

光学学报

基于超表面结构的紧凑型铌酸锂波导模式转换器

王琳, 高阳, 石昊, 张磊*, 尹坤**

之江实验室智能网络研究院, 浙江 杭州 311121

摘要 模式转换器是片上模式复用(MDM)系统的关键器件。为在绝缘体上铌酸锂(LNOI)中实现结构紧凑的模式转换,本文提出了一种基于超表面结构的模式转换器。该模式转换器可以实现 TE_0 - TE_1 、 TE_0 - TE_2 的转换。为了在模式之间实现高效转换,采用逆向设计方法,结合 3D 电磁场仿真,优化器件倾斜周期性亚波长条形蚀刻结构参数,以同时符合沿传播方向的相位匹配要求,以及符合短耦合长度的横向方向折射率分布要求。仿真结果表明,器件在 1400~1700 nm 波段内, TE_0 - TE_1 转换的插入损耗 < 0.8 dB, 模间串扰 < -10 dB, 模式转换区长度 ~ 20 μm 。且该器件具有较好的高阶模式转换扩展性以及工艺容差性,是未来 LNOI 的高密度集成 MDM 系统中模式转换器的良好备选方案。

关键词 光学器件; 模式转换器; 集成光子器件; 铌酸锂

中图分类号 TN256

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230847

1 引言

随着信息化的发展,人们对信息传输和处理的需求不断增加。在这种情况下,如何提高信道容量成为了一个迫切需要解决的问题。目前有多种可以提高信道容量的复用技术,如波分复用技术、偏振复用技术与模分复用技术(MDM)等等^[1-3]。其中,MDM利用不同阶的模式和不同的光偏振来承载数据,在光波导或光纤中并行传输多个数据通道,且只需要一个单一波长的激光源^[4-5],可以认为是拓展光纤通信容量的一个新维度。在MDM技术需求的推动下,由于具有金属-氧化物-半导体(CMOS)兼容的优点,绝缘体上硅(SOI)平台中MDM器件得到了大量的实验演示^[6-9]。然而,SOI平台的高速调制通常采用硅的等离子体色散效应来实现,这需要进行p-n结的掺杂,而掺杂所引起的吸收损耗和温度敏感性会限制SOI调制器的性能。

不同于SOI平台,绝缘铌酸锂(LNOI)平台因其具有强电光效应、低材料损耗和宽透明窗口的特性,可实现高速电光调制器和光学非线性器件,同时提供高折射率对比度波导,使得其能够实现高速、高密度的片上光学器件制造^[10-13]。例如,已有实验证明LNOI平台上的电光调制器具有超过100 GHz的调制带宽^[14]、较低的信号滚降^[15]以及较低的驱动电压^[16]。为了充分发挥LNOI作为光子集成电路(PIC)平台的潜力,仍然需要开发无源器件以与有源器件进行单片集成。目前对于LNOI平台上MDM器件的报道较少,且基本围绕氮化

硅负载LNOI平台的定向耦合器相位匹配原理展开。例如,文献^[17]设计、制造和实验演示了一种基于非对称定向耦合器的模式复用器(MMUX)。在1525~1565 nm波长范围内,实测插入损耗小于1.49 dB,模间串扰小于-13.03 dB。文献^[18]设计了在波长范围为1510~1580 nm内可以将光从 TM_0 模式耦合到高阶模式的 TM_0 - TM_1 、 TM_0 - TM_2 和 TM_0 - TM_3 的模式转换器,在该波段内插入损耗小于1.5 dB,消光比大于13.0 dB,并设计了对应的MMUX。基于定向耦合器的相位匹配原理的模式转换器虽然加工难度低、可拓展性较好,但是可能存在占地面积相对较大的问题,不利于片上的大规模集成。超表面材料是具有亚波长特征的二维人工材料,可通过特殊折射率分布在亚波长尺度进行光波的相位、幅度和偏振的操控^[6,19-21]。将超表面材料集成到光学波导中,有助于应对此类问题。

基于以上分析,借助超表面结构可在亚波长尺度进行光波操控的特性,本文提出了一种紧凑型铌酸锂波导模式转换器,该模式转换器可以实现在铌酸锂(LN)波导中 TE_0 - TE_1 的转换或 TE_0 - TE_2 的转换。为了在模式之间实现耦合,采用逆向设计方法,结合3D电磁场仿真,优化器件倾斜周期性亚波长条形蚀刻结构参数,以满足沿传播方向的相位匹配要求,以及具有高耦合系数的横向方向折射率分布。仿真结果表明,该器件在1400~1700 nm的波段内, TE_0 - TE_1 的插入损耗 < 0.8 dB, 模间串扰 < -10 dB, 器件转换区长度 ~ 20 μm , 且具有较好的高阶模式转换扩展性以及工艺

收稿日期: 2023-04-19; 修回日期: 2023-05-23; 录用日期: 2023-06-05; 网络首发日期: 2023-06-19

基金项目: 之江实验室科研项目(2020LC0AD02, 2022QA0AL01)

通信作者: *zhanglei2438@zhejianglab.com; **yink@zhejianglab.com

容差性,是未来 LNOI 的高密度集成 MDM 系统中模式转换器的良好备选方案。

2 模式转换器结构与参量设计

2.1 模式转换器结构

根据耦合模理论,当光在介质中传播时,通过设计恰当的介质结构,可使得光场能量从一种模式耦合到另一种模式。在这个过程中,介质结构的扰动不仅在沿 z 轴的传播方向满足两个转换模式的相位匹配要求,同时也在横向上具有恰当的折射率分布,以获得恰当的耦合系数,实现较短的耦合长度。本文所提出的基于超表面结构的波导模式转换器概念 3D 模型

如图 1(a)所示。模式转换器由三部分组成,即输入、输出端口以及用于完成模式转换的能量耦合的耦合区。所设计的 LN 波导模式转换器结构的膜层分布如图 1(b)所示,输入、输出端口均为 SiO_2 上的 LiNbO_3 条形波导。耦合区在沿 z 轴的传播方向与横向上均进行了结构折射率的设计,由倾斜周期性亚波长条形蚀刻结构构成。其中, LiNbO_3 条形波导总高度为 600 nm,倾斜周期性亚波长条形蚀刻结构深度为 300 nm。对于 TE_0 - TE_1 和 TE_0 - TE_2 ,其超表面的结构不完全相同,涉及变化的参数有波导宽度 W 、刻蚀槽周期长度 Λ 、刻蚀槽周期数目 n 和刻蚀槽倾斜角度 θ 等,如图 1(c)所示。

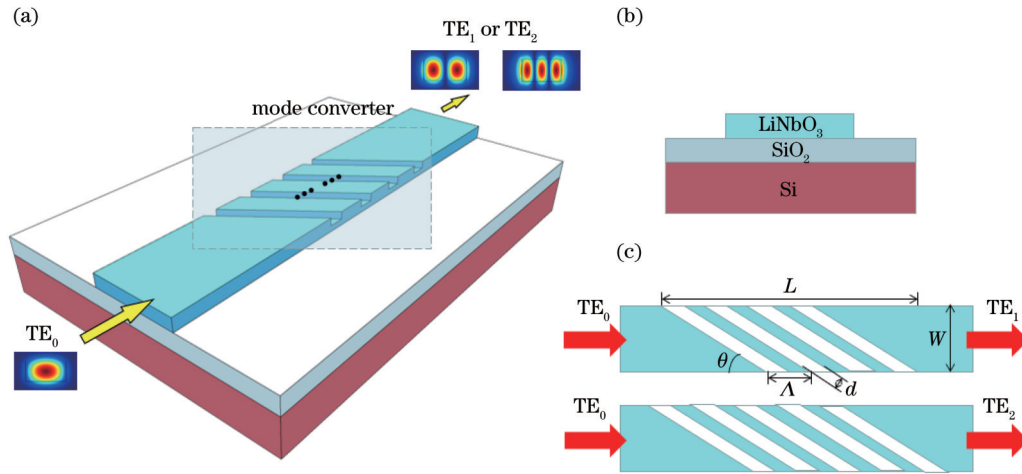


图 1 所设计的 LN 波导模式转换器的 3D 概念模型。(a)3D 立体侧视图;(b)膜层分布图;(c)俯视图及关键结构参数

Fig. 1 Conceptual 3D model of proposed LN waveguide mode converter. (a) 3D side view; (b) layer construction; (c) top view and key dimensions

2.2 理论模型

光场在扰动介质结构中的传播可以用耦合模式理论来描述。根据耦合模式理论,介质结构的扰动可能导致能量从一种模式耦合到另一种模式,并且每个波导模式沿传播方向的幅度由一组微分方程^[6, 22]确定:

$$-\frac{\partial A}{\partial z} = j\kappa_{ab} B e^{j(\beta_a - \beta_b)z}, \quad (1)$$

$$-\frac{\partial B}{\partial z} = j\kappa_{ba} A e^{j(\beta_b - \beta_a)z}, \quad (2)$$

式中: A 和 B 分别为波导模式 a 和 b 的振幅; β_a 和 β_b 分别为波导模式 a 和 b 的传播常数; κ_{ab} 和 κ_{ba} 分别表示波导模式 a 和 b 之间的交换耦合系数。在所提出的器件中,假设介质结构的扰动在传播方向 z 上是周期性的,那么结构的介电常数的函数可以写为

$$\epsilon(x, y, z) = \epsilon_0(x, y, z) + \Delta\epsilon(x, y, z), \quad (3)$$

式中: $\epsilon_0(x, y, z)$ 是非微扰的介质介电常数; $\Delta\epsilon(x, y, z)$ 代表以 δ 为周期的周期性扰动。模式耦合系数^[6, 22]可以定义为

$$\kappa_{ba} = \frac{\omega}{4} \iint_S E_a^*(x, y) \cdot \Delta\epsilon(x, y, z) E_b(x, y) dx dy, \quad (4)$$

式中: $E_a(x, y)$ 和 $E_b(x, y)$ 分别是波导模式 a 和 b 的电场分布; S 为硅波导的横截面积; $\Delta\epsilon(x, y, z)$ 为介质波导中的周期性扰动。此外,耦合长度(即使得模式功率可 100% 耦合到另一个模式的 z 轴位置)与不同模式之间的耦合系数 κ_{ab} 成反比关系。另外, TE_0 和 TE_j 模式沿传播方向 z 之间的模式耦合需要满足以下相位匹配条件^[6, 22]:

$$\delta = \frac{2\pi q}{\beta_a - \beta_b}, \quad (5)$$

式中, δ 为扰动 $\Delta\epsilon(x, y, z)$ 的扰动周期; $q=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 。为了在模式之间实现耦合,必须选择沿传播方向适当的扰动周期来满足相位匹配的要求。一旦建立了相位匹配,就需要恰当地选择横向方向上的折射率分布,以获得恰当的耦合系数 κ_{ab} ,实现较短的耦合长度。根据式(4),耦合系数 κ_{ab} 的值与周期性扰动 $\Delta\epsilon(x, y, z)$ 有关,而 $\Delta\epsilon(x, y, z)$ 又取决于波导在 z 处的横向折射率分布。

2.3 逆向设计算法

传统的光子器件“正向设计”理念是从现有的解析

理论出发,手动设置器件各部位尺寸参数,根据仿真计算或实验测试得到器件性能的结果,进一步优化各项参数,直到得到理想的结果。这种方法存在一定的局限性,如当涉及到不规则的器件形状或参数众多的情况下,“正向设计”花费的人工、时间成本是较大的。并且根据“正向设计”设计出的器件尺寸一般比较大,不利于提高集成度。因此研究人员提出了“逆向设计”的思路,从器件的目标功能出发,运用拓扑优化算法^[23]、粒子群算法^[24-25]、神经网络算法^[26-28]、伴随算法^[29]等计算机算法,设计出符合目标需求的器件。粒子群优化(PSO)算法最早由Eberhart等^[28]通过模拟飞鸟的社会行为提出,每个被称为粒子的个体都会根据自己和邻居的飞行状态来调整自己的飞行。PSO算法是一种基于迭代的多目标优化算法,具有搜索速度快、效率高、收敛速度快等优点,被广泛应用于光子器件的设计中。本文从耦合模式理论出发,将 PSO 算法与

Lumerical 软件的三维时域有限差分(FDTD)模块相结合,对 LN 模式转换器进行逆向设计。应用 PSO 算法进行器件设计的流程如图 2 所示,具体实施步骤如下:

- 1) 初始化粒子的状态,包括波导宽度 W 、刻蚀槽周期长度 Λ 、刻蚀槽周期数目 n 、刻蚀槽倾斜角度 θ 等,并设定各参数合理的变化范围;初始化迭代次数,以 TE_1/TE_2 模式的插入损耗作为适应度函数;
- 2) 通过 FDTD 法计算每一个粒子的适应度;
- 3) 依据个体最优位置和种群最优位置更新个体粒子状态,包括个体粒子的速度以及位置;
- 4) 判断此时是否满足收敛条件,在本文的设计中,收敛条件为第 1 步中初始化的迭代次数。如果未达到目标迭代次数,则返回第 2 步;如果已达到目标迭代次数,输出结构参数值并结束算法。优化后得到的两种模式转换器的尺寸参数在表 1 中列出。

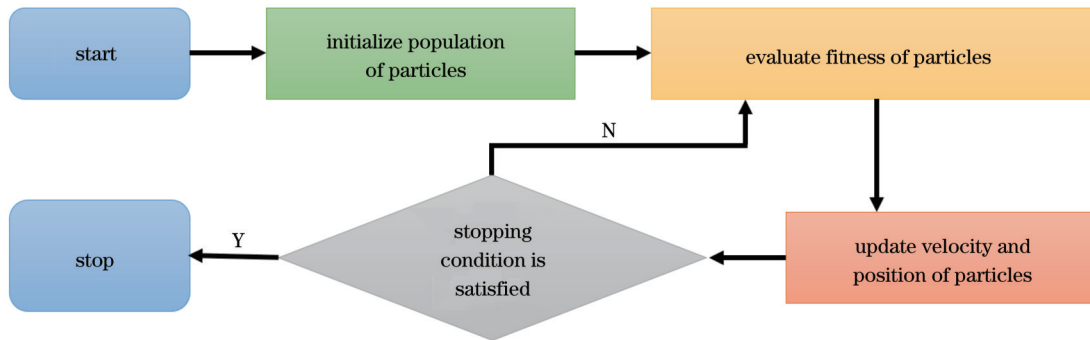


图 2 PSO 算法流程图

Fig. 2 Flow chart of PSO algorithm

表 1 优化后两种模式转换器的尺寸参数

Table 1 Size parameters for two types of optimized mode converters

Type of mode converter	$W / \mu\text{m}$	$L / \mu\text{m}$	$\Lambda / \mu\text{m}$	d / nm	$\theta / (^\circ)$	n
TE_0 -to- TE_1	1.88	17.4	1.9	189.1	10.0	4
TE_0 -to- TE_2	2.80	22.1	1.2	125.6	12.7	8

3 数值模拟

TE_0 - TE_1 器件结构优化的关键结构尺寸如图 3(a) 所示,其中, LN 波导宽度 W 为 $1.88 \mu\text{m}$ 、刻蚀槽周期长度 Λ 为 $1.9 \mu\text{m}$ 、刻蚀槽宽度 d 为 189.1 nm 、刻蚀槽倾斜角度 θ 为 10° 、刻蚀槽周期数目 n 为 4、总体耦合区长度 L 为 $17.4 \mu\text{m}$ 。通过数值仿真模拟对所设计的模式转换器的模场传输进行观察,其整体顶视模场分布如图 3(b) 所示。所谓顶视模场,是指从上方看下去所形成的模场的分布。也就是说,它描述的是模场在空间中的竖向分布情况。可以发现,当 TE_0 模式从端口输入后,在中间的超表面结构区域发生了波前的渐变,模式分布从 TE_0 逐渐转换为 TE_1 。

所设计的 LN 波导模式转换器的模式插入损耗与模间串扰如图 3(c) 所示, TE_1 模式在器件出口处与 TE_0 模式在器件入口处的功率比可视为 TE_1 模式的插入损耗, TE_0 模式在器件出口处与 TE_0 模式在器件入口处的功率比可视为此处的模间串扰。可以看出, TE_0 模式的能量在传播过程中逐渐降低,逐渐转换为 TE_1 模式的能量,且在 $1400 \sim 1700 \text{ nm}$ 的带宽内,插入损耗 $< 0.8 \text{ dB}$,在 1520 nm 处最低,为 0.3 dB ;模间串扰 $< -10 \text{ dB}$,在 1473 nm 处小于 -38 dB ,消光比为 37.3 dB 。较低的模间串扰意味着 TE_0 模式的能量大多数转为 TE_1 模式的能量,能量不会有很大的损失,故该模式转换器适用于光通信领域。

为了展示该设计的可拓展性,本文同样列出了 TE_0 - TE_2 的模式转换设计。器件结构优化的关键结构尺寸如图 4(a) 所示, LN 波导宽度 W 为 $2.80 \mu\text{m}$ 、刻蚀槽周期长度 Λ 为 $1.2 \mu\text{m}$ 、刻蚀槽宽度 d 为 125.6 nm 、刻蚀槽倾斜角度 θ 为 12.7° 、刻蚀槽周期数目 n 为 8、总体耦合区长度 L 为 $22.1 \mu\text{m}$ 。通过数值仿真模拟对所设计模式转换器的模场传输进行观察,其整体顶视模场分布如图 4(b) 所示。可以发现,当 TE_0 模式从端口

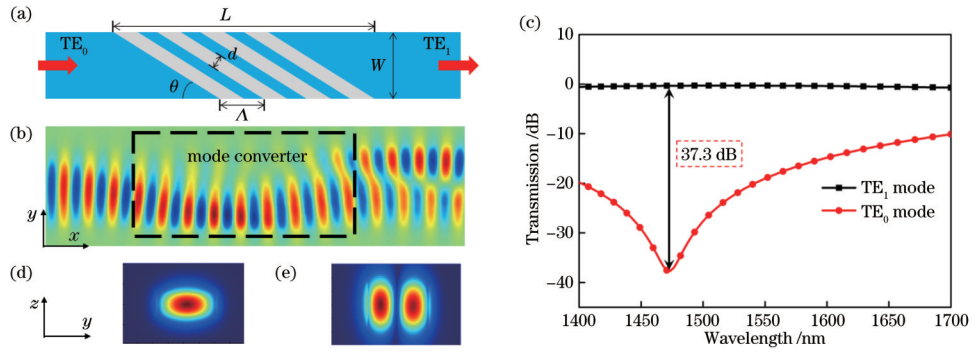


图 3 所设计的 TE_0 - TE_1 LN 波导模式转换器的结构、模场分布、模式插入损耗与模间串扰。(a) 结构俯视图; (b) 仿真模场分布图; (c) 模式插入损耗与模间串扰; (d) 入口和 (e) 出口处与传播方向垂直的截面模场分布

Fig. 3 Structure, mode field distributions, mode insertion loss, and crosstalk between modes of designed TE_0 -to- TE_1 LN waveguide mode converter. (a) Top view of structure; (b) simulated mode field distribution; (c) mode insertion loss and mode crosstalk; cross-sectional field distributions perpendicular to propagation directions of (d) input and (e) output

输入后,在中间的超表面结构区域发生了波前的渐变,模式分布从 TE_0 逐渐转换为 TE_2 。

所设计的 LN 波导模式转换器的模式插入损耗与模间串扰如图 4(c) 所示, TE_2 模式在器件出口处与 TE_0 模式在器件入口处的功率比可视为 TE_2 模式的插入损耗, TE_0 模式在器件出口处与 TE_0 模式在器件入口处的功率比可视为此处的模间串扰。可以看

出, TE_0 模式的能量在传播过程中逐渐降低,逐渐转换为 TE_2 模式的能量,且在 1400~1700 nm 的带宽内,插入损耗 < 2.4 dB,在 1565 nm 处最低,为 0.8 dB;模间串扰 < -10 dB,在 1453 nm 处小于 -24.3 dB,消光比为 22.9 dB。较低的模间串扰意味着 TE_0 模式的能量大多数转为 TE_2 模式的能量,能量不会有很大的损失。

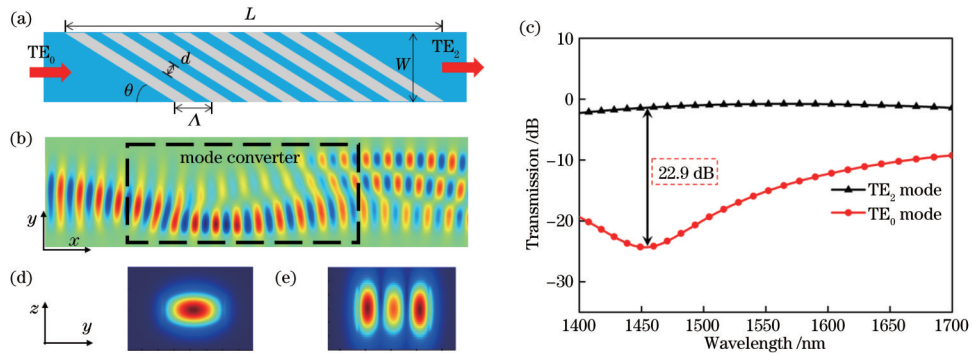


图 4 所设计的 TE_0 - TE_2 LN 波导模式转换器的结构、模场分布、模式插入损耗与模间串扰。(a) 结构俯视图; (b) 仿真模场分布图; (c) 模式插入损耗与模间串扰; (d) 入口和 (e) 出口处与传播方向垂直的截面模场分布

Fig. 4 Structure, mode field distributions, mode insertion loss, and crosstalk between modes of designed TE_0 -to- TE_2 LN waveguide mode converter. (a) Top view of structure; (b) simulated mode field distribution; (c) mode insertion loss and mode crosstalk; cross-sectional field distributions perpendicular to propagation directions of (d) input and (e) output

4 工艺误差模拟分析

为了评估工艺误差对所设计结构性能的影响,保障器件的可重复加工性,展开了刻蚀槽宽度 d 的工艺误差在 TE_0 - TE_1 和 TE_0 - TE_2 中对模式插入损耗和模间串扰影响的 FDTD 仿真。其中,仿真的刻蚀槽宽度 d 分别为 +40、+20、-20、-40 nm。这对于 TE_0 - TE_1 的刻蚀槽宽度 d 值,变化率在 21% 以内;而对于 TE_0 - TE_2 的刻蚀槽宽度 d 值,变化率在 32% 以内。其他结构参数如 LN 波导宽度 W 、刻蚀槽周期长度 Λ 、刻蚀槽倾斜角度 θ 、刻蚀槽周期数目 n 以及总体耦合区长度 L 等均不发生变化。图 5 为不同刻蚀槽宽度 d 对所设计 TE_0 -

TE_1 模式转换器性能影响的仿真结果。可以看出,在 1400~1700 nm 波段内,插入损耗可以保持在 0.9 dB 以内, d 的工艺误差对 TE_1 模式的插入损耗影响不明显;而模间串扰 < -8.3 dB,最小的模间串扰值在 1450 nm 处,为 -18.3 dB,可见 d 值的变化会导致模间串扰一定程度上的劣化。图 6 为不同刻蚀槽宽度 d 对所设计 TE_0 - TE_2 模式转换器性能影响的仿真结果。可以看出,在 1400~1700 nm 波段内,插入损耗可以保持在 3 dB 以内,相对于原始仿真值 2.4 dB 有略微增加,与 TE_0 - TE_1 结构的变化情况类似;模间串扰最大值为 -6.7 dB,相较于原仿真值的最大值 -10 dB 在可接受范围内有一定程度的劣化。可以看出,所设计的器件

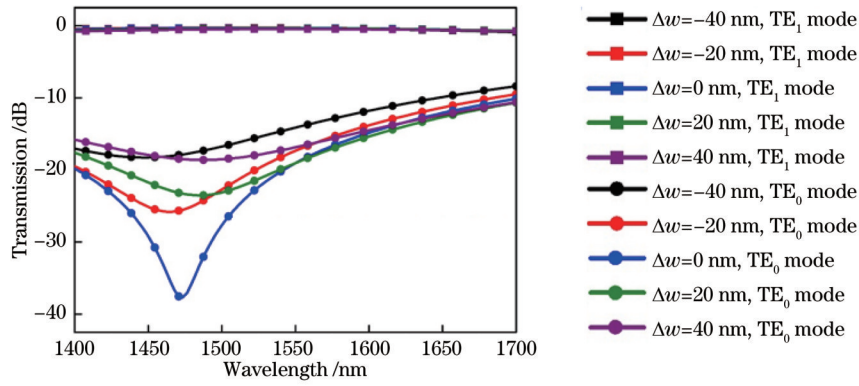


图 5 刻蚀槽宽度 d 的工艺误差在 TE_0 - TE_1 中对模式插入损耗和模间串扰的影响

Fig. 5 Effect of process error of etching groove width d on mode insertion loss and crosstalk between modes in TE_0 - TE_1

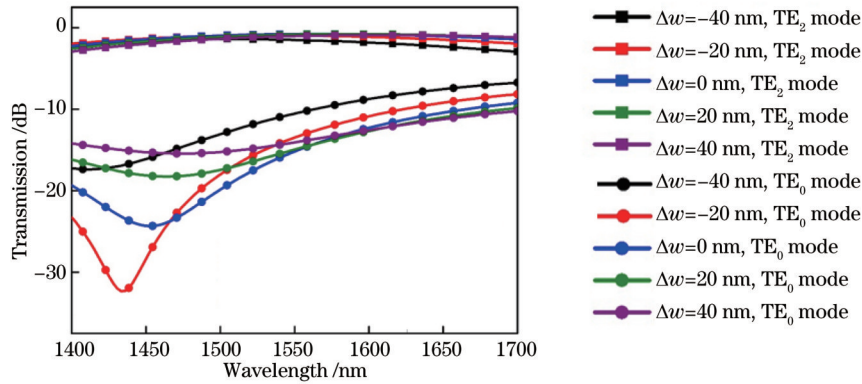


图 6 刻蚀槽宽度 d 的工艺误差在 TE_0 - TE_2 中对模式插入损耗和模间串扰的影响

Fig. 6 Effect of process error of etching groove width d on mode insertion loss and crosstalk between modes in TE_0 - TE_2

对于刻蚀槽宽度 d 的工艺误差具有较好的容差性。

为了评估工艺侧壁角度误差对所设计结构性能的影响,保障器件的可重复加工性,展开了刻蚀槽侧壁角度 α 的工艺误差在 TE_0 - TE_1 和 TE_0 - TE_2 中对模式插入损耗和模间串扰影响的 FDTD 仿真。其中,仿真的侧壁角度 α 分别为 90° (理想直角边)、 85° 和 80° 。其他结构参数如 LN 波导宽度 W 、刻蚀槽周期长度 Λ 、刻蚀槽倾斜角度 θ 、刻蚀槽周期数目 n 以及总体耦合区长度 L 等均不发生变化。图 7 为不同刻蚀槽侧壁角度 α 对所

设计 TE_0 - TE_1 模式转换器性能影响的仿真结果。可以看出,在 $1400\sim 1700$ nm 波段内,插入损耗可以保持在 1.3 dB 以内, α 的工艺误差对 TE_1 模式的插入损耗影响不明显;而模间串扰 < -6.2 dB,在 1550 nm 处,模间串扰最大为 -9.6 dB,可见 α 值的变化会导致模间串扰一定程度上的劣化。图 8 为不同刻蚀槽侧壁角度 α 对所设计 TE_0 - TE_2 模式转换器性能影响的仿真结果。可以看出,在 $1400\sim 1700$ nm 波段内,插入损耗可以保持在 2.2 dB 以内,与原始仿真值 2.4 dB 相似,与 TE_0 - TE_1 结

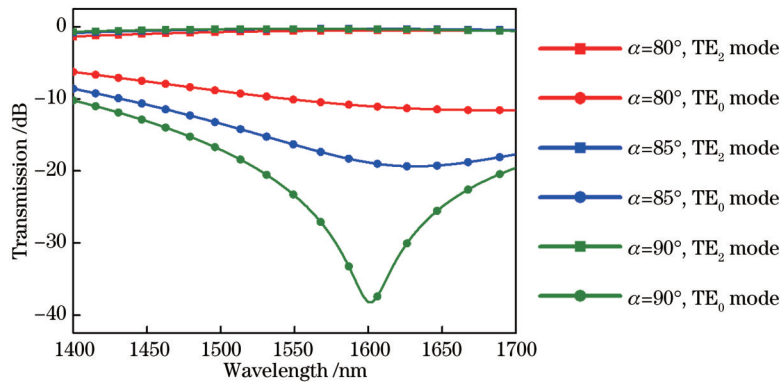


图 7 刻蚀槽侧壁角度 α 的工艺误差在 TE_0 - TE_1 中对模式插入损耗和模间串扰的影响

Fig. 7 Effect of process error of etching groove sidewall angle α on mode insertion loss and crosstalk between modes in TE_0 - TE_1

构的变化情况类似;模间串扰最大值为 -7.6 dB,相较于原仿真值的最大值 -10 dB在可接受范围内有一定程

度的劣化。可以看出,所设计器件对于在 80° 以内的侧壁角度 α 的工艺误差具有较好的容差性。

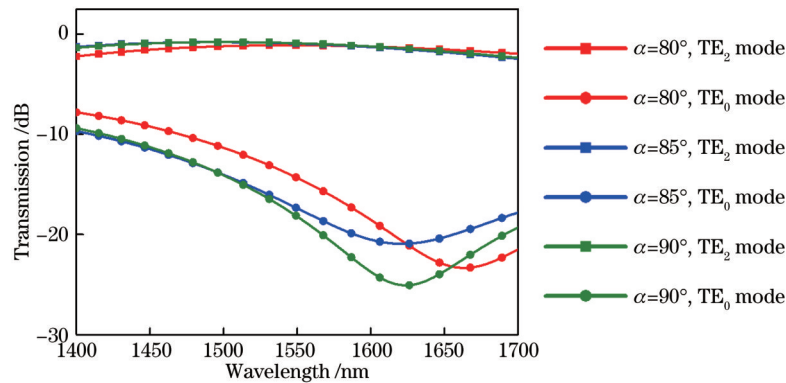


图 8 刻蚀槽侧壁角度 α 的工艺误差在 TE_0 - TE_2 中对模式插入损耗和模间串扰的影响

Fig. 8 Effect of process error of etching groove sidewall angle α on mode insertion loss and crosstalk between modes in TE_0 - TE_2

5 结 论

本文提出了一种基于超表面结构的紧凑型LN波导模式转换器,该模式转换器可以实现 TE_0 - TE_1 、 TE_0 - TE_2 的转换。为了在模式之间实现高效耦合,采用逆向设计方法,结合3D电磁场仿真,优化器件倾斜周期性亚波长条形蚀刻结构参数,同时符合沿传播方向的模式转换相位匹配要求,以及短耦合长度的横向方向折射率分布要求。仿真结果表明,器件在 $1400\sim 1700$ nm的波段内, TE_0 - TE_1 转换的插入损耗 <0.8 dB,模间串扰 <-10 dB,模式转换区长度 ~ 20 μm ,且具有较好的高阶模式转换扩展性以及工艺容差性,是未来LNOI的高密度集成MDM系统中模式转换器的良好备选方案。

参 考 文 献

- [1] Jalali B, Fathpour S. Silicon photonics[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(12): 4600-4615.
- [2] Soref R. Mid-infrared photonics in silicon and germanium[J]. Nature Photonics, 2010, 4(8): 495-497.
- [3] 刘大建, 赵伟科, 张龙, 等. 高性能无源硅光波导器件: 发展与挑战[J]. 光学学报, 2022, 42(17): 1713001.
Liu D J, Zhao W K, Zhang L, et al. High performance passive silicon optical waveguide devices: development and challenges [J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(17): 1713001.
- [4] Luo L W, Ophir N, Chen C P, et al. WDM-compatible mode-division multiplexing on a silicon chip[J]. Nature Communications, 2014, 5: 3069.
- [5] Stern B, Zhu X L, Chen C P, et al. On-chip mode-division multiplexing switch[J]. Optica, 2015, 2(6): 530-535.
- [6] Wang H W, Zhang Y, He Y, et al. Compact silicon waveguide mode converter employing dielectric metasurface structure[J]. Advanced Optical Materials, 2019, 7(4): 1801191.
- [7] Zhao W K, Yi X L, Peng Y Y, et al. Silicon multimode waveguide crossing based on anisotropic subwavelength gratings [J]. Laser & Photonics Reviews, 2022, 16(6): 2100623.
- [8] Yi X L, Li C L, Zhao W K, et al. On-chip mode-selective manipulation based on the modal-field redistribution assisted with subwavelength grating structures[J]. Nanophotonics, 2023, 12(9): 1809-1821.
- [9] 吕元帅, 汪成根, 袁伟, 等. 基于相变材料的可重构模式复用光波导开关[J]. 光学学报, 2021, 41(17): 1723001.
Lü Y S, Wang C G, Yuan W, et al. Reconfigurable mode multiplexer waveguide switch based on phase change material[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(17): 1723001.
- [10] Zhu D, Shao L B, Yu M J, et al. Integrated photonics on thin-film lithium niobate[J]. Advances in Optics and Photonics, 2021, 13(2): 242-352.
- [11] Qi Y F, Li Y. Integrated lithium niobate photonics[J]. Nanophotonics, 2020, 9(6): 1287-1320.
- [12] 乔玲玲, 汪旻, 伍荣波, 等. 超低损耗铌酸锂光子学[J]. 光学学报, 2021, 41(8): 0823012.
Qiao L L, Wang M, Wu R B, et al. Ultra-low loss lithium niobate photonics[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(8): 0823012.
- [13] 刘子溪, 曾成, 夏金松. 高线性度电光调制器研究进展[J]. 中国激光, 2022, 49(12): 1206001.
Liu Z X, Zeng C, Xia J S. Research progress of high linearity electro-optic modulator[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(12): 1206001.
- [14] Xu M Y, He M B, Zhang H G, et al. High-performance coherent optical modulators based on thin-film lithium niobate platform[J]. Nature Communications, 2020, 11: 3911.
- [15] Kharel P, Reimer C, Luke K, et al. Breaking voltage - bandwidth limits in integrated lithium niobate modulators using micro-structured electrodes[J]. Optica, 2021, 8(3): 357-363.
- [16] Wang C, Zhang M, Chen X, et al. Integrated lithium niobate electro-optic modulators operating at CMOS-compatible voltages [J]. Nature, 2018, 562(7725): 101-104.
- [17] Yu Z J, Tong Y Y, Tsang H K, et al. High-dimensional communication on etchless lithium niobate platform with photonic bound states in the continuum[J]. Nature Communications, 2020, 11: 2602.
- [18] Han X, Jiang Y H, Frigg A, et al. Mode and polarization-division multiplexing based on silicon nitride loaded lithium niobate on insulator platform[J]. Laser & Photonics Reviews, 2022, 16(1): 2100529.
- [19] Cheben P, Halir R, Schmid J H, et al. Subwavelength integrated photonics[J]. Nature, 2018, 560(7720): 565-572.
- [20] Tong X C. Functional metamaterials and metadevices[M]. Cham: Springer, 2018.
- [21] 唐剑雄, 龚岩栋, 庞恺. 二维超构表面: 超透镜应用及研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(21): 2100004.
Tang J X, Gong Y D, Pang K. Two-dimensional metasurface: application and research progress of metalens[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(21): 2100004.
- [22] Ohana D, Levy U. Mode conversion based on dielectric

- metamaterial in silicon[J]. *Optics Express*, 2014, 22(22): 27617-27631.
- [23] Men H, Lee K Y K, Freund R M, et al. Robust topology optimization of three-dimensional photonic-crystal band-gap structures[J]. *Optics Express*, 2014, 22(19): 22632-22648.
- [24] Shiratori R, Nakata M, Hayashi K, et al. Particle swarm optimization of silicon photonic crystal waveguide transition[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(8): 1904-1907.
- [25] Kang S T, Zhang R, Hao Z Z, et al. High-efficiency chirped grating couplers on lithium niobate on insulator[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(24): 6651-6654.
- [26] Liu Z C, Zhu D Y, Rodrigues S P, et al. Generative model for the inverse design of metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2018, 18(10): 6570-6576.
- [27] Kojima K, Tahersima M H, Koike-Akino T, et al. Deep neural networks for inverse design of nanophotonic devices[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(4): 1010-1019.
- [28] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C]// *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, November 27-December 1, 1995, Perth, WA, Australia. New York: IEEE Press, 2002: 1942-1948.
- [29] Piggott A Y, Lu J, Lagoudakis K G, et al. Inverse design and demonstration of a compact and broadband on-chip wavelength demultiplexer[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(6): 374-377.

Compact Lithium Niobate Waveguide Mode Converter Employing Metasurface Structure

Wang Lin, Gao Yang, Shi Hao, Zhang Lei*, Yin Kun**

Research Institute of Intelligent Networks, Zhejiang Lab, Hangzhou 311121, Zhejiang, China

Abstract

Objective With the development of informatization, there is a growing demand for information transmission and processing. In this situation, it becomes urgent to increase the channel capacity. Currently, there are multiple multiplexing techniques available to enhance channel capacity, such as wavelength division multiplexing, polarization multiplexing, and mode division multiplexing (MDM). Among them, MDM utilizes different modes and polarizations of light to carry data and parallelly transmits multiple data channels in optical waveguides or fibers using only a single wavelength laser source, which can be seen as a new dimension to expand the capacity of optical fiber communication. The lithium niobate-on-insulator (LNOI) platform, with its strong electro-optic effect, low material loss, and wide transparent window, can achieve high-speed electro-optic modulators and optical nonlinear devices while providing high refractive index contrast waveguides, which thus makes it capable of manufacturing high-speed and high-density on-chip optical devices. However, there are few reports on MDM devices on LNOI platforms, and they mainly focus on the principle of phase matching of directional couplers loaded with LNOI platforms with silicon nitride. Although the mode converter based on the principle of phase matching of directional couplers has low processing difficulty and good scalability, it may have the problem of a relatively large footprint, which is not conducive to large-scale on-chip integration.

Methods According to the coupled mode theory, when light propagates in a medium, the energy of the light field can be coupled from one mode to another mode by designing the appropriate medium structure. In this process, the perturbation of the medium structure not only satisfies the phase matching requirement of the two converting modes along the propagation direction of the z -axis but also has an appropriate refractive index distribution in the lateral direction to obtain an appropriate coupling coefficient and achieve a shorter coupling length. Metasurfaces are two-dimensional artificial materials with subwavelength features that can manipulate the phase, amplitude, and polarization of light waves at subwavelength scales through a special refractive index distribution. Integrating metasurfaces into optical waveguides can help deal with the relatively large footprint of converters based on the principle of phase matching of directional couplers, which is not conducive to large-scale on-chip integration. By leveraging the subwavelength-scale manipulation of light waves offered by metasurface structures, this study proposes a compact lithium niobate (LN) waveguide mode converter that can achieve TE_0 - TE_1 or TE_0 - TE_2 conversion in LN waveguides. In order to achieve coupling between modes, a reverse design method is adopted, and three-dimensional (3D) electromagnetic field simulation is utilized to optimize the subwavelength periodic stripe etching structure parameters of the device, so as to meet the phase matching requirements along the propagation direction and the lateral direction refractive index distribution with a high coupling coefficient.

Results and Discussions Figure 3 shows the top view of the designed TE_0 - TE_1 LN waveguide mode converter, the simulated modal field distribution, insertion loss, and crosstalk between modes, as well as the modal field distribution of the cross-sectional planes that are perpendicular to the propagation directions at the input and output. It can be seen that the energy of the TE_0 mode gradually decreases during propagation and is gradually converted into that of the TE_1 mode.

Within the bandwidth of 1400–1700 nm, the insertion loss is less than 0.8 dB, with a minimum of 0.3 dB at 1520 nm; the crosstalk between modes is less than -10 dB, with a minimum of -38 dB at 1473 nm, and the extinction ratio is 37.3 dB. The low crosstalk between modes means that most of the energy of the TE_0 mode is converted into the energy of the TE_1 mode, and the energy loss is not significant, thus making the mode converter suitable for the field of optical communication. To demonstrate the scalability of this design, the TE_0 - TE_2 mode conversion design is also presented in Fig. 4. It shows that the energy of the TE_0 mode gradually decreases during propagation and is gradually converted into that of the TE_2 mode. Within the bandwidth of 1400–1700 nm, the insertion loss is less than 2.4 dB, and the crosstalk between modes is less than -10 dB. The low crosstalk between modes means that most of the energy of the TE_0 mode is converted into the energy of the TE_2 mode, and the energy loss is not significant. In order to evaluate the effect of process errors on the performance of the designed structure and ensure the reproducibility of the device, finite-difference time-domain (FDTD) simulations of the insertion loss and crosstalk between modes in TE_0 - TE_1 and TE_0 - TE_2 mode conversions are carried out for processing errors of the etching groove width d and etching groove sidewall angle α (Figs. 5–8). It can be seen that the designed device has good tolerance to process errors in d and α .

Conclusions This study proposes a compact LN waveguide mode converter based on metasurface structures, which can achieve TE_0 - TE_1 and TE_0 - TE_2 conversions. In order to achieve efficient coupling between modes, a reverse design method is adopted, and 3D electromagnetic field simulation is utilized to optimize the parameters of the tilted periodic sub-wavelength stripe etching structure of the device, which complies with the phase matching requirements of mode conversion along the propagation direction and the transverse refractive index distribution requirements of short coupling length. Simulation results show that the device has an insertion loss of less than 0.8 dB and crosstalk between modes of less than -10 dB in the wavelength range of 1400–1700 nm for TE_0 - TE_1 conversion, with a conversion length of about 20 μm . In addition, the device has good scalability and process tolerance for higher-order mode conversion, making it a good candidate for mode converters in high-density integrated MDM systems in future LNOI.

Key words optical devices; mode converter; integrated photonic device; lithium niobate