

激光与光电子学进展

基于 V 形硅的薄膜铌酸锂波导模式转换器

张程¹, 徐银^{1,2}, 董越^{1,2}, 张博^{1,2}, 倪屹^{1,2*}¹江南大学物联网工程学院, 江苏 无锡 214122;²江南大学先进技术研究院, 江苏 无锡 214122

摘要 模式转换器承担着波导基模到高阶模的转换任务,是片上多模光传输、模分复用传输的重要器件。基于薄膜铌酸锂平台,提出一种利用 V 形硅阵列的薄膜铌酸锂波导模式转换器,转换结构主要包括沿光传输方向排布的 V 形硅阵列,位于薄膜铌酸锂波导顶部。基于上述结构进行详细的设计与优化分析,在中心波长为 1550 nm、转换长度仅为 11 μm 的情况下,实现了输入 TE_0 模到输出 TE_1 模的高效转换。模式转换效率为 96.8%,串扰为 -28.6 dB,插入损耗为 0.78 dB。进一步对转换结构进行横向扩展,实现了输入 TE_0 模到输出 TE_2 模的高效转换。模式转换效率为 91.3%,串扰为 -14.3 dB,插入损耗为 1 dB。若继续扩展,可获得其他高阶模。本器件及设计方法有望在薄膜铌酸锂波导多模光传输方向发挥优势,推动薄膜铌酸锂光子集成器件及回路的发展。

关键词 集成光学; 集成光器件; 光波导; 铌酸锂; 微光学器件

中图分类号 TN252 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230829

Lithium Niobate Waveguide Mode Converter Based on V-Shaped Silicon

Zhang Cheng¹, Xu Yin^{1,2}, Dong Yue^{1,2}, Zhang Bo^{1,2}, Ni Yi^{1,2*}¹School of IoT Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China;²Institute of Advanced Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China

Abstract Mode converter, achieving the mode conversion task from fundamental mode to higher-order mode, is a key component for the on-chip multimode transmission and mode division multiplexing transmission. Here, we propose an array of V-shaped silicon mode converter based on the thin film lithium niobate (TFLN) waveguide. The mode conversion structure is consisted of an array of V-shaped silicon, where it is deposited atop the TFLN waveguide. Based on such structure, we conduct detailed structural analyses and optimizations, where the required conversion length is only 11 μm and the central wavelength is 1550 nm for the mode conversion from input TE_0 mode to output TE_1 mode. The mode conversion efficiency, crosstalk, and insertion loss are 96.8%, -28.6 dB, and 0.78 dB, respectively. We further extend the device structure and obtain the mode conversion from input TE_0 mode to output TE_2 mode in the same length, where the mode conversion efficiency, crosstalk, and insertion loss are 91.3%, -14.3 dB, and 1 dB, respectively. If we further extend the device structure, other higher-order modes can also be obtained. We believe the proposed device structure and scheme could benefit the multimode transmission for the TFLN waveguide and boost the development of photonic integrated components and circuits based on the TFLN platform.

Key words integrated optics; integrated optics devices; waveguides; lithium niobate; micro-optical devices

1 引言

薄膜铌酸锂具备高电光系数,优异的压电、弹光、非线性特性以及稳定的物理和化学性质,受到了人们重点关注,薄膜铌酸锂晶圆(LNOI wafer)目前已被成功商业化应用,推动集成光子学进入了新的发展时

期^[1-4]。宽带、大容量、高速率片上光互连是集成光子学的目标,而复用技术(如波分复用、偏振复用、模分复用)是实现上述目标的关键所在^[5-8]。对于片上光互连,模分复用是一种更为有效提升传输容量的方法,其可摆脱波分复用对昂贵多波长激光器的需求及偏振复用仅有两个复用维度的限制^[9-11]。因此,通过复

收稿日期: 2023-03-10; 修回日期: 2023-04-10; 录用日期: 2023-04-20; 网络首发日期: 2023-04-29

基金项目: 国家自然科学基金(62205129)、江苏省自然科学基金(BK20200592)、中央高校基本科研基金(JUSRP12024)

通信作者: *8073110160@jiangnan.edu.cn

用多个高阶光波导模式可实现片上传输容量的倍增。高阶光波导模式的产生与复用成为了模分复用的关键所在,也是薄膜铌酸锂光子集成电路所要解决的问题。

2020年,Kaushalram等^[12]提出一种可实现 TM_0 - TE_1 的LNOI模式转换器,转换效率为99.5%,器件长度为500 μm ;2021年,Xu等^[13]设计了一种锥形LNOI基模转换器,可以实现 TM_0 - TE_0 的转换,转换效率为99%,器件长度为100 μm ;2021年,Yang等^[14]提出一种LNOI偏振模式转换器,可实现 TE_0 - TM_1 与 TM_1 - TE_0 的模式转换,转换效率为97%,器件长度为3 mm;2022年,Jiang等^[15]设计了一种可实现 TE_0 - TE_1 与 TE_0 - TE_2 的三波导LNOI模式转换器,转换效率为99%,器件长度为65 μm 。以上设计方案仅能实现一种或两种转换,器件的扩展性能不高,且器件长度都在60 μm 以上,不能满足小尺寸紧凑型器件的需求。

针对以上问题,本文提出一种利用V形硅阵列设计的薄膜铌酸锂光波导模式转换器。通过设计优化,在转换长度仅为11 μm 的情况下,器件能够实现输入 TE_0 模到输出 TE_1 模与 TE_2 模的转换。若进一步对器

件进行横向扩展,还可以实现更高阶模式的转换,展现出较好的功能扩展性。本器件有望用于薄膜铌酸锂光波导的高阶模式转换,进而实现薄膜铌酸锂光子集成电路的模分复用、多模光传输等^[16-18]。

2 器件结构与工作原理

2.1 器件结构

图1为所提利用V形硅阵列作为超表面设计的薄膜铌酸锂光波导模式转换器示意图,选用400 nm厚的Z切薄膜铌酸锂,器件工作于TE偏振态。该器件输入输出波导为普通的薄膜铌酸锂脊型波导,模式转换区波导的顶部加入了V形硅阵列。该超表面的引入可改变转换区薄膜铌酸锂波导的折射率分布,从而产生较大的模式相位差,进而改变光场实现高阶模式产生。输入输出脊型波导的顶部宽度为3.2 μm ,底部倾角 $\alpha=50^\circ$,两侧平板层厚度为100 nm。硅阵列的参数如下:V形硅宽度为 w (x 方向);厚度为 h ;周期为 T ;周期数为 N ;硅超表面中心轴与薄膜铌酸锂波导宽度中心轴 O' 之间的间距为 y ;V形硅的凹陷距离为 d ,V形硅的长度 l 固定为1 μm 。

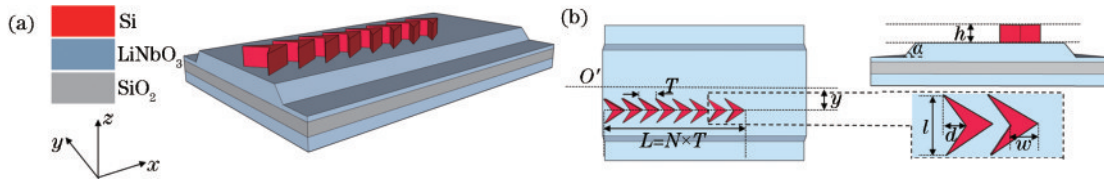


图1 基于V形硅阵列的薄膜铌酸锂光波导模式转换器。(a)示意图;(b)俯视及正视图

Fig. 1 The proposed LNOI-based waveguide mode converter using V-shaped silicon. (a) Schematic; (b) top and side view

2.2 工作原理

所设计的模式转换器,其工作原理是利用超表面结构改变波导的局部折射率,从而使光在传播过程中产生相位差。当相位差累积至 π 时,就能实现低阶模到高阶模的转换。具体地,在本设计中,转换区波导的顶部沿传播方向加入了折射率较高的V形硅阵列,这将显著改变模式转换区的材料折射率分布,从而导致输入模场在进入转换区之后产生明显改变。比如当输入 TE_0 模进入转换区之后,因材料折射率差异大及结构非对称性,输入 TE_0 模将被分裂为两个 TE_0 模光束,其中一个 TE_0 模位于无硅超表面的区域,另一个 TE_0 模位于有硅超表面的区域,两区域所对应的模式传播常数不同。接着通过光传输,两区域的 TE_0 模将逐渐积累相位差^[16],当相位差达到 π 时,两区域的模式合成之后即为 TE_1 模(相当于两个相位相反的 TE_0 模)^[19-21]。基于上述原理,重点设计、分析并优化器件结构参数以实现片上高效模式转换。

为了论证器件的模式转换效果,采用模式转换效率(CE)、串扰(CT)及插入损耗(IL)来量化表征器件的模式转换性能^[22](从输入 TE_0 模到输出 TE_1 模的转换)。其中,模式转换效率的表达式为

$$E_{CE} = \frac{P_{TE_1}}{P_O} \times 100\%, \quad (1)$$

式中: P_{TE_1} 、 P_O 分别表示输出端口接收 TE_1 模式的能量以及输出端口总能量。模式串扰的表达式为

$$T_{CT} = 10 \log_{10} \frac{P_{TE_0}}{P_{TE_1}}, \quad (2)$$

式中: P_{TE_0} 表示输出端口接收 TE_0 模式的能量。需要注意的是,在本器件中,虽然其他高阶模式也会被激励,但模式能量很低,所以主要的模式串扰来自于 TE_0 模。插入损耗的表达式为

$$L_{IL} = -\log_{10} \frac{P_{TE_1}}{P_I}, \quad (3)$$

式中: P_I 表示输入端的总能量。接下来以上述性能参数为设计依据,围绕硅纳米线光栅、相变材料矩形纳米线及薄膜铌酸锂波导的结构参数,开展器件结构及性能研究。

3 分析与讨论

基于上述器件工作原理及量化性能参数,采用三维时域有限差分法(3D-FDTD)对器件结构进行设计、分析与优化^[23]。下面从硅阵列、脊型薄膜铌酸锂波导及器件的功能可扩展性方面对所提器件进行详细分

析,以期实现尺寸小、模式转换效率高、串扰低、插入损耗低、具备功能扩展性的薄膜铌酸锂波导模式转换器。

3.1 V形硅阵列结构设计

3.1.1 硅阵列整体偏离距离 y 对器件性能的影响

为实现输入 TE_0 模到输出 TE_1 模的转换,根据器件的工作原理,器件结构需采用非对称设计以产生两个不同模式传播常数的区域。据此,硅超表面应以非对称的方法沉积于薄膜铌酸锂波导的上方,硅阵列中心轴与薄膜铌酸锂波导宽度中心轴的最优间距 y 需确定。在参数优化前,相关参数的初始取值如下:周期数 $N=18$,周期 $T=0.5 \mu\text{m}$,凹陷距离 $d=0.8 \mu\text{m}$,宽度 $w=400 \text{ nm}$,厚度 $h=200 \text{ nm}$ 。图 2 分析了当波长在 $1450\sim 1650 \text{ nm}$ 之间时,器件性能对偏移距离 y 的依赖关系。可以发现,模式转换效率、模式串扰和插入损耗

对偏离距离 y 的变化较为敏感。随着 y 的增大,各项性能均大幅改善,然而当 y 超过 $0.9 \mu\text{m}$ 时,器件性能下降,偏离距离 $y=0.9 \mu\text{m}$ 是性能反转点。同时,分析波长变化对性能的影响时可以发现,偏离距离 y 越靠近性能反转点,如 $y=0.7 \mu\text{m}$ 或 $y=1.1 \mu\text{m}$,器件性能越容易受到波长变化的影响,尤其是模式串扰对波长变化尤其敏感。其中,在中心波长 $\lambda=1550 \text{ nm}$ 附近, $y=[0.7 \mu\text{m}, 0.9 \mu\text{m}]$ 时,转换效率、模式串扰以及插入损耗均能取到较优值。

此外,从图 2 可以看到,模式转换效率最高为 92.1% ,串扰最低为 -21.1 dB ,损耗最低为 1.16 dB ,但以上最优值都在工作波长 $\lambda=1600 \text{ nm}$ 附近达到。如何使器件在中心波长 $\lambda=1600 \text{ nm}$ 时取得最优性能是亟待解决的问题。

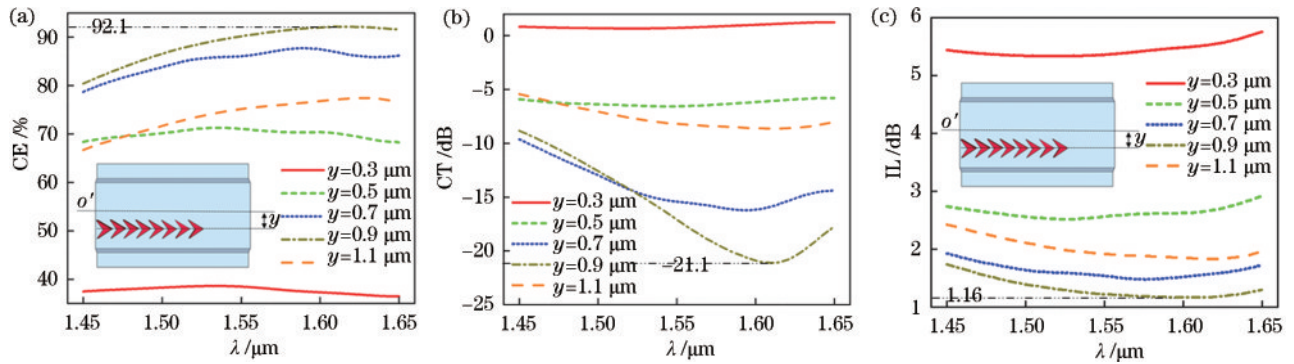


图 2 阵列偏离距离 y 对器件性能的影响。(a)模式转换效率;(b)模式串扰;(c)插入损耗

Fig. 2 Device performance dependent on the deviation distance y of the array. (a) Mode conversion efficiency; (b) mode crosstalk; (c) insertion loss

3.1.2 V形硅周期数 N 和周期 T 对器件性能的影响

对于硅阵列而言,阵列周期数和周期是一对重要参数,直接决定了器件的模式转换长度 ($L=NT$)。而在长为 L 的模式转换区内,波导表面的硅阵列破坏了波导材料均匀性,使该区域形成一个等效的高折射率区,因此输入 TE_0 模式被一分为二,即初始相位差为 0 的两束光。由于存在高折射率区域,两束光在波导中传播时将产生相位差。随着硅阵列周期数 N 与周期 T 的增加,转换区长度 L 增加,这将增加光束之间的相位差积累。为此,图 3 分析了周期数 N 以及周期 T 对器件性能的影响。其中,偏离距离 $y=0.9 \mu\text{m}$,凹陷距离 $d=0.8 \mu\text{m}$,宽度 $w=400 \text{ nm}$,厚度 $h=200 \text{ nm}$ 。从图 3(a)、(d) 可以看出,周期数 N 为 18 和 20 时,模式转换效率整体高于其他取值。在这该两幅图中,用菱形标记标出了转换效率的峰值, $N=20$ 时,效率最高能达到 93% ,而对于其他取值的周期数 N ,转换效率均在 91% 以下,因此 $N=18, 20$ 是性能反转点。

此外,观察菱形标记可以发现,转换效率的峰值是随着周期 T 的变化而移动的,具体是,随着周期 T 的增大,转换效率的峰值朝着短波方向移动。如 $N=18$ 时: $T=450 \text{ nm}$,转换效率的峰值在 $\lambda=1620 \text{ nm}$ 附近; $T=$

500 nm ,转换效率的峰值在 $\lambda=1500 \text{ nm}$ 附近; $T=550 \text{ nm}$ 及 $T=600 \text{ nm}$,转换效率的峰值已经到 1450 nm 以内了。 $N=20$ 的情况与之类似。后续分析中,可以通过调整周期 T ,使得器件转换效率最优值对应的波长范围偏移至中心波长。

与此同时,关注插入损耗的情况,可以看到,当 N 介于 $18\sim 20$ 之间时,插入损耗整体较低,当 $N=20$ 、 $T=[500 \text{ nm}, 550 \text{ nm}]$ 、工作波长在 1620 nm 附近时,插入损耗低于 1.25 dB 。而 N 为其他值时,不论 T 如何变化,插入损耗都在 1.5 dB 以上。

3.1.3 V形硅宽度 w 和凹陷距离 d 对器件性能的影响

本小节重点分析并确定 V 形硅的宽度 w 与凹陷距离 d ,其中,偏离距离 $y=0.9 \mu\text{m}$, $N=20$,周期 $T=500 \text{ nm}$,厚度 $h=200 \text{ nm}$ 。图 4(a)~(e) 为所提器件的模式转换效率及器件插入损耗在不同的宽度 w 和距离 d 时随波长的变化关系。由于凹陷距离 d 的初始值为 $0.8 \mu\text{m}$,所以从图 4(a) 可以发现,在中心波长附近,随着 w 的增加,器件性能呈现出先增后减的趋势,其中, $w=400 \text{ nm}$ 是上述趋势的反转点。结合图 4(b)~(e) 可以看出,不同的距离 d 均存在某一宽度 w 值,使

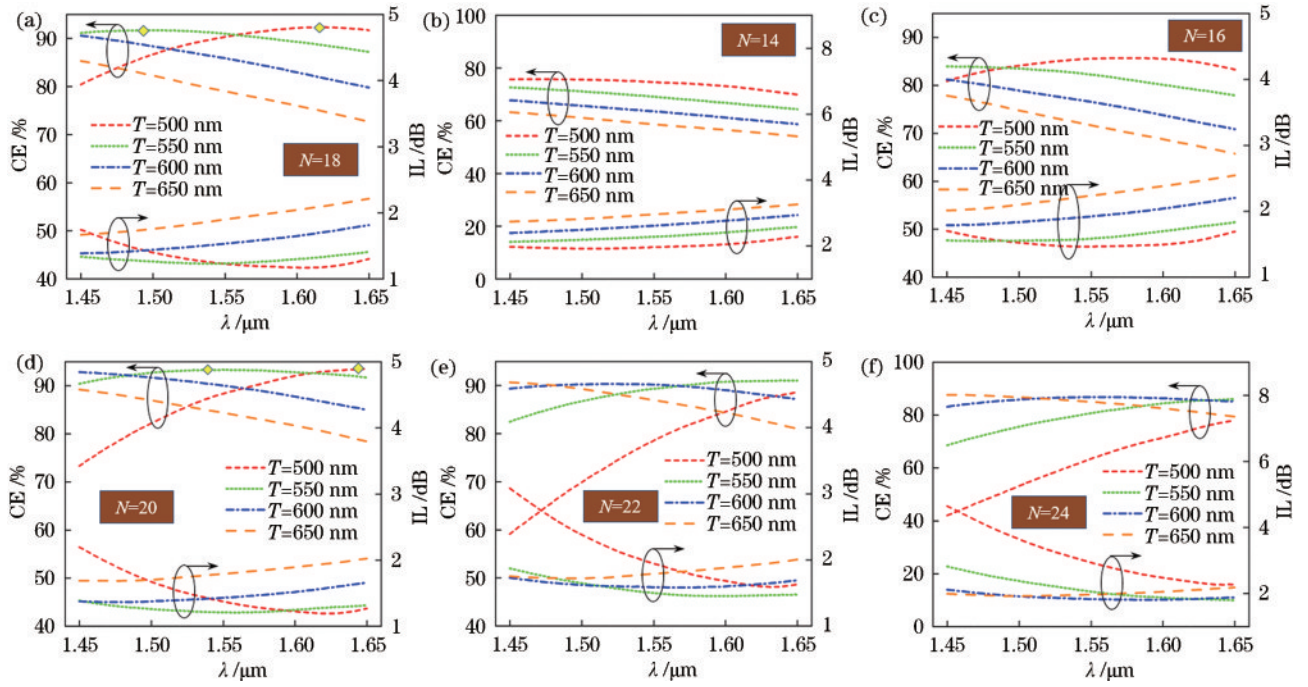


图 3 V 形硅周期数 N 及周期 T 对器件性能的影响。(a) $N=18$; (b) $N=14$; (c) $N=16$; (d) $N=20$; (e) $N=22$; (f) $N=24$
 Fig. 3 Device performance dependent on the period number N and period T of the V-shaped silicon. (a) $N=18$; (b) $N=14$; (c) $N=16$; (d) $N=20$; (e) $N=22$; (f) $N=24$

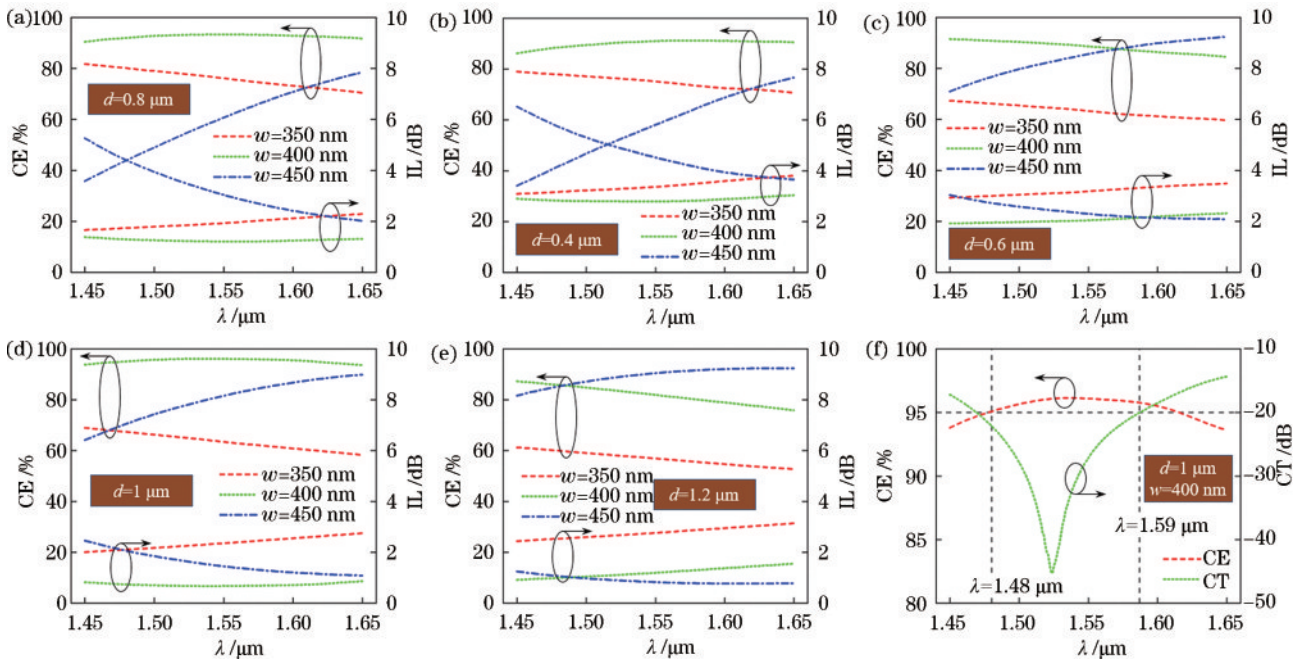


图 4 V 形硅宽度 w 与凹陷距离 d 对器件性能的影响。(a) $d=0.8 \mu\text{m}$; (b) $d=0.4 \mu\text{m}$; (c) $d=0.6 \mu\text{m}$; (d) $d=1 \mu\text{m}$; (e) $d=1.2 \mu\text{m}$; (f) $d=1 \mu\text{m}$, $w=400 \text{ nm}$
 Fig. 4 Width w and sag length d of the V-shaped silicon affecting on the device performance. (a) $d=0.8 \mu\text{m}$; (b) $d=0.4 \mu\text{m}$; (c) $d=0.6 \mu\text{m}$; (d) $d=1 \mu\text{m}$; (e) $d=1.2 \mu\text{m}$; (f) $d=1 \mu\text{m}$, $w=400 \text{ nm}$

得器件性能反转。

与此同时,横向对比图 4(a)~(e),可以看到,器件性能随凹陷距离 d 改变的表现。以 $w=400 \text{ nm}$ 为例,随着距离 d 的增加,可以看到在中心波长附近,器件转换效率先增后减,插入损耗先小后大,转换效率和插入损耗均

在 $d=1 \mu\text{m}$ 时反转。其中,插入损耗对距离 d 的变化更敏感,以 $w=400 \text{ nm}$ 为例,随着 d 从 $0.4 \mu\text{m}$ 增至 $1 \mu\text{m}$,插入损耗从高于 2 dB 降至 1 dB 以内,插入损耗提升明显。当 $d=1 \mu\text{m}$, $w=400 \text{ nm}$ 时,转换效率在波长 $\lambda=1537 \text{ nm}$ 附近达到最高值 96.2% ,插入损耗为 0.7 dB 。

此外,图 4(f)展示了 $d=1\ \mu\text{m}$ 、 $w=400\ \text{nm}$ 时,转换效率和模式串扰的变化曲线,可以发现,两条曲线的走势呈反相关,这就表明器件能够在取得较高的转换效率的同时获得较低的模式串扰。从图中可以看到,在波长介于 $1480\sim 1590\ \text{nm}$ 之间时,器件的转换效率大于 95% ,而模式串扰小于 $-20\ \text{dB}$ 。

3.1.4 硅阵列厚度 h 对器件性能的影响

本部分研究硅阵列厚度 h 对模式转换性能的影响,其中,已确定的参数如下: $N=20$, $T=500\ \text{nm}$, $y=0.9\ \mu\text{m}$, $d=1\ \mu\text{m}$, $w=400\ \text{nm}$ 。图 5(a)~(e)分析了器件性能对硅阵列厚度 h 的依赖关系, h 的范围为 $100\sim 300\ \text{nm}$ 。从图 5 可以看到,在该范围内,阵列厚度 h 对器件性能的影响较大。由图 5(a)可知,随着周期 T 的增加,器件性能减弱,具体表现为转换效率降低、插入

损耗升高。由于已经分析研究过周期 T 的特性,这里不必担心周期 T 对器件性能的影响,在其他参数确定后,通过调节周期 T ,可以使得器件在中心波长处取得较高的性能。

同时,横向对比图 5(a)~(e)可以发现,随着厚度 h 的增加,器件性能先提高后降低。 $h=200\ \text{nm}$ 时,在中心波长附近,转换效率最高达 96.2% ,插入损耗为 $0.7\ \text{dB}$; $h=250\ \text{nm}$ 时, $\lambda=1625\ \text{nm}$ 附近,转换效率最高为 97.2% ,插入损耗为 $0.76\ \text{dB}$ 。即厚度 $h=[200\ \text{nm}, 250\ \text{nm}]$ 时,器件性能较高。图 5(f)展示了 $h=250\ \text{nm}$ 、 $T=500\ \text{nm}$ 时,转换效率和模式串扰的变化情况,可以看到,转换效率和模式串扰性能呈正相关, λ 介于 $1570\ \text{nm}\sim 1650\ \text{nm}$ 之间时,器件的转换效率大于 95% ,而模式串扰小于 $-19\ \text{dB}$ 。

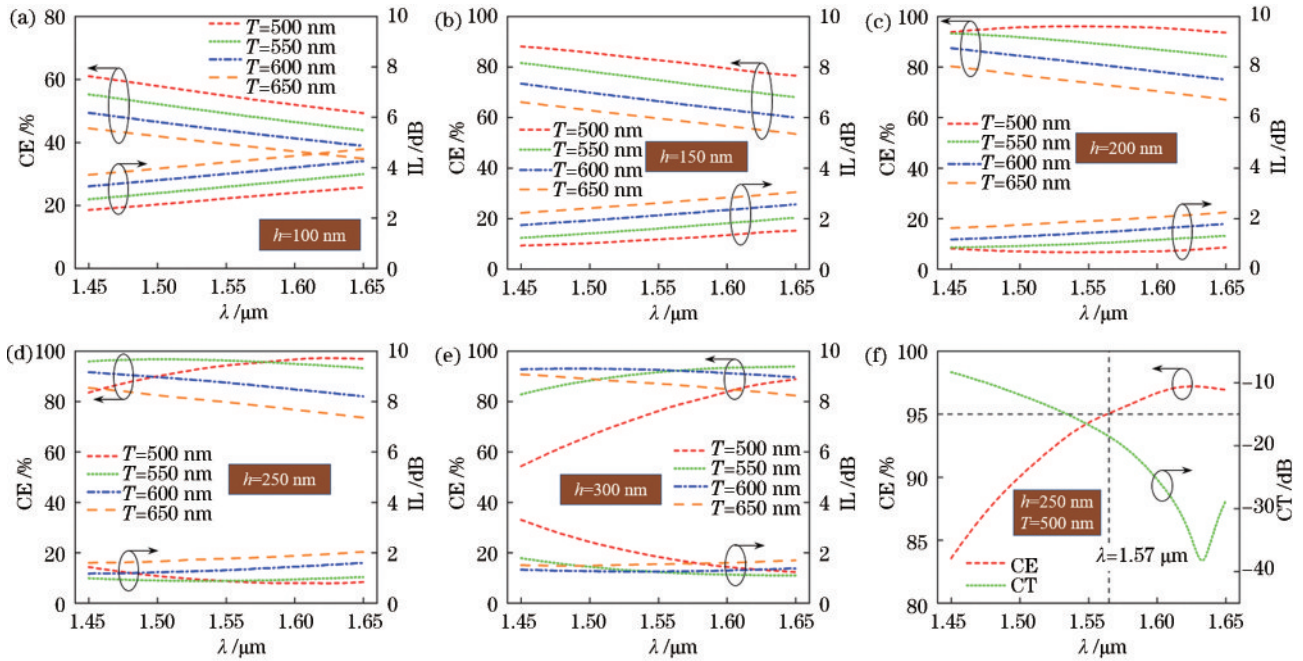


图 5 硅阵列厚度 h 对器件性能的影响。(a) $h=100\ \text{nm}$; (b) $h=150\ \text{nm}$; (c) $h=200\ \text{nm}$; (d) $h=250\ \text{nm}$; (e) $h=300\ \text{nm}$; (f) $h=250\ \text{nm}$, $T=500\ \text{nm}$

Fig. 5 Device performance dependent on the thickness h of the silicon array. (a) $h=100\ \text{nm}$; (b) $h=150\ \text{nm}$; (c) $h=200\ \text{nm}$; (d) $h=250\ \text{nm}$; (e) $h=300\ \text{nm}$; (f) $h=250\ \text{nm}$, $T=500\ \text{nm}$

针对最优性能对应的波长范围偏离中心波长的现象,通过优化周期 T ,在性能损失较小的情况下,实现高性能对应波长范围的整体移动。图 6(a)展示了随着周期 T 增加,转换效率的变化情况。可以看到,随着周期 T 增大,转换效率的峰值(菱形标记)会左移,即向短波方向移动。当 $T=530\ \text{nm}$ 时,转换效率的峰值在 $\lambda=1530\ \text{nm}$ 附近,此时,在中心波长 $\lambda=1550\ \text{nm}$ 处,转换效率为 96.8% ,高于其他周期。图 6(b)展示了 $T=530\ \text{nm}$ 时,器件性能(CE、CT、IL)随波长的变化情况,可以看到,在中心波长处插入损耗取到较低值 $0.78\ \text{dB}$ 。然而模式串扰对应的最低值有明显的左移,导致在中心波长处不能取到最低值,但此时串扰值依然较低, $\lambda=1550\ \text{nm}$ 处,模式串扰为 $-28.6\ \text{dB}$ 。另外,当工作

波长 $\lambda=[1480\ \text{nm}, 1600\ \text{nm}]$ 时,模式转换效率大于 96% 、模式串扰小于 $-20\ \text{dB}$ 且插入损耗小于 $1\ \text{dB}$,工作带宽约为 $120\ \text{nm}$ 。

综上所述,通过对模式转换区波导顶部的 V 形硅超表面展开优化分析,确定了器件的关键结构参数,具体如表 1 所示。基于上述确定的结构参数,再对器件进行传输仿真,具体如图 7 所示。从图 7 可以看出,输入 TE_0 模在进入模式转换区之后,产生了模式分裂并在两个传输区域中分别进行模式传输,因两区域中的模式传播常数不同,两区域中传输的模式之间逐渐产生了相位差,当积累的相位差达到 π 时,两区域模式合成即为 TE_1 模,最终在器件输出端可获得高性能的 TE_1 模。其中,铌酸锂脊波导宽 $3.2\ \mu\text{m}$,模式转换区长

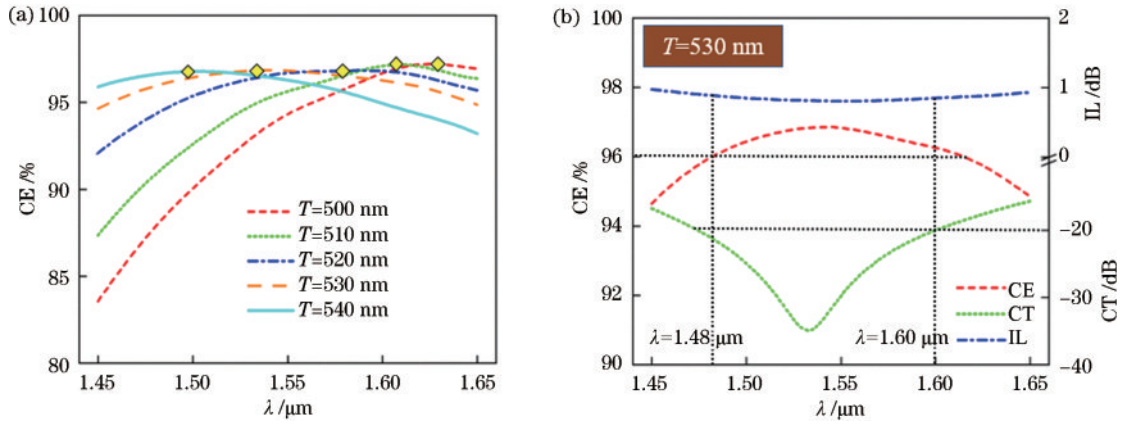
图 6 周期 T 对器件性能的改善。(a)模式转换效率;(b)带宽分析

Fig. 6 The improvement effect of period T on device performance. (a) Mode conversion efficiency; (b) bandwidth analysis

表 1 所提薄膜铌酸锂光波导 TE_0 -to- TE_1 模式转换器结构参数
Table 1 Structural parameters of proposed TFLN waveguide based TE_0 -to- TE_1 mode converter

Parameter	T / nm	α / ($^\circ$)	d / μm	w / nm	y / μm	h / nm	N
Value	530	50	1	400	0.9	250	20

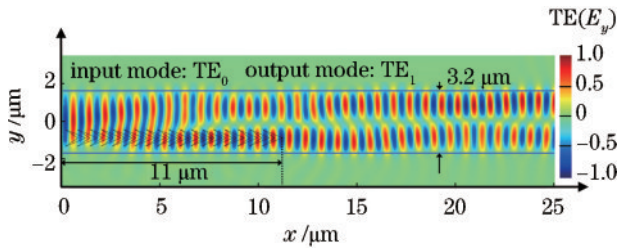


图 7 所提薄膜铌酸锂光波导 TE_0 -to- TE_1 模式转换器
传输电场图

Fig. 7 Electric field evolution of the proposed TFLN waveguide based TE_0 -to- TE_1 mode converter

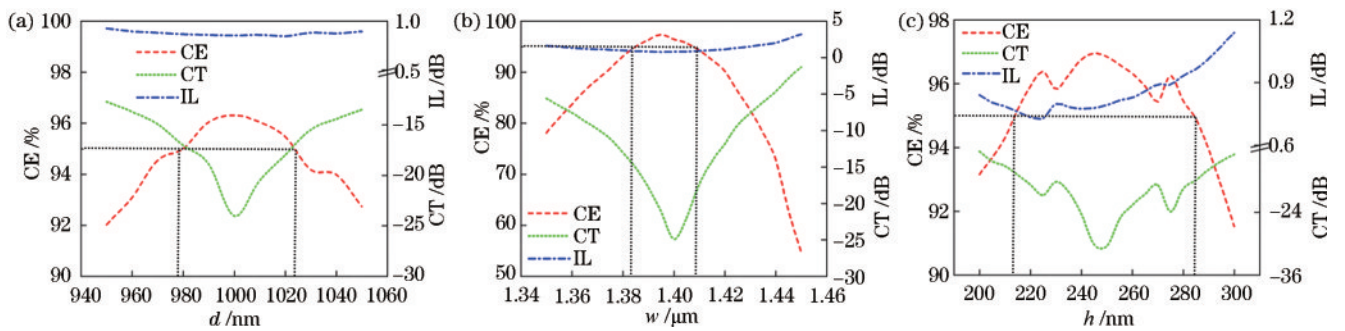
图 8 关键尺寸对器件性能的影响。(a)凹陷距离 d ;(b)宽度 w ;(c)厚度 h

Fig. 8 Device performance dependent on key dimensions. (a) Sag length d ; (b) width w ; (c) thickness h

3.3 器件功能可扩展性研究

最后,分析器件是否具备功能可扩展性。在前述分析中,重点设计并优化分析了在薄膜铌酸锂平台上实现输入 TE_0 模到输出 TE_1 模的高效转换(TE_0 -to- TE_1),这也是目前多数模式转换器要解决的问题^[24-27]。然而,面对片上模分复用、多模光传输等技术的发展需

求,同样需要更高阶的光波导模式(例如: TE_2 、 TE_3 等)。为此,在上述器件的基础上,进一步研究输入 TE_0 模到输出 TE_2 模的高效转换(TE_0 -to- TE_2),具体的器件结构设计参照 TE_0 -to- TE_1 模式转换器,将结构设计成对称型以满足三区域模式传输的需要且输出 TE_2 模为对称模。具体结构参数如表 2 所示,器件模式转

3.2 器件加工误差分析

对于器件的制作,由于所提超表面结构仅使用硅一种材料,所以超表面的加工只需要一步光刻和蚀刻工艺。以下针对器件的加工公差进行了分析研究。图 8 展示了中心波长处, V 形硅的凹陷距离 d 、宽度 w 、厚度 h 的性能曲线,从中可以确定相关参数的加工公差。可以看到,当这些参数偏离其最佳值时,器件性能会下降。尤其是宽度 w ,随着 w 偏离 $1.4 \mu\text{m}$,器件性能(CE、CT、IL)快速下滑。因此,为了同时保持模式转换效率大于 95%、模式串扰小于 -15 dB、插入损耗小于 0.9 dB,允许的尺寸范围分别为: $d=[980 \text{ nm}, 1025 \text{ nm}]$ 、 $w=[1385 \text{ nm}, 1410 \text{ nm}]$ 、 $h=[215 \text{ nm}, 285 \text{ nm}]$ 。上述结果对实际器件的制作具有一定的指导意义。

表 2 所提薄膜铌酸锂光波导 TE_0 -to- TE_2 模式转换器结构参数
Table 2 Structural parameters of proposed TFLN waveguide based TE_0 -to- TE_2 mode converter

Parameter	$T /$ nm	$\alpha /$ ($^\circ$)	$d /$ μm	$w /$ nm	$y /$ μm	$h /$ nm	N
Value	500	50	1	400	1.4	250	20

换区长度同为 $11 \mu\text{m}$, 但波导宽度增加至 $4.5 \mu\text{m}$, 对应的模式转换效率为 91.3% , 模式串扰为 -14.3 dB , 插入损耗为 1.0 dB 。图 9 为器件的传输电场图。可以看出, 输入 TE_0 模通过模式转换区之后可较好地转变为 TE_2 模, 在薄膜铌酸锂平台上实现了输入 TE_0 模到输出 TE_2 模的转换且转换长度仅为 $11 \mu\text{m}$, 展现出了较好的功能扩展性。若进一步增加波导宽度, 按照奇数阶模与偶数阶模的特点^[28]设计模式转换区结构, 所提器件方案有望实现更高阶模式的转换输出。因此, 基于所提器件的性能、尺寸及功能可扩展性优势, 相信该器件将有助于推动薄膜铌酸锂多模光子集成器件的发展。

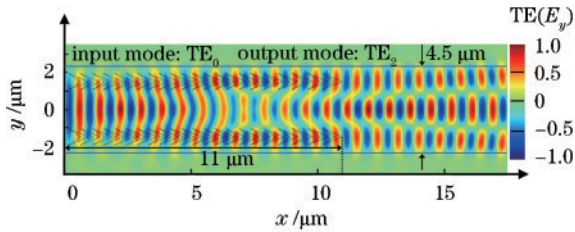


图 9 所提薄膜铌酸锂光波导 TE_0 -to- TE_2 模式转换器传输电场图
Fig. 9 Electric field evolution of the proposed TFLN waveguide based TE_0 -to- TE_2 mode converter

4 结 论

针对薄膜铌酸锂光波导多模光传输对高阶模式转换的需求, 提出一种利用 V 形硅超表面设计的薄膜铌酸锂光波导模式转换器, 在模式转换区波导的顶部沉积 V 形硅阵列。具体转换结构如下: V 形硅阵列沿光传输方向排布, 相对于底部的薄膜铌酸锂光波导以非对称的方式设计。通过分析 & 优化设计, 在波导转换区长度仅为 $11 \mu\text{m}$ 的情况下, 实现了输入 TE_0 模到输出 TE_2 模的转换且模式转换效率为 96.8% , 串扰为 -28.6 dB , 插入损耗为 0.78 dB 。保持转换长度不变, 仅通过横向扩展, 本器件可实现输入 TE_0 模到输出 TE_2 模的转换; 若进一步对结构进行扩展, 可实现其他高阶模的转换输出, 该设计展现出较好的功能扩展性。希望所提设计方案能够在片上多模处理中得到应用, 提高片上 MDM 系统的传输能力。

参 考 文 献

[1] Lin J T, Xu Y X, Fang Z W, et al. Fabrication of high-Q lithium niobate microresonators using femtosecond laser micromachining[J]. Scientific Reports, 2015, 5:

8072.

- [2] Poberaj G, Hu H, Sohler W, et al. Lithium niobate on insulator (LNOI) for micro-phonic devices[J]. Laser & Photonics Reviews, 2012, 6(4): 488-503.
- [3] Wang C, Burek M J, Lin Z, et al. Integrated high quality factor lithium niobate microdisk resonators[J]. Optics Express, 2014, 22(25): 30924-30933.
- [4] Qi Y F, Li Y. Integrated lithium niobate photonics[J]. Nanophotonics, 2020, 9(6): 1287-1320.
- [5] Zhang M R, Ai W, Chen K X, et al. A lithium-niobate waveguide directional coupler for switchable mode multiplexing[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 30(20): 1764-1767.
- [6] Wu X R, Huang C R, Xu K, et al. Mode-division multiplexing for silicon photonic network-on-chip[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(15): 3223-3228.
- [7] Stern B, Zhu X L, Chen C P, et al. On-chip mode-division multiplexing switch[J]. Optica, 2015, 2(6): 530-535.
- [8] Han X, Xiao H F, Liu Z L, et al. Reconfigurable on-chip mode exchange for mode-division multiplexing optical networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(3): 1008-1013.
- [9] Soref R. Mid-infrared photonics in silicon and germanium [J]. Nature Photonics, 2010, 4(8): 495-497.
- [10] Dai D X. Silicon nanophotonic integrated devices for on-chip multiplexing and switching[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(4): 572-587.
- [11] Sun C L, Yu Y, Chen G Y, et al. Integrated switchable mode exchange for reconfigurable mode-multiplexing optical networks[J]. Optics Letters, 2016, 41(14): 3257-3260.
- [12] Kaushalram A, Hegde G, Talabattula S. Mode hybridization analysis in thin film lithium niobate strip multimode waveguides[J]. Scientific Reports, 2020, 10: 16692.
- [13] Xu Q, Chen F, Xue S D, et al. A fundamental mode converter based on tapered LiNbO_3 -on-insulator photonic wire with a laterally asymmetric structure[J]. Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures, 2022, 136: 115028.
- [14] Yang G, Sergienko A V, Ndao A. Tunable polarization mode conversion using thin-film lithium niobate ridge waveguide[J]. Optics Express, 2021, 29(12): 18565-18571.
- [15] Jiang R Z, Xu Y, Dong Y, et al. Integrated TM-through/TE-converted polarization beam splitter based on z-cut lithium niobate-on-insulator platform[J]. Optik, 2022, 255: 168690.
- [16] Milad G, Sasan F. Applications of thin-film lithium niobate in nonlinear integrated photonics[J]. Advanced Photonics, 2022, 4(3): 034001.
- [17] 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.

- [18] Alquliah A, Elkabbash M, Zhang J H, et al. Ultrabroadband, compact, polarization independent and efficient metasurface-based power splitter on lithium niobate waveguides[J]. *Optics Express*, 2021, 29(6): 8160-8170.
- [19] 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.
- [20] Yu N F, Genevet P, Aieta F, et al. Flat optics: controlling wavefronts with optical antenna metasurfaces [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, 19(3): 4700423.
- [21] Yu N F, Genevet P, Kats M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction[J]. *Science*, 2011, 334(6054): 333-337.
- [22] Qi Y, Xu Y, Zhang B, et al. Etched circular waveguide-based on-chip silicon mode-order converters[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(22): 6422-6428.
- [23] Sullivan D M. Electromagnetic simulation using the FDTD method[M]. New York: IEEE Press, 2000.
- [24] Molesky S, Lin Z, Piggott A Y, et al. Inverse design in nanophotonics[J]. *Nature Photonics*, 2018, 12(11): 659-670.
- [25] Guo R, Decker M, Setzpfandt F, et al. High-bit rate ultra-compact light routing with mode-selective on-chip nanoantennas[J]. *Science Advances*, 2017, 3(7): e1700007.
- [26] Meng Y A, Hu F T, Liu Z T, et al. Chip-integrated metasurface for versatile and multi-wavelength control of light couplings with independent phase and arbitrary polarization[J]. *Optics Express*, 2019, 27(12): 16425-16439.
- [27] Ohana D, Desiatov B, Mazurski N, et al. Dielectric metasurface as a platform for spatial mode conversion in nanoscale waveguides[J]. *Nano Letters*, 2016, 16(12): 7956-7961.
- [28] Xu Y, Liu L P, Hu X, et al. Scalable silicon-based mode-order converters assisted by tapered metal strip layer[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 151: 108028.