

文章编号: 0253-2239(2010)12-3530-07

三层介质平板光波导的最小光斑

喻 平 江晓清 杨建义 王明华

(浙江大学信息与电子工程学系, 浙江 杭州 310027)

摘要 从三层平板波导麦克斯韦方程的模场解出发,根据光斑尺寸的定义,讨论了波导模式,波导尺寸、折射率差、工作波长以及波导非对称性对光斑尺寸的影响,给出了最小光斑的波导条件。分析和模拟结果表明,对称三层平板波导 TE 模的最小光斑尺寸(MMSS)与波导芯/包层介电系数差的平方根成反比, TM 模最小光斑尺寸则依赖于波导芯层和包层介电系数的具体大小,相同波导结构条件下 TM 模的等效光斑尺寸较 TE 模更大,二者皆与工作波长成正比;非对称波导中光斑分布是非对称的,其光斑尺寸介于分别以两个包层为包层的对应对称三层平板波导之间,其最小光斑尺寸随对称因子的增大先减小后增大。

关键词 集成光学;光斑;微纳光波导;光量子性

中图分类号 TN25 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103012.3530

Minimum Mode Spot Size in a Three-Layer Dielectric Optical Waveguide

Yu Ping Jiang Xiaoqing Yang Jianyi Wang Minghua

(Department of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University,
Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract The minimum mode spot size of a three-layer dielectric optical waveguide was studied. Based on the mode-field solutions expression of Maxwell function, The influences of mode polarization, waveguide size, dielectric coefficient difference, wavelength and asymmetry on mode spot size, according to its specified definition are investigated. The analysis and simulation results indicated that there existed a minimum mode spot size (MMSS) in a three-layer dielectric optical waveguide. As to the symmetric waveguide, the MMSS of TE mode is inversely proportional to the square root of dielectric coefficient difference. However the MMSS of TM mode is dependent on the specified dielectric coefficients of waveguide and larger than that of TE mode. Both of them are proportional to the wavelength of guided wave. As to the asymmetric waveguide, the shape of mode spot is also asymmetric. The MMSS has the same dependences on dielectric coefficient difference as symmetric one. Besides, it decreases at first and then increases with the increasing of waveguide symmetry factor.

Key words integrated optics; mode spot size; micro-nano optical waveguide; quantum nature of light

1 引 言

近年来,随着微纳加工技术的不断进步和成熟,集成光学进一步向着微型化和高密度集成化发展^[1,2]。采用光波长量级以及亚波长尺度的光子晶体、表面等离子波等技术,可以将光子器件的尺寸大幅度缩小^[3,4],因此吸引了研究者的广泛关注^[5~9]。相对于这些新型的光波导结构和器件,传统介质波导更容易加工实现,而且通常具有更低的传输损耗。

另外,当传统介质波导尺寸缩小至亚波长量级,也显示出一些有趣的光学现象。随着波导尺寸不断缩小,其导波光场的有效模场面积会经历一个逐渐变小到极小值然后又急剧增大的过程^[10],这是由于波导模场中倏逝波作用的结果。在导波光学中,光斑尺寸(或称模场尺寸)是指介质波导中电磁场的主要集中分布的范围尺度,它表征了波导对导波光场的限制作用,波导导模的许多性质都可以由它决

收稿日期: 2010-03-09; 收到修改稿日期: 2010-04-06

基金项目: 国家自然科学基金(60977043)和国家 973 计划(2007CB613405)资助课题。

作者简介: 喻 平(1980—),男,博士研究生,主要从事集成光电技术方面的研究。E-mail: yu_ping@zju.edu.cn

导师简介: 杨建义(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事集成光学方面的研究。E-mail: yangjy@zju.edu.cn

(通信联系人)

定^[11]。

为了将尽可能多的光子器件高密度地集成在一起的时候,就要尽量将器件做得足够小,这时光斑尺寸的大小对于波导间耦合、串扰以及波导的损耗等问题就显得更加重要。此外在设计光子晶体平板的微腔时,在垂直于平板方向上是靠全内反射机制导光的,为了进一步减小微腔模式体积,也需要对这一方向上的芯区厚度进行优化。类似于集成电路设计中要求导线间最小间距应大于某一特征值,随着波导数量大规模地增多,它们之间的距离以及波导宽度的设计就决定了器件集成能达到的极限和器件工作的性能,因而研究最小光斑的波导条件对于微纳尺度光波导器件的设计和制作具有现实意义。

作为最基本的理论模型之一,三层平板波导的导模有严格的解析解^[12],容易对它的光斑尺寸进行精确的分析和讨论,其结果有助于理解其它类似的波导,例如脊形波导、条形波导等实际可以制作的光波导,皆可使用等效折射率方法将二维问题转化为一维情况进行简便的讨论。由此,本文研究了对称三层平板波导与非对称三层平板波导基模的最小光

斑尺寸问题。从三层平板波导的模场解析解出发,根据光斑尺寸的定义,讨论了波导模式,波导尺寸,波导芯层-包层折射率差,工作波长以及波导非对称性对最小光斑尺寸的影响。

2 基本模型

图 1 为三层平板波导介电常数分布示意图,其中图 1(a)为对称平板波导,图 1(b)为非对称平板波导。

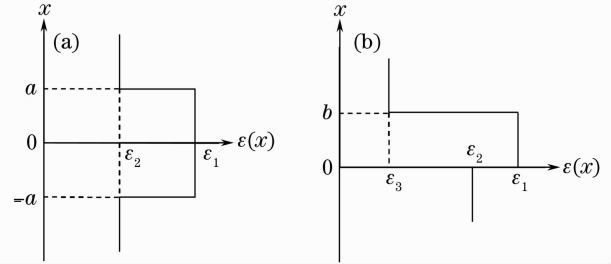


图 1 三层平板波导结构示意图。(a)对称;(b)非对称

Fig. 1 Schematic of three-layer optical waveguide.

(a) symmetric; (b) asymmetric

设波导介质为非磁性电介质,若只考虑基模,三层对称平板波导的导模解^[12]可以写为

$$\psi(x) = \begin{cases} A \cos(\gamma_1 a) \exp[\gamma_2(x+a)] & (-\infty < x \leq -a) \\ A \cos(\gamma_1 x) & (-a \leq x \leq a) \\ A \cos(\gamma_1 a) \exp[-\gamma_2(x-a)] & (a \leq x < \infty) \end{cases}, \quad (1)$$

式中 $\gamma_1 = (k_0^2 \epsilon_1 - \beta^2)^{1/2}$, $\gamma_2 = (\beta^2 - k_0^2 \epsilon_2)^{1/2}$, 并且满足本征方程

$$\gamma_1 a = \arctan T_2, \quad T_2 = \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \right)^{1/2} \frac{\gamma_2}{\gamma_1}, \quad (2)$$

对于 TE 模, $\psi(x) = E_{y0}(x)$, $s = 0$; 对于 TM 模, $\psi(x) = H_{y0}(x)$, $s = 1$ 。

对于非对称三层平板波导,其导模解为

$$\psi(x) = \begin{cases} A \exp(\gamma_2 x) & (-\infty < x \leq 0) \\ A [\cos(\gamma_1 x) + T_2 \sin(\gamma_1 x)] & (0 \leq x \leq b) \\ A [\cos(\gamma_1 b) + T_2 \sin(\gamma_1 b)] \exp[-\gamma_3(x-b)] & (b \leq x < \infty) \end{cases}, \quad (3)$$

式中 $\gamma_1 = (k_0^2 \epsilon_1 - \beta^2)^{1/2}$, $\gamma_2 = (\beta^2 - k_0^2 \epsilon_2)^{1/2}$, $\gamma_3 = (\beta^2 - k_0^2 \epsilon_3)^{1/2}$, 且满足本征方程

$$\gamma_1 b = \arctan T_2 + \arctan T_3, \quad T_2 = \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \right)^{1/2} \frac{\gamma_2}{\gamma_1}, \quad T_3 = \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_3} \right)^{1/2} \frac{\gamma_3}{\gamma_1}, \quad (4)$$

对于 TE 模, $\psi(x) = E_{y0}(x)$, $s = 0$; 对于 TM 模, $\psi(x) = H_{y0}(x)$, $s = 1$ 。

TE 导模和 TM 导模的光强为对应模式的时间平均坡印亭矢量^[13],可以分别表示为^[12]

$$\bar{S}_{z\text{TE}}(x) = \frac{\beta}{2\omega\mu_0} |E_{y0}(x)|^2, \quad (5)$$

$$\bar{S}_{z\text{TM}}(x) = \frac{\beta}{2\omega\epsilon\epsilon_0} |H_{y0}(x)|^2. \quad (6)$$

对于光斑尺寸大小,常采用近场的光斑尺寸进行讨论。关于光斑尺寸的定义较多,采用何种具体的定义,应该取决于具体应用的需要。为不失一般性,采用两种比较常用和简单的定义进行讨论:1)高斯分布近似光斑的定义^[14]:即认为光强下降至中心最大处的 $1/e^2$ 处为光斑边界。2)功率因子定义^[10]:即光斑中心附近包含总功率的 $1 - e^{-2}$ 的范围为光斑区域。

为便于讨论,规定对称三层平板波导光斑尺寸的半宽度为 w ,非对称平板波导光斑的两个半宽度分别为 w_1 和 w_2 ,光斑整个宽度为 d ,即对于对称三层平板波导 $d = 2w$,对于非对称平板波导 $d = w_1 + w_2$ 。

3 最小光斑尺寸

3.1 对称平板波导

按前述两种光斑定义,容易证明最小光斑的边界总是在芯区以外包层中的。且按第一种光斑尺寸的定义,TE 模光斑半宽度可以表达为

$$w_{\text{TE}} = \frac{1 + \ln[\cos(\gamma_1 a)]}{\gamma_2} + a, \quad (7)$$

利用本征方程(2)式,且令 $\Delta = n_1^2 - n_2^2$, $\xi = n_1^2 - N^2$, $N^2 - n_2^2 = \Delta - \xi$, 则有

$$w_{\text{TE}} = \frac{1 + \ln\left\{\cos\left[\arctan\left(\frac{\Delta - \xi}{\xi}\right)^{1/2}\right]\right\}}{k_0(\Delta - \xi)^{1/2}} + \frac{\arctan\left(\frac{\Delta - \xi}{\xi}\right)^{1/2}}{k_0(\xi)^{1/2}}, \quad (8)$$

令 $\frac{dw_{\text{TE}}}{d\xi} = 0$, 得到最小光斑处波导有效折射率条件为

$$\left(\frac{\Delta - \xi}{\xi}\right)^{-3/2} \left\{1 + \ln\left[\cos\left[\arctan\left(\frac{\Delta - \xi}{\xi}\right)^{1/2}\right]\right]\right\} - \arctan\left(\frac{\Delta - \xi}{\xi}\right)^{1/2} = 0, \quad (9)$$

又令 $\eta = \left(\frac{\Delta - \xi}{\xi}\right)^{1/2}$, 可将上述超越方程化简为

$$\eta^{-3} \{1 + \ln[\cos(\arctan \eta)]\} - \arctan \eta = 0, \quad (10)$$

其数值解为 $\eta_0 = 0.9588$, 对应的 $\xi = \frac{\Delta}{1.92}$, 代入(8)

式得最小光斑半宽度

$$w_{\text{TE}} = \frac{2.0328}{k_0 \sqrt{\Delta}}, \quad (11)$$

相应的波导芯半宽度条件为

$$a_{\text{TE}} = \frac{1.0591}{k_0 \sqrt{\Delta}}, \quad (12)$$

若按 $1 - e^{-2}$ 功率因子的定义,光斑尺寸表示为

$$w_{\text{TE}} = a + \frac{1 - \frac{1}{2} \ln\left[\frac{\alpha \gamma_2}{\cos^2(\gamma_1 a)} + \frac{\gamma_2}{\gamma_1} \tan(\gamma_1 a) + 1\right]}{\gamma_2}, \quad (13)$$

类似于第一种光斑尺寸定义,利用本征方程可以得到最小光斑时的波导等效折射率条件为

$$\arctan \eta + \eta^{-1} - \eta^{-3} + \frac{1}{2} \eta^{-3} \ln[\eta \arctan \eta \arccos^2(\arctan \eta) + \eta^2 + 1] - \frac{\left[\frac{1}{2} \eta^{-1} (\eta^2 + 1) \arctan \eta \arccos^2(\arctan \eta) + (\eta^2 + 1)\right] + \frac{1}{2} \arccos^2(\arctan \eta) (1 + 2 \arctan \eta)}{\eta [\eta \arctan \eta \arccos^2(\arctan \eta) + \eta^2 + 1]} = 0, \quad (14)$$

其数值解为 $\eta_0 = 1.1043$, 对应的 $\xi = \Delta/2.22$, 故最小光斑的半宽度为

$$w_{\text{TE}} = \frac{1.6144}{k_0 \sqrt{\Delta}}, \quad (15)$$

相应波导芯半宽度条件为

$$a_{\text{TE}} = \frac{1.2438}{k_0 \sqrt{\Delta}}, \quad (16)$$

由(11)式,(12)式,(15)式,(16)式可知,两种定义条件下最小光斑尺寸和相应的波导厚度条件皆具有

$w_{\text{TE}} = \frac{c_1}{k_0 \sqrt{\Delta}}$ 和 $a_{\text{TE}} = \frac{c_2}{k_0 \sqrt{\Delta}}$ 相同的形式,不同的光

斑尺寸定义具有不同的常系数 c_1 和 c_2 。第一种光斑定义下的 TE 模光斑尺寸大于第二种光斑定义对应值,但其对应的波导宽度条件却小于第二种定义相应值。同时由(12)式和(16)式可以看到,最小光斑

处的波导芯厚度小于波导单模条件波导芯厚度

$\frac{1.57}{k_0 \sqrt{\Delta}}$, 即是工作在单模状态的。

对于对称三层平板波导 TM 模的光斑分布,由于时间平均坡印亭矢量表示的光强在波导芯/包层界面处不连续,使得包层中光强可能比芯区光强更大。特别是在折射率差较大的情形,这时界面处包层中光强远大于芯区中心最大光强,因 TM 模的光斑尺寸将比 TE 模的光斑尺寸要大。若考虑 TM 模的光斑边界出现在包层中,则其大小可表示为

$$w_{\text{TM}} = \frac{1 + \ln[(n_1/n_2) \cos(\gamma_1 a)]}{\gamma_2} + a, \quad (17)$$

利用 TM 模本征方程并令 $\alpha = n_1^2/n_2^2$, $\beta = N^2/n_2^2$, 光斑尺寸可以写成以下形式:

$$w_{TM} = \frac{1}{k_0 n_2} \left\{ \frac{\arctan \left[\alpha \left(\frac{\beta - 1}{\alpha - \beta} \right)^{1/2} \right]}{(\alpha - \beta)^{1/2}} + \frac{\ln \alpha^{1/2} + \ln \left\{ \cos \left[\arctan \left[\alpha \left(\frac{\beta - 1}{\alpha - \beta} \right)^{1/2} \right] \right\} + 1}{(\beta - 1)^{1/2}} \right\}, \quad (18)$$

令 $dw_{TM}/d\beta=0$, 可以得到最小光斑的波导等效折射率条件。与 TE 模不同的是, TM 模最小光斑条件式中两个参数 α 和 β 不具有简单的线性关系, 但其对应关系由它们唯一确定。图 2 是 TM 模的最小光斑尺寸随介电系数的变化关系, 为便于比较, 图中同时画出了以 α 为参数的 TE 模最小光斑尺寸关系。由图可知, 同样波导折射率分布条件下, TE 模的最小光斑尺寸小于 TM 模的值。

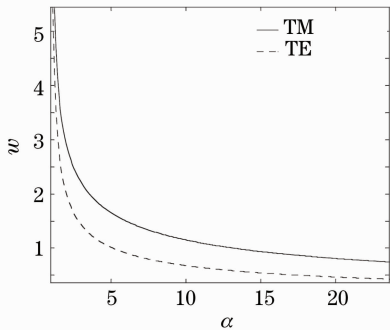


图 2 TM 模与 TE 模的光最小光斑尺寸的比较(定义 1)
Fig. 2 MMSS of TM and TE modes as α varies
(Gauss definition)

同理, 若采用功率因子定义, 最小光斑尺寸可以表示为

$$w_{TM} = a + \frac{1 - \frac{1}{2} \ln \left[\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \frac{a\gamma_2}{\cos^2(\gamma_1 a)} + \left(\frac{\gamma_2}{\gamma_1} \right)^2 + 1 \right]}{\gamma_2}, \quad (19)$$

同样, 若上式中令 $\alpha = n_1^2/n_2^2, \beta = N^2/n_2^2$, 且令 $dw_{TM}/d\beta = 0$, 可以得到功率因子定义时最小光斑的波导有效折射率条件。图 3 给出了功率因子定义下的最小光斑尺寸随介电系数比率的变化, 图中同时画出了功率因子定义时 TE 模的最小光斑随波导介电系数比率的变化关系。在介电系数比率较小(弱导)时, TE 模和 TM 模的差异较小。随着介电系数比率增大其差值逐渐增加, 它们的最小光斑尺寸都随着介电系数比率的增大而不断减小。

在上述两种光斑尺寸定义下, TM 模最小光斑条件式中两个参数不具有简单的线性关系, 其最小光斑尺寸依赖于波导具体的介电系数大小, 同样介电系数比率条件下包层折射率大的光斑尺寸更小。

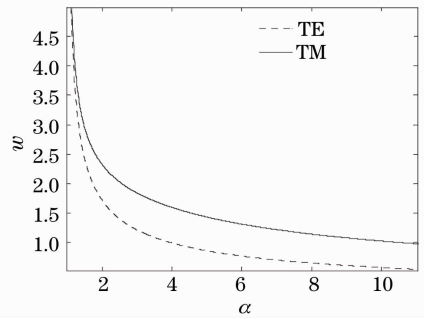


图 3 TM 模与 TE 模的光最小光斑的比较(定义 2)
Fig. 3 MMSS of TM and TE modes as α varies
(power definition)

在介电系数差较小的情况下, TE 模和 TM 模近乎简并^[12], 因而它们的最小光斑尺寸相差很小。随着介电系数差的增大, TM 模的最小光斑尺寸远大于 TE 模的值, 这是由于在折射率差较大的情况下, 由(6)式表示的 TM 模光强在波导界面处的不连续性, 使得包层中波导边界附近光强较之芯区光强更大, 因而光斑向包层扩散。值得注意的是, 图 3 与图 4 中横纵坐标均为无量纲量, 因而通过 TE 模最小光斑尺寸计算(11)式, (12)式, (15)式, (16)式以及不同 α 下 TE 模和 TM 模最小光斑尺寸的差, 并由 n_2 的值可以计算出 TM 模的最小光斑尺寸。

3.2 非对称三层平板波导

由于波导结构的非对称性, 非对称三层平板波导最小光斑的形貌也呈现出不对称性。为简单起见, 这里仅讨论其 TE 模的最小光斑, 关于 TM 模的最小光斑可以作类似讨论。

考虑到波导的非对称性, 可见取光强为中心最大值 $1/e^2$ 处为光斑边界更为方便, 因此仅采用第一种光斑尺寸定义进行讨论。图 4 是非对称三层平板波导光斑尺寸随波导芯厚度的变化。图中同时也给

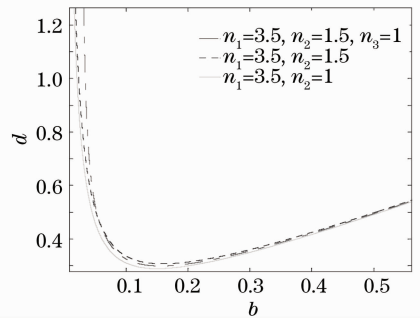


图 4 非对称三层平板波导中光斑尺寸随波导尺寸的变化

Fig. 4 Spot size of an asymmetric three-layer flat waveguide as the core width varies

出了相应两个具有同样芯区折射率的对称三层平板波导的光斑尺寸关系,它们的包层折射率分别为非对称波导中两个包层折射率。从图中可以看到,在远离截止时,非对称平板波导的光斑尺寸是位于这两个对称波导对应的光斑尺寸之间的。但是在近截止处,由于非对称波导存在零阶截止厚度,其光斑尺寸不再位于两个对称平板波导光斑尺寸的范围,随着芯区厚度减小将迅速增大,超过包层折射率较大的对称平板波导的光斑尺寸。

在单模情况下,设光斑在中心某处 x_{max} 具有最大光强,由模场解可得

$$x_{max} = \frac{\arctan T_2}{\gamma_1} = \frac{\arctan[(\frac{\Delta - \xi}{\xi})^{1/2}]}{k_0(\xi)^{1/2}}. \quad (20)$$

由光斑尺寸的定义且同第 3.1 节中讨论类似,考虑最小光斑边界位于波导包层中,由光斑尺寸的定义其大小可以表示为

$$d_{TE} = b + \frac{1}{\gamma_3} \ln \left\{ \frac{e[\cos(\gamma_1 b) + T_2 \sin(\gamma_1 b)]}{[\cos(\arctan T_2) + T_2 \sin(\arctan T_2)]} \right\} + \frac{1}{\gamma_2} \ln \left\{ \frac{e}{[\cos(\arctan T_2) + T_2 \sin(\arctan T_2)]} \right\}. \quad (21)$$

利用本征方程(4)式,并令 $\Delta = n_1^2 - n_2^2, \delta =$

$n_2^2 - n_3^2, \xi = n_1^2 - N^2, N^2 - n_2^2 = \Delta - \xi$, 则非对称三层平板波导的最小光斑有效折射率条件为

$$\frac{\partial d_{TE}}{\partial \xi} = 0. \quad (22)$$

对(22)式求导可以得到最小光斑的波导有效折射率条件的超越方程。通过数值求解可以得到 Δ, δ, ξ 之间的关系,将其代入(21)式可得到最小光斑随 Δ, δ 的变化关系。图 5 是非对称三层平板波导中最小光斑尺寸随介电系数差 Δ [图 5(a)]和非对称因子 δ [图 5(b)]的变化关系,随着折射率差的增大,光斑尺寸不断减小;但在一定的介电系数差值条件下,最小光斑尺寸随着非对称性的增大先减小后增大图 5(b)。由于非对称性的增大使得电磁场在折射率较小一侧包层中衰减速度增大,光斑尺寸减小,但同时使得截止厚度增加。进一步增大非对称性因子 δ 使得非对称三层平板波导的截止厚度增加幅度远超过穿透深度的减小,使得最小光斑的尺寸增加。图 6 给出了非对称三层平板波导能够达到的最小光斑尺寸随介电系数差值的变化关系。从图中可以看到,通过合理的选择非对称因子,非对称波导的最小光斑尺寸可以小于对应对称平板波导最小光斑尺寸一定的数值。

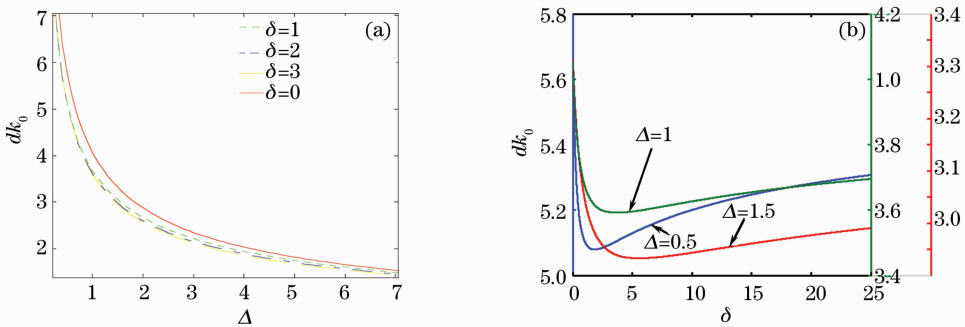


图 5 非对称波导 TE 模最小光斑尺寸与 Δ (a)和 δ (b)的关系

Fig. 5 MMSS of TE mode of an asymmetric waveguide as the Δ (a) and δ (b) varies

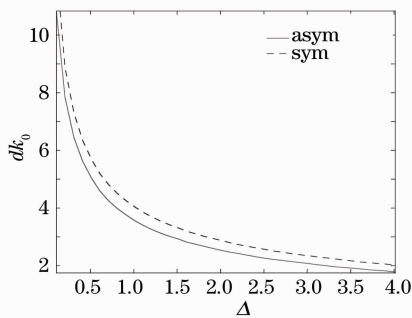


图 6 非对称和对称波导 TE 模最小光斑的比较

Fig. 6 MMSS of TE modes of symmetric and asymmetric waveguides as the index contrast varies

4 讨 论

从对称三层平板波导的最小光斑尺寸及其对应的波导条件(11)式,(12)式,(15)式,(16)式可知,TE 模最小光斑尺寸在特定工作波长下最小光斑尺寸仅取决于介电系数相对差值 Δ ,与波导芯层和包层介电系数的具体数值无关。由于 TM 模光强在波导界面的不连续性,其最小光斑尺寸取决于波导芯区和包层的介电系数的具体数值,且大于 TE 模的最小光斑尺寸。值得注意的是,TE 模和 TM 模的最小光斑的波导条件并不一定相同,而且不同光斑尺寸定义下波导条件具有更大的差别,这需要根

据具体的需要进行考虑。

由(11)式,(12)式,(15)式,(16)式决定的最小光斑尺寸,与从光电磁波本身的量子性导出的结果是一致的。海森伯测不准原理给出了粒子动量和位置坐标的不确定性需满足 $\Delta p \Delta x \geq \hbar/2$, Takahara 等^[15]认为光波导能限制的最小光束宽度由下述极限决定:

$$d \approx \frac{\lambda_0}{2n_{\text{core}}}, \quad (23)$$

式中 λ_0 为真空中波长, n_{core} 为波导芯区的折射率。我们认为这仅是在波导芯区折射率远远大于包层折射率时的极限。即由(11)式有

$$d_{\text{TE}} = \frac{2 \times 2.0328}{k_0 \sqrt{\Delta}} = \frac{2.0328\lambda_0}{\pi \sqrt{n_{\text{core}}^2 - n_{\text{clad}}^2}}, \quad (24)$$

(24)式仅当 $n_{\text{core}} \gg n_{\text{clad}}$ 时为 $\lambda_0/n_{\text{core}}$ 量级。应当指出,(23)式应该是谐振腔中的最小模斑尺寸。实际上,对于光波导,由(11)式及(12)式可以看到,在最小光斑尺寸时,模场的很大一部分是以倏逝波的形式分布在波导包层中的,波矢的横向分量需要满足以下条件:

$$\beta^2 + k_x^2 = n_1^2 k_0^2, \quad (25a)$$

$$\beta^2 - \gamma_2^2 = n_2^2 k_0^2, \quad (25b)$$

只有在芯区折射率相对于包层折射率很大时,(25b)式中 γ_2 较大,这时倏逝波的部分几乎为零,光子全部被限制在波导芯区当中。由(25a)式知,对于基模,其 x 方向的波矢分量 k_x 比高阶模的更小,因而总是有

$$k_x \ll n_1 k_0 = \frac{2\pi n_1}{\lambda_0}, \quad (26)$$

因而由海森伯不确定性关系给出的最小光束尺寸可以表示为 $d \gg \frac{\lambda_0}{2n_{\text{core}}}$ 。在一维情况下 TE 模最小光斑应由(11)式给出,即

$$d_{\text{TE}} = \frac{2c_1}{k_0 \sqrt{\Delta}} = \frac{c_1 \lambda_0}{\pi \sqrt{\Delta}}, \quad (27)$$

当然上式中常数 c_1 依赖于光斑尺寸的定义。

当光波导尺寸减小到亚微米尺度下时,光波导传输特性会出现一些新的特点,诸如损耗、偏振、单模条件等都发生了相应的变化,在实际应用中需要综合考虑这些问题。如果单从集成密度这个角度考虑,为了避免阵列波导区或是平行布线区波导之间的串扰,首先将面临的两个问题是:1)光波导究竟可以缩小到多小;2)光波导可以实现多大密度的集成。严格分析此类问题需要使用耦合模理论,然而作为简单的估计,可以将上述问题归结到研究波导光斑

的尺寸以及最小光斑尺寸问题。根据耦合模理论,两平行平板波导间耦合系数由下式给出^[12]:

$$K = \frac{\omega \epsilon_0}{4} (n_1^2 - n_2^2) \int_{\Sigma} E_{1y}^*(x) E_{2y}(x) dx, \quad (28)$$

(28)式积分区间为波导芯区。如果以第一种定义下最小光斑尺寸作为波导芯区之间的间隔,这时可以认为波导 1 的模场在波导 2 芯区中的作用非常微弱以至于接近于零,(28)式中的耦合系数很小,因此对应的耦合长度非常大。

例如,在 1.55 μm 工作波长条件下,硅的折射率为 3.5,如果考虑 TE 模的情况,由(11)式及(12)式可知由空气构成包层的硅波导三层平板的最小光斑尺寸为 299 nm,对应硅芯层厚度为 156 nm,因而可以达到的集成密度为每微米线宽 3 个芯厚度为 150 nm 左右的波导。当然,制作如此小的波导增加了工艺上的难度,同时由于光场很大部分是分布在包层中的,因而波导界面处由于粗糙引起的散射损耗较大。但由于最小光斑处光斑尺寸对波导芯厚度一阶导数为零,因而可以在一定程度上减轻由于沿光传播方向波导尺寸不均匀带来的光斑尺寸变化的影响。

5 结 论

对称三层平板波导中基模光斑是对称分布的,在远离截止区,TE 模光斑尺寸随波导芯厚度的增大而增大,在近截止区,光斑尺寸呈指数急剧上升,在这两者之间光斑尺寸存在最小值。其 TE 模的最小光斑尺寸与介电系数差值的平方根成反比,与工作波长成正比,特定工作波长下最小光斑尺寸仅决定于介电系数的差值,与具体折射率大小无关。由于光强在波导界面处的不连续性,其 TM 模的最小光斑尺寸依赖于波导包层和芯层的具体折射率大小,与工作波长成正比。非对称三层平板波导中,由于模场的非对称性,其光斑也是非对称的。其 TE 模的最小光斑尺寸小于以介电系数较大的包层作为包层的对称平板波导最小光斑尺寸值,与工作波长成正比,固定波长下最小光斑尺寸仅取决于介电系数差值和非对称因子,通过调整非对称因子可以将光斑尺寸减至最小。由麦克斯韦方程给出的三层平板波导最小光斑尺寸与测不准关系的导出的结果一致,采用最小光斑计算公式粗略估计出阵列波导最密集度的相关参数。

参 考 文 献

- chips [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2009, **97**(7): 1166~1185
- 2 C. Manolatu, S. G. Johnson, S. Fan *et al.*. High-density integrated optics [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(9): 1682~1692
- 3 W. L. Barnes, A. Dereux, T. W. Ebbesen. Surface plasmon subwavelength optics [J]. *Nature*, 2003, **424**(6950): 824~830
- 4 P. Berini. Long-range surface plasmon polaritons [J]. *Adv. Opt. Photon.*, 2009, **1**(3): 484~588
- 5 Chen Libai, Guo Zhenning, Lin Jieben. Study on application of one-dimensional photonic crystal microcavity to luminescence of silicon-based material [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1793~1797
- 陈丽白, 郭震宁, 林介本. 一维光子晶体微腔在硅基材料发光中的应用研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1793~1797
- 6 Liu Guiqiang, Liao Yubo, Liu Zhongmin. Fabrication and transmittance spectra of high quality three-dimensional photonic crystals [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2400~2403
- 刘桂强, 廖昱博, 刘忠民. 高质量三维光子晶体的制备及其透射谱研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 2400~2403
- 7 Wang Jizhou, Xiong Yuqing, Wang Duoshu *et al.*. Filtering characteristics and application of defect mode of one-dimensional photonic crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2914~2919
- 王济洲, 熊玉卿, 王多书等. 一维光子晶体缺陷模的滤波特性及应用研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(10): 2914~2919
- 8 Yan Haitao, Wang Ming, Ge Yixian *et al.*. Fabrication of FCC structure colloidal photonic crystals and characteration of band gap measured [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2905~2908
- 闫海涛, 王 鸣, 葛益娴等. FCC 结构胶体光子晶体的制备及其带隙特性测量[J]. *光学学报*, 2009, **29**(10): 2905~2908
- 9 Chen Shuwen, Zhu Guixin, Yu Tianbao *et al.*. 1×3 Beam splitter based on photonic crystal waveguides directional coupler [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2898~2904
- 陈淑文, 朱桂新, 于天宝等. 光子晶体波导定向耦合型 1×3 光分束器[J]. *光学学报*, 2009, **29**(10): 2898~2904
- 10 L. Tong, J. Lou, E. Mazur. Single-mode guiding properties of subwavelength-diameter silica and silicon wire waveguides [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(6): 1025~1035
- 11 D. M. Liu. *Fiber Optics* [M]. Beijing: Science Press, 2008. 101~102
- 刘德明. *光纤光学* [M]. 北京: 科学出版社, 2008. 101~102
- 12 C. S. Ma, S. Y. Liu. *Theory of Optical Waveguide Modes* [M]. Changchun: Jilin University Press, 2007. 36~37
- 马春生, 刘式墉. *光波导模式理论* [M]. 长春: 吉林大学出版社, 2007. 36~37
- 13 Chen Jun. *Theory of Optical Electromagnetism* [M]. Beijing: Science Press, 2005. 51~52
- 陈 军. *光学电磁理论* [M]. 北京: 科学出版社, 2005. 51~52
- 14 G. T. Reed, A. P. Knights. *Silicon Photonics: An Introduction* [M]. Chichester: John Wiley, 2004. 52~53
- 15 J. Takahara, S. Yamagishi, H. Taki. Guiding of a one-dimensional optical beam with nanometer diameter [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(7): 475~477