2020年度陈嘉庚科学奖专辑

陈嘉庚青年科学奖——信息技术科学奖获奖人

肖云峰

北京大学博雅特聘教授、长江特聘教授、美国光学学会会士，主要从事超高品质因子光学微腔研究。近年来，成果两次入选“中国高校十大科技进展”，四次入选“中国光学十大进展”。

相关成果名称：微腔光信息器件新原理与应用

光学微腔将光子长时间局域在很小空间体积内，极大地增强了光与物质相互作用，已经成为纳微光子信息科学研究的重要体系之一。相关的研究方向包括新型相干光源、芯片上光信息处理、超高灵敏传感和片上量子光学等。近年来，肖云峰与同事聚焦在超高品质因子微腔光子器件新原理与新应用两方面开展工作。主要研究内容包括：自主开发了片上微腔制备新技术，获得了具有超高品质因子的对称、非对称微芯圆环等新型回音壁模式光学微腔，为高性能芯片光子器件与应用奠定了基础；针对微腔光信息器件在光耦合等方面的重要挑战，提出了混沌辅助光子动量转换新原理，突破相位匹配的限制，实现了超高品质因子回音壁模式的超宽谱耦合；发挥微腔增强光与物质相互作用的优势，提出微腔模式加宽、劈裂和耗散型相互作用等新机理，实现了纳米尺度单颗粒检测和大气颗粒物粒径分布精确测量，为空气质量评估提供了新的参考。团队正在发展基于光学微腔的光频梳技术，其具有芯片集成、功耗低、精度高等优势，有望为时间标准、精细光谱、天文观测、生物成像和激光雷达等重大交叉领域提供新的片上光源。

超高品质因子片上微腔光子学研究进展

曹启韬¹, 唐水晶¹, 陈豪敬¹, 肖云峰^{1,2*}

1. 北京大学物理学院, 北京 100871;

2. 北京大学纳光电子前沿科学中心, 北京 100871

* 联系人, E-mail: yfxiao@pku.edu.cn

2020-03-28 收稿, 2020-05-19 修回, 2020-05-21 接受, 2020-05-22 网络版发表

国家杰出青年科学基金(11825402)资助

摘要 光学微腔能够同时在空间和时间维度上约束光场, 从而增强光与物质相互作用, 被广泛用于基础光物理和光子学应用研究. 其中, 回音壁光学微腔具有超高的品质因子和很小的模式体积, 是当前微腔研究的学术前沿. 随着光学材料微纳加工和半导体芯片制备工艺的发展, 超高品质因子回音壁光学微腔研究的重要趋势之一是片上集成化. 例如, 超高品质因子片上光学微腔已经在光子学芯片、集成光计算、片上光互联、光学精密测量等众多领域发挥着重要作用. 本文重点介绍了片上回音壁光学微腔在微型激光器、非线性光学、集成光子学回路和高灵敏光学传感等研究中的基本原理、发展历程和最新进展; 进一步展望了超高品质因子片上微腔光子学未来研究的发展方向.

关键词 回音壁模式, 微腔激光器, 非线性光学, 集成光子学回路, 高灵敏传感

光与物质相互作用是现代光信息器件与应用中的核心问题之一. 光学微腔在空间和时间维度上均具有光场局域特性, 能够提高光与物质相互作用强度并且具有丰富的光场调控手段, 是光信息科学研究中的重要物理平台^[1]. 根据不同的光场局域机制, 光学微腔通常分为法布里-珀罗腔、回音壁模式微腔、光子晶体腔和表面等离子激元腔等, 它们各自都有不同的特点和优势. 其中, 回音壁光学微腔具有超高的品质因子 Q , 能够长时间将光子局域在很小的区域内, 因此可以显著地增强光与物质的相互作用, 是当前重要的学术前沿^[2,3]. 近年来, 随着光学材料微纳加工和半导体芯片制备工艺的发展, 回音壁微腔也逐渐走向片上可集成化的发展道路, 同时也带来了更小的模式体积、更精细的结构控制以及更有效的模式调控等优势, 在片上集成光子学信息器件发展中扮演着至关重要的角色.

回音壁光学微腔的基本原理如图1(a)所示, 光波沿着微腔弯曲表面传播时, 由于满足全内反射条件而被局域在微腔内部, 就如同声波在北京天坛回音壁的墙面内传播(图1(b)), 故而得名. 另一方面, 当光波沿腔表面传播一周的光程满足波长整数倍时, 腔内光场在多光束干涉下相干相长从而产生显著的共振增强效应, 形成回音壁模式(光场空间分布如图1(c)所示). 关于回音壁谐振腔的研究已经有超过100年的历史, 1992年美国贝尔实验室学者首次在半导体制备得到微腔^[4], 自此片上微腔光子学相关的研究与应用蓬勃发展. 目前, 超高品质因子片上光学微腔研究涉及的腔体材料包括二氧化硅、硅基半导体、III-V族半导体、晶体材料、金刚石、类钙钛矿材料以及各种复合材料体系等; 常见的片上微腔结构包括微盘、微环、微环、楔形盘等, 品质因子普遍可以达到 10^6 . 迄今, 片上

引用格式: 曹启韬, 唐水晶, 陈豪敬, 等. 超高品质因子片上微腔光子学研究进展. 科学通报, 2020, 65: 3028–3042

Cao Q T, Tang S J, Chen H J, et al. Research advances of ultrahigh- Q on-chip microcavity photonics (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 3028–3042, doi: 10.1360/TB-2020-0333

图1 回音壁模式示意图. (a) 光线在圆形回音壁微腔中发生全内反射, 沿表面传播. (b) 北京天坛皇穹宇回音壁(照片来源于网络). (c) 典型的光学回音壁模式电场分布(顺时针传播)

Figure 1 Schematic illustration of whispering gallery mode (WGM). (a) Light ray propagates along the surface inside the cavity by total internal reflection. (b) Echo wall at Temple of Heaven in Beijing (image from internet). (c) Typical electric field distribution of optical WGM (clockwise)

回音壁微腔已成为基础光物理和光子学应用研究中的关键之一. 本文主要介绍超高品质因子片上光学微腔的相关研究进展, 其中包括微型激光器、微腔非线性光学与光频梳、集成光子学回路和高灵敏光学传感等.

1 微腔激光器

由于激光阈值反比于谐振腔的品质因子, 回音壁模式微腔在实现低阈值激光器研究方面备受关注. 回音壁微腔激光最早在增益介质体系中得到实验证明. 1961年, Garrett等人^[5]在Sm:CaF₂晶体增益回音壁腔中观察到受激辐射现象. 1984年, Tzeng等人^[6]首次在罗丹明染料掺杂的乙醇液滴中实现回音壁微腔激光. 液

滴通过液体表面张力形成球腔, 虽然品质因子较高, 但形成的微腔不稳定, 实用性较低. 因此, 人们致力于制备固态回音壁微腔, 通常采用发光材料直接制备, 或者对无源微腔进行掺杂以及表面覆盖处理. 近年来, 回音壁微腔激光器的研究主要聚焦于增益材料和微腔结构设计两个方面. 人们探索不同的激光增益材料以实现不同波长的激光器, 如图2(a)~(c)所示, 最终期望得到全波段的激光以满足各种应用需要^[12]. 另一方面, 通过微腔结构设计实现激光器的出射调控^[3], 例如通过腔形设计实现回音壁微腔激光的单向性出射^[10](图2(d)), 或者实现轨道角动量激光垂直出射^[11](图2(e))等. 特别地, 人们也借助超高品质因子片上回音壁微腔研究和探索

图2 片上回音壁微腔激光器. (a) 铒离子掺杂的微芯圆环腔激光器^[7]. (b) CdSe/ZnS量子点涂覆的微芯圆环腔激光器^[8]. 左边为激光器的扫描电子显微镜图片, 右边为受到泵浦的发光微腔的光学显微图像. (c) 室温超低阈值连续光泵浦的InAs/GaAs量子点微盘腔激光器^[9]. (d) 回音壁微腔激光器的单向性出射^[10]. (e) 回音壁微腔的轨道角动量激光^[11]

Figure 2 On-chip WGM microlasers. (a) Erbium-doped microtoroid laser^[7]. (b) CdSe/ZnS quantum-dots (QDs)-coated toroid microlaser^[8]. The left panel is the scanning electron micrograph (SEM) of the microlaser, and the right panel is the optical micrograph of the microlaser with light emission under the pump. (c) InAs/GaAs semiconductor QD microdisk laser with ultra-low threshold under the continuous-wave pump at room temperature^[9]. (d) Unidirectional emission of WGM microlaser^[10]. (e) Orbital angular momentum WGM microlaser^[11]

一些激射新机制,例如声子激光^[13]和激子激光^[14]等.本节主要介绍片上回音壁微腔激光.

早期的固态回音壁微腔主要通过二氧化硅熔融光纤制备而成,其品质因子可以达到 10^8 .为了实现芯片集成,人们通过现代半导体工艺成功制备了片上超高品质因子微盘腔、微芯圆环腔以及微环腔等.由于二氧化硅是间接带隙半导体材料,无法直接发光,因此主要通过增益掺杂以及表面涂覆增益层来产生激光.其中,稀土离子掺杂的回音壁微腔激光器具有稳定性高、阈值低和工艺简单等优势,得到广泛研究.2003年,加州理工学院Vahala研究组^[7]通过溶胶凝胶法在微腔表面涂覆铈离子掺杂的二氧化硅层,实现了可片上集成的掺铈激光器,在1550 nm波段的激光阈值约为34 μW (图2(a)).2005年,该小组又通过溶胶凝胶法在半导体衬底上首先制备出高质量的掺铈薄膜,然后再利用半导体工艺制备微芯圆环腔^[15].该方法不仅可以批量制备铈离子掺杂的微芯圆环腔,而且进一步将激光阈值降低到660 nW.后续人们将不同稀土金属离子(如铒离子^[16]、镱离子^[17]等)在二氧化硅微腔上进行掺杂,实现了不同波长的回音壁微腔激光.除了稀土离子掺杂和量子点植入法^[8],有机薄膜表面涂覆方法^[18]也能实现回音壁微腔激光器.例如,Vahala研究组^[8]将CdSe/ZnS量子点涂覆在微芯圆环腔的表面在560 nm波长附近实现了9.9 fJ的超低阈值激光出射(图2(b)).

具有增益的半导体材料是片上微型激光器研究的又一选择.如前所述,贝尔实验室^[4]首先制备出了10 μm 直径的InGaAs半导体微盘腔,实现了近红外波段的光致激光,其激光阈值仅为100 μW .1993年,他们又进一步实现了直径仅为2 μm 的InGaAs半导体微盘腔脉冲激光^[19].为了实现连续激光,人们发展了可以连续光泵浦和电致激光技术.2007年,Baets研究组^[20]利用InP微盘腔实现了电致连续激光,并将InP微盘腔激光器集成在绝缘硅衬底上以便于光互联.另一方面,室温连续光泵浦半导体激光器也在最近几年得到发展.例如,2016年,Lau研究组^[21]对含有InAs半导体量子点的微盘腔进行连续光泵浦,在室温下实现了激光出射,激光阈值约为200 μW .2019年,Zhang研究组^[9]实现了室温超低阈值连续光泵浦的片上半导体微腔激光器,其阈值仅为3 μW (图2(c)).另外,由于具有高吸收系数、高量子效率以及宽带可调谐的辐射波长等特征,近几年钙钛矿纳微激光器也是国内外的研究热点^[22,23].2014年,Zhang等人^[24]第一次在六边形纳米片内实现了780 nm

波长附近的激光出射,阈值为37 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$.2017年,宋清海研究组^[25]利用自上而下的光刻工艺实现了钙钛矿微盘激光器,其阈值仅为2.75 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$.

为了实现回音壁微腔激光的高效和功能性输出,微腔结构设计也吸引了越来越多的研究兴趣.对于圆形的回音壁微腔,其结构的旋转对称性使得激光主要沿微腔赤道平面向外辐射,并且在赤道平面内各个方向的激光输出强度基本相同,这无疑造成了很大的能量损失.虽然倏逝场耦合方式可以实现回音壁模式的高效耦合,但是这类方法不仅需要满足动量匹配条件,而且需要借助于高精度对准或者光刻工艺来保证耦合器件和微腔之间的纳米尺度间隙.为了克服这个问题,人们尝试了多种不同的方法进行微腔结构设计,获得方向性出射.20年前,Nöckel和Stone^[26]在圆形腔的基础上引入变形来调控回音壁模式的场分布,从而实现了远场方向性出射.之后,Stone研究组^[27]在实验中利用半导体微柱非对称腔实现了方向性激光出射,受到国内外研究学者的广泛关注.后续人们先后证明螺旋形腔、跑道形腔、四极形腔、蚌线形腔、脸形腔等可以实现回音壁模式的远场方向性出射,并在半导体微腔等不同材料体系中实现了片上回音壁微腔激光的单向性出射(图2(d))^[3,8,28].此外,在微腔边缘引入散射体打破旋转对称性,通过准直效应也可以实现回音壁模式的单向远场出射以及激光的定向发射^[29].除了实现回音壁微腔激光定向出射之外,人们也对回音壁微腔激光器的空间相干性^[30,31]以及激光光谱^[32,33]进行调控以满足不同的应用需求.例如,Cao研究组^[30]利用D型微腔降低半导体回音壁微腔的空间相干性,成功将其应用于全场成像;Khajavikhan研究组^[32]和Zhang研究组^[33]等通过引入宇称-时间反演对称性结构进行模式筛选,得到了单模回音壁微腔激光器.

2 微腔非线性光学及光频梳

基于多光子间相互作用的非线性光学效应是光场调控的重要手段.由经典电动力学理论可知,通常介质的电磁响应以简谐振荡形式的线性电偶极响应为主导,而高阶的非谐性响应十分微弱,因此材料的非线性极化率远远小于其线性极化率^[34].在传统的非线性光学研究中,通常采用高功率的脉冲光作为激发源,同时选用非线性极化率较大的材料作为介质.光学微腔由于具有显著的光场增强效应,能够在低功率连续光激发下产生明显的非线性光学效应,为光场调控提供了一

个优异的平台. 超高品质回音壁光学微腔体系中的非线性光学研究已经有30多年的历史, 可以大致分为以下3个阶段的研究历程.

第一阶段: 从20世纪80年代中期到90年代, Chang等研究组^[35-37]在实验上做了先驱性探索. 这一阶段的研究主要集中在非线性光学现象的产生和观测方面, 缺少系统性分析和定量表征. 在这期间, 实验上通常采用的是自由空间光直接照射高品质因子的液滴微腔, 并成功观测到了各种非线性光学效应. 虽然20世纪90年代中后期已经可以制备出片上半导体微环、微盘腔等, 但由于其品质较差, 难以用于非线性光学的实验研究.

第二阶段: 21世纪最初十几年期间, Vahala和Kippenberg等研究组在超高品质因子固态光学微腔和锥形光纤耦合系统中, 定量地研究了各种非线性光学效应, 揭示了丰富的物理特性, 并大幅降低了激发光强度, 提升了非线性过程的转换效率^[38]. 这主要得益于光学材料微纳加工和半导体芯片制备工艺的进一步发展、锥形光纤高效耦合器件的广泛应用等实验仪器和技术的提升. 在这期间, 研究人员已经能够成功制备某些片上

超高品质因子光学微腔并用于非线性光学中的实验研究, 例如在二氧化硅微芯圆环腔和氮化硅微环腔中实现了受激拉曼散射^[39]、受激布里渊散射^[40]、三次谐波^[41,42]、四波混频和光学频率梳^[43-45]等多种高效非线性效应(图3).

第三阶段: 最近10年来, 超高品质因子回音壁微腔非线性光学效应研究的主要趋势转变为发展高性能片上集成光子学器件, 并开展相关应用研究. 在这期间, 人们已经能够在诸多不同结构和材料中获得超高品质因子的片上光学微腔, 例如二氧化硅楔形微盘腔^[46,47] ($Q>10^8$)、氮化硅微环腔^[48] ($Q>10^7$)、III-V族半导体微环腔^[49] ($Q>10^6$)、铌酸锂微盘腔^[50] ($Q\sim 10^7$)、氮化铝微环腔^[51] ($Q>10^6$)等. 主要的非线性光学应用包括利用微腔受激布里渊散射或克尔光频梳产生低噪声相干微波信号源^[40,52]; 利用微腔受激散射拉曼散射实现纳米尺度单颗粒检测^[53,54]; 利用受激布里渊散射结合Sagnac效应精确测量地球自转^[55]; 利用普克尔效应等实现高速光调制器^[56]; 利用热光效应、二次合频、四波混频等效应实现光学隔离器^[57-59]. 此外, 单光子水平的非线

图3 片上回音壁微腔中典型的非线性光学效应. (a) 二氧化硅微芯圆环腔中拉曼激光光谱^[39]. 插图: 实验采用的微腔样品侧视图. (b) 二氧化硅微盘中产生受激布里渊散射的背向光谱图^[40]. (c) 氮化硅微环腔中三次谐波光谱^[42]. 插图: 产生三次谐波的微环成像俯视图. (d) 二氧化硅非对称微芯圆环腔中通过四波混频、三阶合频、对称破缺诱导的二阶合频等多种非线性效应共同作用产生的超宽谱微腔光梳^[45]. 插图: 光学显微镜观察到的多色光出射

Figure 3 Typical nonlinear optical effects in on-chip WGM microcavities. (a) Raman laser spectrum in a silica microtoroid^[39]. Inset: The sideview of the microcavity used in the experiment. (b) Back-spectrum of stimulated Brillouin scattering in a silica microdisk^[40]. (c) Optical spectra of third harmonic generation in a silicon nitride microring^[42]. Inset: Topview image of the microring with third harmonic light. (d) Ultra-broadband microcomb generation in a silica asymmetric microtoroid by combining multiple nonlinear effects including four-wave mixing, third-order sum frequency generation, symmetry-breaking induced second-order sum frequency generation^[45]. Inset: Multi-color light emission image observed by an optical microscope

性光学效应同样可以在光学微腔中显著增强,进一步应用于各种片上量子光学器件。例如,利用光学克尔非线性产生光子阻塞效应获得单光子源^[60,61],利用阈值之下光学参量振荡或自发参量下转换效应制备量子纠缠光源等^[62-64]。另一方面,在基础研究上也广泛而深入地探究了新物理新现象,包括光场自发对称性破缺^[65]、非厄米光学^[66]、光学诱导透明^[67]、光学同步^[68,69]、表面非线性光学^[70]等。

微腔光学频率梳是当前光学微腔中受关注最广泛、发展最迅速的重要非线性光学效应之一。光学频率梳(以下简称光梳)是由一系列频率间隔严格相等的窄线宽激光组成的宽谱相干光源,在频谱上呈梳子状,因此得名。光梳提供了一个连接光频段与射频段的桥梁,革命性地改变了精密测量的方式。作为世界上精度最高的频率标准,光梳已被广泛应用于时间标准、精密光谱、激光雷达和地外行星探寻等众多领域,在基础科学研究、产业应用和军事国防上都具有重要意义^[71]。2005年,德国马克斯·普朗克研究所的Hansch和美国国家标准技术研究所的Hall因在光频梳以及精密测量领域的贡献分享了诺贝尔物理学奖。传统的光频梳主要基于飞秒锁模激光器,其体积大、功耗高、造价昂贵,而且对工作环境非常敏感。

近年来,通过克尔非线性效应产生的新型片上微腔光学频率梳受到了广泛关注^[44]。相较于传统锁模光梳,微腔光梳大大降低了精密光梳光源对体积和功耗的需求。其主要原理为:回音壁微腔在一束单频连续光泵浦下,由真空扰动作为种子源,通过简并四波混频作用首先在泵浦光频率两侧产生一系列对称的边带^[72]。随后这些边带将会和泵浦光通过简并以及非简并四波混频级联作用在其他频率上产生光子,最终光谱拓宽形成光学频率梳。由于光学微腔带来的显著光场增强效应,微腔光梳的工作阈值可低至毫瓦量级。克尔效应引起的模式红移则能补偿大多数腔体材料具有的反常色散,拓宽光梳的光谱覆盖范围。此外,得益于其较小的腔长,微腔光梳具有极高的重复频率,可以覆盖GHz~THz的范围。然而,早期的微腔光梳由于缺乏有效的锁模机制,其梳齿间的相干性面临很大的挑战。2014年,Kippenberg研究组^[73]在微腔谐振模式的等效红失谐处激光泵浦,此时腔内的连续光处于克尔双稳态的不稳定分支,而由于局部的克尔相位调制作用,腔内光场的脉冲解将达到共振,实现非线性效应与色散以及增益与损耗的双重平衡,进而产生孤子锁模微腔

光梳。通过这种新型锁模机制产生的微腔孤子光梳梳齿间相位锁定,具有极高的相干性,并且具有十分光滑的光谱功率包络;其时域上表现为一个超短脉冲。由于其独特的物理机制和巨大的应用潜力,微腔孤子光梳吸引了研究人员极大的兴趣,在短短的几年间取得了迅猛的发展。在物理机制方面,开展了包括斯托克斯拉曼孤子^[74]、孤子类切伦科夫辐射^[75]、完美孤子晶体^[76]以及耗散呼吸孤子^[77]等研究,并且已在多种集成光学材料上实现了锁模孤子光梳的产生^[78]。

由于构成微腔光梳的核心器件仅包括激光器和光学微腔,微腔光梳具有完全在集成光电子平台上实现的潜力,从而大大提升其便携性。近几年,微腔光梳的片上集成化研究也取得了飞速发展。继2014年首次在微腔内实现孤子锁模后,2018年美国哥伦比亚大学的Lipson研究组^[79]利用超低损耗的氮化硅波导制造的微腔实现了超低功耗的集成微腔光梳,电泵浦功率仅98 mW,一节普通3 A电池就可满足其供电需求。2019年,由加州理工学院的Vahala研究组、瑞士联邦理工的Kippenberg研究组和加州圣芭芭拉分校的Bowers研究组组成的国际团队^[80]进一步实现了完全自发锁模的超鲁棒集成光梳。迄今,片上微腔光梳已经被迅速推广应用于光学原子钟、光学频率合成器、低噪声微波源等重要领域^[78](图4),同时在量子光源产生^[81]及量子密钥分配^[82]方面也取得了阶段性进展。在这些应用中,相比传统光梳,微腔光梳可以显著减小其体积,降低其能耗,实现无与伦比的便携性。微腔光梳的超高重复频率则有助于提高分子光谱检测、激光距离测量的采集速度,适应大容量通信和天文光谱校准对梳齿分辨率的要求,大大拓宽了传统精密测量光源的应用场景。

3 集成光子学回路

集成光子学回路是类比集成电路的一种包含多个光子学功能器件的片上集成结构,是片上光互联和宽带集成光计算的重要基础。其中,片上光学微腔是构成集成光子学回路中功能器件的关键之一,可应用于信号源、存储器、滤波器、隔离器、调制器、放大器、路由器等诸多器件^[83](图5(a))。以下简单举例说明光学微腔在集成光子回路器件中的若干功能。

具有超高品质因子的回音壁光学微腔由于具有很长的腔中光子寿命(超过百纳秒),因此是一个天然的光子存储器,并且可以通过外部调控来实现任意读取和写入操作^[86]。另一方面,通过光与其他物质的相互作用

图4 微腔光梳应用领域^[78]. 从顶端顺时针依次为: 超快距离测量(激光雷达)、光学原子钟、光子雷达、双光梳光谱学、光学相干层析成像、低噪声微波源、集成光学频率合成器、天文光谱仪校准、相干光通信

Figure 4 Application areas of microcombs^[78]. From top, clockwise: Ultrafast distance measurements (LIDAR), optical atomic clocks, photonic radar, dual-comb spectroscopy, optical coherence tomography, low-noise microwaves, optical frequency synthesizer, astronomical spectrometer calibration, and coherent communications

用, 可以把光子态有效地转移到其他具有更长寿命的物理态中进行存储。例如, 2015年Dong等人^[87]利用受激布里渊散射过程将光场能量储存于传播的声子中, 存储时间可以超过50 μs。

对于常规的微腔-波导耦合系统, 透射端在频域上腔模共振位置处通常表现为一个洛伦兹型吸收谷, 因此可以有效地过滤对应频率的光信号^[88]。2004年, Vahala研究组^[84]采用片上微芯圆环腔并搭建了分插-复用结构滤波器(图5(b)), 使得输入波导中的信号光仅有与腔模频率相同的成分得以耦合进入微腔从另一根波导中输出, 而其余频率的信号在输入波导中被过滤掉。此外, 为达到更好的信号输出, 还可以在系统中加入多个谐振腔形成级联微腔, 通过各个腔之间耦合, 可以使隔离度和带宽得到进一步提高。

隔离器和环形器等非互易传输器件在光子学回路中用于信号复用和消除串扰, 其核心原理为打破洛伦兹互易性以获得双向非对称的传输率^[89]。传统的方法是利用磁光效应和检偏器实现单向隔离功能, 不易于片上集成化, 而且施加的磁场区域一般较大, 会干扰其他光学器件的工作状态。对于全光非互易器件, 通常需要依靠光子间非线性相互作用以打破洛伦兹互易性。光学微腔可以显著增强非线性光学效应, 获得方向依赖的谐振模式频率或非线性匹配过程, 从而实现光隔离。目前, 已经实现的基于片上光学微腔的隔离器主要方案包括: (1) 硅谐振腔中的热光效应可以引起模式移动, 同时结合结构中的非对称耦合(图5(c)中, G₂和G₃处耦合距离不同), 因此在较高输入功率下正反传输的光会造成腔模共振频率产生差异而实现非对称的透过光

图 5 片上光学微腔在集成光子学回路中的应用. (a) 单片铌酸锂光子学回路^[83], 其中利用铌酸锂微环腔作为光梳光源产生、光学滤波和电光调制等多种功能器件. (b) 插播-复用结构的二氧化硅微芯圆环腔耦合系统获得光学滤波器^[84]. 1端口为输入端, 4端口为输出端. (c) 利用硅微环腔中的热光效应结合非对称性耦合结构(G_2 和 G_3 处耦合距离不同实现光学隔离器)^[59]. (d) 氮化铝微环腔中利用二阶非线性和频过程产生非线性强耦合和非互易光传输^[58]. (e) 利用铌酸锂跑道腔和微环腔中的普克尔效应实现片上电光调制器^[56]. (f) 非对称光学微腔和纳米波导结构实现超宽带的能量耦合^[85]

Figure 5 Applications of on-chip microcavities in photonic integrated circuits. (a) Monolithic lithium niobate photonic circuits^[83], where lithium niobate microring cavities are used for multifunctional devices, including the generation of microcombs light source, optical filtering, electrooptical modulation. (b) Silica microtoroid with add-drop coupling structure for optical filter^[84]. Port 1 is input, and port 4 is output. (c) Optical isolator by using optothermal effect and asymmetric coupling in silicon microrings (the coupling gaps at G_2 and G_3 are different)^[59]. (d) Nonlinear strong coupling and nonreciprocal light propagation by second-order sum frequency generation effect in an aluminium nitride microring^[58]. (e) On-chip electro-optic modulators by Pockel effect in lithium niobate race-track and microring cavities^[56]. (f) Ultra-broadband coupling in the asymmetric microcavity-nanowaveguide system^[85]

强度^[59]. (2) 利用二次谐波、四波混频等依赖动量匹配的非线性过程, 使得信号光只有与泵浦光方向匹配时才能发生对应的非线性效应(图5(d)), 因此获得方向依赖的非线性信号和谱线, 实现光隔离^[57,58]. (3) 受激布里渊散射等光力相互作用同样需要满足动量匹配条件, 使得在泵浦光方向固定的情况下只有特定方向的信号光才能发生散射相互作用, 从而产生方向依赖的诱导透明和非互易传输^[85,90-92]. (4) 光学克尔效应可以使腔中光场发生自发对称性破缺从而产生相向传输强度不相等的手征光场^[65,93], 因此选择性抑制了反向传输的光场强度以实现光隔离等^[94]. 除此之外, 研究人员在片上光学微腔系统中还提出并证明了采用宇称-时间反演对称系统^[95,96]、旋转微腔中的Sagnac效应^[97]、方向依赖的光场横向角动量与原子自旋耦合的系统^[98]等方案来实现片上光场非互易传输.

光调制器也是集成光通讯和信号处理中的关键器件之一, 通常需要在外部调控下产生强度周期振荡的信号. 光调制器一个重要指标为功耗, 通过光学微腔可

以进一步获得低功耗、高效率、小型化的片上电光调制器. 2005年, Lipson研究组^[99]首次采用硅环谐振腔结构实现片上电光调制器, 其原理为存在p-n结的硅环在外电场的作用下会注入电子空穴对导致微腔折射率改变, 使得原本共振模式的透射强度也随之变化. 近年来, 随着片上晶体薄膜制备工艺的逐渐成熟, 基于普克尔效应的晶体材料微腔, 如铌酸锂、氮化铝等, 也广泛地用于片上电光调制器的研究和发展^[56,100](图5(e)), 目前已可以实现半波调制效率为 1.8 V cm , 调制速率达到 40 Gbps . 除此之外, 基于光学微腔的耗散型电光调制器也成功获得^[101], 其主要原理为将少层石墨烯材料转移至微环腔区域, 通过外部电场改变石墨烯费米能级从而调控其吸收. 当微环腔-石墨烯复合系统的内部损耗发生变化时, 直接影响了其模式共振处的耦合效率, 从而实现了透射光强的电光调制. 但需要说明的是, 具有高品质因子的光学微腔在显著降低调制功耗的同时, 伴随着长时间腔内光子寿命会限制调制带宽的进一步提升, 因此同时兼具高效率和高带宽的片上光学调制

器的发展仍然是目前存在的重要挑战。

除了上述各种独立器件的功能相关研究之外,集成光子学回路中还存在一个重要的问题是不同光子学元件之间的能量交换和信息传递的带宽限制。以基本的微腔-波导耦合模型为例,两者之间能量交换的过程通常需要满足动量匹配条件,即光在波导和微腔传输时的动量一致^[102]。然而,由于波导与微腔的材料和几何性质影响,动量匹配条件仅在较窄光谱范围内满足,严重制约了微腔宽带光子学应用。2017年,北京大学肖云峰研究组^[85]提出采用非对称光学微腔(图5(f)),利用其中的混沌辅助光子动量快速转换机制,实现了超高品质因子微腔和纳米尺度波导的超宽带耦合,突破了微纳光学器件近场耦合需要相位匹配的限制。此外,Tang研究组^[58]和Lipson研究组^[79]等还采用弯曲波导的耦合结构拓宽微腔-波导的耦合带宽。

4 超高灵敏光学传感

超高品质因子回音壁微腔极大地增强了光与物质相互作用,在光学传感中显示出巨大的优势,具体表现为极高的传感灵敏度和极低的探测极限。近年来,基于回音壁微腔的光学传感技术发展迅速,人们不仅展示了它们具有磁场和温度等物理量传感能力,也相继证明了它们具有纳米尺度单颗粒甚至单分子的传感能力^[103-105]。本文从生物传感、磁场探测和光学陀螺仪3

个代表性应用角度分别介绍回音壁微腔传感的基本原理和发展情况。

回音壁模式光场能量不仅分布在高折射率微腔内部,微腔表面附近也存在较强的倏逝场分布。这部分倏逝场可以感知外界环境的变化,例如待测颗粒吸附到微腔表面引起的有效折射率改变,具体表现为回音壁光学模式的展宽、劈裂和共振波长的移动。回音壁模式微腔中的光场拥有很长的光子寿命,可以与表面吸附的待测物质发生多次相互作用,极大地增强传感信号。另外,除了超高的传感灵敏度,回音壁微腔具有片上微流集成、对样品消耗量小等优势,使之成为生物传感的优异平台。2002年,Vollmer等人^[106]第一次利用回音壁微球腔通过模式移动实现了水溶液中的蛋白质分子检测,自此之后微腔传感研究领域迅速发展。

纳米尺度颗粒的检测在环境监测、医学早期诊断、易爆物品探测以及半导体制造工艺流程控制等方面具有十分重要的意义。近年来,人们通过检测聚苯乙烯标准小球、金纳米球以及灭活病毒等颗粒证明了回音壁微腔的单颗粒传感能力。例如,2008年,哈佛大学Vollmer等人^[107]在实验上利用回音壁微腔的模式移动机制实现了聚苯乙烯颗粒和病毒的探测(图6(a))。2010年,华盛顿大学Yang研究组^[108]提出了模式分裂机制,不仅实现了30 nm半径的聚苯乙烯小球颗粒的检测,而且证明了颗粒尺寸信息提取方法(图6(b))。2013年,北京

图6 基于回音壁微腔的单纳米颗粒检测。当待测纳米颗粒沾附到微腔上,会引起模式移动(a)^[107]、模式分裂(b)^[108],以及模式展宽(c)^[109]。
Figure 6 Single nanoparticle detection with the WGM sensor. When a nanoparticle approaches to the WGM cavity, the mode variation can represent as mode shift (a)^[107], mode splitting (b)^[108], or mode broadening (c)^[109].

大学肖云峰研究组^[109]提出了模式展宽机制,通过监测模式线宽变化实现了70 nm半径的聚苯乙烯和病毒(Lentiviruses)的单颗粒检测,进一步降低了单颗粒检测的探测极限(图6(c)).以上3种机制主要是基于待测物极化率实部的变化.2016年,北京大学肖云峰研究组^[110]提出了耗散型传感机制,通过利用待测物吸收损耗导致的模式线宽变化进行单个金纳米棒的检测.耗散型传感机制适用于探测吸收较大的金属颗粒或者碳纳米管等.

受限于探测极限,模式移动、劈裂以及展宽等回音壁微腔基本传感机制很难实现单个生物小分子的检测.为此,人们提出了微腔-局域表面等离子共振增强、锁模技术等提高灵敏度的微腔传感新方法.2013年,Arnold研究组^[111]通过将回音壁微腔和局域表面等离子共振相结合,在实验上成功检测到质量低至1和0.11 ag的甲状腺球蛋白和牛血清蛋白单分子.之后,Vollmer研究组^[112]利用微腔-金纳米棒结构相继实现DNA、RNA、蛋白质分子以及单原子离子的检测.除了结合局域表面等离子共振场增强机制,2016年Su等人^[113]利用锁模技术监测回音壁模式共振模长移动,此方法可以分辨小于10 am的模式移动,成功实现了质量仅为15.5 kDa的人体白细胞介素-2单分子的检测.

基于微腔的物理量传感方面,微腔磁力仪以及陀螺仪是目前发展的几个重要研究方向,它具有灵敏度高、易于片上集成、体积小以及常温工作等优势,近年来吸引了国内外越来越多学者的研究兴趣.微腔磁力仪是腔光力学的一种应用形式,其基本原理是磁致伸缩材料在交变磁场下通过伸缩应力作用激发微腔机械振动模式,引起周期性的微腔形变,从而对回音壁模式的共振波长进行调制.由于机械模式和光学模式的双共振效应,回音壁微腔光学磁力仪具有极高的灵敏度.2012年,Forstner等人^[114]第一次提出并证明了回音壁微腔磁力仪.他们将铽镓铁黏合于微芯圆环腔顶部,测量微腔光学模式共振波长受磁场的调制频率和强度,最终在MHz频段实现了最高为400 nT/Hz^{1/2}的磁场传感灵敏度.之后,该研究组^[115]通过将铽镓铁放置于微腔内部,从而增强磁致伸缩材料与微腔机械模式的耦合强度,将MHz频段的磁场探测灵敏度提高了500倍,同时提出通过磁致伸缩的非线性效应实现灵敏度为150 nT/Hz^{1/2}的2 Hz~1 kHz低频段磁场探测.2018年,Li等人^[116]利用相位压缩光进行探测,降低微腔磁力仪中的激光散粒噪声.

对于微腔陀螺仪,其基本原理为回音壁微腔发生

旋转时,原本简并的一对顺时针和逆时针行波模式的共振波长发生相反方向的变化^[117],即Sagnac效应.2006年起,Sunada和Harayama^[118]理论研究了回音壁微腔中的Sagnac效应,预测了通过顺时针和逆时针传播的回音壁模式频率之差实现角速度传感.2015年,Cao研究组^[119]提出并理论分析了变形微腔由于Sagnac效应引起的远场辐射分布非对称性与角速度的线性关系,具有极高的角速度传感灵敏度.同时,该研究组^[120]在旋转微腔中利用Sagnac效应获得手征辐射光场,且其手征程度可以在非对称腔中显著放大,进一步利用其手征性实现角速度传感.2017年,Sunada^[121]和Khajavi-khan研究组^[122]理论分析得到Sagnac效应引起的模式频率分裂机制工作在奇异点附近时,其传感灵敏度可以提高两个量级以上.2019年以来,Vahala研究组^[55,123]利用微腔布里渊激光结合Sagnac效应,在光学奇异点附近实现了具有极高灵敏度的可集成光学微腔陀螺仪.这种微腔陀螺仪相比传统的光纤陀螺仪,在片上集成和小型化方面具有极大优势.

5 总结与展望

过去几年,超高品质因子回音壁光学微腔在集成光子学信息器件发展中发挥着关键作用.本文重点介绍了超高品质因子片上微腔光子学在微型激光器、微腔非线性光学与光频梳、集成光子学回路和高灵敏光学传感等方面的研究进展.目前研究现状为:(1)能够在多种不同增益材料的片上光学微腔中产生超低阈值激射,并且进一步实现了回音壁微腔激光的各种高效功能输出;(2)在不同材料和结构的微腔系统中产生高效、丰富的非线性光学效应,以微腔光学频率梳为代表的各种微腔非线性效应已被广泛地用于发展高性能的片上集成光子学器件;(3)作为集成光子学回路中的关键之一,片上光学微腔已成功实现了多种不同功能的高性能器件,包括信号源、存储器、滤波器、隔离器、调制器等,并且可以实现器件之间的超宽带能量耦合;(4)基于回音壁微腔的光学传感器不仅成功用于磁场、温度、应力、质量、角速度等各种不同物理量的传感,而且实现了单个纳米颗粒甚至单个生物分子的超高灵敏度探测.

尽管片上微腔光子学在诸多领域都取得了丰硕的研究成果,但在一些方面还存在着挑战和机遇,例如微腔孤子光梳的产生效率较低、覆盖波段较窄;基于回音壁微腔的光学隔离器工作带宽较窄,最高只能达到

GHz水平;微腔电光调制器的研究中始终存在调制高带宽和低功耗不兼容的问题;微腔生物传感在探测目标特异性识别方面还存在很大挑战.因此,进一步结合新原理、新机制以及新材料,在优化现有的微腔器件性能以及探索微腔应用新领域方面均具有重要意义.

譬如,将之前研究中的单体、线性、对称等平凡相互作用进一步丰富和延拓到复杂系统中的非平凡相互作用,如耦合微腔等复合结构系统、包含多种非线性相互作用的复杂光场调控、具有光学混沌行为的非对称光学微腔以及非厄米光物理和拓扑光子学等.

参考文献

- Vahala K J. Optical microcavities. *Nature*, 2003, 424: 839–846
- Ward J, Benson O. WGM microresonators: Sensing, lasing and fundamental optics with microspheres. *Laser Photon Rev*, 2011, 5: 553–570
- Cao H, Wiersig J. Dielectric microcavities: Model systems for wave chaos and non-Hermitian physics. *Rev Mod Phys*, 2015, 87: 61–111
- McCall S L, Levi A F J, Slusher R E, et al. Whispering-gallery mode microdisk lasers. *Appl Phys Lett*, 1992, 60: 289–291
- Garrett C G B, Kaiser W, Bond W L. Stimulated emission into optical whispering modes of spheres. *Phys Rev*, 1961, 124: 1807–1809
- Tzeng H M, Wall K F, Long M B, et al. Laser emission from individual droplets at wavelengths corresponding to morphology-dependent resonances. *Opt Lett*, 1984, 9: 499–501
- Yang L, Armani D K, Vahala K J. Fiber-coupled erbium microlasers on a chip. *Appl Phys Lett*, 2003, 83: 825–826
- Min B, Kim S, Okamoto K, et al. Ultralow threshold on-chip microcavity nanocrystal quantum dot lasers. *Appl Phys Lett*, 2006, 89: 191124
- Zhou T, Tang M, Xiang G, et al. Ultra-low threshold InAs/GaAs quantum dot microdisk lasers on planar on-axis Si (001) substrates. *Optica*, 2019, 6: 430–435
- Jiang X F, Zou C L, Wang L, et al. Whispering-gallery microcavities with unidirectional laser emission. *Laser Photon Rev*, 2016, 10: 40–61
- Miao P, Zhang Z, Sun J, et al. Orbital angular momentum microlaser. *Science*, 2016, 353: 464–467
- He L, Özdemir Ş K, Yang L. Whispering gallery microcavity lasers. *Laser Photon Rev*, 2013, 7: 60–82
- Zhang J, Peng B, Özdemir Ş K, et al. A phonon laser operating at an exceptional point. *Nat Photonics*, 2018, 12: 479–484
- Ye Y, Wong Z J, Lu X, et al. Monolayer excitonic laser. *Nat Photonics*, 2015, 9: 733–737
- Yang L, Carmon T, Min B, et al. Erbium-doped and Raman microlasers on a silicon chip fabricated by the sol-gel process. *Appl Phys Lett*, 2005, 86: 091114
- Wu J, Jiang S, Qua T, et al. 2 μm lasing from highly thulium doped tellurite glass microsphere. *Appl Phys Lett*, 2005, 87: 211118
- Ostby E P, Yang L, Vahala K J. Ultralow-threshold $\text{Yb}^{3+}:\text{SiO}_2$ glass laser fabricated by the solgel process. *Opt Lett*, 2007, 32: 2650–2652
- Tulek A, Vardeny Z V. Unidirectional laser emission from π -conjugated polymer microcavities with broken symmetry. *Appl Phys Lett*, 2007, 90: 161106
- Slusher R E, Levi A F J, Mohideen U, et al. Threshold characteristics of semiconductor microdisk lasers. *Appl Phys Lett*, 1993, 63: 1310–1312
- Van Campenhout J, Rojo Romeo P, Regreny P, et al. Electrically pumped InP-based microdisk lasers integrated with a nanophotonic silicon-on-insulator waveguide circuit. *Opt Express*, 2007, 15: 6744–6749
- Wan Y, Li Q, Liu A Y, et al. Temperature characteristics of epitaxially grown InAs quantum dot micro-disk lasers on silicon for on-chip light sources. *Appl Phys Lett*, 2016, 109: 011104
- Wang K, Wang S, Xiao S, et al. Recent advances in perovskite micro- and nanolasers. *Adv Opt Mater*, 2018, 6: 1800278
- Zhang Q, Su R, Du W, et al. Advances in small perovskite-based lasers. *Small Methods*, 2017, 1: 1700163
- Zhang Q, Ha S T, Liu X, et al. Room-temperature near-infrared high- Q perovskite whispering-gallery planar nanolasers. *Nano Lett*, 2014, 14: 5995–6001
- Zhang N, Sun W, Rodrigues S P, et al. Highly reproducible organometallic halide perovskite microdevices based on top-down lithography. *Adv Mater*, 2017, 29: 1606205
- Nöckel J U, Stone A D. Ray and wave chaos in asymmetric resonant optical cavities. *Nature*, 1997, 385: 45–47
- Gmachl C. High-power directional emission from microlasers with chaotic resonators. *Science*, 1998, 280: 1556–1564
- Sui S S, Huang Y Z, Tang M Y, et al. Locally deformed-ring hybrid microlasers exhibiting stable unidirectional emission from a Si waveguide. *Opt Lett*, 2016, 41: 3928
- Wang Q J, Yan C, Yu N, et al. Whispering-gallery mode resonators for highly unidirectional laser action. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2010, 107: 22407–22412
- Redding B, Cerjan A, Huang X, et al. Low spatial coherence electrically pumped semiconductor laser for speckle-free full-field imaging. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2015, 112: 1304–1309
- Bittner S, Guazzotti S, Zeng Y, et al. Suppressing spatiotemporal lasing instabilities with wave-chaotic microcavities. *Science*, 2018, 361: 1225–

1231

- 32 Hodaie H, Miri M A, Heinrich M, et al. Parity-time-symmetric microring lasers. *Science*, 2014, 346: 975–978
- 33 Feng L, Wong Z J, Ma R M, et al. Single-mode laser by parity-time symmetry breaking. *Science*, 2014, 346: 972–975
- 34 Boyd R W. *Nonlinear Optics*. 3rd ed. Amsterdam, Boston: Academic Press, 2008
- 35 Acker W P, Leach D H, Chang R K. Third-order optical sum-frequency generation in micrometer-sized liquid droplets. *Opt Lett*, 1989, 14: 402–404
- 36 Snow J B, Qian S X, Chang R K. Stimulated Raman scattering from individual water and ethanol droplets at morphology-dependent resonances. *Opt Lett*, 1985, 10: 37–39
- 37 Braginsky V B, Gorodetsky M L, Ilchenko V S. Quality-factor and nonlinear properties of optical whispering-gallery modes. *Phys Lett A*, 1989, 137: 393–397
- 38 Li Y, Jiang X, Zhao G, et al. Whispering gallery mode microresonator for nonlinear optics. 2018, arxiv: 1809.04878
- 39 Kippenberg T J, Spillane S M, Armani D K, et al. Ultralow-threshold microcavity Raman laser on a microelectronic chip. *Opt Lett*, 2004, 29: 1224–1226
- 40 Li J, Lee H, Vahala K J. Microwave synthesizer using an on-chip Brillouin oscillator. *Nat Commun*, 2013, 4: 2097
- 41 Carmon T, Vahala K J. Visible continuous emission from a silica microphotonic device by third-harmonic generation. *Nat Phys*, 2007, 3: 430–435
- 42 Levy J S, Foster M A, Gaeta A L, et al. Harmonic generation in silicon nitride ring resonators. *Opt Express*, 2011, 19: 11415–11421
- 43 Del’Haye P, Schliesser A, Arcizet O, et al. Optical frequency comb generation from a monolithic microresonator. *Nature*, 2007, 450: 1214–1217
- 44 Kippenberg T J, Holzwarth R, Diddams S A. Microresonator-based optical frequency combs. *Science*, 2011, 332: 555–559
- 45 Chen H J, Ji Q X, Wang H, et al. Chaos-assisted two-octave-spanning microcombs. *Nat Commun*, 2020, 11: 2336
- 46 Lee H, Chen T, Li J, et al. Chemically etched ultrahigh- Q wedge-resonator on a silicon chip. *Nat Photonics*, 2012, 6: 369–373
- 47 Yang K Y, Oh D Y, Lee S H, et al. Bridging ultrahigh- Q devices and photonic circuits. *Nat Photonics*, 2018, 12: 297–302
- 48 Ji X, Barbosa F A S, Roberts S P, et al. Ultra-low-loss on-chip resonators with sub-milliwatt parametric oscillation threshold. *Optica*, 2017, 4: 619–624
- 49 Chang L, Xie W, Shu H, et al. Ultra-efficient frequency comb generation in AlGaAs-on-insulator microresonators. *Nat Commun*, 2020, 11: 1331
- 50 Lin J, Yao N, Hao Z, et al. Broadband quasi-phase-matched harmonic generation in an on-chip monocrystalline lithium niobate microdisk resonator. *Phys Rev Lett*, 2019, 122: 173903
- 51 Liu X, Sun C, Xiong B, et al. Aluminum nitride-on-sapphire platform for integrated high- Q microresonators. *Opt Express*, 2017, 25: 587–594
- 52 Merklein M, Stiller B, Kabakova I V, et al. Widely tunable, low phase noise microwave source based on a photonic chip. *Opt Lett*, 2016, 41: 4633–4636
- 53 Özdemir Ş K, Zhu J, Yang X, et al. Highly sensitive detection of nanoparticles with a self-referenced and self-heterodyned whispering-gallery Raman microlaser. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2014, 111: E3836–E3844
- 54 Li B B, Clements W R, Yu X C, et al. Single nanoparticle detection using split-mode microcavity Raman lasers. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2014, 111: 14657–14662
- 55 Lai Y H, Suh M G, Lu Y K, et al. Earth rotation measured by a chip-scale ring laser gyroscope. *Nat Photonics*, 2020, 14: 345–349
- 56 Wang C, Zhang M, Stern B, et al. Nanophotonic lithium niobate electro-optic modulators. *Opt Express*, 2018, 26: 1547–1555
- 57 Hua S, Wen J, Jiang X, et al. Demonstration of a chip-based optical isolator with parametric amplification. *Nat Commun*, 2016, 7: 13657
- 58 Guo X, Zou C L, Jung H, et al. On-chip strong coupling and efficient frequency conversion between telecom and visible optical modes. *Phys Rev Lett*, 2016, 117: 123902
- 59 Fan L, Wang J, Varghese L T, et al. An all-silicon passive optical diode. *Science*, 2012, 335: 447–450
- 60 Fortsch M, Furst J U, Wittmann C, et al. A versatile source of single photons for quantum information processing. *Nat Commun*, 2013, 4: 1–5
- 61 Huang R, Miranowicz A, Liao J Q, et al. Nonreciprocal photon blockade. *Phys Rev Lett*, 2018, 121: 153601
- 62 Kues M, Reimer C, Roztocky P, et al. On-chip generation of high-dimensional entangled quantum states and their coherent control. *Nature*, 2017, 546: 622–626
- 63 Furst J U, Strekalov D V, Elser D, et al. Quantum light from a whispering-gallery-mode disk resonator. *Phys Rev Lett*, 2011, 106: 113901
- 64 Strekalov D V, Marquardt C, Matsko A B, et al. Nonlinear and quantum optics with whispering gallery resonators. *J Opt*, 2016, 18: 123002
- 65 Cao Q T, Wang H, Dong C H, et al. Experimental demonstration of spontaneous chirality in a nonlinear microresonator. *Phys Rev Lett*, 2017, 118: 033901
- 66 Zhang F, Feng Y, Chen X, et al. Synthetic anti-PT symmetry in a single microcavity. *Phys Rev Lett*, 2020, 124: 053901
- 67 Zheng Y, Yang J, Shen Z, et al. Optically induced transparency in a micro-cavity. *Light Sci Appl*, 2016, 5: e16072
- 68 Jang J K, Klenner A, Ji X, et al. Synchronization of coupled optical microresonators. *Nat Photonics*, 2018, 12: 688–693
- 69 Xu D, Han Z, Lu Y, et al. Synchronization and temporal nonreciprocity of optical microresonators via spontaneous symmetry breaking. *Adv*

- Photon, 2019, 1: 046002
- 70 Zhang X, Cao Q T, Wang Z, et al. Symmetry-breaking-induced nonlinear optics at a microcavity surface. *Nat Photonics*, 2019, 13: 21–24
 - 71 Diddams S A. The evolving optical frequency comb. *J Opt Soc Am B*, 2010, 27: B51
 - 72 Kovach A, Chen D, He J, et al. Emerging material systems for integrated optical Kerr frequency combs. *Adv Opt Photonics*, 2020, 12: 135
 - 73 Herr T, Brasch V, Jost J D, et al. Temporal solitons in optical microresonators. *Nat Photonics*, 2014, 8: 145–152
 - 74 Yang Q F, Yi X, Yang K Y, et al. Stokes solitons in optical microcavities. *Nat Phys*, 2017, 13: 53–57
 - 75 Brasch V, Geiselmann M, Herr T, et al. Photonic chip-based optical frequency comb using soliton Cherenkov radiation. *Science*, 2016, 351: 357–360
 - 76 Karpov M, Pfeiffer M H P, Guo H, et al. Dynamics of soliton crystals in optical microresonators. *Nat Phys*, 2019, 15: 1071–1077
 - 77 Lucas E, Karpov M, Guo H, et al. Breathing dissipative solitons in optical microresonators. *Nat Commun*, 2017, 8: 736
 - 78 Kippenberg T J, Gaeta A L, Lipson M, et al. Dissipative Kerr solitons in optical microresonators. *Science*, 2018, 361: 129–162
 - 79 Stern B, Ji X, Okawachi Y, et al. Battery-operated integrated frequency comb generator. *Nature*, 2018, 562: 401–405
 - 80 Shen B, Chang L, Liu J, et al. Integrated turnkey soliton microcombs operated at CMOS frequencies. 2019, arxiv: 1911.02636
 - 81 Kues M, Reimer C, Lukens J M, et al. Quantum optical microcombs. *Nat Photonics*, 2019, 13: 170–179
 - 82 Wang F, Wang W, Niu R, et al. Quantum key distribution with on-chip dissipative Kerr soliton. *Laser Photon Rev*, 2020, 14: 1900190
 - 83 Wang C, Zhang M, Yu M, et al. Monolithic lithium niobate photonic circuits for Kerr frequency comb generation and modulation. *Nat Commun*, 2019, 10: 978
 - 84 Rokhsari H, Vahala K J. Ultralow loss, high Q , Four port resonant couplers for quantum optics and photonics. *Phys Rev Lett*, 2004, 92: 253905
 - 85 Jiang X, Shao L, Zhang S X, et al. Chaos-assisted broadband momentum transformation in optical microresonators. *Science*, 2017, 358: 344–347
 - 86 Zhang M, Wang C, Hu Y, et al. Electronically programmable photonic molecule. *Nat Photonics*, 2019, 13: 36–40
 - 87 Dong C H, Shen Z, Zou C L, et al. Brillouin-scattering-induced transparency and non-reciprocal light storage. *Nat Commun*, 2015, 6: 6193
 - 88 Little B E, Chu S T, Haus H A, et al. Microring resonator channel dropping filters. *J Lightwave Technol*, 1997, 15: 998–1005
 - 89 Jalas D, Petrov A, Eich M, et al. What is — and what is not — an optical isolator. *Nat Photonics*, 2013, 7: 579–582
 - 90 Shen Z, Zhang Y L, Chen Y, et al. Experimental realization of optomechanically induced non-reciprocity. *Nat Photonics*, 2016, 10: 657–661
 - 91 Kim J H, Kuzyk M C, Han K, et al. Non-reciprocal Brillouin scattering induced transparency. *Nat Phys*, 2015, 11: 275–280
 - 92 Sohn D B, Kim S, Bahl G. Time-reversal symmetry breaking with acoustic pumping of nanophotonic circuits. *Nat Photonics*, 2018, 12: 91–97
 - 93 Del Bino L, Silver J M, Stebbings S L, et al. Symmetry breaking of counter-propagating light in a nonlinear resonator. *Sci Rep*, 2017, 7: 43142
 - 94 Del Bino L, Silver J M, Woodley M T M, et al. Microresonator isolators and circulators based on the intrinsic nonreciprocity of the Kerr effect. *Optica*, 2018, 5: 279–282
 - 95 Chang L, Jiang X, Hua S, et al. Parity-time symmetry and variable optical isolation in active-passive-coupled microresonators. *Nat Photonics*, 2014, 8: 524–529
 - 96 Peng B, Özdemir Ş K, Lei F, et al. Parity-time-symmetric whispering-gallery microcavities. *Nat Phys*, 2014, 10: 394–398
 - 97 Maayani S, Dahan R, Kligerman Y, et al. Flying couplers above spinning resonators generate irreversible refraction. *Nature*, 2018, 558: 569–572
 - 98 Lodahl P, Mahmoodian S, Stobbe S, et al. Chiral quantum optics. *Nature*, 2017, 541: 473–480
 - 99 Xu Q, Schmidt B, Pradhan S, et al. Micrometre-scale silicon electro-optic modulator. *Nature*, 2005, 435: 325–327
 - 100 Xiong C, Pernice W H P, Sun X, et al. Aluminum nitride as a new material for chip-scale optomechanics and nonlinear optics. *New J Phys*, 2012, 14: 095014
 - 101 Phare C T, Daniel Lee Y H, Cardenas J, et al. Graphene electro-optic modulator with 30 GHz bandwidth. *Nat Photonics*, 2015, 9: 511–514
 - 102 Knight J C, Cheung G, Jacques F, et al. Phase-matched excitation of whispering-gallery-mode resonances by a fiber taper. *Opt Lett*, 1997, 22: 1129–1131
 - 103 Vollmer F, Yang L. Review Label-free detection with high- Q microcavities: A review of biosensing mechanisms for integrated devices. *Nanophotonics*, 2012, 1: 267–291
 - 104 Zhi Y, Yu X C, Gong Q, et al. Single nanoparticle detection using optical microcavities. *Adv Mater*, 2017, 29: 1604920
 - 105 Tang S J, Li B B, Xiao Y F. Optical sensing with whispering-gallery microcavities. *Physics*, 2019, 48: 137–147
 - 106 Vollmer F, Braun D, Libchaber A, et al. Protein detection by optical shift of a resonant microcavity. *Appl Phys Lett*, 2002, 80: 4057–4059
 - 107 Vollmer F, Arnold S, Keng D. Single virus detection from the reactive shift of a whispering-gallery mode. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2008, 105: 20701–20704
 - 108 Zhu J, Ozdemir S K, Xiao Y F, et al. On-chip single nanoparticle detection and sizing by mode splitting in an ultrahigh- Q microresonator. *Nat Photonics*, 2010, 4: 46–49
 - 109 Shao L, Jiang X F, Yu X C, et al. Detection of single nanoparticles and lentiviruses using microcavity resonance broadening. *Adv Mater*, 2013, 25: 5616–5620

- 110 Shen B Q, Yu X C, Zhi Y, et al. Detection of single nanoparticles using the dissipative interaction in a high- Q microcavity. *Phys Rev Appl*, 2016, 5: 024011
- 111 Dantham V R, Holler S, Barbre C, et al. Label-free detection of single protein using a nanoplasmonic-photonic hybrid microcavity. *Nano Lett*, 2013, 13: 3347–3351
- 112 Baaske M D, Foreman M R, Vollmer F. Single-molecule nucleic acid interactions monitored on a label-free microcavity biosensor platform. *Nat Nanotechnol*, 2014, 9: 933–939
- 113 Su J, Goldberg A F, Stoltz B M. Label-free detection of single nanoparticles and biological molecules using microtoroid optical resonators. *Light Sci Appl*, 2016, 5: e16001
- 114 Forstner S, Prams S, Knittel J, et al. Cavity optomechanical magnetometer. *Phys Rev Lett*, 2012, 108: 120801
- 115 Forstner S, Sheridan E, Knittel J, et al. Ultrasensitive optomechanical magnetometry. *Adv Mater*, 2014, 26: 6348–6353
- 116 Li B B, Bilek J, Hoff U B, et al. Quantum enhanced optomechanical magnetometry. *Optica*, 2018, 5: 850–856
- 117 Li J, Suh M G, Vahala K. Microresonator Brillouin gyroscope. *Optica*, 2017, 4: 346–348
- 118 Sunada S, Harayama T. Sagnac effect in resonant microcavities. *Phys Rev A*, 2006, 74: 021801
- 119 Ge L, Sarma R, Cao H. Rotation-induced evolution of far-field emission patterns of deformed microdisk cavities. *Optica*, 2015, 2: 323–328
- 120 Sarma R, Ge L, Wiersig J, et al. Rotating optical microcavities with broken chiral symmetry. *Phys Rev Lett*, 2015, 114: 053903
- 121 Sunada S. Large Sagnac frequency splitting in a ring resonator operating at an exceptional point. *Phys Rev A*, 2017, 96: 033842
- 122 Ren J, Hodaei H, Harari G, et al. Ultrasensitive micro-scale parity-time-symmetric ring laser gyroscope. *Opt Lett*, 2017, 42: 1556–1559
- 123 Lai Y H, Lu Y K, Suh M G, et al. Observation of the exceptional-point-enhanced Sagnac effect. *Nature*, 2019, 576: 65–69

Summary for “超高品质因子片上微腔光子学研究进展”

Research advances of ultrahigh- Q on-chip microcavity photonics

Qi-Tao Cao¹, Shui-Jing Tang¹, Hao-Jing Chen¹ & Yun-Feng Xiao^{1,2*}

¹ School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China;

² Frontiers Science Center for Nano-optoelectronics, Peking University, Beijing 100871, China

* Corresponding author, E-mail: yfxiao@pku.edu.cn

Optical microcavities can trap light within both spatial and temporal dimensions, giving rise to an enhancement of light-matter interaction, which are employed extensively for fundamental studies of optical physics and photonic applications. In particular, because of its ultrahigh- Q factors and small mode volumes, optical whispering-gallery-mode (WGM) microcavities, confining light by total internal reflection, act as the frontier of the state-of-art microcavity studies. As the recent significant development of the micro-/nano-fabrication technology for semiconductor chips and optical materials, on-chip integration becomes one of the most important trends for WGM microcavities. For example, on-chip optical microcavities have been playing a pivotal role in diverse fields, including photonic chip, broadband integrated optical computing, on-chip optical interconnects, microcomb-based precise measurement, etc. In this review, we introduce the research advances of microlasers, nonlinear optics, photonic integrated circuits, and ultrasensitive optical sensing in ultrahigh- Q on-chip microcavities.

The specific progresses are organized as follows: (1) Ultralow-threshold lasing in on-chip WGM microcavity can be achieved by either introducing active materials to the resonator or using intrinsic nonlinearities of the resonator material. Moreover, diverse functional microlasers are also realized, such as unidirectional emission, chaotic laser, symmetry-broken laser, orbit angular momentum laser, parity-time reversal symmetry laser, etc. (2) Numerous optical nonlinear effects with high efficiency have been experimentally generated in WGM microcavities, including second harmonic generation, four-wave mixing, stimulated Brillouin scattering, stimulated Raman scattering. Furthermore, high-performance and multifunctional photonic applications have been developed based on microcavity-engineered nonlinear optics. In particular, optical frequency combs based on Kerr nonlinear effects in WGM microcavities, are applied extensively for integrated precision measurement applications like ultrafast LiDAR, optical clocks, and astronomical spectrum calibration. (3) As one of the most important elements in photonic integrated circuit, the optical microcavity has been widely used in the realization of photonic functional devices, such as signal sources, storage, filter, isolator, and modulator. Moreover, it also has been applied to broadband coupling between individual photonic devices. (4) WGM microcavity sensing attracts much attention due to ultra-high sensitivity and label-free nature. The last decade has witnessed the tremendous progress of on-chip microcavity sensing, and the sensing ability has been widely exploited for detecting single nanoparticles, biological molecules, magnetic fields, angular velocity, temperature, etc.

Finally, we provide an outlook on the future developments of on-chip ultrahigh- Q microcavity photonics. While numerous progresses have been achieved in ultrahigh- Q on-chip microcavities, a few challenges and obstacles still exist in practical applications. For example, the optical soliton microcombs suffer from the low conversion efficiency and limited wavelength bandwidth; the bandwidth of the optical isolator by the optical microcavities is narrow; the electro-optic modulator based on microcavities cannot combine the broad modulation bandwidth and low power consumption; it is highly challenging for the specific identification in microcavity biosensing. In order to further push forward the development of on-chip microcavity photonics, new principles, new mechanisms, and new materials are required to be explored. The considerable solution may focus on the non-trivial interaction in complex systems, such as hybrid microcavity structures, regulation of optical field by multiple nonlinear optical effects, optical wave chaos in asymmetric microcavities, non-Hermitian physics, and topological photonics.

whispering gallery mode, microcavity laser, nonlinear optics, photonic integrated circuits, ultra-sensitive sensing

doi: [10.1360/TB-2020-0333](https://doi.org/10.1360/TB-2020-0333)