# 基于改进遗传算法设计的超紧凑型片上硅光隔离器\*

冉冲冲<sup>1)2)3)</sup> 吴鸣杰<sup>1)</sup> 曾永灿<sup>1)2)3)</sup> 吴正茂<sup>1)3)</sup> 杨俊波<sup>2)†</sup> 吴加贵<sup>1)3)‡</sup>

(西南大学物理科学与技术学院,重庆 400715)
(国防科技大学,物质与材料科学实验中心,长沙 410073)

3) (西南大学, 微纳结构光电子学重庆市重点实验室, 重庆 400715)

(2024年9月2日收到; 2024年11月27日收到修改稿)

片上集成型光隔离器的定向光传输特性在光通信、光信号处理等领域有广泛的应用价值.本文通过改进 遗传算法,引入分段的适应度函数(阶段1设定隔离度;阶段2设定插入损耗),并建立基因库;在仅为 4.2 μm×3 μm的区域内获得了一种超紧凑的光隔离器方案.在标准的绝缘体上硅(silicon on insulator, SOI) 基片上,通过设置5种直径(60 nm, 120 nm, 180 nm, 240 nm, 300 nm)的刻蚀圆孔排布,在1550 nm TE 偏振 模式下,取得了隔离度约为31 dB、插入损耗约为2 dB的结果;在1550 nm TM 偏振模式下,取得了隔离度约 为38 dB、插入损耗为2 dB的结果.还进一步分析了不同尺寸组对隔离器性能的影响.这些结果对于发展超 小尺寸、高集成度的片上光信号定向传输方案有促进作用.

关键词:集成光隔离器,超紧凑,遗传算法 PACS: 42.82.Ds, 43.40.Tm, 42.79.Ta, 87.55.kd CSTR: 32037.14.aps.74.20241228

**DOI:** 10.7498/aps.74.20241228

#### 1 引 言

隔离器由于具有单向导通特性被广泛用于保 护反射敏感的光学系统中,如激光器、光放大器等<sup>[1]</sup>. 光学器件一般是互易的,即光路可逆,实现单向导 通必须打破非互易,而打破非互易目前主要通过以 下几个方案实现:磁光方案<sup>[2-5]</sup>、非线性方案<sup>[6,7]</sup>、动 态调制方案<sup>[8-10]</sup>、时间反演对称破缺方案<sup>[11,12]</sup>和片 上集成设计方案<sup>[13,14]</sup>等.其中,片上集成方案一般 是利用二维正方晶格光子晶体板之间的异质结 与方向带隙失配和不同的模式转换实现光的非 互易传输.目前,片上集成光隔离器已有诸多报道. 例如 2020年, Mizumoto 和 Shoji<sup>[15]</sup>利用单晶磁光 石榴石在硅片上取得了隔离度为 16 dB 的隔离器. 同年, Karki 等<sup>[16]</sup>通过在石榴石中掺入镓和铕, 得 到了不外加磁场的隔离器, 其在整个 C 波段上的隔 离度为 25 dB. 2021年, Tian 等<sup>[17]</sup>在氮化铝 (AIN) 中利用三个氮化硅 (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)微环谐振器进行时空 调制, 取得隔离度为 10 dB, 插入损耗为 0.1 dB 的 结果. 2022年, Herrmann 等<sup>[10]</sup>采用铌酸锂薄膜实 现了系统频率特征模之间的转化, 在 1550 nm 处 测得的隔离度为 40 dB. 2023年, White 等<sup>[6]</sup>利用 氮化硅微环设计了一种基于克尔效应的隔离器, 取得了 17—23 dB 隔离度. 这些结果表明片上集成 隔离器研究方面取得了很好的进展.

<sup>\*</sup> 国家重点研发计划 (批准号: 2022YFF0706005)、国家自然科学基金 (批准号: 12272407, 62275269, 62275271, 62305387, 62335015)、重庆市自然科学基金 (批准号: CSTB2024NSCQ-LZX0033, CSTB2022NSCQ-MSX0313)、重庆市留学人员回国创业 创新支持计划 (批准号: cx20240022)、国防科技大学科研计划 (批准号: ZK23-03)、湖南省自然科学基金 (批准号: 2022JJ40552, 2023JJ40683) 和新世纪高校优秀人才计划 (批准号: NCET-12-0142) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: yangjunbo@nudt.edu.cn

<sup>‡</sup> 通信作者. E-mail: mgh@swu.edu.cn

<sup>© 2025</sup> 中国物理学会 Chinese Physical Society

但是,目前仍然缺乏一种紧凑的、结构简单的 片上硅基光隔离器方案.为了得到超紧凑结构,采 用逆向算法设计是一个可能的途径.与正向设计不 同,逆向算法设计是以目标为导向进行的算法设 计思路,目前逆向算法设计使用的方法有:直接二 进制搜索 (direct binary search, DBS)算法<sup>[18-20]</sup>、 伴随法 (形状优化<sup>[21-24]</sup>与拓扑优化<sup>[25-28]</sup>)、粒子群 算法<sup>[20-31]</sup>和遗传算法<sup>[32-34]</sup>.除上述算法外,为追求 器件的极致性能还开发出一些混合算法,如 Wang 等<sup>[35]</sup>设计的超宽带宽的 Y 分支器件,先后使用伴 随法与 DBS 对 Y 分支进行优化,取得了超低损耗 与超宽带宽的结果; Peng 等<sup>[36]</sup>讨论了使用单一算 法和混合算法的区别,通过混合算法得到的器件在 性能上更有优势.

基于此,本文基于遗传算法发展了引入分段设 计适应度函数的自适应调整算法,在标准的绝缘体 上硅 (silicon on insulator, SOI) 基片,通过设置简 单的 5 种不同直径的圆孔结构而实现了光的定向 传输.在经典设计<sup>[13,14]</sup> 的基础上,本文获得的隔离 器尺寸更小,仅为 4.2 μm × 3 μm,且获得了更高的 隔离度和更低的插入损耗.在 TE 偏振模式下,取 得了隔离度约为 31 dB、插入损耗仅为 2 dB 的结果. 这些结果对于发展结构超紧凑的、更利于光电融合的片上硅基光电子系统具有有益价值.

## 2 结构设计

图 1 为基于 SOI 的片上隔离器示意图, 由三 根直波导和一块方形波导组成,分别为入射波导 (450 nm)、出射波导 (900 nm)、下方波导 (900 nm) 和中心波导 (4.2 μm×3 μm). 通过在中心波导刻蚀 不同半径的圆孔以实现隔离效果[13,14],中心波导共 有 140 个 (14 × 10) 位置可选择刻蚀与否, 为提高 模型的表达能力,刻蚀的圆孔直径提供了5种 尺寸,分别是 60, 120, 180, 240 和 300 nm. 除了选 择不同尺寸的圆孔刻蚀以外,还可以不对该位置刻 蚀.图 1(a) 为正向通过该器件时的示意图, 其中紫 色部分的材料为纯硅, 淡蓝色部分的材料为 SiO<sub>2</sub>, 下方展示了5种可供遗传算法选择的尺寸;图1(b) 为反向通过该器件时的示意图,下方给出了遗传算 法通过 1500 次优化 1550 nm TM 偏振计算出来的 结果,观察该结构可以发现,遗传算法充分使用了 不同尺寸的圆孔.



图 1 隔离器结构示意图 (a) 正向导通示意图, 下方是优化过程中可供选择的 5 种不同的圆孔孔径参数; (b) 反向通光示意图. 下方是 1550 nm 的 TM 模式光源经过 1500 次迭代后最优价值函数对应的隔离器结构分布图

Fig. 1. Isolator structure diagram: (a) Schematic diagram of the forward guide, below which are the five different round hole aperture parameters that can be selected during the optimization process; (b) reverse light passing diagram. The structure below is the distribution diagram of the isolator structure corresponding to the optimal value function of the 1550 nm TM mode light source after 1500 iterations. 3 遗传算法的改进

遗传算法被广泛用于光子器件优化[32-34],这 里设定种群环境容纳量为 50, 种群进化 1500 代, 遗传算法的流程如图 2 所示,首先随机生成一个数 量为 50 个的初始种群, 种群之间随机进行基因交 流,产生一个数量为100的新种群,将这个新种群 代入时域有限差分 (finite difference time domain, FDTD) 中计算得到了整个种群的适应度, 以适应 度为参考对种群内的个体进行选择,选择出适应 度靠前的 50 个个体,下一代以该 50 个个体作为迭 代的初始种群 (父代). 当迭代次数达到预设时, 程 序结束并导出结果.为满足隔离器单向传播的特 性,进一步发展为混合算法,即在计算适应度函数 (价值函数 FOM) 时,算法考虑了两个阶段. 第一 个阶段优先优化隔离度,此时的价值函数设定为  $FOM = -10 \log_{10}(p_1/p_2)$ , 式中  $p_1, p_2$ 分别表示反 向、正向通过器件的透射率. 经反复模拟发现当隔 离度值较大时,反向透射率 p1 的减小速度要慢于 正向透射率 p2 的增大速度. 虽然隔离度值符合得 很好,但插入损耗却较大,于是本文针对插入损耗 设置了第二段价值函数. 在该阶段对 p1 进行限制, 当 $p_1 < 1 \times 10^{-4}$ 时, 令 $p_1 = 1 \times 10^{-4}$ , 如此, 遗传 算法会将优化重心转移到插入损耗上,因而得到符 合预期的隔离器性能.

在种群演化更新中常常出现一些"未进化"的

个体,倘若再次对这些个体进行计算,很大程度上 会降低算法的优化效率,于是进一步构建了基因 库.当计算出一个新结构的 FOM 后,将这个结构 和计算的结果保存至基因库中,后续计算价值函数 时,首先查看该结构是否已存在于基因库中,若存 在则返回对应的值,进而增加了算法的效率.

## 4 分析结果

图 3 给出了遗传算法迭代 1, 11 和 201 次时的 结果,图 3(a)—(c),图 3(d)—(f),图 3(g)—(i)分别 是正向传播模场、反向传播模场与对应的结构分 布.模场分布随着迭代次数的增加,正向通过的光 强越来越大,而反向通过的光强越来越小,符合 预期.

#### 4.1 TE 模式

将光源设置为 1550 nm 处的 TE 偏振, 算法 优化得到了图 4 所示的结果, 图 4(a) 是最优结构 的正向和反向透射率, 正向透射率最终收敛在 61.47%, 反向透射率收敛于5×10<sup>-4</sup>.图 4(b) 红线 是最优结构的价值函数随着迭代次数呈阶梯式单 调递增趋势; 蓝线是最优结构的隔离度随迭代次数 的变化曲线, 该曲线在细节上并不是单调递增, 这 是由于第二阶段的价值函数限制作用, 优化重心转 移至正向透射率的结果.图 4(c) 是不同波长的光 源正向 (红色点线)、反向 (红色实线) 通过结构的



图 2 遗传算法的流程图 Fig. 2. Flow chart of genetic algorithm.



图 3 遗传算法的最优结构在正向、反向传播时光场模场分布和对应的结构分布图 (a), (d), (g) 迭代 1 次; (b), (e), (h) 迭代 11 次; (c), (f), (i) 迭代 201 次

Fig. 3. Optimal structure of genetic algorithm in the forward and backward propagation of power distribution and the corresponding structure distribution diagram: (a), (d), (g) Iteration 1 times; (b), (e), (h) 11 iterations; (c), (f), (i) 201 iterations.

透射率和隔离度 (蓝色曲线)分布图, 红色点线 的值在 1.53—1.58 µm 之间都远远高于红色实线, 该器件的 3 dB 带宽约为 50 nm. 图 4(d) 和图 4(g)、 图 4(e) 和图 4(h)、图 4(f) 和图 4(i)分别为 1550 nm TE 模式的光正向和反向通过最优结构 (白色圆 孔)的电场、磁场、功率的模场分布, 从图 4(d)— (f)可以看出正向通过该结构时, 不论是电场、磁场 还是功率均能在出射波导中接收到电磁信号; 从 图 4(g)—(i)可观察到出射波导中并没有接受到大 量电磁信号, 而是被反射回去或者进入到了下方波 导中. 综上, 在 TE 偏振下 1550 nm 处取得了隔离 度为 30.89 dB, 插入损耗为 2.11 dB 的结果.

#### 4.2 TM 模式

将光源设定为 1550 nm 的 TM 基模, 优化得 到的结果见图 5, 其中图 5(a) 和图 5(d)、图 5(b) 和图 5(e) 以及图 5(c) 和图 5(f) 分别将光源波长设 置为 1535, 1555 和 1575 nm 处, 光正向与反向通 过隔离器的电场模分布, 整体均有隔离效果, 在细 节上模场分布并不一致,体现了不同波长的光在硅 介质中传播规律的差别. 图 5(g) 红色曲线为每代 最优结构的隔离度随着迭代次数的变化; 蓝色曲线 为插入损耗随迭代次数的变化. 图 5(h) 是正向导 通的透射率随着迭代次数的变化结果,透射率随着 迭代次数"阶梯式"增加. 图 5(i) 展示了不同波长的 光源正向(红色点线)、反向(红色实线)通过结构 的透射率分布和 1450—1650 nm 的各个波长 (蓝 色曲线)隔离度分布,由图可得该器件的3dB带 宽约为 50 nm, 正向通过器件时透射率值随波长的 变化起伏较大,而反向透射率相比于正向透射率均 较小. 图 5(j) 和图 5(k) 分别是延长波导光源正向 和反向通过这个器件的光场模场分布图,光从入射 波导进入器件后大部分光都从出射波导中透过,少 部分光从器件中散射出去,图中白色圆圈标注处是 透射监视器放置处,经优化该处的最大透射率为 61%. 由图 5(k) 可得反向入射的光多数被反射. 综 上,在TM偏振下1550nm处取得了隔离度为 37.86 dB, 插入损耗为 1.96 dB 的结果.



图 4 将光源设置为 1550 nm TE 偏振的优化结果 (a) 透射率随着迭代次数的变化曲线; (b) 价值函数和隔离度随着算法的迭 代的变化曲线; (c) 不同波长通过结构的透射率分布曲线; (d), (g) 正向、反向通光时的电场模场分布图; (e), (h) 正向、反向通光 时的磁场分布图; (f), (i) 正向、反向通光时的光场模场分布图

Fig. 4. Optimization results of setting the light source to 1550 nm TE polarization: (a) Transmittance with the number of iterations; (b) variation curve of the value function and isolation degree with the iteration of the algorithm; (c) transmittance distribution curves of different wavelengths through the structure; (d), (g) mode field distribution of the electric field when the light is transmitted in the forward and reverse directions; (e), (h) magnetic field distribution in forward and reverse transmission; (f), (i) power distribution diagram for forward and reverse transmission.

## 5 讨 论

#### 5.1 结构尺寸对隔离性能的影响分析

上述研究中, TE 模式与 TM 模式使用的结构 参数均一致, 其中最小的圆孔半径为 30 nm, 为探 究不同特征尺寸对隔离器效果的影响设置了 4 套 不同的体系, 以最小半径 25 nm 为例, 在这套结构 体系中还有半径为 0×25 nm, 1×25 nm, 2×25 nm, 4×25 nm 和 5×25 nm 的圆孔供算法选择, 最小半 径还有 50, 75 和 100 nm. 对这 4 套结构分别进行 优化, 结果如图 6 所示. 图 6(a) 是正向透射率随迭 代次数的变化曲线, 透射率值为上升趋势并收敛, 其中透射率取值最大的是 25 nm 对应的体系, 该 体系最优结构的正向透射率 (75%), 其次是 50 nm (23%), 75 nm (17%) 和 100 nm (13%), 取值随尺 寸的增大呈下降趋势. 图 6(b) 是反向透射率随着 迭代次数的变化曲线,可以看出整体呈下降趋势并 收敛于价值函数限制处 (10<sup>-4</sup>), 其中 100 nm 体系 的反向透射率特别低,体现了大尺寸体系将光传播 到指定位置比较困难,即该体系的表达能力不足. 图 6(c) 是隔离度随着迭代次数的变化曲线, 其中 25 nm 体系计算出来的隔离度有 40 dB, 整体上看 尺寸越大隔离度越小,细节上不符的是100 nm体 系和 75 nm 体系, 这是由于 100 nm 特征尺寸的通 光能力过小,导致计算出来的隔离度大于 75 nm 的结构,这也证实了设置两段价值函数的必要性, 避免了通光能力小、插入损耗很大的器件. 图 6(d) 是4种特征尺寸的价值函数随迭代次数的变化曲 线,可以看出,所有体系的价值函数都是随迭代的 次数先阶梯式单调递增,最后收敛到4个值,体现 了特征尺寸越小(表达能力强),越符合本文对隔离 器的期望.



图 5 TM 偏振的优化结果 (a), (d) 1535 nm 处的光场模场分布图; (b), (e) 1555 nm 处的光场模场分布图; (c), (f) 1575 nm 处的 光场模场分布图; (g) 隔离度、插入损耗的变化曲线; (h) 透射率的变化曲线; (i) 不同波长的光源通过结构的透射率和隔离度分布 曲线; (j), (k) 1550nm TM 光源正向和反向通过结构的光场模场分布图

Fig. 5. Optimization results of TM polarization: (a), (d) Optical power distribution at 1535 nm; (b), (e) optical power distribution at 1555 nm; (c), (f) optical power distribution at 1575 nm; (g) variation curves of isolation and insertion loss; (h) variation curves of transmittance; (i) transmittance curves and isolation distribution curves of different wavelengths of the light source passing through the structure; (j), (k) mode-field distribution of the light field of a 1550 nm TM light source passing through the structure in the forward and reverse directions.

根据优化的数据可以看出:结构尺寸越小,隔 离效果越好.但同时需要考虑到现实工艺的限制, 器件结构尺寸并不能无限制得小,正如上文使用的 最小半径为 30 nm 的圆孔, 该尺寸的结构加工相 对容易, 且隔离度较大而插入损耗较小, 基本满足 实验的需求.



图 6 四种特征尺寸随迭代次数的变化曲线和刻蚀穿透间距离 (a) 正向透射率; (b) 反向透射率; (c) 隔离度; (d) 价值函数; (e)—(h) 刻蚀 10 nm 孔间距得到的透射率曲线、示意图和光场模场分布图; (i)—(l) 刻蚀 20 nm 得到的结果; (m)—(p) 刻蚀 30 nm 得到的结果

Fig. 6. Variation curves of the four feature sizes with the number of iterations and the distance between the etched penetrations: (a) Forward transmittance; (b) reverse transmittance; (c) isolation; (d) FOM function; (e)–(h) transmittance curves, schematic and power distribution plots obtained by etching 10 nm pore spacing; (i)–(l) results obtained by etching 20 nm; (m)–(p) results obtained by etching 30 nm.

#### 5.2 刻蚀穿透对器件性能的影响

本文在设计中限定了刻蚀圆孔最小半径为 30 nm,而不同刻蚀孔的统一间距为 300 nm.因为 方案中有了不同半径的刻蚀圆孔,从而相邻圆孔间 最小距离分别具有 0, 30, 60, 120, 150, 180, 210, 240,300 nm 等 9 种可能.对于孔间距离为 0 nm 的特殊情况,会直接导致刻蚀穿透而实际不能加工.如图 6(f),(j) 和 (n) 所示,分别对应于刻蚀穿 透区域为 10,20 和 30 nm 的情况.这覆盖了当前 电子束工艺的极限加工尺寸约 10 nm<sup>[37,38]</sup>,以及更

成熟的 30 nm 特征尺寸<sup>[39]</sup>. 以 30 nm 刻蚀穿透为 例, 如图 6(n) 所示, 两个圆孔相距为 30 nm 的区 域被腐蚀掉而导致两个圆孔穿通. 通过仿真计算, 得到对应图 6(o) 的 1550 nm TE 模式的光正向通 过结构的光场强分布, 以及图 6(p) 的 1550 nm TE 模式的光反向通过结构的光场强分布图. 图 6(m) 为结构的光透射率分布曲线, 可见在 30 nm 刻蚀 穿透情况, 器件仍然保持了良好的隔离特性. 进一 步与图 6(e) 和图 6(i) 比较可知, 10 nm 刻蚀穿透 和 20 nm 刻蚀穿透对器件光隔性能的总体影响不 大. 当然可以预期, 随着刻蚀穿透区域越来越大, 器件的光隔离性能肯定会进一步劣化. 总之, 本文 的结果初步显示, 当前较成熟的 30 nm 刻蚀工艺 导致的刻蚀穿透是可以承受的.

## 6 结 论

本文在标准 SOI 平台上 4.2 µm × 3 µm 区域内 设计了一种高集成度、高隔离度的硅基光隔离器方 案.结合分段价值函数,发展了改进的遗传算法, 在1550 nm TE 偏振下取得了隔离度为 30.89 dB, 插入损耗为 2.11 dB 的结果;此外还分析了 1550 nm TM 偏振模式下该光隔离器的结构参数,取得了隔 离度为 37.86 dB,插入损耗为 1.96 dB 的结果;并 进一步分析了不同尺寸体系对隔离器性能的影响, 得到了微纳结构尺寸越小,体系的表达能力越强, 隔离效果越好的结论,但同时也需要综合考虑实际 加工工艺的限制.总体而言,这些结果有利于发展 超紧凑的片上硅光单向传输方案,有利于发展光电 融合的集成硅基光电子系统.

#### 参考文献

- Yu M, Cheng R, Reimer C, He L, Luke K, Puma E, Shao L, Shams-Ansari A, Ren X, Grant H R, Johansson L, Zhang M, Lončar M 2023 Nat. Photonics 17 666
- [2] Huang D, Pintus P, Shoji Y, Morton P, Mizumoto T, Bowers J E 2017 Opt. Lett. 42 23
- [3] Pintus P, Huang D, Zhang C, Shoji Y, Mizumoto T, Bowers J E 2017 J. Lightwave Technol. 35 1429
- [4] Bi L, Hu J, Jiang P, Kim D H, Dionne G F, Kimerling L C, Ross C 2011 Nat. Photonics 5 758
- [5] Onbasli M C, Beran L, Zahradník M, Kučera M, Antoš R, Mistrík J, Dionne G F, Veis M, Ross C A 2016 *Sci. Rep.* 6 23640
- [6] White A D, Ahn G H, Gasse K V, Yang K Y, Chang L, Bowers J E, Vučković J 2023 Nat. Photonics 17 143
- [7] Abdelsalam K, Li T, Khurgin J B, Fathpour S 2020 Optica 7

209

- [8] Dostart N, Gevorgyan H, Onural D, Popović M A 2021 Opt. Lett. 46 460
- [9] Lira H, Yu Z, Fan S, Lipson M 2012 Phys. Rev. Lett. 109 033901
- [10] Herrmann J F, Ansari V, Wang J, Witmer J D, Fan S, Safavi-Naeini A H 2022 Nat. Photonics 16 603
- [11] Yu Z, Fan S 2009 Nat. Photonics 3 91
- [12] Kang M S, Butsch A, Russell P S J 2011 Nat. Photonics 5 549
- [13] Wang C, Zhou C Z, Li Z Y 2011 Opt. Express 19 26948
- [14] Wang C, Zhong X L, Li Z Y 2012 Sci. Rep. 2 674
- [15] Mizumoto T, Shoji Y 2020 Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2020 San Diego, California, United States, March 8–12, 2020 pT3B.1
- [16] Karki D, Stenger V, Pollick A, Levy M 2020 J. Lightwave Technol. 38 827
- [17] Tian H, Liu J, Siddharth A, Wang R N, Blésin T, He J, Kippenberg T J, Bhave S A 2021 Nat. Photonics 15 828
- [18] Seldowitz M A, Allebach J P, Sweeney D W 1987 Appl. Opt. 26 2788
- [19] Yuan H, Wu J, Zhang J, Pu X, Zhang Z, Yu Y, Yang J 2022 Nanomaterials 12 669
- [20] Peng Z, Feng J, Yuan H, et al. 2022 Nanomaterials 12 1121
- [21] Lalau-Keraly C M, Bhargava S, Miller O D, Yablonovitch E 2013 Opt. Express 21 21693
- [22] Keraly C L, Bhargava S, Ganapati V, et al. 2014 CLEO: Science and Innovations 2014 San Jose, California, United States, June 8–13, 2014 pSTu2 M.6
- [23] Liao J, Tian Y, Yang Z, Xu H, Tang C, Wang Y, Zhang X, Kang Z 2024 Chin. Opt. Lett. 22 011302
- [24] Wang Z, Feng J, Li H, Zhang Y, Wu Y, Hu Y, Wu J, Yang J 2023 Nanomaterials 13 2516
- [25] Piggott A Y, Lu J, Lagoudakis K G, Petykiewicz J, Babinec T M, Vučković J 2015 Nat. Photonics 9 374
- [26] Nanda A, Kues M, Calà Lesina A 2024 Opt. Lett. 49 1125
- [27] Vercruysse D, Sapra N V, Su L, Trivedi R, Vučković J 2019 Sci. Rep. 9 8999
- [28] Cao J, Zhao Z, Sun H, Yang Y, Deng Y, Cao P 2023 J. Phys.: Conf. Ser. 2464 012019
- [29] Mak J C, Sideris C, Jeong J, Hajimiri A, Poon J K 2016 Opt. Lett. 41 3868
- [30] Yao R, Li H, Zhang B, Chen W, Wang P, Dai S, Liu Y, Li J, Li Y, Fu Q, Dai T, Yu H, Yang J, Pavesi L 2021 J. Lightwave Technol. 39 6253
- [31] Lee I, Kim C, Ju K, Jun G, Yoon G 2023 Appl. Opt. 62 8994
- [32] Jia W, Jiang L, Li X 2010 Opt. Commun. 283 1537
- [33] Yu Z, Cui H, Sun X 2017 Opt. Lett. 42 3093
- [34] Mirzaei A, Miroshnichenko A E, Shadrivov I V, Kivshar Y S 2014 Appl. Phys. Lett. 105 011109
- [35] Wang Z, Peng Z, Zhang Y, Wu Y, Hu Y, Wu J, Yang J 2023 Opt. Express 31 15904
- [36] Peng Z, Feng J, Du T, Cheng W, Wang Y, Zang S, Cheng H, Ren X, Shuai Y, Liu H, Wu J, Yang J 2022 Opt. Express 30 27366
- [37] Cakirlar C, Galderisi G, Beyer C, Simon M, Mikolajick T, Trommer J 2022 2022 IEEE 22nd International Conference on Nanotechnology (NANO) Palma de Mallorca, Spain, July 4–8, 2022 pp207–210
- [38] Saifullah M, Subramanian K, Tapley E, Kang D J, Welland M, Butler M 2003 Nano Lett. 3 1587
- [39] Wang K, Ren X, Chang W, Lu L, Liu D, Zhang M 2020 Photonics Res. 8 528

## Ultra-compact on-chip silicon photonics isolator designed using modified genetic algorithm<sup>\*</sup>

1) (School of Physical Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China)

2) (Center of Material Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

3) (Chongqing Key Laboratory of Micro & Nano Structure Optoelectronics, Southwest University, Chongqing 400715, China)

( Received 2 September 2024; revised manuscript received 27 November 2024 )

#### Abstract

The directional optical transmission characteristics of on-chip integrated optical isolators have wide applications in fields such as optical communication and optical signal processing. At early stage, various schemes of on-chip optical isolators have been developed, such as single-crystal magneto-optical pomegranate scheme, and silicon nitride  $(Si_3N_4)$  micro-ring resonators. However, there is still lack of compact on-chip optical isolator solutions. Here, a compact and integrated silicon optical isolator on a standard silicon on insulator (SOI) substrate is proposed and designed by intelligent algorithms and a variety of micro-nano circular vias. A modified genetic algorithm is developed, a segmented design fitness function is induced, and a gene library is established to obtain an ultra-compact optical isolator scheme with a size of only  $4.2 \ \mu m \times 3 \ \mu m$ . On a standard silicon on insulator substrate, a linear passive isolation scheme is achieved by etching circular holes with five different diameters: 60 nm, 120 nm, 180 nm, 240 nm, and 300 nm. In the TE polarization mode, the design achieves an isolation degree of approximately 31 dB and an insertion loss of about 2 dB. Furthermore, in TM polarization mode, the design achieves an isolation degree of approximately 38 dB and an insertion loss of 2 dB; Finally, the influence of different size groups on the performance of isolators is analyzed. The results show that the smaller the circular hole structure, the better the isolation performance is. However, at the same time, we also need to consider the real silicon etching process requirements. In practice, holes that are too small are difficult to etch the effects of etching penetration at 10 nm, 20 nm and 30 nm between circular vias on the performance of the isolator are also evaluated, and the preliminary results show that the etching penetration caused by the more mature 30 nm etching process is acceptable. Therefore, considering all factors, it is recommended that the minimum circular hole size be 30 nm and the minimum distance adjacent circular holes be 30 nm. These results can promote the development of highly integrated and ultra-small on-chip optical signal directional transmission schemes.

Keywords: integrated optical isolator, ultra-compact, genetic algorithms

PACS: 42.82.Ds, 43.40.Tm, 42.79.Ta, 87.55.kd

**DOI:** 10.7498/aps.74.20241228

#### CSTR: 32037.14.aps.74.20241228

<sup>\*</sup> Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2022YFF0706005), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12272407, 62275269, 62275271, 62305387, 62335015), the Natural Science Foundation of Chongqing, China (Grant Nos. CSTB2024NSCQ-LZX0033, CSTB2022NSCQ-MSX0313), the Innovation Support Program for Overseas Students in Chongqing, China (Grant No. cx20240022), the Foundation of National University of Defense Technology, China (Grant No. ZK23-03), the Natural Science Foundation of Hunan Province, China (Grant Nos. 2022JJ40552, 2023JJ40683), and the Program for New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education of China (Grant No. NCET-12-0142).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: yangjunbo@nudt.edu.cn

<sup>‡</sup> Corresponding author. E-mail: mgh@swu.edu.cn





Institute of Physics, CAS

#### 基于改进遗传算法设计的超紧凑型片上硅光隔离器

冉冲冲 吴鸣杰 曾永灿 吴正茂 杨俊波 吴加贵

Ultra-compact on-chip silicon photonics isolator designed using modified genetic algorithm RAN Chongchong WU Mingjie ZENG Yongcan WU Zhengmao YANG Junbo WU Jiagui 引用信息 Citation: Acta Physica Sinica, 74, 044207 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20241228 CSTR: 32037.14.aps.74.20241228 在线阅读 View online: https://doi.org/10.7498/aps.74.20241228 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

基于遗传算法的宽带渐变电阻膜超材料吸波器设计

Design of broadband gradient resistive film metamaterial absorber based on genetic algorithm 物理学报. 2024, 73(7): 074101 https://doi.org/10.7498/aps.73.20231781

机器学习结合固溶强化模型预测高熵合金硬度

Machine learning combined with solid solution strengthening model for predicting hardness of high entropy alloys 物理学报. 2023, 72(18): 180701 https://doi.org/10.7498/aps.72.20230646

基于直接二进制搜索算法设计的超紧凑In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>可调控功率分束器

Ultra-compact In2Se2 tunable power splitter based on direct binary search algorithm

物理学报. 2023, 72(15): 154207 https://doi.org/10.7498/aps.72.20230459

基于遗传算法的太赫兹多功能可重构狄拉克半金属编码超表面 Genetic algorithm based terahertz multifunctional reconfigurable Dirac semi-metallic coded metasurface 物理学报. 2024, 73(14): 144204 https://doi.org/10.7498/aps.73.20240225

基于硅基砖砌型亚波长光栅的紧凑型模式转换器

Silicon-based compact mode converter using bricked subwavelength grating 物理学报. 2023, 72(16): 164203 https://doi.org/10.7498/aps.72.20230673

#### 光纤相控阵稀疏排布优化算法对比

Comparison between optimal configuration algorithms of fiber phased array 物理学报. 2021, 70(8): 084205 https://doi.org/10.7498/aps.70.20201768