

引用本文:冯瑶,耿敏明,何万才,等.基于SOI的类梅花型二维光栅耦合器[J].光通信技术,2023,47(4):1-7.

基于SOI的类梅花型二维光栅耦合器

冯瑶^{1,2},耿敏明^{1,2,3,4*},何万才^{1,2},赖明彬^{1,2},刘 嫻^{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;4.广西信息科学实验中心,广西 桂林 541004)

摘要:为设计出高效率且低偏振耦合相关损耗的二维光栅耦合器(2D-GC),提出一种基于绝缘体上硅(SOI)的类梅花型2D-GC。该2D-GC由多个单元周期排列而成,每个单元的图案呈类梅花型,该结构中的晶胞由2对圆形图案构成,并采用时域有限差分(FDTD)法对2D-GC结构参数进行数值仿真优化。仿真结果表明:在最佳优化参数结构时,所提2D-GC的有效工作波段为1.525~1.6 μm ,最佳耦合效率为56%,对应的耦合损耗为-2.4 dB,偏振相关损耗为0.18 dB。

关键词:绝缘体上硅;二维光栅耦合器;类梅花型;偏振;耦合损耗

中图分类号:TN252 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2023)04-0001-07

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.04.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Plum-like two-dimensional grating coupler based on SOI

FENG Yao¹, GENG Minming^{1,2,3,4*}, HE Wancai^{1,2}, LAI Mingbing^{1,2}, LIU Qiang^{1,2,3}, ZHANG Zhenrong^{1,2,3}

(1. School of Computer, Electronics and 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;

4. Guangxi Experiment Center of Information Science, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: In order to design a two-dimensional grating coupler(2D-GC) with high efficiency and low polarization coupling related loss, a plum-like 2D-GC based on silicon-on-insulator (SOI) is proposed. The 2D-GC is composed of several cells arranged periodically, and the pattern of each cell is like plum blossom. The cell in the structure is composed of two pairs of circular patterns. The finite difference time domain(FDTD) method is used to simulate and optimize the structure parameters of the 2D-GC. The simulation results show that the effective working band of the proposed 2D-GC is 1.525~1.6 μm , the optimal coupling efficiency is 56%, the corresponding coupling loss is -2.4 dB, and the polarization related loss is 0.18 dB when the parameter structure is optimized.

Key words: silicon-on-insulator, two-dimensional grating coupler, plum-like, polarization, coupling loss

0 引言

由于绝缘体上硅(SOI)与互补金属氧化物半导体(CMOS)的制备工艺具有良好的兼容性和实现高集成度光子、光电芯片的发展潜力^[1-2],使得基于集成光路

的片上/片外耦合器被广泛研究与应用^[3]。基于单模光波导的横截面通常为500 nm×220 nm^[4],而标准单模光纤的直径约为10.4 μm ,两者的形状和尺寸都存在很大的差异,导致光信号在两者之间传输时产生的耦合损耗较大^[5]。目前,降低耦合损耗常见的方式有2种:平面内(对接)边缘耦合^[6-8]和平面外垂直耦合^[9-11]。其中,平面内边缘耦合的效率通常较高^[7],且对准精度要求很高,即光纤和波导必须置于同一水平面并确保双方中心对准,同时还需要锥型的单模光纤才能保证足够的耦合效率(CE)^[12];平面外垂直耦合则可以容忍较大的对准公差,但其CE相对较低,且对偏振比较敏感^[13]。

垂直耦合的核心器件通常是光栅,光栅的结构分为一维光栅和二维光栅。一维光栅耦合器(1D-GC)结

收稿日期:2022-12-07。

基金项目:国家自然科学基金项目(61741504、61965003、61661004)资助;广西自然科学基金项目(2018GXNSFAA294133)资助。

作者简介:冯瑶(1992—),男,硕士研究生,贵州省普安县人,现就读于广西大学计算机与电子信息学院计算机科学与技术专业,主要研究方向是信息处理与通信网络系统-硅基集成化光学神经网络拓扑结构及其关键器件。

*通信作者:耿敏明(1981—),男,博士,讲师,硕士生导师,主要研究方向为硅基集成光学、光纤通信技术和光子信息处理。

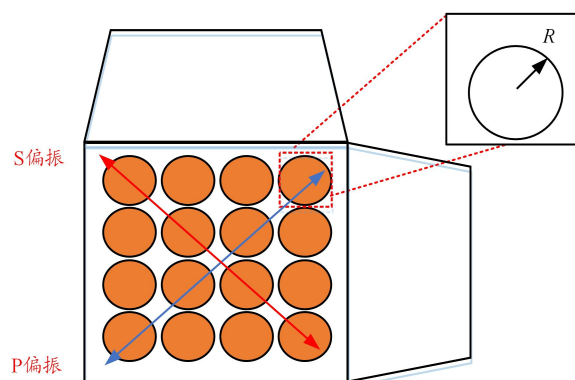


冯瑶,耿敏明,何万才,等:基于 SOI 的类梅花型二维光栅耦合器

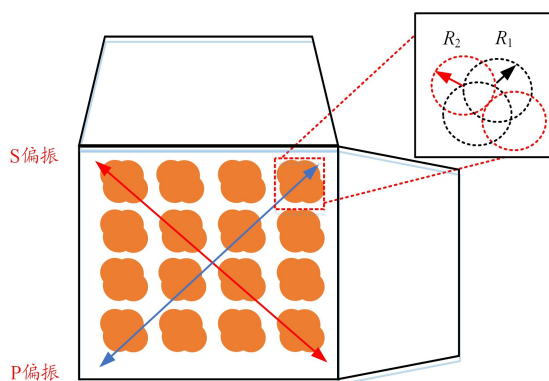
构较为简单,但偏振相关性较强^[14-15],无法用于处理偏振态随机变化的光信号。尽管文献[16-18]已经提出了偏振不敏感或偏振分束的 1D-GC,但大多数硅光子集成芯片(PICs)是为横电波(TE)模式设计的,因此 1D-GC 需要添加额外的偏振旋转器,这不仅使 PICs 的设计复杂化,而且会增大 PICs 的面积。文献[19-24]使用了 2 个正交的 1D-GC 组合而成的二维光栅耦合器(2D-GC)来解决偏振相关性问题,同时在 2D-GC 上端使用具有一定倾斜角度的非垂直入射光源减少二阶反射,从而提高 CE。2D-GC 能处理任意偏振态的输入光信号,并以 TE 偏振态输出至后续的光器件,即同时实现偏振的分束和旋转^[25-29]。但是,倾斜耦合也会直接导致 S 偏振和 P 偏振之间的耦合谱位移,造成偏振相关损耗(PDL)较大。为减小 PDL,2009 年,VAN F 等人^[30]提出结构紧凑的基于聚焦光栅结构的 2D-GC,其长度为普通非聚焦 2D-GC 的 1/8,且 PDL 低于 0.4 dB,但其耦合损耗较大,为-5.68 dB(CE 为 27%)。2017 年,SOBU Y 等人^[31]提出基于十字型单元图案的 2D-GC,其耦合损耗为-4.03 dB(CE 为 39.5%),PDL 小于 0.5 dB,该方案在调试过程中相对简便,但器件性能还需要改进和提高。2021 年,ZHANG Z 等人^[32]提出了具有热光相位延迟线的有源结构的 2D-GC,该 2D-GC 的耦合损耗为-1.87 dB(CE 为 65%),PDL 小于 0.2 dB,但附加的有源结构增加了系统设计、制备和调试的复杂性。为了解决以上问题,本文提出一种基于 SOI 的类梅花型 2D-GC。

1 基于 SOI 的类梅花型 2D-GC 结构设计

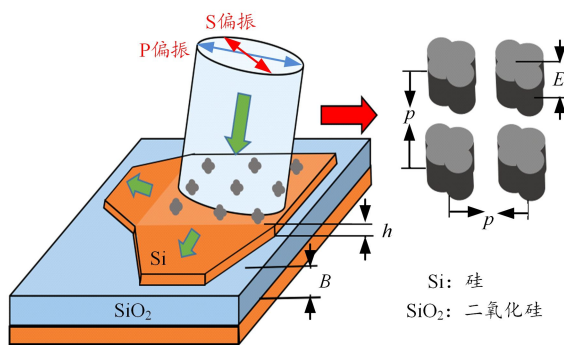
传统 2D-GC 俯视图和基于 SOI 的 2D-GC 结构如图 1 所示。图 1(a)为传统 2D-GC 的俯视图,它由 1 个二维光栅和 2 个正交的线性锥形输出波导组成,其中的二维光栅由周期排列的圆孔单元组成,每个圆孔对应一个晶胞。图 1(b)为本文提出的类梅花型 2D-GC 结构俯视图,该结构中的晶胞由 2 对不同半径的圆构成,其中较小的 1 对圆(半径为 R_1)相切,较大的 1 对圆(半径为 R_2)相交,并且相交的 2 个圆的弧线分别经过彼此的圆心。所提 2D-GC 采用非垂直耦合方式以提高 CE,其示意图如图 1(c)所示。图中, h 为顶硅层厚度, p 为光栅周期, B 为埋氧化层厚度, E 为刻蚀深度。光纤入射光在 2D-GC 的 2 个输出端之间以 45° 角入射,由于光纤采用倾斜耦合,光的 S 偏振平行 2D-GC 平面,P 偏振与光栅平面之间存在一定角度^[19-22],并且 P 偏振的输入电场略微倾斜到 2D-GC 平面。传统的二维



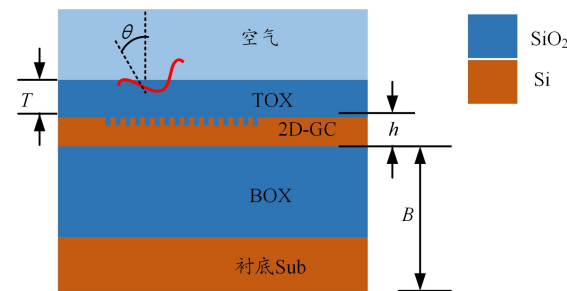
(a) 传统 2D-GC 俯视图



(b) 类梅花型 2D-GC 结构俯视图



(c) 类梅花型 2D-GC 立体示意图



(d) 2D-GC 横截面示意图

图 1 传统 2D-GC 俯视图基于 SOI 的 2D-GC 结构示意图

光栅若采用非垂直耦合方式,容易出现 S 偏振光和 P 偏振光幅频响应曲线不重合的现象,从而引起较大的 PDL;同时,由于传统二维光栅的晶胞可控的结构参数较少,因此无法有效减小 PDL。本文提出的 2D-GC 的晶胞有多个可控参数,通过优化这些结构参数,可以有效减小 PDL。图 1(d)为所提 2D-GC 的横截面结构示意图,2D-GC 是基于 SOI 平台制作而成的,同 SOI 材料一样,从顶硅层到衬底硅层都是基于 Si-SiO₂-Si 的三明治结构。光栅区采用浅刻蚀工艺,通过在顶硅层上刻蚀周期性凹槽形成的衍射图案,光栅上部用 SiO₂ 包裹,优化上包层 SiO₂(TOX 层)的厚度可以进一步提高 CE。

二维光栅作为一种周期结构,入射光矢量和衍射矢量满足布喇格衍射条件:

$$K_{m,z} = \beta + mK \quad (1)$$

其中, β 为光栅的传播因子, $\beta = 2\pi n_{\text{eff}}/\lambda$, n_{eff} 为二维光栅的有效折射率, λ 为耦合谱中的峰值波长; m 为光栅衍射级数, K 为光栅矢量。在二维光栅中,取 $m=-1$, $K=2\pi/p$; $K_{m,z}$ 表示 m 阶衍射光在光栅 z 轴方向上的投影分量,计算公式为

$$K_{m,z} = \frac{2\pi}{\lambda} n_1 \sin \theta \quad (2)$$

其中, n_1 为入射介质的折射率, θ 为光纤倾斜角度。根据式(1)和式(2)可得到入射条件下峰值波长 λ 的表达式为

$$\lambda = (n_{\text{eff}} - n_1 \sin \theta) \times p \quad (3)$$

根据式(1)~式(3)可知,当光栅的结构一旦确定, n_{eff} , n_1 , p 则为固定值,不同的光纤倾斜角度 θ 对应不同的耦合谱线峰值波长 λ ;当 n_1 , p , θ 确定时,耦合谱线峰值波长 λ 仅取决于光栅的有效折射率 n_{eff} ,即可以根据系统的工作波长来大致确定光栅的初始结构参数。

为表征 2D-GC 倾斜耦合时的性能,还需要度量 S 偏振的耦合谱线相对 P 偏振偏移而引起的 PDL 情况。本文定义 PDL 为在相同波长处 2 个偏振对应的耦合损耗之差的绝对值,即

$$D_{\text{PDL}} = |10\lg(T_s) - 10\lg(T_p)| \quad (4)$$

其中, T_s 和 T_p 分别表示 S 偏振和 P 偏振对应的 CE。

从图 1(b)~图 1(d)可以看出,光信号从光纤经空气以倾斜角 θ 入射到光栅,分别经过上包层、TOX、埋氧化层和底部氧化层(BOX)。与光栅性能相关的结构参数及其初始值如表 1 所示。为了降低仿真难度,可以微调参数以减少数据波动。

表 1 基于 SOI 的类梅花型 2D-GC 的结构参数及其初始值

顶硅层 厚度 h / nm	刻蚀 深度 E / nm	埋氧化 层厚度 $B/\mu\text{m}$	上包层 厚度 T / nm	圆孔 半径 R_1/nm	圆孔 半径 R_2/nm	光栅 周期 p / nm	光纤 倾斜 角度 $\theta/(^\circ)$
220	140	3	750	100	130	650	12

本文对光栅的性能仿真采用三维时域有限差分(FDTD)法进行数值分析。为了使光纤与光栅之间的对准具有较大的容差空间^[28],光栅有效面积设置为 $12\mu\text{m} \times 12\mu\text{m}$ 。入射光经光栅从两臂输出,光栅总 CE 为 X、Y 方向两臂 CE 的叠加。

2 仿真实验

为了使所提 2D-GC 实现最大 CE 和最佳 PDL,本文先优化单个偏振(S 偏振)的 CE,再控制 S 偏振和 P 偏振的耦合光谱(减小 PDL)。

首先,仿真观察光栅 CE 随 R 、 E 和 p 的变化趋势。当 $p=650\text{ nm}$ 、 $E=140\text{ nm}$ 时,CE 随 R_1 、 R_2 的变化趋势如图 2 所示。可以看出,随着半径的增加,CE 逐渐增大,峰值波长蓝移。当 $R_1=100\text{ nm}$ 时,随着 R_2 增加,CE 逐渐增大;半径继续增大,CE 逐渐减小,峰值波长继续蓝移。该仿真中,半径每变化 10 nm ,耦合谱偏移 6 nm 左右。这是因为半径越大,被刻蚀去掉的 TOX 就越多,导致光栅的 n_{eff} 减小,峰值波长蓝移。

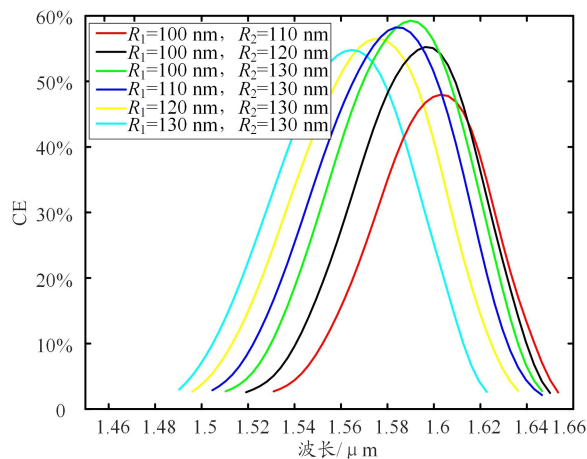
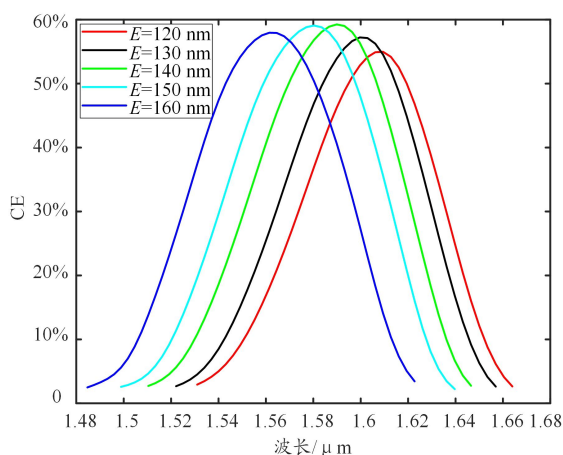


图 2 R_1 、 R_2 对 CE 的影响

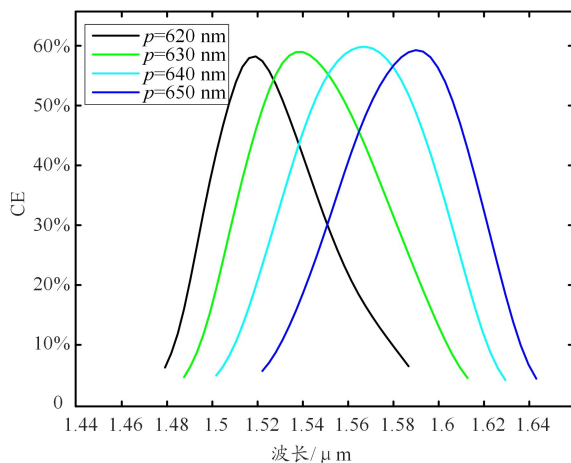
然后,仿真观察 E 对 2D-GC 耦合性能的变化趋势。当 $p=650\text{ nm}$ 、 $R_1=100\text{ nm}$ 、 $R_2=130\text{ nm}$ 时,刻蚀深度 E 对 CE 的影响如图 3 所示。可以看出, E 每变化 10 nm ,产生了约 10 nm 的峰值波长偏移,即随着刻蚀深度的增加,光栅的有效折射率 n_{eff} 随之减小,峰值波长蓝

冯瑶,耿敏明,何万才,等:基于SOI的类梅花型二维光栅耦合器

图3 当 $p=650$ nm、 $R_1=100$ nm、 $R_2=130$ nm 时, E 对 CE 的影响

移;当 $E=140$ nm 时,CE 最大。图 2 中, R_1 和 R_2 取不同的大小时,波峰变化比较大;而图 3 中其峰值变化平缓。由此可知, R_1 、 R_2 对光栅的 CE 影响更大, E 对光栅的耦合峰值波长影响更大。

最后,观察 p 对 2D-GC 耦合性能的变化趋势。当 $R_1=100$ nm、 $R_2=130$ nm、 $E=140$ nm 时,光栅周期 p 对 CE 的影响如图 4 所示。可以看出,CE 随 p 的变化不大,在 $p=640$ nm 时的 CE 达到最大值,且 p 每增大 10 nm,耦合谱峰值波长向右偏移 25 nm 左右,即随着 p 的增加,峰值波长红移。

图4 当 $R_1=100$ nm、 $R_2=130$ nm、 $E=140$ nm 时, p 对 CE 的影响

为了进一步提高 CE,本文对 R_1 、 R_2 、 E 、 p 做二次优化。由上述仿真结果可知, p 对 CE 的影响较小,可令 $p=640$ nm,以降低仿真的复杂度。当 $R_2=130$ nm 时, R_1 和 E 联合变化对 CE 的影响如图 5(a) 所示。可以看出,在 $R_1=100$ nm、 $E=120$ nm 时,CE 达到最大值。令 $R_1=100$ nm、 $E=120$ nm 时,进一步优化 R_2 的仿真结果如图 5(b) 所示。可以看出,CE 在 $R_2=140$ nm 时的 CE

达到最大值,为 61.64%,即当 $R_1=100$ nm、 $R_2=140$ nm、 $p=640$ nm、 $E=120$ nm 时,2D-GC 的 CE 值最大。2D-GC 的 PDL 与耦合损耗谱如图 6 所示,PDL 的最大值为 1.97 dB。

由图 5 和图 6 可知,光栅的 CE 达到最大值后,还需要对其结构参数进行微调,才能提高 2 个偏振耦合谱的重合度,减小光栅的 PDL,且 P 偏振相对于 S 偏

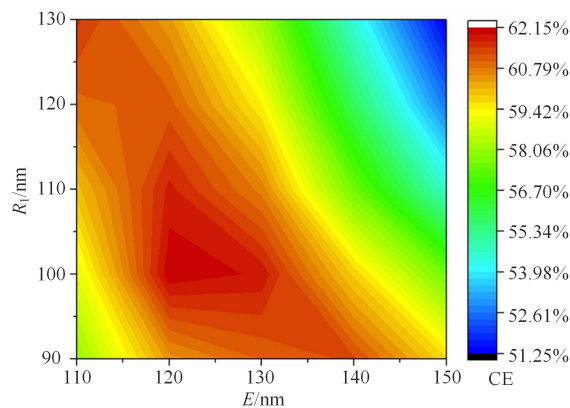
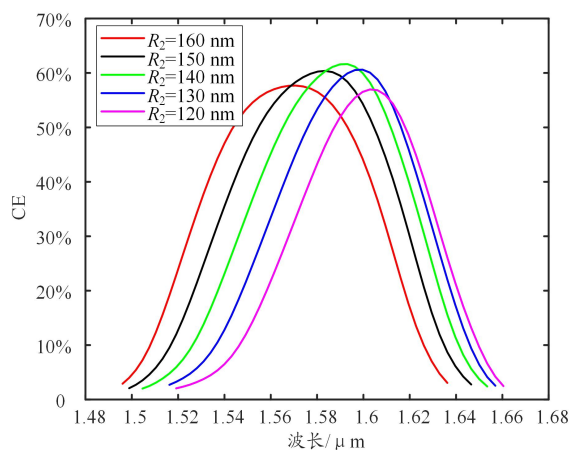
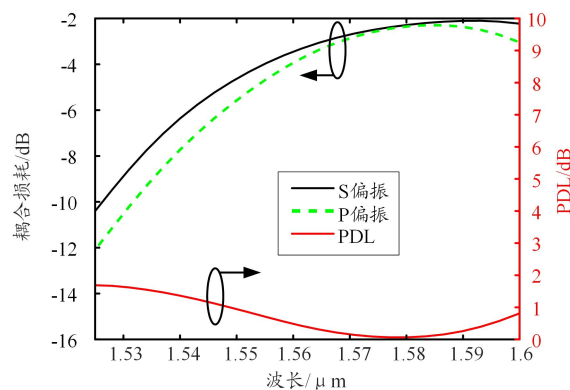
(a) 当 $R_2=130$ nm 时,CE 随 R_1 、 E 的变化趋势(b) 当 $R_1=100$ nm、 $E=120$ nm 时,CE 随 R_2 的变化趋势图5 当 $p=640$ nm 时,对参数进行二次优化后 CE 的仿真结果

图6 2D-GC 的 PDL 与耦合损耗谱

振存在较大的频谱偏移损耗。经研究发现,可通过调整 R_2 来改变 P 偏振的有效折射率,减小 2 个偏振之间的波长偏移,从而减小 PDL。

当 $R_1=100\text{ nm}$ 、 $p=640\text{ nm}$ 、 $E=120\text{ nm}$, 且 R_2 从 150 nm 变化到 114 nm 时对应耦合损耗和 PDL 的变化情况如图 7 所示。可以看出,PDL 随 R_2 的减少而逐渐减小;当 $R_2=119\text{ nm}$ 时,可以得到最佳的 PDL 为 0.18 dB ,且 PDL 曲线在 $1.525\sim 1.6\text{ }\mu\text{m}$ 之间的波段都很平缓,此时对应的耦合损耗约为 -2.4 dB 。因此,所提出的 2D-GC 最佳的结构参数为 $p=640\text{ nm}$ 、 $E=120\text{ nm}$ 、 $R_1=100\text{ nm}$ 、 $R_2=119\text{ nm}$ 。

优化后 2D-GC 的水平 and 垂直 2 个方向上的光场强度分布如图 8 所示。可以看出,入射光大部分被耦合到光栅的 2 条输出臂,仅有少量的光泄露到下方的衬底和反射到上方的自由空间中。

本文对近几年报道的 2D-GC 性能进行了对比,如表 2 所示。可以看出,虽然有些 2D-GC 实现了较高的 CE 或较低的 PDL,但结构比较复杂,不易于加工制作,如增加额外的反射镜^[33]或使用热光相位延迟线^[32]等;但大多数 2D-GC 的 PDL 较低,CE 相对不高^[22,31]。而本文提出的 2D-GC 则无需附加复杂的结构就能实现较高的 CE 和较低的 PDL。

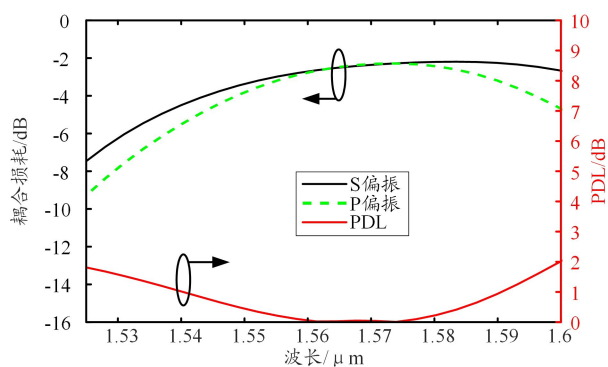
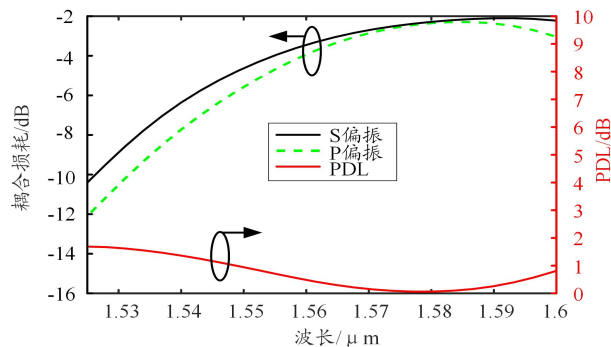
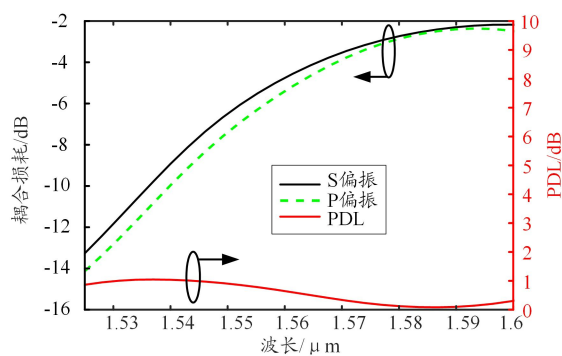
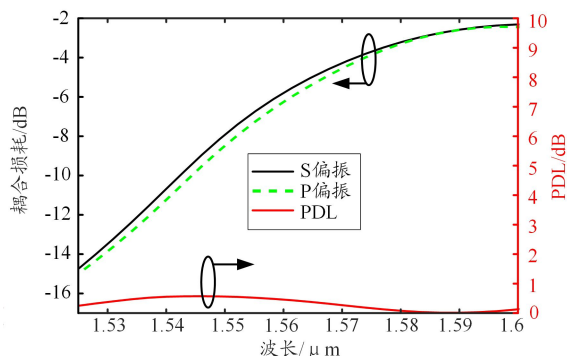
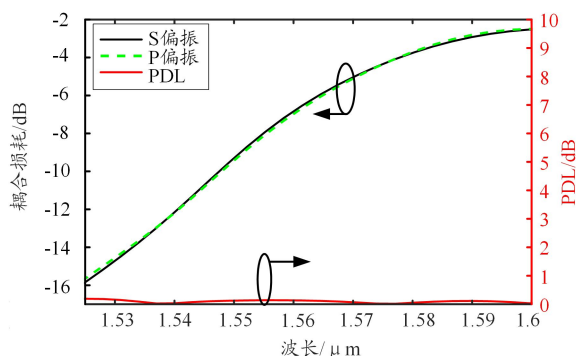
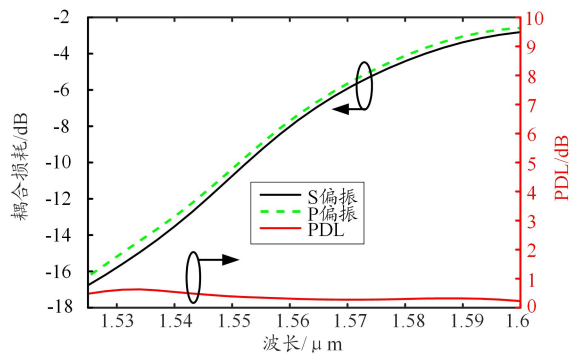
(a) $R_2=150\text{ nm}$ (b) $R_2=140\text{ nm}$ (c) $R_2=130\text{ nm}$ (d) $R_2=124\text{ nm}$ (e) $R_2=119\text{ nm}$ (f) $R_2=114\text{ nm}$

图 7 当 $p=640\text{ nm}$ 、 $R_1=100\text{ nm}$ 、 $E=120\text{ nm}$ 时, 耦合损耗与 PDL 随 R_2 的变化情况

冯瑶,耿敏明,何万才,等:基于 SOI 的类梅花型二维光栅耦合器

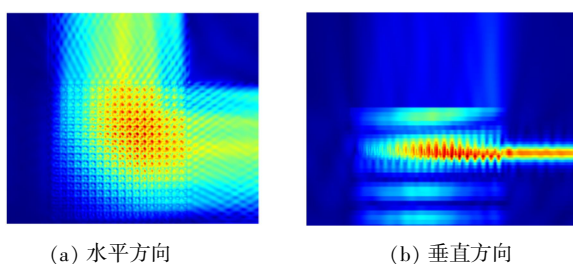


图 8 优化后的 2D-GC 的光场强度分布

表 2 近几年的 2D-GC 性能比较

参考文献	年份	耦合 损耗/dB	PDL /dB	Si 厚度 /nm	耦合 方式	工艺
[31]	2017	>-4.03	<0.5	220	倾斜	2 次刻蚀
[33]	2018	-1.8	1	220	倾斜	加反射镜
[22]	2019	-3.4	0.2	220	倾斜	2 次刻蚀
[34]	2020	-3.52	—	220	倾斜	生长多晶硅和多次刻蚀
[35]	2020	-1.73	<0.2	220	倾斜	加金属薄膜及键合
[32]	2021	-1.87	<0.2	220	垂直	2 次刻蚀及附加热光相位延迟
本文	2022	-2.4	0.18	220	倾斜	2 次刻蚀

3 结束语

本文提出了一种基于 SOI 的类梅花型 2D-GC, 该光栅耦合器由多个类梅花型图案的晶胞周期排列而成。采用了倾斜耦合方式减小偏振光的二阶反射, 并通过优化结构中的光栅周期 p 、刻蚀半径 R_1 和 R_2 以及刻蚀深度 E , 有效地减小了 2 个偏振耦合谱线的偏移。仿真结果表明, 所提出的 2D-GC 在有效工作波段为 $1.525\sim 1.6\ \mu\text{m}$ 时, 最大的耦合损耗约为 $-2.4\ \text{dB}$, PDL 为 $0.18\ \text{dB}$ 。相较于已报道的大多数 2D-GC, 本文提出的 2D-GC 具有较高的 CE 和较低的 PDL, 更好地实现了硅光子片上系统与片外系统的信息交互, 且结构简单, 有利于降低工艺复杂度。但本结构设计也存在一些局限, 由于均匀光栅为指数衰减的衍射模场, 而光纤呈模场高斯分布, 二者之间重叠积分受到很大的限制, CE 相对不高, 因此在未来的工作中需要打破光纤与光栅模场失配的局限, 考虑采用非均匀光栅耦合器解决这一难题。

参考文献:

[1] SOREF R. The past, present, and future of silicon photonics [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2006, 12 (6): 1678–1687.

[2] RAHIM A, SPUESENS T, BAETS R, et al. Open-access silicon photonics: current status and emerging initiatives [J]. Proceedings of the IEEE, 2018, 106(12): 2313–2330.

[3] YANG Y, HOU Z J, ZHU X, et al. A millimeter-wave reconfigurable on-chip coupler with tunable power-dividing ratios in $0.13\text{-}\mu\text{m}$ BiCMOS technology [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2020, 67(5): 1516–1526.

[4] LACAVA C, CARROLL L, GERACE D, et al. Performance of 2D-grating couplers designed through full 3D-FDTD numerical simulations [C] //IEEE. Proceedings of 11th International Conference on Group IV Photonics (GFP). Paris: IEEE, 2014: 203–204.

[5] MARCHETTI R, LACAVA C, CARROLL L, et al. Coupling strategies for silicon photonics integrated chips [J]. Photonics Research, 2019, 7(2): 201–239.

[6] HE A, GUO X, WANG K, et al. Low loss, large bandwidth fiber-chip edge couplers based on silicon-on-insulator platform [J]. Journal of Light-wave Technology, 2020, 38(17): 4780–4786.

[7] LI Y, WANG M, YANG S, et al. Polarization insensitive edge coupler assisted by subwavelength grating and suspended structure [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2022, 34(14): 765–768.

[8] LIN Y, MAK J C C, CHEN H, et al. Low-loss broadband bi-layer edge couplers for visible light [J]. Optics Express, 2021, 29(21): 34565–34576.

[9] YU J, YAMADA H. Design and investigation of a dual-layer grating coupler for efficient vertical fiber-chip coupling [J]. Applied Physics Express, 2018, 12(1): 12004-1–12004-5.

[10] WANG S, HONG Y, ZHU Y, et al. Compact high-efficiency perfectly-vertical grating coupler on silicon at O-band [J]. Optics Express, 2017, 25(18): 22032–22037.

[11] LUO H, XIE F, CAO Y, et al. Low-loss and broadband fiber-to-chip coupler by 3D fabrication on a silicon photonic platform [J]. Optics Letters, 2020, 45(5): 1236–1239.

[12] MELKONYAN H, SLOYAN K, TWAYANA K, et al. Efficient fiber-to-waveguide edge coupling using an optical fiber axicon lens fabricated by focused ion beam [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(4): 1–9.

[13] MEKIS A, GLOECKNER S, MASINI G, et al. A grating-coupler-enabled CMOS photonics platform [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2010, 17(3): 597–608.

[14] ROELKENS G, VERMEUNLEN D, THOURHOUT D V, et al. High efficiency diffractive grating couplers for interfacing a single mode optical fiber with a nanophotonic silicon-on-insulator waveguide circuit [J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(13): 1–3.

[15] AKCAY B, GUNES H A, KURT H, et al. A fiber-to-waveguide, 1D grating coupler design using genetic algorithm for $1550\ \text{nm}$ applications [C] //SPIE. Proceedings of Integrated Photonics Platforms II. Bellingham: SPIE, 2022, 12148: 70–75.

[16] 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.

[17] YU J, WANG W, YANG L, et al. Silicon-based polarization insensitive grating coupler [C] //SPIE. Proceedings of International Conference on Optoelectronic and Microelectronic Technology and Application. Belling-

- ham: SPIE, 2020, 11617: 162–168.
- [18] 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.
- [19] TONG Y, ZHOU W, WU X, et al. Efficient mode multiplexer for few-mode fibers using integrated silicon-on-insulator waveguide grating coupler [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2019, 56(1): 1–7.
- [20] SOBU Y, JEONG S H, TANAKA Y. Si-wire two-dimensional grating coupler with polarization-dependent loss of lower than 0.3 dB over a 60 nm-wide spectral range[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2018, 57(11): 112501-1–112501-5.
- [21] XUE Y, CHEN H, BAO Y, et al. Low polarization dependent loss two-dimensional grating coupler[C]//IEEE. Proceedings of 2019 18th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON). Huangshan: IEEE, 2019: 1–3.
- [22] XUE Y, CHEN H, BAO Y, et al. Two-dimensional silicon photonic grating coupler with low polarization-dependent loss and high tolerance[J]. Optics Express, 2019, 27(16): 22268–22274.
- [23] 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.
- [24] LUO Y, NONG Z, GAO S, et al. Low-loss two-dimensional silicon photonic grating coupler with a backside metal mirror [J]. Optics Letters, 2018, 43(3): 474–477.
- [25] NONG Z, LUO Y, GAO S, et al. Low-loss two-dimensional grating coupler on SOI platform with bonded metal mirror [C]//IEEE. Proceedings of 2017 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO). San Jose: IEEE, 2017: 1–2.
- [26] ROSA M F, CASTRO P, HOPPE N, et al. Novel design of two-dimensional grating couplers with backside metal mirror in 250 nm silicon-on-insulator[C]//IEEE. Proceedings of 2017 International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices (NUSOD). Copenhagen: IEEE, 2017: 81–82.
- [27] WATANABE T, FEDORYSHYN Y, LEUTHOLD J. 2-D grating couplers for vertical fiber coupling in two polarizations [J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(4): 1–9.
- [28] WATANABE T, BITACHON B I, FEDORYSHYN Y, et al. Coherent few mode demultiplexer realized as a 2D grating coupler array in silicon[J]. Optics Express, 2020, 28(24): 36009–36019.
- [29] ZHANG Z, CHEN X, CHENG Q, et al. Two-dimensional apodized grating coupler for polarization-independent and surface-normal optical coupling[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(15): 4037–4044.
- [30] VAN F, BOGAERTS W, DUMON P, et al. Focusing polarization diversity grating couplers in silicon-on-insulator [J]. Journal of Light-wave Technology, 2009, 27(5): 612–618.
- [31] SOBU Y, JEONG S H, TANAKA Y. Demonstration of low polarization dependent loss of 1.3 μm two dimensional grating coupler [C]//IEEE. Proceedings of 2017 IEEE 14th International Conference on Group IV Photonics (GFP). Berlin: IEEE, 2017: 127–128.
- [32] ZHANG Z, ZHANG K, CHENG Q, et al. High-efficiency two-dimensional perfectly vertical grating coupler with ultra-low polarization dependent loss and large fibre misalignment tolerance[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2021, 57(5): 1–7.
- [33] LUO Y, NONG Z, GAO S, et al. Low-loss two-dimensional silicon photonic grating coupler with a backside metal mirror [J]. Optics Letters, 2018, 43(3): 474–477.
- [34] CHANG C, HSU Y, KUO H, et al. Two-dimensional focusing grating couplers for SOI waveguides[C]//IEEE. Proceedings of 2020 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC). Taipei: IEEE, 2020: 1–3.
- [35] CHEN B, ZHANG X, HU J, et al. Two-dimensional grating coupler on silicon with a high coupling efficiency and a low polarization-dependent loss[J]. Optics Express, 2020, 28(3): 4001–4009.