

# 大截面单模脊波导的几何结构优化

严朝军 彭文标 覃 琴

(三峡大学计算机与信息学院, 湖北 宜昌 443002)

**摘要** 大截面单模脊波导器件的几何结构满足单模条件并不意味着波导工作在最佳状态。漏泄模的干扰往往不容忽视。标量有限差分波束传输法(FDBPM)被用来计算具有不同几何尺寸的单模脊波导漏泄模的衰减度。当漏泄模衰减最大时,脊波导的几何尺寸最优。经过优化之后的脊波导,仍然满足单模条件,但漏泄模的衰减很大,对主模不构成干扰。对于一个脊宽固定为 $2\ \mu\text{m}$ 、脊高比率固定为0.45的典型单模波导,将脊波导总高作为可变参数,在总高为 $5.4\sim 1.3\ \mu\text{m}$ 的范围内,计算不同波导尺寸下的漏泄模衰减度,计算表明,总高度 $2.25\ \mu\text{m}$ 是最佳波导尺寸。

**关键词** 集成光学;脊波导;漏泄模;优化;单模;有限差分波束传输法

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1013002

## Geometrical Optimization of Single-Mode Rib Waveguides with Large Cross Section

Yan Chaojun Peng Wenbiao Qin Qin

(College of Computer Information Technology, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

**Abstract** If the geometrical structure of a rib waveguide with large cross section meets the conditions of single mode, the waveguide device does not necessarily work in the best status. The interference of leaky modes often cannot be ignored. The scalar finite difference beam propagation method is used to calculate the attenuation degree of leaky modes supported by the single-mode rib waveguides with different geometric dimensions. When the attenuation is the largest, the geometrical structure of rib waveguide is the most optimal. The single-mode condition is still satisfied after the optimization, but the attenuation of leaky modes is very large and the interference to the main mode is ignored. For a typical single-mode rib waveguide, whose width of rib is  $2\ \mu\text{m}$  and ratio of rib height to total height is fixed at 0.45, when the total height as variable parameter ranges from  $5.4\ \mu\text{m}$  to  $1.3\ \mu\text{m}$ , the optimized total height is  $2.25\ \mu\text{m}$  after the calculation of attenuation of leaky modes with different geometric dimensionings.

**Key words** integrated optics; rib waveguide; leaky mode; optimization; single mode; finite difference beam propagation method

**OCIS codes** 130.0250; 130.1750; 130.2790; 130.3120; 220.4830

## 1 引 言

脊形光波导器件在集成光学系统中得到广泛应用<sup>[1-2]</sup>,比如基于绝缘硅(SOI)的高速电光调制器<sup>[3]</sup>、模分离器<sup>[4]</sup>以及各类多模干涉(MMI)功能器件<sup>[5-7]</sup>等。出于对光纤耦合效率的考虑,常常期望脊波导不仅工作在单模状态而且是大截面的。大截面脊波导的几何结构如果满足一定条件,是可以工作于单模状态的,文献[8-10]中已经给出了一些单模条件公式。

如果用绝缘硅工艺制作普通的平板波导,单模条件对波导尺寸的限制将很苛刻,典型值为芯层厚

度不超过 $0.2\ \mu\text{m}$ 。这种尺寸不利于与光纤的耦合。所幸,脊波导和平板波导不同。这里所称的脊波导中的单模,被严格定义为传播常数为实数的传导模,同时,波导中还存在漏泄模,这些漏泄模的模传播常数是复数,这意味着这些漏泄模的振幅是衰减的,各阶漏泄模的衰减程度不一定相同。

但是存在如下问题:如果漏泄模衰减很弱,这种漏泄模几乎等同于导模,漏泄模需要传播很长距离才能泄出波导,从而模糊了单模波导与多模波导的界限。如果设计的是单模波导器件,表现却和多模波导相似,这种设计当然不能说完美。

收稿日期: 2013-05-08; 收到修改稿日期: 2013-05-24

作者简介: 严朝军(1968—),男,教授,主要从事集成光学、光波导器件等方面的研究。E-mail: aerolus@liyun.com

漏泄模的衰减程度与脊波导的几何结构有关。本文在单模条件满足的前提下,寻找到一种理想的波导几何结构,此时,漏泄模的衰减最大,漏泄模不至于干扰导模,即实现了单模脊波导的结构优化。所采用的优化方法是传统的标量有限差分波束传输法(FDBPM)<sup>[11]</sup>。

## 2 大截面脊波导中的漏泄模

这里所谈的脊波导,是具有如图 1 所示横截面的波导。称“脊”隆起的方向为竖直方向(或  $y$  方向),而截面内与之垂直的方向为水平方向(或  $x$  方向)。图 1 中脊宽  $w = 2a\lambda$ ,  $\lambda$  为工作波长,  $a$  代表归一化宽度;总高度为  $2b\lambda$ ,  $b$  代表归一化高度;  $r$  为脊底高度与总高度之比,脊高为  $(1 - r) \times 2b\lambda$  且  $r < 0.5$  的脊波导被称为深刻蚀波导;  $n_0$ 、 $n_1$  和  $n_2$  为波导各部分的折射率。脊波导中的模式为混合模<sup>[8,10]</sup>,但可近似为水平方向偏振的  $HE_{nm}$  模和竖直方向偏振的  $EH_{nm}$  模。其中,下标  $m$  与  $n$  取值为整数  $0, 1, 2, \dots$ ;  $m$  表示竖直方向的模编号,  $n$  表示水平方向的模编号。如果是单模波导,则导模只有  $HE_{00}$  和  $EH_{00}$ 。

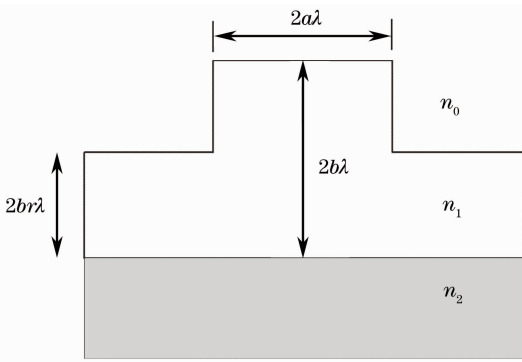


图 1 脊波导横截面图

Fig. 1 Cross section of rib waveguide

脊波导能否工作于单模状态,与它的几何尺寸有关。文献[8,10,12]中给出被称为单模条件的公式:

$$2b \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \geq 1, \quad (1)$$

$$0.5 \leq r < 1.0, \quad (2)$$

$$\frac{a}{b} \leq 0.3 + \frac{r}{\sqrt{1 - r^2}}, \quad (3)$$

(1)~(3)式是采用有效折射率法(EIM)推出的。其中(1)式是先决条件,对于大截面脊波导通常都满足此条件。(2)式是竖直方向单模条件,(3)式是水平方向单模条件。

这个单模条件并没有否认漏泄模的存在。实际上(1)~(3)式的推导和漏泄模还有一定的关系。将

脊波导看成由三个三层平板波导并排构成。位于中间的是两边受限的三层平板波导,它的芯厚度包含“脊”,被称为中心波导;而位于两边的半无限三层平板波导被称为边波导。显然,中心波导的芯层厚度大于边波导的芯层厚度。脊波导中漏泄模的形成可以解释如下:中心波导和边波导都是三层平板多模波导,它们所支持的平板模式均有相应的模等效折射率,如果中心波导的基模等效折射率大于边波导所有模式的等效折射率,因为全反射效应,此模将作为整个脊波导的基模而存在;如果中心波导中的一阶模的等效折射率也大于边波导中所有模的等效折射率,那么这个一阶模也将作为脊波导的传导模而存在,此时,脊波导就不是单模波导;中心波导平板导模不满足全反射条件的模式都将作为漏泄模而存在。这当然只是一种定性的解释,因为边波导一般情况下也是多模波导,究竟拿哪个模式的等效折射率作为全反射现象发生与否的判决依据仍待考究。尽管如此,这种解释对于理解脊波导中的导模和漏泄模很有好处。

未经优化的脊波导,漏泄模很有可能需要经过很长距离的传输才可完全泄出波导。这时单模波导的表现就类似于多模波导。如何求各阶漏泄模的衰减度,是本文工作的主题。如果要定量求出漏泄模的传播常数及模场分布,对于三维波导,只能借助于数值解法。FDBPM法就是一种可行的选择。这种方法直接针对三维波导求解波动方程,并不将水平与垂直两个方向上的导波特性分开讨论。采用标量FDBPM来求漏泄模的衰减度。尽管脊波导中的模式具有偏振性,严格的求解需要采用矢量FDBPM或其他数值方法,但是这里关心的是波导的结构优化,并不是模场的具体分布形式,忽略模式的偏振性有利于简化分析。

## 3 脊波导中漏泄模衰减度判断方法

FDBPM法是一种获得广泛应用的波导器件模拟设计方法。将波导的导波方向取为  $z$  轴,  $z = 0$  的平面定义为波导器件的输入面或输入端,这个平面上的光场分布被称为初始场或输入场。如果器件纵向长度为  $L$ ,  $z = L$  的平面被称为波导器件输出面或输出端,此平面上的光场分布被称为输出场。FDBPM法是一种基于有限差分的偏微分方程数值解法,连续的空间在三个方向上以一定的间距离散为一系列格点。设三个方向上离散间距分别为  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ , 格点标号为  $(i, j, k)$ , 则  $E(i, j, k)$  代表  $E(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z)$ 。显然,格点划得越密集,精确度

越高,当然,计算量也越大。从  $z$  方向来看,空间可视为一列离散平面,这些平面被称为  $z$  平面,由整数  $k$  标示。应用 FDBPM 法,可以由标号为  $k-1$  平面上的场值计算出标号为  $k$  的平面上的场值。因此,给定输入场,经过反复的 FDBPM 运算,可以求出任意  $z$  平面上的场值,直至波导输出面。

设  $\epsilon(x, y, z)$  是欲求解的标量波动方程的波场,根据模式的完备性,

$$\epsilon(x, y, z) = \sum_n^m A_{n,m} u_{n,m}(x, y) \exp(j2\pi f_n z), \quad (4)$$

式中  $n$  是某阶模的标号,  $m$  代表简并度,  $u_{n,m}(x, y)$  是本征模分布,  $2\pi f_n$  是模传播常数,习惯上用  $\beta$  表示传播常数,  $\beta_n = 2\pi f_n$ 。  $A_{n,m}$  是叠加系数或模权重。相关函数  $\rho(z)$  定义为

$$\rho(z) = \iint \epsilon^*(x, y, 0) \epsilon(x, y, z) dx dy, \quad (5)$$

式中  $\epsilon^*(x, y, 0)$  为输入场的共轭。将(4)式代入(5)式,由本征函数的正交性,可得

$$\rho(z) = \sum_{n,m} |A_{n,m}|^2 \exp(j\beta_n z), \quad (6)$$

(6)式  $z$  域到  $f$  域的傅里叶变换为

$$P(f) = \sum_{n,m} |A_{n,m}|^2 \delta(f - f_n). \quad (7)$$

可见,每一个模式,包括辐射模,在  $P(f)$  中都对应着一个广义冲激函数。实际运算时不可能在  $z$  方向上做无限步运算,因此,冲激函数在  $P(f)$  中就显示为一个个极值点。设想输入场为某阶导模,导模在波导中将无损耗地传输,因此,无论  $z$  在何处,做相关积分都得到同样的结果,波导中的场与初始场是最“相关”的。如果输入场中包括辐射模,光波传输到某  $z$  平面时,辐射模也许已经辐射出波导,这时波导中只有导模,故做相关积分时,“相关”性会变弱。所以,准备做傅里叶变换的  $\rho(z)$  序列,不仅包含一个个模式传播常数的位置信息,而且也包含各个模式在波导中传输的衰减信息。那些没有衰减的导模,其  $P(f)$  中对应极值点的极值将最大,绝大多数模式在  $P(f)$  中所对应的极值与导模相比相差巨大。

通过在  $P(f)$  中定位极值点位置,可以求得波导中模式的传播常数。如果将模传播常数求出来了,则通过下式可以算出未归一化模场:

$$u_n(x, y) = \int_0^Z \epsilon(x, y, z) \exp(-j\beta_n z) dz, \quad (8)$$

式中  $Z$  是 FDBPM 运算的总长度。

可见,通过 FDBPM 法可以求出波导模式的模传播常数与模场分布。不管是导模还是漏泄模,只

要在波导中传输过并且在相关积分的傅里叶谱中能被分辨出来,那么这种计算就是可行的。计算均在复数域进行,求得的  $f_n$  或模传播常数  $\beta_n$  也是复数。模传播常数的虚部越大,说明模衰减越厉害。这个过程体现了波束传输法的优点,即它把波导中的各种模式一并考虑,而不是仅局限于导模。

因此,定量计算漏泄模衰减度的步骤如下:1) 确定各阶漏泄模的模传播常数;2) 求出各阶漏泄模的模场分布;3) 将得到的归一化模场作为波导输入场,定量计算固定长度波导器件输出场与输入场的功率比率,得到用分贝表示的衰减度。所谓波导几何结构的优化,就是寻找一种既满足单模条件且各阶漏泄模的衰减度又最大的波导几何尺寸。

## 4 单模脊波导几何结构优化实例

下面给出一个优化波导几何结构的实例。材料参数为:  $n_0 = 1.0, n_1 = 3.44, n_2 = 3.34, \lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 。固定脊宽为  $w = 2a\lambda = 2 \mu\text{m}$ 。尽管  $r < 0.5$  时也有可能是单模,但这里设其为定值:  $r = 0.55$ 。试图寻找一种几何结构,具有这种几何尺寸的波导,其漏泄模的衰减很大。因为脊宽和比率  $r$  均固定不变,所以实际改变的只有总高度  $h$ ,探求最佳的  $h$ 。此实例中差分网格划分为  $320 \times 320$ ,  $x$  方向和  $y$  方向取值范围分别为  $(-3.2 \mu\text{m}, 3.2 \mu\text{m})$ 、 $(-5.4 \mu\text{m}, 0.2 \mu\text{m})$ 。  $z$  方向的步长为  $0.02 \mu\text{m}$ 。坐标原点取在脊顶中心。

对于该脊波导,波导结构与  $z$  无关,因此输入场可以任意给定。例如,用高斯波形作为输入场,也可以以求得的某阶模的模场作为输入场来计算经过一定距离传输后模式的损耗。因为在相关积分序列的傅里叶谱中,辐射模和漏泄模的信息都包含其中,为了集中力量分析漏泄模,首先任意给定一个输入场,经过  $2^{15} \times 3 + 2^{11} = 100352$  步的  $z$  方向传播,在当前的步长下,约经过  $2 \text{ mm}$  的传导。这样得到的输出场,大概不会包括那些衰减较快的漏泄模和辐射模。这里的初始输入场尽管可以任意给定,但不能呈现明显的关于位置的对称性,要让它包含所有可能的模式。记录下这个输出场。然后开始构造相关积分序列。以记录下来的输出场作为输入场,在  $z$  方向上做共计  $2^{15}$  步的 FDBPM 运算,每一步都做相关积分,记录这个序列,期望它的傅里叶谱中只留下令人感兴趣的传导模和漏泄模信息。

实际的计算从  $h = 5.4 \mu\text{m}$  开始,  $h$  每次减少  $0.2 \mu\text{m}$ ,逐次重复第 3 节中提到的计算步骤。计算发现,此例相关积分的傅里叶谱中可以分辨的模式

有三个,其中一个是无衰减的导模,另外两个是漏泄模,这两个漏泄模也不是同时出现。将这两个漏泄模分别称为模 A 与模 B。当计算到  $h=2.4 \mu\text{m}$  时,相关积分的傅里叶变换序列见图 2(a)。其中纵轴是相关积分序列经快速傅里叶变换(FFT)后得到的复数序列的绝对值,而横轴是传播常数的序号,如果序号为  $n$ ,序号与传播常数的对应关系为  $\beta = n \times f_0$ ,  $f_0$  与傅里叶变换的离散点总数目及  $z$  方向上的步长有关,本例中,作傅里叶变换的点数  $N$  为  $2^{15}$ ,则  $f_0=1/(2^{15} \times 0.02)=0.0015 (\mu\text{m}^{-1})$ 。图中显现两个明显的极值点,两个极值点数值分别是 579.94 与 206.98。显然,图 2(a)中较大的极值点对应着那

个唯一的传导模,通过步骤 2)的演算得出这个模的等效折射率为 3.339,其传播常数为  $\beta=(13.54-0.005247j) \mu\text{m}^{-1}$ ,归一化模场的等高线图如图 3(a)所示。从图中看出,这个漏泄模垂直方向上大概有三个峰,而水平方向的峰比较复杂,看起来需要视区域而定。这个漏泄模被称为模 A,以模 A 的归一化模场作为输入场,经过  $L=2^{15} \times 0.02=655 (\mu\text{m})$  传输后,算得输出场与输入场能量比为 0.24,用分贝表示此漏泄模损耗为 9.5 dB/mm。从  $h=5.4 \mu\text{m}$  运算到  $2.4 \mu\text{m}$  时,可以看出漏泄模衰减逐渐增大的趋势,因此,后面运算所取总高的值根据情况人为指定,减小了脊波导总高,几个值的计算结果如表 1 所示。

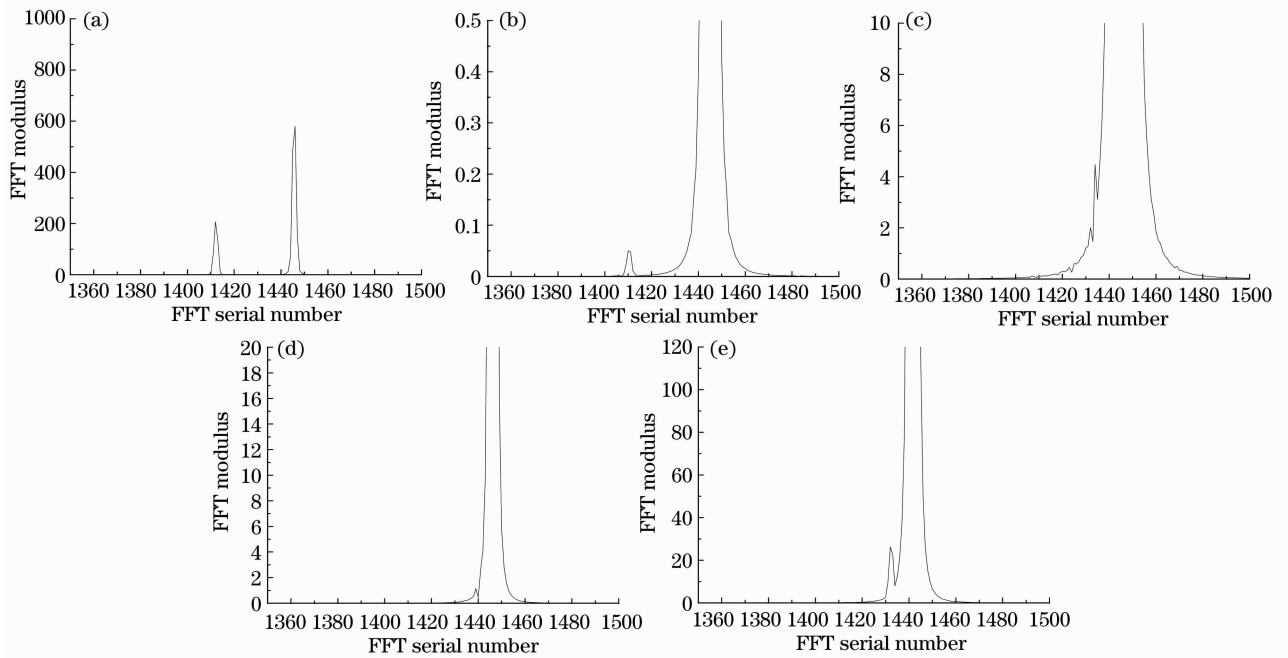


图 2 相关积分序列的傅里叶变换,  $N=2^{15}$ 。(a)  $h=2.4 \mu\text{m}$ ; (b)  $h=2.3 \mu\text{m}$ ; (c)  $h=2.25 \mu\text{m}$ ; (d)  $h=2.2 \mu\text{m}$ ; (e)  $h=1.6 \mu\text{m}$

Fig. 2 Fourier transform of correlation integral sequence,  $N=2^{15}$ 。(a)  $h=2.4 \mu\text{m}$ ; (b)  $h=2.3 \mu\text{m}$ ; (c)  $h=2.25 \mu\text{m}$ ; (d)  $h=2.2 \mu\text{m}$ ; (e)  $h=1.6 \mu\text{m}$

表 1 脊波导总高度  $h$  不同时对应漏泄模的衰减度

Table 1 Attenuation of leaky mode with the different heights of rib waveguide

Total height / $\mu\text{m}$	Mode A	Mode B	Attenuation / (dB/mm)
2.4	✓		9.5
2.3	✓		53
2.25		✓	
2.2		✓	
1.6		✓	37.21
1.3		✓	13

取  $h=2.3 \mu\text{m}$ ,相关积分序列的傅里叶变换如图 2(b)所示,此时显示的两个极值点的值分别是 654.68 与 0.05,这两个值相差巨大,以至于无法将两个值显示在同一幅图中。如果用此归一化漏泄模作

为输入场,经同样距离传输后,其损耗为 53 dB/mm。如果继续减小总高至  $h=2.2 \mu\text{m}$ ,这时傅里叶谱如图 2(d)所示。模 A 在谱图中无法辨识,但是新的漏泄模出现了,它的位置靠近导模,称此模为模 B。可

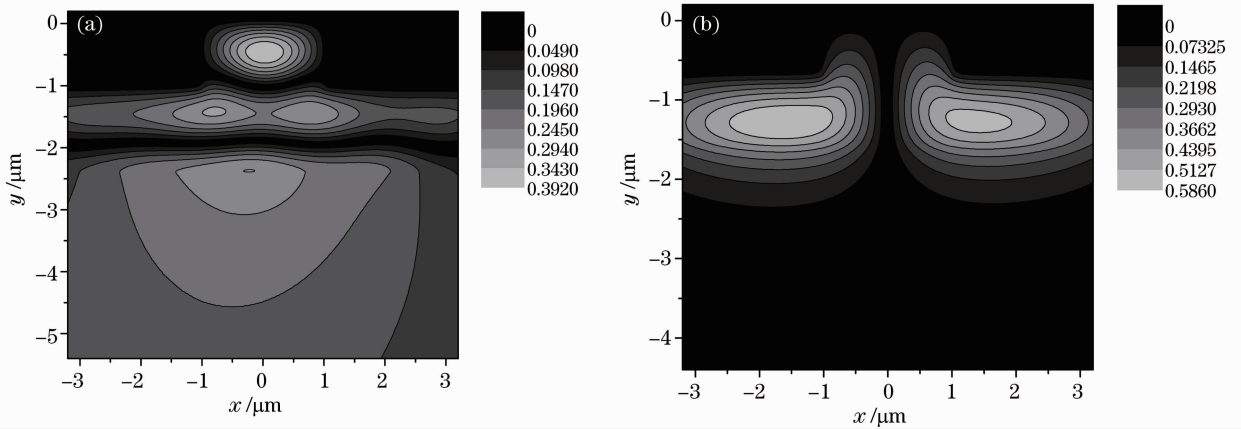


图3 漏泄模模场等高线图。(a)  $h=2.4 \mu\text{m}$ , 模式 A; (b)  $h=1.6 \mu\text{m}$ , 模式 B  
Fig. 3 Profiles of leaky mode. (a)  $h=2.4 \mu\text{m}$ , mode A; (b)  $h=1.6 \mu\text{m}$ , mode B

以判定,最优的  $h$  位于  $2.2 \mu\text{m}$  与  $2.3 \mu\text{m}$  之间。取  $h=2.25 \mu\text{m}$ , 傅里叶谱如 2(c) 所示,发现模 A 还是无法分辨,而模 B 初露端倪。因此取最优值为  $h=2.25 \mu\text{m}$ 。

模 B 刚出现时,衰减很大,输出场很微弱,这时采用高斯积分法(数值积分的常规方法)计算输出场能量,其精确性值得怀疑。因此,表 1 中的衰减值一栏留空。减小总高至  $h=1.6 \mu\text{m}$ , 计算结果比较清晰。傅里叶谱如图 2(e) 所示。算得这个漏泄模其等效折射率为 3.386, 模传播常数为  $\beta = (13.73 - 0.000696j) \mu\text{m}^{-1}$ , 其模场分布如图 3(b) 所示。图中可以明显看到模 B 在水平方向上不是单模。以归一化模场作为输入场,经过  $655 \mu\text{m}$  的传输后,输出场与输入场能量比为 0.003652, 损耗约为 37.21 dB/mm。  $h=1.3 \mu\text{m}$  时的相应数值也列在表 1 中。按照总高  $h$  从大到小的计算次序,模 A 的衰减趋势是从低到高,而模 B 衰减趋势是从高到低。很幸运,模 A 和模 B 的衰减走势没有重叠,也只有如此,优化才能成功,否则,只能是部分优化。

## 5 结 论

在给出的优化实例中,只有两个漏泄模被观测到。这可解释为别的漏泄模实际上和辐射模一样,衰减太快。只有衰减小到一定程度时,才能在 FDBPM 的计算中明显被分辨出来。那么,有无办法确定究竟有多少个漏泄模可以被明显观测到这个问题很难回答。水平方向上的单模条件由(3)式决定,在给出的实例中,如果  $r$  和  $a$  给定且不变,那么总高  $h < 2.0865 \mu\text{m}$  时,(3)式已经不被满足,即水平方向不是单模。(3)式当中的常数为 0.3,文献中尚有不同的取值。从计算数据看,当  $h < 2.25 \mu\text{m}$  时,模 B

才出现,倒推过去,这个常数应该取 0.2303。在此我们无意校正这个常数,定性来看,模 B 出现在我们的实例中,是符合单模条件的要求的。水平方向上的多模为何只出现一个,或者为何没有变成一个无衰减的导模,这些问题需要进一步研究。目前的做法是:对不同的波导尺寸,计算所有出现的漏泄模的衰减度,寻找一个使所有的漏泄模衰减都较大(最好是能量衰减到零)的波导几何尺寸作为优化的结果。尚无法确定是否所有满足单模条件的脊波导都能优化,优化的可能性与诸多波导几何参数之间的关系究竟如何,有待更细致地研究。

本文给出一个单模脊波导的几何结构优化实例。采用标量 FDBPM 方法,优化满足单模条件的脊波导器件的几何尺寸。在优化的几何参数下,脊波导仍然工作于单模状态,但漏泄模的衰减最大。

本文的研究表明,大截面单模脊波导器件的几何尺寸是有可能被优化的。这个工作在以往的文献中没有被强调。未经优化的单模波导,在使用 FDBPM 法来设计诸如 MMI 这样的功能器件时,如果输入场不是单模模场,将很困难,甚至不能进行。

## 参 考 文 献

- 1 Wen Changli, Ji Jiarong, Feng Xianghua, *et al.*. Fabrication of the multi-mode rib-waveguide and its coupling and wasting measurement system [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(2): 0212005.
- 2 温昌礼, 季家镛, 冯向华, 等. 多模脊形光波导的制备及其耦合对准和损耗测量系统[J]. 光学学报, 2011, 31(2): 0212005.
- 3 Li Zhiqian, Liu Wei, Niu Liyong, *et al.*. Design and study of ZnO ridge-waveguide random laser extension layer [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(11): 1102014.
- 4 李志全, 刘 玮, 牛力勇, 等. 氧化锌随机激光器脊状波导外延层的设计研究[J]. 中国激光, 2011, 38(11): 1102014.
- 5 Huang Qingzhong, Yu Jinzhong. Recent progress on SOI-based high-speed electro-optic modulators [J]. Chinese J

- Semiconductors, 2006, 27(12): 2069–2074.
- 黄庆忠, 余金中. SOI 光波导高速电光调制器的研究进展[J]. 半导体学报, 2006, 27(12): 2069–2074.
- 4 T K Liang, H K Tsang. Integrated polarization beam splitter in high index contrast silicon-on-insulator waveguides [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2005, 17(2): 393–395.
- 5 Wei Hongzhen, Yu Jinzhong, Liu Zhongli, *et al.*.  $1 \times 4$  MMI splitter based on rib SOI waveguide [J]. Chinese J Lasers B, 2000, 9(6): 525–530.
- 6 Dong Xiaye, Li Hongqiang, Chen Hongda, *et al.*. Design of a  $2 \times 2$  MMI coupler based on SOI [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(9): 090602.
- 董夏叶, 李鸿强, 陈弘达, 等. 基于 SOI 的  $2 \times 2$  MMI 耦合器的设计[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(9): 090602.
- 7 Le Zichun, Huang Sungang, Hu Jinhua, *et al.*. General self-imaging properties for line-tapered multimode interference couplers[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(6): 0611003.
- 乐孜纯, 黄孙港, 胡劲华, 等. 锥形多模干涉耦合器一般成像特性分析[J]. 光学学报, 2011, 31(6): 0611003.
- 8 Wei Hongzhen, Yu Jinzhong, Zhang Xiaofeng, *et al.*. Geometric structures and modes of SOI and GeSi/Si rib optical waveguides [J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(5): 556–558.
- 魏红振, 余金中, 张小峰, 等. SOI 及 GeSi/Si 脊形光波导的模式与波导几何结构[J]. 光学学报, 2001, 21(5): 556–558.
- 9 Zhao Cezhou, Liu Enke, Li Guozheng, *et al.*. Fabrication of SOI single-mode rib waveguide with large trapezoidal cross-section [J]. Acta Optica Sinica, 1994, 14(7): 783–784.
- 赵策洲, 刘恩科, 李国正, 等. SOI 梯形大截面单模脊形波导的研制[J]. 光学学报, 1994, 14(7): 783–784.
- 10 Yin Yuan, Dai Daoxin, Shi Yaocheng, *et al.*. Analysis of the single-mode condition for a rib SOI waveguide with a large cross section [J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(5): 669–671.
- 殷 源, 戴道锌, 时尧成, 等. 大截面 SOI 脊型波导单模条件的研究[J]. 光子学报, 2005, 34(5): 669–671.
- 11 Yan Chaojun, Peng Wenbiao, Li Haijun, *et al.*. Verification of single-mode condition of silicon-on-insulator rib waveguides with large cross-section [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(s1): s113002.
- 严朝军, 彭文标, 李海军, 等. 绝缘硅大截面脊波导的单模条件验证[J]. 光学学报, 2012, 32(s1): s113002.
- 12 Gao Yuan, Zhang Xiaoxia, Liao Jinkun. Analysis of single-mode condition for organic polymer asymmetric ridge waveguide [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8): 0813001.
- 高 原, 张晓霞, 廖进昆. 有机聚合物非对称脊波导单模条件分析[J]. 光学学报, 2011, 31(8): 0813001.

栏目编辑: 王晓球