

基于薄膜铌酸锂定制化多模干涉的宽带 90°光混频与模式分离集成器件的设计*

谭振坤^{1)†} 侯鹏飞¹⁾ 郭海红²⁾ 雷思琛³⁾ 徐一帆¹⁾
张福瑞¹⁾ 李瑶¹⁾ 蔚娟¹⁾ 张朋⁴⁾ 王姣⁵⁾

1) (西安工业大学光电工程学院, 西安 710021)

2) (邯郸学院信息工程学院, 邯郸 056005)

3) (西安理工大学自动化与信息工程学院, 西安 710048)

4) (北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

5) (陕西科技大学电子信息与人工智能学院, 西安 710021)

(2025年6月4日收到; 2025年9月24日收到修改稿)

90°光混频器是无线相干光通信系统接收端的关键器件, 在提升接收端灵敏度和抗干扰能力方面发挥着重要作用. 传统的90°光混频器存在对精度要求高、体积大、受限于模式失配、偏振敏感和功能单一等缺点. 为解决上述问题且进一步实现器件的多功能化, 在铌酸锂平台基于多模干涉 (multimode Interference, MMI) 结构, 设计了兼具90°光混频和模式分离功能的多功能集成器件. 该器件在功能上具备良好的可扩展性, 在性能上均优于传统结构, 具有低损耗、高精度和宽带宽的特点, 并通过容差分析验证了器件在较大工艺误差范围内仍能保持优异的性能, 展现了较高的工艺容差性和可靠性. 该器件可同时应用于大规模集成光学中, 为高性能片上光通信系统提供了新技术.

关键词: 多模干涉, 90°光混频器, 模式分离器, 平面光波导

PACS: 42.25.-p, 42.79.-e, 07.60.-j, 78.67.Pt

DOI: 10.7498/aps.74.20250725

CSTR: 32037.14.aps.74.20250725

1 引言

传统无线光通信系统的接收终端普遍存在体积庞大、功耗高等缺点, 极大地限制了无线光通信系统向高性能、广场景应用的发展, 将相干接收终端小型化、集成化已成为无线光通信系统的核心发展趋势之一^[1]. 使用光子集成技术, 利用具有良好可扩展性的多模干涉耦合器 (MMI) 结构, 在保证

高灵敏度探测性能的前提下可有效地将相干接收核心器件——90°光混频器小型化. 为进一步提升器件的集成度和丰富器件功能, 可将单波导 MMI 结构设计成模式分离器. 传统方法实现模式分离通常需要采用模式转换器来改变模式阶数, 该方法增加了器件的复杂度. 因此, 在单波导 MMI 结构上实现 90°光混频器的前提下, 如何设计维持模式阶数不变的模式分离器件^[2-4], 成为突破现有技术局限、提升无线光通信系统灵活性与集成度的关键问

* 陕西省重点研发计划一般项目 (批准号: 2025CY-YBXM-057, 2025CY-YBXM-058, 2025CY-YBXM-116, 2024GX-YBXM-101)、陕西省教育厅科研计划项目-自然专项 (批准号: 24JK0478)、陕西省科协青年人才托举计划 (批准号: 2022-G-3, 20230103) 和西安工业大学优秀硕士学位论文培养基金 (批准号: YS2025002) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: luka_tan@163.com

题,具有重要的理论研究价值与实际应用意义。

近年来, 90°光混频器在不同材料平台上的研究取得了显著进展. 2008年, Robert Halir等^[5]根据自映像原理设计的90°光混频器,实现了相位偏差小于5°、共模抑制比大于20 dB. 2010年, Jeong和Morito等^[6]基于磷化铟材料设计的新型混频器,实现了94 nm工作带宽内相位偏差小于5°、共模抑制比小于-20 dB的优异特性. 2011年, Voigt等^[7]首次采用SOI材料设计了4×4 MMI结构的硅基纳米线混频器. 研究表明:该器件在宽波长范围内具有良好的性能,其插入损耗小于0.5 dB、相位误差小于5°,共模抑制比小于-20 dB. 同年, Halir等^[8]研究的2×4 MMI结构的90°混频器具有小于-20 dB的共模抑制比和±5°的相位偏差. 2013年, Yang等^[9]采用taper型MMI结构的90°光混频器实现了约0.5 dB的插入损耗、±5°以内的相位偏差和小于-20 dB的共模抑制比. 近年来,模式分离器的研究也取得了重要突破. 2016年, Liao等^[10]地提出了一种基于非对称定向耦合架构的硅基模式分离器设计方案. 通过在结构中引入槽波导、分支波导和槽波导,从而有效分离了TE₀和TE₁模式. 研究表明:该器件在100 nm宽光谱范围内具有良好的性能,插入损耗小于1 dB、串扰抑制小于-16 dB. 2020年, Jiang和Wang^[11]设计了一种新型的埋入式条形波导模式分离器,实现了TM₀与TM₁模式的高效分离. 研究表明:插入损耗控制在0.53 dB以下,串扰抑制小于-15 dB. 同年, Liu等^[12]提出一种基于多模波导的多通道滤波技术,成功实现了首个片上单纤四路复用器(quadplexer)的研制. 研究表明:插入损耗控制在1 dB以下,串扰抑制小于-30 dB. 2021年, Jiang和Xu^[13]改进了BSWG模式分离器,创新性地将非定向耦合器与双三波导耦合式模式(解)复用器集成于同一芯片. 研究表明:该结构在1550 nm波长处展现出优异的性能指标,插入损耗控制在1.8 dB以下、串扰抑制达到-22.1 dB. 同年, Chen等^[14]创新性地设计出一种基于热光调制的多端口聚合物波导光开关阵列. 该器件的核心功能单元采用1×3光开关结构,通过精确调控光路实现信号切换与分路功能. 2023年,陈涛等^[15]采用直接二进制搜索算法,设计出基于亚单元辅助非对称定向耦合器的新型模式分离器,其核心功能区域尺寸仅为5 μm×3 μm. 研究表明:在1550 nm工作波长下,器件的插入损耗为3.04 dB、串扰为-13.34 dB.

2024年,廖莎莎等^[16]研制了一种基于级联MMI结构的二氧化硅波导模式选择开关. 该器件采用1×3 MMI与3×3 MMI的级联架构,通过热光相位调制技术实现对输入模式的动态调控. 研究表明:在1523—1556 nm工作波段内,三个输出端口的插入损耗均不超过10 dB,串扰抑制达到-15 dB以下. 2025年,王曼卓^[17]设计并制备了一种由1×3多模干涉耦合器和3×3 MMI耦合器级联构建的二氧化硅波导模式选择开关,通过热光调制改变输入至3×3 MMI耦合器光信号的相位,可实现一阶模(E₁₀)输入转换为基模(E₀₀),并有选择地从目标端口输出.

综上所述,为了突破常见模式分离器需要进行模式转换的缺点、实现光子器件的多功能化,本文基于铌酸锂平台设计了一种具有90°光混频和模式分离的多功能集成器件. 由于铌酸锂具有电光效应强、热光效应强、物理化学特性稳定等优势^[18-20],可通过在MMI结构中的多模干涉区域添加微型热电极实现功能的转换. 当微型热电极不施加电压时,利用MMI结构中光场干涉的物理特性,器件可实现90°混频的性能. 当微型热电极施加电压时,基于铌酸锂材料的线性电光效应、热光效应,通过精确控制热电极的温度,调整多模干涉区域的折射率分布,能在保持原有模式不变的情况下,实现TE₀, TE₁, TE₂和TE₃四种模式的分离^[17],提高信道容量、减少模式间串扰. 随着微型热电极数量的增加,该器件能够实现高阶模式的分离,提升模式分离器的灵活性和实用性.

2 结构设计

2.1 基于铌酸锂平台宽带90°光混频器的设计与优化

宽带90°光混频器的结构图如图1所示. 芯层采用厚度为220 nm LiNbO₃材料,氧化层采用厚度为8 μm的SiO₂材料. 输出波导的宽度为0.8 μm、长度为15 μm. 锥形波导的近端宽度 $W_p = 1.5 \mu\text{m}$ 和远端宽度 $W_0 = 0.8 \mu\text{m}$. MMI耦合区域的宽度 $W_{\text{MMI}} = 13.2 \mu\text{m}$,入射光采用中心波长为1550 nm的TE₀偏振光,光谱扫描范围为1520—1580 nm. 在MMI多模干涉区域上集成了4个宽度 W_{charge} 为2.55 μm、间距 d_{charge} 为1 μm的微型热电极阵列. 当微型热电极两端不施加电压时,可以实现90°光混频功能.

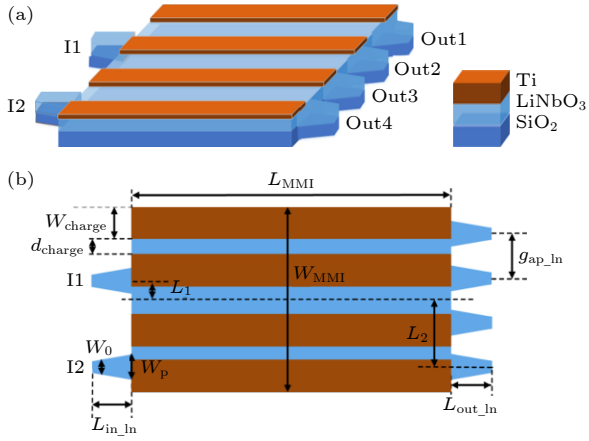


图 1 宽带 90° 光混频器的示意图 (a) 三维图; (b) 俯视图
Fig. 1. Schematic diagram of a wideband 90° optical mixer: (a) Three-dimensional diagram; (b) top view.

当微型热电极两端不施加电压时, 本文通过 2D FDTD 对宽带 90° 光混频器的结构参数进行优化. 由于输出波导的间距过小会导致相邻波导间产生显著的串扰, 间距过大则会引入额外的传输损耗, 从而影响宽带 90° 光混频器的工作性能. 图 2(a) 表示耦合效率随着输出波导间隔 g_{ap_in} 的变化情况. 当 g_{ap_in} 在 0.7—1.7 μm 范围内, 耦合效率随着 g_{ap_in} 的增加逐渐下降后趋于平缓, 且逐渐接近于 0. 当 g_{ap_in} 小于 1.2 μm 时, 由于较多的光能量耦合进相邻的输出端口波导, 从而产生显著的交叉耦合现象. 当 g_{ap_in} 大于 1.2 μm 时, 两相邻输出端口波导间不存在耦合情况. 因此, 当 g_{ap_in} 采用 1.3 μm 时, 不仅可以有效地抑制串扰、避免间距过大引入的额外损耗, 也可缩小整体器件尺寸.

在宽带 90° 光混频器的设计中, 锥形波导的长度参数对器件性能具有决定性影响. 图 2(b) 给出了损耗随 L_{out_in} 变化情况. 当锥形长度 $L_{out_in} < 10 \mu\text{m}$

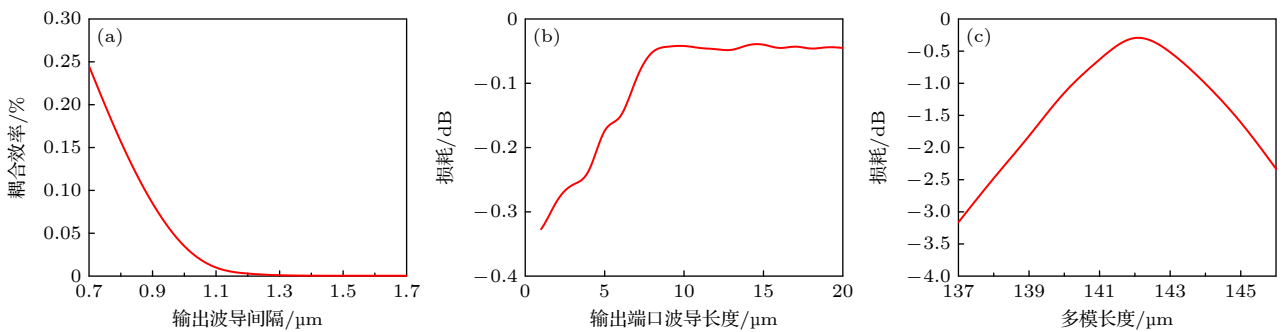


图 2 性能随结构参数变化曲线 (a) 耦合效率随输出波导间隔 g_{ap_in} 的变化; (b) 损耗随输出波导长度 L_{out_in} 的变化; (c) 损耗随多模波导长度 L_{MMI} 的变化

Fig. 2. Performance curves with structural parameters: (a) Curve of coupling efficiency with output waveguide g_{ap_in} ; (b) variation of loss with output waveguide length L_{out_in} ; (c) variation of loss with multimode waveguide length L_{MMI} .

时, 由于折射率的变化会破坏绝热传输条件, 从而产生高阶模式和辐射损耗. 当锥形长度 $L_{out_in} > 10 \mu\text{m}$ 时, 宽带 90° 光混频器的损耗随 L_{out_in} 增加呈现先降低后饱和的变化趋势. 为了能够保证传输性能的同时实现结构紧凑性, 将锥形长度 L_{out_in} 确定为 10 μm .

损耗随着多模波导长度 L_{MMI} 的变化如图 2(c) 所示, 当 $L_{MMI} = 137—146 \mu\text{m}$ 时, 宽带 90° 光混频器的损耗呈现先降低后升高的趋势. 当 $L_{MMI} = 142 \mu\text{m}$ 时, 损耗达到最小值. 因此, L_{MMI} 采用 142 μm .

基于 LiNbO₃ 平台宽带 90° 光混频器的光强如图 3 所示. 为了验证上述结构参数选取的正确性, 采用 TE₀ 偏振光分别从 S 端口和 LO 端口单独输入时, 由图 3 可以观察到 4 路输出光路在 4 倍自映像点处均衡输出.

2.2 多模波导模式分离器设计

多模波导模式分离器的结构示意图如图 1 所示. 在 MMI 多模干涉区域上集成了 4 个宽度 W_{charge} 为 2.55 μm 、间距 d_{charge} 为 1 μm 的微型热电极阵列. 为了实现模式分离功能, 本文通过对微型热电极两侧施加电压, 从而导致微型热电极发热. 由于电光效应、热光效应的作用, 波导的材料折射率会随着温度的变化而变化. 因此, 通过改变微型热电极两侧的电压, 就能够调整多模区域的折射率分布^[17], 从而实现 TE₀, TE₁, TE₂ 和 TE₃ 四种模式的稳定传输.

铌酸锂的折射率变化 Δn 与外加电压 V 的关系可以表示为

$$\Delta n = -\frac{1}{2} n^3 r \frac{V}{d_{charge}}, \quad (1)$$

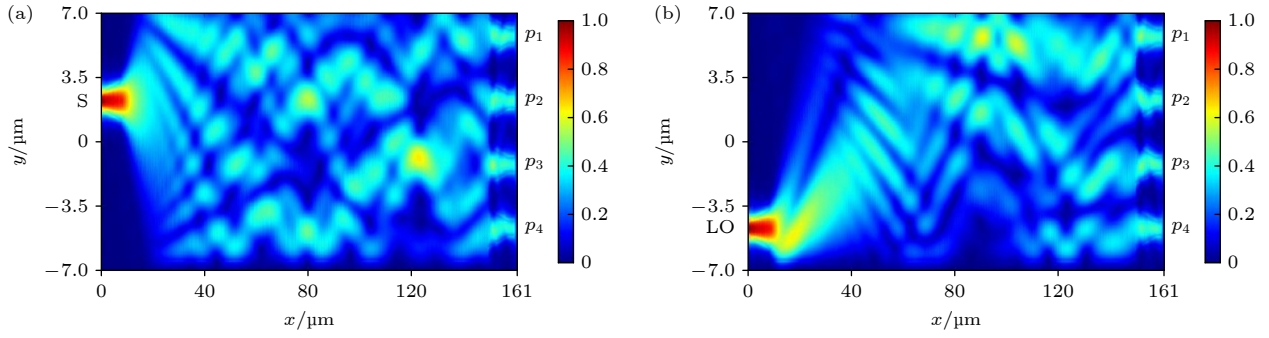


图 3 基于 LiNbO₃ 平台宽带 90° 光混频器单束光输入光强图 (a) 单束信号光输入; (b) 单束本振光输入

Fig. 3. Single-beam optical input light intensity diagram of a wideband 90° optical mixer based on the LiNbO₃ platform: (a) Single beam signal light input; (b) single-beam local oscillator optical input.

其中 n 为 1550 nm 处铌酸锂的折射率, 其取值为 2.2111; r 为 1550 nm 处铌酸锂的电光系数, 其取值为 30.5 pm/V; V 表示施加的调制电压; d_{charge} 为相邻电极之间的距离. 为了实现 TE0, TE1, TE2 和 TE3 四种模式的分离, 折射率变化 Δn 需要满足 10^{-4} — 10^{-3} 的数量级^[17]. 因此, 通过 (1) 式计算可知, 电压的最大值可估算为 $V \approx 60$ V.

共模抑制比 (common mode rejection ratio, CMRR) 是指一对平衡探测器中, 同相通道或正交通道中两个输出功率的弱相关性, 公式定义如下^[21]:

$$\text{CMRR} = 20 \lg \left(\frac{|p_i - p_j|}{|p_i + p_j|} \right), \quad (2)$$

其中 p_i 和 p_j 为 i 和 j 输出端口的光功率.

损耗 (insertion loss, IL) 的计算公式为

$$\text{IL} = 10 \lg \frac{P_2}{P_1}, \quad (3)$$

其中 P_2 表示器件输出时的光功率, P_1 表示器件输入时的光功率. 当 P_2 越大时, IL 值越大, 从而表示光在器件传输过程中的损耗越小.

串扰的计算公式为

$$C_{\text{TE}i} = 10 \lg \left(\sum_{j=0, 1, 2, 3; j \neq i, k=0, 1, 2, 3} T_{jk} \right), \quad (4)$$

$i = 0, 1, 2, 3,$

其中 TE i ($i = 0, 1, 2, 3$) 分别表示 TE0, TE1, TE2 和 TE3 四种模式; T_{jk} 表示输入端口输入 TE j 模式时从目标输出端口输出 TE k 模式的透过率.

为了精准调控各阶模式 (TE0—TE3) 分布, 确保自成像位置分别与四个输出波导实现空间匹配, 本文采用系统扫描方法对四个微型热电极的偏置电压进行优化. 设置 4 个微型电极的电压扫描区间

为 0—60 V, 通过反复迭代扫描使得器件性能达到最优, 此时 4 个模式的传输光场图如图 4 所示. 当入射光经过多模干涉区域后, 由于传播常数和相位调制的差异导致不同模式逐渐分离. 从图 4(a) 可看出, 由于 TE0 模式的电场分布为中心对称的单峰, 因此 TE0 模式从输出端口 2 输出; 从图 4(b) 可看出, 由于 TE1 模式的电场分布为双峰, 因此 TE1 模式从输出端口 3 输出; 从图 4(c) 可看出, 由于 TE2 模式的电场分布为三峰, 因此 TE2 模式从输出端口 4 输出; 从图 4(d) 可看出, 由于 TE3 模式的电场分布为四峰, 因此 TE3 模式从输出端口 1 输出.

各阶模式的透射率随电压变化如图 5 所示. TE0 模式在电压为 14 V 时, 透射率可以达到 98.27%. TE1 模式在电压为 40 V 时, 透射率可以达到 97.16%. TE2 模式在电压为 46 V 时, 透射率可以达到 98.21%. TE3 模式在电压为 52 V 时, 透射率可以达到 98.45%.

各阶模式的性能指标随电压变化如图 6 所示. 当 TE0 模式在 14 V 的电压下损耗和串扰分别为 -0.27368 dB 和 -8.36 dB. TE1 模式在 40 V 的电压下损耗和串扰分别为 -0.25628 dB 和 -7.54 dB. TE2 模式在 46 V 的电压下损耗和串扰分别为 -0.25628 dB 和 -9.12 dB. TE3 模式在 52 V 的电压下损耗和串扰分别为 -0.26519 dB 和 -12.36 dB.

3 结果分析

3.1 宽带 90° 光混频器性能分析

当微型热电极两端不施加电压时, 基于铌酸锂平台的宽带 90° 光混频器在中心波长 1550 nm 处的光强分布如图 7 所示. 当相位差为 0° 的信号光

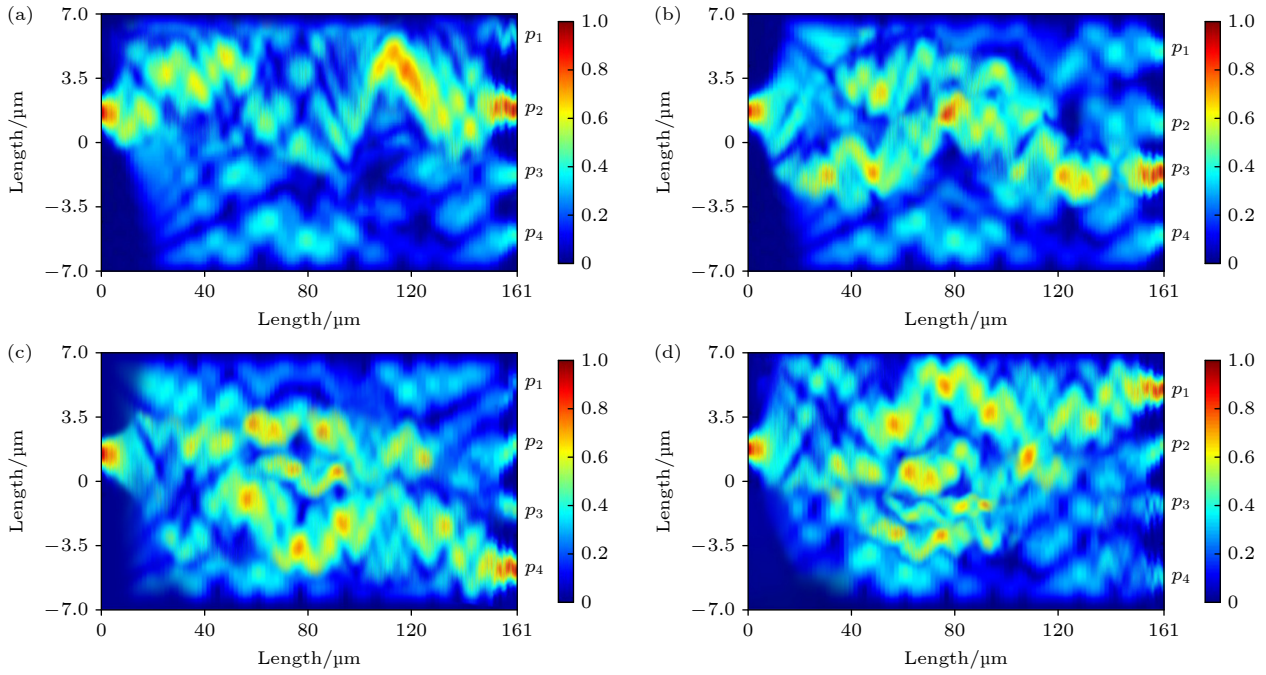


图 4 各模式传输光场图 (a) 输出 TE0 模式; (b) 输出 TE1 模式; (c) 输出 TE2 模式; (d) 输出 TE3 模式
 Fig. 4. Transmission light field diagram of each mode: (a) Outputs TE0 mode; (b) outputs TE1 mode; (c) output TE2 mode; (d) output TE3 mode.

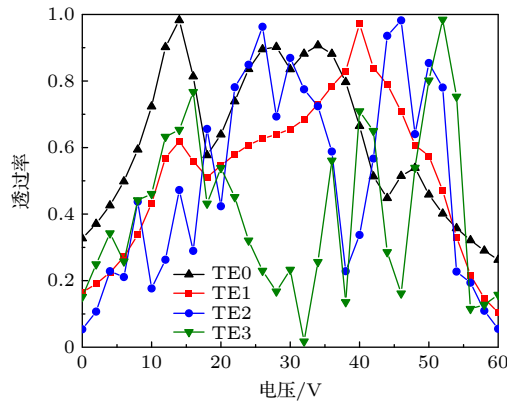


图 5 各模式透射率随电压变化曲线
 Fig. 5. Variation curves of transmittance with voltage in each mode.

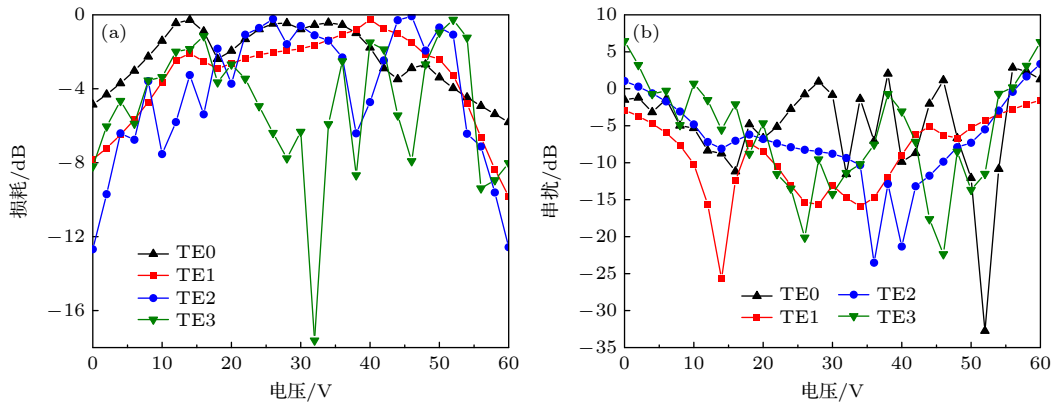


图 6 各模式性能指标随电压变化曲线 (a) 模式分离器损耗; (b) 模式分离器串扰
 Fig. 6. Variation curves of performance index of each mode with voltage: (a) Mode separator loss; (b) mode separator crosstalk.

和本振光分别输入到输入端口 I1 和 I2, 可以清晰观察到光束在 MMI 中的传播路径、自映像效应以及 4 个输出端口的光强分布。

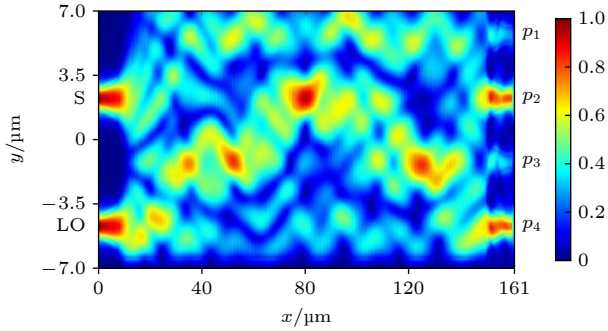


图 7 基于 LiNbO₃ 平台的宽带 90° 光混频器光强图
Fig. 7. Light intensity map of a wideband 90° optical mixer based on LiNbO₃ platform.

当微型热电极两端不施加电压时, 基于铌酸锂平台的宽带 90° 光混频器的 4 个输出端口损耗随波长的变化如图 8(a) 所示. 当多模波导长度为 142 μm 时, 在整个波段内 4 个端口损耗均高于 -13.862 dB, 输出端口 Out1 最低可至 -13.862 dB, 输出端口 Out2 最低可至 -5 dB, 输出端口 Out3 最低可至 -12.21 dB, 输出端口 Out4 最低可至 -4.78 dB.

共模抑制比随波长的变化如图 8(b) 所示, 将输出端口 Out3 作为参考对象, 在整个波段中输出端口 Out2 和输出端口 Out3 的共模抑制比 Q 、输出端口 Out4 和输出端口 Out3 的共模抑制比 I 均处于 -75—30 dB. 因此, 整体器件的抑制共模干扰信号能力较强.

相位偏差随波长的变化如图 8(c) 所示, 以输

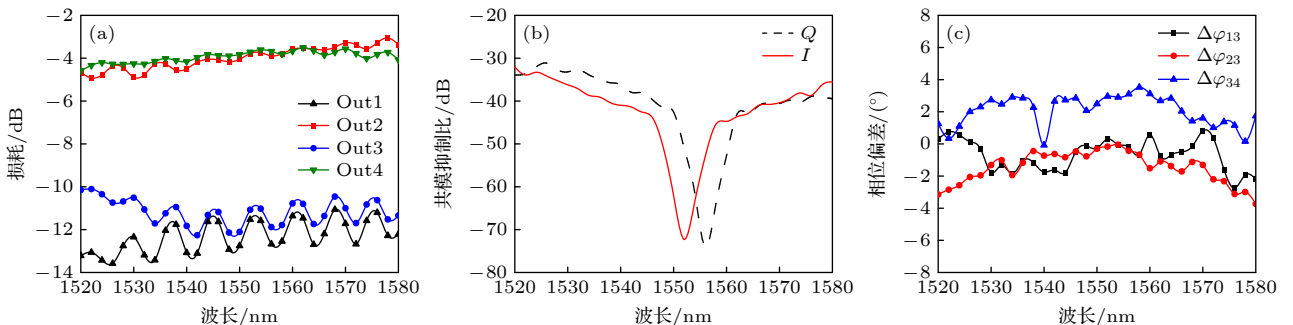


图 8 性能指标随波长变化情况 (a) 90° 光混频器损耗随波长变化曲线; (b) 90° 光混频器共模抑制比随波长变化曲线; (c) 不同输出端口之间的相位偏差随波长变化曲线

Fig. 8. Variation of performance index with wavelength: (a) Variation curves of loss of 90° optical mixer with wavelength; (b) variation curves of common mode rejection ratio of 90° optical mixer with wavelength; (c) variation curves of phase deviation between different output ports with wavelength.

出端口 Out3 为参考对象, 其他输出端口相对于输出端口 Out3 的相位偏差为 $\Delta\varphi_{13} = \varphi_1 - \varphi_3 - 90^\circ$, $\Delta\varphi_{23} = \varphi_2 - \varphi_3 - 180^\circ$, $\Delta\varphi_{34} = \varphi_3 - \varphi_4 - 90^\circ$. 在整体光谱范围内, 所有相位偏差均小于 4°. 从而表明了铌酸锂平台的宽带 90° 光混频器在较宽的波长范围内具有较高的相位一致性, 能够满足光信号处理中对相位稳定性的要求.

表 1 总结了近年来在 90° 光混频器设计方面的研究进展. 其中一部分是基于磷化铟平台设计的 90° 光混频器, 另外一部分是基于绝缘体上硅平台设计的 90° 光混频器. 通过对比发现, 本文基于铌酸锂平台设计 90° 光混频器的性能比磷化铟平台、绝缘体上硅平台设计 90° 光混频器的性能更好, 实现了相位误差小于 4°、共模抑制比小于 -30 dB.

表 1 90° 光混频器的比较
Table 1. Comparison of 90° optical mixers.

Ref.	Phase deviation/(°)	CMRR/dB	Technology
[6]	<5	<-20	InP 平台
[7]	<5	<-20	SOI 平台
[8]	<5	<-20	SOI 平台
[9]	<5	<-20	SOI 平台
[10]	<5	<-20	SOI 平台
This work	<4	<-30	LiNbO ₃ 平台

3.2 多模波导模式分离器的性能分析

当微型热电极两端施加电压时, 基于铌酸锂平台多模波导模式分离器的性能指标如图 9 所示. 在 1520—1580 nm 的波长范围内, TE₀ 模式的损耗大于 -0.474 dB、串扰大于 -32.7 dB. TE₁ 模式的损耗大于 -0.526 dB、串扰大于 -25.7 dB. TE₂ 模式

的损耗大于-0.45 dB、串扰大于-25.5 dB. TE3 模式的损耗大于-0.556 dB、串扰大于-34.3 dB. 结果表明: 电极片施加电压后的多模波导模式分离器在整个工作波段内具有较优的模式分离性, 各模式最小损耗偏差小于 0.024 dB, 串扰波动控制在 8.8 dB 以内.

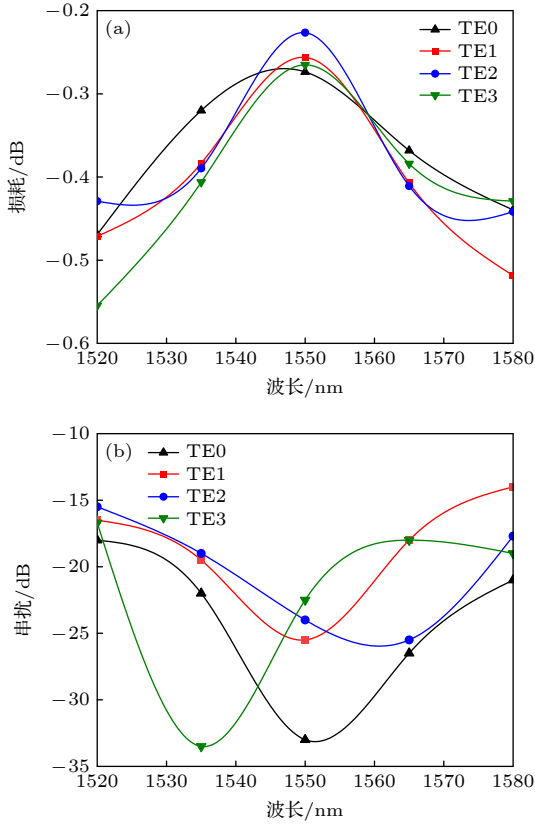


图 9 模式分离器性能指标 (a) 模式分离器损耗; (b) 模式分离器串扰
Fig. 9. Performance index of mode separator: (a) Mode separator loss; (b) mode separator crosstalk.

表 2 总结了近年来在模式分离器设计方面的研究进展. 通过对比发现, 其他研究人员设计的模式分离器只能实现 2 阶模式以下的分离, 本文基于铌酸锂平台设计的模式分离器可以实现 3 阶模式以下的分离.

表 2 模式分离器的比较

Table 2. Comparison of pattern separators.

Ref.	Patterns of separation	Loss/dB	Crosstalk/dB
[11]	TE0, TE1	<1	<-16
[12]	TM0, TM1	<0.53	<-15
[14]	TE0, TE1	<1.8	<-22.1
[16]	TE0, TE1	<3.04	<-13.34
[18]	TE0, TE1, TE2	<10	<-15
This work	TE0, TE1, TE2, TE3	<0.56	<-15.46

4 容差分析

4.1 基于铌酸锂平台宽带 90°光混频器的容差分析

当微型热电极两端不施加电压时, 为了验证宽带 90°光混频器对工艺误差的容忍能力, 本文主要对 MMI 的波导长度、宽度进行了分析.

MMI 宽度容差下共模抑制比性能分析如图 10 所示. 当波导宽度 W_{MMI} 偏差在 $13.2 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ 和 $13.2 \mu\text{m} \pm 0.2 \mu\text{m}$ 的范围内, 宽带 90°光混频器在 1520—1580 nm 波段范围内始终保持优于 -30 dB 的共模抑制比. 验证了该设计对制造公差具有显著的鲁棒性, 使其能够满足相干通信系统的严格要求, 适应实际制造中的工艺偏差.

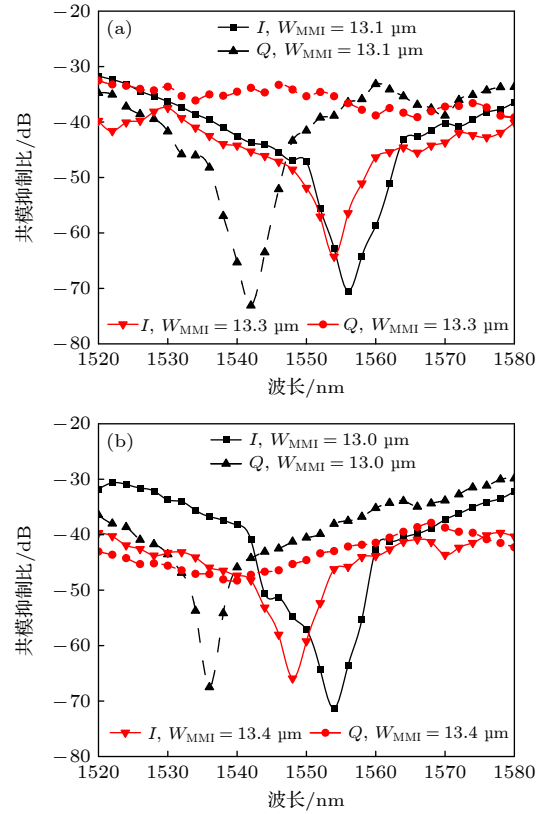


图 10 宽度容差下共模抑制比性能分析 (a) MMI 宽度容差范围为 $\pm 0.1 \mu\text{m}$; (b) MMI 宽度容差范围为 $\pm 0.2 \mu\text{m}$
Fig. 10. Performance analysis of common mode rejection ratio under width tolerance: (a) The tolerance range of MMI width is $\pm 0.1 \mu\text{m}$; (b) the width of MMI tolerance range is $\pm 0.2 \mu\text{m}$.

MMI 宽度容差下损耗性能分析如图 11 所示. 当波导宽度偏差在 $13.2 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ 和 $13.2 \mu\text{m} \pm 0.2 \mu\text{m}$ 的范围内, 宽带 90°光混频器损耗均大于 -0.1 dB 且增加幅度有限. 表明该器件具有较低的

宽度误差敏感度.

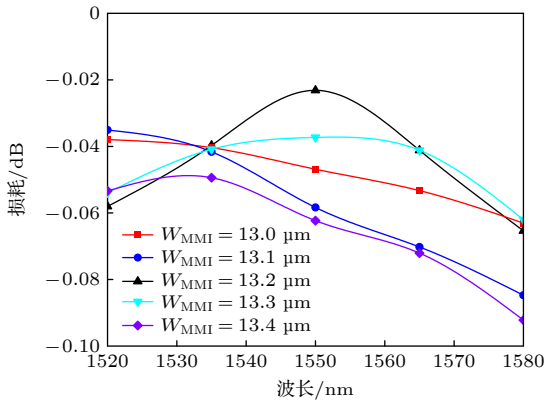


图 11 宽度容差下损耗性能分析

Fig. 11. Analysis of loss performance under width tolerance.

MMI 宽度容差下相位偏差性能分析如图 12 所示. 当宽带 90°光混频器的波导宽度偏差在 $13.2 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ 的误差范围内, 在 1520—1580 nm 波段范围内 $\Delta\varphi_{13}$ 的相位偏差处于 5° 以内、 $\Delta\varphi_{23}$ 的相位偏差处于 8.5° 以内和 $\Delta\varphi_{34}$ 的相位偏差处于 9° 以内. 当宽带 90°光混频器的波导宽度偏差在 $13.2 \mu\text{m} \pm$

$0.2 \mu\text{m}$ 的误差范围内, 在整个波长范围内 $\Delta\varphi_{13}$ 的相位偏差处于 5° 以内、 $\Delta\varphi_{23}$ 的相位偏差处于 10° 以内和 $\Delta\varphi_{34}$ 的相位偏差处于 10° 以内. 由于 $\Delta\varphi_{13}$ 在波导宽度处于 $13.2 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$, $13.2 \mu\text{m} \pm 0.2 \mu\text{m}$ 误差范围内与波导宽度为 $13.2 \mu\text{m}$ 的相位误差保持一致, 均处于 5° 以内. $\Delta\varphi_{23}$, $\Delta\varphi_{34}$ 在波导宽度处于 $13.2 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$, $13.2 \mu\text{m} \pm 0.2 \mu\text{m}$ 误差范围内的相位误差处于 10° 以内 [22], 从而具有较好的相位特性. 因此, 该器件在宽度方向上具有良好的工艺容差性能.

MMI 长度容差下共模抑制比性能分析如图 13 所示. 当波导长度偏差在 $142 \mu\text{m} \pm 2 \mu\text{m}$ 的误差范围内, 宽带 90°光混频器在 1520—1580 nm 波段范围内的共模抑制比均低于 -30 dB . 波导长度偏差在 $142 \mu\text{m} \pm 4 \mu\text{m}$ 的误差范围内, 宽带 90°光混频器在整个波长范围内的共模抑制比均低于 -26 dB . 表明该设计在长度方向上具有较高的容差容忍性, 可以确保器件在工艺误差允许范围内仍能够维持其优异的性能表现.

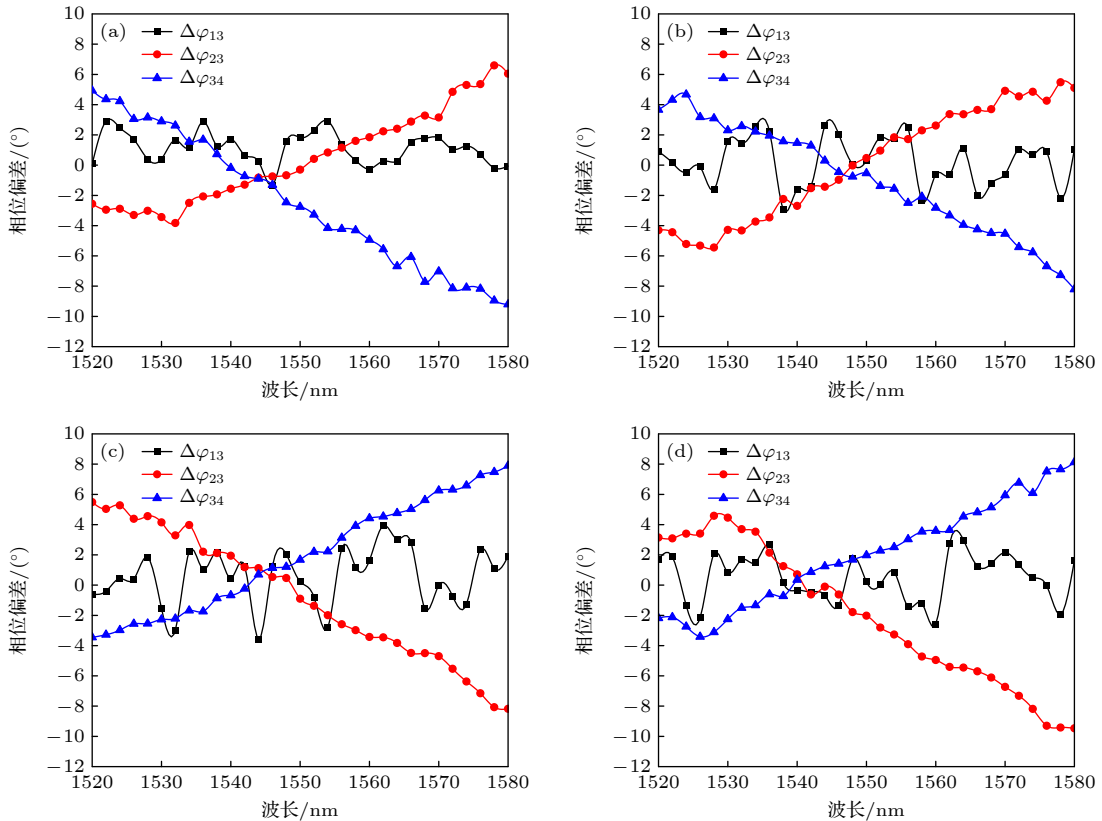


图 12 宽度容差下相位偏差性能分析 (a) MMI 宽度为 $13 \mu\text{m}$; (b) MMI 宽度为 $13.1 \mu\text{m}$; (c) MMI 宽度为 $13.3 \mu\text{m}$; (d) MMI 宽度为 $13.4 \mu\text{m}$

Fig. 12. Performance analysis of phase deviation under width tolerance: (a) The MMI width is $13 \mu\text{m}$; (b) the MMI width is $13.1 \mu\text{m}$; (c) the MMI width is $13.3 \mu\text{m}$; (d) the MMI width is $13.4 \mu\text{m}$.

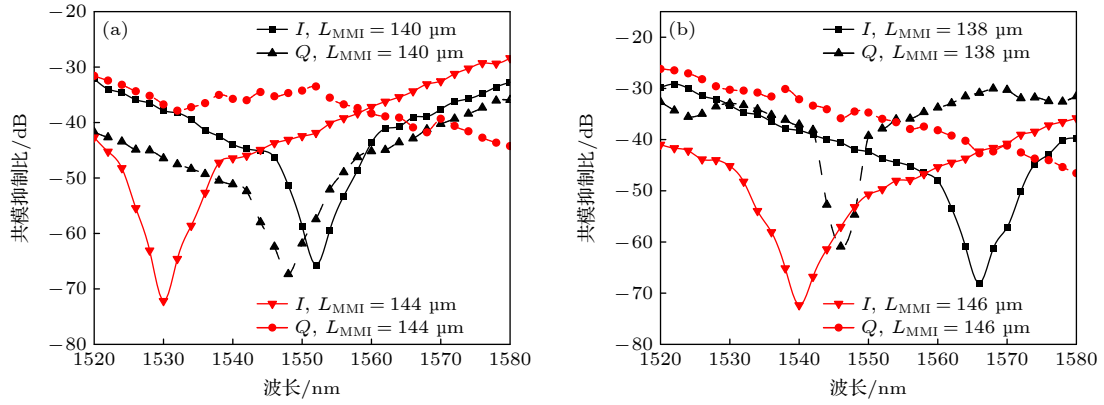


图 13 长度容差下共模抑制比性能分析 (a) MMI 长度容差范围为 $\pm 2 \mu\text{m}$; (b) MMI 长度容差范围为 $\pm 4 \mu\text{m}$
 Fig. 13. Performance analysis of common mode rejection ratio under length tolerance: (a) The tolerance range of MMI length is $\pm 2 \mu\text{m}$; (b) the tolerance range of MMI length is $\pm 4 \mu\text{m}$.

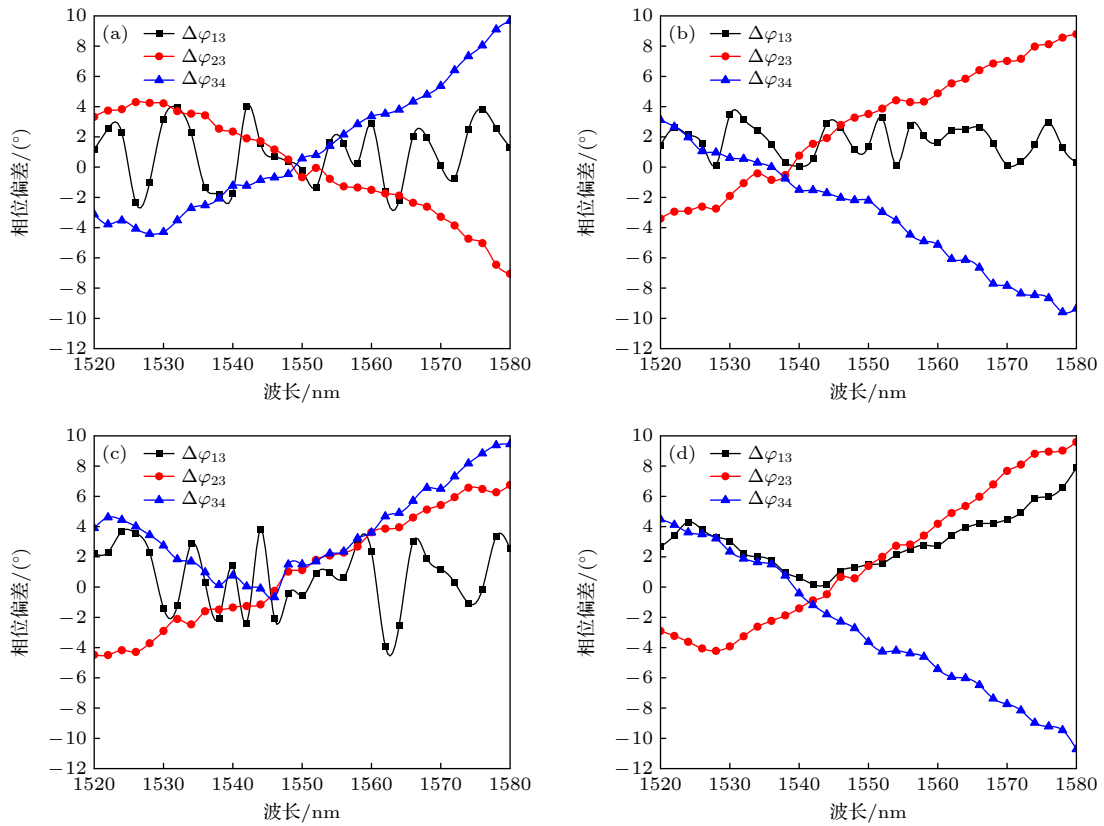


图 14 长度容差下相位偏差性能分析 (a) MMI 长度为 $138 \mu\text{m}$; (b) MMI 长度为 $140 \mu\text{m}$; (c) MMI 长度为 $144 \mu\text{m}$; (d) MMI 长度为 $148 \mu\text{m}$
 Fig. 14. Performance analysis of phase deviation under length tolerance: (a) The MMI length is $138 \mu\text{m}$; (b) the MMI length is $140 \mu\text{m}$; (c) the MMI length is $144 \mu\text{m}$; (d) the MMI length is $148 \mu\text{m}$.

MMI 长度容差下相位偏差性能分析如图 14 所示. 当波导长度偏差在 $142 \mu\text{m} \pm 2 \mu\text{m}$ 的误差范围内, 宽带 90° 光混频器在整个波长范围内的相位偏差均在 $\pm 10^\circ$ 以内. 波导长度偏差在 $142 \mu\text{m} \pm 4 \mu\text{m}$ 的误差范围内, 相位偏差略有增加, 但仍保持在 $\pm 11^\circ$ 以内. 表明器件在较大工艺误差范围内仍

具有良好的相位稳定性.

MMI 长度容差下损耗性能分析如图 15 所示. 当波导长度偏差在 $142 \mu\text{m} \pm 2 \mu\text{m}$, $142 \mu\text{m} \pm 4 \mu\text{m}$ 的误差范围内, 宽带 90° 光混频器在整个波长范围内的损耗均大于 -0.09 dB . 研究表明: 即使存在一定的制造误差, 器件仍能保持较为稳定的特性.

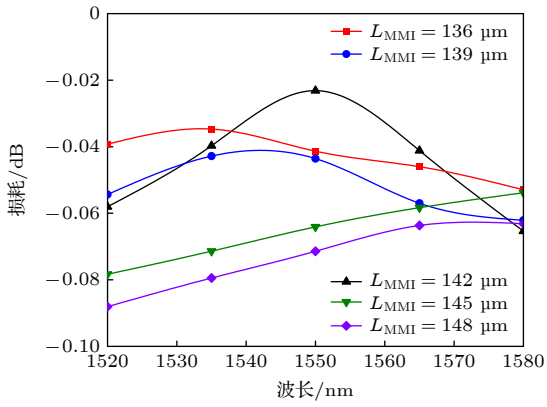


图 15 长度容差下损耗性能分析

Fig. 15. Analysis of loss performance under length tolerance.

4.2 多模波导模式分离器的容差分析

当微型热电极两端施加电压时, 基于铌酸锂平台的多模波导模式分离器在宽度容差下损耗随波长变化如图 16 所示. 当 MMI 波导宽度偏差在 $13.2 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ 和 $13.2 \mu\text{m} \pm 0.2 \mu\text{m}$ 的误差范围内, 多模波导模式分离器在整个波长范围内各模式的损耗均大于 -1.1 dB . 表明多模波导模式分离器对宽度误差敏感度低, 具有较好的宽度容差性.

MMI 宽度容差下串扰性能分析如图 17 所示. 当波导宽度偏差在 $13.2 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ 和 $13.2 \mu\text{m} \pm 0.2 \mu\text{m}$ 的误差范围内, 多模波导模式分离器的串扰始终保持在可接受范围内, 且器件的性能变化较为平稳. 表明制造过程中存在不可避免的宽度误差, 器件的模式分离性能依然能够得到有效保证, 且不会因微小的尺寸偏差而导致串扰显著增加.

MMI 长度容差下损耗性能分析如图 18 所示. 当波导长度偏差在 $142 \mu\text{m} \pm 2 \mu\text{m}$ 的误差范围内, 多模波导模式分离器在整个波段范围内损耗均在 -0.93 dB 以上且增加幅度有限. 波导长度偏差在 $142 \mu\text{m} \pm 2 \mu\text{m}$ 的误差范围内, 多模波导模式分离器在整个波段范围内损耗均大于 -1.15 dB . 表明多模波导模式分离器对宽度误差敏感度低, 具有较好的宽度容差性.

MMI 长度容差下串扰性能分析如图 19 所示. 当波导长度偏差在 $142 \mu\text{m} \pm 2 \mu\text{m}$ 和 $142 \mu\text{m} \pm 4 \mu\text{m}$ 的误差范围内, 多模波导模式分离器在整个波段范围内的串扰均小于 -12 dB . 表明在长度容差控制范围内, 多模波导模式分离器能够保持较高的性能稳定性.

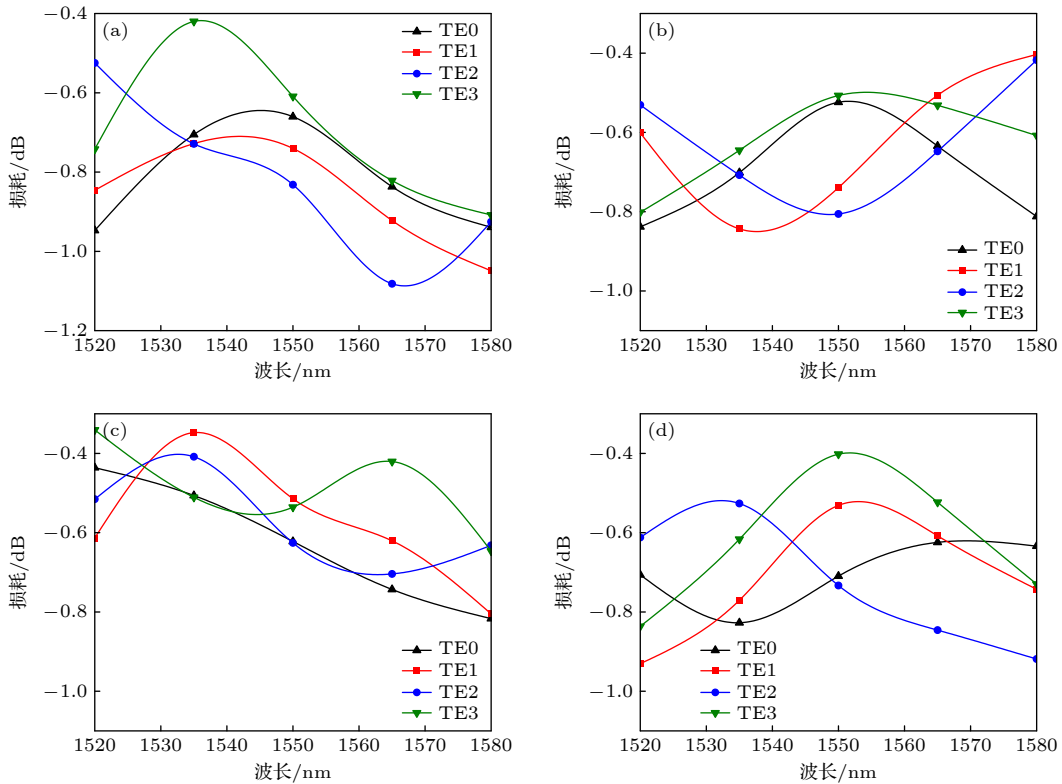


图 16 宽度容差下损耗性能分析 (a) MMI 宽度为 $13 \mu\text{m}$; (b) MMI 宽度为 $13.1 \mu\text{m}$; (c) MMI 宽度为 $13.3 \mu\text{m}$; (d) MMI 宽度为 $13.4 \mu\text{m}$

Fig. 16. Analysis of loss performance under width tolerance: (a) The MMI width is $13 \mu\text{m}$; (b) the MMI width is $13.1 \mu\text{m}$; (c) the MMI width is $13.3 \mu\text{m}$; (d) the MMI width is $13.4 \mu\text{m}$.

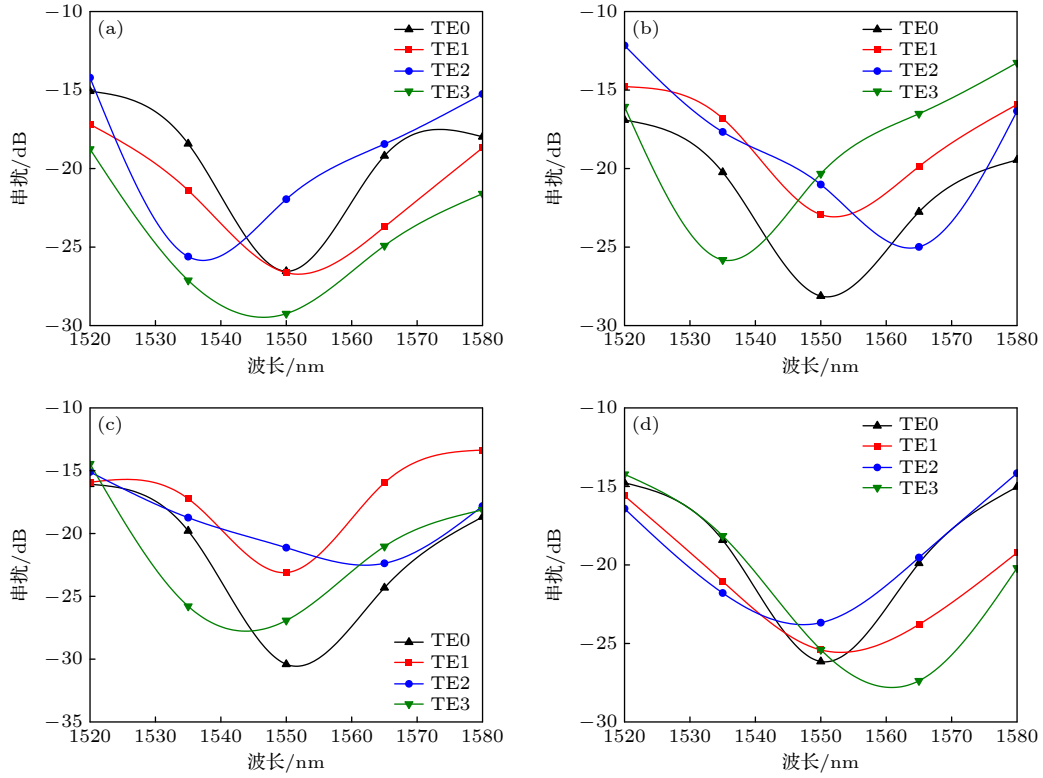


图 17 宽度容差下串扰性能分析 (a) MMI 宽度为 13 μm ; (b) MMI 宽度为 13.1 μm ; (c) MMI 宽度为 13.3 μm ; (d) MMI 宽度为 13.4 μm
 Fig. 17. Analysis of crosstalk performance under width tolerance: (a) The MMI width is 13 μm ; (b) the MMI width is 13.1 μm ; (c) the MMI width is 13.3 μm ; (d) the MMI width is 13.4 μm .

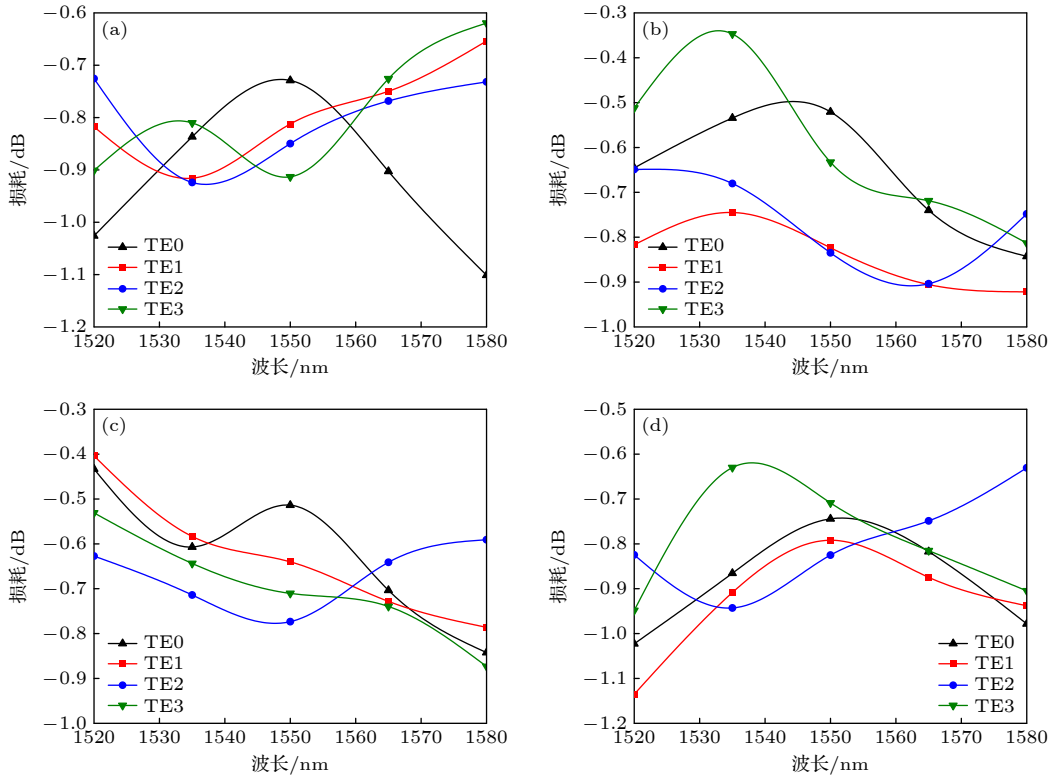


图 18 长度容差下损耗性能分析 (a) MMI 长度为 138 μm ; (b) MMI 长度为 140 μm ; (c) MMI 长度为 144 μm ; (d) MMI 长度为 148 μm
 Fig. 18. Analysis of loss performance under length tolerance: (a) The MMI length is 138 μm ; (b) the MMI length is 140 μm ; (c) the MMI length is 144 μm ; (d) the MMI length is 148 μm .

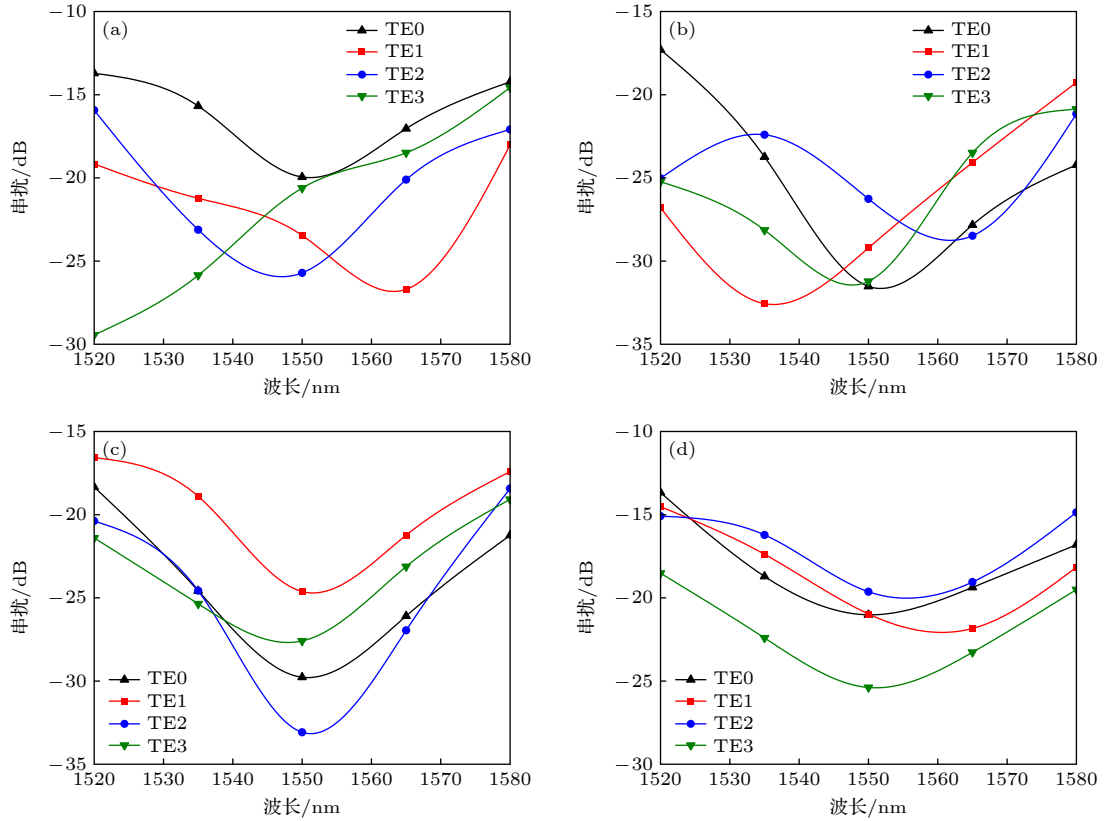


图 19 长度容差下串扰性能分析 (a) MMI 长度为 138 μm ; (b) MMI 长度为 140 μm ; (c) MMI 长度为 144 μm ; (d) MMI 长度为 148 μm .
Fig. 19. Analysis of crosstalk performance under length tolerance: (a) The MMI length is 138 μm ; (b) the MMI length is 140 μm ; (c) the MMI length is 144 μm ; (d) the MMI length is 148 μm .

5 结论

在铌酸锂平台上, 本文基于 MMI 结构设计了宽带 90° 光混频与模式分离集成器件, 实现了光信号调控功能的集成化设计. 通过系统的参数优化与物理机制验证, 结果表明: 当微型热电极不施加电压时, 利用 MMI 结构中光场干涉的物理特性, 通过对宽带 90° 光混频的参数进行优化, 调控光场在多模区的干涉叠加过程, 使器件在宽光谱范围内保持稳定的相位匹配条件, 实现了宽波段内光场能量的精准分配与相位调控; 当微型热电极施加电压时, 基于铌酸锂材料的线性电光效应 (Pockels 效应), 通过外加电场调控波导折射率分布, 改变光场在 MMI 结构中的传播模式与耦合路径, 使模式分离集成器件精准实现模式分离功能, 满足不同模式光信号的隔离需求, 验证了电光效应在光功能调控中的有效性. 此外, 还对器件的长度和宽度进行了系统的容差分析, 揭示了结构尺寸偏差对光场干涉条件与模式耦合效率的影响规律, 本文设计的宽带 90° 光混频与模式分离集成器件有较高的工艺容差特性.

参考文献

- [1] Han X T, Nie W C, Li P, Li G Y, Chang C, Zhang P F, Liao P X, Xie C H, Li H, Wang W, Xie X P 2025 *Acta Opt. Sin.* **45** 1306016 (in Chinese) [韩笑天, 聂文超, 李鹏, 李广英, 常畅, 张鹏飞, 廖佩璇, 谢琛华, 李慧, 汪伟, 谢小平 2025 *光学学报* **45** 1306016]
- [2] Xing J J, Li Z Y, Xiao X, Yu J Z, Yu Y D 2013 *Opt. Lett.* **38** 3468
- [3] Ma T B, Qi L Z, Peng S, Li J M, Guo X L, Liu K 2024 *Acta Opt. Sin.* **44** 1627001 (in Chinese) [马天宝, 祁玲珍, 彭姝, 李佳明, 郭旭联, 刘奎 2024 *光学学报* **44** 1627001]
- [4] Driscoll J B, Grote R R, Souhan B, Dadap J I, Lu M, Osgood R M 2013 *Opt. Lett.* **38** 1854
- [5] Halir R, Molina-Fernández I, Ortega-Moñux A, Wangtemert-Pérez J G, Xu D X, Cheben P, Janz S 2008 *J. Lightwave Technol.* **26** 2697
- [6] Jeong S H, Morito K 2010 *J. Lightwave Technol.* **28** 1323
- [7] Voigt K, Zimmermann L, Winzer G, Tian H, Tillack B, Petermann K 2011 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **23** 1769
- [8] Halir R, Roelkens G, Ortega-Moñux A, Wangtemert-Pérez J G 2011 *Opt. Lett.* **36** 178
- [9] Yang W, Yin M, Li Y P, Wang X J, Wang Z Y 2013 *Opt. Express* **21** 28423
- [10] Liao J W, Zhang L X, Liu M L, Wang L R, Wang W Q, Wang G X, Ruan C, Zhao W, Zhang W F 2016 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **28** 2597
- [11] Jiang W F, Wang X G 2020 *J. Lightwave Technol.* **38** 2414
- [12] Liu D J, Zhang M, Shi Y C, Dai D X 2020 *IEEE Photonics*

- Technol. Lett.* **32** 192
- [13] Jiang W F, Xu S Y 2021 *J. Lightwave Technol.* **39** 6239
- [14] Chen T, Dang Z Q, Liu Z X, Ding Z M, Yang Z F, Zhang X D, Jiang X H, Zhang Z Y 2021 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **33** 1135
- [15] Chen T, Mao S Q, Wan H D, Wang J L, Jiang W F 2023 *Acta Opt. Sin.* **43** 2313003 (in Chinese) [陈涛, 毛思强, 万洪丹, 汪静丽, 蒋卫锋 2023 *光学学报* **43** 2313003]
- [16] Liao S S, Zhang W H, Zhao S, Zhao X C, Tang L 2024 *Acta Opt. Sin.* **44** 0523001 (in Chinese) [廖莎莎, 张伍浩, 赵帅, 赵新程, 唐亮 2024 *光学学报* **44** 0523001]
- [17] Wang M Z, Yao Z T, Sun C Y, Zhang Y, Fang J M, Sun X Q, Wu Y D, Zhang D M 2025 *Acta Photonica Sin.* **54** 0323001 (in Chinese) [王曼卓, 姚振涛, 孙朝阳, 张越, 方记民, 孙小强, 吴远大, 张大明 2025 *光子学报* **54** 0323001]
- [18] Qi Y, Li Y 2020 *Nanophotonics* **9** 1287
- [19] Xu G Y, Ma X F, Chong S, Liu H 2023 *Acta Opt. Sin.* **43** 1923001 (in Chinese) [徐光耀, 马晓飞, 盛冲, 刘辉 2023 *光学学报* **43** 1923001]
- [20] Feng X K, Chen H X, Chen J Y, Liang W G 2023 *Chin. J. Lasers* **50** 2208001 (in Chinese) [冯新凯, 陈怀熹, 陈家颖, 梁万国 2023 *中国激光* **50** 2208001]
- [21] Guan H, Ma Y J, Shi R Z, Zhu X L, Younce R, Chen Y J, Roman J, Ophir N, Liu Y, Ding R, Baehr-Jones T, Bergman K, Hochberg M 2017 *Opt. Express* **25** 28957
- [22] Ortega-Monux A, Zavargo-Peche L, Maese-Novo A, Molina-Fernandez I, Halir R, Wanguermert-Perez J G, Cheben P, Schmid J H 2011 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **23** 1406

Design of broadband 90° optical mixing and mode-separation integrated device based on customized multi-mode interference of thin-film lithium niobate*

TAN Zhenkun^{1)†} HOU Pengfei¹⁾ GUO Haihong²⁾ LEI Sichen³⁾ XU Yifan¹⁾
ZHANG Furui¹⁾ LI Yao¹⁾ YU Juan¹⁾ ZHANG Peng⁴⁾ WANG Jiao⁵⁾

1) (*Faculty of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China*)

2) (*Institute of Information Technology, Handan University, Handan 056005, China*)

3) (*School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China*)

4) (*Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China*)

5) (*School of Electronic Information and Artificial Intelligence, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China*)

(Received 4 June 2025; revised manuscript received 24 September 2025)

Abstract

90° optical mixer, as an essential part of coherent optical communication and heterodyne detection, improves polarization discrimination and anti-interference capabilities, increases receiver sensitivity, and permits demodulation of higher-order modulation forms. The disadvantages of traditional 90° optical mixers, however, include their high precision needs, size, mode mismatch restrictions, polarization sensitivity, and single functionality. Utilizing a lithium niobate platform, a multimode interference (MMI) structure, and a micro-thermoelectric electrode array, and with the help of the finite difference time domain (FDTD) method, a multipurpose device that combines 90° optical mixing and mode separation capabilities is designed in this work. According to the results, when no voltage is applied across the micro-thermoelectric electrodes, the multipurpose device acts as a 90° optical mixer. The common-mode rejection ratios of all four outputs are all above -30 dB, phase errors are below 4°, and the losses in the wavelength range of 1520–1580 nm exceed -13.862 dB. When a voltage is applied across the micro-thermoelectric electrodes, TE₀, TE₁, TE₂, and TE₃

* Project supported by the Shaanxi Provincial Key R&D Program General Project, China (Grant Nos. 2025CY-YBXM-057, 2025CY-YBXM-058, 2025CY-YBXM-116, 2024GX-YBXM-101), the Shaanxi Provincial Department of Education Scientific Research Project-Nature Special Project, China (Grant No. 24JK0478), the Shaanxi Association for Science and Technology Young Talent Support Program Project, China (Grant Nos. 2022-6-3, 20230103), and the Xi'an University of Technology Excellent Master's Thesis Training Fund, China (Grant No. YS2025002).

† Corresponding author. E-mail: luka_tan@163.com

modes are separated by the multipurpose device acting as a mode splitter. In addition to controlling crosstalk fluctuation within 8.8 dB, the minimum loss divergence between modes is less than 0.024 dB. Research findings indicate that the physical characteristics of optical field interference within the MMI structure enable perfect phase matching and energy distribution across a wide spectrum range, even when no voltage is supplied across the micro-thermoelectric electrode terminals. By controlling the interference superposition process inside the multi-mode region and improving broadband 90° optical mixing parameters, the stable phase-matching conditions are maintained across the wide spectrum. The lithium niobate-based linear electro-optic effect (Pockels effect) modifies the waveguide refractive index distribution through an external electric field when a voltage is applied across the micro-thermoelectrodes. By changing the light field's coupling path and propagation mode inside the MMI structure, the mode-separating integrator can precisely achieve mode separation, thereby confirming the efficiency of the electro-optic effect in optical functional control, which meets the isolation requirements for various mode optical signals. Furthermore, a systematical tolerance analysis of the device's width and length is carried out, demonstrating how structural dimensional deviations affect the mode coupling efficiency and optical field interference circumstances. The integrated broadband 90° optical mixer and mode splitter device described in this paper has excellent process tolerance properties.

Keywords: multimodal interference, 90° optical mixer, mode splitter, planar optical waveguide

PACS: 42.25.-p, 42.79.-e, 07.60.-j, 78.67.Pt

DOI: [10.7498/aps.74.20250725](https://doi.org/10.7498/aps.74.20250725)

CSTR: [32037.14.aps.74.20250725](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20250725)

基于薄膜铌酸锂定制化多模干涉的宽带90°光混频与模式分离集成器件的设计

谭振坤 侯朋飞 郭海红 雷思琛 徐一帆 张福瑞 李瑶 蔚娟 张朋 王姣

Design of broadband 90° optical mixing and mode-separation integrated device based on customized multi-mode interference of thin-film lithium niobate

TAN Zhenkun HOU Pengfei GUO Haihong LEI Sichen XU Yifan ZHANG Furui LI Yao YU Juan
ZHANG Peng WANG Jiao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 244205 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250725

CSTR: 32037.14.aps.74.20250725

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250725>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于分段级联多模干涉的Ta₂O₅ 980/1550 nm波分复用/解复用器

Ta₂O₅ 980/1550 nm wavelength multiplexer/demultiplexer based on segmented cascaded multimode interference

物理学报. 2025, 74(2): 024202 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241243>

铌酸锂集成光子器件的发展与机遇

Thin-film lithium niobate photonic integrated devices: Advances and opportunities

物理学报. 2023, 72(23): 234201 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20231295>

基于薄膜铌酸锂的模式色散相位匹配单光子源

Mode-dispersion phase matching single photon source based on thin-film lithium niobate

物理学报. 2023, 72(15): 154204 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230743>

基于微纳光纤双模式干涉的亚波长聚焦光场及光捕获应用

Sub-wavelength focused light and optical trapping application based on two-mode interference from an optical micro-/nanofiber

物理学报. 2024, 73(10): 100401 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240181>

多模式离子推力器放电室和栅极设计及其性能实验研究

Design and performance test of discharge chamber and grid for multi-mode ion thrusters

物理学报. 2022, 71(19): 195203 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220720>

铌酸锂微米光纤模内后向布里渊散射特性

Intra-mode backward stimulated Brillouin scattering in lithium niobate micron fibers

物理学报. 2025, 74(3): 034203 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241329>