

引用本文: 李坚平, 邓冶, 王烈, 等. 基于改进 PSO 算法设计的 TFLN 平台偏振不敏感光栅耦合器[J]. 光通信技术, 2024, 48(4): 9-14.

基于改进 PSO 算法设计的 TFLN 平台偏振不敏感光栅耦合器

李坚平¹, 邓冶¹, 王烈^{1,2,3}, 张振荣^{1,2,3*}

(1. 广西大学 计算机与电子信息学院, 南宁 530004; 2. 广西多媒体通信与网络技术重点实验室, 南宁 530004;

3. 广西高校多媒体通信与信息处理重点实验室, 南宁 530004)

摘要: 针对光栅耦合器存在偏振依赖性问题, 在薄膜铌酸锂(TFLN)平台上相继设计了标准型和改进型偏振不敏感光栅耦合器。在设计过程中, 首先对粒子群(PSO)算法进行了改进, 然后利用改进后的 PSO 算法对光栅参数进行了优化, 包括光栅周期、占空比、刻蚀深度以及入射角等关键参数。最后, 设计了偏振不敏感啁啾光栅耦合器, 并通过线性啁啾调节有效折射率, 从而显著提升了耦合效率和偏振不敏感带宽。仿真结果表明: 在波长为 1 544 nm 时耦合效率最高, 偏振不敏感啁啾光栅耦合器的横电(TE)、横磁(TM)模式耦合损耗分别为 -4.88、-5.05 dB; 在 1 500~1 580 nm 波长内偏振相关损耗(PDL)小于 0.5 dB, 偏振不敏感带宽为 45 nm。

关键词: 薄膜铌酸锂; 偏振不敏感; 光栅耦合器; 啁啾; 改进粒子群算法

中图分类号: TN256 文献标志码: A 文章编号: 1002-5561(2024)04-0009-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.04.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Polarization-insensitive grating coupler designed for TFLN platform based on improved PSO algorithm

LI Jianping¹, DENG Ye¹, WANG Lie^{1,2,3}, ZHANG Zhenrong^{1,2,3*}

(1. School of Computer and Electronic Information, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Guangxi Key Laboratory of Multimedia Communications and Network Technology, Nanning 530004, China;

3. Key Laboratory of Multimedia Communications and Information Processing of Guangxi Higher Education Institutes, Nanning 530004, China)

Abstract: Aiming at the polarization-dependency issue of grating couplers, standard and improved polarization-insensitive grating couplers are successively designed on the thin film lithium niobate(TFLN) platform. During the design process, the particle swarm optimization (PSO) algorithm is first improved, and then the improved PSO algorithm is used to optimize the grating parameters, including critical parameters such as grating period, duty cycle, etching depth, and incident angle. Finally, a polarization-insensitive chirped grating coupler is designed, and the effective refractive index is adjusted through linear chirp, significantly improving the coupling efficiency and polarization-insensitive bandwidth. The simulation results show that the coupling efficiency is the highest at the wavelength of 1 544 nm, and the coupling losses of the transverse electric(TE) and transverse magnetic(TM) modes of the polarization-insensitive chirped grating coupler are -4.88 and -5.05 dB, respectively. The polarization-dependent loss(PDL) is less than 0.5 dB within the wavelength range of 1 500 nm to 1 580 nm, and the polarization-insensitive bandwidth is 45 nm.

Key words: thin film lithium niobate, polarization-insensitive, grating coupler, chirp, improved particle swarm optimization algorithm

收稿日期: 2024-01-23。

基金项目: 广西重点研发计划项目(桂科 AB22080048)资助。

作者简介: 李坚平(1998—), 男, 广西桂平人, 硕士研究生, 现就读于广西大学计算机与电子信息学院电子与通信工程专业, 主要从事铌酸锂光栅耦合器、铌酸锂光学天线方面的研究工作。

* 通信作者: 张振荣(1976—), 男, 博士, 教授, 现就职于广西大学计算机与电子信息学院, 主要研究方向为通信网络及光纤传感技术。



0 引言

绝缘体上薄膜铌酸锂(TFLN)脊波导制造技术的快速发展, 使得各种结构、器件、系统和应用的实现成为可能^[1-2]。然而, 由于标准单模光纤的模场直径接近 10 μm , 而波导横截面仅有数百纳米, 当光束从光纤耦合到芯片时, 波导横截面远小于标准单模光纤的直径, 造成模式尺寸失配, 从而产生巨大的损耗。因此, 波导与光纤之间的光耦合仍然面临挑战。尽管光栅耦

李坚平, 邓治, 王烈, 等: 基于改进 PSO 算法设计的 TFLN 平台偏振不敏感光栅耦合器

合器能够显著降低光纤耦合损耗,但其偏振依赖性问题显著,这限制了它在双偏振相干调制器、模式复用系统和偏振控制器等多种应用中的潜力。因此,具有偏振不敏感特性的光栅耦合器引起了广泛的关注。CHEN B 等人^[7]在铌酸锂(LN)中引入了金材料,不仅避免了对 LN 的刻蚀,还激发了横磁(TM)模式的等离激元,使得光栅区域中横电(TE)和 TM 模式的有效折射率相等,从而实现了偏振不敏感特性。类似地,MA X 等人^[8]在 LN 波导上集成了硅作为光栅,并在硅光栅与 LN 波导之间引入了低折射率材料作为缓冲层,通过优化缓冲层的厚度,同样实现了偏振不敏感特性。然而,这些方法在工艺实现上仍然面临挑战。此外,WANG X 等人^[9]在 SOI 平台上利用自适应遗传算法反向设计了光栅形状,虽然成功实现了偏振不敏感光栅耦合器,但由于其结构复杂,且对工艺要求极高,因此不能将 SOI 平台上的设计直接应用于 TFLN 平台。

粒子群优化(PSO)算法是一种受到鸟群觅食行为启发的群体智能优化方法,以其参数简单、收敛速度快、易于实现的特点,在路径规划、组合优化、模糊系统控制、神经网络训练等领域得到了广泛应用^[10-11]。然而,标准 PSO 算法存在容易陷入局部最优解和收敛速度较慢的问题。在纳米光子器件的设计过程中,局部最优解可能会严重影响器件的最佳性能,而缓慢的收敛速度会导致设计效率低下,进而消耗大量计算机资源。为了解决这些问题,本文提出一种基于改进的 PSO 算法设计的 TFLN 平台偏振不敏感光栅耦合器的方案。

1 改进 PSO 算法

本文对标准 PSO 算法做了如下改进:首先,通过引入振荡下降非线性惯性权重来提高算法的收敛效率;然后,采用精英选择策略来增强种群质量;最后,引入中心游移策略来优化初始种群的生成。

1.1 引入振荡下降非线性惯性权重提高算法收敛效率

大量研究表明,较大的惯性权重更有利于全局搜索,而较小的惯性权重则更有利于局部搜索。不同的惯性权重值可能会导致收敛速度变慢或陷入局部最优解。针对这一问题,本文引入了一种振荡下降非线性惯性权重,这种惯性权重 ω 定义为

$$\omega = \omega_{\text{start}} - (t-1)(\omega_{\text{start}} - \omega_{\text{end}})/(M-1) + A \cos(\Psi t) \quad (1)$$

其中, ω_{start} 、 ω_{end} 分别为初始惯性权重和迭代次数最大时的惯性权重, t 为当前迭代次数, M 为最大迭代次数; A 、 Ψ 分别为振荡的幅度和频率,它们的取值为 0~

1 之间的常数。

本文设定 $\omega_{\text{start}}=0.9$ 、 $\omega_{\text{end}}=0.4$ 、 $A=0.1$ 、 $\Psi=0.3$ 、 $M=100$ 。随着迭代的进行,惯性权重在一定范围内振荡下降,从而扩大粒子的搜索区域,使其更加兼顾全局和局部搜索,进而提高算法的收敛效率。

1.2 采用精英选择策略增强种群

在标准 PSO 算法中生成新一代的种群时,通常会包含适应度高的优质个体和适应度低的劣质个体。劣质个体的存在往往会显著降低算法的收敛速度。为了改善这一问题,本文采取了以下措施:

首先,将前一代的种群与遗传操作后的种群进行混合,以增加种群的多样性。然后,根据个体的适应度大小对混合后的种群进行排序。最后,通过精英选择策略来优化种群,选择适应度最高的前 I 个个体作为新一代种群。

这种策略能够加速算法的收敛速度,提高算法的整体性能,从而更好地应对复杂优化问题。

1.3 引入中心游移策略优化初始种群生成

在标准 PSO 算法中,初始种群通常通过随机方式生成。这种随机性可能导致粒子在搜索空间中的分布不均匀,从而减慢算法的收敛速度或使其陷入局部最优解。为了改善这一问题,本文引入了一种中心游移策略。该策略首先根据式(2)生成一个反向学习的粒子 $x_{j,o}(t)$ (第 t 次迭代反向学习生成的第 j 个粒子),接着,使用式(3)和游移系数 μ (在这里取值为 0.618)来生成中心游移粒子 $x_{j,c}(t)$ (中心游移在第 t 次迭代生成的第 j 个粒子)。这样就得到了 2 个种群:一个是原始的随机种群,另一个是通过中心游移策略生成的种群。最后,比较这 2 个种群中个体的适应度,选择适应度较高的粒子作为最终的初始种群。

$$x_{j,o}(t) = x_{\text{up}} + x_{\text{down}} - x_{j,d}(t) \quad (2)$$

$$x_{j,c}(t) = x_{j,d}(t) + \mu x_{j,o}(t) \quad (3)$$

其中, x_{up} 、 x_{down} 分别为搜索空间的上界和下界,而 $x_{j,d}(t)$ 为随机生成的初始解。

1.4 算法性能验证

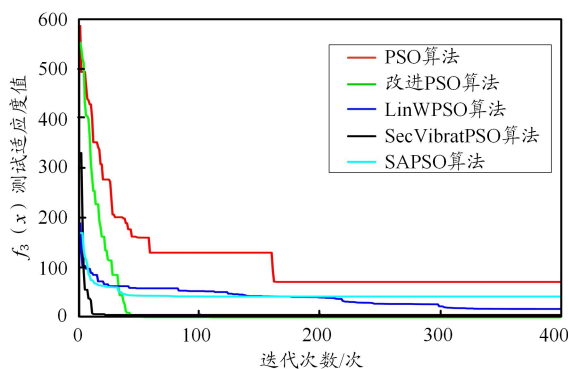
本文选取了 3 组基准函数对改进 PSO 算法性能进行验证测试,测试结果如表 1 所示。这些基准函数涵盖了单峰函数和多峰函数。其中, $f_1(x)$ 是单峰函数,而 $f_2(x)$ 和 $f_3(x)$ 则是多峰函数。

为了确保实验的公平性和准确性,本文在实验中统一设定算法的种群大小为 30,最大迭代次数为 400。此外,为确保结果的稳定性和可靠性,每种算法均独立运行 30 次,并取其平均值以评估各自的寻优

表 1 测试函数

函数	变量 x 范围	函数维度	最优值
$f_1(x) = \sum_{i=1}^{30} x_i^2$	$[-100, 100]$	30	0
$f_2(x) = -20 \times \exp\left(-0.2 \sqrt{\frac{1}{30} \sum_{i=1}^{30} x_i^2}\right) - \exp\left(\frac{1}{30} \sum_{i=1}^{30} \cos(2\pi x_i)\right) + 20 + e$	$[-32, 32]$	30	0
$f_3(x) = \frac{1}{4000} \sum_{i=1}^{30} x_i^2 \prod_{j=1}^{30} \cos\left(\frac{x_j}{\sqrt{i}}\right) + 1$	$[-600, 600]$	30	0

性能。本文使用了一台配备 Windows 10 操作系统和 Intel(R) Core(TM) i7-7700HQ 处理器的计算机,并借助 Matlab 2021b 软件进行了数据处理和分析,得到不同 PSO(PSO、改进 PSO、LinWPSO、SecVibratPSO、SAPSO)算法和基准函数测试结果如图 1 所示。可以看出,在 3 种不同基准函数情况下,本文所提出的改进 PSO 算法的收敛曲线迅速趋于平稳,显示出更高的寻优效率和稳定性,在收敛速度上明显优于其它 PSO 算法。这一结果不仅验证了本文所提算法的有效性和优越



(c) $f_3(x)$ 收敛曲线

图 1 不同 PSO 算法和基准函数测试结果

性,同时也为复杂优化问题的求解提供了新的思路和方法。此外,在寻找最优解方面,本文提出的改进 PSO 算法也展现出了显著的优势。与其它算法相比,它能够更加有效地探索搜索空间,并快速收敛至接近理论最优值的解。

2 偏振不敏感的光栅耦合器设计

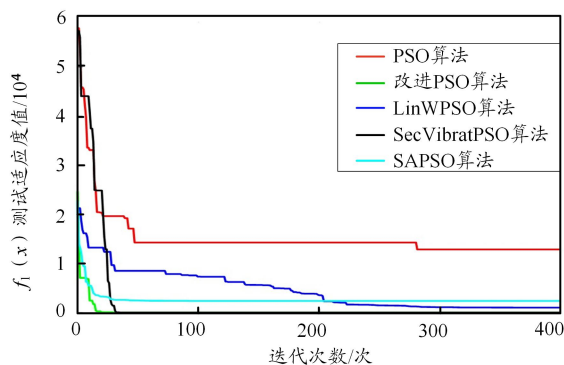
2.1 标准型偏振不敏感的光栅耦合器

图 2 为标准型光栅耦合器结构截面示意图。光栅耦合器的光栅长度为 $20 \mu\text{m}$, LN 波导层厚度 $h=0.6 \mu\text{m}$ 、 SiO_2 层厚度 $h_{\text{SiO}_2}=4.7 \mu\text{m}$ 。 Λ 为光栅周期, w 为未刻蚀部分宽度, θ 为入射角, d_{etch} 为刻蚀深度。光纤和波导之间的输入光耦合应满足相位匹配条件,该条件可表示为

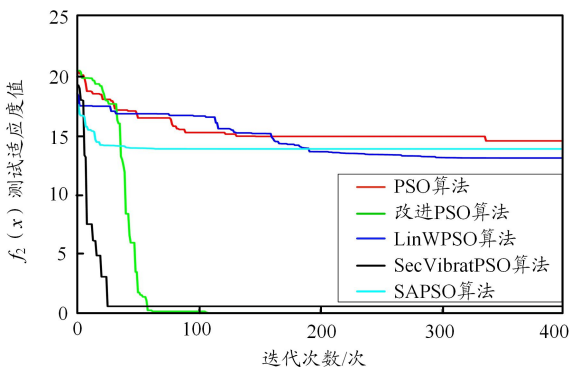
$$k_0 n_{\text{eff}} = k_0 n_{\text{eff}} \sin \theta + 2\pi m / \Lambda \quad (4)$$

其中, k_0 表示光在自由空间的波矢量, n_{eff} 是光在结构中传播时的有效折射率, m 为衍射阶数。

在矩形波导中,由于 TE 和 TM 模式的有效折射率存在差异,它们通常难以满足相同的相位匹配条件,这会导致偏振相关损耗(PDL),其计算表达式如式(5)所示。为了减小 PDL 并实现偏振不敏感的光栅耦合



(a) $f_1(x)$ 收敛曲线



(b) $f_2(x)$ 收敛曲线

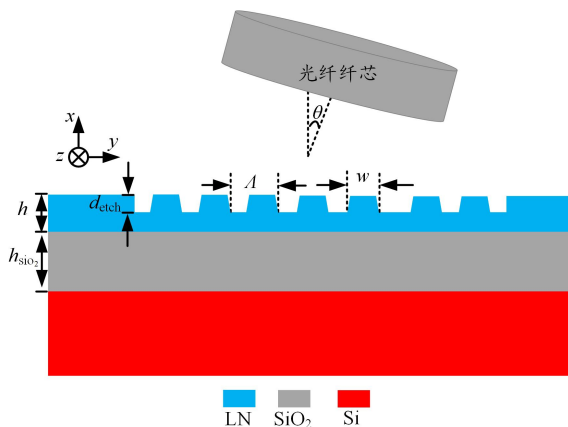


图 2 标准型光栅耦合器结构截面示意图

李坚平, 邓冶, 王烈, 等: 基于改进 PSO 算法设计的 TFLN 平台偏振不敏感光栅耦合器

器, 需要确保 TE 和 TM 模式都能同时满足相位匹配条件。在设计标准型偏振不敏感光栅耦合器时, 本文采用改进 PSO 算法优化光栅周期 Λ 、占空比 $f(f=w/\Lambda)$ 、刻蚀深度 d_{etch} 、入射角 θ 等参数, 算法流程如图 3 所示。

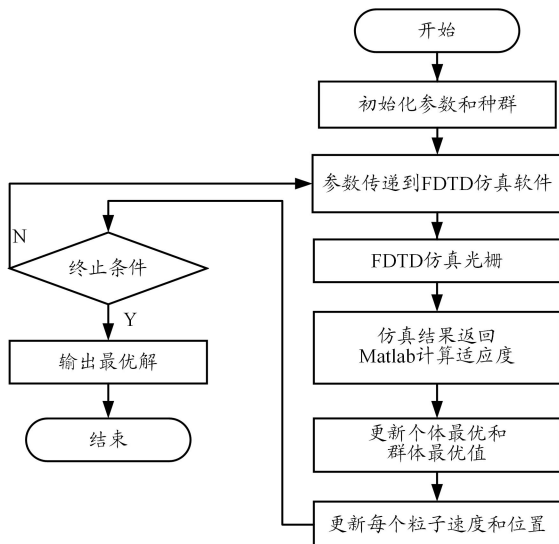


图 3 改进 PSO 算法流程

$$I_{\text{PDL}} = 10 \times \lg \left| \frac{T_{\lambda}^{\text{TE}}}{T_{\lambda}^{\text{TM}}} \right| \quad (5)$$

其中, T_{λ}^{TE} 、 T_{λ}^{TM} 分别为 TE 和 TM 模式的耦合效率; λ 为波长, $\lambda=1\,550\text{ nm}$ 。

使用改进 PSO 算法设计光栅耦合器时, 需精心构建目标函数, 以确保器件设计能够精准地朝向预定的优化目标发展。本文定义目标函数 ξ 的表达式为

$$\xi = \eta \frac{T_{\lambda}^{\text{TE}} + T_{\lambda}^{\text{TM}}}{2} + (1 - \eta) \sum_{i=1}^N \frac{|T_{\lambda_i}^{\text{TE}} - T_{\lambda_i}^{\text{TM}}|}{N} \quad (6)$$

其中, η 为加权系数。

式(6)中, 第一项为 TE 和 TM 模式在波长为 $1\,550\text{ nm}$ 处的峰值耦合效率, 第二项为在一定波长范围内 TE 和 TM 模式的 PDL。加权系数 η 控制峰值耦合效率和 PDL 的优先级, 当 η 越接近 1 时, 越偏向于提高峰值耦合效率; 而当 η 接近于 0 时, 则更偏向于优化 PDL。本文设定 $\eta=0.5$, 采用二维有限差分域 (2D FDTD) 软件与 Matlab 软件相结合的方式仿真。在此基础上, 使用改进后的 PSO 算法, 设置了种群规模为 10, 迭代次数为 50, 最终优化得到的参数如表 2 所示。图 4 为标准型光栅耦合器耦合效率曲线图。可以看出, 在波长为 $1\,500 \sim 1\,600\text{ nm}$ 时, 标准型光栅耦合器的 TE 和 TM 模式耦合损耗分别在波长为 $1\,550\text{ nm}$ 和 $1\,540\text{ nm}$ 处达到最低, 分别为 -6.4 dB 和 -5.7 dB 。在 $1\,562\text{ nm}$ 波长处, TE 和 TM 模式的耦合损耗均为 -6.5 dB , 且 PDL 为 0。因此, 最佳偏振不敏感波长与峰值耦合效率

表 2 标准型光栅耦合器参数优化结果

参数名称	优化结果
$\Lambda/\mu\text{m}$	1.31
f	0.51
$d_{\text{etch}}/\mu\text{m}$	0.578
$\theta(^{\circ})$	22.57

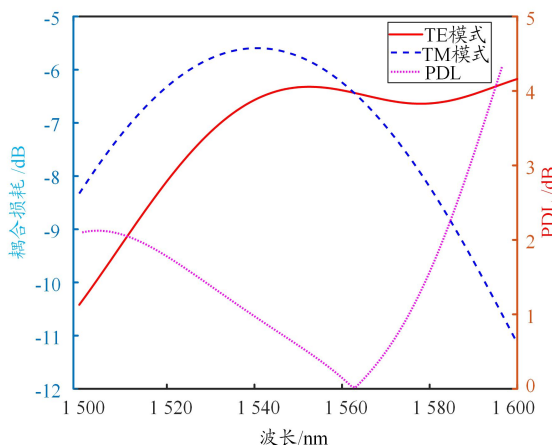


图 4 标准型光栅耦合器耦合效率曲线

所对应的波长不一致。此外, 标准型光栅耦合器仅在少数几个波长内表现出偏振不敏感特性, 无偏振不敏感带宽。

2.2 偏振不敏感啁啾光栅耦合器

由于标准型光栅耦合器仅在少数特定波长下表现出偏振不敏感特性, 并不具备偏振不敏感带宽, 因此, 本文对其进行了改进, 设计了一种偏振不敏感啁啾光栅耦合器。图 5 为啁啾光栅耦合器结构截面示意图。与标准型偏振不敏感光栅耦合器相比, 啁啾光栅耦合器的光栅周期 Λ 保持不变, 但光栅结构被分为两部分: 第一部分采用线性啁啾设计, 使得占空比 f_i 随周期线性变化; 第二部分则保持固定的占空比, 该占空

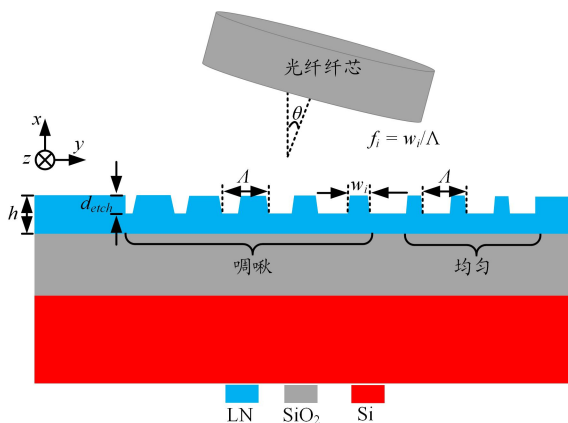


图 5 啁啾光栅耦合器结构截面示意图

比与线性啁啾部分的最后一个占空比相同。采用线性啁啾设计时, 每个周期的有效折射率得以差异化, 从而更有效地调节折射率, 使 TE 和 TM 模式同时满足相位匹配条件。式(7)给出了占空比线性变化的数学表达式。

$$f_i = f - Ri \quad (7)$$

其中, R 为线性变化因子。

光栅的主要耦合损耗与模场匹配密切相关。在标准型光栅中, 大部分光仅在前几个周期便完成衍射, 且沿传播方向向上衍射的光的模场呈现指数衰减分布。然而, 单模光纤的模场分布呈高斯形状, 与指数衰减分布差异显著, 因此会产生模场失配损耗。线性啁啾设计不仅有助于调节有效折射率, 还能减少前几个周期衍射的光功率, 从而使向上衍射光的模场更接近高斯形状分布, 进而提升光栅的耦合效率。本文利用改进 PSO 算法对啁啾结构和光栅参数进行优化设计, 涉及参数包括 Λ 、 f_i 、 d_{etch} 、 N 、 θ , 其中 R 固定为 0.03, N 代表啁啾的周期个数。最终得到的参数优化结果和耦合效率曲线分别如表 3 和图 6 所示。不同 PSO (PSO、改进 PSO、LinWPOS、SecVibratPSO、SAPSO) 算法经多次仿真取平均后的优化迭代曲线如图 7 所示。

从表 3 可知, 与标准型光栅耦合器相比, 对啁啾

表 3 啁啾光栅耦合器参数优化结果

参数名称	优化结果
$\Lambda/\mu\text{m}$	1.236
f_i	0.77
$d_{\text{etch}}/\mu\text{m}$	0.574
N /个	2
$\theta/(\circ)$	23.25

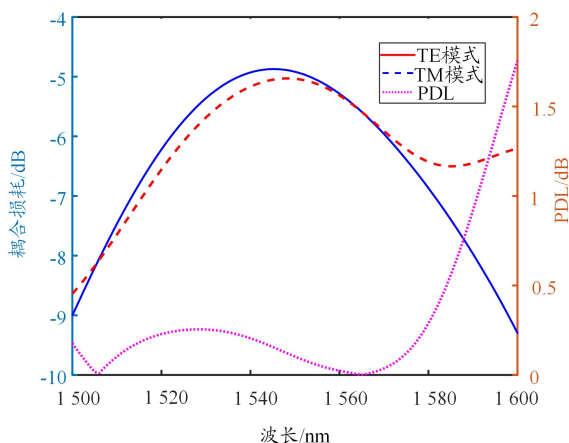


图 6 啁啾光栅耦合器耦合效率曲线

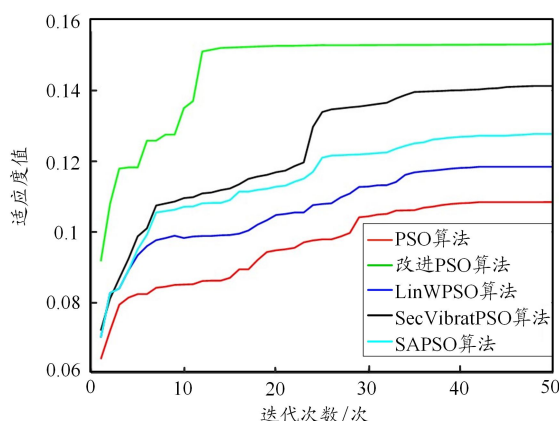


图 7 不同改进 PSO 算法优化光栅迭代曲线

光栅耦合器的优化设计时增加了 2 个参数: 光栅周期啁啾个数 N 和光栅每个占空比的大小 f_i 。

从图 6 可知, 当波长为 1 500~1 580 nm 时, 啁啾光栅耦合器的 PDL 最大值小于 0.5 dB, 表明该耦合器具有较宽的偏振不敏感带宽。在波长 1 544 nm 处, 啁啾光栅耦合器达到了最高的耦合效率, 此时 TE 和 TM 模式下的耦合损耗分别为 -4.88 dB 和 -5.05 dB, 对应的 PDL 为 0.17 dB。相较于标准型光栅耦合器, 啁啾光栅耦合器在 TE 和 TM 模式下的耦合损耗分别降低了 1.52 dB 和 0.65 dB。

从图 7 可以看出, 改进后的 PSO 算法相比其它 PSO 算法, 在迭代次数减少一半的情况下即达到稳定状态, 并成功找到最优解, 显示出其高效的收敛速度和寻找全局最优解的能力。

在不集成其它材料的基础上设计的不同偏振不敏感光栅耦合器性能对比情况如表 4 所示。可以看出, 本文设计的偏振不敏感光栅耦合器在 TE、TM 模式耦合损耗、PDL 以及偏振不敏感带宽方面均表现出显著优势。

表 4 不同偏振不敏感光栅耦合器性能

材料与光栅结构	耦合损耗/dB		PDL/dB	偏振不敏感带宽/nm	参考文献
	TE 模式	TM 模式			
TFLN 一维	-4.88	-5.05	0.17	45	本文
SOI 一维	-7.6	-7.9	0.3	25	[9]
SOI 一维	-6.1	-4.7	1.4	41	[13]
TFLN 二维	-3.88	-5.78	1.9	—	[14]
SOI 二维	-5.8	-5.6	0.2	—	[15]

3 结束语

本文利用改进 PSO 算法, 在 TFLN 平台上深入研究了标准型偏振不敏感光栅耦合器的性能特点。鉴于

李坚平, 邓冶, 王烈, 等: 基于改进 PSO 算法设计的 TFLN 平台偏振不敏感光栅耦合器

该类型耦合器仅在有限的几个波长范围内表现出偏振不敏感的特性, 缺乏足够的偏振不敏感带宽, 本文采用啁啾结构来设计偏振不敏感光栅耦合器。仿真结果表明, 所设计的耦合器在 1 544 nm 处耦合效率最高, TE、TM 模式耦合损耗分别为 -4.88 dB 和 -5.05 dB, 且在波长为 1 500~1 565 nm 内, PDL 最大值小于 0.5 dB, 即偏振不敏感带宽较宽。该器件不仅偏振不敏感性能优异, 且无需集成其它材料, 结构简单实用, 易于制作, 有效降低了成本, 有利于推动光子电路的大规模集成。

参考文献:

- [1] JIANG W, PATEL R N, MAYOR F M, et al. Lithium niobate piezo-optomechanical crystals[J]. Optica, 2019, 6(7): 845–853.
- [2] QI Y, LI Y. Integrated lithium niobate photonics[J]. Nanophotonics, 2020, 9(6): 1287–1320.
- [3] TAILLAERT D, CHONG H, BOREL P I, et al. A compact two-dimensional grating coupler used as a polarization splitter[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15(9): 1249–1251.
- [4] WANG Z, CHEN G, RUAN Z, et al. Silicon-lithium niobate hybrid intensity and coherent modulators using a periodic capacitively loaded traveling-wave electrode[J]. ACS Photonics, 2022, 9(8): 2668–2675.
- [5] KHONINA S N, KAZANSKIY N L, BUTT M A, et al. Optical multiplexing techniques and their marriage for on-chip and optical fiber communication: a review[J]. Opto-Electronic Advances, 2022, 5(8): 210127-1–210127-25.
- [6] LIN Z, LIN Y, LI H, et al. High-performance polarization management devices based on thin-film lithium niobate[J]. Light: Science & Applications, 2022, 11(1): 93–102.
- [7] CHEN B, RUAN Z, CHEN K, et al. One-dimensional grating coupler on lithium-niobate-on-insulator for high-efficiency and polarization-independent coupling[J]. Optics Letters, 2023, 48(6): 1434–1437.
- [8] MA X, ZHUANG C, ZENG R, et al. Polarization-independent one-dimensional grating coupler design on hybrid silicon/LNOI platform[J]. Optics Express, 2020, 28(11): 17113–17121.
- [9] WANG X, YU H, HUANG Q, et al. Polarization-independent fiber-chip grating couplers optimized by the adaptive genetic algorithm[J]. Optics Letters, 2021, 46(2): 314–317.
- [10] 胥小波, 郑康锋, 李丹, 等. 新的混沌粒子群优化算法[J]. 通信学报, 2012, 33(1): 24–30, 37.
- [11] WANG D, TAN D, LIU L. Particle swarm optimization algorithm: an overview[J]. Soft Computing, 2018, 22: 387–408.
- [12] ZHANG B, SCHILLER M, AL QUBAISI K, et al. Polarization-insensitive 1D grating coupler based on a zero-birefringence subwavelength corelet waveguide[J]. Optics Letters, 2022, 47(13): 3167–3170.
- [13] CHEN B, RUAN Z, HU J, et al. Two-dimensional grating coupler on an X-cut lithium niobate thin-film[J]. Optics Express, 2021, 29(2): 1289–1295.
- [14] ZOU J, YU Y, ZHANG X. Single step etched two dimensional grating coupler based on the SOI platform[J]. Optics Express, 2015, 23(25): 32490–32495.