

一种计算单模波导输出的快速方法 及其在结构优化中的应用^{*}

戴道锌 何赛灵

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室 光及电磁波研究中心, 杭州 310027)

摘要: 提出了一种快速准确的新方法, 用以计算入射场耦合到波导的能量。这种方法将 BPM (beam propagation method) 和叠加积分法结合起来, 克服了单独用 BPM 计算场分布的效率较低的缺点, 同时也克服了叠加积分只适用于计算规则波导的缺点, 该方法称为正交过滤法。用这种快速方法对星型耦合器中输出波导的锥形波导形状曲线进行优化以获得最大的耦合能量。

关键词: BPM; 叠加积分方法; 正交过滤法; 锥形波导

EEACC: 4130; 4140

中图分类号: TN 252

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2002)06-0614-05

1 引言

在光波导集成器件如星型耦合器等的设计中, 通常需要计算入射场耦合到接收波导的能量。叠加积分是一种非常简单快速的方法, 但它只适合于处理波导形状规则、宽度不变的情况。对于锥形波导, 普通的叠加积分方法是不适合的。在这种情况下, 用 BPM^[1] (beam propagation method) 分析是可行的, 但由于入射场和波导模式不匹配, 需要传输足够远的距离才能得到稳定的场分布, 因此通常 BPM 的计算量很大。这样不但计算效率低下, 而且长距离的计算也可能引入一定的误差。

因此, 寻求一种快速计算方法以提高器件设计效率是非常必要的。我们注意到在光波导集成器件中, 很多波导尤其是接收波导(或称为输出波导)都是单模波导, 而且长度都很长, 因此经过足够长的距离后, 波导的输出场中只含有一种模式即基模, 而高阶模在传输过程中被完全衰减。所以, 我们只要能得到接收波导输出场的振幅就可以得到入射场耦合到波导的能量和输出场分布。利用这一特点, 我们提出

一种将 BPM 和叠加积分方法结合起来的方法, 称之为正交过滤法 (orthogonal filtering method, OFM)。这种方法克服了单独用 BPM 计算场分布的效率较低的缺点, 同时也克服了叠加积分只适用于计算规则波导的缺点。这种方法的优点是快速收敛, 大大提高计算效率。

本文首先介绍这种方法, 然后给出一个应用的例子, 对星型耦合器中输出波导的锥形波导的形状曲线进行优化以获得最大的耦合能量。

2 原理

2.1 BPM 原理^[1]

BPM 是一种用于近似求解单色波波动方程的方法。考虑二维标量场 $\Phi(x, z) \exp(-i\omega t)$, 得到相应的波动方程即亥姆霍兹方程:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} + \frac{\omega^2}{c^2 n^2(x, z)} \Phi = 0 \quad (1)$$

当场振幅沿传输方向缓慢变化时, 可以将场分布写成

$$\Phi(x, z) = u(x, z) \exp(i \bar{k} z)$$

* 浙江省科技计划重大项目资助(No. 001101027)

戴道锌 男, 1979 年出生, 博士研究生, 主要从事光纤通讯波分复用器件的模拟设计与制作。

2001-10-01 收到, 2001-12-29 定稿

©2002 中国电子学会

式中 $\bar{k} = \bar{n} \cdot k_0$, \bar{n} 为参考折射率, k_0 为真空中的波矢. 将上式代入(1)式得:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + 2ik \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + (k_0^2 \cdot n^2(x, z) - \bar{k}^2) u = 0 \quad (2)$$

式中 $n(x, z)$ 为空间折射率分布.

在近轴近似情况下, $\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$ 项可忽略, 得

$$2ik \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + (k_0^2 \cdot n^2(x, z) - \bar{k}^2) u = 0 \quad (3)$$

这是基本的二维近轴 BPM. 运用有限差分数值方法和合适的边界条件如透明边界^[2], 可得该方程的数值解.

2.2 叠加积分方法

考虑波导模式的正交完备性, 我们可以将场分布写成各阶模式的线性叠加, 即

$$\Phi(x) = \sum_{i=1}^{\infty} \alpha_i \phi_i(x) \quad (4)$$

式中 $\alpha_i = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \Phi(x) \phi_i(x) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} \phi_i(x) \phi_i(x) dx}$, $\phi_i(x)$ 为第 i 阶模式,

* 表示共轭.

由于 $\alpha_i \phi_i(x)$ 表示第 i 阶模分量, 将 $\phi_i(x)$ 作振幅归一化, 则 α_i 即为第 i 阶模分量的振幅. 在本文中, 我们主要考虑单模波导, 因此在文章后面的例子中我们计算的是基模分量的振幅 α_0 .

2.3 正交过滤法

当入射场耦合到波导时, 将激发高阶模, 但在单模波导中只有基模能稳定存在, 高阶模在传输过程中将逐渐衰减, 传输足够远以后只剩下基模. 因此, 只需求出入射场中所包含的单模波导的基模分量, 就可以得到波导最后输出的场分布. 利用这一特点, 我们提出正交过滤法, 这是一种将 BPM 和叠加积分方法结合使用的方法. 首先, 利用 BPM 计算出 z 处场分布 $\Phi(x, z)$, 此场分布可能包含多个模式. 然后利用叠加积分方法, 过滤出 $\Phi(x, z)$ 中的基模分量, 得到基模分量的振幅 $\alpha_0(z)$, 即

$$\alpha_0(z) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \Phi(x, z) \phi_0(x) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} \phi_0(x) \phi_0(x) dx} \quad (5)$$

由于单模波导的最后输出场中只包含基模, 所

以 $\alpha_0(z)$ 最后的稳定值即为输出场的振幅, 由此也能计算出从入射场耦合到波导中的能量. 此即本文提出的正交过滤法.

3 计算结果及对锥形波导的优化设计

作为正交过滤法应用的一个例子, 我们计算了典型的星型耦合器^[3]中输出波导的最后输出场的振幅. 星型耦合器包括输入波导、自由传输区、输出波导三部分. 为简单起见, 在此我们只考虑正中间的那根输出波导(如图 1 所示), 并忽略输出波导之间的影响. 通常为了获得更大的耦合能量, 输出波导的输入端设计成具有如图 1 所示的锥形波导结构.

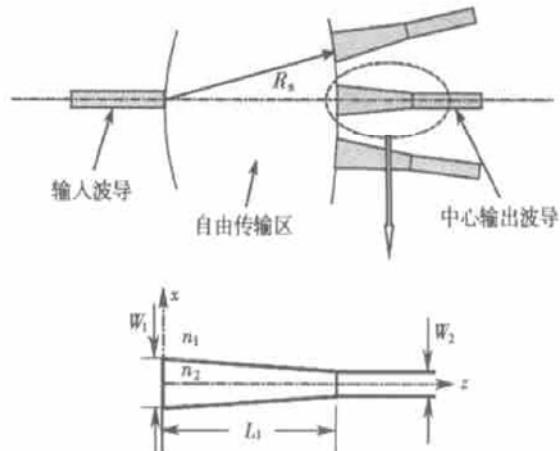


图 1 星型耦合器结构示意图及其输出波导放大图样

Fig. 1 Structure of a star coupler and a zoom out view of its center output waveguide

具体参数为: $L_t = 1000\mu m$, $W_2 = 5\mu m$, 分别取 $W_1 = 1\mu m$, $12\mu m$. 用等效折射率方法将三维结构等效为二维结构, 波导包层、芯层等效折射率分别为 $n_1 = 1.46$, $n_2 = 1.4668$, 光波长为 $1.55575\mu m$.

3.1 输出波导的入射场

从输入波导发射的场为输入波导的基模, 该基模场从输入波导入射到自由传输区(自由传输区长度 R_s 为 $5000\mu m$), 经过自由传输区发散后再入射到输出波导, 这就是输出波导的入射场.

我们用如下高斯分布近似代替输入波导的基模:

$$E_0(x) = \exp(-x^2/w_0^2) \quad (6)$$

式中 w_0 为高斯场的束腰.

高斯光束在自由传输区传输的表达式为:

$$E(x, z) = \left[\frac{w_z}{w_0} \right]^{-\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{x^2}{w_z^2} - \frac{i\beta x^2}{2R}\right) \times \exp(-i\beta z + i\varphi) \quad (7)$$

其中 $w_z = \frac{\pi n_2 w_0^2}{\lambda}$, $R = z \left[1 + \left(\frac{z_0}{z} \right)^2 \right]$, $w_0 = w_0 \times \left[1 + \left(\frac{z}{z_0} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$, $\varphi = \text{tg}^{-1}\left(\frac{z}{z_0}\right)$, $\beta = 2\pi n_2/\lambda_0$. 令 $z = R_s$, 即可得到输出波导的入射场.

3.2 输出波导输出场的振幅

利用前面算出的入射场, 我们用近轴 BPM 计

算出传输方向 z 位置的垂直截面上的场分布 $\psi(x, z)$. 很显然, 当 $z < L_1$ (L_1 为锥形波导的长度) 时, 由于波导宽度是变化的, 波导局部模式场也是变化的. 当 $z > L_1$, 我们利用正交过滤法在 z 处从 $\psi(x, z)$ 中取出基模分量的振幅 $\alpha_0(z)$, 此时 z 对应的位置称为过滤位置(filtering position), 振幅 $\alpha_0(z)$ 随过滤位置的变化曲线, 如图 2 所示. 为了看出振幅 $\alpha_0(z)$ 的微小变化, 我们将图 2(a)、(b) 的坐标范围取得很小. 同时直接从 BPM 计算的场分布取出场分布的振幅, 绘出振幅 $\alpha_0(z)$ 随 z 变化的曲线, 如图 3 所示. 从图 2(a)、(b) 和图 3(a)、(b) 中我们可以看到, 两种方法计算的振幅 $\alpha_0(z)$ 都发生振荡, 而最后得到的稳

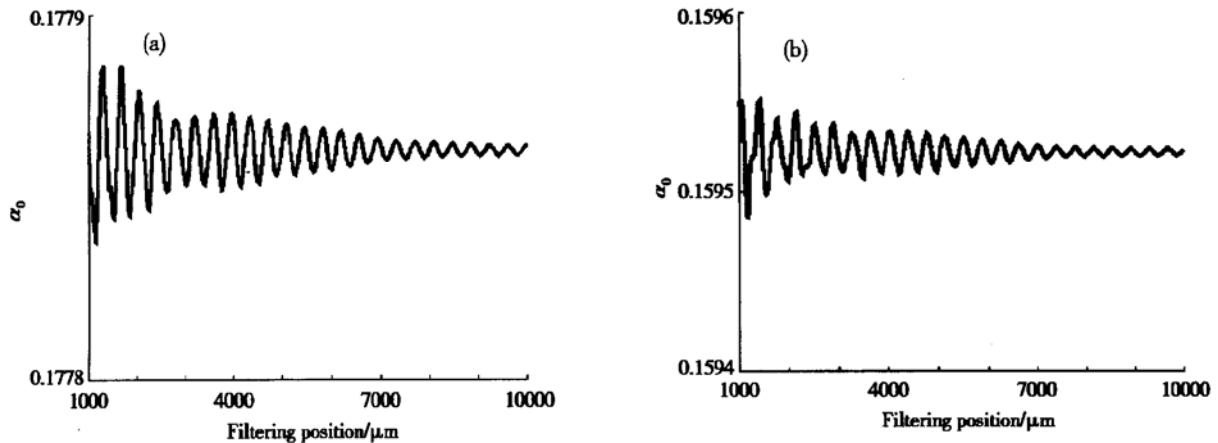


图 2 (a) W_1 为 $1\mu\text{m}$ 时, 用正交过滤法计算的场的振幅 $\alpha_0(z)$; (b) W_1 为 $12\mu\text{m}$ 时, 用正交过滤法计算的场的振幅 $\alpha_0(z)$

Fig. 2 (a) Field amplitude α_0 calculated by OFM when W_1 being $1\mu\text{m}$; (b) Field amplitude α_0 calculated by OFM when W_1 being $12\mu\text{m}$

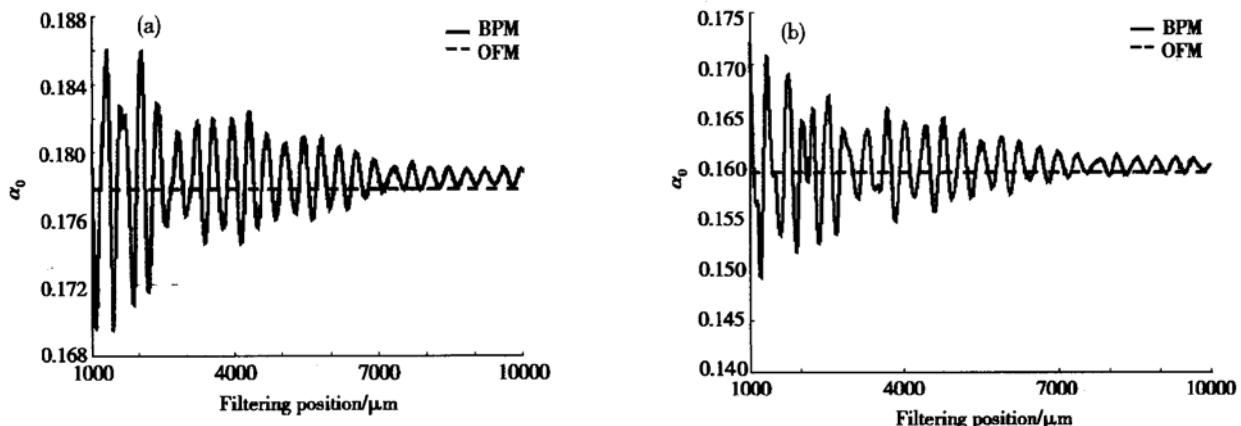


图 3 (a) W_1 为 $1\mu\text{m}$ 时, 分别用正交过滤法和单纯用 BPM 计算得到的场振幅 $\alpha_0(z)$; (b) W_1 为 $12\mu\text{m}$ 时, 分别用正交过滤法和单纯用 BPM 计算得到的场振幅 $\alpha_0(z)$

Fig. 3 (a) Field amplitude $\alpha_0(z)$ calculated by BPM and OFM when W_1 being $1\mu\text{m}$; (b) Field amplitude $\alpha_0(z)$ calculated by BPM and OFM when W_1 being $12\mu\text{m}$

定值是相同的。但是图3(a)、(b)表明, 正交过滤法计算的收敛速度要比单纯的BPM方法迅速得多。用正交过滤法计算时, $\alpha_0(z)$ 值的振荡幅度非常小($< 0.1\%$), 并很快获得趋近于最后输出的结果。而单纯用BPM计算场的振幅时, 由于高阶模的影响, 场分布振荡幅度要大得多, 需要很长的距离才能获得足够精确的结果。由此可见, 采用正交过滤法将使得计算效率大大提高。图2(a)、(b)和图3(a)、(b)中的横坐标表示过滤位置, 纵坐标表示振幅 $\alpha_0(z)$ 的大小(注意图2(a)、(b)和图3(a)、(b)的坐标范围不同)。

3.3 利用正交过滤法优化锥形波导形状曲线

正交过滤法具有快速高效的特点, 在计算量巨大的优化设计中将发挥重要作用。在此, 我们用这种方法对锥形波导形状曲线进行了优化。

(1) 锥形波导形状为一次曲线的情况

曲线方程可表示如下:

$$x - W_2/2 = \left[\frac{W_1 - W_2}{2L_1} \right] (L_1 - z) \quad (8)$$

计算得到场振幅 α_0 与 W_1 的关系曲线如图4所示。

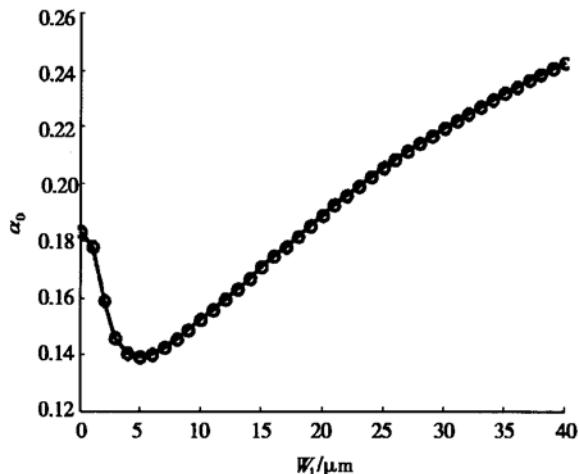


图4 振幅 α_0 和锥形波导宽度 W_1 的关系

Fig. 4 Field amplitude α_0 versus taper waveguide width W_1

(2) 为了获得更好的结果, 对锥形波导形状曲线进行优化, 设优化曲线为

$$\frac{x - W_2/2}{L_1} = a_2 \left[\frac{z - L_1}{L_1} \right]^2 + a_3 \left[\frac{z - L_1}{L_1} \right]^3 \quad (9)$$

由此式确定的曲线使得锥形波导相切过渡到后面的波导, 对于一个确定的 W_1 , 寻找最优的 a_2 、 a_3

使得波导有最大的输出。为保证曲线为单调上升或下降, 须保证 a_2 在区间 $[0, \frac{3(W_1 - W_2)}{2L_1}]$ 内取值。显然 $z = 0$ 时, $x = W_1/2$, 故得 $a_3 = a_2 - \frac{W_1 - W_2}{2L_1}$ 。我们计算了 W_1 分别为 $12, 24, 40\mu\text{m}$ 时, 不同 a_2 值的基本分量的振幅 α_0 。

从图5中可以看出, 对应不同的 W_1 值, 若 a_2 取最大值即 $\frac{3(W_1 - W_2)}{2L_1}$, 可获得最大的输出, 此输出较一次曲线锥形波导的输出要大。图6为锥形波导

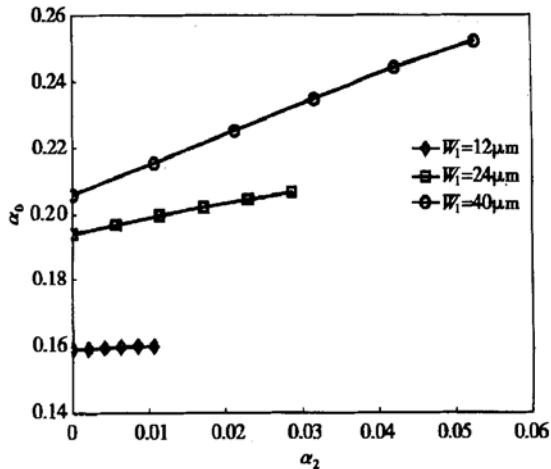


图5 锥形波导开口宽度 W_1 分别为 $12, 24, 40\mu\text{m}$ 时, 场振幅 α_0 与 a_2 的关系

Fig. 5 Field amplitude α_0 versus a_2 when the taper width W_1 being $12, 24$ and $40\mu\text{m}$, respectively

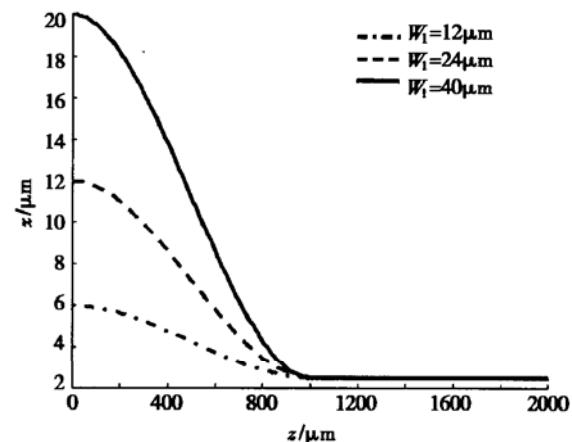


图6 锥形波导开口宽度 W_1 分别为 $12, 24, 40\mu\text{m}$ 时, 优化的锥形波导形状曲线

Fig. 6 Optimized taper waveguide curves for a taper whose width W_1 being $12, 24$ and $40\mu\text{m}$, respectively

开口宽度 W_1 为 12、24、40 μm 时的优化曲线, 对应的 a_2 应取 $\frac{3(W_1 - W_2)}{2L_1}$, 即分别取 0.0105、0.0285、0.0525.

4 结论

本文提出了一种用以计算入射场耦合到波导的能量的新方法. 这种方法克服了单独使用 BPM 计算场分布的效率较低的缺点, 同时也克服了叠加积分法只适用于计算规则波导的缺点. 给出了一个应用例子, 获得了星型耦合器中输出波导的锥形波导形状的优化曲线. 结果表明这种方法是一种快速准确的方法, 可以大大提高波导形状优化设计的效率.

参考文献

- [1] Scarmozzino R, Osgood R M. Comparison of finite-difference and Fourier-transform solutions of the parabolic wave equation with emphasis on integrated-optics applications. *J Opt Soc Am A*, 1991, 8(5): 724
- [2] Hadley G R. Transparent boundary condition for beam propagation method. *Opt Lett*, 1991, 16(9): 624
- [3] Okamoto K, Takahashi H, Yasu M, et al. Fabrication of wavelength-insensitive 8×8 star coupler. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1992, 4(1): 61
- [4] Unger H G. *Planar optical waveguides and Fibers*. Oxford: Clarendon Press, 1977

A Fast Method to Calculate Output Energy of a Single Mode Waveguide and Its Application to Optimization of Structure*

Dai Daoxin and He Sailing

(State Key Laboratory for Modern Optical Instrumentation, Center for Optical and Electromagnetic Research, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A new method that can be used when coupled intensity is desired for an output waveguide is presented. One way to obtain coupled intensity is to calculate the field via beam propagation method(BPM). Another method is the overlap integral method, which is only for an unvaried waveguide. The new method combines BPM with overlapping integral method and overcomes disadvantages of both methods. It is called orthogonal filtering method. In the last section, as an example, this method is used to optimize the taper shape of on output waveguide of a star coupler.

Key words: BPM; overlap integral method; orthogonal filtering method; taper waveguide

EEACC: 4130; 4140

Article ID: 0253-4177(2002)06-0614-05

* Project supported by Science and Technology Key Program of Zhejiang Province(No. 001101027)

Dai Daoxin male, was born in 1979, PhD candidate. His research activities are in designs, simulations and fabrications of integrated wavelength division multiplexers.