

## 氮化硅微腔中的光学频率梳 (特邀)

李 锦<sup>1,2</sup>, 王丕屿<sup>1,2</sup>, 王正瑜<sup>1,2</sup>, 牛 睿<sup>1,2</sup>, 万 帅<sup>1,2\*</sup>, 郭光灿<sup>1,2</sup>, 董春华<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学技术大学 中国科学院量子信息重点实验室, 安徽合肥 230026;  
2. 中国科学技术大学 中国科学院量子信息和量子物理协同创新中心, 安徽合肥 230026)

**摘 要:** 具有高品质因子 ( $Q$  值) 的光学谐振腔能够长时间将光束束缚在较小的模式体积内, 极大地增强了光与物质的相互作用, 成为集成光学器件中具有重大潜力的重要组成部分。聚焦于目前广泛应用于集成非线性光学领域的氮化硅材料平台, 为了解决大尺寸氮化硅微环腔由拼接误差、表面粗糙等因素导致的散射损耗较大的问题, 进行了一系列的工艺改进以提高大尺寸氮化硅微环腔的品质因子。结果表明: 通过薄膜再沉积工艺可以有效降低氮化硅波导的散射损耗, 半径为  $560\ \mu\text{m}$  的大尺寸氮化硅微环腔的本征  $Q$  值得到了平均 26% 的提升。得益于提高的微腔  $Q$  值, 在氮化硅微环腔中实现了重复频率 40 GHz 的光学频率梳。

**关键词:** 氮化硅微环腔; 品质因子; 光学频率梳

中图分类号: O437 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20220302

## Optical frequency comb in silicon nitride microresonator (*Invited*)

Li Jin<sup>1,2</sup>, Wang Piyu<sup>1,2</sup>, Wang Zhengyu<sup>1,2</sup>, Niu Rui<sup>1,2</sup>, Wan Shuai<sup>1,2\*</sup>, Guo Guangcan<sup>1,2</sup>, Dong Chunhua<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Quantum Information, Chinese Academy of Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 2. Center For Excellence in Quantum Information and Quantum Physics, Chinese Academy of Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** Optical resonators with high quality ( $Q$ ) factor can restrict light in a small mode volume for a long time, greatly enhancing the interaction between light and matter, and becoming an important component with great potential in integrated optical devices. Focusing on the silicon nitride material platform, which is currently widely used in the field of integrated nonlinear optics, in order to solve the problem of large scattering loss in the large size on-chip silicon nitride microring resonator caused by the stitching error, the surface roughness and other factors, a series of fabrication process improvements were made to improve the quality factor of the large size silicon nitride microring resonator. The results show that the scattering loss of the silicon nitride waveguide can be effectively reduced by thin film redeposition process, and the intrinsic  $Q$  of the large size silicon nitride microring resonator with a radius of  $560\ \mu\text{m}$  is increased by 26% on average. Thanks to the improved  $Q$  of the large size microring resonator, the frequency comb with the repetition rate of 40 GHz is realized in the on-chip silicon nitride microring resonator.

**Key words:** silicon nitride microring resonator; quality factor; optical frequency comb

收稿日期: 2022-02-20; 修订日期: 2022-04-20

基金项目: 国家自然科学基金 (12104442, 11934012)

作者简介: 李锦, 女, 博士生, 主要从事微腔光学频率梳方面的研究。

导师简介: 董春华, 男, 教授, 博士, 主要从事微腔光子学和微腔光学频率梳方面的研究。

通讯作者: 万帅, 男, 博后, 博士, 主要从事微腔光学频率梳和微纳加工方面的研究。

## 0 引言

具有很小的模式体积和很高的品质因子 ( $Q$  值) 的光学微腔能够将光长时间束缚在微小的空间内, 极大地增强光与物质的相互作用, 因而在腔量子电动力学、微腔激光与传感、腔光力学、非线性光学等领域受到大家的广泛关注<sup>[1-6]</sup>。对于非线性光学微腔器件, 非线性性能通常与微腔的  $Q$  值平方成正比关系, 例如四波混频等非线性光学振荡的阈值功率, 以及激光器的线宽等<sup>[7-8]</sup>; 而在其他领域, 包括量子光学、腔光力学和传感等<sup>[5, 9-11]</sup>,  $Q$  值的提高也会提升器件的性能。近年来, 随着薄膜制备工艺的成熟和微纳加工技术水平的提高, 在多种材料平台上都实现了高品质因子的集成光学微腔光梳<sup>[12-16]</sup>, 并在微腔光梳演示了包括低噪微波源、激光雷达、光学频率梳、光学传感、光学频率合成器、量子密钥分发、大规模相干通信、光钟<sup>[17-24]</sup> 等应用, 大大推进了集成微腔光学平台的发展。在众多的材料平台上, 氮化硅材料由于其具有折射率适中、低损耗、非线性系数较高、透明窗口从可见光一直拓展到中红外等优点, 在集成光学尤其是非线性集成光学中具有巨大的潜力。特别是在基于微腔的孤子频率梳领域, 氮化硅微环腔由于其低功耗、可集成、加工工艺与 CMOS 兼容等特点, 尤其是能够与功率受限的激光芯片相结合实现孤子频率梳<sup>[8]</sup>, 成为具有巨大潜力的孤子应用平台。

目前, 基于氮化硅材料的微腔, 报道的最高本征  $Q$  值约为  $7.2 \times 10^8$ <sup>[25]</sup>。但是, 这种类型的氮化硅微腔, 为了降低光学损耗, 微腔厚度很小 (~50~100 nm), 大量的模式光场分布在氮化硅波导附近的氧化硅介质中<sup>[26]</sup>。这导致波导实际的非线性系数更接近比氮化硅的非线性系数低了一个量级的氧化硅, 不利于光学非线性的研究。同时, 这类微腔的色散不满足孤子频率梳产生所需的反常色散的要求, 无法实现亮孤子的产生。为了制备满足反常色散的集成氮化硅微腔, 可以通过结构色散来补偿材料的正常色散, 这需要制备的微腔厚度达到 600 nm 以上。迄今为止, 满足反常色散的氮化硅微腔的本征  $Q$  值最高可以达到  $10^7$  量级<sup>[27]</sup>, 和理论上氮化硅材料微腔可以达到的最高  $Q$  值至少还有一个量级的差距<sup>[27]</sup>。因此, 开发和改进微纳加工工艺和设计技术, 进一步减小微腔的损

耗, 对推进集成氮化硅光学芯片的应用具有重要意义。

文中对微腔损耗的来源进行了分析, 并通过薄膜再沉积工艺平滑微腔表面, 减少大尺寸氮化硅微环腔在加工过程中产生的拼接误差和微腔表面粗糙度带来的缺陷, 减少氮化硅微环腔的散射损耗。实验结果表明半径为 560  $\mu\text{m}$  的大尺寸氮化硅微环腔经过薄膜再沉积工艺后的平均本征  $Q$  值达到了  $1.92 \times 10^6$ , 与再沉积薄膜前相比平均提高了 26%。并且薄膜再沉积可以与空气包层结合实现对微环腔的几何尺寸的精确调整。利用改进的工艺克服了电子束曝光的拼接误差带来的散射损耗后, 笔者在半径 560  $\mu\text{m}$  的大尺寸氮化硅微环腔中成功实现了重复频率 40 GHz 的单孤子产生, 证明了空气包层可以与低重频的孤子频率梳兼容。笔者的工作为微腔, 尤其是受拼接损耗影响很大的大尺寸微腔的  $Q$  值提高提供了一种简单可行的方案, 有助于在大尺寸微腔中产生低重频孤子频率梳。

## 1 微腔损耗分析和工艺改进

当不考虑微腔与外部耦合带来的耦合损耗时, 即微腔的本征损耗主要包括两个部分: 吸收损耗和散射损耗。吸收损耗主要由薄膜内的杂质引起, 最终以热的形式耗散, 散射损耗主要由微腔表面粗糙度引起, 最终能量通过散射耗散出去, 如图 1 所示。对于氮化硅薄膜, 吸收损耗主要来源于薄膜生长过程中引入的氢原子<sup>[28]</sup>。氢原子和氮化硅结构的氮原子会形成氮-氢 (N-H) 共价键, 在 1530 nm 附近形成宽带吸收峰, 给通讯波段的腔模带来显著的吸收损耗, 吸收的能量最终会以热的形式耗散。而散射损耗主要由微腔波导表面的粗糙度导致<sup>[29]</sup>, 粗糙度越高, 表面缺陷就会导致微腔内的光散射越严重, 越多的腔内能量辐射到外部。对于吸收损耗, 可以通过在高温 (~1200  $^{\circ}\text{C}$ ) 下对氮化硅进行热退火进而有效降低<sup>[30-31]</sup>; 而对于散射损耗, 则需要对加工工艺进行一系列优化和改进, 通过减小波导表面和侧壁的粗糙度来降低。由于被吸收损耗损失的能量会以热的形式耗散, 通过对光产生的热量进行测量, 即可量化微腔中的吸收损耗。参考文献 [27] 中利用线性响应测量的方法, 估算出目前工艺水平下氮化硅微腔的吸收损耗决定的微腔本征  $Q$  值上限约为  $3 \times 10^8$ 。因此, 目前主要是散射损耗限制了

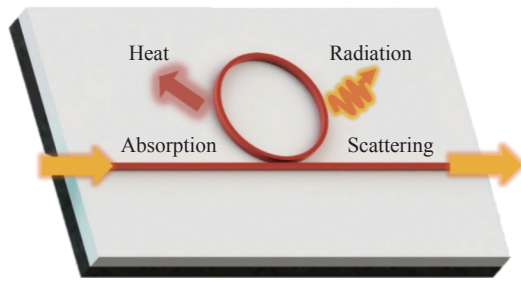


图 1 低功率下微腔损耗的概念图

Fig.1 Conceptual representation of the optical loss in the microresonator at low power

氮化硅微腔本征  $Q$  值的提高。

散射损耗主要由波导表面的粗糙度引起,对于通常采用的矩形波导,表面粗糙度可以分为上下表面粗糙度和侧壁粗糙度。下表面粗糙度主要由沉积薄膜的基底粗糙度决定,氮化硅薄膜沉积好后基本就无法改变,而且基底的粗糙度会通过薄膜沉积传递到上表面。此外,上表面的粗糙度以及侧壁的粗糙度还受到光刻胶掩膜或硬掩膜的图形边缘光滑程度以及刻蚀工艺的优化程度影响。特别地,对于较大尺寸的微腔来说,电子束曝光 (EBL) 设备切换写场时引入的拼接误差是微腔散射损耗的一个重要原因。因此,利用 EBL 制备低损耗大尺寸微腔或者长波导一直是一个难题。为了降低微腔的散射损耗,笔者在之前的工作的基础上<sup>[32-33]</sup>,改进了氮化硅薄膜的制备工艺,在制备出氮化硅微环后,在微环表面再沉积一层薄的氮化硅,通过平滑波导的侧壁和上表面,填补加工过程产生的缺陷,减少表面散射损耗<sup>[26]</sup>,如图 2 (a)~(b) 所示。

为了观测薄膜再沉积对  $Q$  值的影响,需要对同一微腔在沉积前后进行测量。为了能够进行薄膜沉积,微环顶部只能采用空气包层,而不是具有保护作用的氧化硅包层。如果整个芯片,包括传输波导和耦合端口均为空气包层,根据笔者的实验测量,由于耦合处模斑失配较为严重,透镜光纤和波导端面的单端耦合效率仅为 6.3%,相当于 12 dB 的插入损耗,比具有氧化硅包层的样品的插入损耗增大了 10 dB。因此,为了减少插入损耗和满足实验要求,芯片上的微环腔部分需为空气包层,而耦合端面波导需为氧化硅包层,这就需要对氧化硅进行选择沉积,如图 2 所示。通常的做法是使用剥离工艺<sup>[34]</sup>或者湿法刻蚀工艺<sup>[35]</sup>,遮挡或去除微环顶部的氧化硅层。但由于氮化硅波导

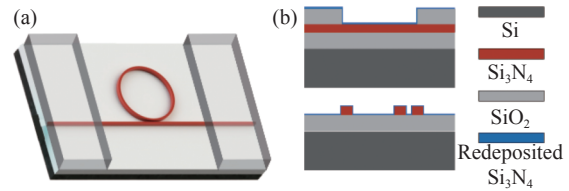


图 2 (a) 再次沉积薄膜前的氮化硅微环腔示意图,耦合波导上方已沉积二氧化硅保护层;(b) 再次沉积薄膜后的氮化硅微环腔的侧面视图

Fig.2 (a) Schematic diagram of the silicon nitride microring resonator before redeposition of film, silica protective layer has been deposited above the coupling waveguide; (b) Side view of the silicon nitride microring resonator with the redeposited film

为全刻蚀波导,湿法刻蚀去除顶部氧化硅的同时,也会刻蚀波导底部的氧化硅,带来额外的损耗。而剥离工艺在空气包层和氧化硅包层的分界面处,由于模斑的突变,也会带来额外的损耗。根据参考文献<sup>[34]</sup>报道,对于 1064 nm 的入射光,剥离工艺的单端总插入损耗为 3.5~4 dB,说明包层分界面处引入了 1.5~2 dB 的插损。在通讯波段,由于空气包层和氧化硅包层的模斑失配程度更大,包层分界面处会引入更多的插损。为了减小包层分界面处引入的插损,使用一片经过加工的硅片小片,而不是光刻胶来遮挡不需要覆盖氧化硅的部分。硅小片是由厚度为 500  $\mu\text{m}$  的 4 in 硅片经过裂片、清洗和深硅刻蚀制备的。为了避免硅小片与芯片表面接触的一侧触碰到氮化硅器件,通过深硅刻蚀工艺将接触面侧中间部分刻蚀 100  $\mu\text{m}$ 。利用光刻胶做掩膜的剥离工艺,因为光刻胶厚度与氧化硅厚度在同一量级,包层分界面几乎垂直。而利用硅小片做掩膜的情形则完全不同。由于硅小片的厚度为 500  $\mu\text{m}$ ,与沉积的氧化硅厚度 (通常为 3  $\mu\text{m}$ ) 之间存在巨大差异,这造成实际沉积的氧化硅厚度会从硅小片的边缘开始向四周逐渐增加,氮化硅波导上方的空气包层逐渐转变为氧化硅包层。这种氧化硅包层厚度的渐变使得空气包层的模斑可以逐渐转换为氧化硅包层中的模斑,反之亦然。相比于垂直的包层分界面,氧化硅厚度渐变的分界面可以降低额外插耗。根据笔者的实验结果,在通信波段,透镜光纤和波导端面的单端耦合效率为 41%,相当于 3.87 dB 的插入损耗。考虑到耦合端面的损耗约为 2 dB,因此包层分界面处引入的额外损耗约为 1.87 dB,与 1064 nm 处的剥离工

艺相当<sup>[34]</sup>,可以预见应小于剥离工艺在通信波段的额外损耗。

## 2 氮化硅微环腔改进工艺的特征

随着现代社会的快速发展,通信载频的频率越来越高,电子信号的生成和数字化变得越来越困难,利用光子技术处理超宽带信号是未来的趋势。40 GHz 作为 5 G 通信的标准频段之一,利用集成微腔实现 40 GHz 重复频率的孤子频率梳产生具有重要的价值。而为了实现该重复频率的氮化硅微腔,结合上述工艺,制备了横截面尺寸为  $720\text{ nm} \times 2200\text{ nm}$ ,半径为  $560\text{ }\mu\text{m}$  的空气包层氮化硅微环腔和端面尺寸收缩至  $720\text{ nm} \times 250\text{ nm}$  的氧化硅包层锥形耦合波导。由于微腔的半径为  $560\text{ }\mu\text{m}$ ,使用的电子束曝光 (EBL) 的写场为  $62.5\text{ }\mu\text{m}$ ,因此相比于笔者之前工作制备的半径为  $100\text{ }\mu\text{m}$  的微腔,大尺寸的微腔的拼接处将由 8 处增加到 36 处,因此会受到更多的写场拼接误差的影响<sup>[36]</sup>,造成大尺寸微腔具有更大的散射损耗。为了减弱拼接误差和由此产生的散射损耗对  $Q$  值的影响,同时满足反常色散的要求,微环腔的波导宽度从此前的  $1800\text{ nm}$  增加到  $2200\text{ nm}$ 。测量了氮化硅薄膜再沉积前后微环腔的  $Q$  值变化,结果如图 3 (a) 的统计直方图所示。直方图统计了在  $1550\sim 1625\text{ nm}$  之间所有 TM 基模的本征  $Q$  值,其中蓝色直方图表示沉积前的微环腔的本征  $Q$  值分布,橙色直方图为经过再沉积  $15\text{ nm}$  的氮化硅和  $30\text{ min}$  的  $1100\text{ }^\circ\text{C}$  氧气氛围退火后的微环腔的本征  $Q$  值分布。

受到拼接误差的影响,在薄膜再沉积前,微腔的本征  $Q$  值普遍低于笔者之前工作中报道的  $3 \times 10^6$ <sup>[33]</sup>,在薄膜再沉积工艺后,微环腔  $Q$  值的总体分布向更高处移动,统计的平均本征  $Q$  值从  $1.52 \times 10^6$  提高到了  $1.92 \times 10^6$ ,提高了 26%。图 3 (b) 和 (c) 分别给出了薄膜再沉积前后本征  $Q$  值最高的光学模式。沉积之前,本征  $Q$  值最高的光学模式位于  $1572.6\text{ nm}$  处,通过洛伦兹拟合得到的  $Q$  值为  $2.84 \times 10^6$ ,由于模式处于欠耦合状态,相应的本征  $Q$  值为  $2.91 \times 10^6$ 。薄膜再沉积后,本征  $Q$  值最高的光学模式位于  $1559.24\text{ nm}$  处,由于本征  $Q$  值的提高,模式的消光比变大,通过洛伦兹拟合得到的  $Q$  值为  $3.44 \times 10^6$ ,相应的本征  $Q$  值提高为  $4.15 \times 10^6$ 。因此,除了平均本征  $Q$  值,本征  $Q$  值

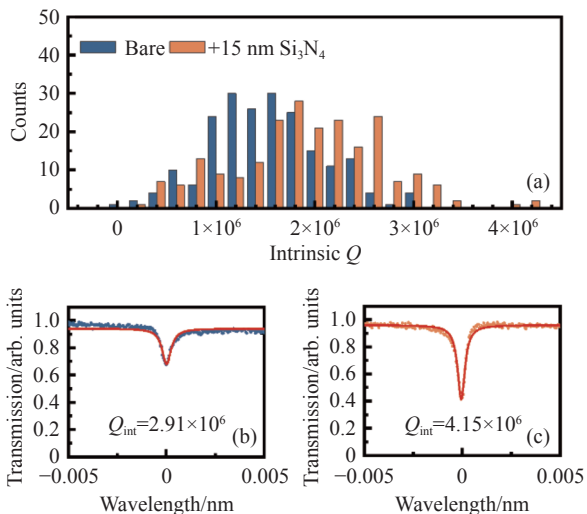


图 3 (a) 氮化硅微环腔在沉积薄膜前 (蓝色直方图) 与后 (橙色直方图) 的本征  $Q$  值的统计直方图,包括了在  $1550\sim 1625\text{ nm}$  之间所有 TM 基模的本征  $Q$  值; (b)-(c) 沉积前后,本征  $Q$  值最高的光学模式的透射功率谱,通过洛伦兹拟合的  $Q$  值分别为  $2.84 \times 10^6$  和  $3.44 \times 10^6$ ,相应的本征  $Q$  值分别为  $2.91 \times 10^6$  和  $4.15 \times 10^6$

Fig.3 (a) Statistical histograms of intrinsic  $Q$  of silicon nitriding microring resonator before (blue histogram) and after (orange histogram) deposition of thin films, which includes intrinsic  $Q$  of all fundamental TM modes between  $1550\text{ nm}$  and  $1625\text{ nm}$ ; (b)-(c) The transmission power spectrum of the optical mode with the highest intrinsic  $Q$  before and after the redeposition. The loaded  $Q$  by Lorentz fitting is  $2.84 \times 10^6$  and  $3.44 \times 10^6$ , respectively, and the corresponding intrinsic  $Q$  is  $2.91 \times 10^6$  and  $4.15 \times 10^6$ , respectively

的最高值也有明显提高,这充分说明薄膜再沉积明显降低了表面粗糙度,减小了散射损耗,提高了本征  $Q$  值。从笔者的实验结果也可以看出,薄膜再沉积工艺可以实现对氮化硅微环腔的后处理,实现微环腔的厚度和宽度的微调。根据使用的沉积设备的性能,最小沉积厚度约为  $2\text{ nm}$ ,精度约为  $1\text{ nm}$ 。

## 3 40 GHz 光学频率梳产生

在通过改进工艺提高的  $Q$  值的基础上,使用双泵浦热平衡<sup>[33, 37-39]</sup>的方法在半径为  $560\text{ }\mu\text{m}$  的空气包层微环腔中进行重复频率为  $40\text{ GHz}$  的光学频率梳产生实验。图 4 (a) 给出了笔者使用的微环腔的 TM 模式的透射谱,图中标红并用红色星号指示的即谐振波长为  $1566.89\text{ nm}$  的泵浦模式,模式的  $Q$  值为  $1.57 \times 10^6$ 。激光器产生的泵浦光经放大器放大后通过透镜

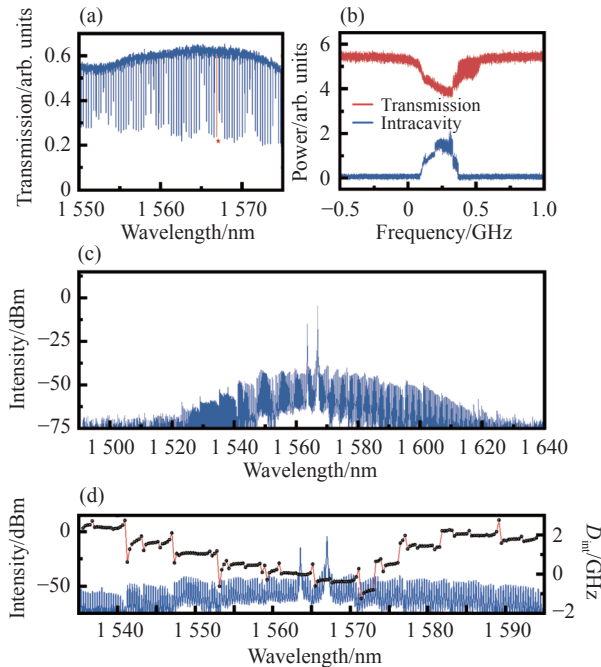


图 4 (a) 氮化硅微环腔的 TM 模式的透射谱; (b) 随着泵浦光从腔模的蓝失谐扫到红失谐, 腔内光功率和透射光功率的变化, 能观测到明显的孤子台阶; (c) 产生的光学频率梳的频谱, 包络抖动由避免模式交叉导致; (d) 光学频率梳频谱与相应的集成色散曲线, 色散曲线上的色散突变与频率梳频谱上的包络抖动相对应

Fig.4 (a) Transmission spectrum of the TM mode in the silicon nitride microring resonator; (b) The change of the intracavity power and the transmitted power with the pump light sweeping from the blue detuning to the red detuning, where distinct soliton steps can be observed; (c) The generated spectral spectrum of the soliton microcomb, the envelope perturbation is caused by avoided mode crossings; (d) The spectral spectrum of the soliton microcomb and the corresponding integrated dispersion curve, the dispersion abrupt change on the dispersion curve corresponds to the envelope perturbation on the soliton microcomb spectrum

光纤耦合进入波导, 片上光功率约为 500 mW。随着泵浦光从腔模的蓝失谐扫到红失谐, 腔内光功率和透射光功率的变化如图 4 (b) 所示。在腔内光功率谱和透射谱上均可以看到明显的孤子台阶, 通过利用反向输入辅助光的双泵浦热平衡方法, 成功的将泵浦光稳定在孤子台阶上, 相应的光学频率梳的频谱如图 4 (c) 所示, 两个功率很大的频率分别对应泵浦光频率和辅助光频率。由于实验中使用的微环腔的波导宽度较宽, 腔内同时存在基模和多种高阶模式, 因此在孤子包络上存在多个由避免模式交叉引起的强度抖

动。将通过光纤马赫曾德干涉仪 (MZI) 校准测得的微腔集成色散 ( $D_{int}$ )<sup>[40]</sup> 与孤子频率梳的频谱放在一起比较, 如图 4 (d) 所示, 可以发现色散曲线上的由避免模式交叉导致的色散突变可以与孤子频率梳频谱上的包络抖动一一对应, 证明了频谱包络抖动确实来源于色散突变。为了抑制微腔内的避免模式交叉, 实现平滑的孤子频率梳频谱包络, 后续的设计中可以采用特殊函数曲线来设计尺寸较大的微环腔<sup>[41]</sup>, 避免基模与高阶模的耦合。

### 4 结 论

总体来说, 笔者在分析了氮化硅微腔损耗的基础上, 针对氮化硅微环腔的散射损耗进行了一系列工艺验证和优化, 并最终在氮化硅微环腔中实现了重复频率为 40 GHz 的孤子频率梳的产生。对于上表面和侧壁的粗糙度, 通过薄膜再沉积实现了表面粗糙度的降低。经过笔者的对比, 可以实现微腔平均本征  $Q$  值从  $1.52 \times 10^6 \sim 1.92 \times 10^6$  的大约 26% 的提升。这降低了大尺寸微腔制备对工艺设备和工艺精度的极高要求, 有助于低重频的光学频率梳产生。笔者在氮化硅微环腔上实现的 40 GHz 的孤子频率梳的产生, 证明了大尺寸微腔的频率梳可以与空气包层兼容, 为后续将后处理应用于更大尺寸的微腔, 实现更低重频的孤子频率梳的产生奠定了基础。

此外, 为了降低微腔下表面的粗糙度, 在  $15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$  的小片样品上探索了利用热回流氧化硅的方法<sup>[42]</sup> 来降低作为基底的热氧化硅片的表面粗糙度的可能性。经过 12 h 的略高于氧化硅的熔点的  $1250 \text{ }^\circ\text{C}$  氮气氛围退火, 热氧化硅片小片样品的表面粗糙度的均方根由  $0.178 \text{ nm}$  降为  $0.161 \text{ nm}$ , 证明了热回流氧化硅来降低热氧化硅表面粗糙度的有效性。后续的实验中, 笔者将尝试在晶圆上验证该方法, 以进一步降低微腔的散射损耗, 从而提高  $Q$  值, 降低孤子频率梳的产生阈值。

### 参考文献:

[1] Vahala K J. Optical microcavities [J]. *Nature*, 2003, 424: 839-846.  
 [2] Chen H, Xiao Y. Applications of integrated microresonator-based optical frequency combs in precision measurement

- (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(11): 20210560. (in Chinese)
- [3] Dong C H, Wang Y D, Wang H L, et al. Optomechanical interfaces for hybrid quantum networks [J]. *National Science Review*, 2015, 2(4): 510-519.
- [4] Vollmer F, Yang L. Review label-free detection with high-Q microcavities: A review of biosensing mechanisms for integrated devices [J]. *Nanophotonics*, 2012, 1: 267-291.
- [5] He L, Ozdemir S K, Yang L. Whispering gallery microcavity lasers [J]. *Laser and Photonics Reviews*, 2013, 7(1): 60-82.
- [6] Song Q H. Emerging opportunities for ultra-high Q whispering gallery mode microcavities [J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2019, 62(7): 074231.
- [7] Kippenberg T J, Holzwarth R, Diddams S A. Microresonator-based optical frequency combs [J]. *Science*, 2011, 332(6029): 555-559.
- [8] Jin W, Yang Q F, Chang L, et al. Hertz-linewidth semiconductor lasers using CMOS-ready ultra-high Q microresonators [J]. *Nature Photonics*, 2021, 15(5): 346-353.
- [9] Lu X, Moille G, Li Q, et al. Efficient telecom-to-visible spectral translation through ultralow power nonlinear nanophotonics [J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(9): 593-601.
- [10] Kippenberg T J, Vahala K J. Cavity optomechanics: Backaction at the mesoscale [J]. *Science*, 2008, 321(5893): 1172.
- [11] Wan S, Niu R, Ren H L, et al. Experimental demonstration of dissipative sensing in a self-interference microring resonator [J]. *Photonics Research*, 2018, 6(7): 681-685.
- [12] Xue X X, Zheng X P, Zhou B K. Super-efficient temporal solitons in mutually coupled optical cavities [J]. *Nature Photonics*, 2019, 13: 616-622.
- [13] Chen H J, Ji Q X, Wang H M, et al. Chaos-assisted two-octave-spanning microcombs [J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 2336.
- [14] Lu Z Z, Chen H J, Wang W Q, et al. Synthesized soliton crystals [J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 3179.
- [15] Weng H Z, Liu J, Afridi A A, et al. Directly accessing octave-spanning dissipative Kerr soliton frequency combs in an AlN microresonator [J]. *Photonics Research*, 2021, 9(7): 1351.
- [16] Wang C L, Fang Z W, Yi A L, et al. High-Q microresonators on 4 H-silicon-carbide-on-insulator platform for nonlinear photonics [J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10(1): 1-11.
- [17] Bai Y, Zhang M, Shi Q, et al. Brillouin-kerr soliton frequency combs in an optical microresonator [J]. *Physical Review Letters*, 2021, 126: 063901.
- [18] Wang J, Lu Z, Wang W, et al. Long-distance ranging with high precision using a soliton microcomb [J]. *Photonics Research*, 2020, 8(12): 1964-1972.
- [19] Wang W, Wang L, Zhang W. Advances in soliton microcomb generation [J]. *Advanced Photonics*, 2020, 2(3): 34001.
- [20] Tan T, Yuan Z, Zhang H, et al. Multispecies and individual gas molecule detection using Stokes solitons in a graphene over-modal microresonator [J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 6716.
- [21] Spencer D T, Drake T, Briles T C, et al. An optical-frequency synthesizer using integrated photonics [J]. *Nature*, 2018, 557(7703): 81-85.
- [22] Marin-Palomo P, Kemal J N, Karpov M, et al. Microresonator-based solitons for massively parallel coherent optical communications [J]. *Nature*, 2017, 546(7657): 274-279.
- [23] Newman Z L, Maurice V, Drake T, et al. Architecture for the photonic integration of an optical atomic clock [J]. *Optica*, 2019, 6(5): 680-685.
- [24] Wang F X, Wang W, Niu R, et al. Quantum key distribution with on-chip dissipative kerr soliton [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2020, 14: 1900190.
- [25] Liu K, Jin N, Cheng H, et al. 720 million quality factor integrated all-waveguide photonic resonator [C]//2021 Device Research Conference (DRC), 2021: 1-2.
- [26] Puckett M W, Liu K, Chauhan N, et al. 422 Million intrinsic quality factor planar integrated all-waveguide resonator with sub-MHz linewidth [J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 934.
- [27] Liu J, Huang G, Wang R N, et al. High-yield, wafer-scale fabrication of ultralow-loss, dispersion-engineered silicon nitride photonic circuits [J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 2236.
- [28] Shaw M J, Guo J, Vawter G A, et al. Fabrication techniques for low-loss silicon nitride waveguides [C]//Proc of SPIE, 2005, 5720: 109-118.
- [29] Tang X, Bayot V, Reckinger N, et al. A simple method for measuring si-fin sidewall roughness by afm [J]. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2009, 8(5): 611-616.
- [30] Ji X, Barbosa F A S, Roberts S P, et al. Ultra-low-loss on-chip resonators with sub-milliwatt parametric oscillation threshold [J]. *Optica*, 2017, 4(6): 619.
- [31] Liu J, Raja A S, Karpov M, et al. Ultralowpower chip-based soliton microcombs for photonic integration [J]. *Optica*, 2018, 5(10): 1347.
- [32] Wan S, Niu R, Wang Z Y, et al. Frequency stabilization and tuning of breathing solitons in Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> microresonators [J]. *Photonics Research*, 2020, 8(8): 1342-1349.
- [33] Wan S, Niu R, Peng J L, et al. Fabrication of the high-Q

- $\text{Si}_3\text{N}_4$  microresonators for soliton microcombs [J]. *Chinese Optics Letters*, 2022, 20(3): 032201.
- [34] Moille G, Westly D, Orji N G, et al. Tailoring broadband Kerr soliton microcombs via post-fabrication tuning of the geometric dispersion [J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 119(12): 121103.
- [35] Hu Y, Yu M, Zhu D, et al. On-chip electro-optic frequency shifters and beam splitters [J]. *Nature*, 2021, 599(7886): 587-593.
- [36] Dey R K, Cui B. Stitching error reduction in electron beam lithography with in-situ feedback using self-developing resist [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2013, 31(6): 06F409.
- [37] Lu Z, Wang W, Zhang W, et al. Deterministic generation and switching of dissipative Kerr soliton in a thermally controlled micro-resonator [J]. *AIP Advances*, 2019, 9: 025314.
- [38] Niu R, Wan S, Wang Z Y, et al. Perfect soliton crystals in the high Q microrod resonator [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(15): 788-791.
- [39] Zhou H, Geng Y, Cui W, et al. Soliton bursts and deterministic dissipative Kerr soliton generation in auxiliary-assisted microcavities [J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8(1): 1-10.
- [40] Li J, Wan S, Peng J L, et al. Thermal tuning of mode crossing and the perfect soliton crystal in a  $\text{Si}_3\text{N}_4$  microresonator [J]. *Optics Express*, 2022, 30(8): 13690.
- [41] Ji X, Liu J, He J, et al. Compact, spatial-mode-interaction-free, ultralowloss, nonlinear photonic integrated circuits [J]. *Communications Physics*, 2022, 5(1): 1-9.
- [42] Pfeiffer M H P, Liu J, Raja A S, et al. Ultra-smooth silicon nitride waveguides based on the damascene reflow process: fabrication and loss origins [J]. *Optica*, 2018, 5(7): 884.