

11. 光波回路

マイクロ波、ミリ波に対して、極めて波長が短い光波帯では誘電体導波路が用いられる。光波帯における典型的な機能素子の一つとして、誘電体導波路の性質を利用した方向性結合器の動作原理を説明する。

11.1. 誘電体導波路間のエバネッセント結合を用いた方向性結合器

二本の誘電体導波路を近接して配置すると、導波路間に光波電磁界の結合が生じる。この結合は、導波路のクラッド部分に”染み出した”電磁界（エバネッセント界）が関与する。ここでは、二本の導波路構造が同一の対称結合導波路の場合について、エバネッセント結合に基づく導波路間の結合を考える。

対称結合導波路では、伝搬する光波電磁界（固有モード）が、対象軸に対して対称なモード（偶モード）と反対称なモード（奇モード）になる。また、偶モードと奇モードは、それぞれ異なる伝搬定数 β_e 、 β_o で伝搬する。

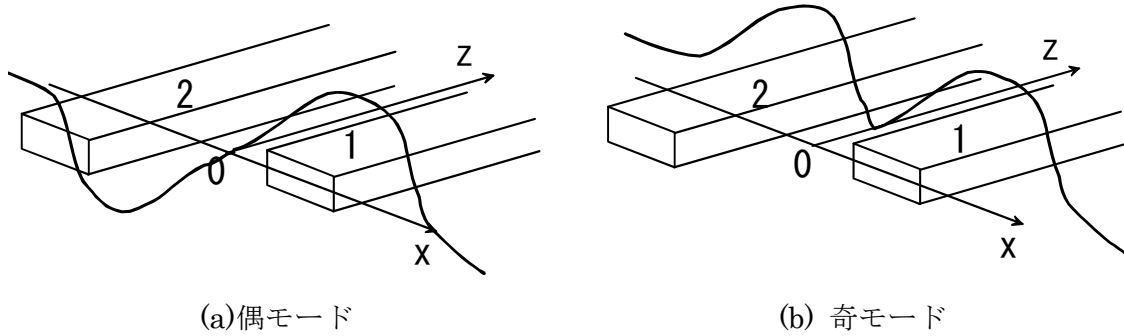


Fig. 11.1 対称結合導波路における偶・奇モードの界分布

導波路の構造は、 $x = 0$ に関して対称とする。偶モードの横方向（ x 方向）の電界分布は $x = 0$ に関して対称関数で表されるので、次のようにおくことができる。

$$\begin{aligned} x > 0 \text{ (導波路1)} & \quad f_e(x) \\ x < 0 \text{ (導波路2)} & \quad f_e(-x) \end{aligned} \quad (11.1)$$

また、奇モードの横方向（ x 方向）の電界分布は $x = 0$ に関して反対称関数になるので、次のように表される。

$$\begin{aligned} x > 0 \text{ (導波路1)} & \quad f_o(x) \\ x < 0 \text{ (導波路2)} & \quad -f_o(-x) \end{aligned} \quad (11.2)$$

したがって、それぞれの導波路中で、伝搬に伴って電界分布は次のように変化する。

導波路 1 ($x > 0$) :

$$E_1(x, z) = E_e f_e(x) e^{-j\beta_e z} + E_o f_o(x) e^{-j\beta_o z} \quad (11.3)$$

導波路 2 ($x < 0$) :

$$E_2(x, z) = E_e f_e(-x) e^{-j\beta_e z} - E_o f_o(-x) e^{-j\beta_o z} \quad (11.4)$$

ここで E_e 、 E_o は、それぞれ偶モード、奇モードの振幅を表す。

[近似]

$x > 0$ の横方向電界分布を次のように近似する。

$$f_e(x) \approx f_o(x) \approx f(x) \quad (11.5)$$

これによって、それぞれの導波路中の伝搬に伴う電界分布は次のように近似できる。

導波路 1 ($x > 0$) :

$$E_1(x, z) = (E_e e^{-j\beta_e z} + E_o e^{-j\beta_o z}) f(x) \quad (11.6)$$

導波路 2 ($x < 0$) :

$$E_2(x, z) = (E_e e^{-j\beta_e z} - E_o e^{-j\beta_o z}) f(-x) \quad (11.7)$$

[定式化]

散乱行列の代わりに、次の行列 $[T]$ を考える。行列 $[T]$ は、結合線路の入力位置 $z = 0$ における電界分布 $E_1(x, 0)$ 、 $E_2(x, 0)$ を、任意の伝搬位置 z における電界分布 $E_1(x, z)$ 、 $E_2(x, z)$ と関係付ける行列である。

$$\begin{pmatrix} E_1(x, z) \\ E_2(x, z) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1(x, 0) \\ E_2(x, 0) \end{pmatrix} \quad (11.8)$$

ここで、 $|E(x, z)|^2$ が各導波路中の光パワーに比例するので、 E_1 や E_2 は散乱行列を定義する a 、 b と同じような意味をもつ。

通常は、導波路における反射は小さく無視できるので、次のようにして行列要素を決定する。

$$(i) \text{ 入力として } \begin{pmatrix} E_1(x, 0) \\ E_2(x, 0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f(x) \\ 0 \end{pmatrix} \text{ を与えて } T_{11} \text{ と } T_{21} \text{ を求める}$$

$$(ii) \text{ 入力として } \begin{pmatrix} E_1(x, 0) \\ E_2(x, 0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ f(-x) \end{pmatrix} \text{ を与えて } T_{12} \text{ と } T_{22} \text{ を求める}$$

(i) 入力条件 $E_1(x, 0) = f(x)$ 、 $E_2(x, 0) = 0$ のとき、

導波路 2 の入力位置 $z = 0$ において

$$E_2(x, 0) = (E_e - E_o) f(-x) = 0$$

なる条件から $E_e = E_o$ となり、式(11.6)から

$$\begin{aligned} E_1(x, z) &= E_e (e^{-j\beta_e z} + e^{-j\beta_o z}) f(x) \\ &= 2E_e \cos\left(\frac{\beta_e - \beta_o}{2} z\right) e^{-j\frac{\beta_e + \beta_o}{2} z} f(x) \end{aligned} \quad (11.9)$$

を得る。

ここで、 $E_1(x,0) = 2E_e f(x)$ が入力条件 $E_1(x,0) = f(x)$ と一致することから $E_e = \frac{1}{2}$ となる。

また、式(11.7)から

$$\begin{aligned} E_2(x,z) &= (E_e e^{-j\beta_e z} - E_o e^{-j\beta_o z}) f(-x) \\ &= -j \sin\left(\frac{\beta_e - \beta_o}{2} z\right) e^{-j\frac{\beta_e + \beta_o}{2} z} f(-x) \end{aligned} \quad (11.10)$$

となる。 $f(x) \approx f_e(x) = f_e(-x) \approx f(-x)$ であることを用いると、式(11.8)の行列 $[T]$ の要素 T_{11} 、 T_{21} は次のように求まる。

$$\begin{aligned} T_{11} &= \cos\left(\frac{\beta_e - \beta_o}{2} z\right) e^{-j\frac{\beta_e + \beta_o}{2} z} \\ T_{21} &= -j \sin\left(\frac{\beta_e - \beta_o}{2} z\right) e^{-j\frac{\beta_e + \beta_o}{2} z} \end{aligned} \quad (11.11)$$

(ii)同様に、入力条件 $E_1(x,0) = 0$ 、 $E_2(x,0) = f(-x)$ のときには $E_e = -E_o = 1/2$ となり、行列 $[T]$ の要素 T_{12} 、 T_{22} は次のように求まる。

$$\begin{aligned} T_{12} &= -j \sin\left(\frac{\beta_e - \beta_o}{2} z\right) e^{-j\frac{\beta_e + \beta_o}{2} z} \\ T_{22} &= \cos\left(\frac{\beta_e - \beta_o}{2} z\right) e^{-j\frac{\beta_e + \beta_o}{2} z} \end{aligned} \quad (11.12)$$

すなわち、行列 $[T]$ は次のように定まる。

$$\begin{pmatrix} T_{11} & T_{21} \\ T_{12} & T_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\left(\frac{\beta_e - \beta_o}{2} z\right) & -j \sin\left(\frac{\beta_e - \beta_o}{2} z\right) \\ -j \sin\left(\frac{\beta_e - \beta_o}{2} z\right) & \cos\left(\frac{\beta_e - \beta_o}{2} z\right) \end{pmatrix} e^{-j\frac{\beta_e + \beta_o}{2} z} \quad (11.13)$$

ここで $e^{-j\frac{\beta_e + \beta_o}{2} z}$ は、伝搬にともなう平均的な位相変化を表す項である。

結合係数を $\kappa = \frac{\beta_e - \beta_o}{2}$ と定義すると、任意の伝搬位置 z における電界分布 $E_1(x,z)$ 、 $E_2(x,z)$ を入力電界分布と関係付ける行列 $[T]$ は次のように定まる。

$$[T] = \begin{pmatrix} \cos \kappa z & -j \sin \kappa z \\ -j \sin \kappa z & \cos \kappa z \end{pmatrix} e^{-j\frac{\beta_e + \beta_o}{2} z} \quad (11.14)$$

※バー出力とクロス出力の間に、常に位相差 $\pi/2$ があることに注意

(1)伝搬距離が $\kappa z = \pi / 2$ を満足するとき

$$[T] = \begin{pmatrix} 0 & -j \\ -j & 0 \end{pmatrix} e^{-j \frac{\beta_e + \beta_o}{2} z} \quad (11.15)$$

・ 一方の導波路から他方の導波路にパワーが完全に推移する

・ 伝搬距離 $z = \frac{\pi}{\kappa} = \frac{\pi}{\beta_e - \beta_o}$ は完全結合長と呼ばれる

(2)伝搬距離が $\kappa z = \pi / 4$ を満足するとき

$$[T] = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & -j \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -j \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} e^{-j \frac{\beta_e + \beta_o}{2} z} \quad (11.16)$$

・ 一方の導波路から入力したパワーが 1 対 1 に分岐する (3dB 方向性結合器)