

基于多模干涉的椭圆型十字波导的设计与仿真

乐孜纯¹, 徐自力¹, 孙 琛¹, 杜 颖¹, 董 文^{2*}

¹浙江工业大学理学院, 浙江 杭州 310023;

²浙江工业大学环境学院, 浙江 杭州 310014

摘要 设计了一种高效的、基于多模干涉(MMI)的椭圆型十字光波导,通过增加模式匹配器和调整自聚焦点位置,降低其传输损耗。COMSOL 仿真表明该波导在 1550 nm 波长处的透射率高达 96.5%,串扰损耗小于 2×10^{-5} ,而传统的椭圆型十字波导的透射率仅为 91.2%。并且对椭圆型 MMI 的成像规律进行了理论分析和仿真验证,结果表明这种新型椭圆型结构不但在 1550 nm 处表现出高效性,对整个 1500~1600 nm 的通信波段都具有非常低的损耗(小于 0.2 dB)和串扰(小于 -42 dB)。这种十字光波导尺寸小、结构简单,只需要在硅上绝缘体(SOI)基底材料上融刻一次即可实现,制备工艺简单,有利于节约成本和批量生产,广泛适用于未来的集成光路。

关键词 集成光学; 波导; 多模干涉; 损耗; 串扰

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.1013001

Design and Simulation of Elliptical Crossing Waveguide Based on Multimode Interference

Le Zichun¹, Xu Zili¹, Sun Chen¹, Du Ying¹, Dong Wen²

¹ College of Sciences, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China;

² College of Environment, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310014, China

Abstract We design an elliptical crossing waveguide with high efficiency based on multimode interference (MMI), adding a mode matcher and adjusting the self-focusing position to reduce its transmission loss. The COMSOL simulation shows that the transmittance of the waveguide reaches 96.5% and the crosstalk loss is less than 2×10^{-5} at 1550 nm, while the transmittance is 91.2% for traditional elliptical crossing waveguide. The imaging law of elliptical MMI is analyzed theoretically and verified in simulation. The results show that the new elliptical structure not only exhibits high efficiency at 1550 nm, but also has very low loss (less than 0.2 dB) and crosstalk (less than -42 dB) for the whole communication band from 1500 nm to 1600 nm. This cross-light waveguide is small-sized, simple-structured, and is formed by only one step etching with the grating couplers on a silicon-on-insulator (SOI) platform. It has simple preparation process and is conducive to cost savings and mass production. So it will be widely used in integrated optics in the future.

Key words integrated optics; waveguide; multimode interference; loss; crosstalk

OCIS codes 130.3130; 230.7370; 260.3160; 060.1810; 060.4510

1 引 言

由于光路集成化的需要,微米级甚至是亚微米级光器件的研究越来越受到重视,尤其是负责各个光路链接的十字波导结构。十字波导可以用作波分复用器、窄带滤波器^[1]等,其结构的稳定性和高效性将直接影响整个集成光路光线传播的质量。硅上绝缘体(SOI)基底的应用使光路的集成化、微型化成为可能。SOI 基底具有高折射率差,可以更好地将光信号束缚在波导中以减小散射损耗的影响,并且与互补金属氧化物半导

收稿日期: 2017-04-13; **收到修改稿日期:** 2017-06-16

基金项目: 国家自然科学基金(61172081)、浙江省自然科学基金(LZ13F010001)

作者简介: 乐孜纯(1965—),女,博士,教授,主要从事光纤通信无源器件、光纤通信网络技术等方面的工作。

E-mail: lzc@zjut.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: dongwen@zjut.edu.cn

体(CMOS)技术具有很强的兼容性。SOI 结构已被广泛运用于光纤路由器^[2]、交换机^[3]和光学滤波器^[4]中。而这些高精度光子设备的利用离不开由十字波导提供的光路连接,同时十字波导在简化设备结构上也起到关键作用。

传统 SOI 十字波导具有的高折射率差,使光子器件的结构尺寸很小,但也使波导在交叉点处具有很大的损耗和串扰^[5],两者之间的矛盾阻碍了光子器件微型化的发展。通常,SOI 光波导单次直接交叉的损耗和串扰分别为 1 dB~1.5 dB 和 -15 dB~-10 dB^[4-5]。为了提高十字波导的质量,学者们进行了很多研究,提出了很多解决方案^[6-13]。其中利用多模干涉(MMI)的波导十字结构因其制作工艺简单、波长选择的范围较宽而备受瞩目^[14-15]。在多模干涉区聚焦点的位置上,光场的分布非常集中。利用这一特性,将光的聚焦点置于波导的十字交叉处,就能很好地抑制衍射损耗,从而显著地降低光波导十字单元的损耗和串扰。虽然已有相关的文献报道过利用 MMI 特性设计十字波导单元的例子^[15-16],但都因为尺寸过大或制作工艺复杂而难以投入使用。

传统的椭圆型波导,其长轴方向两端处的曲率会发生较大变化,使得波导的近似宽度产生较大波动,波导宽度的变化会对 MMI 的自成像点位置和像斑的形状与质量产生显著的影响;其模式匹配不佳导致较大的辐射模损耗。

结合已有的对锥型 MMI 耦合器成像规律的研究^[17],理论论证椭圆型 MMI 耦合器一样具有自成像效应,并且将尺寸相近的椭圆型 MMI 耦合器与矩型 MMI 耦合器进行对比,证明了椭圆型 MMI 耦合器自成像点明显相对向前偏移,这一特性使缩小十字波导单元的尺寸成为可能。同时,将模式匹配器引入到椭圆型波导十字单元中,解决了模式失配带来的问题。

本文通过增加模式匹配器的方法,提出一种新型的椭圆型十字波导单元,其模式在转化过程中更多地向导模转化。使用 COMSOL 仿真软件对这一新型的椭圆型波导十字单元进行验证,在 1500~1600 nm 的波长范围内,新型椭圆型波导十字单元的单次传输损耗低、串扰低,并且通用于两种主流的光子集成电路。

2 原 理

用椭圆型 MMI 耦合器代替传统的矩型 MMI 耦合器是一种减小 MMI 耦合器尺寸的有效方法。本文对其成像点位置做理论推导,为方便推导,十字波导的整体结构在仿真部分给出,十字交叉波导的部分结构如图 1 所示。

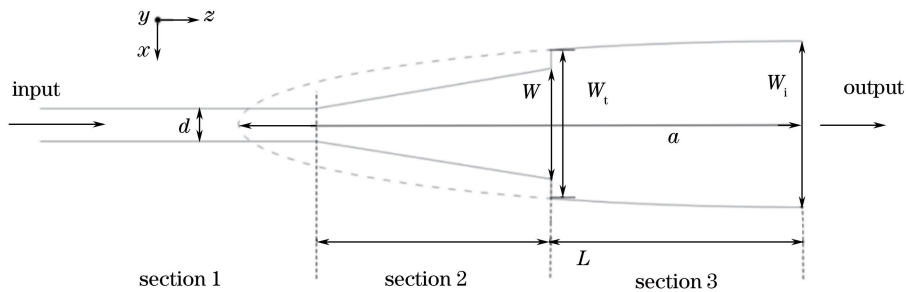


图 1 椭圆型 MMI 结构示意图

Fig. 1 Construction of elliptical MMI

该结构分 3 个部分,第 1 部分是直波导部分,直波导宽度为 d ;第 2 部分为模式匹配器部分,出口宽度为 W ;第 3 部分为椭圆 MMI 区。针对椭圆型 MMI 做理论推导,光信号从椭圆型 MMI 区的左端进入右端输出,MMI 区的有效宽度 $W_e(z)$ 在初始宽度 W_t 和终止宽度 W_i 之间变化, z 代表光波的传输方向,MMI 的宽度方向为 y ,MMI 的厚度方向为 x ,椭圆短轴为 $W_i/2$,椭圆长轴为 a , L 代表椭圆型 MMI 区的传播长度。

椭圆型 MMI 区的宽度方程为

$$W(z) = W_i \sqrt{1 - z^2/a^2}, \quad (1)$$

式中 $a^2 = L^2/[1 - (W_t/W_i)^2]$,而 n_t 、 n_c 分别代表椭圆型 MMI 区芯层、包层的有效折射率。设计的波导是折射率为 3.48 的硅融刻十字波导,采用掩埋型,掩埋于四周的二氧化硅($n_c = 1.48$)基底中,其有效折射率近

似为 $n_r=2.85$ 。在工作波长为 $\lambda_0=1.55 \mu\text{m}$ 的椭圆型 MMI 区中支持 m 个模式的传输,其模式数为 $v=0, 1, 2, \dots, m^{-1}$ 。横向波数 k_{vx} 、纵向传输常数 β_v 的关系满足色散方程:

$$k_{vx}^2 + \beta_v^2 = k_0^2 n_r^2, \quad (2)$$

式中 $k_0=2\pi/\lambda_0$, $k_{vx}=(v+1)\pi/W_e(z)=(v+1)\pi/[W_g+W(z)]$, 其中 W_g 考虑了古斯-汉森位移, 表达式为

$$W_g = (\lambda/\pi) (n_c/n_r)^{2\sigma} (n_r^2 - n_c^2)^{-1/2}, \quad (3)$$

其中 $\sigma=0$ 为 TE 模, $\sigma=1$ 为 TM 模, 这里只考虑 TE 模。由(2)式可以得到纵向传播常数为

$$\beta_v = k_0 n_r \sqrt{1 - [k_{vx}/(k_0 n_r)]^2}. \quad (4)$$

取椭圆长轴为 $1.8 \mu\text{m}$, 将 λ_0, n_r, n_c 代入(2)式得横向波数 k_{0x}, k_{2x}, k_{4x} 与 $k_0 n_r$ 的比值的平方分别为 0.01844, 0.1660, 0.4610。可看出阶数为 $v=0$ 和 $v=2$ 的模式可以采用傍轴近似。由此得到通过傍轴近似后的传播常数为

$$\beta_v \approx k_0 n_r - \frac{(v+1)^2 \pi \lambda_0}{4 n_r W_e^2(z)}. \quad (5)$$

利用 TE 导模的特征方程可以解出 β_v 的精确值。

$$(1-P)^{1/2} V = m\pi + 2 \arctan \left(\frac{P}{1-P} \right)^{1/2}, \quad (6)$$

式中 P 为归一化传播常数, V 为归一化厚度常数, 表达式为

$$P = \frac{\beta_v^2 - k_0^2 n_r^2}{k_0^2 (n_r^2 - n_c^2)}, \quad V = k_0 (n_r^2 - n_c^2)^{1/2} W_e. \quad (7)$$

通过特征方程、色散关系和傍轴近似得到的不同阶数情况下的传播常数如表 1 所示。

表 1 3 种近似方法得到的传播常数

Table 1 Propagation constants derived from three approximate methods

Approximate method	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5
Characteristic equation	11.45	11.12	10.56	9.733	8.588	7.049
Dispersion equation	11.45	11.12	10.55	9.700	8.482	6.699
Paraxial approximation	11.45	11.13	10.59	9.849	8.890	7.719

将由色散关系和傍轴近似得到的传播常数和精确值(特征方程)作对比, 可以看到基模和二阶模的误差均在 1% 以内, 这说明可以通过傍轴近似的方法来计算传播常数和精确值。从表 1 还可以看出四阶模与精确值的误差较大, 其主要原因是基模和二阶模远离截止, 而四阶模临近截止。设计的多模干涉耦合器的中心宽度约为 $1.8 \mu\text{m}$, 其中容纳的模式数只有 6 个, 由于波导沿中心线对称, 所以只有 3 个偶对称的模式, 即 $v=0, 2, 4$ 。

干涉器中场分布函数为^[18]

$$\Psi(x, z) = \sum_{v=0}^{m-1} c_v \Psi_v(x) \exp[i(\beta_0 - \beta_v)z], \quad (8)$$

式中场分布函数是导模的叠加, 辐射模的激发系数 c 非常小, 在此忽略不计。图 1 中模式匹配器的出口处宽度 W 和终止宽度 W_i 相差不大, 且模式匹配器出口处四阶模场激发系数 c_4 很小, 其场分布函数可以在 COMSOL 仿真中看到; 根据端面耦合理论, 在进入椭圆型 MMI 区后四阶模 c_4 也很小。所以忽略四阶模只考虑基模和二阶模。考虑一阶模与基模传输常数之差 $\Delta\beta_{01}(z) = (3\pi\lambda)/[4n_r W_e^2(z)]$, 在位置 z 处的相位差为^[17]

$$\Delta\phi(z) = \int_0^z (\beta_0 - \beta_1) dz. \quad (9)$$

若该干涉器为矩形, 拍长为 $\pi/(\beta_0 - \beta_1)$, 但是椭圆型 MMI 区宽度并不是常数而是 z 的函数, 所以椭圆型传播常数之差 $\beta_0 - \beta_1$ 为传播方向 z 的函数, 传播常数之差应为(9)式比上路程 z 取平均值即 $\beta_0 - \beta_1 \approx \phi(z)/z$, 该式成立的条件是椭圆 MMI 区的初始宽度 W_i 和终止宽度 W_f 非常接近, 由此得到椭圆型 MMI 区的拍长为

$$L_\pi(z) = \pi z / \Delta\phi(z). \quad (10)$$

$\beta_0 - \beta_v$ 的传播常数之差为 $v(v+2)\pi/(3L_\pi)$, 将 $v=2$ 代入得

$$\beta_0 - \beta_2 = \frac{8\pi}{3L_\pi(z)}. \quad (11)$$

在(8)式中 v 取 0 和 2, 通过传播常数近似, 并利用(11)式, 场分布函数变为

$$\Psi(x, z) = c_2 \Psi_2(x) \exp\left[i \frac{8\pi}{3L_\pi(z)} z\right] + c_0 \Psi_0(x). \quad (12)$$

由此可知, 场分布函数是 x, z 的二元函数, 以端口 W_i 的场分布函数为基准, 第 n 个自成像位置场分布函数与端口处 $z=0$ 处的场分布函数 $\Psi(x, 0)$ 相同, 所以应满足关系

$$\frac{8\pi}{3L_\pi(z)} z = 2n\pi. \quad (13)$$

最低两阶模经过距离 z 后的相位差 $\Delta\phi(z)$ 通过(9)式积分计算可以得到

$$\Delta\phi(z) = \frac{3\pi\lambda}{W_g^2 a n_r} \left\{ \frac{A+B}{(A-B)^3} \ln \frac{(B-b)(A-a^{-1})}{(A-b)(B-a^{-1})} + \frac{b-a^{-1}}{(A-B)^2} \left[\frac{A}{(A-b)(A-a^{-1})} + \frac{B}{(B-b)(B-a^{-1})} \right] \right\}, \quad (14)$$

其中

$$A = -\frac{W_i + \sqrt{W_i^2 - W_g^2}}{W_g a}, \quad B = -\frac{W_i - \sqrt{W_i^2 - W_g^2}}{W_g a}, \quad b = \frac{1}{a} \sqrt{\frac{a+z}{a-z}}. \quad (15)$$

当 $a \gg L$ 时, 方程退化为

$$\Delta\phi(z) = \frac{3\pi\lambda z}{4n_r (W_g + W_i)^2}, \quad (16)$$

此时椭圆型 MMI 耦合器变为近似矩形耦合器。

当 $W_g \rightarrow 0^+$ 时, (14)式右边第二项趋近于零, 方程退化为

$$\Delta\phi(z) = \frac{3a\pi\lambda}{8n_r W_i^2} \ln \frac{a+z}{a-z}. \quad (17)$$

对于对称干涉单个像的第一个成像位置($n=1$)由(13)式得到

$$\frac{4\Delta\phi(z)}{3n\pi} = 1. \quad (18)$$

经 MATLAB 计算椭圆型 MMI 耦合器的成像周期为 $l_e = 6.86 \mu\text{m}$, 不考虑古斯-汉森位移则成像周期为 $l_e = 5.50 \mu\text{m}$ 。矩型 MMI 耦合器的成像周期为

$$l_r = \pi / (\beta_0 - \beta_2). \quad (19)$$

通过计算得到矩型 MMI 耦合器成像周期为 $l_r = 7.0892 \mu\text{m}$, 可以看到椭圆型 MMI 耦合器的成像周期明显缩短, 有利于缩小器件的尺寸。不足之处在于, 横纵向波导由直波导、模式匹配器、椭圆型 MMI 耦合器组成, 在理论方面很难精确计算出进入椭圆型 MMI 耦合器端面时基模与二阶模的相位与激发系数, 难以确定光斑最小处(聚焦点)的位置, 因此需结合 COMSOL 软件进行仿真研究。

3 器件设计与仿真

传统的椭圆型 MMI 耦合器十字波导结构如图 2 所示(图中 H_z 表示磁场强度), 直波导宽度为 $0.44 \mu\text{m}$, 椭圆长轴为 $10.4 \mu\text{m}$, 短轴为 $1.6 \mu\text{m}$, 通信波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 。由图中可以看出, 该十字波导结构在输入和输出口对于直波导段的模式匹配度不好, 其耦合模式更多地转化为辐射模而不是导模, 这导致光信号在端口和十字交叉处更多地以辐射模的形式损耗掉, 其损耗达到 0.4 dB , 透射率为 91.2% ^[19]。

为了解决传统椭圆型波导结构损耗大的问题, 引入了模式匹配器, 将椭圆型扁头的两端截掉, 用锥型的模式匹配器代替, 保留了椭圆型结构较平滑的部分。新型椭圆型 MMI 交叉单元是基于自成像效应, 可以抑制波阵面的扩张, 从而起到降低交叉处损耗和串扰的作用, 整个结构的 COMSOL 设计如图 3 所示。

图 4 中的十字交叉单元是在厚度为 $0.34 \mu\text{m}$ 的硅片上融刻完成的, 融刻厚度为 $0.22 \mu\text{m}$, 下部分保留了 $0.12 \mu\text{m}$ 的硅基, 硅片置于厚度为 $2 \mu\text{m}$ 的二氧化硅的基底上, 同时硅片的融刻十字波导部分完全掩埋于厚

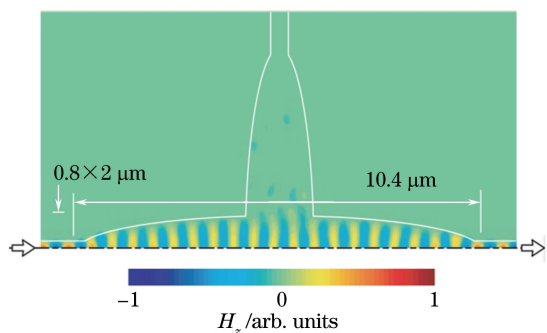


图 2 传统的椭圆型 MMI 十字波导二维仿真图
Fig. 2 Simulation of traditional elliptical MMI crossing waveguide

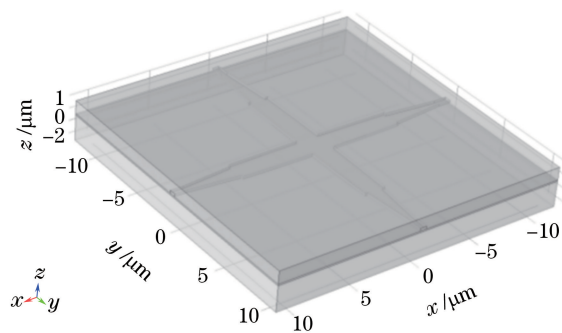


图 3 基于 SOI 的新型椭圆型 MMI 十字交叉单元
Fig. 3 Crossing structure of new elliptical MMI based on SOI

度为 $1 \mu\text{m}$ 的二氧化硅中。二氧化硅的折射率为 1.48, 硅片的折射率为 3.48。当入射光频率 $f = 1.9341 \times 10^{14}$ 时, 整个结构的光场分布仿真结果如图 4 所示, 图中可以很清晰地看到整个结构的光强分布图, 仿真表明该结构能较好地将光束束缚在十字交叉波导中心, 周围基本没有光场分布, 其在 1550 nm 波长处透射率为 96.5% , 串扰损耗小于 2×10^{-5} 。

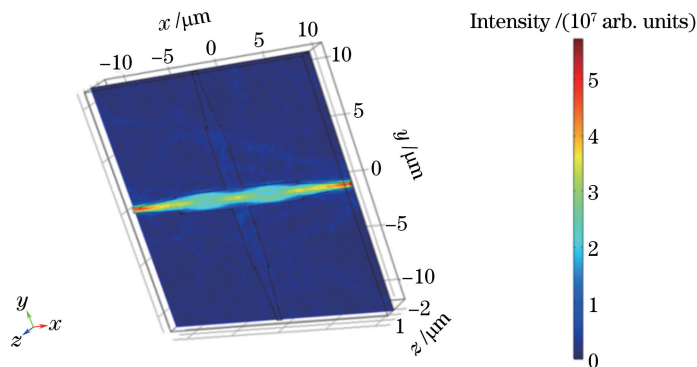


图 4 新型椭圆型 MMI 十字单元光场分布仿真图

Fig. 4 Simulated optical field distribution of new elliptical MMI crossing waveguide

理论计算结果表明, 长半轴为 $15 \mu\text{m}$, 短半轴为 $0.9 \mu\text{m}$ 的椭圆型结构的成像周期 l_e 为 $6.86 \mu\text{m}$, 而等宽度的矩型 MMI 的成像周期 l_r 为 $7.09 \mu\text{m}$ 。以 $1.55 \mu\text{m}$ 波长为输入光信号对其进行仿真, 结果如图 5 所示。图 5(a) 显示椭圆型结构的第 1 个自聚焦点位于 $6.5 \mu\text{m}$ 处(光强最大处), 但这并不是成像点位置; 图 5(b) 显示矩型 MMI 的第 1 个成像位置位于 $6.9 \mu\text{m}$, 与理论结果 $l_r = 7.0892 \mu\text{m}$ 符合得较好; 图 5(c) 中椭圆型 MMI 的第 6 个自成像点的位置为 $42 \mu\text{m}$, 所以自成像周期 l_e 为 $7 \mu\text{m}$, 这与理论结果 $l_e = 6.86 \mu\text{m}$ 符合得很好。

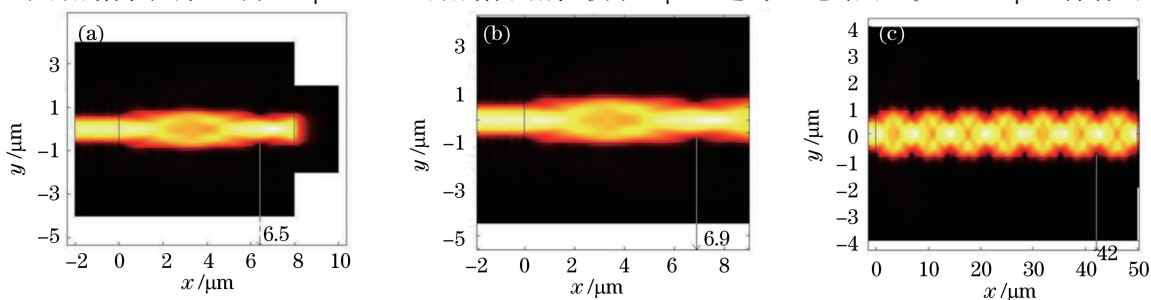


图 5 (a) 椭圆型 MMI 第 1 个自聚焦点所在位置; (b) 矩型 MMI 第 1 个成像点所在位置;
(c) 椭圆型 MMI 第 6 个自聚焦点所在位置

Fig. 5 (a) First position of self-focusing of elliptical MMI; (b) first position of self-imaging of rectangle MMI; (c) sixth position of self-focusing of elliptical MMI

同时要注意十字交叉波导中在椭圆型 MMI 的出口处成的像并不是入口处的像,而是在端口处后方成的像,所以椭圆型 MMI 的传播长度 L 选择为 $6.5 \mu\text{m}$,即选择的是光线聚焦的位置。

影响损耗的另一个重要因素在于锥型结构模式匹配器的尺寸。然而,目前关于不完美亚微米级光波导的电磁理论分析的相关报道甚少,只有一些仅适用于像变化程度很小的不完美波导的近似理论^[20],没有适用于像变化程度较大(如本文的模式匹配器)的近似理论,其原因是偏微分方程难以简化,通常由仿真模拟给出结论。

由于锥型结构的长度和开口宽度对自成像光斑的长短和粗细有很大影响,故只要使十字交叉处的光斑又长又细,就可以最大限度地抑制串扰和损耗。根据经验值选择长度的变化范围为 $3.5 \sim 4.5 \mu\text{m}$,大口宽度的变化范围为 $1.2 \sim 1.6 \mu\text{m}$,利用二分法来搜索可得对应的模式匹配器的最优尺寸,如图 6 所示,十字交叉波导的两种尺寸的整体均呈中心对称。针对 0.45 型椭圆型波导器件,宽度选取 $W_1 = 0.45 \mu\text{m}$, $W_2 = 1.18 \mu\text{m}$,长度选取 $L_2 = 4.3 \mu\text{m}$;针对 0.5 型椭圆型波导器件,宽度选取 $W_1 = 0.5 \mu\text{m}$, $W_2 = 1.26 \mu\text{m}$,长度选取 $L_2 = 4 \mu\text{m}$ 。

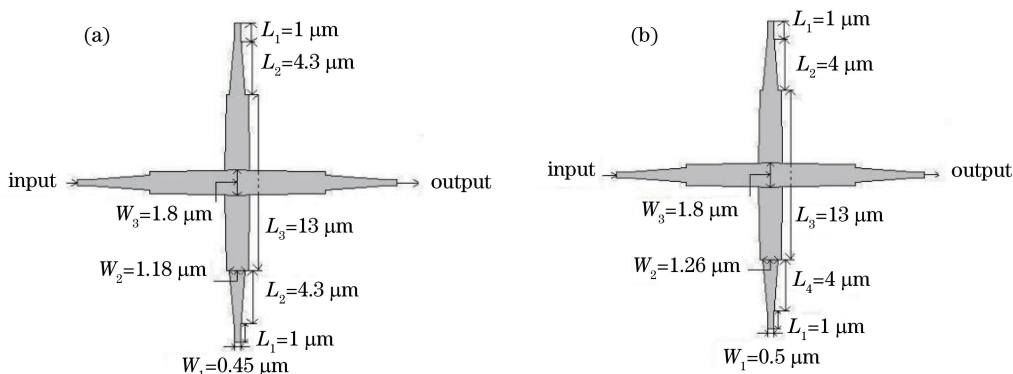


图 6 椭圆型 MMI 十字单元尺寸设计图。(a) $W_1 = 0.45 \mu\text{m}$; (b) $W_1 = 0.5 \mu\text{m}$

Fig. 6 Design of elliptical MMI crossing size. (a) $W_1 = 0.45 \mu\text{m}$; (b) $W_1 = 0.5 \mu\text{m}$

为降低整个十字交叉波导的损耗,选择 $L = 6.5 \mu\text{m}$ (光线最聚焦位置), $L_3 = 2L = 13 \mu\text{m}$ 。通过 COMSOL 仿真,可以得到该十字交叉波导的光场分布图,如图 7 所示。

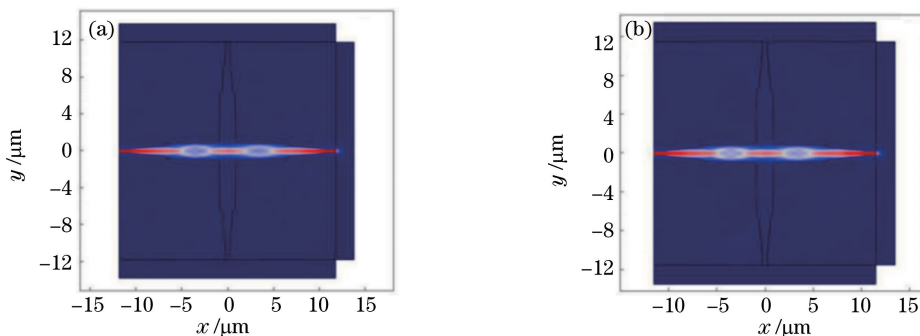


图 7 椭圆型波导十字单元尺寸优化后的光场仿真图。(a) $W_1 = 0.45 \mu\text{m}$; (b) $W_1 = 0.5 \mu\text{m}$

Fig. 7 Simulated optical field distribution of elliptical MMI crossing waveguide optimized.

(a) $W_1 = 0.45 \mu\text{m}$; (b) $W_1 = 0.5 \mu\text{m}$

同时,对设计的椭圆型十字波导在两种主流的光子集成电路下的表现做了一系列的 COMSOL 仿真测试,两种型号的横纵轴截面的电场模分布如图 8 和图 9 所示。

由图 8(a)和图 9(a)可知,横向电场场强在 $-10 \mu\text{m}$ 之前和 $10 \mu\text{m}$ 之后(即进入模式干涉前)较大,在模式匹配器中光强逐渐减少,在椭圆型 MMI 中由于多模干涉,电场场强产生较大变化,在十字交叉位置区域 0 处,光强达到较大的值,达到聚焦的效果。由图 8(b)和图 9(b)可知光强基本被束缚在垂直面的中心区域。

为了验证其损耗及串扰特性,对两种型号的十字波导单元在 $1.5 \sim 1.6 \mu\text{m}$ ($1.85 \times 10^{14} \sim 2.00 \times 10^{14} \text{ Hz}$) 的通信波段以 $0.01 \mu\text{m}$ 作为步长仿真各自的损耗和串扰数值。 $0.45 \mu\text{m}$ 型和 $0.5 \mu\text{m}$ 型十字波导单元单次损耗和串扰分别如图 10 和图 11 所示。由图可知该结构对 $1.55 \mu\text{m}$ 的通信信号具有较小的损耗和较大的串

扰,对整个 1500~1600 nm 的通信波段都具有非常低的损耗(小于 0.2 dB)和串扰(小于 -42 dB)。在整个通信波段内,损耗和串扰的波动也不大,故该结构适用于波分复用器等通信器件的设计。

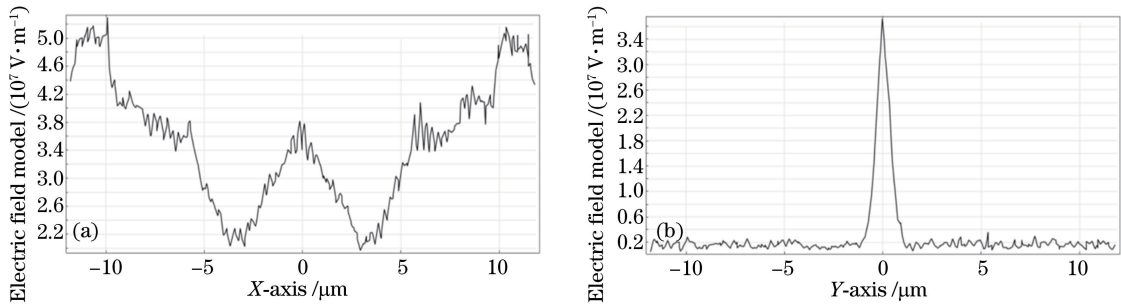


图 8 0.45 型输入面电场模分布。(a)横向;(b)纵向

Fig. 8 Electric field model distribution for $W_1 = 0.45 \mu\text{m}$. (a) Transverse; (b) longitudinal

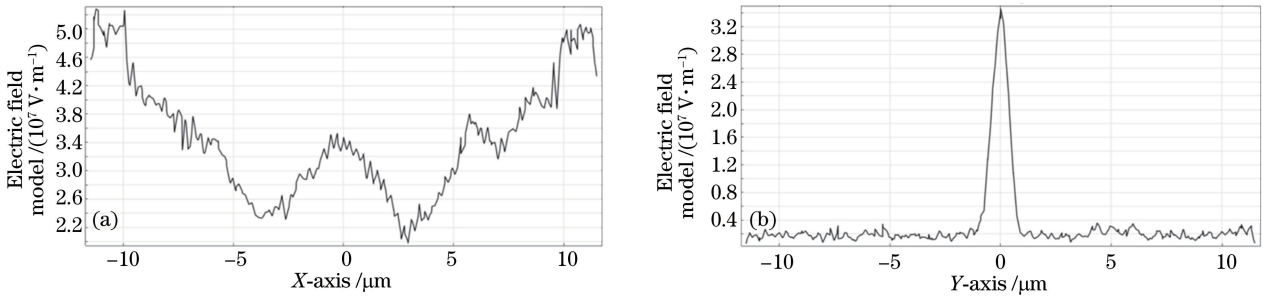


图 9 0.5 型输入面电场模分布。(a)横向;(b)纵向

Fig. 9 Electric field model distribution for $W_1 = 0.5 \mu\text{m}$. (a) Transverse; (b) longitudinal

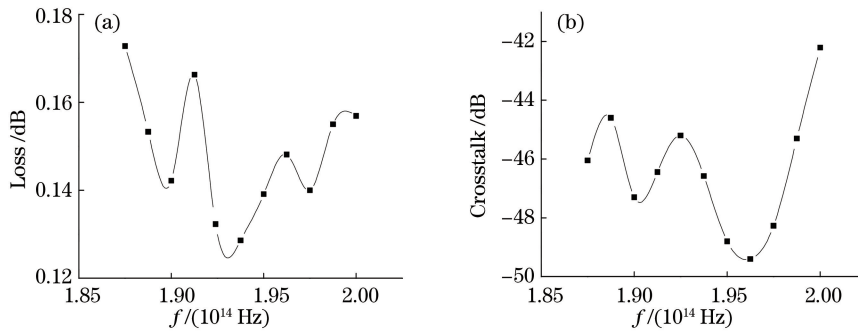


图 10 0.45 型椭圆型 MMI 十字单元的损耗及串扰特性。(a)单次损耗;(b)单次串扰

Fig. 10 Loss and crosstalk characteristics of elliptical MMI crossing waveguide for $W_1 = 0.45 \mu\text{m}$.

(a) Single loss; (b) single crosstalk

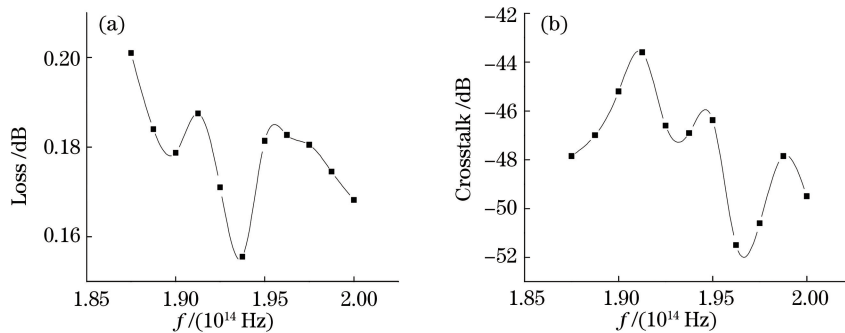


图 11 0.5 型椭圆型 MMI 十字单元的损耗及串扰特性。(a)单次损耗;(b)单次串扰

Fig. 11 Loss and crosstalk characteristics of elliptical MMI crossing waveguide for $W_1 = 0.5 \mu\text{m}$.

(a) Single loss; (b) single crosstalk

4 结 论

设计了一种基于多模干涉的椭圆型十字光波导结构,并对椭圆型 MMI 耦合结果进行了理论分析与仿真模拟。在仿真中通过不断调整模式匹配器的尺寸来逐渐优化透射率,并在理论上通过近似方法得到椭圆型 MMI 自成像点的位置,与仿真结果的误差小于 $\pm 1\%$ 。在设计方面,将锥型模式匹配器引入到椭圆型 MMI 中,大幅度改善了传统椭圆型十字波导损耗过大的问题,将透射率由 91.2% 提升到 96.5%。同时,相较于二次融刻,掩埋型的一次融刻在工艺上更加简单,广泛适用于未来的集成光路。对于自聚焦点的位置有待后续进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Yong Zhen, Fu Haiwei, Qiao Xueguang, *et al.* Transmission characteristics of photonic crystal cross waveguide containing defect structures[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(4): 1070-1074.
雍振, 傅海威, 乔学光, 等. 含缺陷平板光子晶体十字波导传输特性研究[J]. *光学学报*, 2009, 29(4): 1070-1074.
- [2] Ji R Q, Tian Y H, Lin Y, *et al.* On-chip optical router for optical networks-on-chip[C]. *Quantum Electronics Conference & Lasers and Electro-Optics (CLEO/IQEC/PACIFIC RIM)*, 2011: 12712664.
- [3] Dorin B A, Goodwill D, Bernier E, *et al.* Large-scale wavelength and polarization insensitive optical switch on SOI from 1260 nm to 1360 nm[C]. *SPIE*, 2013, 8915: 89150T.
- [4] Cherchi M, Kapulainen M, Aalto T, *et al.* Fabrication-tolerant optical filters for dense integration on a micron-scale SOI platform[C]. *SPIE*, 2014, 8990: 89900F.
- [5] Fukazawa T, Hirano T, Ohno F, *et al.* Low loss intersection of Si photonic wire waveguides[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2004, 43(1): 646-647.
- [6] Li J J, Fattal D A, Beausoleil R G. Crosstalk-free design for the intersection of two dielectric waveguides[J]. *Optics Express*, 2009, 17(9): 7717-7724.
- [7] Sanchis P, Villalba P, Cuesta F, *et al.* Highly efficient crossing structure for silicon-on-insulator waveguides[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(18): 2760-2762.
- [8] Johnson S G, Manolatu C, Fan S H, *et al.* Elimination of cross talk in waveguide intersections[J]. *Optics Letters*, 1998, 23(23): 1855-1857.
- [9] Watanabe Y, Sugimoto Y, Ikeda N, *et al.* Broadband waveguide intersection with low-crosstalk in two-dimensional photonic crystal circuits by using topology optimization[J]. *Optics Express*, 2006, 14(20): 9502-9507.
- [10] Bock P J, Cheben P, Schmid J H, *et al.* Subwavelength grating crossings for silicon wire waveguides[J]. *Optics Express*, 2010, 18(15): 16146-16155.
- [11] Feng J B, Li Q Q, Fan S S. Compact and low cross-talk silicon-on-insulator crossing using a periodic dielectric waveguide[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(23): 3904-3906.
- [12] Tsarev A V. Efficient silicon wire waveguide crossing with negligible loss and crosstalk[J]. *Optics Express*, 2011, 19(15): 13732-13737.
- [13] Wei Yuming. Research of high performance waveguide crossing unit based on SOI[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014: 42-50.
魏玉明. 基于 SOI 的高性能波导交叉单元研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014: 42-50.
- [14] Jones A M, de Rose C T, Lentine A L, *et al.* Ultra-low crosstalk, CMOS compatible waveguide crossings for densely integrated photonic interconnection networks[J]. *Optics Express*, 2013, 21(10): 12002-12013.
- [15] Chen H B, Hou H L, Wang G H, *et al.* Novel design of multi-mode-interference crossings for periodic dielectric waveguides[J]. *Optics Communications*, 2016, 361: 59-64.
- [16] Chen C H, Chiu C H. Taper-integrated multimode-interference based waveguide crossing design[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2010, 46(11): 1656-1661.
- [17] Le Zichun, Huang Sungang, Hu Jinhua, *et al.* General self-imaging properties for line-tapered multimode interference couplers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(6): 0611003.
乐孜纯, 黄孙港, 胡劲华, 等. 锥形多模干涉耦合器一般成像特性分析[J]. *光学学报*, 2011, 31(6): 0611003.
- [18] Soldano L B, Pennings E C M. Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: Principles and applications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1995, 13(4): 615-627.
- [19] Fukazawa T, Hirano T, Ohno T, *et al.* Low loss intersection of Si photonic wire waveguides[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2004, 43(2): 646-647.
- [20] Marcuse D. Mode conversion caused by surface imperfections of a dielectric slab waveguide[J]. *Bell Lab Technical Journal*, 1969, 48(10): 3187-3215.