表面プラズモンと金属光導波路

波多腰玄一

1 はじめに

前章では，半導体レーザーのように複素屈折率分布を持つ光導波路のモード解析法と，Excelでのニュートン法による計算を紹介した。また大きな消衰係数を持つ半導体材料をクラッドに用いた損失導波型光導波路における導波モードについても述べた。

消衰係数の大きい材料の典型例としてもう一つ金属がある。そこで今回は金属／誘電体で構成される光導波路のモードについて考えてみよう。

2 表面プラズモンポラリトン

⑴金属／誘電体界面に形成される導波モード

第5章で述べたように，金属の屈折率はドルーデモデルで以下のように表される（第5章の式⑷2)）。

$$\varepsilon_{\mathrm{r}} = n_{\mathrm{c}}^{2} = 1 - \frac{\omega_{\mathrm{p}}^{2}}{\omega^{2} - i\omega/\tau} \tag{1}$$

ここでω_{p}はプラズマ角周波数で，上式からわかるように$\omega<\omega_{\mathrm{p}}$の領域では誘電率あるいは$n_{\mathrm{c}}^{2}$の実数部は負となり，消衰係数$\kappa$が大きな値をとる。

このような負の誘電率を持つ金属と誘電体の界面には電磁波の局在モードが形成される。これが表面プラズモンポラリトン[†1]である[1)]。略して表面プラズモンとも呼ばれることもある。

z方向に伝搬する表面プラズモンポラリトンの実効伝搬定数をβとし，モード関数を$F(x)$とおくと，前章の式⒁と同様に$F(x)$は以下のように表される。

$$F(x) = \begin{cases} \exp(\gamma_1 x) & (x \le 0) \\ \exp(-\gamma_2 x) & (x \ge 0) \end{cases} \tag{2}$$

$F(x)$の微分に対する境界条件より

$$\alpha_1\gamma_1 + \alpha_2\gamma_2 = 0 \tag{3}$$

ここでα_i（i=1，2）は，前章の式⒅と同じで

$$\alpha_i = \begin{cases} 1 & (\text{TEモード}) \\ 1/n_{\mathrm{c}i}^{2} & (\text{TMモード}) \end{cases} \tag{4}$$

まずTEモードの場合を考えると，α_i=1であるから

$$\gamma_1 + \gamma_2 = 0 \tag{5}$$

$\mathrm{Re}(\gamma_1)>0$，$\mathrm{Re}(\gamma_2)>0$であるから式⑸を満たす解は存在しない。一方TMモードでは

$$\frac{\gamma_1}{n_{\mathrm{c}1}^{2}} + \frac{\gamma_2}{n_{\mathrm{c}2}^{2}} = 0 \tag{6}$$

前述のように金属では$\mathrm{Re}(n_{\mathrm{c}}^{2})<0$であり，誘電体では$\mathrm{Re}(n_{\mathrm{c}}^{2})>0$であるから，式⑹では解が存在する。$\gamma_i$と$\beta$との関係は

$$\gamma_i^{2} = k_0^{2} n_{\mathrm{c}i}^{2} - \beta^{2} \tag{7}$$

---

†1 プラズモンは金属中の自由電子の振動エネルギーが量子化されたもので，表面プラズモンポラリトンはこの自由電子の振動に結合した“電磁波”である。“ポラリトン”のエネルギーはやはり量子化されている。ここでは量子化については述べない。

金属の誘電率実数部が負となるのは，第5章で述べたように，電磁波に対する電子分極の巨視的応答が負であることに対応している。