



Tokyo Gakugei University Repository

東京学芸大学リポジトリ

<http://ir.u-gakugei.ac.jp/>

Title	金属層を有する光導波路におけるTMモードの分散関係
Author(s)	藤井, 和人
Citation	東京学芸大学紀要. 第6部門, 技術・家政・環境教育, 56: 9-12
Issue Date	2004-11-30
URL	<a href="http://hdl.handle.net/2309/2986">http://hdl.handle.net/2309/2986</a>
Publisher	東京学芸大学紀要出版委員会
Rights	

## 金属層を有する光導波路における TMモードの分散関係

藤 井 和 人

工 学\*

(2004年7月30日受理)

FUJII, K. : TM-mode Dispersion Relations of Slab Waveguides with Metal Clad. Bull. Tokyo Gakugei Univ. Sect.6, 56 : 9-12 (2004) ISSN 1341-1705

### Abstract

We have investigated the mode dispersion relations of the slab-waveguide with a metal cladding layer focusing on the TM mode. From the calculation, a surface plasmon polariton mode (SPP-mode) is shown the area of  $1.5319649 > n_{\text{eff}} > 1.5217$ , where  $n_{\text{eff}}$  is a the effective refractive index and this mode has no cutoff. The effective extinction coefficients of SPP-mode are by 2 orders higher than those of quasi-propagation modes and its maximum value is 0.0024. However, it is useless for mode-demultiplexing device because of its effective refractive index.

(in Japanese)

**Keywords** : metal cladding, polartion, SSP, waveguide

*Department of Engineering, Tokyo Gakugei University, Koganei-shi, Tokyo 184-8501, Japan*

### 1. はじめに

3層スラブ型光導波路の場合、1層もしくは2層が金属層により構成されているとき、TMモードの伝播に伴い表面プラズモンポラリトンが発生することが知られている。ただし、一般的には、その波数ベクトルから導かれる有効屈折率は、境界を形成する物質の屈折率よりも大きいことから、高屈折率プリズムによるATR（減衰全反射）信号により測定されることが多い。一方、各層が、複素屈折率を有するような、より一般的な導波路を扱える分散関係式が報告されたのは1999年に至ってからである<sup>1)</sup>。金属クラッドを持つ導波路の最初の報告は1974年であり<sup>2)</sup>、このときから、より一般的なモード分散関係式が求められていなかった期間は、各層を構成する物質の複素屈折率が金属の様に虚部が実部に比べて極めて大きい場合、もしくは、虚部が実部に比べて極めて小さい場合を扱い、さまざまな近似式が検討されてきた<sup>3-6)</sup>。そして、これらの多くは表面プラズモンポラリトンの分散関係を求める為のものであった。

この表面プラズモンポラリトンは、TEモード・TMモードのモード選択フィルターや高密度磁気情報の読み出しに应用されたり、光の波長変換に関する実験も行われており、近年、再び注目される様になった<sup>7,8)</sup>。本報告では、3層スラブ型光導波路のクラッド層が複素屈折率を持つ層で構成されている場合の非対称導波路に関するモード分散関係式に関して検討する。特に、金属層である場合に、どのような特徴が現れてくるのかに注目した。また、求められた式は、複素屈折率の虚部が負の場合には光増幅を正の場合には光吸収を表し、光増幅器の検討にも使用できるものである。

\* 東京学芸大学 (184-8501 小金井市貫井北町4-1-1)

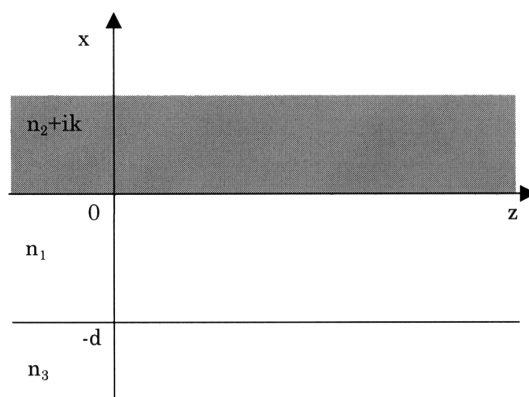


図1 クラッドが複素屈折率を有する光導波路の概要図。  
nは各層の屈折率をkは消衰係数を示している。dは  
ガイド層の厚さに相当する。

## 2. モード分散関係式

各層の屈折率を図1の様にする。光はZ方向に進み、角周波数を $\omega$ として、 $\text{Exp}[i(\omega t - kz)]$ を進行波の成分とする。ここでkは波数である。これと、Maxwellの波動方程式より各層の磁界分布をRef. 1の電界分布のようとする。さらに、これらの係数を各々

$$r_1 = \frac{((n_2^2 - k^2 - n_{\text{eff}}^2 + k_{\text{eff}}^2)^2 + 4(n_2^2 k - n_{\text{eff}} k_{\text{eff}})^2)^{0.25}}{\text{Sqrt}[(n_2^2 - k^2)^2 + 4(n_2 k)^2]} \quad (1)$$

$$r_2 = \frac{((n_1^2 - n_{\text{eff}}^2 + k_{\text{eff}}^2)^2 + 4(-n_{\text{eff}} k_{\text{eff}})^2)^{0.25}}{n_1^2} \quad (2)$$

$$r_3 = \frac{((n_3^2 - n_{\text{eff}}^2 + k_{\text{eff}}^2)^2 + 4(-n_{\text{eff}} k_{\text{eff}})^2)^{0.25}}{n_3^2} \quad (3)$$

$$\phi_1 = 0.5 \text{ArcTan}[2(n_2 k - n_{\text{eff}} k_{\text{eff}}) / (n_2^2 - k^2 - n_{\text{eff}}^2 + k_{\text{eff}}^2)] + 0.5 - \text{ArcTan}[2(n_2 k) / (n_2^2 - k^2)] - \pi \quad (4)$$

$$\phi_2 = 0.5 \text{ArcTan}[2(-n_{\text{eff}} k_{\text{eff}}) / (n_1^2 - n_{\text{eff}}^2 + k_{\text{eff}}^2)] + 0.5y\pi \quad (5)$$

$$\phi_3 = 0.5 \text{ArcTan}[2(-n_{\text{eff}} k_{\text{eff}}) / (n_3^2 - n_{\text{eff}}^2 + k_{\text{eff}}^2)] + 0.5z\pi \quad (6)$$

とする。ここで、 $n_{\text{eff}}$ は有効屈折率、 $k_{\text{eff}}$ は有効消衰係数、 $z$ は $(n_3^2 - n_{\text{eff}}^2 + k_{\text{eff}}^2)$ の符号が変化する際に、位相 $\phi_3$ がずれてしまうことを補正するための係数で-1か0である。 $y$ は、ガイド層内の磁界分布が指数関数により与えられる場合(表面プラズモンポラリトン)に-1、そうでない場合(擬モード)は0である。これらをRef. 1の分散関数式12式13式に代入し、2つの式を同時に満たす解を得ることでモード分散関係が得られる。

## 3. 計算・検討

金属(アルミ)の場合の波長 $1.3 \mu\text{m}$ における複素屈折率を $n_2 = 1.199984 + i12.0017$ とし、各層の屈折率を $n_3 = 1.510$ ,  $n_1 = 1.520$ とすると、図2, 3のようなモード分散関係が得られる。図中、実線はガイド層厚を点線は有効消衰係数を表している。数字はモード次数である。これらのうち有効屈折率が $n_1$ 以上の領域に現れてくる曲線が表面プラズモンポラリトンを表している。 $n_1$ 以下に現れてくる擬モードのようにcutoffは存在せず、これまでに報告されている分散関係の特徴と一致している。ただし、 $n_{\text{eff}} > 1.5217$ で現れてくるので $1.52 < n_{\text{eff}} < 1.5217$ の領域には、いずれのモードも存在していない。また、このポラリトンモードは $= 1.5319649$ ほどが有効屈折率の上限であった。

これらより、有効消衰係数は、ポラリトンモードのときに最大となり、0.0024であった。ただし、この値は、両サイドに金属クラッドを有するTEモードの場合に比べて4桁ほど小さい値である<sup>9)</sup>。また、これらの図と参考文献(2)のFig. 5を比べると、図3と参考文献のものは良く似たものになっているが、有効屈折率と膜厚の関係は、ポラリトンのモードに関してかなり異なった結果となっている。参考文献における導波路は空気層/ポリマー層/A1層からなっており、我々のものと空気層のみが異なっている。空気層

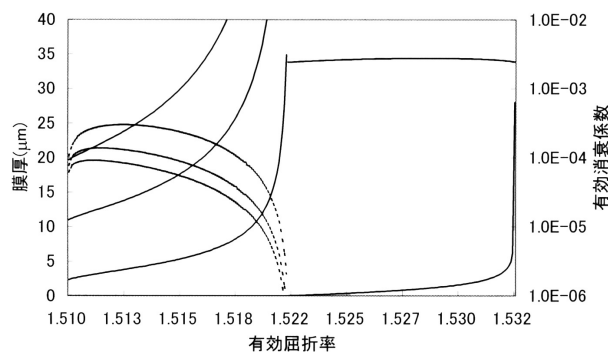


図2 アルミ層を有する光導波路のTMモードの分散関係。実線はガイド層の膜厚を示し、点線は有効消衰係数を示す。

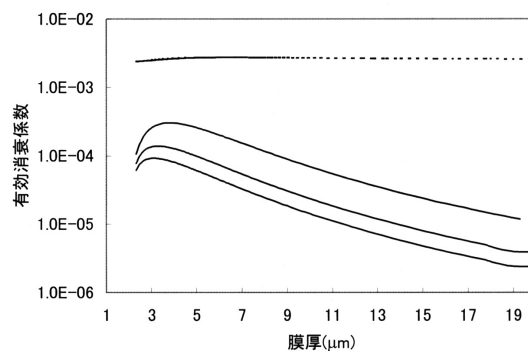


図3 ガイド層厚と消衰係数の関係。Ref.2のair/polymer/A1の分散関係とよく似た結果となっている。実線は擬モードの点線はポラリトンモードの有効消衰係数である。

を持つ場合は、そうでない場合に比べ電磁界の閉じ込めが高くなり、境界部での磁界成分が小さくなる。Kaminow等の場合は、ポラリトンモードの有効屈折率が、擬モードのものと一致した領域があるが、我々が計算したケースでは一致した領域が存在しない。一般に、空気層のように屈折率が低い物質が無いために、クラッドを空気層としない場合は、我々の計算結果と同様になってくる。以上を考えると、空気層を有する導波路の方が吸収性のモード分離素子を考える上では有用に見えてくるが、空気層の場合、埃等の影響を受けやすく、素子性能の安定性を得にくいというデメリットがある。

一方、Kaminow等の計算では、ポラリトンモードが最低次のモードになっているが、我々の場合は、最低次の擬モードとポラリトンモードの次数は共に0であった。その代わりに、(5)式の $y$ によって有効屈折率が $n_1$ を越えた場合の補正を行う必要があった。

図4は同じ導波路に関してTEモードの分散関係を求めたものである。図2と比較すると、有効消衰係数は2桁ほど小さく、各モードが伝播するガイド層の厚さもTMモードのものに比べると薄くなっている。TM、TEの各モードにおける最大の吸収係数は、波長が $1.3\mu\text{m}$ であることから $29\text{cm}^{-1}$ 、 $0.48\text{cm}^{-1}$ となる。これらより、伝播光強度を $1/e$ にする素子の長さは、 $345\mu\text{m}$ 、 $2.08\text{cm}$ となり、素子としてはこの数倍の長さが必要である事から、かなり大きいものになってしまう。一方、ポラリトンモードを使うことが出来る場合には、最大の吸収係数は $266.8\text{cm}^{-1}$ 、これより伝播光を $1/e$ にする素子の長さは $37.5\mu\text{m}$ となる。

また、どの程度の消衰係数まで、この表面プラズモンポラリトンモードが存在するのか調べたが、このポラリトンモードは消衰係数のみを変えた場合消衰係数 = 2 以上の場合は計算により確認したが、これ以下については、確認できなかった。

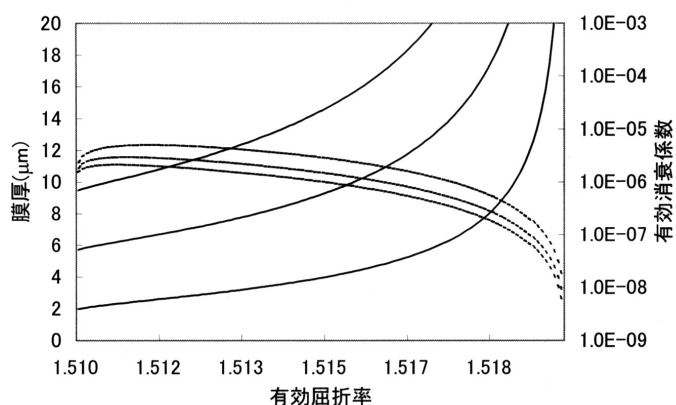


図4 TEモードの分散関係、導波路構造は図2、3と同じ。各モード次数の消衰係数はTMモードのものより2桁近く異なる。実線はガイド層厚を、点線は有効衰係数を表している。

## まとめ

アルミ層をクラッドとする光導波路のTMモードに関する分散関係について、その特徴について調べた。表面プラズモンポラリトンモードは、 $1.5319649 > n_{\text{eff}} > 1.5217$ の領域に現われ、cutoffは存在しなかった。その有効消衰係数は、擬モードのものより2桁ほど大きい、二つのクラッドがともに金属の場合に比べると4桁ほど小さい物であった。計算上のモードの次数は、これまでの報告と異なり、最低次のモードも表面プラズモンポラリトンモードもともに $m = 0$ であった。これは、分散関係式の導出過程が異なるためである。

TEモードとTMモードを比べるとTEモードの有効消衰係数は、TMモードのもりより2桁ほど小さく、この点ではモード分離素子に応用できそうだが、素子サイズを考慮すると表面プラズモンポラリトンモードを利用することが望ましい。ただしこの場合も、空気層をクラッドにする必要があるであろう。

また、どの程度の消衰係数まで、この表面プラズモンポラリトンモードが存在するのか調べたが、今のところ2以上の消衰係数が必要であることがわかっている。これ以下については、今後の課題である。

## 参考文献

- 1) K. Fujii, Opt. Commun. (1999).
- 2) I. P. Kaminow, W. L. Mammel, and H. P. Weber, Appl. Opt. 13 (1974) 396.
- 3) G. Li and S. R. Seshadri, J. Appl. Phys. 67 (1990) 555.
- 4) G. Li and S. R. Seshadri, J. Appl. Phys. 67 (1999) 555.
- 5) S. X. She, Opt. Lett. 15 (1990) 900.
- 6) S. X. She, Opt. Commun. 135 (1997) 241.
- 7) 林 真至, 表面プラズモン励起と近接場光学, 応用物理 第71巻 2002, 705.
- 8) 河田 聡, 近接場光学と表面プラズモンポラリトン, O plus E 1月号 2002.
- 9) K. Fujii, Opt. Commun. 198 (2001) 379.