

文章编号: 1005—0523(2007)04—0138—03

方形波导的图像传输特性

刘志敏, 陈爱喜, 周凤麒

(华东交通大学 基础科学学院, 江西 南昌 330013)

摘要:对方形波导的图像传输问题进行了理论分析与探讨, 推导出其自成像周期, 并借助于数值方法模拟其图像传输特性. 结果表明: 二分之一自成像周期截面具有成反像的特性; 四分之一自成像周期截面可成四个自成像, 其他位置的图像与输入位置的图像依次关于 y 轴、原点和 x 轴对称.

关键词:方形波导; 图像传输; 自成像

中图分类号: TN252 **文献标识码:** A

1 引言

光波导的图像传输一直是导波光学中的一个重要问题, 近年来, 波导的分束和自成像等特性引起了科研工作者的广泛兴趣, Ovchinnikov 等对平面波导的分束特性进行了系统讨论^[1-3]; 何赛灵等人研究了矩形波导的自成像特性^[4]; 同时, Wu 等人对方形波导图像传输问题的讨论表明: 在四分之一自成像周期截面可得到四个图像, 其对称位置的像相对于输入像发生翻转和旋转^[5-6]. 但 Wu 等人对方形波导中的图像传输问题的讨论过程中在波导的两端分别放置傅立叶透镜, 相当于作傅立叶积分, 其过程相当复杂. 基于这种考虑, 本文对方形波导进行了理论分析, 理论上推导出了其自成像周期, 并推导出二分之一自成像周期截面具有移位(即反像)的特性, 最后将 Wu 其文献中的傅立叶透镜省略, 将输入图像直接放置波导的端面, 并借助数值方法模拟其图像传输特性.

2 理论分析

图 1 为沿 Z 方向传输的方形波导简图. 波导的

边宽和长度分别为 a 和 L , 并设波导的外壁为理想导体. 则沿波导传输距离的截面上光场(TM 波)可以表示为

$$E(x, y, L) = \sum_{m=1}^{max} \sum_{n=1}^{max} C_{m, n} \sin(\frac{m\pi}{a}x) \sin(\frac{n\pi}{a}y) \times \exp \left[-i \sqrt{K_1^2 - \frac{m^2 \pi^2}{a^2} - \frac{n^2 \pi^2}{a^2}} L \right] \quad (1)$$

其中 $k_1 = n_1 \omega / c$, n_1 为波导内媒质的折射率. 系数 $C_{m, n}$ 由入射光场来决定

$$C_{m, n} = \iint dx dy \sin(\frac{m\pi}{a}x) \sin(\frac{n\pi}{a}y) E_{in}(x, y, L=0) \quad (2)$$

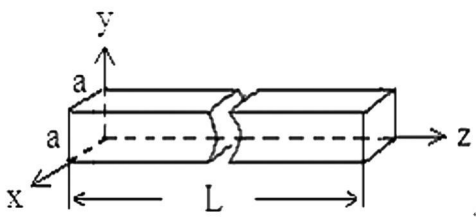


图 1 方形波导简图

另外, 当满足 $(m^2 + n^2) \lambda^2 \ll (2a)^2$ 时, (1) 式可简化为

$$E(x, y, L) = \sum_{m=1}^{max} \sum_{n=1}^{max} C_{m, n} \sin(\frac{m\pi x}{a}) \sin(\frac{n\pi y}{a}) \exp$$

$$(i\frac{2\pi L}{\lambda})\exp(i\frac{2\pi(m^2+n^2)L}{8a^2}) \tag{3}$$

(3)式中最后一项表明了波导内不同模式间的相位差.当 $L=L_0$ 时,其中 $L_0=8a^2/\lambda$ 为平面波导自成像周期^[3],对于所有的 m 和 n 值相位差为 2π 的整数倍,有

$$E(x,y,L=L_0)=E(x,y,L=0) \tag{4}$$

表明 $L=L_0$ 为该波导的自成像周期,且具有周期性,即在 $z=nL_0$ ($n=1,2L$)也出现自成像.

当 $z=L_0/2$ 时,对于所有的 m 和 n 为奇数或为偶数时,相位差为 2π ;而对所有的 m 和 n 中一个为奇数一个为偶数时,相位差为 π .通过计算有

$$E(x,y,Z=L_0/2)=E(a-x,a-y,z=0) \tag{5}$$

上式表明 $z=L_0/2$ 截面,在 $x=y=a$ 处的光场是由 $z=0$ 截面 $x=y=0$ 的光场移位而来,即说明方形波导在 $z=L_0/2$ 截面具有移位(反像)特性.

3 数值结果与讨论

为讨论方形波导的图像传输特性,我们借助数值方法来模拟,模拟参数选取为:方形波导的宽度 $a=2\text{ mm}$;波长 $\lambda=633\text{ nm}$;通常,系数随着模数的增加迅速衰减^[1],因此实际考虑的模数远小于最大模数,模拟中取 $m=n=80$.

(1) 输入端面的图像(即输入像)和自成像周期截面的输出图像

$$E(x,y)=\begin{cases} 1, & (\frac{a}{10}\leq x\leq\frac{2a}{5},\frac{a}{10}\leq y\leq\frac{2a}{5}) \\ -(\frac{a}{5}\leq x\leq\frac{2a}{5},\frac{a}{5}\leq y\leq\frac{2a}{5}) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \tag{6}$$

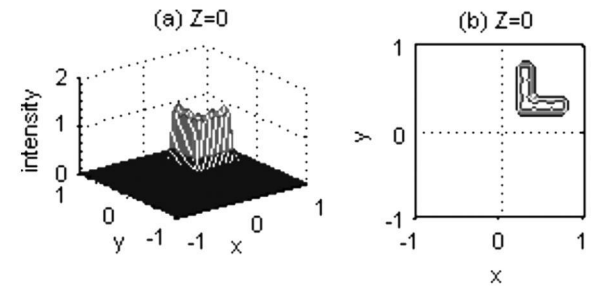


图 2 方形波导输入端面的像图

类似于 Wu 等人讨论方形波导将输入图像设置在第一象限,为简单明了,同时也为更好的体现图像对称性的变化,本文将形如“L”的图形的放置在一定的区间范围内,采用强度为 1 的平面波直接照射图形作为输入图像.从模拟结果图 2(b)可以很明显

的看出 $z=0$ 截面图与输入图像位置和形状一致,且从(a)图可以看出图像主体的强度为 1,尽管在图像的边缘出现大于 1 的强度分布,这主要是由于正交函数展开时的边缘误差所致.这表明了计算程序是正确的.

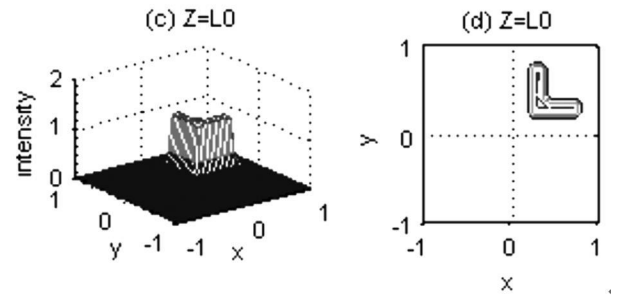


图 3 方形波导自成像周期截面的输出像

从对自成像周期的讨论可知自成像周期为 $L_0=8a^2/\lambda$,因此在该处的截面上输出图像一定与输入图像一致,如图 3 所示,图像的形状、位置和强度都与输入图像一致.

(2) 二分之一自成像周期截面的输出图像

从对二分之一自成像周期截面的理论推导可知该截面具有移位(即反像)的特性,如图 4 所示.图像在强度上没有发生变化,仍然为 1,但是图像从第一象限移位到了第三象限,且图像相对于输入图像旋转了,即与输入图像关于原点对称.

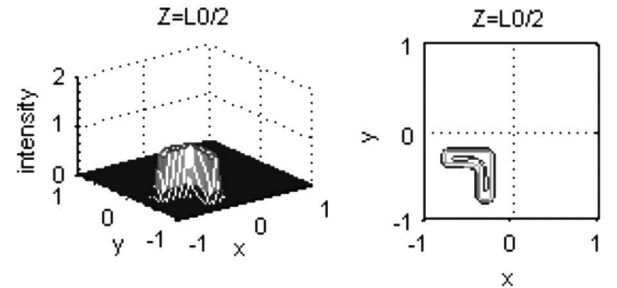


图 4 方形波导二分之一自成像周期截面的输出像

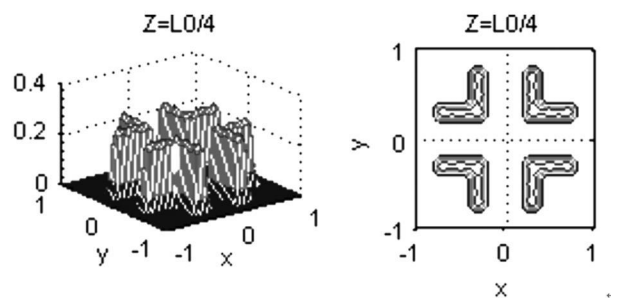


图 5 方形波导四分之一自成像周期截面的输出像

(3) 四分之一自成像周期截面的输出图像

最后模拟了四分之一自成像周期截面的输出图

像,如图 5 所示.结果表明:在四个象限都出现与输入图像形状一致的图像,相对于输入图像,第二象限的图像与输入图像关于轴 $x=0$ 轴对称;第三象限的图像相对于输入图像顺时针或逆时针旋转 180° ,即关于原点对称;第四象限的图像与输入图像关于轴 $y=0$ 轴对称.且四个图像的总强度为 1,与入射强度一致.

4 结论

此文对方形波导进行了分析与探讨,理论上推导出了其自成周期,并推导出二分之一自成周期截面具有移位(即反像)的特性,最后将 Wu 文献中的傅立叶透镜省略,将输入图像直接放置波导的端面,并借助数值方法模拟其图像传输特性,过程简单明了,而且得到了很好的成像效果,这为图像传输问题的实际设计提供了一个新的尝试.

参考文献:

- [1] Ovchinnikov Yu. B. Revivals of light in a planar metal waveguide[J]. Opt. Commun., 2000, (182), 35—43.
- [2] Ovchinnikov Yu. B, T. Pfau. Revivals and Oscillations of the momentum of light in a planar multimode waveguide[J]. Phys. Rev. Lett., 2001, (87), 123901.
- [3] Ovchinnikov Yu. B. A planar waveguide beam splitter[J]. Opt. commun., 2003, (220), 229—235.
- [4] He Sailin, Ao Xianyu, et al. General properties of self-images in a strongly confined rectangular waveguide [J]. Appl. Opt., 2003, (42), 4855—4859.
- [5] Wu C Y, Somervell A R D, Barnes T H. Direct image transmission through a multi-mode square optical fiber[J]. Opt. commun., 1998, (157), 17—22.
- [6] Wu C Y, Somervell A R D, et al. Optical Sine transformation and image transmission by using square optical waveguide[J]. Opt. commun., 2000, (175), 27—32.

The Characteristics of Image Transmission through a Square Optical Waveguide

LIU Zhi-min, CHEN Ai-xi, ZHOU Feng-qi

(School of Basic Science, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: In this paper, image transmission through a square optical waveguide is discussed in theory. Self-image length of this waveguide is derived; and image transmission on the waveguide is studied by numerical simulation. The result shows: the output image at half of the Self-image length shifts from the first quadrant to the third quadrant; And four identical images at one forth of the Self-image length distribute symmetrically.

Key words: Square optical waveguide; Image transmission; Self-image;