

多層膜光導波路を用いた光分波器

An Optical Branching Filter Using a Multi-Layered Dielectric Waveguide

濱 崎 襄 二*・東 野 秀 隆**

Joji HAMASAKI and Hidetaka HIGASHINO

1. 序

屈折率と厚さを適切に選んだ多層誘電体薄膜において、薄膜に対して垂直に近い方向から光を入射させたとき、波長選択性の良い干渉形光分波器が実現されることは良く知られた、また、広く実用されているところである。しかし、この種の光分波器を用いて多数の近接した波長成分を持つ光波を波長成分毎に分波したい場合には、それぞれの波長に応じた多数の光分波器を使用しなければならない。一方、同様な構造の多層誘電体薄膜の薄膜に平行に光を入射させるならば、この薄膜は多層膜光導波路となる。周期的な多層膜光導波路については、これをブラッグ反射器として利用する目的で解析されている¹⁾。

本文では、多層誘電体薄膜導波路が著しい波長分散特性を持つことに着目し、このような導波路を主体として近接した多数の波長成分を分波するための光分波器が構成できることを示し、その解析法と結果を述べる。

2. 多層膜導波路形光分波器の動作概要

図1は多層膜導波路形光分波器の概念図である。この分波器は、多層膜導波路と一つの入力結合器と多数の出力結合器とから構成されている。多数の波長成分を持った入力波は、多層膜導波路によって分波され、それぞれの波長成分はそれぞれの出力結合器によって取り出される。多層膜導波路は、屈折率が高い層と低い層との交互積層構造を持つ。高屈折率層をチャンネルと呼ぶことにし、その総数を N とする。低屈折率層をバンクと呼ぶことにするが、半無限に拡がっている最上層および最下層もバンクと呼ぶことにすると、バンクの総数は $N+1$ である。屈折率が変化する方向を x 、波の伝搬方向を z 方向に選ぶものとする。簡単のため y 方向には変化はないものとする。

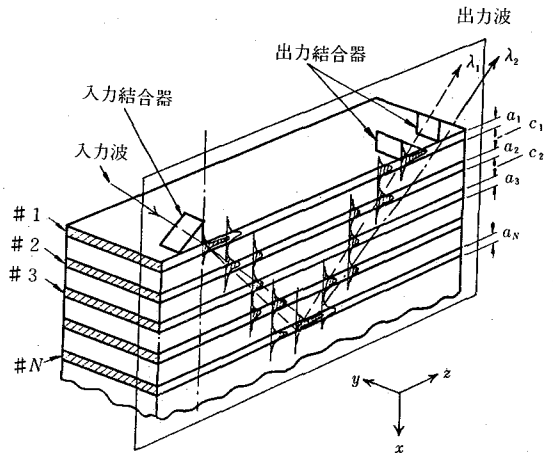


図1 多層膜形分波器の概念図

チャンネルを伝搬する波は、一般には多数の横モードに分類されるが、同一横モードに属する N 箇のチャンネル中の波を、一つのモード群に属する波と呼ぶことにする。仮に、チャンネルの厚さと屈折率が同一であり、かつ、バンクの屈折率が同一でその厚さが充分大きな導波路を考えてみると、一つのモード群の N 箇のモードは縮退して(すなわち、同一伝搬定数を持ち)、各モードは独立にチャンネル中を伝搬する。バンクの厚さが減少してチャンネル間の結合が起ると、この N 箇のモードの縮退が解け、各モードは互いに異なった伝搬定数を持つに至る。

本文で扱う分波器では、着目したモード群(通常 x 方向の基本モード)に属する各モードの伝搬定数が、分波器の中心波長において、等差的となるようにバンクの厚さを選ぶ。このとき、相隣るチャンネルに漏洩電磁界が滲み出すため、各チャンネルの波の伝搬定数が僅かながら変化するので、この変化分が分波器の中心波長において打ち消されるように、チャンネルの厚さあるいは屈折率の微小調整が行われるものとする。

* 東京大学生産技術研究所 第3部

** 松下電器産業株式会社

山口・熊谷氏の理論によれば、上記条件が満たされたとき、そのモード群に属するモードの重畳によって構成された任意の波の x 方向分布は、伝搬に伴った結合・再結合を繰り返した結果として、 z 方向に関して周期的となる²⁾。 $z=0$ において波長 λ_1 の波の波動強度が最上層の第1チャンネルに集中しているとき、この波は第2チャンネル以下に次々と結合・再結合されて深層部に達するが、その後、再び同じ結合・再結合によって浅層部に到り、ついに $z=\Lambda_1$ において再び第1チャンネルに波動強度が集中した形の波となる。導波路の屈折率差が小さいとき多層膜導波路は著しい分散特性を持つので、この周期 Λ_1 は波長によって著しく異なる。したがって、僅かに異なった複数の波長 $\lambda_1, \lambda_2, \dots$ の波が同一入力結合器から第1チャンネルに結合された場合、それぞれの周期 $\Lambda_1, \Lambda_2, \dots$ の位置に複数箇の出力結合器が置かれるならば、波長が異なる波は分離して取り出される。

3. 分波器として利用可能な多チャンネル導波路

各チャンネルを伝搬しているように見える波をチャンネル波と呼ぶならば、これの振幅・位相共に z の関数である。チャンネルの番号を i としたときチャンネル波の複素振幅を A_i ($i=1, 2, \dots, N$) と表し、 $P_i = A_i^* A_i$ ($*$ は共役複素数を表す) がそのチャンネル波の (その z における) 電力を与えるように A_i を規格化することにする。前節に述べた通り多層膜導波路の一つのモード群によって表される波を対象としているので、 $A=(A_1, A_2, \dots, A_N)^T$ (T は転置行列を表す) はそのモード群に属する N 箇のモードの一次結合でなければならない。 A は次の結合方程式によって記述される。

$$(d/dz)A = -jCA \tag{1}$$

ここに、 C は結合行列、 $j=\sqrt{-1}$ である。導波路は相反性、無損失とすると C は実体称行列でなければならない。また、チャンネル間の結合は弱く、したがって、結合は隣接チャンネル間のみが存在するものとする。

N 箇のモードの伝搬定数が等差条件を満足するような C の要素、 C_{ij} ($i, j=1, 2, \dots, N$) を求めると、

$$C_{ii} = b, \quad C_{ij} = 0, \quad (j \neq i \pm 1), \tag{2}$$

$$C_{i, i-1} = C_{i-1, i} = u[(N-i)i]^{1/2}/2.$$

ここに b はチャンネルに共通な伝搬定数 (伝搬波のみ対象としているので共通な伝搬定数は正確には jb である。以下においても同様な表現を用いる)、 u は結合の大きさに関与するチャンネルに共通な係数である。式(2)が満たされたとき、モード番号を n とすると、 N 箇のモードの伝搬定数 b_n ($n=0, 1, 2, \dots, N-1$) は次式の通りとなり、等差条件を満足している。

$$b_n = b + [(N-1)/2 - n]u \tag{3}$$

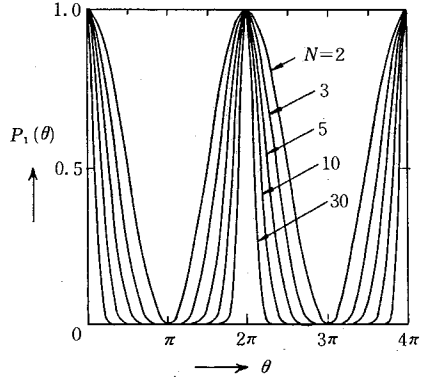


図2 θ と P_1 との関係

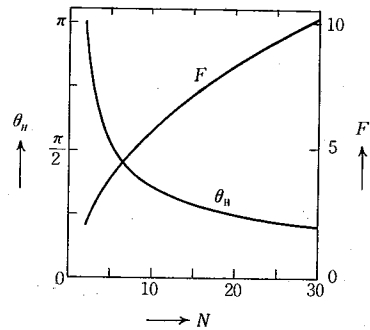


図3 N と θ_H および F との関係

$z=0$ において第1チャンネルに $A_1=1$, 他のチャンネルに $A_i=0$ ($i \neq 1$) で表される波が与えられたとき、 $A_1(z)$ は次式の通りとなる。

$$A_1(z) = [\cos(\theta/2)]^{N-1} \exp(-j\phi). \tag{4}$$

ここに、 $\theta = uz$, $\phi = bz$ である。この式から、チャンネル電力 $P_1(z) = A_1^*(z)A_1(z)$ の周期 Λ とその半値幅 z_H およびフィネス F は次のように求まる。

$$\Lambda = 2\pi/u, \tag{5}$$

$$z_H = \theta_H/u, \quad \theta_H = 4 \cos^{-1}[2^{-1/(2(N-1))}] \tag{6}$$

$$F = \Lambda/z_H = 2\pi/\theta_H. \tag{7}$$

図2は θ と P_1 との関係を、図3には N と θ_H, F との関係を示す。位置選択性はチャンネル総数 N によって定まることがわかる。

波長が変化したとき、式(2)に現れた b, u の値は個々に変化しても構わないが、式(2)の関係そのものは少くとも近似的に満足されていなければならない。 $z=0$ で第1チャンネルに波長 λ の波が乗せられ、その波長に対する周期 $\Lambda(\lambda)$ の m 倍 (m は整数) だけ z 方向に進行した位置 $z=z_1$ でその波が第1チャンネルから引き上げられるとすると、 z_1 は

$$z_1 = 2m\pi/u(\lambda) \approx 2m\pi/u(\lambda_0) + 2m\pi v_0 \cdot (\lambda - \lambda_0),$$

研 究 速 報

$$v_0 = (\partial u^{-1} / \partial \lambda)_{\lambda = \lambda_0} \quad (8)$$

ここに、 λ_0 は中心波長である。 m が大きいとき $(\lambda - \lambda_0)$ は z 方向に引き伸ばされる。しかし分解可能な波長の総数は前述の通りフィネス F で制限される。

波長変化あるいは構造定数の誤差によって、実際の C の値が、式(2)を満たす要素値を持つ C の値 C_0 と誤差分 ΔC の和 $C_0 + \Delta C$ で表されるとき、式(1)より $A(z)$ は次式で表される。

$$A(z) = \exp\{-jz(C_0 + \Delta C)\}A(0) \quad (9)$$

C_0 と ΔC とは一般には交換できないので、この式は見かけほど簡単ではない。しかし、分波器が実現されるための概略の条件は次のように考えてよいであろう。

$$2m\pi\Delta C/u < 1. \quad (10)$$

ここに、 ΔC は ΔC の要素の絶対値の最大値である。この関係は、分波器の波長範囲、製作誤差の目安を与えるものである。

4. 導波路の構造定数と結合行列要素との関係

式(2)に示された C の要素値を実現するための、導波路の構造定数(屈折率を一定としたときにはチャンネルとバンクのそれぞれの厚さ)は、弱結合の導波路においては、対称構造2チャンネル導波路に電磁界理論を適用した結果によって、良い近似で求められる。すなわち、対称2チャンネル導波路について計算された偶モード伝搬定数と奇モード伝搬定数との差の半分が非対角要素 $C_{i,i-1}$, $C_{i-1,i}$ を与え、この二つの伝搬定数の和の半分が近接導波路の影響を考慮したチャンネル波の伝搬定数 C_{ii} を与えるからである。

図4は波数と結合係数との関係の一例を示す。この例では、チャンネルとバンクの屈折率はそれぞれ1.590と1.515であり、物質分散は無視している。また、チャンネルの幅を a 、二つのチャンネル間にあるバンクの幅を c とし、TE横基本モードについて計算している。長さ a で規格化し、横軸 K は波数 ($k = 2\pi/\lambda$) の a 倍であり、縦軸 $1/C$ の C は二つのチャンネルの結合係数の a 倍である。この図の曲線を c/a と K とのそれぞれに関する一次式で近似すると

$$\log(1/C) \approx 1.0036 - 0.3095c/a + (0.0003 + 0.2159c/a)K \quad (11)$$

となるが、 $(c/a)K$ の係数が零でないことに注意されたい。

$C_{i,i-1}$ が式(2)を満足するためには、それぞれのバンクについてそれぞれの c/a 値を用いなければならない。式(11)によれば、 c/a が異なると $1/C$ の波長依存性が異なる。したがって、中心波長において式(2)が成立しているても、波長変化に伴って式(10)の ΔC が増大するの

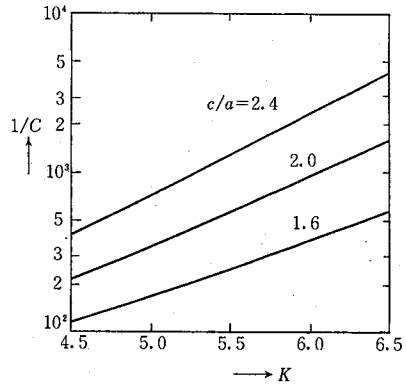


図4 波数と結合係数との関係

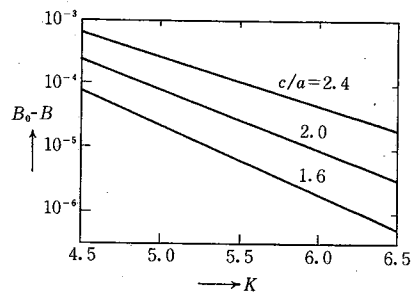


図5 波数とチャンネル波伝搬定数との関係

で、分波器の利用可能な波長域は制限されることになる。

図5は、波数とチャンネル波伝搬定数との関係の一例を示す。縦軸 B_0/B の中の B はチャンネル波伝搬定数の a 倍、 B_0 は $c \rightarrow \infty$ とした場合の B の値である。その他の記号と仮定は図4と同様である。この図より、中心波長においてチャンネル波伝搬定数を揃えるために必要なチャンネル幅の調整量は極めて小さいことがわかる。

5. 導波路の分波特性

表1には、 $N=5$ 、TE基本波を対象とした場合に関する導波路の構造定数と基本特性定数の計算例を示す。表の数値は、多チャンネル形の高層膜導波路について直接電磁界理論を適用して求めたものであるが、上述の各節で述べた近似理論によっても良い近似度で計算される。表中の a' は、チャンネルとバンクの厚さおよび伝搬定数を正規化するために用いた任意定数である。チャンネルとバンクの厚さについては、上層から順次に $a_1, c_1, a_2, c_2, a_3, c_3, a_4, c_4, a_5$ 、としている。波長 λ は k に含まれている。

図6は、表1の導波路を考え中心波長 $\lambda_1 = 0.90 \mu\text{m}$ において式(2)の条件が正確に満足された場合、波長 $\lambda_2 = 0.857 \mu\text{m}$ の波がどのように振る舞うかを図示したもの

表 1 導波路の構造定数と基本特性定数
(TE₀ モード群, N=5)

	チャンネル	バ ン ク
屈 折 率	1.590	1.515
中心波数	$ka' = 6.283158, k = 2\pi/\lambda$	
厚 さ	$a_1 = a_3 = 0.999900a'$ $a_2 = a_4 = 1.000047a'$	$c_1 = c_4 = 2.058698a'$ $c_2 = c_3 = 1.975533a'$
モード伝搬定数 式 (3) 参照	$b/k = 1.562840$ $u/k = 0.0001095$	

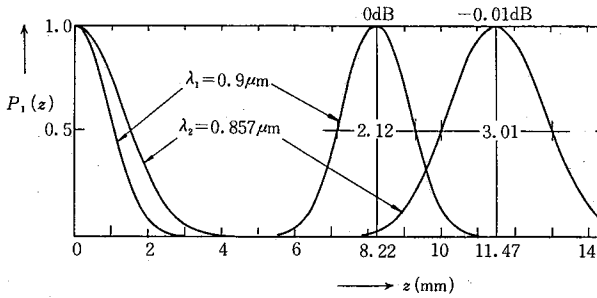


図 6 多層膜分波器用導波路の分波特性の一例

である。図の横軸は伝搬方向の距離 z (単位: mm), 縦軸は第 1 チャンネルの電力 $P_1(\lambda)$ を示す。図の曲線は, $z=0$ において二つの波長 λ_1, λ_2 の波が第 1 チャンネルに乗せられた場合の $P_1(\lambda_1)$ と $P_1(\lambda_2)$ の z 依存性を示す。ただし屈折率の波長依存性は無視している。波長が短縮すると隣接チャンネルとの結合が減少し, その結果 u が減少するので, A は増大する。図示のように, 両波長の波は $m=1$ において充分良く分離されている。また,

この第 1 結合距離における両波長の第 1 チャンネル波の減衰量は, λ_1 においては当然ながら 0 dB, λ_2 においても 0.01 dB に過ぎない。これらのことは, このような多層膜導波路が分波器として使えることを示している。

6. 結

本文では筆者等の提案による多層膜光導波路を用いた光分波器の解析結果の一例を示した。この分波器は小型で良い波長選択性を持ち, 光集積回路と光ファイバーに対する適合性にも富んでいるという特色を持つ。しかし, 層の厚さおよび各層の屈折率について厳しい製作精度が要求される。

終わりに, 有益なご討論をいただいた斎藤成文名誉教授, 藤井陽一教授, 楠裕之助教授に深謝する。本研究は文部省特定研究「光導波エレクトロニクス」の一環として行われたものである。 (1982 年 12 月 15 日受理)

参 考 文 献

- 1) P. Yeh, A. Yariv and C.S. Hong, "Electromagnetic Propagation in Periodic Stratified Media, I. General Theory", J. Opt. Soc. Am., Vol. 67, pp. 423-438, 1977
- 2) 山口・熊谷, "多モード結合系における完全結合の条件とその応用", 電子通信学会論文誌(B), Vol. 58-B, pp. 613-620, 1975
- 3) 濱崎・東野, "多層膜構造分波器", 特定研究「光導波エレクトロニクス」第 10 回研究会資料, 昭和 53 年 7 月
- 4) 東野, 修士論文 (東京大学工学系電気工学), 昭和 54 年 3 月
- 5) J. Hamasaki and H. Higashino, "Multi-Layered Branching Filter for Guided Optical Waves", Proc. of Soc. of Photo-Optical Instrumentation Engineers, Vol. 239, pp. 92-97, 1980