

doi:10.3788/gzxb20134203.0303

两介质波导的最小中心间距

汪明燕¹, 孙一翎², 张旭琳²

(1 丽水学院 计算机与信息工程学院, 浙江 丽水 323000)

(2 深圳大学 电子科学与技术学院 深圳市微纳光子信息技术重点实验室, 广东 深圳 518060)

摘 要:根据波导的耦合模理论,推导出两介质波导单位长度串扰的表达式,并在一定串扰的前提下,定义了两介质波导最小间距和最小中心间距,提出采用最小中心间距做为衡量波导集成度的参量.分析了波导尺寸及折射率差对最小间距、最小中心间距的影响.分析和模拟结果表明:折射率差越大,两波导最小间距、最小中心间距越小;在大折射率差的条件下,两波导最小间距可以降低到 $1\ \mu\text{m}$ 以下;在给定的工作波长、折射率分布的条件下,两介质波导的最小中心间距存在最小值.

关键词:波导;最小中心间距;耦合模理论;集成光学

中图分类号:TN256

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2013)03-0303-4

Minimum Center-to-center Separation of Two Dielectric Waveguides

WANG Ming-yan¹, SUN Yi-ling², ZHANG Xu-lin²

(1 College of Computer and Information Engineering, Lishui University, Lishui, Zhejiang 323000, China)

(2 Shenzhen Key Laboratory of Micro-Nano Photonic Information Technology, College of Electronic Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China)

Abstract: Based on the coupled mode theory, analytical expression of crosstalk per unit length between two dielectric waveguides is derived. The minimum separation and center-to-center separation of two dielectric waveguides under certain crosstalk are defined. The minimum center-to-center separation serves as a measure of waveguide integration. The influences of waveguide size and refractive index difference on the minimum center-to-center separation are investigated. The analysis and simulation results indicate that strongly confined waveguides have small minimum separation and center-to-center separation. Under the condition of large refractive index difference, the minimum separation can be reduced to less than $1\ \mu\text{m}$. The minimum center-to-center separation has a minimum value for given wavelength and refractive index distribution.

Key words: Waveguide; Minimum center-to-center separation; Coupled mode theory; Integrated optics

0 引言

微纳加工技术的不断进步,推动集成光学^[1-3]向微型化和高密度集成化方向发展.但与更为成熟的集成电路相比,集成光学器件的尺寸和集成度问题一直阻碍着集成光学的发展.为了进一步提高集成光学器件的集成度,人们提出了各种研究方案,其中最有代表性的有:基于表面等离子体激元的集成光学器件^[4]及光子晶体光波导器件^[5].金属纳米结构

中的表面等离子体激元具有光场局域效应,利用表面等离子体激元可以将光场限制在远小于光波长的横截面内.但是在光频段,表面等离子体激元波导无法避免定向运动的自由电子与晶格相互作用过程中的能量损失,即欧姆损耗,从而引起严重的信号衰减和热量产生等问题,传输距离一般只有微米量级,在光波导器件方面的应用受限.

虽然利用光子晶体线缺陷形成的光子晶体波导具有优越的光子局域化性能,如可以实现任意弯曲

基金项目:国家自然科学基金青年基金(No. 61108053)和深圳市微纳光子信息技术重点实验室开放基金(No. MN201113)资助

第一作者:汪明燕(1978-),女,讲师,主要研究方向为集成光学. Email:wmy@ls0578.net

导师(通讯作者):孙一翎(1972-),女,教授,主要研究方向为集成光波导器件. Email:sunyl@szu.edu.cn

收稿日期:2012-06-25;录用日期:2012-08-22

($>90^\circ$),从而减小集成光路的体积.但光子晶体是利用周期性的谐振结构限制光波传输的,不同于常规介质波导的全反射原理,要获得优良的光子晶体特性,构成光子晶体的周期数不能太少(严格意义上需要 10 个以上周期),因此利用光子晶体波导构成的光子器件的总体尺寸不可能很小^[6].

为了将各种功能的集成光学器件高密度地集成在一起,就要将器件做得足够小,并且器件在允许的情况下足够靠拢.传统的介质波导是构成集成光学器件最基本的组成单元,随着波导数量的增多,波导之间的距离以及波导宽度就决定了器件集成度和器件的工作性能.本文借鉴集成电路设计中要求导线间距大于最小间距,提出介质光波导的最小间距及最小中心间距的概念.讨论了折射率差、波导尺寸对最小间距、最小中心间距的影响.

1 两波导最小中心间距

两根相互平行、彼此靠近的光波导由于倏逝波相互交迭,存在相互耦合作用,从而直接影响两平行波导可靠近的距离,即存在串扰问题.如图 1 所示,

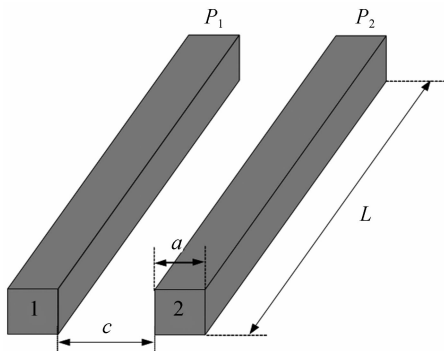


图 1 两平行波导示意图

Fig. 1 Schematic diagram of two parallel waveguides

两相同的介质正方形波导, c 为两波导的间距, a 为两波导和高度,两波导芯区和包层的折射率分别为 n_1 和 n_2 .设光波从波导 1 输入,经过长度为 L 的距离后,一部分光耦合到波导 2 中.根据耦合模理论^[7],两平行介质波导的输出光强比,即串扰为

$$P_2/P_1 = \tan^2(K_c L) \quad (1)$$

式中 K_c 为两波导耦合系数,而两波导输出光强比是长度的函数,所以定义 R 为两平行介质波导单位长度串扰

$$R = \frac{P_2}{P_1} \frac{1}{L} = \tan^2(K_c L)/L \quad (2)$$

对于准 TE 模,耦合系数近似公式为^[8]

$$K_c = \frac{2p_x k_x^2}{\beta(a+2/p_x)(p_x^2+k_x^2)} \exp(-cp_x) \quad (3)$$

式中

$$\begin{aligned} k_x a &= m\pi - 2\arctan(k_x/p_x) \\ k_y a &= n\pi - 2\arctan(n_2^2 k_y/n_1^2 p_y) \\ \beta &= (k_0^2 n_1^2 - k_x^2 - k_y^2)^{1/2} \end{aligned} \quad (4)$$

$$p_x = \sqrt{k_0^2 n_1^2 - k_0^2 n_2^2 - k_x^2}$$

$$p_y = \sqrt{k_0^2 n_1^2 - k_0^2 n_2^2 - k_y^2}$$

将耦合系数的表达式代入式(2),得

$$K_c = \frac{\arctan(\sqrt{RL})}{L} = \frac{2p_x k_x^2}{\beta(a+2/p_x)(p_x^2+k_x^2)} \exp(-cp_x) \quad (5)$$

$$\text{令 } A = \frac{2p_x k_x^2}{\beta(a+2/p_x)(p_x^2+k_x^2)}, \text{ 则有}$$

$$\frac{\arctan(\sqrt{RL})}{L} = A \exp(-cp_x) \quad (6)$$

两边取自然对数,得

$$\ln\left(\frac{\arctan(\sqrt{RL})}{L}\right) = \ln(A - cp_x) \quad (7)$$

根据耦合模理论,任意两平行波导都存在耦合,因此只有在约定一定的串扰的前提下,讨论两波导之间最小间距、最小中心间距才有意义.定义一个最小间距 c_{\min} ,当间距等于最小间距时,经过 1 cm 的传输,有 9% 的光强从输入波导转化到另一波导,对应的串扰为 $P_2/P_1 = 9\%/91\% \approx 0.1$,单位长度串扰为 0.1 cm^{-1} ,即 $10 \text{ dB} \cdot \text{cm}^{-1}$.因此根据耦合模理论,当间距大于最小间距,所对应的单位长度串扰小于 $10 \text{ dB} \cdot \text{cm}^{-1}$.将长度 $L = 1 \text{ cm}$ 及单位长度串扰 0.1 cm^{-1} 代入式(7)中,解得最小间距 c_{\min}

$$c_{\min} = \frac{\ln A - \ln(0.00003)}{p_x} = \frac{\ln A + 10.4}{p_x} \quad (8)$$

用两波导最小中心间距来考察集成度,最小中心间距与最小间距的关系为

$$\text{space} = a + c_{\min} \quad (9)$$

两介质波导最小中心间距越小,波导的集成度就越高.

2 分析与讨论

2.1 折射率差对最小中心间距的影响

先考虑弱限制波导,设工作波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 时,包层折射率为 1.45,波导宽度为 $5 \mu\text{m}$.保持波导宽度、包层折射率不变,改变折射率差,即芯层折射率发生改变.折射率差增大,耦合系数减小,串扰减小,最小间距减小,如图 2(a).由于波导宽度 a 保持不变,最小中心间距 space 跟最小间距 c_{\min} 变化规律一致.以氧化硅波导为例,工作波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 时,其包层折射率为 1.45,芯层折射率为 1.457,最小间距为 $14.78 \mu\text{m}$,对应的两波导最小中心间距为 $19.78 \mu\text{m}$.

再考虑强限制波导, 设工作波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 时, 包层折射率为 1.45, 波导宽度为 400 nm . 保持波导宽度、包层折射率不变, 改变折射率差. 折射率差增大, 串扰减小, 最小间距减小, 如图 2(b). 以硅波导为例, 工作波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 时, 其包层折射率为 1.45, 芯层折射率为 3.45, 最小间距为 $1.0 \mu\text{m}$, 对应的两波导最小中心间距为 $1.4 \mu\text{m}$, 若折射率差增加到 3, 两波导最小中心间距可减少到 $1.1 \mu\text{m}$. 强限制波导的最小中心间距比上述弱限制波导的最小中心间距小一个数量级.

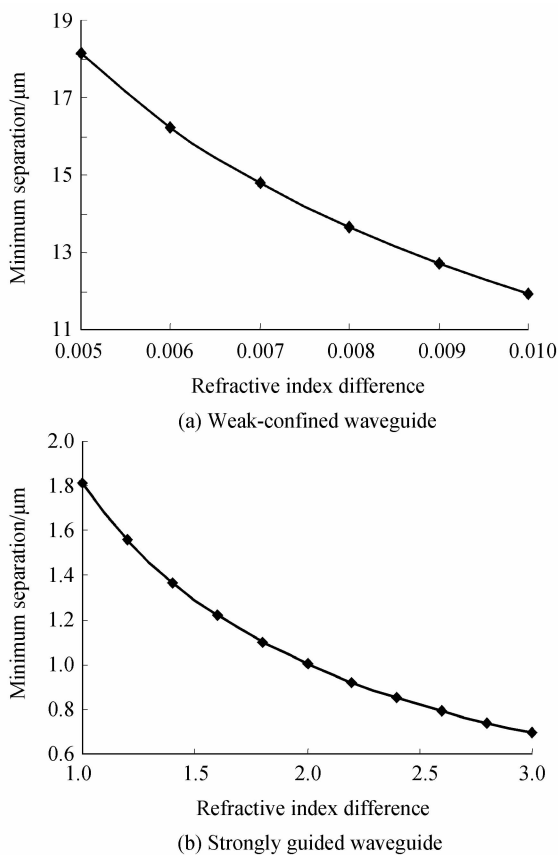


图 2 弱强限制波导、折射率差对最小间距的影响
Fig. 2 The minimum separation of weak-confined and strongly guided waveguides at different refractive index differences

2.2 波导宽度对最小中心间距的影响

对弱限制波导, 保持芯层折射率 1.457、包层折射率 1.45 不变, 改变波导宽度, 波导宽度增大, 最小间距单调递减. 但两波导最小中心间距先减小, 再增大, 当波导宽度达到 $6.5 \mu\text{m}$ 时, 两波导最小中心间距达到最小值 $19.5 \mu\text{m}$, 如图 3(a).

同样对强限制波导, 保持芯层折射率 3.45、包层折射率 1.45 不变, 改变波导宽度, 波导宽度增大, 最小间距单调递减. 但两波导最小中心间距先减小, 再增大, 当波导宽度达到 400 nm 时, 两波导最小中心间距达到最小值 $1.4 \mu\text{m}$, 如图 3(b). 文献[9]中传统的长程表面等离子体激元波导最小中心间距

$2.8 \mu\text{m}$, 对称混合型等离子激元波导最小中心间距 $2.8 \mu\text{m}$. 可见, 采用传统的强限制介质光波导集成度上有明显的优势.

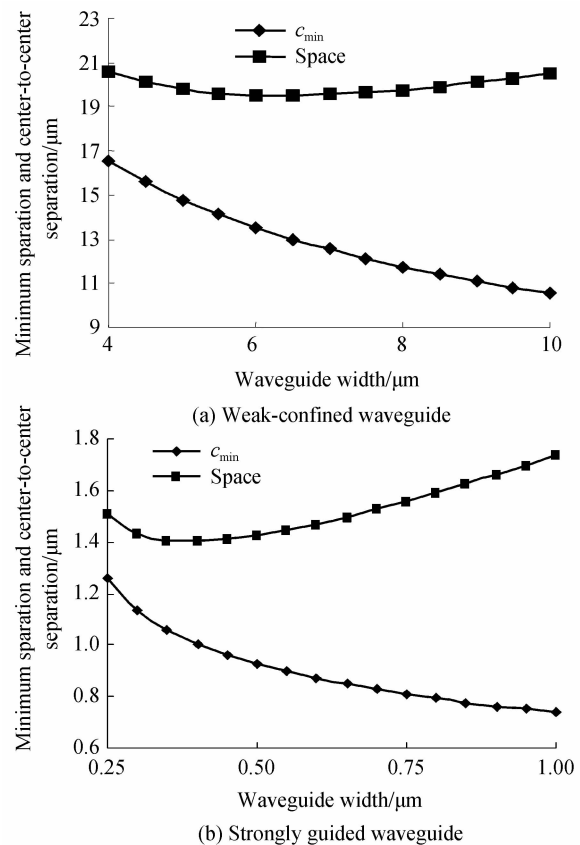


图 3 弱强限制波导、波导宽度对最小间距、最小中心间距的影响

Fig. 3 The minimum separation and center-to-center separation of weak-confined and strongly guided waveguides as a function of waveguide width

以上分析表明: 无论是强限制波导还是弱限制波导, 折射率差和波导宽度都是影响最小间距和最小中心间距的关键因素. 折射率差越大, 波导对光的限制作用越好, 在相同串扰条件下, 相邻两波导的间距越小, 可以实现更高密度的集成.

当工作波长、折射率分布一定的情况下, 随着波导宽度的增大, 最小间距单调减小, 而最小中心间距存在一个最小值. 这一现象可以通过最小光斑来解释. 文献[10]中对应一定的工作波长、折射率分布的平板波导的光斑尺寸随波导宽度变化, 存在一个最小光斑. 光斑的定义跟光强分布有关, 而耦合是通过倏逝波进行的, 耦合强弱直接跟倏逝波场分布有关. 所以光斑的最小值对应最小中心间距的最小值. 利用文献[10]中的最小光斑的第一种定义, 求得在包层折射率 1.45, 芯层折射率 3.45 的条件下, 有效折射率为 2.607 4 时, TE 模光斑半宽度达到最小值. 该有效折射率对应的波导宽度为 $0.4 \mu\text{m}$, 和图 3(b) 中两波导最小中心间距取到最小值所对应的波

导宽度一致。

3 结论

根据光波的衍射理论和波导耦合模理论,只要有足够长的传输距离,任意间隔的两平行波导都存在相互耦合,因此在讨论两介质波导之间的最小中心间距(或集成度),只有先定义描述互相耦合的物理量(如串扰)才有意义.根据文中的分析,两介质波导间最小中心间距与波导的折射率差、尺寸有关.折射率差越大,两波导间的最小间距越小,两波导最小间距可以降低到 $1\ \mu\text{m}$ 以下;在一定的串扰前提和给定的工作波长、折射率分布的条件下,两平行介质波导的最小中心间距存在一个最小值.

虽然表面等离子体激元波导具有常规超衍射极限的约束能力,但传输损耗太大,在综合考虑到尺寸和传输损耗与距离等因素,传统的介质光波导在集成度上比表面等离子体激元波导、光子晶体波导更有优势,而且制作更为简单、方便.

参考文献

- [1] LI Guo-yi, WEI Yu-xin, ZHOU Qiang, *et al.* Analysis of Polarization-independent optical directional coupler based on slot waveguides for long-wave infrared[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(10): 1603-1606.
李国熠,魏玉欣,周强,等. 基于 slot 波导的硅基长波红外偏振无关定向耦合器分析[J]. 光子学报, 2011, **40**(10): 1603-1606.
- [2] DAI Dao-xin, HE Sai-ling. A silicon-based hybrid plasmonic waveguide with a metal cap for a nano-scale light confinement [J]. *Optics Express*, 2009, **17**(19): 16646-16653.
- [3] WANG Hui, ZHANG Feng, LIU Tian-ji, *et al.* Embedded waveguide thermo-optic switch based on novel organic-inorganic hybrid material[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(9): 1303-1306.
王辉,张峰,刘天际,等. 有机/无机复合功能材料倒脊型波导热光开关[J]. 光子学报, 2011, **40**(9): 1303-1306.
- [4] NIKOLAJSEN T, LEOSSEON K. Surface plasmon polariton based modulators and switches operating at telecom wavelengths[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, **85**(24): 5833-5835.
- [5] GUO Hao, FANG Li-guang, WU Xiao-hua, *et al.* Heterostructure ultracompact multiway beam splitter using photonic crystal ring resonator [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(7): 1198-1202.
郭浩,方利广,吴小华,等. 光子晶体环形谐振腔异质结构超微多路光分束器[J]. 光子学报, 2010, **39**(7): 1198-1202.
- [6] KURT H. Bend-free optical power transfer using photonic crystal waveguide arrays [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, **27**(10): 1402-1407.
- [7] YARIV A. Coupled-mode theory for guided-wave optics[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1973, **QE-9**(9): 919-933.
- [8] MARCATILI E A J. Dielectric rectangular waveguide and directional coupler for integrated optics [J]. *Bell System Technical Journal*, 1969, **48**: 2071-2102.
- [9] BIAN Yu-sheng, ZHENG Zheng, ZHAO Xin, *et al.* Symmetric hybrid surface plasmon polariton waveguides for 3D photonic integration [J]. *Optics Express*, 2009, **17**(23): 21320-21325.
- [10] YU Ping, JIANG Xiao-qing, YANG Jian-yi, *et al.* Minimum mode spot size in a three-layer dielectric optical waveguide [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(12): 3530-3536.
喻平,江晓清,杨建义,等. 三层介质平板光波导的最小光斑 [J]. 光学学报, 2010, **30**(12): 3530-3536.