

氮化硅低损耗光栅耦合器的设计与制备

梁宇鑫, 李智慧, 范诗佳, 杨忠华, 刘大鹏, 冯 靖, 廖海军, 崔乃迪*

(联合微电子中心有限责任公司, 重庆 401332)

摘要:为实现光栅耦合器与光纤的高效率耦合, 基于联合微电子中心有限责任公司(CUMEC)超低损耗氮化硅平台, 成功设计并开发了与互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺兼容的低损耗、小尺寸氮化硅光栅耦合器。首先对光栅关键参数进行了仿真计算, 选择最优参数进行光栅耦合器的设计。然后, 基于 CUMEC 超低损耗氮化硅平台, 采用聚焦光栅结构, 极大地缩小了光栅耦合器的尺寸, 得到的氮化硅聚焦光栅耦合器小线宽结构制备良好。搭建了光学测试系统完成聚焦光栅性能表征, 测试结果表明, 损耗最优值为 4.48 dB, 对应波长 1548 nm, 1 dB 带宽大于 45 nm。

关键词: 聚焦光栅; 氮化硅平台; 集成光子; 低压化学气相沉积

中图分类号: TN256 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2022)04-0068-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.04.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Design and fabrication of the SiN grating coupler with low loss

LIANG Yuxin, LI Zhihui, FAN Shijia, YANG Zhonghua, LIU Dapeng, FENG Jing, LIAO Haijun, CUI Naidi*

(Chongqing United Microelectronics Center Co., Ltd., Chongqing 401332, China)

Abstract: In order to realize high-efficiency coupling between grating couplers and optical fibers, a low-loss, small-size silicon nitride grating coupler compatible with complementary metal oxide semiconductor (CMOS) process has been successfully designed and developed based on the ultra-low loss Silicon nitride platform of United Microelectronics Center (CUMEC). Firstly, the key parameters of grating are simulated and the optimal parameters are selected to design the grating coupler. Then, the grating is prepared based on CUMEC ultra-low loss silicon nitride platform with good line-width structures. Since the focused grating structure is adopted, the size is reduced. An optical test system was built to characterize the performance of the focusing grating. The test results showed that the optimal loss was 4.48 dB at 1548 nm, and 1 dB bandwidth was greater than 45 nm.

Key words: focused grating coupler, SiN platform, integrated photonics, low-pressure chemical vapor deposition

0 引言

集成光子技术作为延续摩尔定律的发展方向之一, 通过光代替电进行信息传输与调控, 能够提高信号传输效率, 成为近年来的研究热点^[1-4]。但集成光波导具有较大的折射率差, 波导模式尺寸往往在百纳米量级, 而常用光纤模场的直径在 10 μm 左右, 两模场之间较大的模式失配, 导致耦合损耗高, 这成为制约

光子集成走向商业化、产业化的挑战之一^[5]。集成光子芯片光信号的输出与输入主要依赖于 2 类耦合结构: 端面耦合和光栅耦合。端面耦合通过波导将光场传输至芯片边缘, 因此合理设计端面耦合器结构将波导模式扩展至与光纤模式相匹配的模式, 降低耦合损耗^[6-8]。但是, 端面耦合器一般具有较高的耦合效率与较大的带宽, 其往往需要 100 nm 左右的波导尖端尺寸, 工艺要求高; 而且, 由于其光场只能由芯片边缘输入输出, 这对芯片边缘的处理工艺与封装技术均有较高的要求。光栅耦合器目前受到广泛关注, 其主要有以下优点: 通过周期性光栅结构就能将光场有效衍射至芯片外部, 实现离面耦合; 可以实现芯片任意位置光场的输入输出和无划片条件下晶圆级性能检测; 对工艺要求低, 制备容差高, 且封装简单, 适合集成光子芯片的大规模产业化^[9-12]。

收稿日期: 2022-05-10。

作者简介: 梁宇鑫(1989—), 男, 河北唐山人, 博士, 工程师。2016—2018 年赴比利时根特大学学习, 2019 年博士毕业于大连理工大学, 博士期间研究方向为集成光子芯片。现就职于联合微电子中心有限责任公司, 主要从事氮化硅集成光子芯片和可编程光子芯片方面的研究工作。



* 通信作者: 崔乃迪(1983—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为集成微光子与可编程光子芯片。

绝缘衬底上的硅(SOI)平台光栅耦合器的研究已较为成熟,通过合理设计光栅结构与加入反射层等技术,SOI平台光栅与单模光纤的耦合损耗可降低至1.25 dB^[9]。近年来,另一种光子集成平台——氮化硅光子集成平台,由于其极低的传输损耗与较高的功率承载力,被广泛应用于非线性光学与光频梳产生等领域^[13-15]。氮化硅光子集成平台在保证适当集成度前提下,能够极大地降低波导损耗,如文献[16-17]的氮化硅波导损耗已降低至1 dB/m。另外,不同于硅材料,氮化硅材料本身不具备双光子吸收,因此能够承载更高的光功率。然而,现今氮化硅光栅耦合器方面的研究较少,且由于其较低的折射率差,导致氮化硅平台光栅耦合器的耦合损耗很难降低。为降低氮化硅光栅耦合器的耦合损耗,科研工作者提出了多种增加光栅耦合器衍射效率的方案。例如,增加光栅区域的氮化硅厚度或直接在氮化硅光栅上制备其它高折射率材料二阶光栅,这种方案能够有效增大光栅栅尺与刻蚀区的有效折射率差,进而增加衍射效率,降低耦合损耗^[18-19]。另外,下包层添加金属反射镜也是提高光栅向上衍射效率的常用方案^[20]。但这些降低氮化硅光栅耦合器耦合损耗的方案均对工艺提出了较高的要求,使得其很难应用于氮化硅集成光子平台的光栅制备。

另外,为实现与光纤的高效率耦合,光栅宽度一般达到与光纤模场近似的尺寸,需要设计渐变波导实现从单模波导到光栅平板波导的模式转换。若要保证较低的模式转换损耗,往往需要100 μm以上的渐变波导长度,这极大地增加了光栅耦合器的尺寸。为了克服此问题,聚焦光栅耦合器^[21]应运而生,经过光栅耦合器衍射的光可以聚焦于波导处,实现光纤到波导的高效耦合。本文在聚焦光栅耦合器基础上,对光栅周期、刻蚀深度、占空比和下包层厚度进行了仿真优化,并于联合微电子中心有限责任公司(CUMEC)氮化硅平台完成光栅耦合器的制备。

1 光栅的结构设计

1.1 光栅耦合器的基本原理

CUMEC 氮化硅平台一维光栅耦合器示意图如图1所示。氮化硅平台波导厚300 nm,由周期性排布的栅齿结构构成,氮化硅与二氧化硅折射率分别为2与1.46。为使光波导内输入光场经光栅衍射后入射至光纤输出,需要满足光栅相位匹配条件为

$$n \sin \theta = n_{\text{eff}} + m \frac{\lambda}{\Lambda} \quad (1)$$

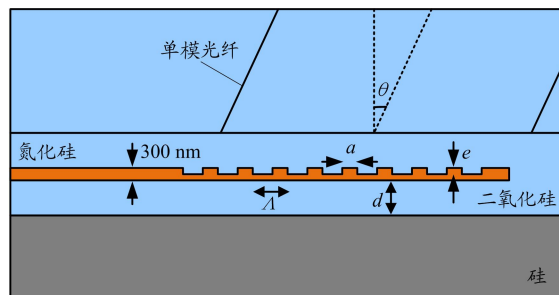


图1 CUMEC 氮化硅平台一维光栅耦合器示意图

其中, n_{eff} 为光栅波导的有效折射率, n_i 为环境折射率, θ 为光栅与芯片表面法线的夹角(常用光纤封装角度为8°), λ 为传输光波长, Λ 为光栅周期, m 为衍射级次(对于常规光栅耦合器,衍射级次选为-1)。

传统一维光栅由于存在很长的模式渐变波导,尺寸很大,影响芯片的集成度。为降低光栅尺寸,并进一步提高耦合效率,本文采用了结构更紧凑的聚焦光栅:采用弧形的栅齿结构代替直线型的栅齿结构,使得光栅本身具有聚焦作用,无需很长的模斑转换波导。然而,由于去掉了缓慢的模斑转换波导,光栅单一栅齿聚焦的光场传输到单模波导处容易出现相位差,导致聚焦后光功率劣化,因此需要对光栅的弧形栅齿进行设计,让单一栅齿聚焦的光场在单模波导处干涉相长。本文设计的聚焦光栅结构示意图如图2所示。为符合相位匹配条件,光栅栅齿上任意一点 $p(x_1, y_1)$ 坐标需要满足

图2 氮化硅聚焦光栅结构示意图

$$m\lambda = n_{\text{eff}} \sqrt{x_1^2 + y_1^2} - x_1 n_i \sin \theta \quad (2)$$

从式(2)可以看出,聚焦光栅栅齿形状是以单模波导起始点为焦点的椭圆弧形。

1.2 氮化硅聚焦光栅仿真设计

在保证光栅栅齿坐标满足式(2)的前提下,影响光栅与光纤之间耦合效率的主要参数包含光栅周期 Λ 、栅齿占空比 f 、刻蚀深度 e 和下包层厚度 d 。本文采用光波导仿真软件Lumerical的FDTD模块搭建氮化硅聚焦光栅模型,并对上述参量进行仿真优化。

1.2.1 光栅周期与耦合效率的关系

首先,通过式(1)与CUMEC 氮化硅平台对应参数,可以计算出氮化硅聚焦光栅周期为1.11 μm,在此计算值附近对光栅周期进行参数扫描。然后,固定 θ

梁宇鑫,李智慧,范诗佳,等:氮化硅低损耗光栅耦合器的设计与制备

为 8° ,改变光栅周期 Λ ,计算光栅与单模光纤的耦合效率,得到耦合效率随光栅周期 Λ 的变化关系如图3所示。可以看出,随着 Λ 的增加,耦合效率先增大后减小, $\Lambda=1.17\ \mu\text{m}$ 时,耦合效率达到最大。这与式(1)计算得到结果稍有差别,是由公式计算中存在近似导致的。

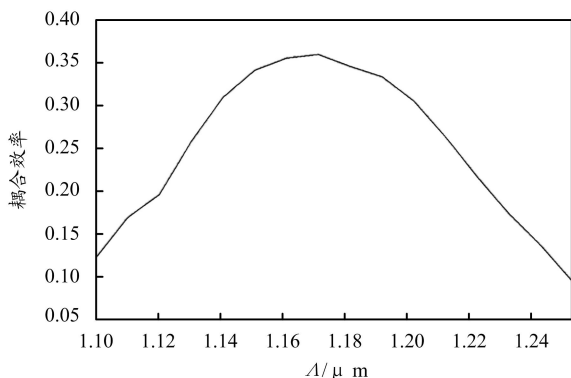


图3 耦合效率随光栅周期 Λ 的变化

1.2.2 刻蚀深度与耦合效率的关系

光栅刻蚀深度 e 直接影响衍射光与入射光的比例,即衍射效率。由于SOI平台的光栅耦合器折射率差较大,全刻蚀光栅衍射效率过大,使得光栅衍射光场很难与单模光纤模场匹配,因此往往通过浅刻蚀的方式降低衍射效率,从而提高与光纤的耦合效率。本文改变光栅刻蚀深度 e 并仿真计算其与光纤的耦合效率,得到的结果如图4所示。可以看出,随着 e 的增加,耦合效率逐渐增大,在 $e=300\ \text{nm}$ 时,即全刻蚀情况下,光栅耦合效率达到最大。因此,对于折射率差较小的氮化硅平台,较小的波导高度限制了刻蚀深度,进而影响了光栅与光纤的耦合效率,即增加波导高度能进一步提高耦合效率。但是,采用低压化学气相沉积(LPCVD)的氮化硅薄膜过厚时会出现应力问题,因此,常规氮化硅波导高度不大于 $400\ \text{nm}$ 。

1.2.3 光栅栅齿占空比与耦合效率的关系

光栅栅齿占空比 f 会影响光栅的衍射效率与光场

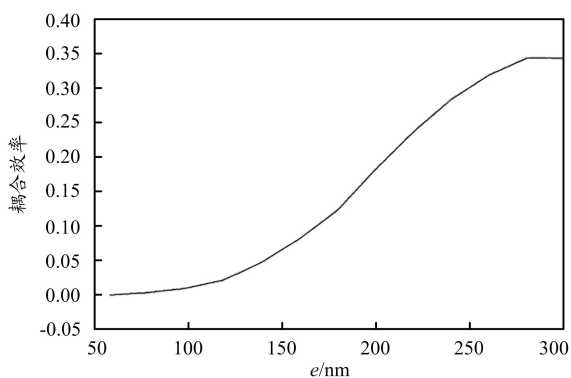


图4 耦合效率随刻蚀深度 e 的变化

出射角度。本文结合实际需求,设定光纤出射角度为 8° ,对光栅占空比 f 进行参数扫描,并计算其与光纤耦合效率的关系,结果如图5所示。可以看出,耦合效率随 f 的增加先增大后减小,在 $f=0.51$ 时,耦合效率达到最大。

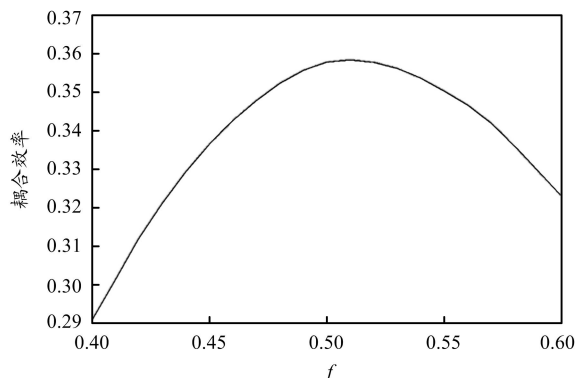


图5 耦合效率随占空比 f 的变化

1.2.4 下包层厚度与耦合效率的关系

光场从芯片外入射后,透射光场透过波导层进入下包层,当下包层厚度 d 刚好满足式(3)时,光栅上方的入射光和在下包层底部反射的反射光发生干涉相长,此时输出光场强度最大。

$$2d=q\lambda\cos\theta \quad (3)$$

其中, q 为正整数。氮化硅光栅的下包层厚度 d 对光栅的耦合效率影响较大,干涉相长与干涉相消对应的耦合效率变化可达到20%。本文改变光栅下包层厚度 d ,计算 d 与光纤耦合效率的关系,得到的结果如图6所示。可以看出,耦合效率随 d 的增加成周期性变化,这与上述光场干涉理论相符。

本文根据以上仿真结果对氮化硅聚焦光栅的参数进行优化设计,具体参数设置如表1所示。参数优化后的氮化硅聚焦光栅耦合效率能够达到37%,带宽大于 $45\ \text{nm}$,中心波长为 $1550\ \text{nm}$ 。

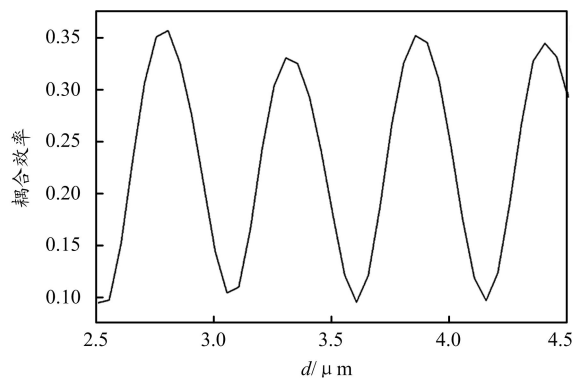


图6 耦合效率随下包层厚度 d 的变化

表 1 氮化硅聚焦光栅结构参数

参数	指标	参数	指标
周期	1.17 μm	占空比	0.51
刻蚀深度	300 nm	下包层厚度	3.3 μm

2 氮化硅聚焦光栅耦合器的制备与表征

2.1 氮化硅聚焦光栅耦合器的制备

氮化硅聚焦光栅耦合器采用 CUMEC 氮化硅工艺进行制备,氮化硅波导厚度为 300 nm。由于采用 LPCVD 工艺完成氮化硅薄膜沉积,氮化硅波导传输损耗较低,可以降低至 0.1 dB/cm 以内,其工艺最小线宽为 200 nm,能够很好地保证氮化硅聚焦光栅耦合器的制备。制备完成的氮化硅聚焦光栅耦合器的扫描电子显微镜(SEM)图如图 7(a)所示,由于采用了聚焦光栅结构,光栅整体尺寸缩减至 $50\text{ }\mu\text{m}\times 40\text{ }\mu\text{m}$ 。光栅耦合器栅齿的放大图如图 7(b)所示,可以看出,小线宽的光栅栅齿表面光滑,矩形度良好。

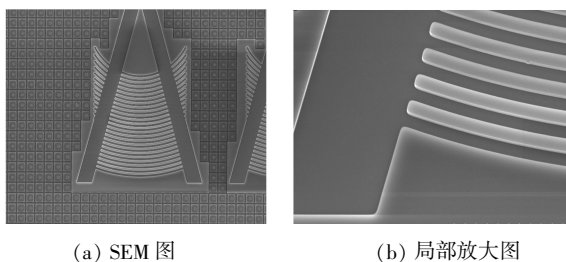
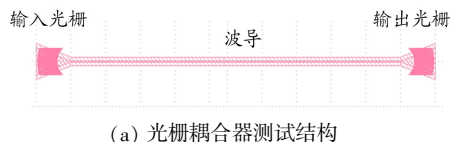


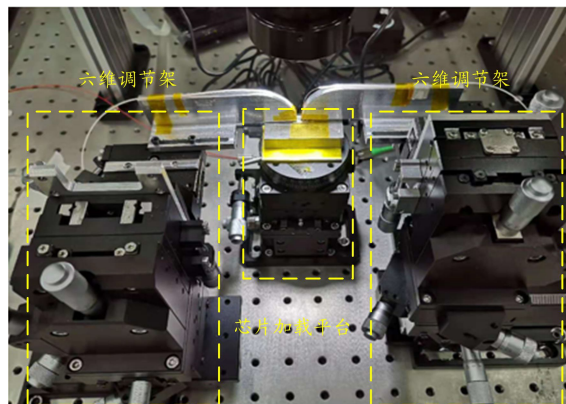
图 7 氮化硅聚焦光栅耦合器的 SEM 图

2.2 氮化硅聚焦光栅耦合器的测试与结果讨论

本文搭建测试系统对氮化硅聚焦光栅进行性能表征,测试结构如图 8(a)所示,由输入/输出光栅与连接波导构成。测试系统如下:连续激光光源输出的光通过偏振控制器(PC),经输入光栅耦合进入氮化硅芯片;光场通过输出光栅与光功率计相连。实际实验过程中,将氮化硅芯片放置在光学测试平台上,如图 8(b)所示。使用 Keysight 公司的可调激光光源输出 1510~1590 nm 波段的连续激光,输出功率为 8 dBm,经由三环式 PC 将输入光调成 TE 模式通过左侧的光纤,与输入光栅耦合后进入芯片;将输出通道的光通过输出光栅耦合进入右侧的光纤,进而传播到光功率计中,从而获得测试结构的输出光谱图,如图 9 所示。可以看出,光栅与光纤的耦合损耗随着波长的增加先减小后增大,损耗最优值为 4.48 dB,对应波长为 1548 nm,与设计值(中心波长为 1550 nm、耦合损耗为 4.3 dB)基本一致,1 dB 带宽大于 45 nm。



(a) 光栅耦合器测试结构



(b) 测试平台

图 8 光栅测试结构与测试平台

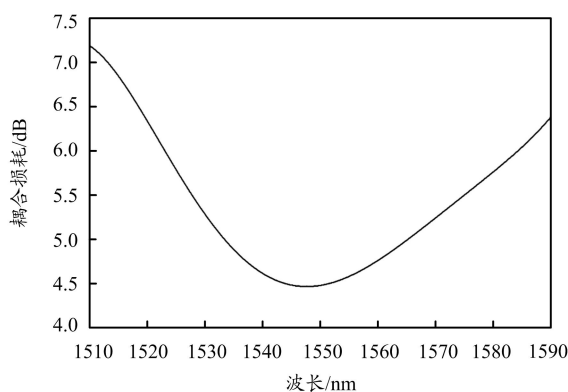


图 9 氮化硅光栅测试光谱

本文基于 CUMEC 氮化硅平台制备的光栅耦合器在耦合损耗方面,相较于已有文献报道的基于特殊工艺的氮化硅基光栅耦合器尚有不足,例如:文献[18]采用厚氮化硅层直接提高光栅的衍射效率,将光栅损耗降低至 3.7 dB;文献[20]采用下包层反射镜的方式,提高了光场向上的衍射效率,可以将光栅损耗降低至 2.6 dB。但文献[18,20]中,工艺的复杂性导致此类设计很难应用于平台的光栅制备与工业量产。本文设计与制备的氮化硅光栅耦合器是基于成熟且商用的 CUMEC 氮化硅平台研发,并已被作为标准模块应用于 CUMEC 氮化硅光子集成平台,因此工艺稳定性与实用性优于上述文献中的氮化硅光栅耦合器。

4 结束语

本文成功设计并制备了与 CMOS 工艺兼容的低

梁宇鑫,李智慧,范诗佳,等:氮化硅低损耗光栅耦合器的设计与制备

损耗、小尺寸氮化硅基聚焦光栅耦合器。通过对光栅耦合器多个关键参数进行仿真计算,包括周期、刻蚀深度、占空比与下包层厚度等,有效地降低了氮化硅光栅耦合器损耗,解决了小折射率差的氮化硅平台光栅耦合器损耗较高的问题。另外,为解决常规一维光栅尺寸较大的问题,本文采用了聚焦光栅结构,有效地将光栅尺寸缩小至 $50\ \mu\text{m}\times 40\ \mu\text{m}$ 。设计的氮化硅聚焦光栅采用 CUMEC 超低损耗氮化硅平台完成制备。经测试,氮化硅光栅耦合器损耗最优值为 4.48 dB,对应波长为 1548 nm,1 dB 带宽大于 45 nm。由于考虑了与 CMOS 工艺的兼容性,本文的设计工艺较为简单,但其耦合损耗性能不如已报道的复杂工艺氮化硅光栅耦合器。耦合损耗方面尚有不足。

参考文献:

- [1] SIEW S Y, LI B, GAO F, et al. Review of silicon photonics technology and platform development [J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39 (13): 4374–4389.
- [2] BAEHR J T, PINGUET T, GUO Q P L, et al. Myths and rumours of silicon photonics[J]. Nature Photonics, 2012, 6(4): 206–208.
- [3] JALALI B, FATHPOUR S. Silicon photonics [J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 24(12): 4600–4615.
- [4] SOREF R. The past, present, and future of silicon photonics [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2007, 12 (6): 1678–1687.
- [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] LARREA R, GUTIERREZ A M, GRIOL A, et al. Fiber-to-chip spot-size converter for coupling to silicon waveguides in the O-band [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 31(1): 31–34.
- [7] WANG X, QUAN X, LIU M, et al. Silicon-nitride-assisted edge coupler interfacing with high numerical aperture fiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(5): 349–352.
- [8] MAEGAMI Y, TAKEI R, OMODA E, et al. Spot-size converter with a SiO_2 spacer layer between tapered Si and SiON waveguides for fiber-to-chip coupling[J]. Optics Express, 2015, 23(16): 21287–21295.
- [9] MAEGAMI Y, OKANO M, CONG G, et al. A simple and fully CMOS-compatible low-loss fiber coupling structure for silicon photonics platform [J]. Optics Letters, 2020, 45(7): 2095–2098.
- [10] MAK J C C, QUENTIN W, OLIVIER S, et al. Silicon nitride-on-silicon bi-layer grating couplers designed by a global optimization method [J]. Optics Express, 2018, 26(10): 13656–13665.
- [11] WATANABE T, AYATA M, KOCH U, et al. Perpendicular grating coupler based on a blazed anti-back-reflection structure[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(21): 4663–4669.
- [12] SÁNCHEZ-POSTIGO A, WANGÜEMERT-PÉREZ J G, LUQUE-GONZÁLEZ J M, et al. Broadband fiber-chip zero-order surface grating coupler with 0.4 dB efficiency[J]. Optics Letters, 2016, 41(13): 3013–3016.
- [13] WANG W, WANG L, ZHANG W. Advances in soliton microcomb generation[J]. Advanced Photonics, 2020, 2(3): 034001-1–034001-27.
- [14] LAMB E S, CARLSON D R, HICKSTEIN D D, et al. Optical-frequency measurements with a Kerr-microcomb and photonic-chip supercontinuum [J]. Physical Review Applied, 2018, 9(2): 024030-1–024030-5.
- [15] PFEIFFER M, KORDTS A, BRASCH V, et al. Photonic damascene process for integrated high-Q microresonator based on nonlinear photonics [J]. Optical, 2015, 3(1): 20–25.
- [16] BLUMENTHAL D J. Ultra-low loss SiN waveguide platform for integrated passive and active components for next generation photonic integrated circuits[C]//IEEE. Proceedings of Photonics Society Summer Topical Meeting Series (SUM). Newport Beach: IEEE, 2016: 1–2.
- [17] NISHIMURA M, TAKEMURA H, UMEZAWA T, et al. Fabrication of sputtered low-strain, low-loss SiN waveguide for optical phased array device [C]//IEEE. Proceedings of Opto-Electronics and Communications Conference. Taipei: IEEE. 2020: 1–3.
- [18] ZHAO X, LI D, CHENG Z, et al. Compact grating coupler for 700 nm silicon nitride strip waveguides[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 34(4): 1322–1327.
- [19] CHMIELAK B, SUKOW S, PARRA J, et al. High-efficiency grating coupler for an ultralow-loss Si_3N_4 -based platform [J]. Opt. Lett., 2022, 47: 2498–2501.
- [20] NAMBIAR S, KUMAR A, KALLEGA R, et al. High-efficiency grating coupler in 400 nm and 500 nm PECVD silicon nitride with bottom reflector[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(5): 1–3.
- [21] BRÄUER A, SCHNABEL B, KLEY E B, et al. Efficient coupling into polymer waveguides by gratings[J]. Applied Optics, 1997, 36: 9383–9390.