

文章编号: 1001-3806(2009)03-0333-04

两种变形双脊波导传输特性的分析研究

张黎明¹, 逯迈^{1*}, 陈小强², 张流洋³, 韩国军¹

(1. 兰州交通大学 教育部光电技术与智能控制重点实验室, 兰州 730070; 2. 兰州交通大学 电子与信息工程学院, 兰州 730070; 3. 平顶山学院 软件学院, 平顶山 467000)

摘要: 为了寻找最佳传输特性的对称双脊波导结构, 提出了圆形和椭圆形两种变形对称双脊波导, 采用有限元的方法, 研究了圆形和椭圆形两种变形对称双脊波导对传输特性的影响。计算了脊尺寸变化时的截止波长和单模带宽, 给出了主模场结构图以及变形对截止波长和单模带宽影响的相应的关系曲线, 并分析了传输特性随对称脊波导结构尺寸的变化情况。该研究结果对变形双脊波导的应用和研究提供了参考, 并为脊波导器件的小型化提供了指导。

关键词: 光电子学; 传输特性; 有限元法; 截止波长; 单模带宽; 主模场结构

中图分类号: TN814 **文献标识码:** A

Study of transmission characteristics of two kinds of deformed dual-ridge waveguide

ZHANG Li-ming¹, LU Mai¹, CHEN Xiao-qiang², ZHANG Liu-yang³, HAN Guo-jun¹

(1. Key Laboratory of Opto-Electronic Technology and Intelligent Control of Ministry of Education, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 3. School of Software Engineering, Pingdingshan University, Pingdingshan 467000, China)

Abstract: In order to find a symmetrical dual-ridged waveguide with optimal transmission characteristics, two novel dual-ridged waveguides with circle and ellipse ridges respectively were put forward. The influence of both the deformed dual-ridged waveguides on the transmission characteristics of the waveguide was analyzed by means of finite element method. The cutoff wavelength and single-mode bandwidth were calculated for different ridge dimensions. The field patterns of dominant mode and the curve for the effect of deformation on the cutoff wavelength and brand width were drawn. Finally, the relationship between the transmission characteristics and the dimension of the ridges was analyzed. It is shown that these results can provide valuable reference of application and study of the deformed dual-ridge waveguides and provide instructions for miniaturization of ridged waveguide apparatus.

Key words: optoelectronics; transmission characteristics; finite element method; cutoff wavelength; single-mode bandwidth; dominant field chart

引言

脊波导由 COHN 在 1947 年提出以后就备受人们关注, 与传统的矩形波导相比, 脊波导有其独到的特性, 因此在微波和毫米波设备上有着很广泛的应用, 如: 宽带脊波导滤波器、宽带定向耦合器、双工器、变频器、移相器、脊波导缝隙天线阵等。COHN 利用横向谐振技术给出了求解矩形脊波导的截止波长和特性阻抗的方程和特性图; GETSINGER 研究了矩形脊波导内的

场及其分布; 随后人们分析了矩形单脊、双脊波导^[1]的传输特性。分析波导传输特性的方法多为有限元法^[2-4]、有限差分法、变分法和矩量法^[5-6]等。作者主要是应用有限元法讨论了圆形和椭圆形两种变形对称双脊波导的传输特性, 综合分析了脊位于中心位置时的矩形、圆形和椭圆形脊波导的传输特性, 计算脊分别为圆形和椭圆形脊波导在 TE 模式下的截止波长和单模带宽, 将结果与矩形脊波导、圆形和椭圆形的数据进行对比, 并画出其相应的场结构图, 研究归纳椭圆形的变化对脊波导截止波长和单模带的影响, 从而对以后变形双脊波导的应用和研究提供有价值的参考。

1 基本原理及方法

有限元法已广泛应用于电磁场数值计算问题, 根据 Maxwell 方程:

基金项目: 国家“八六三” 高新技术研究发展计划资助项目 (2007AA11Z211)

作者简介: 张黎明 (1982-), 女, 硕士研究生, 研究方向为计算电磁学。

* 通讯联系人。E-mail: emfmlu@gmail.com

收稿日期: 2008-05-08; 收到修改稿日期: 2008-06-30

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \end{cases} \quad (1)$$

式中, ∇ 为拉普拉斯算子, \mathbf{H} 为磁场强度, \mathbf{E} 为电场强度, \mathbf{B} 为磁感应强度, \mathbf{D} 为电通密度, \mathbf{J} 为电流面密度, ρ 为电荷体密度, t 表示时间。对于无源空间 ($\mathbf{J} = 0$, $\rho = 0$), 介质均匀各向同性中, Maxwell 方程将化简为 Helmholtz 方程:

$$\begin{cases} \nabla^2 E_i + k^2 E_i = 0 \\ \nabla^2 H_i + k^2 H_i = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, $k = \omega(\mu\epsilon)^{1/2}$, 为电磁波在无限媒质中的波数。 μ 为磁导率, ϵ 为介电常数, 对于金属波导, 假设波导是无限长, 且波导是沿着 z 轴方向传输, 则有:

$$\begin{cases} \mathbf{E} = E_0(x, y) \exp[(\alpha - j\beta)z] \exp(j\omega t) \\ \mathbf{H} = H_0(x, y) \exp[(\alpha - j\beta)z] \exp(j\omega t) \end{cases} \quad (3)$$

式中, α 为衰减常数, β 为相位常数, ω 为工作频率。将 (3) 式代入 (2) 式中, 将可得:

$$\begin{cases} \nabla_i^2 \mathbf{E} + k_c^2 \mathbf{E} = 0 \\ \nabla_i^2 \mathbf{H} + k_c^2 \mathbf{H} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, $k_c^2 = k^2 + \gamma^2$, k_c 为截止波数, γ 为电导率, 波导中纵向电场分量 $E_z(x, y)$ 和磁场分量 $H_z(x, y)$ 满足方程:

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial y^2} + k_c^2 E_z = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2} + k_c^2 H_z = 0 \quad (6)$$

由于 (6) 式和 (7) 式均满足齐次 Helmholtz 方程:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + k_c^2 \phi = 0 \quad (7)$$

式中, ϕ 为电位。对于 TM 模 $\phi = E_z$ 时, ϕ 在波导壁上满足齐次 Dirichlet 边界条件 $\phi = 0$ 。对于 TE 模 $\phi = H_z$ 时, ϕ 在波导壁上满足齐次 Neumann 边界条件 $\partial\phi/\partial n = 0$ (n 是指波导壁的单位法线方向)。求解 (7) 式的解等价于对下式求泛函的极值问题:

$$J(\phi) = \frac{1}{2} \iint [(\partial\phi/\partial x)^2 + (\partial\phi/\partial y)^2 - k_c^2 \phi^2] dx dy \quad (8)$$

利用三角单元对场域进行剖分, 研究 (9) 式的变分问题。根据有限元理论分析^[7], 对于三角单元剖分的场域, 可推导出下列本征值矩阵方程:

$$\mathbf{A}\phi = k_c^2 \mathbf{B}\phi \quad (9)$$

式中, \mathbf{A} 和 \mathbf{B} 均为 $N \times N$ 阶方阵, N 为节点数的总和, ϕ 为电位 ϕ 的列向量, 代表有限元剖分后各节点的 ϕ 值。 k_c^2 表示待求的特征值^[8], 由 (9) 式求解特征值, 得到的最小非负特征值就是主模的截止波数 k_c , 得到的

第 2 个最小非负特征值就是第 1 个高次模的截止波数, 这样就可以得到脊波导的截止特性与单模带宽特性。

2 数值计算结果及分析

2.1 截止波长

图 1 和图 2 分别是圆形和椭圆形脊波导在脊位于波导中心位置时脊宽 s 与归一化截止波长 λ_c/a 的关系曲线图, 且脊的几何尺寸连续变化, $b/a = 0.45$ 。其中, a 为长边长度, b 为短边长度。

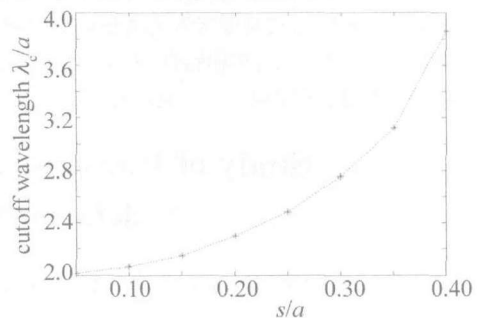


Fig. 1 The relation between s/a and λ_c/a in circle ridged waveguide

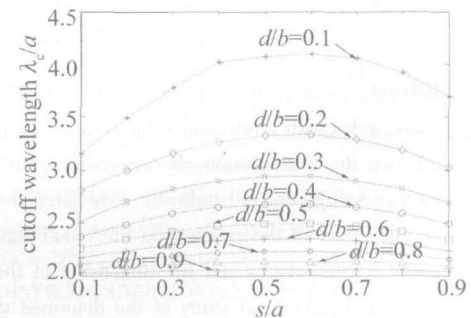


Fig. 2 The relation between s/a and λ_c/a in ellipse ridged waveguide

(1) 圆形对称双脊波导归一化截止波长 λ_c/a 大小取值范围是在 2 ~ 4.9; 椭圆形对称双脊波导归一化截止波长 λ_c/a , 其大小取值范围是在 2 ~ 4.1。当脊位于中间位置时, 归一化截止波长 λ_c/a 可得到较大值, 因此常用的脊波导的脊都做在中间位置, 可获得较大的归一化截止波长, 且在 $s/a = 0.6$ 时, 可获得最大截止波长。

(2) 圆形对称双脊波导和椭圆形对称双脊波导都是矩形对称双脊波导的变形特例, 矩形对称双脊波导^[8]在 s/a 固定时, 随着 d/b 的增大 (d 为脊高), 其截止波长 λ_c/a 随之减小; 在 d/b 固定, 当 $s/a \leq 0.5$ 时, 归一化截止波长 λ_c/a 随 s/a 增大而增大; 当 $s/a > 0.5$ 时, 归一化截止波长 λ_c/a 随 s/a 增大而减小, 所以脊位于中间位置时, 即在 $s/a = 0.5$, 归一化截止波长 λ_c/a 取得较大值, 并且由计算结果与参考文献^[9]中比较得出, 矩形对称双脊波导的最大截止波长比圆形脊波导椭圆形脊波导的最大截止波长都大; 但是随着 s/a 和 d/b 的增大, 椭圆形脊波导的形状越接近矩形脊波

导的形状,并且在 $s/a = 1, d/b = 1$ 时变形为矩形脊波导。所以,椭圆形脊波导截止波长越接近矩形脊波导的截止波长。

(3) 椭圆形对称双脊波导,当 s/a 固定时,随着 d/b 的增大,其截止波长 λ_c/a 随之减小;当 d/b 固定时,随着 s/a 的增大,其截止波长 λ_c/a 先增大后减小,当 $s/a < 0.6$ 时,归一化截止波长 λ_c/a 随 s/a 增大而增大;当 $s/a > 0.6$ 时,归一化截止波长 λ_c/a 随 s/a 增大而减小。因此,脊位于中间时,归一化截止波长 λ_c/a 不是最大值,这是双脊波导与单脊波导的不同之处。

(4) 圆形对称双脊波导,在计算其截止波长时 s/a 所属区间为 $[0.05, 0.425]$, d/b 所属区间为 $[0.1, 0.9]$ 。由于它是椭圆形对称双脊波导的特殊情况,并且 $s/a < 0.5$, 满足椭圆形对称双脊波导在 $s/a < 0.6$ 时,归一化截止波长 λ_c/a 随 s/a 增大而增大。所以,圆形对称双脊波导归一化截止波长 λ_c/a 随着 r/a 的增大(即随着 s 的增大), d 随之减小,其截止波长 λ_c/a 随之增大,即随 s/a 增大而增大,它是椭圆形对称双脊波导变化过程的一小部分。

2.2 单模带宽

单模带宽是 TE 模式的主模截止波长 λ_c 和第 1 高次模 λ_{cl} 的比值即: $\lambda_{BW} = \lambda_c/\lambda_{cl}$, 图 3 和图 4 分别是圆形和椭圆形脊在波导中心位置时,脊宽 s 与单模带宽 λ_{BW} 的曲线关系图,其 $b/a = 0.45$ 。

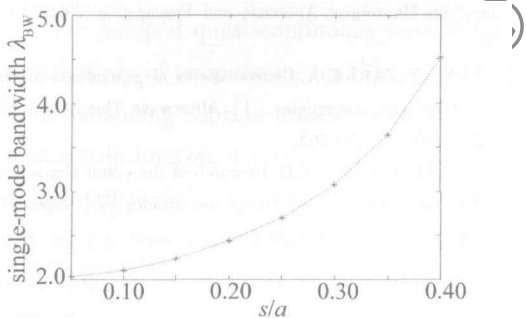


Fig. 3 The relation between s/a and λ_{BW} in circle ridged waveguide

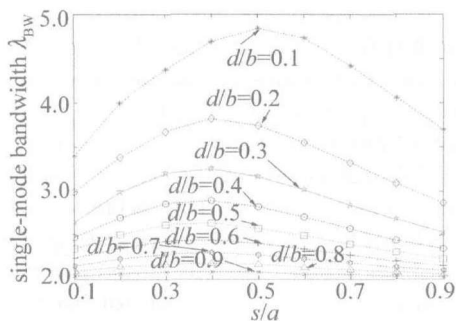


Fig. 4 The relation between s/a and λ_{BW} in ellipse ridged waveguide

(1) 圆形对称双脊波导单模带宽 λ_{BW} 大小取值范围是在 2 ~ 5.49;椭圆形对称双脊波导单模带宽 λ_{BW} 大小取值范围是在 2 ~ 4.84。当脊位于中间位置时,单

模带宽 λ_{BW} 可得到较大值。

(2) 矩形双脊波导^[9]在脊位于中间位置时,当 s/a 固定时,随着 d/b 的增大,其单模带宽 λ_{BW} 随之减小,当 d/b 固定,在 $s/a \leq 0.5$ 时,单模带宽 λ_{BW} 随 s/a 增大而增大;在 $s/a > 0.5$ 时,单模带宽 λ_{BW} 随 s/a 增大而减小,在 $s/a = 0.5$ 时,可得到较大的单模带宽。由计算结果与参考文献[10]比较得出:矩形脊波导单模带宽 λ_{BW} 比圆形脊的单模带宽也大;矩形脊波导单模带宽 λ_{BW} 的比椭圆形脊波导的单模带宽也大。

(3) 椭圆形对称双脊波导,当 s/a 固定时,随着 d/b 的增大,其单模带宽 λ_{BW} 随之减小;当 d/b 固定时,随着 s/a 的增大,其单模带宽 λ_{BW} 先增大后减小,当 $s/a < 0.4$ 时,单模带宽 λ_{BW} 随 s/a 增大而增大;当 $s/a > 0.4$ 时,单模带宽 λ_{BW} 随 s/a 增大而减小,在 $s/a = 0.4$ 时可得到较大的单模带宽。其中在 $d/b = 0.1$ 时的变化最为明显,是以 $s/a = 0.5$ 为分界点的,在 $s/a = 0.5$ 时可得到较大的单模带宽。

(4) 圆形对称双脊波导,在计算其单模带宽时 s/a 所属区间为 $[0.05, 0.425]$, d/b 所属区间为 $[0.1, 0.9]$ 。由于它是椭圆形对称双脊波导的特殊情况,并且 $s/a < 0.4$, 满足椭圆形对称双脊波导在 $s/a < 0.4$ 时,单模带宽 λ_{BW} 随 s/a 增大而增大。所以,圆形对称双脊波导单模带宽 λ_{BW} 随着 r/a 的增大(即随着 s 的增大, d 随之减小),单模带宽 λ_{BW} 随之增大,即随 s/a 增大单模带宽 λ_{BW} 也增大。

2.3 场结构图

图 5 和图 6 分别是圆形对称双脊波导当 $s/a = 0.2$ 时的主模场结构图和第 1 高次模的场结构图;图 7 和

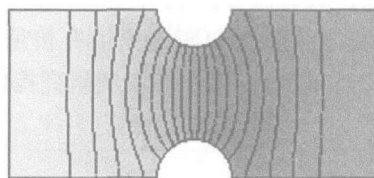


Fig. 5 Field pattern of dominant mode in circle ridged waveguide

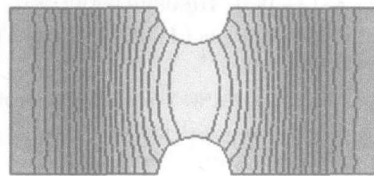


Fig. 6 Field pattern of first higher-order mode in circle ridged waveguide

图 8 分别是椭圆形对称双脊波导当 $d/b = 0.6, s/a = 0.6$ 时的主模场结构图和第 1 高次模的场结构图。对这 4 幅仿真图分析可以看出:(1)随着增大,圆形脊波导(见图 7)在脊两侧的电场密度逐渐减小;并且椭圆形脊波导(见图 8)在脊两侧的电场密度逐渐减小。脊越宽,脊与脊之间的场强就越小,而且越靠近脊背处场强

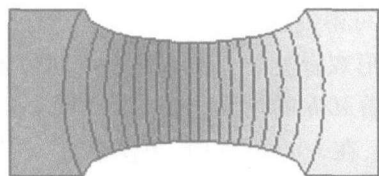


Fig. 7 Field pattern of dominant mode in ellipse ridged waveguide

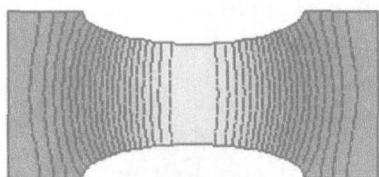


Fig. 8 Field pattern of first higher-order mode in ellipse ridged waveguide
 越大。可见在脊状波导边部的电场密度较脊背之上大,坡印亭矢量也大,并且两边的电场密度对称分布并且相等。因此,波的主要能量是在脊背传输;随着脊 d/b 越小,即脊高越高,脊两侧电场密度越小,能量越集中脊背传输。(2)第1高次模的电场被劈分为对称的两部分,同样下陷部分比较稀疏,等值线稀疏的地方表示场强较小;被下陷部分分开的地方的两侧比较密集,等值线密的地方表示场强较大。

3 结论

作者采用有限元方法研究了圆形、椭圆形脊波导的传输特性,计算了脊在中心位置且脊的尺寸连续变化时的归一化截止波长、单模带宽以及场图,并给出了相应的比较结果和结论^[11],通过对圆形、椭圆形脊波导的截止波长和单模带宽的计算,可以看出:在 d/b 较小的情况下可以获得更高的单模带宽;在主模场分布中,在两脊间场强最大,向两侧逐渐减小。通过这些研究表明:可以扩大脊波导传输特性的调节范围,这对以后变形双脊波导的应用和研究提供有价值的参考,这对实际的微波和毫米波工程的发展研究提供了有价值

的理论依据,并且用有限元方法计算圆形、椭圆形脊波导的传输特性问题,编程简单、计算量小,一般微机就能解决实际工程问题。

参 考 文 献

- [1] LU M, LEONARD P J. Dependence of ridge position on the cutoff wavelength of the dominant mode in single ridge waveguides [J]. Microwave and Optical Technology Letter, 2002, 55(34): 374-377.
- [2] McKAY M, HELSZAJN J. Voltage-current definition of impedance of single-ridge waveguide [J]. IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 1999, 9(2): 66-68.
- [3] QIU D, KLYMYSHYN D M, PRAMANICK P. Ridged waveguide structures with improved fundamental mode cutoff wavelength and bandwidth characteristics [J]. International Journal of RF Microwave Computer-Aided Engineering, 2002, 12(2): 190-197.
- [4] LU M, LEONARD P J. Design of trapezoidal-ridge waveguide by finite-element method [J]. Microwave Antennas and Propagation Proceedings, 2004, 151(3): 205-211.
- [5] ZHU M Z, LIANG Ch H. A MoM calculation of the lowest cutoff frequencies of uniform waveguides by conformal mapping [J]. Journal of Xidian University, 2006, 33(5): 709-711 (in Chinese).
- [6] BU A T. Method & its new development [J]. Journal of Xidian University, 2001, 28(1): 3-5 (in Chinese).
- [7] DENG S F, YANG X Q, CHENG Y Zh. Ridged waveguides eigenvalue analysis based on finite element method [J]. Electronic Warfare Technology, 2005, 20(1): 43-46 (in Chinese).
- [8] ZHANG X J, SONG W M. Characteristic calculation of unsymmetrical ridged waveguide [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2007, 22(5): 825-828 (in Chinese).
- [9] JARVIS D A, RAO T C. Design of double-ridged rectangular waveguide of arbitrary aspect ratio and ridge height [J]. IEEE Proceedings-Microwaves Antennas and Propagation, 2000, 147(1): 31-34.
- [10] RONG Y, ZAKI K A. Characteristics of generalized rectangular and circular ridge waveguides [J]. Microwave Theory and Techniques, 2000, 48(2): 258-265.
- [11] LI Y, LU M, CHEN X Q. Research of the cutoff characteristic of the dominant mode in ridge-trough waveguides [J]. Laser Technology, 2007, 31(4): 442-444 (in Chinese).

(上接第 318 页)

- [8] BINTJAS C, KALYVAS M, THEOPHILOPOULOS G, et al. 20Gbit/s all-optical XOR with UNI gate [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2000, 12(7): 834-836.
- [9] ZHANG X L, DONG J J, WANG Y, et al. Experimental and theoretical investigation on novel all-optical logic and gates [J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54(5): 2066-2071 (in Chinese).
- [10] TSIOKOS D, KEHAYAS E, VYRSOKINOS K, et al. 10Gbit/s all-optical half-adder with interferometric SOA Gates [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(1): 284-286.
- [11] ZOU L F, PAN W, LUO B, et al. Theoretical analysis on all optical XOR using linear optical amplifier [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 54(5): 2066-2071 (in Chinese).
- [12] CHENG Zh J, YU Ch X. All optical wavelength conversion in semiconductor optical amplifier(SOA) [J]. Laser Technology, 2000, 24(3): 158-162 (in Chinese).
- [13] AGRAWAL G P, OLSSON N A. Self-phase modulation and spectral broadening of optical pulses in semiconductor laser amplifiers [J]. IEEE J Q E, 1989, 25(11): 2297-2306.
- [14] DONG J J, ZHANG X L, WANG Y, et al. Extinction ratio characteristics of wavelength converters based on single-port-coupled SOA [J]. Laser Technology, 2005, 29(1): 14-17 (in Chinese).
- [15] YE Y B, ZHENG X P, ZHANG H Y, et al. Study on the dynamic range of input power for wavelength converter based on cross-phase modulation in SOAs [J]. Opt Commun, 2001, 200(1/6): 349-354.
- [16] ZHANG L, KANG I, BHARDWAJ A, et al. Reduced recovery time semiconductor optical amplifier using p-type-doped multiple quantum wells [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(22): 2323-2325.