

中红外微环谐振器及应用的研究进展

胡玉洁^{1,2}, 王书晓^{1,2}, 汪大伟^{1,2}, 余明斌^{1,2}, 蔡艳^{1,2*}

¹中国科学院上海微系统与信息技术研究所信息功能材料国家重点实验室, 上海 200050;

²中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049

摘要 微环谐振器是实现硅基光电子片上集成的重要器件。为此,从微环谐振器的原理出发,主要描述了中红外领域高品质因子微环谐振器的研究意义与发展历程,分析了不同材料体系微环谐振器在工艺和实际应用上的优缺点;介绍了基于 Vernier 效应的级联微环谐振器在中红外波段的传感和滤波领域的理论研究;并回顾了中红外克尔光学频率梳的产生原理和发展历程,在理论上证明了锗条形波导微环可以在泵浦功率低至 80 mW 的情况下实现带宽接近一个倍频程的宽谱光频梳,并对研究进展进行了总结和展望。

关键词 集成光学; 硅基光电子; 微环谐振器; Vernier 效应; 光学频率梳

中图分类号 TN29

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.230004

Research Progress of Mid-Infrared Micro-Ring Resonator and Its Application

Hu Yujie^{1,2}, Wang Shuxiao^{1,2}, Wang Dawei^{1,2}, Yu Mingbin^{1,2}, Cai Yan^{1,2*}

¹State Key Laboratory of Functional Materials for Informatics, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;

²Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The micro-ring resonator is an important device for the integration of silicon photonic chips. Based on the principle of micro-ring resonators, the paper mainly describes the research significance and development process of high-quality factor micro-ring resonators in the mid-infrared field, and analyzes the advantages and disadvantages of micro-ring resonators in different material systems in terms of technology and practical applications; then, we introduce the theoretical research of the cascaded micro-ring resonator based on the Vernier effect in the field of sensing and filtering in the mid-infrared region; the generation principle and development history of the mid-infrared Kerr optical frequency comb are reviewed, and we theoretically prove the germanium strip waveguide micro-ring can realize a wide-spectrum optical frequency comb with a bandwidth close to an octave at a pump power as low as 80 mW. Finally, we summarize the research progress and prospect the future applications.

Key words integrated optics; silicon photonics; micro-ring resonator; Vernier effect; optical frequency comb

OCIS codes 130.3120; 130.0250; 130.7408

1 引言

中红外波长范围被定义为 2~20 μm 波段,该波段内,生物分子通过显示出相关的振动跃迁,进而揭示有关分子结构和组成的信息,因此,该波段又被

称为分子指纹区域^[1-3]。硅基光电子基于互补金属氧化物半导体(CMOS)兼容技术生产开发光电子器件,实现光电集成,既能发挥光互连的高速、大带宽和低功耗等特点,也能利用微电子技术集成度高、价格低廉和成品率高等优势,近些年成为光电子领域

收稿日期: 2020-02-19; 修回日期: 2020-03-13; 录用日期: 2020-04-13

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB2200503)、国家自然科学基金(61904185)、上海市重大项目(2017SHZDZX03)、中国科学院百人计划

* E-mail: yan.cai@mail.sim.ac.cn

的研究热点^[4-6]。在中红外范围内,硅基光电子有许多潜在的应用,譬如环境监测、生物传感和自由空间光通信等领域^[7-11]。微环谐振器凭借其波长选择性、高品质因子以及可产生多种非线性光学现象等优点,成为硅基光电子无源器件在中红外波段的研究热点。由于不同材料在中红外波段的吸收系数不同,近年来,国内外研究学者深入探究了与 CMOS 技术兼容的不同材料体系的微环谐振器的性能。蓝宝石上硅(SOS)受蓝宝石衬底材料的吸收所限,其微环谐振器可工作至 $6\ \mu\text{m}$ 波长附近^[12-14];基于工艺更为成熟的绝缘体上硅(SOI),研究人员采用传统结构^[15-16]以及悬浮结构^[17-20]分别成功实现了高品质因子的微环谐振器,受二氧化硅(SiO_2)埋氧层的吸收所限,悬浮结构将硅(Si)波导下的二氧化硅材料掏空,可让微环谐振器工作至 $8.5\ \mu\text{m}$ 波长附近;通过选用其他透明度范围更大的材料作为波导材料,譬如锗^[21-22]、渐变锗硅合金^[23]、硫化物^[24]等,可让微环谐振器在更长的波段范围工作。除了在基础材料体系上的研究外,国内外的研究工作还试图通过功能性微环结构,提高微环谐振器的性能。基于 Vernier 效应的级联微环结构可拓宽自由光谱范围,凭借其透射波长偏移灵敏性远远高于单一微环的优势,可降低检测的难度^[25-29]。此外,高品质因子的微环谐振器是实现片上克尔光频梳的有利条件。中红外波段的克尔光频梳作为低功率的小型频率梳源,在分子气体检测传感方面有非常重要的应用,有

望成为精密探测的主力工具^[30-34]。

本文重点描述中红外高品质因子的微环谐振器的发展历程,分析不同材料体系的优缺点,介绍了基于 Vernier 效应的级联微环谐振器在中红外波段的传感和滤波领域的理论研究,并回顾了中红外克尔光学频率梳的产生原理和发展历程。仿真显示,锗条形波导微环可以在泵浦功率低至 $80\ \text{mW}$ 的情况下实现带宽接近一个倍频程的宽谱光频梳。

2 中红外微环谐振器及其材料

微环谐振器是基于微纳光波导形成的首尾相连的环型结构,能够对特定的波长进行谐振增强,且光传输方向可控。按照耦合直波导数量,可分为全通型以及上下载型两种基本结构,两种类型分别具有一个耦合区和两个耦合区,如图 1 所示。按照耦合方式,可分为水平耦合和垂直耦合,水平耦合方式的输入输出波导和微环处于同一平面,工艺较为简单;垂直耦合方式的波导与微环不在同一平面,工艺较为复杂。按照耦合结构可分为微环型谐振器和微跑道型谐振器,微跑道型和微环型相比,增加了与直波导之间的耦合长度。

含有不同波长的复信号光从入射端口输入,经过直波导和环型结构波导之间的耦合区耦合至环中,特定波长的光能满足谐振条件从而在微环中引起谐振,耦合进入下载端波导,该谐振波长输出的光强最大,完成了滤波功能^[35-36]。

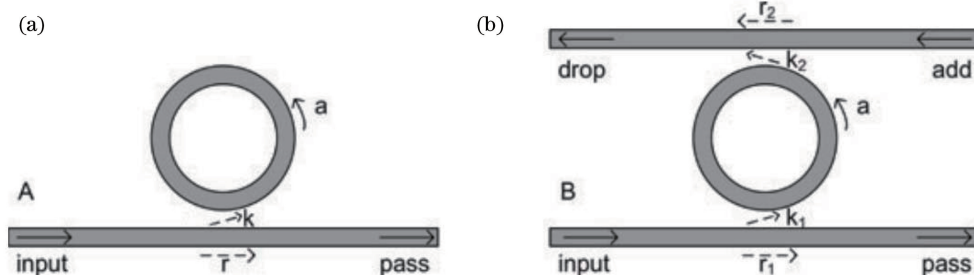


图 1 微环谐振器。(a)全通型微环谐振器^[35]; (b)上下载型微环谐振器^[36]

Fig. 1 Micro-ring resonator. (a) All-pass micro-ring resonator^[35]; (b) add-drop micro-ring resonator^[36]

由于微环谐振器具有较长的光程,可以长时间限制空间光,使得光子和物质的相互作用增强,从而实现较高的灵敏度,可作为中红外应用中的传感器件。具有较高品质因子的微环谐振器对有效折射率的变化有更高的灵敏度^[37],因此,研究人员对于高品质因子的中红外微环谐振器产生了浓厚的兴趣。

针对中红外微环谐振器,研究人员已经研究并实验了多种材料平台。SOS 材料平台在中红外波

段可透明至 $6\ \mu\text{m}$ 波长附近。2010 年,Spott 等^[12]基于 SOS 脊型波导设计并实现了工作于 $5.4\sim 5.6\ \mu\text{m}$ 处品质因子为 3000 的微环谐振器。2012 年,Wong 等^[13]提出了一种使用固定波长源测量微环谐振器品质因子的表征技术,得到工作在 $2.75\ \mu\text{m}$ 波长下,品质因子为 11400 ± 800 的 SOS 微环谐振器。2013 年,Shankar 等^[14]通过光刻胶回流和退火的方式,减小由于制造缺陷而造成的散射

损失,改善了波导传输损耗,优化了波导与微环之间的耦合,测得 SOS 微环谐振器最大负载品质因子为 151000。

然而,SOS 晶圆制造工艺复杂,且价格昂贵,因此研究人员将绝缘体上硅(SOI)材料平台从通信波段引入中红外波段。2015年,Griffith等^[15]用基于热氧化的新型无蚀刻制造工艺来减小硅波导的散射损耗,从而在 $2.6\ \mu\text{m}$ 波长下实现了品质因子高达590000的硅基微环谐振器,并用于后续的光频梳研究。2017年,Miller等^[16]制造了一个空气包层的条形SOI波导及微环谐振器,通过设计波导截面用以减小与吸收性覆层氧化物的光学模式相互作用,从而减少中红外波长的损耗,在 $3.5\sim 3.8\ \mu\text{m}$ 的波长下实现了 1.1×10^6 的高品质因子。

但是,由于SOI平台的 SiO_2 在 $3.4\ \mu\text{m}$ 波长以上具有较大的损耗,限制了其中红外波段的应用,去除氧化物覆层以形成基座或完全悬浮的SOI波导可以大大减少或消除吸收损耗,从而扩展SOI平台的透明窗口。同时,也为波导提供更大的暴露区域,增加了模场与所研究化学物质之间的相互作用面积,因此具有更好的灵敏度,可应用于传感器中。

因此,2012年,一种基于SOI平台的悬浮膜微环谐振器被提出^[17],在 $2.75\ \mu\text{m}$ 波长下理论上达到了8100的品质因子。2013年,Xia等^[18]实际制造并表征了基于SOI平台的悬浮膜微环谐振器,测得该器件在 $5.2\ \mu\text{m}$ 处的品质因子为2700,在 $3.4\ \mu\text{m}$ 波长下品质因子为7900。2016年,Miller等^[38]基于低损耗全气悬式悬浮硅光子学平台制造了在 $3.79\ \mu\text{m}$ 波长下具有83000高品质因子的悬浮微环谐振器。2018年,Zhang等^[19-20]展示了具有横向亚波长光栅(SWG)超材料包层的一次性硅蚀刻的悬浮微跑道型谐振器,在 $2\ \mu\text{m}$ 波长下进行了实验测量,测得消光比(ER)为12.3 dB,品质因子为16600。

此外,氟化钙(CaF_2)材料在从可见光到中红外波长为 $8\ \mu\text{m}$ 的光谱范围内都是高度透明的,并且在该波长范围内的折射率较低,约为1.4。与蓝宝石上硅和二氧化硅上硅相比, CaF_2 上硅具有较宽的透明窗口和较高的折射率对比度。2014年,Chen等^[39]基于 CaF_2 衬底设计了一种硅的微环谐振器,其中心波长为 $5.2\ \mu\text{m}$,内在品质因子达到了62000。

图2为基于不同硅材料平台,各微环谐振器的光学显微或者扫描隧道显微(SEM)图像。

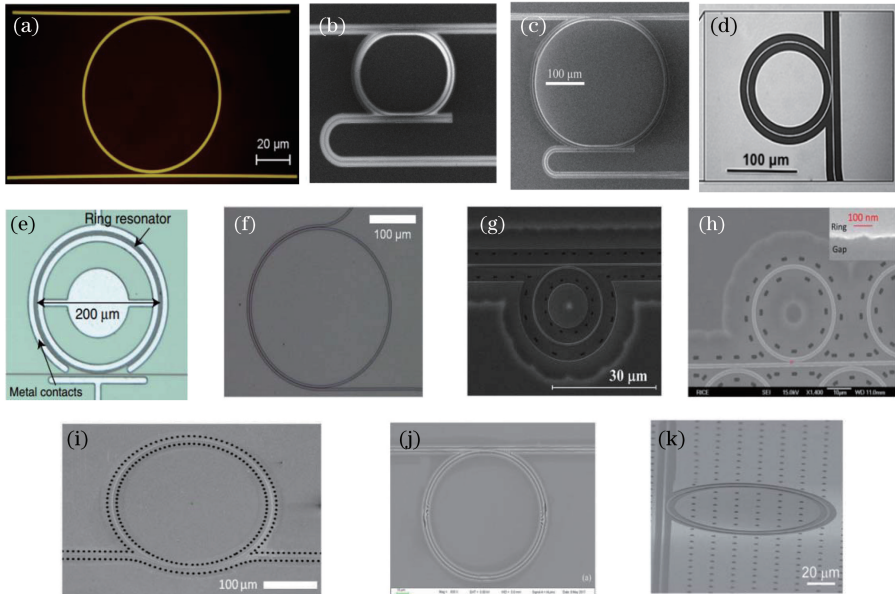


图2 基于不同硅材料平台,各微环谐振器的SEM图像。(a)~(d) SOS微环谐振器的光学显微和SEM图像^[12-14]; (e)(f) SOI微环谐振器的光学显微和SEM图像^[15-16]; (g)~(j)悬浮硅微环谐振器的SEM图像^[17-18,20,38]; (k) CaF_2 衬底的硅微环谐振器的SEM图像^[39]

Fig. 2 SEM images of each micro-ring resonator based on different silicon material platforms. (a)-(d) Optical microscope and SEM image of SOS ring resonators^[12-14]; (e)(f) optical microscope and SEM image of SOI ring resonators^[15-16]; (g)-(j) SEM image of suspended Si ring resonators^[17-18,20,38]; (k) SEM image of Si ring resonator fabricated on the CaF_2 substrate^[39]

除了硅材料以外,同为四族元素,锗(Ge)材料以其在 $2\sim 14\ \mu\text{m}$ 的波长范围内透明,具有比硅高的非线性系数和热光系数,以及与 CMOS 工艺兼容等特点,引起了大家的重视^[1]。2018年,Kang等^[21]在绝缘体上锗(GeOI)晶圆上设计了锗的微环谐振器,工作于 $2\ \mu\text{m}$ 波长左右,并测得其品质因子约为 170。同年,Xiao等^[22]实验制备了一种空气包覆的中红外锗微环谐振器,在 $2150.12\ \text{nm}$ 波长附近,实现了接近临界耦合条件的 $5.4\ \text{dB}/\text{cm}$ 的传输损耗和 $22\ \text{dB}$ 的高消光比,获得了迄今为止,基于锗的集成平台中最高的品质因子,约为 57000。

基于 Ge 平台的另一个方向是直接在 Si 上外延生长锗硅合金(SiGe)或 Ge 材料,通过在生长方向上调整渐变的 Ge 的含量,从而对材料的光学特性进行精细控制。而且,这种生长策略能够逐渐适应 Si 和 Ge 之间的晶格失配,从而实现低缺陷密度的 SiGe 材料。2019年,Ramirez等^[23]展示了在富含 Ge 的 SiGe 材料平台上实现的集成跑道型谐振器,该平台在 $8\ \mu\text{m}$ 波长附近工作。在临界耦合条件附近,测得其品质因子约为 3200,消光比约为 $10\ \text{dB}$ 。

基于其他材料体系,硫族化物玻璃(ChG),即

含有 S、Se 和(或)Te 的无定形化合物,由于它们在中红外具有广泛的光学透明度窗口,较低的热导率和较大的热光系数^[40],引起了大家广泛的兴趣,譬如硫化亚砷(As_2S_3)玻璃^[41]、铌酸锂(LiNbO_3)^[42]等。2013年,Lin等^[24]提出了一种具有高折射率对比的 As_2Se_3 硫族化物玻璃谐振器。其微盘半径为 $200\ \mu\text{m}$,耦合间距为 $2.75\ \mu\text{m}$ 用以达到近临界耦合,实验证明,谐振器在 $5.2\ \mu\text{m}$ 波长处展现出 2×10^5 的高品质因子。

对于 III-V 族化合物而言,足够低折射率的覆层的设计具有挑战性,因此可以将 III-V 族半导体材料砷化镓(GaAs)沉积到由砷化铝镓(AlGaAs)制成的光学缓冲层上,从而在中红外波段中提供非常宽的透明窗口($0.9\sim 25\ \mu\text{m}$)。2019年,Haas等^[43]演示了沉积在 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 缓冲层上的 GaAs 微环谐振器。在 $6\ \mu\text{m}$ 波长左右,实验测得其品质因子约为 1900。

图 3 为基于锗材料及其他材料平台,各微环谐振器的扫描隧道显微图像。

基于以上各种材料平台的对比,表 1 总结了不同的微环谐振器的结构参数及其性能。

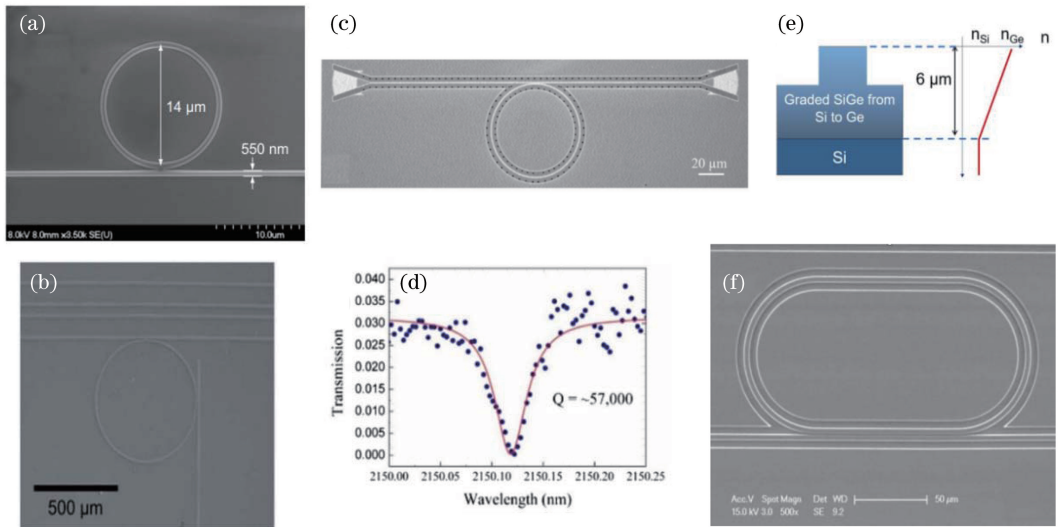


图 3 基于不同材料平台,各微环谐振器的 SEM 图像。(a)基于 GeOI 材料平台的锗微环谐振器的 SEM 图像^[21]; (b)沉积在 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 缓冲层上的 GaAs 微环谐振器的 SEM 图像^[43]; (c)(d)具有空气包层的锗微环谐振器 SEM 图像及其在工作波长下的品质因子的值^[22]; (e)(f)富含 Ge 的 SiGe 渐变波导示意图及 SiGe 渐变微环谐振器的 SEM 图像^[23]

Fig. 3 SEM images of each micro-ring resonator based on different material platforms. (a) SEM image of Ge ring resonator based on GeOI material platform^[21]; (b) SEM image of GaAs ring resonator on top of a $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ buffer layer^[43]; (c) (d) SEM image of Ge ring resonator with air cladding and its quality factor value at operating wavelength^[22]; (e) (f) schematic of Ge-rich SiGe waveguide with refractive index profile along the growth direction and SEM image of Ge-rich SiGe ring resonator^[23]

表 1 基于不同材料平台微环谐振器的性能

Table 1 Performance of ring resonators based on different material platforms

Types of waveguide	Material platform	Operating wavelength $\lambda / \mu\text{m}$	Q	Reference
Rib	SOS	5.5	3000	[12]
Strip	SOS	2.75	11400 \pm 800	[13]
Strip	SOS	4.4	151000	[14]
Strip	SOI	2.6	590000	[15]
Strip	SOI	3.8	1.1 \times 10 ⁶	[16]
Suspended membrane	SOI	2.75	8100	[17]
Suspended membrane	SOI	3.5	7900	[18]
		5.2	2700	
Suspended membrane	SOI	3.79	83000	[38]
Suspended membrane	SOI	2	16600	[19-20]
Strip	Silicon on CaF ₂	5.2	62000	[39]
Suspended membrane	GeOI	2	170	[21]
Suspended membrane	GeOI	2.15	57000	[22]
Rib	graded SiGe	8	3200	[23]
Rib	AlGaAs	6	1900	[43]

3 基于 Vernier 效应的中红外级联微环谐振器

Vernier 效应是一种由较小的信号变化引起了较大的信号变化的现象,目前已被广泛用于滤波和传感应用的集成光子学中。本文将能够产生 Vernier 效应的微环称为 Vernier 微环。通过级联两个不同半径的微环,能够大幅度增加滤波器的自由光谱范围和调谐范围,可应用于可调谐光学滤波器中,也能够大幅提高透射波长的偏移灵敏度,可应用于传感器中^[44-45]。

目前,中红外激光器可以通过外部光栅向激光器提供反馈并定义其发射波长,实现其波长调谐的功能。采用分束器/组合器和 Vernier 跑道微环谐振器组合成的反射器可在芯片上实现集成谐振腔体,从而取代外部旋转光栅。2018 年,Radosavljevic 等^[25]制造和表征了在 Ge-on-SOI 波导平台上的 Vernier 可调谐跑道型谐振器滤波器,该滤波器可在 5 μm 波长范围内进行调谐(自由光谱范围为 108 nm),而无需任何移动部件,该跑道型微环谐振器具有 20000 的品质因子,且峰值抑制超过 20 dB。

Vernier 效应的光学滤波器对单个微环谐振器的折射率变化极为敏感^[46-47]。通过施加热量以诱导热光效应来调谐微环谐振器,可以更大程度地调整 Vernier 滤波器的输出。2019 年,Ho 等^[48]实现了在约 1.95 μm 的波长下的可调 Vernier 滤波器,该滤波器基于绝缘体上锗光子平台,覆盖的金属加热器线会产生热量,以引起热光效应来实现高效调谐,

而不会产生过多的损耗。Ge 的热光系数较高,单个微环谐振器的可调性为 0.083 nm/mW 或 0.175 nm/°C,约为硅的两倍。通过级联两个微环谐振器来实现 Vernier 效应,滤波器的可调性提高到 0.753 nm/mW 或 1.487 nm/°C,相比单个微环谐振器高出 9 倍以上。上述结果说明,通过级联并结合 Ge 的高热光系数可以减少 Vernier 滤波器的功耗。

图 4 为中红外 Vernier 级联微环滤波器的芯片布局以及扫描隧道显微和光学显微图像。

中红外波段谱带符合环境和生物传感领域对高灵敏度和强基频振动的需求。目前,中红外波导传感器件可以满足绝大多数场景的需求。但对于更长波长范围的应用场景,传统波导器件的灵敏度仍有待提高。因此可以采用基于 Vernier 效应的微环谐振器,这种器件可以同时采用折射率传感^[49-50]和光学吸收传感机理,获得极高的传感灵敏度。

2009 年,Dai^[27]提出将 Vernier 效应应用于传感的可能性的理论研究。2012 年,Passaro 等^[51]提出并模拟了基于 Vernier 效应的级联微环谐振器的光学架构,结果显示,该结构具有很好的中红外气体的均质感测和光吸收效果。其结构如图 5 所示,灰色覆盖的区域表示传感区域。

该微环谐振器由两个不同物理尺寸的全通型微环谐振器级联构成,分别为 R_{filter} 和 R_{sensor} ,接收输入光信号的微环谐振器 R_{filter} 作为滤波器,进行波长选择。经由滤波器滤过的光信号传入微环谐振器 R_{sensor} , R_{sensor} 直接暴露于覆盖的介质中,而要检测的

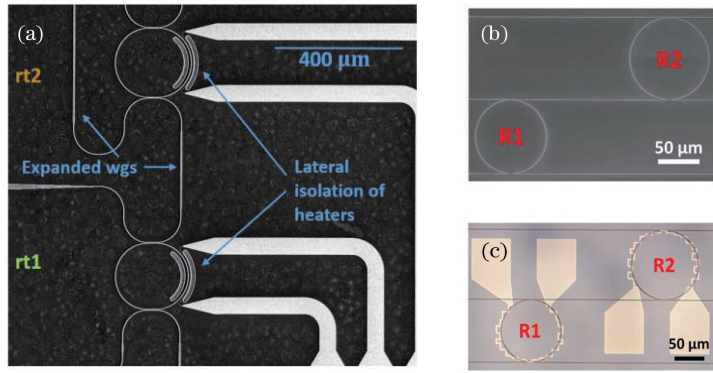


图 4 中红外 Vernier 级联微环滤波器的芯片布局 and SEM 图像。(a)两个 Vernier 配置的跑道型微环谐振器的芯片^[25]；

(b)(c)热调的 Vernier 级联微环谐振器的 SEM 图像和光学显微图像^[48]

Fig. 4 Chip layout and SEM image of mid-infrared Vernier cascaded micro-ring filter. (a) Chip of two racetrack resonators in a Vernier configuration^[25]; (b)(c) SEM and optical microscope images of heating tunable Vernier ring resonator^[48]

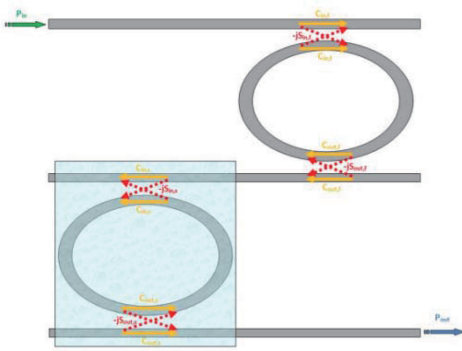


图 5 用于传感领域的基于 Vernier 效应的级联微环谐振器结构示意图^[47]

Fig. 5 Schematic of cascaded micro-ring resonator based on Vernier effect for sensing field^[47]

测试物质包含在覆盖介质中。 R_{filter} 和 R_{sensor} 拥有各自的透射谱和不同的自由光谱范围。为了实现传感器的应用,在无检测物质的情况下,需要把两个微环各自的谐振波长设计为在某个固定波长下相同,显示一个公共的峰,实现输出端最大强度的透射谱,通常将其设置为与传感器的工作波长一致。 R_{filter} 和 R_{sensor} 的透射谱如图 6(a)所示,在公共波长处重叠,整体级联微环的透射谱可通过公式 $T_{tot} = T_{filter} \cdot T_{sensor}$ 进行计算,其图谱如图 6(c)所示。当检测区域存在检测物质时,微环波导的有效折射率会因为检测物质的不同浓度而改变,从而微环谐振器的透射谱发生不同程度的波长偏移,当单一微环作为传感器时,其透射谱变化如图 6(b)所示,而

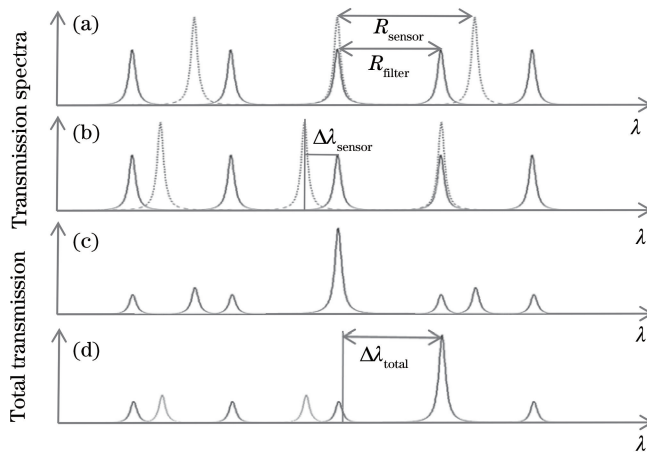


图 6 实验结果。(a)滤波微环和传感微环的透射谱;(b)存在检测物质时,传感微环透射谱的波长偏移;

(c)级联微环谐振器的整体透射谱;(d)存在检测物质时,级联微环谐振器的整体透射谱偏移

Fig. 6 Experimental results. (a) Transmission spectrum of filtering and sensing micro-ring; (b) wavelength shift of transmission spectrum of sensing micro-ring in the presence of detected substance; (c) total transmission spectrum of the cascaded micro-ring resonator based on Vernier effect; (d) wavelength shift of transmission spectrum of cascaded micro-ring resonator in the presence of detected substance

通过设计 Vernier 级联微环,可以使得在相同检测物质的浓度下,整体透射谱的波长偏移量远远高于单一微环的波长偏移量,如图 6(d)所示,从而提高检测灵敏度,实现了高性能的传感器器件。

2014 年, Troia 等^[52]设计并实现了高度为 400 nm、宽度为 1350 nm、刻蚀深度为 220 nm 的 SOI 脊型波导,其埋入氧化层厚度为 2000 nm,在工作波长 3.75 μm 附近,进行准横电波(TE)模式的单模传输。在此基础上,进行了 3.7~3.8 μm 波长范围内的基于 Vernier 效应的级联耦合跑道型微环的设计与制造,单个谐振器的插入损耗低于 1 dB,消光比高达 30 dB。验证了中红外波长 Vernier 架构微环谐振器的光谱。2016 年, Troia 等^[28]报道了工作在 3.8 μm 左右的基于 Ge-on-Si(GOS)脊形波导的 Vernier 级联微环谐振器的实验演示。GOS 脊型波导尺寸如下:厚度为 2.0 μm ,宽度为 2.2 μm ,刻蚀深度为 1.35 μm 。级联的 Vernier 微环谐振器插入损耗约为 5 dB,最大消光比约为 23 dB,负载品质因子高于 5000。此外,单个谐振器的平均插入损耗为 1 dB,消光比为 18 dB,品质因数约为 1700。2018 年, Chana 等^[29]基于 Vernier 效应设计并实现了两个级联环形谐振器,用于 3.65~4 μm 的中红外范围。两个 Vernier 级联环型谐振器基于 400 nm 厚的绝缘体上硅晶圆,波导宽度为 1.2 μm 。两个不同尺寸器件的自由光谱范围分别为 116.2 nm 和 62.6 nm,品质因子分别为 4200 和 2100。在加了热调谐的情况下,在 2 mA 的电流下观察到 7.4 nm 的包络线偏移。

4 中红外克尔光频梳

在时域上拥有同等间隔的多个脉冲序列,在频域上表现为同一体系的若干个排列整齐的离散、等间距、高稳定性的频率分量,称为光频梳(OFC)。光频梳由于其较窄的线宽和精确的频率间隔而成为

高精度光谱学的革命性光源。一个高性能的光频梳主要是通过谱线间隔是否可调谐、平坦度、梳齿数以及信噪比来衡量的。在中红外光谱区的光频梳对分子气体检测非常有效,例如羰基硫、乙烷、乙烯和甲醛等,它们是各种疾病的重要生物标记,在中红外范围内具有强烈的振动跃迁,中红外光频梳通过相干控制或者利用非线性效应能够在较宽的光谱范围内快速而灵敏地采集分子光谱。因此,能够以相对较低的光功率工作,小型化的频率梳源具有很重要的应用价值,它们能够为野外远距离大气传感提供高便携性,因此片上集成的中红外光学频率梳对分子光谱探测具有重大意义^[53]。近年来,学者们研究了多种方法来产生光频梳,例如非线性频率转换,包括光参量振荡(OPO)器^[54-58]和差频(DFG)产生^[59-61],或使用量子级联激光器^[62]和中红外锁模激光器^[63-64]来激发产生光频梳。近几年出现一种更具吸引力的光频梳产生方案,该方案是基于高品质因子的微谐振器的克尔(Kerr)光频梳^[15,65-68]。基于微环谐振器产生光学频率梳的原理图如图 7 所示,输入一束单波长的连续波(CW)泵浦光,随着功率在微腔内的逐渐增强,色散与非线性相互作用,通过光学参量振荡和级联四波混频产生大量等间隔频率分量的多波长光源。基于微谐振器产生的克尔光频梳,频率范围广,具备良好的频率稳定性和相干性,而且克尔光频梳的梳齿间隔一般在几十到几百 GHz,远大于通过飞秒锁模激光器获取的光频梳,能够极大地提升测量范围和精度,是当前较为理想的光频梳产生方案。2007 年, Del'Haye 等^[69]提出了一种基于高品质因子微谐振器的光频梳产生方案,制作出品质因子高达 1×10^8 的微环谐振器,获得了通信波段波长覆盖范围超过 400 nm 且梳齿间隔稳定的光频梳。目前,基于微环谐振器的通信波段的克尔光频梳的研究取得很好的进展,然而中红外波段的光频梳由于测试条件的限制,其发展还是处于起步阶段。

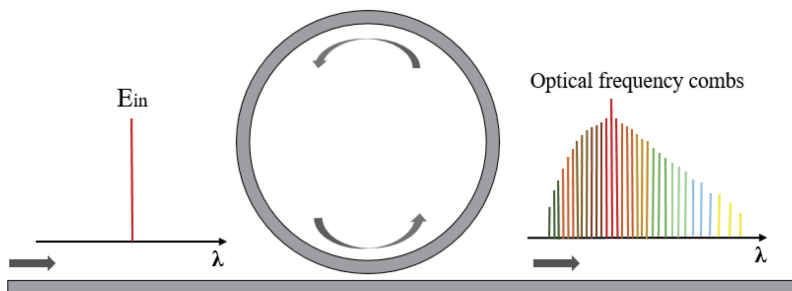


图 7 基于微环谐振器产生光学频率梳的原理图^[66]

Fig. 7 Schematic of optical frequency comb generation based on micro-ring resonator^[66]

基于微环谐振器的中红外光频梳的关键技术是色散的设计,即用于产生光频梳的材料及其结构需满足反常群速度色散要求,并且微环谐振器需要具备较高的品质因子。氮化硅波导材料由于其非常低的波导传输损耗,可制备出高品质因子的微环谐振器,因此在中红外光频梳领域得到了广泛的关注。

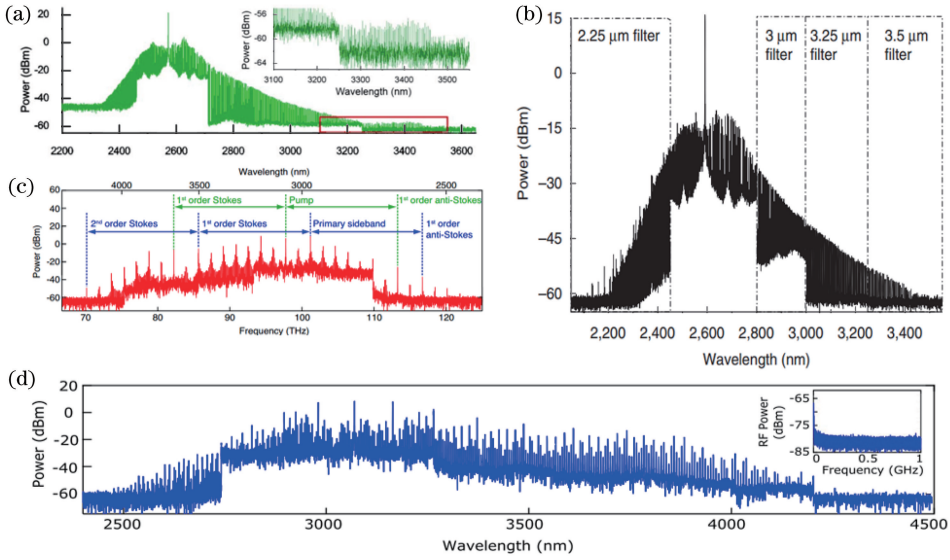


图 8 中红外克尔光频梳实验结果。(a)基于 Si_3N_4 微环谐振器产生的克尔光频梳^[65]; (b)从无蚀刻硅微环谐振器产生中红外光频梳^[15]; (c)硅微环谐振器中基于四波混频和拉曼效应相互作用的相干中红外光频梳^[32]; (d)泵浦波长为 $3.07 \mu\text{m}$ 的中红外孤子光频梳^[68]

Fig. 8 Experimental results of mid-infrared Kerr optical frequency comb. (a) Kerr optical frequency comb based on Si_3N_4 ring resonator^[65]; (b) Kerr optical frequency comb based on non-etched silicon ring resonator^[15]; (c) coherent mid-infrared optical frequency comb based on four-wave mixing and Raman effect interaction in silicon ring resonator^[32]; (d) mid-infrared soliton optical frequency comb with pumping wavelength of $3.07 \mu\text{m}$ ^[68]

由于硅中的双光子吸收的波长不超过 $2.2 \mu\text{m}$ ^[30],并且硅材料本身具有较大的非线性,因此基于硅材料的中红外光频梳也是研究热点。2015年,Griffith等^[15]在 CMOS 兼容的材料平台上,制备得到 $2.6 \mu\text{m}$ 波长处本征品质因子为 590000 的无蚀刻硅微环谐振器。将硅微环谐振器嵌入集成的反向偏置 PIN 二极管中,以抽取生成的自由载流子,降低自由载流子效应对产生光频梳的影响^[31]。利用该微环泵浦 $2.59 \mu\text{m}$ 波长的连续光,实现了 $2.1 \sim 3.5 \mu\text{m}$ 的宽带频率梳状结构,如图 8(b)所示。2016年,Griffith等^[32]实现了低噪声相干中红外光学频率梳源。其制备所得的硅微谐振器在 $3.1 \mu\text{m}$ 波长处的本征品质因子高达 250000。利用集成的 PIN 二极管表征腔内梳的产生动力学,利用硅固有的三光子吸收过程,观察到由硅中的拉曼位移隔开的强梳齿线,表明拉曼效应和四波混频之间的相互作用导致生成的锁相梳齿,如图 8(c)所示。

2015年,康奈尔大学的 Luke等^[65],设计并制备了基于宽度为 $2.7 \mu\text{m}$ 、厚度为 $0.95 \mu\text{m}$ 的氮化硅(Si_3N_4)条形波导微环谐振器,微环半径为 $230 \mu\text{m}$ 、耦合间距为 $0.86 \mu\text{m}$,经过多次退火和刻蚀优化,实验测得在 $2.6 \mu\text{m}$ 波长处其品质因子高达 1×10^6 ,获得了 $2.3 \sim 3.5 \mu\text{m}$ 中红外波段的光频梳,如图 8(a)所示。

同年,该团队采用 PIN 结构的调谐硅微环谐振器,通过对自由载流子进行调控,实现了腔孤子的形成控制,获得了 $2.4 \sim 4.3 \mu\text{m}$ 的基于锁模微谐振器的频率梳^[68],如图 8(d)所示,并观察到较高的泵浦梳齿转换效率,其中 40% 的泵浦功率被转换为输出梳齿功率,这是首个通过孤子锁模产生的相干中红外光频梳。结果表明,硅的高非线性、高导热性、多光子吸收和自由载流子诱导效应这些独特的特征可以适当地用于锁模宽带中红外频率梳的产生。

除了氮化硅和硅材料外,铌酸锂和锆材料也具有非常高的非线性,得到了广泛关注。Fan等^[33]从理论上仿真了在泵浦功率 50 mW 下基于铌酸锂狭缝波导微环的锁模克尔光频梳,带宽为 $2.81 \sim 4.63 \mu\text{m}$ 。Guo等^[34]在 $3.5 \sim 10 \mu\text{m}$ 的宽带上进行硅基锆波导色散平坦化和色散杂化,在泵浦功率低至 180 mW 的条件下,仿真得到带宽为 $2.3 \sim 10.2 \mu\text{m}$ 的锆微环双倍频程锁相克尔光频梳,然而

该文章提出的波导结构为悬浮的锗硅双层波导结构,工艺制备复杂,难度大。Zhang 等^[70]设计了宽度为 $3.2\ \mu\text{m}$ 、高度为 $1.8\ \mu\text{m}$ 的条形锗波导,在泵浦波长为 $6\ \mu\text{m}$ 、泵浦功率为 $1.4\ \text{W}$ 的条件下仿真实现了带宽为 $4.66\sim 8.38\ \mu\text{m}$ 的锁模克尔光频梳,然而产生该光频梳所需的泵浦功率较大,为实验测试带来很大的挑战。

锗在中红外波段材料透明窗口大于 $12\ \mu\text{m}$,且具有很高的非线性和较高的折射率(约为 4.3),是产生中红外波段微环克尔光频梳的最具潜力的材料

之一^[70]。然而目前并没有实验报道出锗基微环克尔光频梳的结果,主要研究仍处于理论仿真阶段。由于锗材料具备优异的光学性能,并且条形波导的工艺制备简单成熟,本文课题组在理论上研究了锗条形波导微环产生的克尔光频梳特性,利用 Lugiato-Lefever 方程(LLE)模型^[34]仿真克尔光频梳的产生并讨论不同泵浦波长条件对产生的光频梳带宽的影响。

Lugiato-Lefever 方程(LLE)可以描述光学微腔中光场的非线性演化过程,具体表达形式为^[71]

$$t_R \frac{\partial E(t, \tau)}{\partial t} = \left[-\frac{\alpha}{2} - \frac{\theta}{2} - i\delta_0 + iL \sum_{k \geq 2} \frac{\beta_k}{k!} \left(i \frac{\partial}{\partial \tau} \right)^k + iL\gamma |E|^2 \right] E + \sqrt{\theta} E_i, \quad (1)$$

式中: $E(t, \tau)$ 为微腔内光场; E_i 为输入连续光泵浦; t_R 表示光场在微腔内的往返时间; t 为慢变时间; τ 为快变时间; α 为腔内损耗; θ 为腔内耦合系数; δ_0 为泵浦与微环谐振模式的失谐; β_k 为微腔的第 k 阶色散; γ 为微腔非线性系数; L 为微腔的周长。采用分步傅里叶方法求解该 LLE 方程,并且使用快速傅里叶变换方法进行有效地模拟仿真。通过优化微腔色散,合理配置泵浦光源,微腔可以通过光学参量振荡和四波混频等非线性效应产生光学频率梳。泵浦光功率的大小对光频梳的产生起着至关重要的作用,通常需要超过泵浦光阈值才能引起光学参量振荡产生新的频率^[72]。然而中红外波段的可调谐激光源的最大可用功率有限,因此,在低泵浦光功率的条件下实现宽带宽、稳定、平坦的克尔光频梳具有重要意义。

所设计的锗条形波导厚度为 $1.5\ \mu\text{m}$,宽度为 $2.2\ \mu\text{m}$,衬底为硅材料,上包层为空气,其结构示意图如图 9(a)所示。仿真了锗波导在 $3.5\ \mu\text{m}$ 波长下的模场,如图 9(b)所示,可以看到,该尺寸的锗波导可以很好地束缚住光场。由于光频梳形成过程中的四波混频效应需要满足相位匹配条件才能实现,而引起相位失配的原因主要有三方面:材料色散、波导色散和非线性效应^[73]。一般材料色散是由材料本身决定的,数值固定,而非线性效应引起的相位失配为正值,只能通过设计不同的波导结构来调节波导色散,使波导处于反常色散区,从而降低整体的相位失配值,使四波混频效应在所需要的范围内更好地发生,得到较好的光频梳输出。通过 Lumerical 光学仿真软件仿真了该波导的色散随波长变化的曲线,如图 9(c)所示,可以看到,该尺寸的锗波导在波

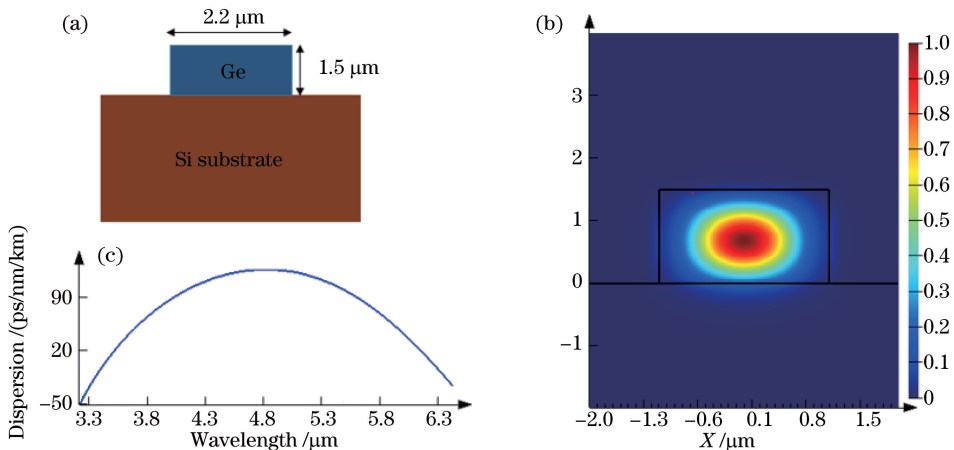


图 9 锗条形波导性能结果图。(a)硅基锗条形波导示意图;(b)锗条形波导模场示意图($@3.5\ \mu\text{m}$);(c)锗条形波导色散

Fig. 9 Property results of Ge strip waveguide. (a) Schematic of Ge-on-Si strip waveguide; (b) Schematic of Ge strip waveguide mode field($@3.5\ \mu\text{m}$); (c) dispersion of Ge strip waveguide

长 $3.4\sim 6.3\ \mu\text{m}$ 的宽谱范围内具有反常色散(色散值大于零),且色散较为平坦。反常色散可以满足克尔光频梳产生的相位匹配条件,是产生克尔光频梳的必要条件。

为避免弯曲损耗给微环带来的影响,选取微环半径为 $100\ \mu\text{m}$,弯曲损耗可以忽略不计。微环的自由光谱范围(FSR)为 $112\ \text{GHz}$,品质因子设为 112000 ,耦合系数设置为 0.0188 ,锗材料在不同波长下的克尔系数可参考文献[70]。选择泵浦波长为 $3.5\ \mu\text{m}$,输入泵浦光的时域与频域光谱如图 10(a)所示。在色散和非线性调制的共同作用下,随机抖动波形首先演化为振荡孤子,然后逐渐收敛为稳定的耗散腔孤子。通过 LLE 模型^[34] 仿真得到,在功率低至 $80\ \text{mW}$ 泵浦下,实现了带宽为 $2.7\sim 5\ \mu\text{m}$ 的稳定耗散腔孤子光频梳,带宽跨度接近一个倍频程,输出光频梳的时域与频域图谱如图 10(b)所示,

这得益于锗材料较高的克尔非线性系数,可以降低输入泵浦光功率阈值。为了研究不同泵浦波长对产生克尔光频梳的影响,也仿真了泵浦波长为 $4\ \mu\text{m}$ 的光频梳进行对比。由于锗的非线性随着波长的增大而降低,为了保持归一化光功率一致^[74],将波长为 $4\ \mu\text{m}$ 的泵浦光功率增大至 $112\ \text{mW}$,输入泵浦光的时域与频域光谱如图 11(a)所示。仿真得到的输出光频梳带宽为 $3.49\sim 4.67\ \mu\text{m}$,远小于 $3.5\ \mu\text{m}$ 波长泵浦下得到的结果,如图 11(b)所示。与 $3.5\ \mu\text{m}$ 波长泵浦条件相比较, $4\ \mu\text{m}$ 波长泵浦条件下波导的色散值较高,更加偏离零色散点,产生的光频梳带宽较窄。色散曲线平坦且靠近零色散点的波导条件更有利于四波混频的相位匹配,增强四波混频效应,可以在更宽的范围内实现光频梳的产生。因此,近邻色散更容易产生宽谱光频梳,这对以后的设计仿真起到了指导性作用。

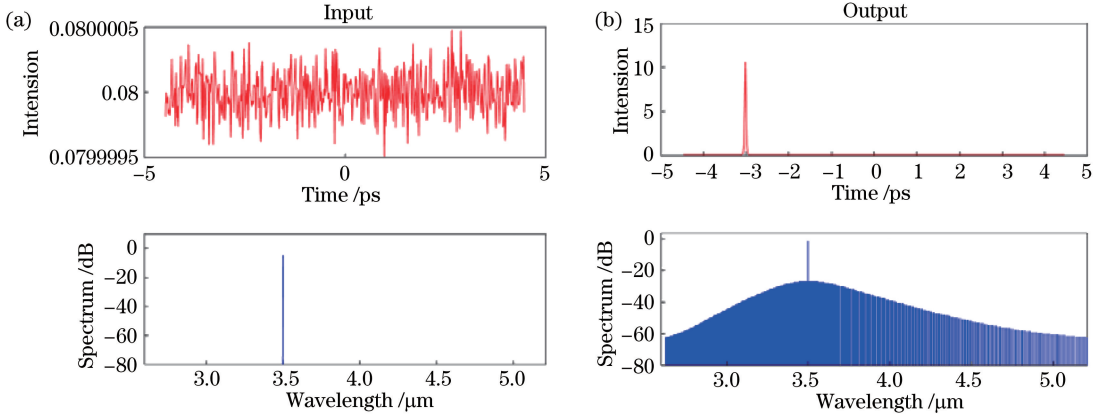


图 10 $3.5\ \mu\text{m}$ 波长泵浦下仿真结果图。(a)输入泵浦光($@3.5\ \mu\text{m}$, 泵浦功率为 $80\ \text{mW}$);(b)输出克尔光频梳
Fig. 10 Simulation results at $3.5\ \mu\text{m}$ wavelength pump. (a) Input the pump light($@3.5\ \mu\text{m}$, pump power is $80\ \text{mW}$); (b) output the Kerr optical frequency comb

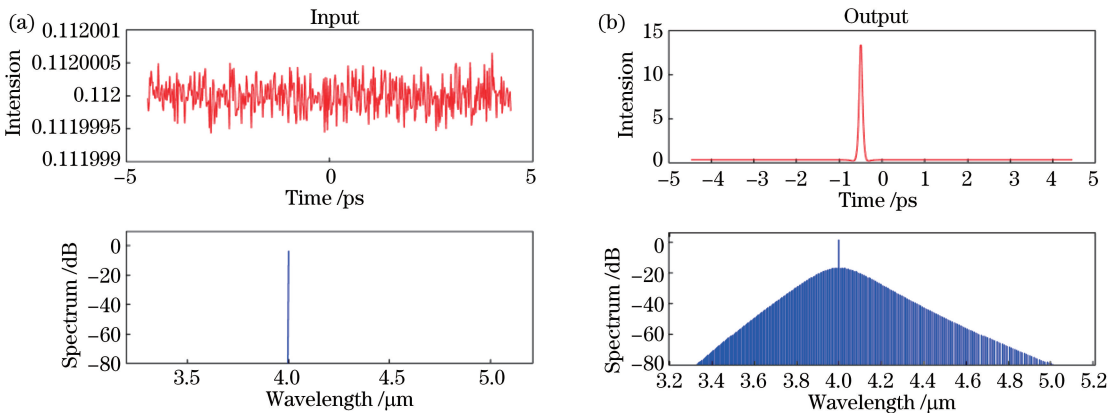


图 11 $4\ \mu\text{m}$ 波长泵浦下仿真结果图。(a)输入泵浦光($@4\ \mu\text{m}$, 泵浦功率为 $112\ \text{mW}$);(b)输出克尔光频梳
Fig. 11 Simulation results at $4\ \mu\text{m}$ wavelength pump. (a) Input the pump light($@4\ \mu\text{m}$, pump power is $112\ \text{mW}$); (b) output the Kerr optical frequency comb

综上所述,优化硅基锗条形波导的尺寸,实现了在 $3.4\sim 6.3\ \mu\text{m}$ 波长范围内的反常色散区,并且通过选择合适的泵浦波长,在泵浦功率低至 $80\ \text{mW}$ 的情况下实现了带宽接近一个倍频程的宽谱光频梳。与文献[70]中锗条形波导微环产生光频梳所需的 $1.2\ \text{W}$ 泵浦功率相比,实现了该光频梳所需的泵浦功率较低($80\ \text{mW}$),在实验测试过程中可以解决对高功率泵浦光源需求的难题。由于锗材料的非线性会随着波长的增大而降低,在选择泵浦光源时应该选择近零色散且波长较短的泵浦源,这样有利于降低泵浦功率,增大产生光频梳的带宽。同时,我们选用了制备工艺简单的硅基锗条形波导微环,避免使用了文献[67]提出的复杂的双层梯形悬空锗硅波导结构,仍然能够在低泵浦功率的条件下实现带宽接近一个倍频程的宽谱光频梳,对以后的设计起到了指导性作用。

5 结束语

本文着重介绍了中红外波段的微环谐振器的发展和应用。在中红外波段,传统的硅基光电子材料由于二氧化硅包层在长波长处的吸收损耗较大,从而导致光路传输损耗较大。因此,在追求高品质因子微环谐振器的过程当中,我们仍需探索新的材料体系和结构并改善现有的工艺,降低器件的表面粗糙度。由于 Vernier 微环谐振器扩大了整个器件的自由光谱范围,凭借其整体透射率的波长偏移远远高于单一微环的波长偏移,降低了检测的难度,可匹配不同分子吸收峰,进行传感实验,因此可考虑结合其他无源器件,扩展其他性能。基于微环谐振器的中红外克尔光学频率梳有望成为精密光谱探测的主力工具,目前大多数研究成果仍处于实验阶段。在理论仿真方面,通过设计波导结构对波导色散进行调控,以满足产生光频梳的反常色散要求,通过仿真分析得到,近零色散有利于增大光频梳的带宽,为以后的仿真设计提供了理论性指导。同时,在微环谐振器制备工艺中降低波导损耗,提高微环品质因子,也是实现中红外克尔光频梳的必要条件。硅基锗条形波导微环制备工艺简单,与 CMOS 工艺兼容,通过尺寸优化设计,本文在理论上证明了锗条形波导微环可以在泵浦功率低至 $80\ \text{mW}$ 的情况下实现带宽接近一个倍频程的宽谱光频梳。

本文基于中红外微环谐振器,描述了其基本原理和发展历程,从构成微环的不同材料体系出发,分析了其在工艺和实际应用上的优缺点;同时,论述了

基于 Vernier 效应的级联微环谐振器的基本原理,分别阐述了其中红外波长的滤波和传感领域的应用潜力;总结了中红外克尔光学频率梳的产生原理和发展历程,最后,对锗条形波导微环谐振器进行仿真,证明了其可以在泵浦功率低至 $80\ \text{mW}$ 的情况下实现带宽接近一个倍频程的宽谱光频梳,为后续实验提供了理论性指导。

参 考 文 献

- [1] Soref R. Mid-infrared photonics in silicon and germanium[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(8): 495-497.
- [2] Hu J, Meyer J R, Richardson K, et al. Feature issue introduction: mid-IR photonic materials[J]. *Optical Materials Express*, 2013, 3(9): 1571-1575.
- [3] Soref R A, Emelett S J, Buchwald W R. Silicon waveguided components for the long-wave infrared region[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2006, 8(10): 840-848.
- [4] Jalali B, Fathpour S. Silicon photonics[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(12): 4600-4615.
- [5] Soref R. The past, present, and future of silicon photonics[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2006, 12(6): 1678-1687.
- [6] Zheng X, Liu Y. Large-scale photonic integration technologies based on multi-project wafer flow sheet [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(5): 050001.
郑秀, 刘永. 基于多项目晶圆流片的规模化光子集成技术 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(5): 050001.
- [7] Soref R. Group IV photonics for the mid infrared[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8629: 862902.
- [8] Tittel F K, Richter D, Fried A. Mid-infrared laser applications in spectroscopy [J]. *Solid-State Mid-Infrared Laser Sources*, 2003: 458-529.
- [9] Willer U, Saraji M, Khorsandi A, et al. Near- and mid-infrared laser monitoring of industrial processes, environment and security applications[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2006, 44(7): 699-710.
- [10] Werle P, Slemr F, Maurer K, et al. Near- and mid-infrared laser-optical sensors for gas analysis [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2002, 37(2/3): 101-114.
- [11] Sieger M, Mizaikoff B. Toward on-chip mid-infrared sensors[J]. *Analytical Chemistry*, 2016, 88(11): 5562-5573.

- [12] Spott A, Liu Y, Baehr-Jones T, et al. Silicon waveguides and ring resonators at $5.5\ \mu\text{m}$ [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(21): 213501.
- [13] Wong C Y, Cheng Z Z, Chen X, et al. Characterization of mid-infrared silicon-on-sapphire microring resonators with thermal tuning[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, 4(4): 1095-1102.
- [14] Shankar R, Bulu I, Loncar M. Integrated high-quality factor silicon-on-sapphire ring resonators for the mid-infrared[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(5): 051108.
- [15] Griffith A G, Lau R K W, Cardenas J, et al. Silicon-chip mid-infrared frequency comb generation [J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 6299.
- [16] Miller S A, Yu M J, Ji X C, et al. Low-loss silicon platform for broadband mid-infrared photonics [J]. *Optica*, 2017, 4(7): 707-712.
- [17] Cheng Z Z, Chen X, Wong C Y, et al. Mid-infrared suspended membrane waveguide and ring resonator on silicon-on-insulator[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, 4(5): 1510-1519.
- [18] Xia Y, Qiu C Y, Zhang X Z, et al. Suspended Si ring resonator for mid-IR application[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(7): 1122-1124.
- [19] Zhang Z C, Ng G I, Hu T, et al. Mid-infrared sensor based on a suspended microracetrack resonator with lateral subwavelength-grating metamaterial cladding[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(2): 1-8.
- [20] Zhang Z C, Ng G I, Hu T, et al. Suspended microracetrack resonator with lateral sub-wavelength-grating metamaterial cladding for mid-infrared sensing applications [J]. *ITM Web of Conferences*, 2018, 17: 02005.
- [21] Kang J, Takagi S, Takenaka M. Design and characterization of Ge passive waveguide components on Ge-on-insulator wafer for mid-infrared photonics [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2018, 57(4): 042202.
- [22] Xiao T H, Zhao Z Q, Zhou W, et al. Mid-infrared high-Q germanium microring resonator [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(12): 2885-2888.
- [23] Ramírez J M, Vakarín V, Liu Q, et al. Ge-rich graded-index $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ racetrack resonators for long-wave infrared photonics [J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 1092: 109261U.
- [24] Lin H T, Li L, Zou Y, et al. Demonstration of high-Q mid-infrared chalcogenide glass-on-silicon resonators[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(9): 1470-1472.
- [25] Radosavljevic S, Beneitez N T, Katumba A, et al. Mid-infrared Vernier racetrack resonator tunable filter implemented on a germanium on SOI waveguide platform [J]. *Optical Materials Express*, 2018, 8(4): 824-835.
- [26] Notte M L, Passaro V M N. Ultra high sensitivity chemical photonic sensing by Mach-Zehnder interferometer enhanced Vernier-effect [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2013, 176: 994-1007.
- [27] Dai D X. Highly sensitive digital optical sensor based on cascaded high-Q ring-resonators [J]. *Optics Express*, 2009, 17(26): 23817-23822.
- [28] Troia B, Penades J S, Khokhar A Z, et al. Germanium-on-silicon Vernier-effect photonic microcavities for the mid-infrared [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(3): 610-613.
- [29] Chana Y H, Ho C P, Dong B W, et al. Development of mid-IR ring resonators using vernier effect [C] // 2018 International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics (OMN). July 29-August 2, 2018, Lausanne, Switzerland. New York: IEEE Press, 2018: 1-2.
- [30] Raghunathan V, Shori R, Stafsudd O M, et al. Nonlinear absorption in silicon and the prospects of mid-infrared silicon Raman lasers[J]. *Physica Status Solidi (a)*, 2006, 203(5): R38-R40.
- [31] Liu M L, Wang L R, Sun Q B, et al. Influences of multiphoton absorption and free-carrier effects on frequency-comb generation in normal dispersion silicon microresonators [J]. *Photonics Research*, 2018, 6(4): 238-243.
- [32] Griffith A G, Yu M J, Okawachi Y, et al. Coherent mid-infrared frequency combs in silicon-microresonators in the presence of Raman effects[J]. *Optics Express*, 2016, 24(12): 13044-13050.
- [33] Fan W C, Wang L R, Zhang W F, et al. Low-threshold $4/5$ octave-spanning mid-infrared frequency comb in a LiNbO_3 microresonator [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(6): 1-7.
- [34] Guo Y, Wang J, Han Z, et al. Power-efficient generation of two-octave mid-IR frequency combs in a germanium microresonator [J]. *Nanophotonics*, 2018, 7(8): 1461-1467.
- [35] Fei Y, He Y M, Yang F H, et al. Effect of backreflection and normal mode loss on the transmission of waveguide ring resonator[J]. *Chinese*

- Journal of Lasers, 2018, 45(5): 0513001.
- 费瑶, 何玉铭, 杨富华, 等. 端面反射和超模损耗对波导环形谐振腔输出谱线的影响[J]. 中国激光, 2018, 45(5): 0513001.
- [36] Mu Z, Liu C J, Wu X S, et al. Feedback-coupled waveguide microring resonator based on slot structure [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(12): 1213001.
穆洲, 刘春娟, 吴小所, 等. 基于 slot 结构的反馈耦合波导微环谐振器[J]. 光学学报, 2019, 39(12): 1213001.
- [37] Hu J, Sun X, Agarwal A, et al. Design guidelines for optical resonator biochemical sensors [J]. 2009, 26(5): 1032-1041.
- [38] Miller S A, Griffith A G, Yu M J, et al. Low-loss air-clad suspended silicon platform for mid-infrared photonics [C] // 2016 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO). June 5-10, 2016, San Jose, CA, USA. New York: IEEE Press, 2016: 1-2.
- [39] Chen Y, Lin H T, Hu J J, et al. Heterogeneously integrated silicon photonics for the mid-infrared and spectroscopic sensing [J]. ACS Nano, 2014, 8(7): 6955-6961.
- [40] Hu J J. Ultra-sensitive chemical vapor detection using micro-cavity photothermal spectroscopy [J]. Optics Express, 2010, 18(21): 22174-22186.
- [41] Vigreux-Bercovici C, Bonhomme E, Pradel A, et al. Transmission measurement at 10.6 μm of $\text{Te}_2\text{As}_3\text{Se}_5$ rib waveguides on As_2S_3 substrate [J]. Applied Physics Letters, 2007, 90(1): 011110.
- [42] Xia X, Chen Q, Tsay C, et al. Low-loss chalcogenide waveguides on lithium niobate for the mid-infrared [J]. Optics Letters, 2010, 35(19): 3228-3230.
- [43] Haas J, Artmann P, Mizaikoff B. Mid-infrared GaAs/AlGaAs micro-ring resonators characterized via thermal tuning [J]. RSC Advances, 2019, 9(15): 8594-8599.
- [44] Boeck R, Shi W, Chrostowski L, et al. FSR-eliminated vernier racetrack resonators using grating-assisted couplers [J]. IEEE Photonics Journal, 2013, 5(5): 2202511.
- [45] Boeck R, Jaeger N A, Rouger N, et al. Series-coupled silicon racetrack resonators and the Vernier effect: theory and measurement [J]. Optics Express, 2010, 18(24): 25151-25157.
- [46] Hoste J W, Soetaert P, Bienstman P. Improving the detection limit of conformational analysis by utilizing a dual polarization Vernier cascade [J]. Optics Express, 2016, 24(1): 67-81.
- [47] Notte M L, Troia B, Muciaccia T, et al. Recent advances in gas and chemical detection by Vernier effect-based photonic sensors [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2014, 14(3): 4831-4855.
- [48] Ho C P, Zhao Z, Li Q, et al. Mid-infrared tunable Vernier filter on a germanium-on-insulator photonic platform [J]. Optics Letters, 2019, 44(11): 2779-2782.
- [49] Troia B, Khokhar A Z, Nedeljkovic M, et al. Design procedure and fabrication of reproducible silicon vernier devices for high-performance refractive index sensing [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2015, 15(6): 13548-13567.
- [50] Passaro V M N, de Tullio C, Troia B, et al. Recent advances in integrated photonic sensors [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2012, 12(11): 15558-15598.
- [51] Passaro V M N, Troia B, De Leonardis F. A generalized approach for design of photonic gas sensors based on Vernier-effect in mid-IR [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2012, 168: 402-420.
- [52] Troia B, Khokhar A Z, Nedeljkovic M, et al. Cascade-coupled racetrack resonators based on the Vernier effect in the mid-infrared [J]. Optics Express, 2014, 22(20): 23990-24003.
- [53] Schliesser A, Picqué N, Hänsch T W. Mid-infrared frequency combs [J]. Nature Photonics, 2012, 6(7): 440-449.
- [54] Leindecker N, Marandi A, Byer R L, et al. Broadband degenerate OPO for mid-infrared frequency comb generation [J]. Optics Express, 2011, 19(7): 6296-6302.
- [55] Vodopyanov K L, Sorokin E, Sorokina I T, et al. Mid-IR frequency comb source spanning 4.4-5.4 μm based on subharmonic GaAs optical parametric oscillator [J]. Optics Letters, 2011, 36(12): 2275-2277.
- [56] Leindecker N, Marandi A, Byer R L, et al. Octave-spanning ultrafast OPO with 2.6-6.1 μm instantaneous bandwidth pumped by femtosecond Tm-fiber laser [J]. Optics Express, 2012, 20(7): 7046-7053.
- [57] Adler F, Cossel K C, Thorpe M J, et al. Phase-stabilized, 1.5 W frequency comb at 2.8-4.8 μm [J]. Optics Letters, 2009, 34(9): 1330-1332.
- [58] Jin Y W, Cristescu S M, Harren F J M, et al. Two-crystal mid-infrared optical parametric oscillator for

- absorption and dispersion dual-comb spectroscopy [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(11): 3270-3273.
- [59] Keilmann F, Amarie S. Mid-infrared frequency comb spanning an octave based on an Er fiber laser and difference-frequency generation [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2012, 33(5): 479-484.
- [60] Cruz F C, Maser D L, Johnson T, et al. Mid-infrared optical frequency combs based on difference frequency generation for molecular spectroscopy[J]. *Optics Express*, 2015, 23(20): 26814-26824.
- [61] Ruehl A, Gambetta A, Hartl I, et al. Widely-tunable mid-infrared frequency comb source based on difference frequency generation [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(12): 2232-2234.
- [62] Hugi A, Villares G, Blaser S, et al. Mid-infrared frequency comb based on a quantum cascade laser[J]. *Nature*, 2012, 492(7428): 229-233.
- [63] Vasilyev S, Mirov M, Gapontsev V. Kerr-lens mode-locked femtosecond polycrystalline $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$ and $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ lasers[J]. *Optics Express*, 2014, 22(5): 5118-5123.
- [64] Sorokin E, Sorokina I T, Mandon J, et al. Sensitive multiplex spectroscopy in the molecular fingerprint 2.4 μm region with a $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ femtosecond laser [J]. *Optics Express*, 2007, 15(25): 16540-16545.
- [65] Luke K, Okawachi Y, Lamont M R E, et al. Broadband mid-infrared frequency comb generation in a Si_3N_4 microresonator[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(21): 4823-4826.
- [66] He M F, Chen K X, Hu Z F. Kerr optical frequency comb based on micro-ring resonator with thermal effect[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(9): 091901.
何明芳, 陈开鑫, 胡哲峰. 热效应作用下的微环克尔光频梳 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(9): 091901.
- [67] Wang C Y, Herr T, Del'Haye P, et al. Mid-infrared optical frequency combs at 2.5 μm based on crystalline microresonators[J]. *Nature Communications*, 2013, 4(1): 1345.
- [68] Yu M J, Okawachi Y, Griffith A G, et al. Mode-locked mid-infrared frequency combs in a silicon microresonator[J]. *Optica*, 2016, 3(8): 854-860.
- [69] Del'Haye P, Schliesser A, Arcizet O, et al. Optical frequency comb generation from a monolithic microresonator[J]. *Nature*, 2007, 450(7173): 1214-1217.
- [70] Zhang L, Agarwal A M, Kimerling L C, et al. Nonlinear Group IV photonics based on silicon and germanium: from near-infrared to mid-infrared [J]. *Nanophotonics*, 2014, 3: 247-268.
- [71] Chembo Y K, Menyuk C R. Spatiotemporal Lugiato-Lefever formalism for Kerr-comb generation in whispering-gallery-mode resonators [J]. *Physical Review A*, 2013, 87(5): 053852.
- [72] Kippenberg T J, Spillane S M, Vahala K J. Kerr-nonlinear optical parametric oscillation in an ultrahigh-Q toroid microcavity[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93(8): 083904.
- [73] Wang Y W, Zhang M M, Xia L, et al. Progress in dispersion control of micro-ring resonator-based optical frequency comb generation [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(6): 060001.
王元武, 张敏明, 夏历, 等. 基于微环谐振腔产生光频梳的色散控制的研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(6): 060001.
- [74] Coen S, Erkintalo M. Universal scaling laws of Kerr frequency combs[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(11): 1790-1792.