

光波导滤波器的理论与最优化设计

连 汉 雄

(北京邮电学院无线电工程系)

提 要

本文提出一种新颖光波导滤波器结构,分析其设计理论,并进行最优化设计。该设计的计算方法简便,且可推广到多种介质波导构成的滤波器。其精确度优于通常的等效介电常数法(EDC法)。

关键词: 光波导滤波器,最优化设计,双肋条波导耦合器。

一、引 言

目前光通讯已发展到一根光纤可以传输10~12个波道,且光纤放大器发展到需要光滤波器滤除其带外噪声。因此,光滤波器已引起人们普遍的兴趣。然而,目前已公布的光波导滤波器还停留在用传统的EDC法分析的多平板波导^[1]或用波阻抗法进行分析的不同宽度的波导等^[2]构成的滤波器。

本文提出一种新型的光波导滤波器,其结构如图1所示。这种滤波器的特点在于,它利用多节双肋条波导耦合器组合而成,便于实现最优化设计,且其所占体积比平板波导滤波器要小。文中所提供的双肋条波导耦合器的耦合系数公式已把每一波导边界的几何不连续性考虑在内,其精确度优于常规的EDC法。在此基础上, n 节双肋条波导滤波器的滤波特性可以看成是 n 个双波导耦合器耦合系数的连乘。据此,可以以最平滑特性(或其他滤波特性)作为预定特性,进行光滤波器的最优化设计,直接得出其结构尺寸。

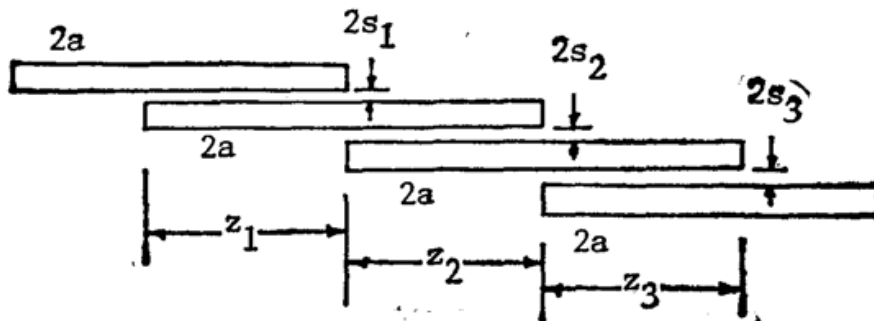


Fig. 1 Optical filter with dual-rib-waveguides

二、理 论 分 析

n 节双肋条波导滤波器的基础是双肋条波导耦合器如图2所示,若两肋条波导的尺寸

完全一致, 则该耦合器的耦合系数为^[1]

$$\left. \begin{aligned} O(z) &= \sin^2\left(\frac{\pi z}{2l_c}\right), \\ l_c &= \frac{\pi}{(\beta_e - \beta_o)}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 β_e 、 β_o 分别为耦合器的偶模与奇模的传播常数。该耦合系数 O 定义为当主波导输入功率为 1 时副波导的输出功率。这样, 对于如图 1 所示的三节双肋条波导耦合器串接而成的光滤波器, 其输出响应为

$$O_2 = O_1(z)O_2(z)O_3(z), \quad (2)$$

条件是各肋条波导的横向尺寸完全一样两耦合器之间用一波导过渡段隔开。其中 z_1, z_2, z_3 分别为三节耦合器的纵向长度。且各耦合器非导行区的尺寸各为 $2S_1, 2S_2, 2S_3$, 故其耦合系数 $O_1(z_1), O_2(z_2), O_3(z_3)$ 各异。

求解 $\beta_o \beta_{1o}$ 。

我们曾用模式匹配法详细分析了肋条波导中的 E_y^o 模^[3], 发现只要将 E_y^o 模等效成 EDC 法中的 TM 模求解单一波导的传播常数, 则模式匹配法与 EDC 法的计算结果完全一致。如图 2 所示, 肋条波导的基模是 E_y^o 模, 其磁场 H_y 和导行区与非导行区之间的界面平行, 因此, 可以等效成 EDC 法中的 TM 模求解 β_o 和 β_{eo} 。

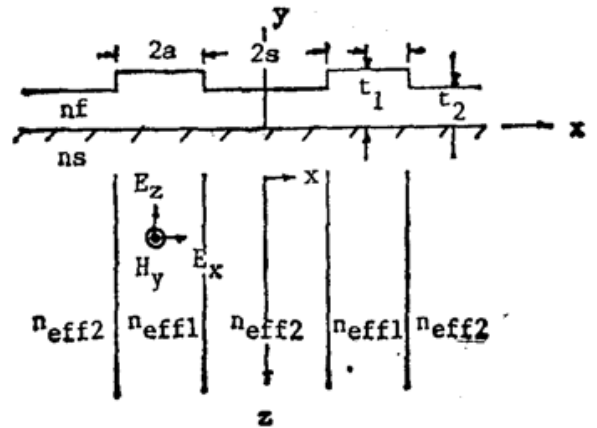


Fig. 2 Dual-rib-waveguide coupler

$n_{\text{eff}1}$ 和 $n_{\text{eff}2}$ 分别为导行区与非导行区的有效折射指数, 则双肋条波导耦合器的特征方程为^[3]

$$\left. \begin{aligned} [p \tan(ha) + qh]^2 [P - 2h \tan(ha)]^2 - e^{-4PS} \tan^2(ha) (p^2 + q^2 h^2)^2 &= 0, \\ h^2 &= k_0^2 n_{\text{eff}1}^2 - \beta^2, \quad p^2 = \beta^2 - k_0^2 n_{\text{eff}2}^2, \\ k_0 &= \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}, \quad q = (n_{\text{eff}2}^2 / n_{\text{eff}1}^2)^2. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

在(3)式中

$$n_{\text{eff}i} = \frac{h_{oi}}{h_0}, \quad (i=1, 2) \quad (4)$$

其中 h_{oi} 是下列超越方程的解^[3]:

$$\left. \begin{aligned} \tan K_i t_i &= \frac{K_i (r_{si} + r_{oi})}{K_i^2 - r_{oi} r_{si}}, \\ K_i^2 &= k_0^2 n_f^2 - h_{oi}^2, \quad r_{oi}^2 = h_{oi}^2 - h_0^2, \\ r_{si}^2 &= h_{oi}^2 - h_a^2 n_s^2, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中 t 为如图 2 中薄膜的厚度, n_f 与 n_s 分别为薄膜与衬底的折射指数。显然, (3)式中有两个 β (传播常数) 解, 一为奇模的传播常数 β_o , 一为偶模的传播常数 β_{eo} 。

三、光滤波器的最优化设计

利用计算机的辅助设计可以逐步改变图 1 所示滤波器的结构参数, 以期达到某一预定

的滤波器响应特性。为此,定义一个误差函数,用它来表出实际计算的滤波器特性与预定特性之间的差别程度。最优化设计是使该误差函数最小,使计算的滤波器特性逼近预定特性。通常,这种误差函数叫做目标函数。常用的目标函数是最小二乘方目标函数,定义为

$$U(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^m |e(\mathbf{x}, f_i)|^2 = \sum_{i=1}^m \{w(f_i) [\psi(\mathbf{x}, f_i) - S(f_i)]\}^2,$$

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T,$$

式中 \mathbf{x} 为 n 个设计参数, $\psi(\mathbf{x}, f_i)$ 为计算的滤波器频率响应, $S(f_i)$ 为预定的滤波器频率响应, $e(\mathbf{x}, f_i)$ 为加权的误差函数, $w(f_i)$ 为加权函数,可按计算的滤波器频率响应与预定的响应的逼近要求来取。本文取 $w(f_i) = 1$ 。

四、数字结果

上述光滤波器的设计公式都是建立在波导单模 (E_1^0) 传输的基础上。为了保证每一波导中的单模传输条件,要求波导的横向尺寸满足如下条件^[4]

$$\left. \begin{aligned} \frac{T}{w} \geq 0.5, \quad \frac{T}{H} \geq 0.5, \\ T = t_2 \left(1 - \frac{1}{v}\right), \quad H = t_2 \left(1 + \frac{t_2}{t_1 v}\right), \\ v = k_0 t_1 (\epsilon_{rf} - \epsilon_{rs})^{1/2}, \quad w = 2a, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中 ϵ_{rf} 和 ϵ_{rs} 分别为薄膜与衬底的折射指数, $2a$, t_1 分别为波导导行区的宽度和厚度, t_2 为非导行区的厚度。

典型的 $n_f = 2.188$ (LiNbO_3), $n_s = 1.9692$ (LiTaO_3)。由单模传输条件(7)式可知,当 $t_2/\lambda_0 = 0.27$ 时,可取 $(t_1/\lambda_0) = 0.32$, $(2a/\lambda_0) = 1$ 。

取中心波长 $\lambda_0 = 1.55 \mu\text{m}$, 3dB 带宽为 $0.022 \mu\text{m}$, 按最平滑特性

$$S(f) = \frac{1}{1 + \left(\frac{\lambda - 1.55}{0.011}\right)^{2n}}, \quad (8)$$

进行最优化设计,其设计参数为滤波器的结构尺寸 S , z_1 , z_2 , z_3 (见图 1)。按模式搜索法进行最优化程序计算,得 $n=5$ 时的响应特性如图 3 实线所示,其优化结果为

$$\begin{aligned} S &= 1.1275 \mu\text{m}, & z_1 &= 118.75 \mu\text{m}, \\ z_2 &= 118.43 \mu\text{m} & z_3 &= 118.75 \mu\text{m}. \end{aligned}$$

若按 $z_1 = z_2 = z_3 = l_c$ 设计*,则滤波器响应特性如图 3 虚线所示,可知最优化响应特性比常规响应特性好得多。

* 见(1)式。

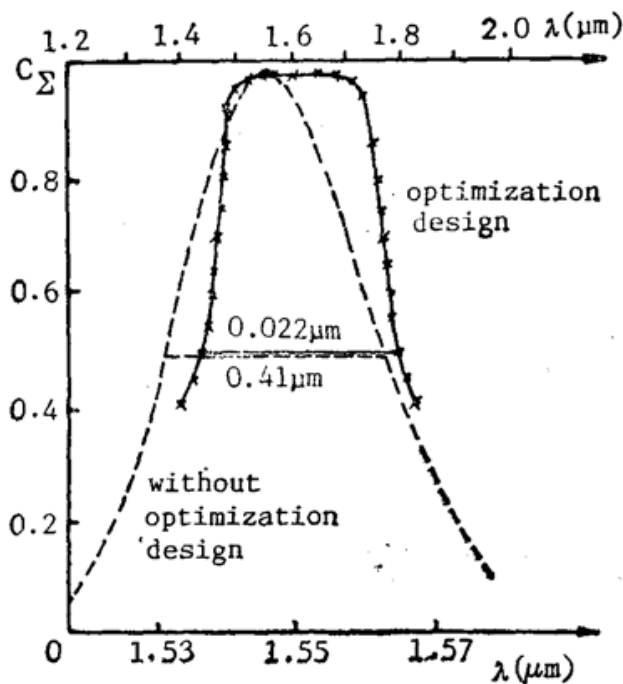


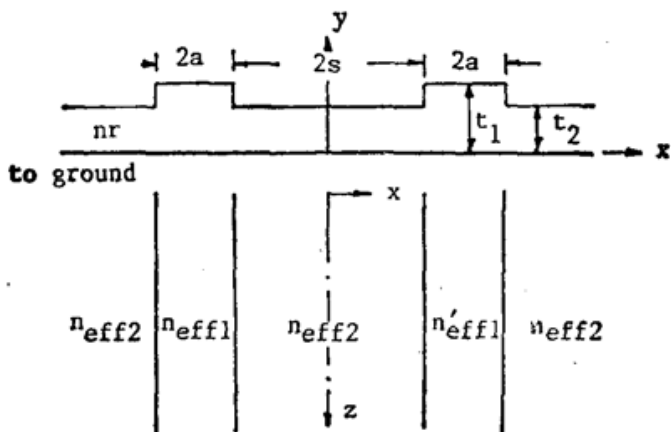
Fig. 3 Response with optimization design and without optimization design

五、讨 论

图 1 所示的多节双波导滤波器结构可以进一步推广到更一般的介质滤波器，并进行最优化设计。

如图 4 所示，在一节接地双脊波导耦合器中，单一波导的最低模是 E_y^0 模。这时由于

于导行区中 E_y 在波导边界不连续，用常规的 EDC 法来分析波导的传播常数时误差较大。为此，必须用模式匹配法将波导边界的不连续性考虑在内，得出每一波导的有效折射指数为



$$\left. \begin{aligned} n'_{eff1} &= n_{eff1} \left(\frac{C_1}{C_2} \right)^2, \\ C_1 &= \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_1(y) \frac{1}{\epsilon_{r1}(y)} \varphi_2(y) dy, \\ C_2 &= \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_1(y) \frac{1}{\epsilon_{r2}(y)} \varphi_2(y) dy, \end{aligned} \right\} (9)$$

Fig. 4 Dual-ridge-waveguide coupler

式中导行区的 n_{eff1} 以及非导行区的 n_{eff2} 均可按(4)式求解； $\varphi_1(y)$ ， $\epsilon_{r1}(y)$ 和 $\varphi_2(y)$ ， $\epsilon_{r2}(y)$ 分别为导行区与非导行区的场分布和介电常数分布^[5]。这时，接地双脊波导耦合器的奇模与偶模传播常数 β_o 和 β_e 可由(3)式求出，但其中的 n_{eff1} 均应换成 n'_{eff1} 。而三节双脊波导滤波器的频率响应仍为

$$O_2 = O_1(z_1)O_2(z_2)O_3(z_3), \quad (10)$$

条件是接地双脊波导耦合器中两波导的横向尺寸($2a$ ， t_1 ， t_2)一样。据此，可按(1)~(6)式进行最优化设计，以便由所要求的响应特性直接设计出滤波器的结构尺寸 $2S_1$ ， $2S_2$ ， $2S_3$ ， z_1 ， z_2 ， z_3 。

六、结 论

图 1 所示的多节双波导滤波器结构便于进行最优化设计，以便由所要求的响应特性直接计算出滤波器的结构尺寸。这种计算十分简便，特别适用于工程设计。

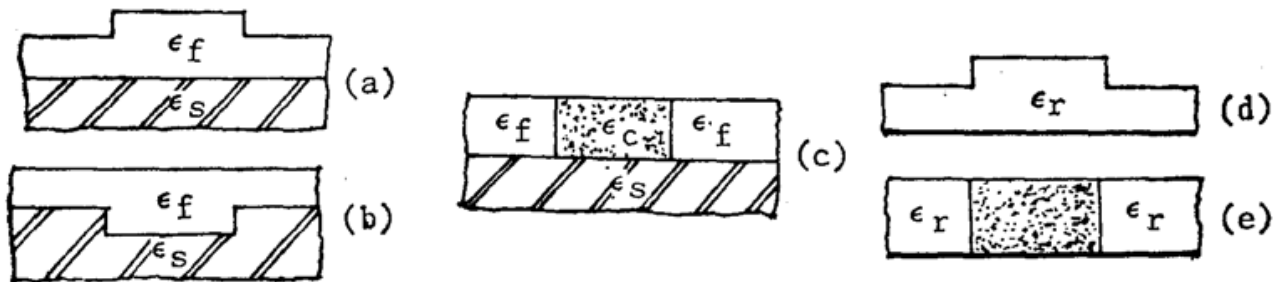


Fig. 5 Dielectric waveguides

在这种滤波器中，双波导耦合器可以由图 5 所示的任一种介质波导所构成。其中图 5(a)、图 5(b)、图 5(c) 三种波导适用于光波段，且其中的最低模式是 E_y^0 模，故由这类波导所构成的多节双波导滤波器，可按光肋条波导的(1)~(6)式进行最优化设计；而图 5(d)、

图 5(e) 两种波导是接地型介质波导, 适用于毫米波段, 其中的最低模式是 H_{11} 模, 故由这类波导所构成的多节双波导滤波器可按接地双脊波导滤波器设计, 即只要将导行区的有效折射指数 $n_{\text{eff}1}$ 按 (9) 式改成 $n'_{\text{eff}1}$ 后, 仍可沿用 (1) ~ (6) 式进行最优化设计。上述计算公式是在模式匹配分析的基础上建立起来^[3,5], 换句话说, 它已把波导边界的几何不连续性考虑在内, 因此, 它比现行的 EDC 法更准确。

至于所要求的滤波器响应特性, 可以是最平滑型的、切比夫型的或椭圆函数型的等等。

感谢黄永青同学在初步计算中所给予的帮助。

参 考 文 献

- [1] Bjorn Broberg *et al.*; *J. Lightwave Technol.*, 1986, **LT-4**, No. 2 (Feb), 196~203.
- [2] Dong Chul Park *et al.*; *IEEE Trans. Microwave Theory & Tech.*, 1985, **MTT-33**, No. 8 (Aug), 693~702.
- [3] Lian Hanxiang, David C. Chang; *IEEE J. Quant. Electron.*, (待发表)
- [4] E. A. J. Marcatili; *B. S. T. J.*, 1974, **53**, No. 4 (Apr), 645.
- [5] Lian Hanxiong *et al.*; «*Sino-Japanese Joint Meeting on Optical Fiber Science & Electromagnetic Theory*, May 16~19, Beijing», 343~348.

Theory and optimum design for the optical waveguide filter

LIAN HANXIONG

(Radio Engineering Department, Beijing Institute of Posts and Telecommunications)

(Received 26 May 1988; revised 21 June 1989)

Abstract

A novel constructure and theory of the optical waveguide filter are presented in this paper. The optimum design of the filter can lead to obtaining the size of the constructure directly. An optical waveguide filter with maximum flat response at 1.55 μm of central wavelength and 22 nm of bandwidth is obtained. The calculation in the design is simple and can be used to the filter construction. Since the design takes the geometry discontinuity of each guide into account, the accuracy of the results is better than that by EDC method.

Key words: optical waveguide filter; optimum design; dual-rib-optical waveguide coupler.