵抗) を考慮する必要がある。このような状況をいかえると、SP波の伝搬損失は金属の電気抵抗により定まるといえることであ

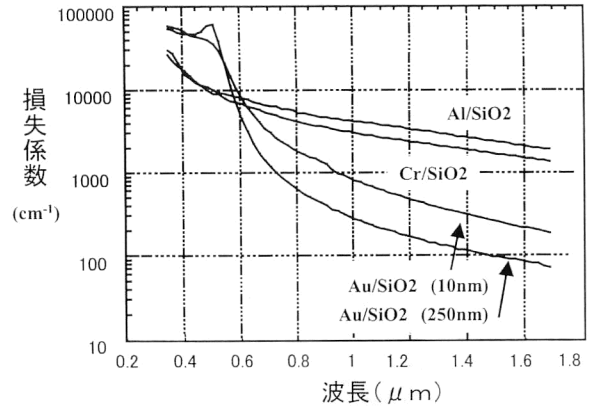


図3 誘電率 (実測値) から計算した各種金属-誘電体界面に存在するSP波の伝搬損失係数.

る。電子の緩和時間を  $\tau = m\sigma / N_e e^2$  とおいて複素誘電率を求め伝搬定数を計算すると

$$\beta = k_0 \sqrt{\frac{\epsilon_1 \left\{ 1 - \frac{\sigma}{\epsilon_0 \omega} \cdot \frac{i + \omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2} \right\}}{\epsilon_1 + 1 - \frac{\sigma}{\epsilon_0 \omega} \cdot \frac{i + \omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2}}} \quad (2)$$

となる ( $\epsilon_1$  は誘電体の誘電率)。この虚数部が損失係数を与える。貴金属等の金属については表2に示すような物性がわかっているので、自由電子ガスモデルによりSP波の損失係数を理論的に予測することができる。これによると、AuとSiO<sub>2</sub>界面のSP波の伝搬定数は波長1.55 μmで約20 cm<sup>-1</sup>となる。この結果は、金属性がより顕著となる低周波数領域の通信波長帯とはいえ、従来の半導体導波路なみの低損失なSP波の導波路を実現できることを示している。

低損失SP波導波路の実現の可否を判断するため、分光エリプソメーターにより得られた誘電率をもとに伝搬定数を計算し、その虚数部から損失係数を定量評価した。その結果を図3に示す。金属性が低いCr/SiO<sub>2</sub>でのSP導波の損失は1000 cm<sup>-1</sup>以上ときわめて大きいが、Au/SiO<sub>2</sub>では損失はきわめて小さく、とくに通信波長帯では100 cm<sup>-1</sup>以下となっている。Alについては、予測に反して損失が大きくなっている。これは酸化によりAl表面が誘電体に変質したため、作製方法および構造の最適化によりSP波導波路へ適用可能と考えている。

## 3. 実験による検証

従来よりSP波をガイドする導波路構造の一般的な提案がなされている<sup>4-8)</sup>。図4はその典型を示している。最も単純なのは金属パターンが誘電体基板に装荷された装荷型である。装荷型はしばしば金属付与による応力誘起による屈

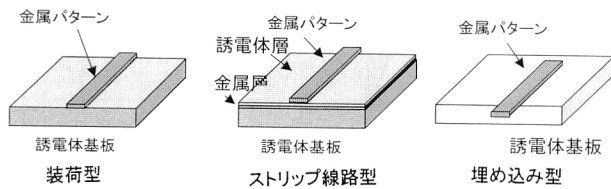


図4 SP波を伝搬させる金属光導波路の構造.

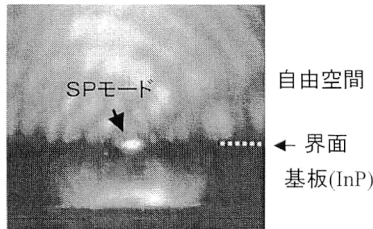


図5 金属-誘電体 (Au/SiO<sub>2</sub>) 界面を伝搬する SP 波の観察例.

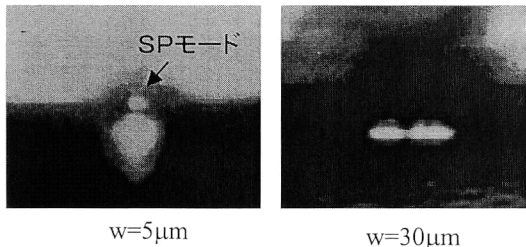


図6 SP 波の横モードとストライプ幅. 試料: Au/SiO<sub>2</sub>/InP.

折率閉じ込め導波路と混同されることがあるが、伝搬の偏光依存性によりそれらの違いを実験的にも判別できる。ストリップ線路形は、誘電体基板上に付与された金属膜の上に、波長以下の厚みの誘電体層を介して金属パターンが付与されたものである。光は金属パターン直下で金属に挟まれた部分を伝搬する。埋め込み型は、波長以下の厚みまたは直径の金属細線を誘電体に埋め込んだものであり、金属パターンがコアとして機能する SP 波の導波路である。

最近になって装荷型および埋め込み型で SP 波の伝搬検証が報告されるようになった。装荷形では横閉じ込め機構がいまのところ不明であるが近接場顕微鏡により伝搬が検証されている。また、埋め込み型で長距離伝搬 (数 mm) の検証が奇しくも通信波長帯で行われ、低損失 SP 波伝搬の可能性が実験で初めて示された<sup>9)</sup>。筆者らは、簡易な構造の装荷型での SP 波伝搬の検証をこれまで試みてきたと同時に、定量的な考察により導波機構の解明を進めている。以下ではそれらの結果の一部を紹介する。

### 3.1 伝搬の検証

#### 3.1.1 金属-誘電体界面の SP 波

InP 基板上に誘電体媒質として SiO<sub>2</sub> (200 nm) を付与し、その上に Cr (5 nm) を接着剤として Au ストライプ

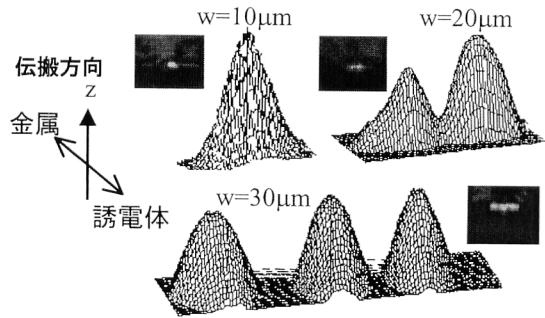


図7 各種 SP 波の横モードの強度プロファイル. 試料: Au/SiO<sub>2</sub>/InP.

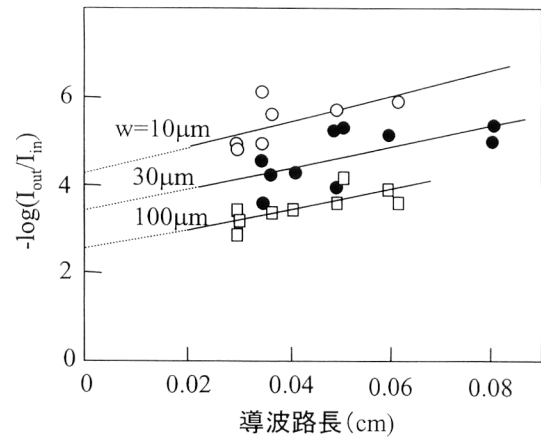


図8 導波路長と入出力光強度比. 試料: Au (250 nm)/SiO<sub>2</sub> (200 nm)/InP.

(厚み 250 nm) を装荷して形成した、長さ約 0.5 mm の導波路について SP 波の導波の検証を行った。図5は、光は導波路の一方の端面から入射し、伝搬した SP 波が他方の短面から出射するのを観察したものである。中央部 (ストライプ部分) にスポットが観察されている。このスポットは TM 偏光しており、SP 波であると考えられる。

装荷形の横モード閉じ込め機構を解明するため、種々の導波路幅で SP 波の伝搬特性を調べている。実験的には SP 波を伝搬させる最小のストライプ幅が存在し、ストライプ幅の増大とともに横モードはシングルからマルチへと変化することが確認された (図6)。さらに、出射光の強度プロファイル測定により、横マルチモードは多数のフィラメントから構成され、その数もストライプ幅に比例して増大することがわかった (図7)。このような横モードの特性は従来の誘電率閉じ込めの理論では説明ができない。マイクロ波回路に類似したエネルギー伝搬機構を考慮した SP 波固有の導波機構を今後構築して説明する必要がある。

導波路の損失を定量的に評価する最も単純な方法は、導波路に対する入力光と出力光の強度比と導波路長から損失係数を導出する方法である。種々の導波路長についてこの測定を行い強度比の自然対数をとれば、結合効率がわから

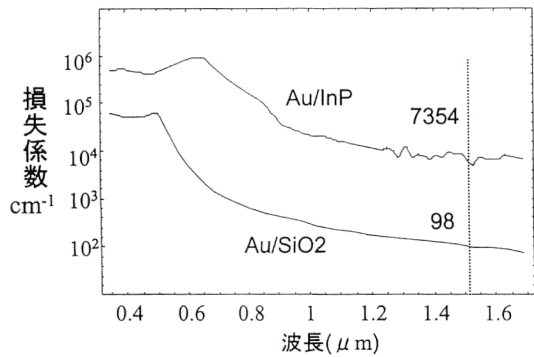


図9 誘電率(測定値)から計算される金属半導体界面のSP波の損失係数.

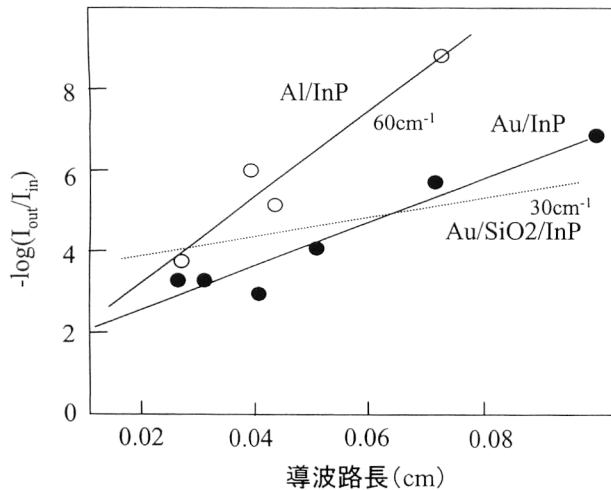


図10 金属-半導体界面のSP波の入出力比による伝搬損失評価.

なくてもその傾きから直接損失係数が求められる。図8は種々のストライプ幅について導波路長と強度比の自然対数との関係を示したものである。結合効率はストライプ幅の増大とともに増大するが、損失係数はほぼ一定であり、さらにそれは  $40 \text{ cm}^{-1}$  と比較的小さい値であった。

### 3.1.2 金属-半導体界面のSP波

半導体は、受動・能動を問わず多様な光集積回路への展開を可能とする材料である。分光エリプソメーターによる誘電率からの予測では、図9に示すように、通信波長帯であっても非常に大きな損失を示す。しかし、実際にInP基板上に金属を装荷して求めた損失係数は、 $40 \sim 60 \text{ cm}^{-1}$  程度であった(図10)。この実験により金属/半導体もSP波をよく伝搬する材料であることがわかり、検討しうる応用範囲が大きく広がった。

### 3.2 曲げによるSP波の屈曲

表面プラズモンと光子が強く結合しているSP波伝搬では、誘電体側の光波を強引に金属との界面に結合させているとみなすことができる。したがって、金属パターンに屈曲部を設ければ、それに沿ってSP波も屈曲すること

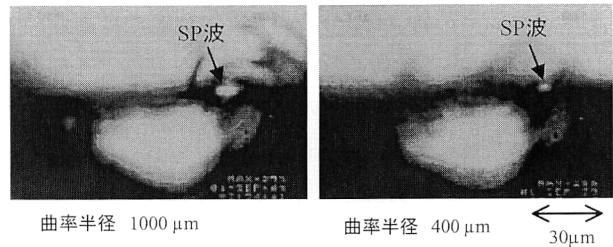
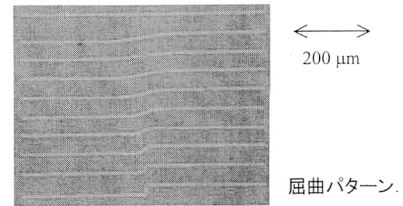


図11 曲げ導波路を伝搬するSP波の観察例(1).

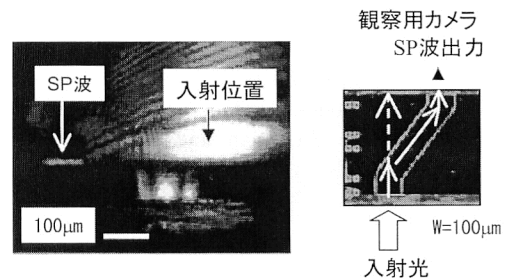


図12 曲げ導波路(45度)を伝搬するSP波の観測例(2).

が期待できる。この命題を実験的に検証するため、屈曲部を有する装荷形導波路を作製してSP波の伝搬特性を調べた。図11は曲率半径が異なる2つの屈曲導波路のSP導波を観察した結果で、いずれの場合も入射位置からオフセットされたシングルモードの出力スポットを観測したことから金属パターンによりSP波が屈曲したといえよう。ただし、基板側を通過する光波により、常に金属パターン部分へエネルギーが供給されて出力スポットが形成できたのだと反論する余地が残されている。このため、さらに図12に示すように入射位置から大きくオフセットされた出力位置を有する導波路を作製し、SP波の導波の有無を調べた。その結果、入射位置からの迷光が完全に除去されていてもSP波はパターンに沿って屈曲することが確かめられた。

高密度光集積回路を実現する新たな技術として、金属-誘電体界面を伝搬する表面プラズモン-光子結合波について解説するとともに、これに基づく新たな光導波路について最近筆者らが検討してきた結果の一部を紹介した。

SP波の存在はマクスウェル方程式に基づいた理論展開により説明が可能となったが、現状では誘電体導波路と比較すると完全に理論が整備された状態ではない。とくに

SP 波の曲がる特性については不明の点が多いばかりでなく、従来の理論がそのまま適用できるかどうかさえ未知である。また、これらの理論を検証するためには、ナノメートルのスケールから原子スケールに至るまでのきわめて微細な層構造をもつ導波路に対して、精密にプローブを位置決めできる制御技術が実験には必要となる。このようなナノテクノロジーの確立は、今後の大きな課題である。また、SP 波の伝搬に直接影響を及ぼす金属材料物性とその制御も大きな課題である。これらの技術が融合し、SP 波の全容が解明された後には、光集積回路の信号伝送線路設計の指針となるとともに、新たな機能素子への展開も可能となることが期待される。

## 文 献

- 1) R. H. Ritchie: "Surface plasmons in solids," *Surface Sci.*, **34** (1973) 1-19.
- 2) R. Ruppin: "Surface effects on optical phonons and on phonon-plasmon modes," *Surface Sci.*, **34** (1973) 20-32.
- 3) 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.

- 4) 高原淳一, 小林哲郎: "ナノトンネルを伝搬する光一低次元光波一", *応用物理*, **68** (1999) 673-678.
- 5) J. Takahara, S. Matsumoto, A. Eda, H. Murata and T. Kobayashi: "Guiding of two-dimensional optical wave by nanostructures in thin metal gap," *The 6th International Conference on Near-field Optics and Related Techniques 2001*, MoP77 (2001).
- 6) P. Berini: "Plasmon-polariton waves guided by thin lossy metal films of finite width: Bound modes of symmetric structures," *Phys. Rev. B*, **61** (1999) 10484-10503.
- 7) J.-C. Weeber, J. R. Krenn, A. Dereux, B. Lamprecht, Y. Lacroute and J. P. Goudonnet: "Near-field observation of surface plasmon polariton propagation on thin metal stripes," *Phys. Rev. B*, **64** (2001) 045411.
- 8) 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.
- 9) R. Charbonneau, P. Berini, E. Berolo and E. Lisicka-Shrek: "Experimental observation of plasmon-polariton waves supported by a thin metal film of finite width," *Opt. Lett.*, **25** (2000) 844-846.

(2002年3月1日受理)