

引用本文:何万才,耿敏明,冯瑶,等. 应用于 C 波段的二维光栅耦合器的设计与优化[J]. 光通信技术,2023,47(4):8-14.

应用于 C 波段的二维光栅耦合器的设计与优化

何万才^{1,2},耿敏明^{1,2,3,4*},冯瑶^{1,2},赖明彬^{1,2},刘 婧^{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:针对二维光栅耦合器存在耦合效率低、偏振相关损耗大、结构复杂等问题,提出了一种应用于 C 波段的基于绝缘体上硅(SOI)材料的新型二维光栅耦合器,该耦合器由具有 45°倾角的四孔交错菱形刻蚀晶胞单位周期排列组成,采用倾斜耦合方式对耦合器的周期、刻蚀深度、刻蚀圆孔的相对位置、刻蚀圆孔半径进行优化,并对其进行仿真验证。仿真结果表明:该耦合器在 1 540 nm 处耦合损耗低至 -2.4 dB,C 波段的偏振相关损耗低于 0.2 dB, 1、3 dB 工作带宽分别是 36、58 nm。

关键词:二维光栅耦合器;倾斜耦合;耦合效率;偏振相关损耗;绝缘体上硅;温度不敏感

中图分类号:TN252 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2023)04-0008-07

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.04.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Design and optimization of two-dimensional grating coupler applied to C-band

HE Wancai^{1,2}, GENG Minming^{1,2,3,4*}, FENG Yao^{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: Aiming at the problems of low coupling efficiency, large polarization related loss and complex structure of two-dimensional grating couplers, a new two-dimensional grating coupler based on silicon on insulator (SOI) material applied in C band is proposed. The coupler is composed of four hole staggered rhombic etching cell unit cycle arrangement with a 45° inclination angle. The period, etching depth, relative position and radius of etching circular hole of the coupler are optimized by using inclined coupling mode, and conduct simulation verification on it. The simulation results show that the coupling loss of the coupler is as low as -2.4 dB at 1 540 nm, the polarization related loss at C band is less than 0.2 dB, and the 1 dB and 3 dB operating bandwidths are 36 dB and 58 nm respectively.

Key words: two-dimensional grating coupler, inclined coupling, coupling efficiency, polarization-dependent loss, silicon on insulator, temperature insensitive

收稿日期:2023-01-02。

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

作者简介:何万才(1997—),男,宁夏固原人,硕士研究生,本科毕业于宁夏大学通信工程专业,现就读于广西大学计算机与电子信息学院,主要研究方向为硅基集成光学。

***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。



0 引言

绝缘体上硅(SOI)对光信号具有较强的束缚能力,并且与互补金属氧化物半导体(CMOS)制造技术兼容,是实现大规模光子集成或光电混合集成的理想平台,市面上已出现多种基于 SOI 的高性能无源光器件,比如光滤波器、光开关、光耦合器等^[1-2]。其中,光耦合器是连接片外光源和片上器件的重要桥梁,受到了广泛的关注。

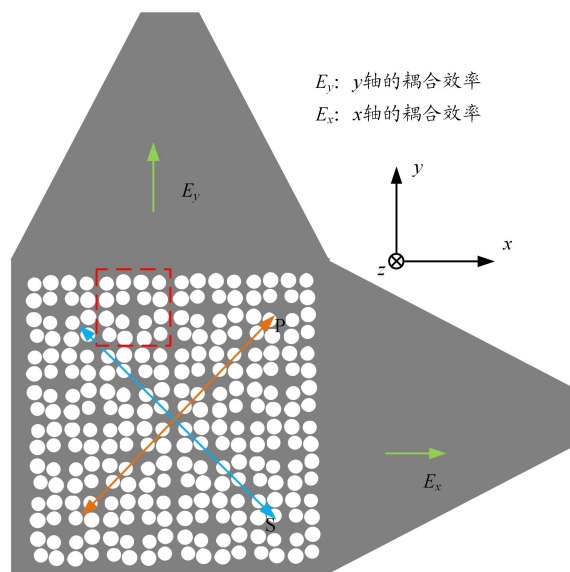
典型的 SOI 光波导的横截面积是 500 nm×220 nm,

标准单模光纤的模场直径是 $10\ \mu\text{m}$, 两者的形状和尺寸均存在较大偏差, 若两者直接进行光信号交换, 会产生严重的模式失配损耗和耦合损耗, 影响系统性能。为了提高 SOI 光波导器件的实用性, 需要设计高性能的光耦合器, 如反向锥形边缘耦合器和光栅耦合器。其中, 光栅耦合器具有位置灵活、对准容差大、无需界面抛光工艺等优势, 因而可以进行晶片级的测试, 同时降低成本。一维光栅耦合器因具有较高的耦合效率而被广泛使用和研究^[3]。然而, 一维光栅耦合器的耦合效率与输入信号的偏振态相关, 即在不同偏振模式之间存在显著的双折射现象, 会引起较大的偏振相关损耗(PDL), 限制了一维光栅耦合器的应用场景。为了实现偏振无关特性, 文献[4-5]设计了新型的一维光栅耦合器, 但由于 SOI 光波导本身存在显著的双折射效应, 且 SOI 光器件通常工作在单一偏振模式下, 增加了设计的复杂性和增大了器件尺寸。为了解决这个问题, 文献[6-7]提出了二维光栅耦合器(2D-GC)。2D-GC 可以耦合光纤模式中的任意偏振光, 将 P 偏振和 S 偏振转换成 2 个相同的波导偏振模式(如 TE 模式)。文献[8-9]提出了二维光栅的垂直耦合方案, 但是该方案会引起严重的二阶反射, 二阶反射会对器件性能造成影响, 因此基于二维光栅的垂直耦合方案的应用受到限制。为了避免二阶反射, 最直接的办法是采用二维光栅的倾斜耦合方案^[11-13], 但是该方案会产生较大的 PDL。为了减少 PDL, 研究人员提出了多种优化方案, 包括使用相移器的有源方案^[10]、优化光栅单元的刻蚀图案^[11-12]、采用倾斜光栅单元阵列^[13]等。其中, 随着制造精度的提高, 优化光栅单元的刻蚀图案成为了一种广泛采用的解决方案。虽然这些方案优化了 2D-GC 在 C 波段($1\ 530\sim 1\ 565\ \text{nm}$)的 PDL 和耦合损耗, 但依然有进一步改善的空间。

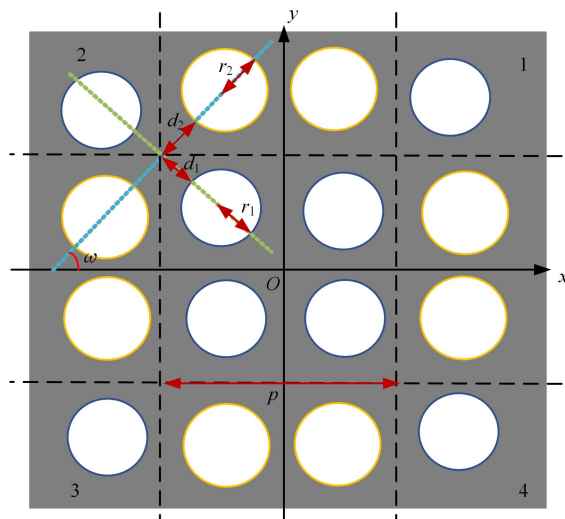
本文提出一种应用于 C 波段的基于 SOI 材料的新型 2D-GC, 通过引入和优化多维度的设计参数, 有效降低 2D-GC 的耦合损耗和 PDL。

1 2D-GC 设计

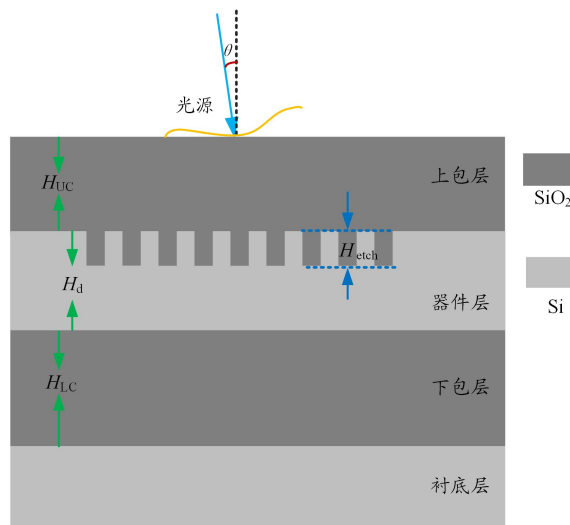
本文提出应用于 C 波段的新型 2D-GC 的结构示意图如图 1 所示。由图 1(a)可知, 该 2D-GC 由 $12\ \mu\text{m}\times 12\ \mu\text{m}$ 的光栅阵列和 2 个锥形波导构成。每个锥形波导一端连接光栅阵列, 另一端连接 SOI 波导, 其作用是将光栅的衍射模式转换为 SOI 波导所需的 TE 模式。图 1(b)中, 1、2、3、4 分别为 4 个不同偏转角度的光栅刻蚀单元, 每个单元由相邻图案旋转 90° 得到, 如



(a) 2D-GC 的俯视图



(b) 俯视图中虚线里的光栅单元模型



(c) 2D-GC 的截面示意图

图 1 应用于 C 波段的新型 2D-GC 结构示意图

何万才,耿敏明,冯瑶,等:应用于C波段的二维光栅耦合器的设计与优化

单元2可由单元1或单元3旋转 90° 得到。每个单元由2对半径分别为 r_2 和 r_1 的圆组成。其中,半径为 r_2 的2个圆的圆心连线与x轴负方向的夹角为 ω ,与半径为 r_1 的2个圆心连线正交,2组圆心连线的交点到圆孔边缘的最小距离分别为 d_2 和 d_1 ;4个圆心的连线呈菱形,即菱形刻蚀单元。每个菱形刻蚀单元与相邻的刻蚀单元的倾角方向均不同,这种设计的目的是消除部分背向反射,从而降低PDL。本文取菱形刻蚀单元中心点之间的距离作为光栅的周期 p 。图1(c)中,器件层采用折射率为3.48的Si,其厚度 H_d 为220 nm,2D-GC由部分刻蚀的圆孔构成,其刻蚀深度用 H_{etch} 表示;上、下包层(UC,LC)均采用折射率为1.45的 SiO_2 ,其厚度分别用 H_{UC} 和 H_{LC} 表示;衬底层用于保障结构的机械强度。光源位于光栅阵列上方,光源的入射方向与光栅阵列表面法线的夹角为 θ ($\theta \neq 90^\circ$),可以消除垂直耦合导致的二阶反射。

2 仿真分析

本文采用有限差分时域(FDTD)算法对所提的2D-GC的耦合损耗和PDL进行仿真。

通常根据耦合损耗衡量耦合效率,本文在仿真中分别使用参数 L 和 E 表示耦合损耗和耦合效率,那么两者关系为

$$L=10\lg E \quad (1)$$

P偏振和S偏振的耦合损耗分别用 L_p 、 L_s 表示,由于耦合效率等于 E_x 与 E_y 之和,那么 L_p 、 L_s 可表示为

$$L_i=10\lg(E_x+E_y), i=P, S \quad (2)$$

PDL是 L_p 和 L_s 差值的绝对值,以 D_{PDL} 表示,其表达式为

$$D_{\text{PDL}}=|L_p-L_s| \quad (3)$$

2D-GC的峰值波长 λ 的表达式为

$$\lambda=(n_{\text{eff}}-n_c \sin \theta) p \quad (4)$$

其中, n_{eff} 为光栅的有效折射率, n_c 为覆盖层的折射率。为消除垂直耦合引入的二阶反射, θ 取值为 12° [12]。

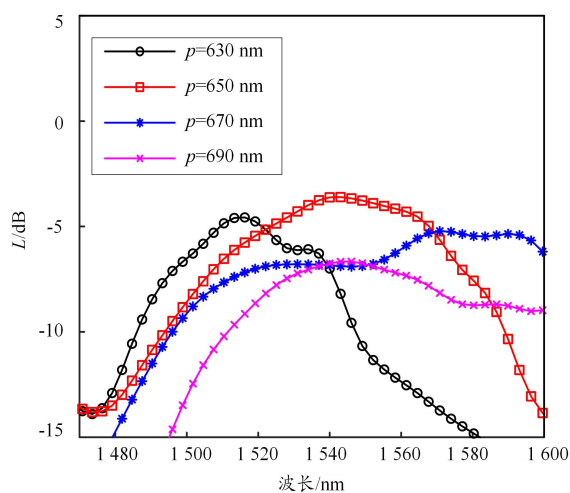
由于所提出2D-GC的结构参数较多,本文挑选对耦合损耗和PDL影响较大的参数(p 、 H_{etch} 、 d_1 、 d_2 、 r_1 、 r_2)进行分析,其它参数采用参考文献或现有SOI晶片的参数,如表1所示。

2.1 光栅周期参数的影响

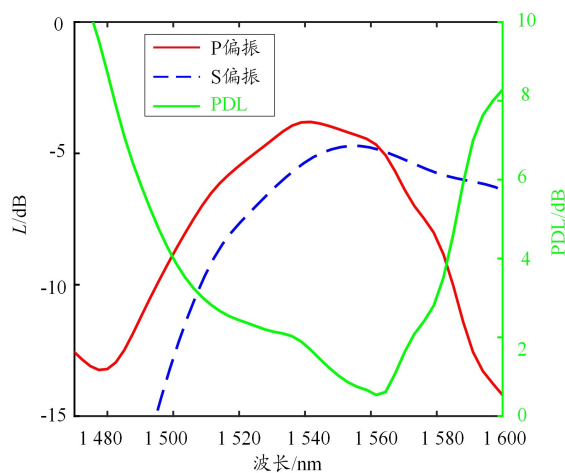
当 $r_1=110$ nm、 $r_2=150$ nm、 $d_1=40$ nm、 $d_2=80$ nm、 $H_{\text{etch}}=105$ nm时,P偏振下,光栅周期 p 对光栅耦合谱的影响如图2(a)所示。由于本文提出的2D-GC工作在C波

表1 部分光栅参数

参数	值
光栅单元与x轴的夹角 $\omega/(^\circ)$	45 ^[11]
上包层的厚度 H_{UC}/nm	700 ^[12]
顶层硅的厚度 H_d/nm	220
下包层的厚度 $H_{\text{LC}}/\mu\text{m}$	2.5



(a) P偏振下, p 对2D-GC的耦合谱的影响情况



(b) S偏振和P偏振下,2D-GC的耦合损耗和PDL仿真结果

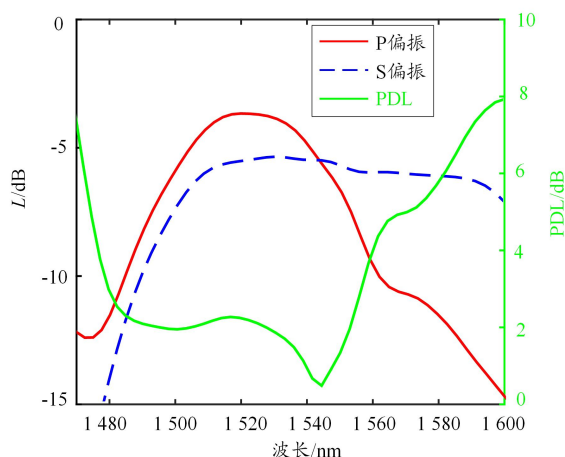
图2 光栅周期 p 对2D-GC的仿真结果

段,峰值波长会随着参数变化而改变,因此图中展示了1470~1600 nm的仿真结果。可以看出, p 的变化对耦合谱形状和峰值波长均造成明显的影响。当 $p=630$ nm时, L 峰值为-4 dB;当 $p=650$ nm时, L 峰值达到最优值,约为-3.6 dB;当 $p=670$ nm时, L 峰值减少,并且伴随着明显的波形畸变。 p 每增大20 nm,会导致27 nm的 L 峰值红移(向长波长方向移动),该变化趋

势与式(4)保持一致。当 $p=650$ nm 且在不同偏振态下,2D-GC 的耦合损耗和 PDL 的仿真结果如图 2(b) 所示。可以看出,在 1 480~1 580 nm 内的 PDL 最大值为 8 dB。在 P 偏振下,光栅的 L 峰值波长为 1 540 nm;在 S 偏振下,光栅的 L 峰值波长是 1 555 nm。2 个偏振态的 L 峰值波长偏离了 15 nm,这是造成 PDL 偏大的主要原因。在 1 480~1 540 nm 内,2 个偏振态的耦合谱形状具有较好的相似性,若能减小不同偏振态 L 峰值波长的偏差,比如将 P 偏振的耦合谱曲线红移,则可以有效地降低 PDL。

2.2 圆孔刻蚀深度参数的影响

当 $p=650$ nm、 $r_1=110$ nm、 $r_2=150$ nm、 $d_1=40$ nm、 $d_2=80$ nm 时,圆孔刻蚀深度 H_{etch} 对 2DGC 耦合谱的影响如图 3(a) 所示。与 p 类似, H_{etch} 的变化对耦合谱形状和峰值波长均产生明显的影响。可以看出,当 $H_{\text{etch}}=75$ nm 时,耦合谱的波长在 1 520~1 600 nm 的波形较为平坦,但 L 峰值较小,不符合光通信系统的要求;当 $H_{\text{etch}}=115$ nm 时, L 峰值达到最优值,大约为 -3.5 dB;同时, H_{etch} 每增大 20 nm,会引起 L 峰值波长蓝移约 26 nm,该现象同样可以用式(4)解释,即当 H_{etch} 增大时,更多的顶层硅被刻蚀,造成光栅的 n_{eff} 减小,使得 L 峰值波长逐渐减小。当 $H_{\text{etch}}=115$ nm 且在不同偏振态下,2DGC 的耦合损耗和 PDL 的仿真结果如图 3(b) 所示。可以看出,P、S 偏振的耦合谱分别在 1 519、1 531 nm 处取得最大值,对应的 L 峰值分别为 -3.48、-5.31 dB。由于 P 偏振和 S 偏振的耦合谱波形差异较大,因此导致 PDL 较大。在 1 480~1 540 nm 的 PDL 最大值是 2 dB,即通过优化 H_{etch} ,减小了不同偏振态 L 峰值波长的偏差。因此,相对于图 2(b),图 3(b) 中的 PDL 得到了显著改



(b) S 偏振和 P 偏振下,2D-GC 的耦合损耗和 PDL 的仿真结果

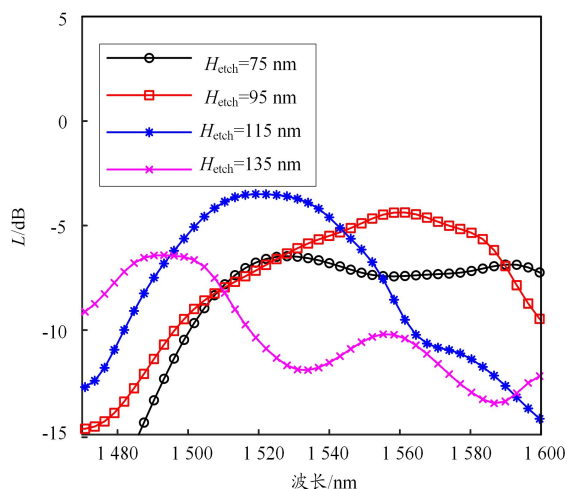
图 3 圆孔刻蚀深度 H_{etch} 对 2D-GC 的仿真结果

善。此时, L 峰值偏离 C 波段,向短波长方向偏移,但偏离量较小,可以通过优化其它参数移回 C 波段,同时进一步优化耦合损耗和 PDL。

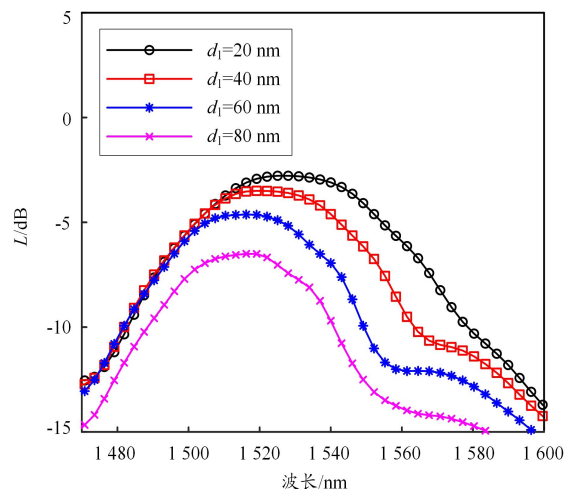
2.3 刻蚀圆孔的相对位置参数的影响

为了改善耦合损耗,需对刻蚀圆孔的相对位置 d_1 、 d_2 进行优化。同时,为了避免晶胞单元内和相邻单元间的圆形图案发生交叠而影响 2D-GC 的性能,也为后续优化 r_1 和 r_2 提供足够的空间,本文将 d_1 、 d_2 的变化范围限制在 20~80 nm。

在 P 偏振下当 $H_{\text{etch}}=115$ nm、 $p=650$ nm、 $r_1=110$ nm、 $r_2=150$ nm 时, d_1 对 2D-GC 耦合谱的影响结果如图 4(a) 所示。可以看出,在 $d_1=20$ nm 时 2D-GC 的 L 峰值最大,大约为 -2.7 dB; d_1 每增大 20 nm,会导致 3 nm 的 L 峰值波长蓝移,且随着 d_1 增加, L 峰值波长逐渐偏离 C 波段,耦合损耗从 -2.7 dB 变化到 -6.5 dB,损耗增加了



(a) P 偏振下, H_{etch} 对 2D-GC 的耦合谱的影响情况



(a) $d_2=80$ nm 时 d_1 对 2D-GC 的耦合谱的影响情况

何万才,耿敏明,冯瑶,等:应用于C波段的二维光栅耦合器的设计与优化

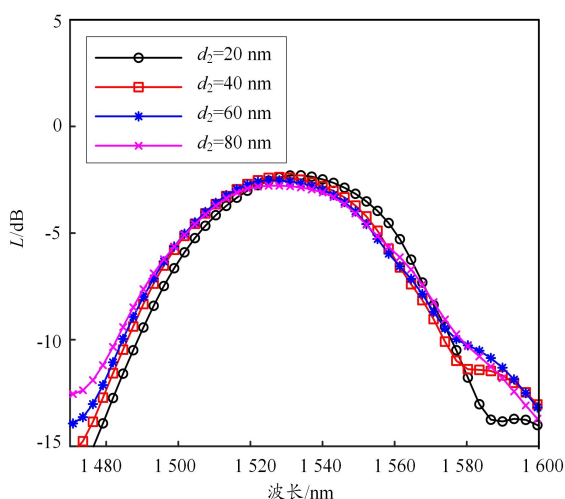
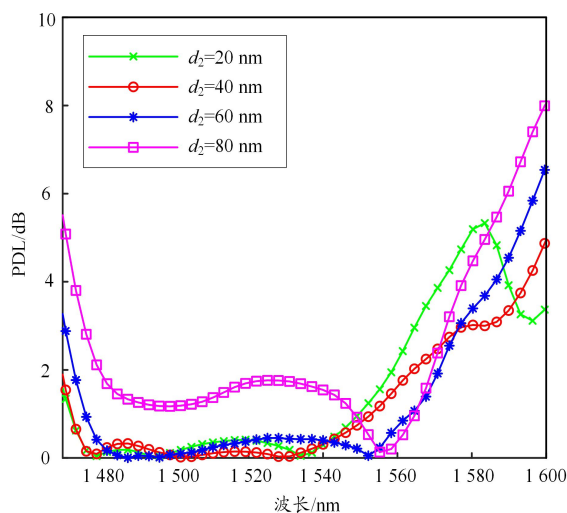
(b) $d_1=20$ nm 时 d_2 对 2D-GC 的耦合谱的影响情况(c) $d_1=20$ nm 时 d_2 对 2D-GC 的 PDL 的影响情况

图4 刻蚀圆孔的相对位置的仿真结果

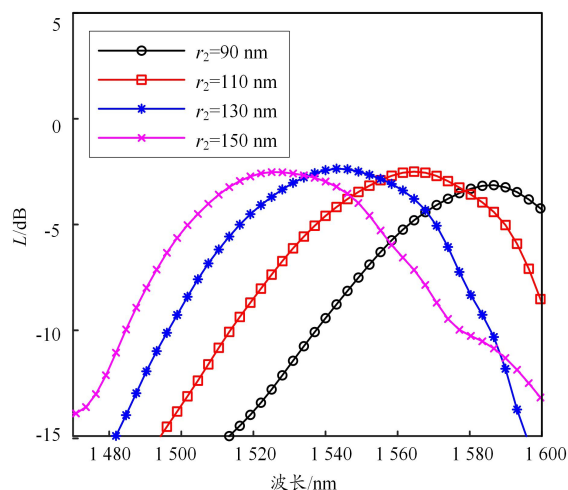
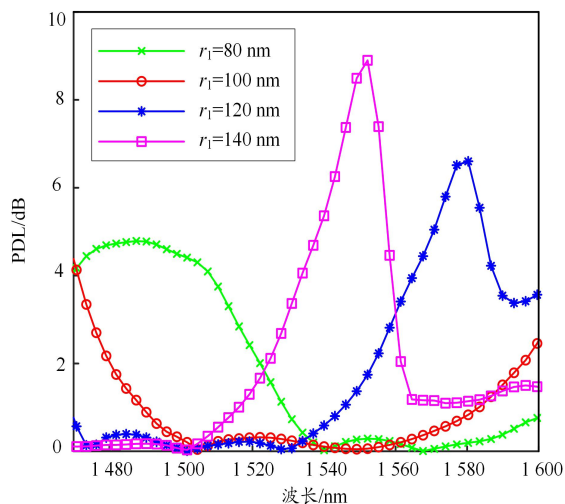
3.8 dB。与 p/H_{etch} 相比, d_1 对耦合损耗的影响较大而对 L 峰值波长移动影响较小。 d_2 对 2D-GC 的耦合谱的影响结果如图4(b)所示。可以看出,当 d_2 从 20 nm 增加到 80 nm 时, L 峰值从 -2.4 dB 变化到 -2.7 dB。与 d_1 相比, d_2 对耦合损耗的影响较小。 d_2 每增大 20 nm, L 峰值波长蓝移 3 nm; 与 d_1 类似, d_2 对 L 峰值波长的漂移影响也较小。PDL 与 d_2 的关系如图4(c)所示。可以看出,当 $d_2=20$ nm 时, C 波段内的 PDL 小于等于 3 dB; 当 $d_2=60$ nm 时, C 波段内的 PDL 小于等于 1 dB; 当 $d_2=80$ nm 时, C 波段内的 PDL 平均值大于 $d_2=60$ nm 的 PDL 平均值。通过权衡该 2D-GC 的耦合损耗和 PDL, 本文选取 $d_2=60$ nm。

2.4 刻蚀圆孔半径参数的影响

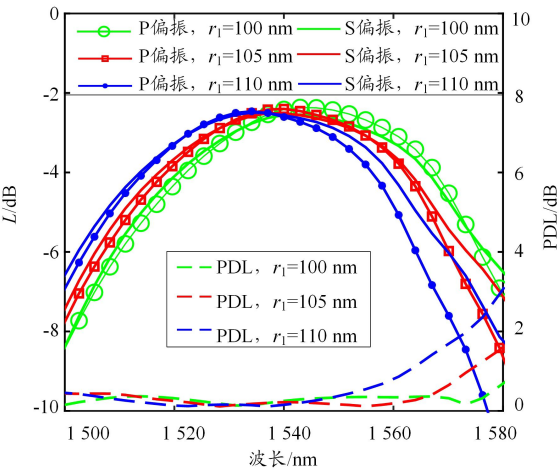
在 P 偏振下, 当 $H_{\text{etch}}=115$ nm、 $p=650$ nm、 $d_1=20$ nm、

$d_2=60$ nm 时, 刻蚀圆孔半径 r_2 对 2D-GC 耦合谱影响的情况如图 5(a)所示。可以看出, r_2 在 90~150 nm 内变化时, L 峰值变化不大; 当 $r_2=130$ nm 时, 2D-GC 的 L 峰值最高, 达到了 -2.4 dB。因此, 本文选取 $r_2=130$ nm 进行优化。

r_1 与 r_2 类似, 对耦合损耗的影响不大, 但对 PDL 的影响较大。 r_1 对 2D-GC 的 PDL 的影响情况如图 5(b)所示。可以看出, 当 $r_1=100$ nm 时 C 波段内的 PDL 最小值为 0.31 dB; 当 r_1 继续增加, PDL 出现恶化。结合图 5(a)和图 5(b)可知, 调节半径对耦合效率影响较小, 但可以有效调节峰值波长的位置, 当 2 个偏振的耦合谱重合时, PDL 可明显降低。但是, 此时 $r_1=100$ nm 的峰值波长位于 C 波段的长波长侧, 损失了部分的工作带宽, 需要微调 r_2 即可完成左移, r_2 需增加到 140 nm 才能将

(a) $r_1=110$ nm, r_2 对 2D-GC 耦合谱的影响情况(b) $r_2=130$ nm, r_1 与 PDL 的关系

何万才,耿敏明,冯瑶,等:应用于C波段的二维光栅耦合器的设计与优化



(c) $r_2=140$ nm,在S、P偏振下,
 r_1 与2D-GC的耦合损耗和PDL的关系

图5 刻蚀圆孔半径的仿真结果

耦合峰值波长移至1546 nm。由于 r_2 发生了微调,必然影响耦合损耗和PDL,可通过控制 r_1 来进一步优化。在S偏振和P偏振下, r_1 与2D-GC的耦合损耗和PDL的关系如图5(c)所示。可以看出,当增加 r_1 时S偏振的 L 峰值相对于P偏振的 L 峰值会逐渐上升,并且两偏振的耦合谱线更加重合;当 $r_1=105$ nm时,C波段的PDL达到最小(0.16 dB),此时P偏振的 L 峰值为-2.4 dB;继续增加 r_1 ,两偏振的耦合谱线会逐渐分离,导致该波段的PDL增加。此时,2D-GC的耦合峰值波长为1540 nm,对应的最佳耦合损耗为-2.4 dB,C波段内的PDL低于0.2 dB。2D-GC的1 dB工作带宽(BW1 dB)、3 dB工作带宽(BW3 dB),即耦合谱中峰值耦合损耗以下1、3 dB的波长范围分别为36、58 nm。因此,本文所提2D-GC的性能符合光通信应用需求。优化后的2DGC的主要参数如表2所示。

表2 优化的2D-GC的结构参数

参数	值
光栅周期 p/nm	650
刻蚀深度 $H_{\text{etch}}/\text{nm}$	115
圆孔半径 r_1/nm	105
圆孔半径 r_2/nm	140
圆孔 r_1 的相对位置 d_1/nm	20
圆孔 r_2 的相对位置 d_2/nm	60

2.5 环境温度对2D-GC的影响

在实际应用中,环境温度 T 影响材料的有效折射率,有效折射率的变化影响2D-GC的性能。其中,温度对 SiO_2 的有效折射率影响很小^[15],因此忽略 SiO_2 。本文

通过计算得出了特定温度下Si的有效折射率^[16-17],如表3所示。当 $H_{\text{etch}}=115$ nm、 $p=650$ nm、 $d_1=20$ nm、 $d_2=60$ nm、 $r_1=105$ nm、 $r_2=140$ nm时,本文对顶层硅的有效折射率进行仿真,得到温度对2D-GC的S、P偏振的耦合损耗和PDL的影响情况,如图6所示。可以看出,当 T 从-13.15 °C增加到66.85 °C时,S、P偏振态的 L 峰值均不低于-2.4 dB,并且两偏振态的耦合损耗变化不大;温度每增加40 °C,峰值波长红移3 nm;当 $T=-13.15$ °C时,C波段的PDL最大值为0.3 dB,继续增加波长,PDL减小;当 $T=26.85$ °C时该波段的PDL小于0.2 dB,继续增加波长,该波段的PDL基本保持不变。

表3 不同温度下, $\lambda=1550$ nm时Si的有效折射率

$T/^\circ\text{C}$	Si的有效折射率
-13.15	3.47
26.85	3.48
66.85	3.488

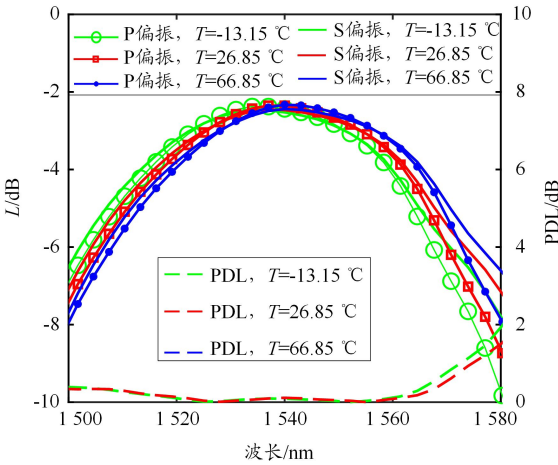


图6 温度 T 对2D-GC的S、P偏振态的耦合损耗和PDL的影响情况

近年有代表性的2D-GC的关键性能指标如表4所示。虽然文献[13]、文献[14]中的耦合损耗达到-1.8 dB,但是其2DGC均采用了金属反射器,增加了工艺的复杂性。文献[8]的耦合损耗性能具有优势,但其方式是

表4 近年典型的2D-GC的关键性能指标

参考文献	L/dB	PDL/dB	$\text{BW1 dB}/\text{nm}$	发表年份
[11]	-5.6	1	-	2015
[14]	-1.8	1	32	2018
[12]	-3.4	0.2	-	2019
[13]	-1.8	0.2	29	2020
[8]	-1.9	0.2	42	2021
本文	-2.4	0.2	36	2023

何万才,耿敏明,冯瑶,等:应用于C波段的二维光栅耦合器的设计与优化

将4个方向的散射光都收集起来,这需要考虑光走不同路径的相位问题,增加了额外的调控模块。综上,本文提出的2D-GC在不增加设计复杂性的情况下,具有低耦合损耗、超低PDL、工作带宽大的优势。

3 结束语

本文提出了一种应用于C波段的2D-GC,由四孔交错菱形排布的晶胞单元周期排列构成。分别对所提2D-GC的光栅周期 p 、圆孔刻蚀深度 H_{etch} 、刻蚀圆孔的相对位置 d_1 和 d_2 、刻蚀圆孔半径 r_1 和 r_2 进行了优化,有效降低了2D-GC的耦合损耗和PDL。仿真结果表明:本文提出的2D-GC在1540 nm处的耦合损耗为-2.4 dB,C波段的PDL低于0.2 dB,1.3 dB带宽分别是36.58 nm,且温度对2D-GC的CL和PDL影响不大。

参考文献:

- [1] 蒋佳,耿敏明,刘婧,等.基于三环辅助Mach-Zehnder干涉仪的带宽可调滤波器设计[J].光子学报,2021,50(7):283-292.
- [2] GENG M, TANG Z, CHANG K, et al. N-port strictly non-blocking optical router based on Mach-Zehnder optical switch for photonic networks-on-chip[J]. Optics Communications, 2017, 383: 472-477.
- [3] CHEN X, THOMSON D J, CRUDGINGTON L, et al. Dual-etch apodized grating couplers for efficient fibre-chip coupling near 1310 nm wavelength [J]. Optics Express, 2017, 25(15): 17864-17871.
- [4] CHENG Z, TSANG H K. Experimental demonstration of polarization-insensitive air-cladding grating couplers for silicon-on-insulator waveguides [J]. Optics Letters, 2014, 39(7): 2206-2209.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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): 1-1.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] HALIR R, VERMEULEN D, ROELKENS G. Reducing polarization-dependent loss of silicon-on-insulator fiber to chip grating couplers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(6): 389-391.
- [11] ZOU J, YU Y, ZHANG X. Two-dimensional grating coupler with a low polarization dependent loss of 0.25 dB covering the C-band [J]. Optics Letters, 2016, 41(18): 4206-4209.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] CHROSTOWSKIL, HOCHBERG M. Silicon photonics design: from devices to systems[M]. England: Cambridge University Press, 2015.
- [16] CHERRORET N, CHAKRAVARTY A, KAR A. Temperature-dependent refractive index of semiconductors [J]. Journal of Materials Science, 2008, 43: 1795-1801.
- [17] FREY B J, LEVITON D B, MADISON T J. Temperature-dependent refractive index of silicon and germanium[C]//SPIE. Proceedings of Optomechanical Technologies for Astronomy. Orlando: SPIE, 2006, 6273: 790-799.