

激光与光电子学进展

三维集成光学芯片中波导之间的耦合研究

庄瑞^{1,2}, 洪晶晶^{1,2}, 刘爱萍^{1,2*}, 周兴平^{1,2}, 王琴^{1,2}

¹南京邮电大学量子信息技术研究所, 江苏 南京 210003;

²南京邮电大学宽带无线与传感网技术教育部重点实验室, 江苏 南京 210003

摘要 为了实现高集成度和高稳定性的三维光学芯片, 必须对三维空间波导的耦合特性进行系统研究。本文主要研究三维集成光学芯片中波导之间的耦合问题。通过全波仿真的方法数值模拟波导阵列在不同架构下的电场分布, 并分析平行波导间和交叉波导间的耦合效率与波导间距、周围介质折射率、工作波长和夹角之间的关系。在平行波导中, 当两个 SiO₂ 基片上波导之间的中心间距为 0.76 μm 和耦合长度为 72.5 μm 时, 垂直方向上波导间的耦合效率达到 0.997。在交叉波导中, 波导之间的耦合效率对波导夹角很敏感, 当夹角大于 10° 时, 波导间不发生耦合, 可以通过调整波导间的夹角来控制波导之间的耦合。

关键词 光学器件; 集成波导; 光学芯片; 耦合效率; 波导模式

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1923001

Coupling Between Waveguides in Three-Dimensional Integrated Optical Chip

Zhuang Rui^{1,2}, Hong Jingjing^{1,2}, Liu Aiping^{1,2*}, Zhou Xingping^{1,2}, Wang Qin^{1,2}

¹*Institute of Quantum Information and Technology, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210003, China;*

²*Key Lab of Broadband Wireless Communication and Sensor Network Technology, Ministry of Education, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210003, China*

Abstract In order to realize a high-integration and high-stability three-dimensional optical chip, it is necessary to systematically study the coupling characteristics of three-dimensional spatial waveguides. This paper mainly studies the coupling between waveguides in three-dimensional integrated optical chips. The electromagnetic field distribution of the waveguide array under different architectures is simulated by full-wave simulation. The coupling efficiency between parallel waveguides and crossed waveguides is analyzed, which is related to and the waveguide spacing, the refractive index of the surrounding medium, the working wavelength and the angle. In parallel waveguides, when the center-to-center spacing between the waveguides on two SiO₂ substrates is 0.76 μm and the coupling length is 72.5 μm, the coupling efficiency between the waveguides in the vertical direction reaches 0.997. In crossed waveguides, the coupling efficiency between the waveguides is very sensitive to the angle between the waveguides. When the angle is greater than 10°, no coupling occurs between the waveguides, so the coupling between the waveguides can be controlled by adjusting the angle between the waveguides.

Key words optical devices; integrated waveguide; optical chip; coupling efficiency; waveguide mode

OCIS codes 230.7370; 200.4650; 130.3120

收稿日期: 2021-01-21; 修回日期: 2021-02-23; 录用日期: 2021-03-03

基金项目: 中国博士后基金(SBH190004)、国家重点研发计划(2018YFA0306400, 2017YFA0304100)、江苏省自然科学基金前沿技术项目(BK20192001)

通信作者: *apliu@njupt.edu.cn

1 引言

随着集成光学的发展,在光学芯片上集成的器件越来越多,而器件之间的耦合和交互问题越来越受到科研人员的重视,其中光学波导之间的耦合问题^[1]在集成光学芯片的设计中占有重要地位。当相邻波导之间的模式发生叠加时,波导内的能量就会相互耦合,耦合效率随着耦合长度和波导间距的改变而改变。Xie 等^[2]提出了一种适用于双极化的硅光子波导超晶格,并对波导的芯宽和排列方式进行了优化选择,使得在特定的波长范围内,相邻波导之间的最大串扰接近 -18 dB 或更小。在平面光学芯片上,除了平行波导,还存在波导交叉^[3-6]的情况,其主要应用于光互连技术^[7-8]。万助军等^[9]对硅基二氧化硅光波导交叉波导的串扰和损耗特性分别进行了实验研究。夏倩等^[10]对多模光波导交叉结构的光传输特性进行理论研究,并采用光束传输法对其传输性能进行仿真,分析了不同阶次模式对交叉多模光波导传输特性的影响。其中,在二维平面光学芯片的基础上制作三维光学芯片将是集成光学的一个发展趋势。孙一翎等^[11]采用等效模场匹配法分析了空间交叉波导中交叉角和垂直间距对耦合长度的影响。为了实现高集成度和高稳定性的

三维光学芯片,必须对三维空间波导的耦合特性进行系统研究^[12-13]。

本文采用全波仿真的方法对空间波导阵列之间的耦合特性进行系统的研究。首先研究平行波导间的耦合特性,分析波导间距和周围介质对波导之间的耦合效率的影响;然后研究空间交叉波导之间的耦合特性,分析波导夹角对波导之间的耦合效率的影响;最后分析波导之间的耦合效率与工作波长的关系。数值模拟结果表明,波导的结构、位置和工作波长对波导之间的耦合效率都有重要影响,该研究结果可以为集成光学的光路设计提供理论指导。

2 波导耦合的理论分析

集成波导阵列的结构如图 1 所示,其中 SU-8 为环氧树脂近紫外负光刻胶。在二维集成光学芯片上,不同波导分布在一个平面上,如图 1(a)所示。在三维集成光学芯片上,不同波导分布在一个空间中,为此波导之间的耦合变得复杂,如图 1(b)所示。波导内传输的模式场除了分布在波导内,部分模式场还会延伸到波导外,从而导致不同波导之间的模式场发生重叠。当不同波导之间的模式场发生叠加时,波导内的能量就会发生相互耦合。

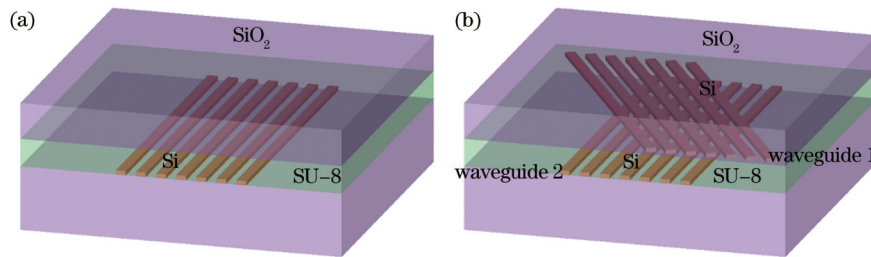


图 1 集成波导阵列的结构示意图。(a)平行波导;(b)空间交叉波导

Fig. 1 Structure diagram of integrated waveguide array. (a) Parallel waveguide; (b) spatial cross waveguide

两个平行波导间的耦合效率可以表示为^[14]

$$\gamma = \frac{p_{1 \rightarrow 2}}{p_1} = \sin^2 \left[L \sqrt{(\Delta\beta/2)^2 + \kappa^2} \right] / [(\Delta\beta/2\kappa)^2 + 1], \quad (1)$$

式中: γ 为波导 1 与波导 2 之间的耦合效率; p_1 为输入波导 1 中的总功率; $p_{1 \rightarrow 2}$ 为从波导 1 耦合到波导 2 的输出功率; L 为波导耦合区域的长度; $\Delta\beta$ 为两个光波导传播常数的差值; κ 为耦合系数, $\kappa = \pi(n_e - n_o)/\lambda$,其中 λ 为入射波长, n_e 为偶对称模式的有效折射率, n_o 为奇对称模式的有效折射率。

当两个波导的结构相同时, $\Delta\beta = 0$,则(1)式可

以简化为

$$\gamma = \frac{p_{1 \rightarrow 2}}{p_1} = \sin^2(L\kappa). \quad (2)$$

波导之间的耦合效率由耦合系数和耦合长度决定。当 $L\kappa = \pi/2 + \pi m (m = 0, 1, 2, \dots)$ 时,波导之间的耦合效率取得最大值,即 $\gamma_{\max} = 1$,本文取满足 $\gamma = \gamma_{\max}$ 的最小值 $(L\kappa)_{\min}$,即 $L\kappa = \pi/2$,将其代入 $\kappa = \pi(n_e - n_o)/\lambda$ 中可得 $L = \lambda / [2(n_e - n_o)]$ 。

3 模型模拟的结果与分析

为了简化问题,考虑由两个平行平面芯片构

成三维芯片,其截面如图 2(a)所示。其中下层芯片和上层芯片的基底均由 SiO₂构成,中间的间隔层由 SU-8 光刻胶构成,Si 波导置于 SiO₂的表面。加工过程中,首先在 SiO₂基片上生长一层 Si,然后采用干法刻蚀工艺分别在基片 1 和基片 2 上刻蚀得到条形 Si 波导,接着在基片 1 上旋涂 SU-8 光刻胶,最后将基片 2 倒扣在基片 1 上并压平。为了保证上、下基片平行,可以在其中一个基片上安置若干个等高圆

柱,在基片 1 和基片 2 相互按压的过程中作为支撑柱,从而使基片间保持平行。两个 SiO₂基片上波导之间的中心间距为 g_{\perp} ,同一平面上平行波导之间的中心间距为 g_{\parallel} 。在 1.55 μm 的波长处,基底的折射率 $n_s=1.45$,中间层的折射率 $n_m=1.58$,上层的折射率 $n_p=1.45$ 。采用时域有限差分(FDTD)法和本征模式展开(EME)法对波导内的电磁场分布进行数值模拟,并分析波导之间的耦合特性。

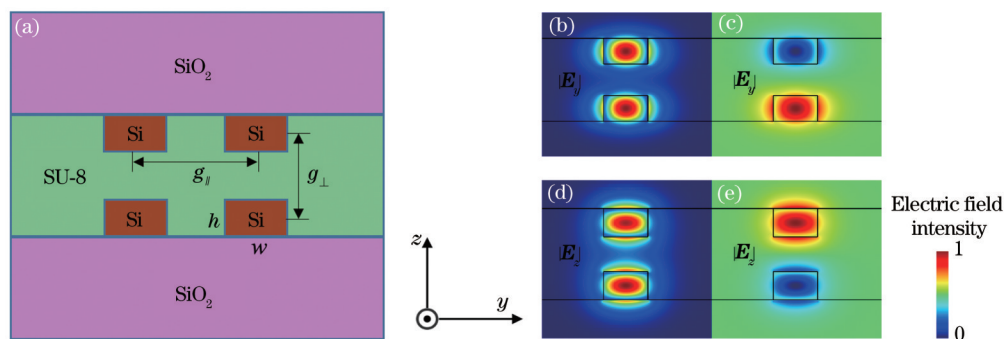


图 2 平行波导结构和不同模式的电场分布。(a)平行波导结构的截面示意图;(b) TE 模,偶对称;(c) TE 模,奇对称;(d) TM 模,偶对称;(e) TM 模,奇对称

Fig. 2 Parallel waveguide structure and electric field distributions in different modes. (a) Cross-section diagram of parallel waveguide structure; (b) TE mode, even symmetry; (c) TE mode, odd symmetry; (d) TM mode, even symmetry; (e) TM mode, odd symmetry

为了保证波导在 1.55 μm 波长处能够单模传输^[15],Si 波导的宽 w 和高 h 分别设为 0.40 μm 和 0.35 μm 。由相同波导($g_{\perp}=0.76 \mu\text{m}$)构成的双波导结构,通过数值模拟得到的模式电场分布如图 2 所示,其中 E 为电场。图 2(b)和图 2(c)分别为 TE (Transverse Electric) 模的偶对称模式和奇对称模式电场分布图,图 2(d)和图 2(e)分别为 TM (Transverse Magnetic) 模的偶对称模式和奇对称模式电场分布图。从图 2 可以看到,波导的模式电场主要分布在波导内,其次分布在波导外侧,越远离波导,场强越弱,其中一部分光场叠加在另一个波导内,这部分叠加的模式电场可以使该模式在波导之间发生耦合。

接下来分析波导之间的耦合系数。耦合系数由波导之间的叠加场强度决定,因此可以通过改变波导的结构来调整波导之间的叠加场分布。图 3(a)为耦合系数 κ 随波导间距 g_{\perp} 的变化曲线。从图 3(a)可以看到,随着 g_{\perp} 值的增大,耦合系数 κ 值逐渐减小。由于波导的基模场从波导边沿向外呈指数衰减的形式分布,因此波导间距越大,叠加场越少,耦合系数也越小。在三维光学芯片的设计

中,中间层的介质材料对波导之间的耦合也会产生影响。图 3(b)为耦合系数随中间层介质折射率的变化曲线。从图 3(b)可以看到,当中间层介质的折射率为 1.4~1.7 时,TE 和 TM 模的有效折射率均随着中间层介质折射率的增大而增大,并且 TM 模的折射率比 TE 模增长得快。这是由于 TM 模在波导外部比 TE 模具有更多的场分布,当中间层介质的折射率发生变化时,TE 模的场分布受到的影响较小,而 TM 模的场分布受到的影响较大,因此 TM 模的有效折射率随中间层介质折射率的变化大于 TE 模的情况。

根据(2)式可知,耦合效率随着耦合系数和耦合长度的改变呈周期性变化,因此在设计波导分布的过程中,需要综合考虑耦合系数和耦合长度。对于 $g_{\perp}=0.76 \mu\text{m}$ 的对称波导结构,在 1.55 μm 波长处 TE 模和 TM 模的耦合系数几乎相同;当耦合长度 L 为 72.5 μm 时,TE 模和 TM 模的耦合效率基本相等,耦合效率达到最大值,约为 0.997。保持耦合长度 $L=72.5 \mu\text{m}$ 不变,耦合效率随波导间距 g_{\perp} 的变化曲线如图 4(a)所示。从图 4(a)可以看到,TE 模和 TM 模的耦合效率都随着波导间距的增大而增

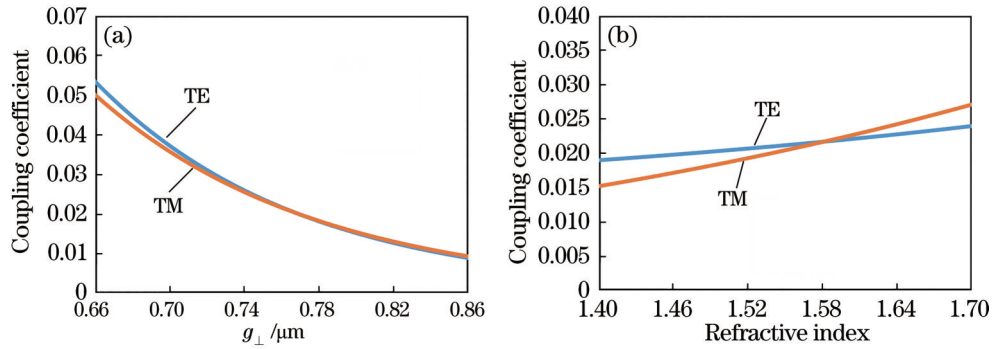


图 3 耦合系数与不同参数之间的关系。(a) g_{\perp} ; (b) 中间层介质的折射率

Fig. 3 Relationship between coupling coefficient and different parameters. (a) g_{\perp} ; (b) refractive index of intermediate layer medium

大, 当 $g_{\perp} = 0.76 \mu\text{m}$ 时, 耦合效率最大, 值为 0.997; 随着波导间距的继续增大, 耦合效率减小; 当 $g_{\perp} > 1.10 \mu\text{m}$ 时, 平行波导间的效率小于 -20 dB , 此时波导之间的耦合可以忽略。图 4(b) 为耦合效率随中间层介质折射率的变化曲线。从图 4(b) 可以看到, TE 模的耦合效率随中间层介质折射率的变化很缓慢, 而 TM 模的耦合效率随着中间层介质折射率的增大呈先增大后减小, 在折射率 $n_m = 1.58$ 处达到最大耦合效率。这是由于 TE 模的偏振沿着 y 方向, 而 TM 模的偏振沿着 z 方向, 所以 TM 模在中间介质层具

有更多的场分布, 因此中间层介质折射率的变化对 TE 模式场分布的影响较小, 对 TM 模式场分布的影响较大。

为了得到工作波长对波导之间的耦合效率的影响, 图 4(c) 为波导之间的耦合效率随波长的变化曲线, 其中 $g_{\perp} = 0.76 \mu\text{m}$, $L = 72.5 \mu\text{m}$ 。从图 4(c) 可以看到, 在 $1.55 \mu\text{m}$ 波长处, TE 模与 TM 模的耦合效率都取得最大值; 当远离这个波长时, 耦合效率逐渐减小, TE 模和 TM 模的工作带宽分别为 180 nm 和 150 nm 。

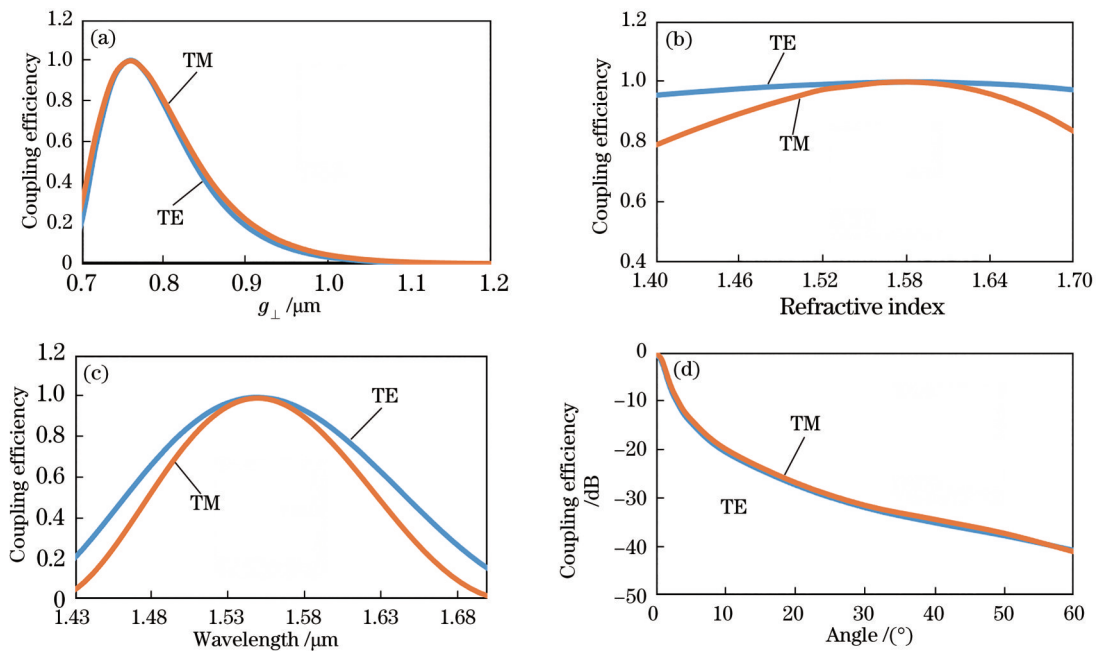


图 4 耦合效率与不同参数的关系。(a) g_{\perp} ; (b) 中间层介质的折射率; (c) 波长; (d) 夹角

Fig. 4 Relationship between coupling efficiency and different parameters. (a) g_{\perp} ; (b) refractive index of intermediate layer medium; (c) wavelength; (d) angle

在三维光学芯片中, 处于不同平面上的波导之间可能存在一定的夹角。当夹角不同时, 波导之间

模式叠加的不同会导致波导模式之间的耦合作用不同。图 4(d) 为波导之间的耦合效率随波导夹角

的变化曲线。从图 4(d) 可以看到, 当夹角在 0 附近时, 耦合效率随着夹角的变化而迅速变化, 说明夹角对耦合效率的影响很大; 随着夹角的增大, 耦合效率变化减缓; 当夹角大于 10.00° 时, 波导间的串扰小于 -20 dB, 这表明当空间交叉波导之间的夹角大于 10° 时, 波导间几乎不发生耦合。

考虑到波导宽度误差对耦合效率的影响, 选择改变图 2(a) 上波导的宽度, 则耦合效率随波导宽度误差 Δw 的变化曲线如图 5 所示。从图 5 可以看到, 耦合效率随着波导宽度误差的增大而降低; 波导宽度的减小对耦合效率的影响大于波导宽度增大的情况; 对于 TE 模, 当波导宽度增大 3.5 nm 或者减小 2.5 nm 时, 耦合效率均降低一半; 对于 TM 模, 当波导宽度增大 7.0 nm 或者减小 6.5 nm 时, 耦合效率均降低一半。综上, TE 模的耦合效率随着波导宽度误差的增大比 TM 模降低得更快, 这是由于 TE 模的电场沿着波导宽度方向 (y 方向) 振动, 而 TM 模的电场沿着波导高度方向 (z 方向) 振动, 因此波导宽度对 TE 电磁场的限制作用大于 TM 的情况, 从而波导宽度的改变对 TE 模式耦合效率的影响较大。

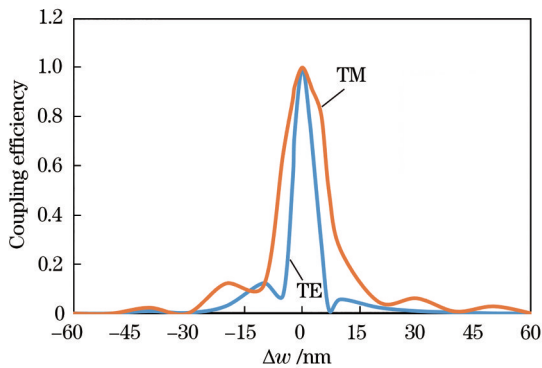


图 5 耦合效率与 Δw 的关系
Fig. 5 Relationship between coupling efficiency and Δw

4 应用举例

根据第 3 节的分析可知, 对称波导之间的耦合效率对夹角的变化很敏感, 即轻微的夹角变化都会导致耦合效率呈大幅度变化, 因此可以根据波导 2 末端的光强来判断波导间是否对准。图 6 为对称波导 ($g_{\perp} = 0.9 \mu\text{m}$, $L = 200 \mu\text{m}$) 中 TE 模的耦合效率随夹角的变化曲线。从图 6 可以看到, 当波导间的夹角为 0 时, 耦合效率最大; 当波导间的夹角约为 0.35° 时, 耦合效率下降一半, 半峰全宽约为 0.7°; 当波导间的夹角约为 3.00° 时, 波导间几乎不发生耦合。通过进一步分析可以发现, 耦合长度 L 值越大,

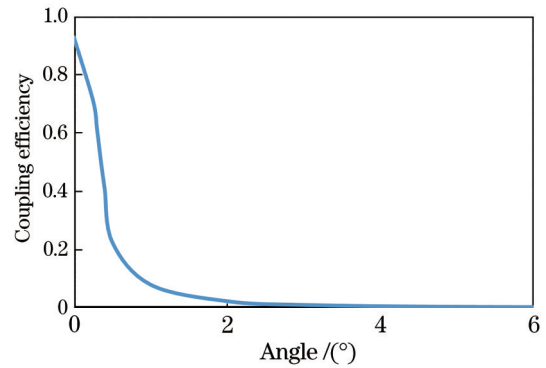


图 6 TE 模的耦合效率与夹角的关系
Fig. 6 Relationship between coupling efficiency and angle in TE mode

耦合效率的半峰全宽越小, 对夹角越敏感。结合光功率探测器和微纳位移台有望实现波导间的自动对准, 其中光功率探测器用来探测波导 2 的输出光强。

交叉波导的耦合可以应用在光层间的交换和传输中。光层间的交换结构如图 7 所示。光层间的交换结构由上、下两层构成, 其中上层是一个直波导, 下层是弯曲波导。在耦合区域, TE 膜在上、下层波导之间发生交叉耦合, 而 TM 模不发生耦合。由于波导之间的耦合效率对夹角很敏感, 所以只有在耦合区域中上、下层波导处于平行对准的情况下, TE 模才会发生耦合。图中 Si 波导的宽和高分别设为 $0.50 \mu\text{m}$ 和 $0.22 \mu\text{m}$, 波导间的中心间距为 $0.68 \mu\text{m}$, 弯曲波导的半径为 $3 \mu\text{m}$, 如图 7 虚线框所示, 耦合区域的长度为 $39.5 \mu\text{m}$ 。通过模拟计算可得 TE 模的交叉耦合率约为 0.96, TM 模的透过率约为 0.86, 能够实现 TE 模式的层间交换和 TM 模式的层间隔离。

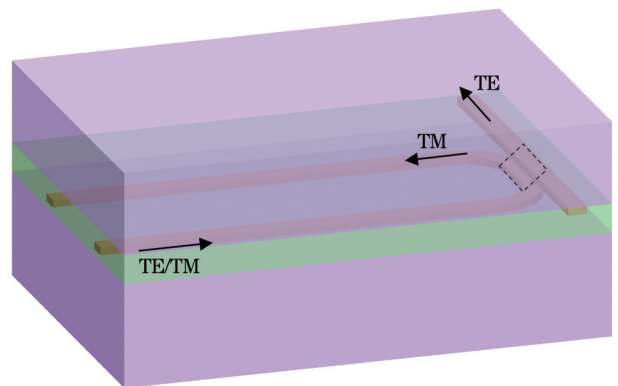


图 7 光层间的交换结构
Fig. 7 Exchange structure between optical layers

5 结 论

本文主要研究三维集成光学芯片中波导之间的耦合问题。数值模拟平行波导和交叉波导间的耦合效率,并分析平行波导和交叉波导间的耦合效率与波导间距、周围环境、工作波长和夹角之间的关系。在平行波导中,当 $g_{\perp}=0.76 \mu\text{m}$ 和 $L=72.5 \mu\text{m}$ 时,垂直方向上波导之间的耦合效率达到 0.997。在交叉波导中,波导之间的耦合效率对波导夹角很敏感,当夹角大于 10° 时,波导间不发生耦合,可以通过调整波导间的夹角来控制波导之间的耦合。此外,将波导之间的耦合效率对波导夹角敏感的特性应用于波导间的对准,设计光层间的交换传输结构来实现光学传输模式的层间交换和层间隔离。该研究结果对集成光学芯片的设计具有重要的指导意义。

参 考 文 献

- [1] Chen Y T, Wang J W, Chen W J, et al. Reciprocal waveguide coupled mode theory[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(15): 154206.
陈云天, 王经纬, 陈伟锦, 等. 互易波导模式耦合理论[J]. *物理学报*, 2020, 69(15): 154206.
- [2] Xie Y W, Yin Y L, Zhang M, et al. Ultra-dense dual-polarization waveguide superlattices on silicon[J]. *Optics Express*, 2020, 28(18): 26774-26782.
- [3] Su R Z, Tang D H, Ding W Q, et al. Efficient transmission of crossing dielectric slot waveguides[J]. *Optics Express*, 2011, 19(5): 4756-4761.
- [4] Liu H, Han D L, Zhang T, et al. Analysis of wide-angle crossed waveguide by wide-angle finite-difference beam propagation method based on the Douglas scheme[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(4): 456-459.
刘昊, 韩德来, 张彤, 等. 基于道格拉斯格式的宽角有限差分光束传播法分析大角度交叉波导[J]. *光学学报*, 2004, 24(4): 456-459.
- [5] Jin G L, Mizumoto T, Pu G S, et al. All-optical switching in intersecting waveguide[J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, 15(11): 1590-1593.
金国良, 水本哲弥, 蒲国胜, 等. 交叉波导中的非线性全光开关[J]. *光学学报*, 1995, 15(11): 1590-1593.
- [6] Jia Y B. Coupling among three nonparallel waveguides[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(9): 1161-1165.
贾玉斌. 三个非平行波导间的耦合[J]. *光学学报*, 2005, 25(9): 1161-1165.
- [7] Liang Z H, Huang H B, Chen S E, et al. Study of silicon-based optical interconnection network[J]. *Optical Communication Technology*, 2016, 40(10): 4-7.
梁梓豪, 黄红斌, 陈舜儿, 等. 硅基光互连网络的研究[J]. *光通信技术*, 2016, 40(10): 4-7.
- [8] Song G F, Feng X, Huang B J, et al. Annual report on investigation of integratable Si-based optical interconnect technology[J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2016, 13(8): 173-174.
宋国峰, 冯雪, 黄北举, 等. 可集成的硅基光互连技术研究[J]. *科技创新导报*, 2016, 13(8): 173-174.
- [9] Wan Z J, Yuan J, Wu Y M, et al. Research on loss and crosstalk of cross-waveguide in planar lightwave circuit[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2008, 29(4): 475-477.
万助军, 袁菁, 吴亚明, 等. 平面光路中交叉波导的损耗和串扰研究[J]. *半导体光电*, 2008, 29(4): 475-477.
- [10] Xia Q, Li K, Pang F F, et al. Transmission characteristics of multimode crossing optical waveguides[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2013, 34(6): 966-970.
夏倩, 李康, 庞拂飞, 等. 交叉多模光波导传输特性分析[J]. *半导体光电*, 2013, 34(6): 966-970.
- [11] Sun Y L, Jiang X Q, Yang J Y, et al. Characteristic analysis of spatial multiwaveguide system based on weakly coupled-mode theory[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(12): 1781-1786.
孙一翎, 江晓清, 杨建义, 等. 基于弱耦合模理论的空间多波导耦合特性研究[J]. *光学学报*, 2006, 26(12): 1781-1786.
- [12] Sun Y L, Jiang X Q, Yang J Y, et al. Coupling characteristics of spatial X-crossing waveguides[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(8): 2099-2103.
孙一翎, 江晓清, 杨建义, 等. 空间交叉波导耦合特性分析[J]. *光学学报*, 2009, 29(8): 2099-2103.
- [13] Zhou H F, Yang J Y, Wang M H, et al. Propagation characteristic analysis and applications of spatial four-waveguide system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(12): 1772-1776.
周海峰, 杨建义, 王明华, 等. 空间四波导的传输特性分析与应用[J]. *光学学报*, 2006, 26(12): 1772-1776.
- [14] Saleh B E A, Teich M C. *Fundamentals of photonics* [M]. 2nd ed. Singapore: John Wiley & Sons Inc, 2007.
- [15] Huang H, Liu K, Qi B, et al. Re-analysis of single-mode conditions for silicon rib waveguides at 1550 nm wavelength[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(16): 3811-3817.