

光学微腔的应用和发展前景

张莹 陈梅雄 李莹颖 袁杰

国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073

摘要 随着激光技术的不断发展,高 Q 值光学微腔受到广泛关注,其应用领域不仅局限于传统光学,在量子信息和集成量子芯片方面更是有广阔的应用前景。简要分析了两种不同类型光学微腔(回音壁模式光学微腔和光子晶体缺陷腔)的原理、发展历程以及相对于传统光学谐振腔的优势。同时数值模拟出了不同结构光学微腔的模式分布。基于其特殊优势,介绍回音壁模式光学微腔在激光技术、生物探测以及量子物理领域的重要应用,并且预测光子晶体微腔将在集成光学、微电子技术等领域具有巨大的发展前景。

关键词 集成光学;微腔;光子晶体;模式

中图分类号 TN814; TN815 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP52.040002

Application and Development Prospects of Optical Micro-resonators

Zhang Ying Chen Meixiong Li Yingying Yuan Jie

*College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology,
Changsha, Hunan 410073, China*

Abstract With the continuous development of laser technology, optical micro-resonator with high Q -value attracts more and more attentions. Apart from broad applications in traditional optics, it also has a considerable prospect in quantum information and quantum integrated chips. Two kinds of micro-resonators are introduced, which are whispering gallery mode and photonic crystal optical micro-resonators. Their principle, history and advantages compared with traditional optical cavity are analyzed in detail. Meanwhile, the mode distribution of different structures of optical micro-resonators are simulated. Based on the unique advantages, the applications of whispering gallery mode optical micro-resonators are introduced in the area of laser, biological detection and quantum physics. And the considerable prospect of photonic crystal optical micro-resonators is predicted in the area of integrated optics and microelectronic technology.

Key words integrated optics; micro-resonator; photonic crystals; mode

OCIS codes 230.5750; 230.5298; 230.7400

1 引言

近年来,随着微纳加工技术和半导体工艺的逐渐成熟,光学微腔得到了快速发展。基于品质因子高、谱宽窄、有效模体积小、振荡阈值低等一系列突出优势,光学微腔在低阈值激光器、腔量子电动力学(QED)、生物探测、高性能滤波器等领域得到了广泛应用。

1.1 低阈值激光器

产生激光振荡,必须满足谐振腔内反转粒子数大于阈值反转粒子数。腔内最初的光场是自发辐射场,当达到阈值条件时,才开始发生受激辐射。而光学微腔相对于传统谐振腔,由于光子与腔内原子发生量子相互作用,使得原子的自发辐射概率大大增强^[1],明显降低了微腔的振荡阈值。2013年, Takahashi等^[2]通过光子晶体线缺陷腔成功制备低阈值拉曼硅基激光器。其输出功率与抽运功率关系曲线如图1所示。从图1可以看出,当抽运功率达到几微瓦,就产生了拉曼激光输出。

收稿日期: 2014-09-03; 收到修改稿日期: 2014-11-19; 网络出版日期: 2015-03-26

作者简介: 张莹(1989—),女,博士研究生,主要从事光电检测方面的研究。E-mail: fengnanjin@126.com

导师简介: 袁杰(1977—),男,博士,教授,主要从事光电检测方面的研究。E-mail: yj200820082008@126.com

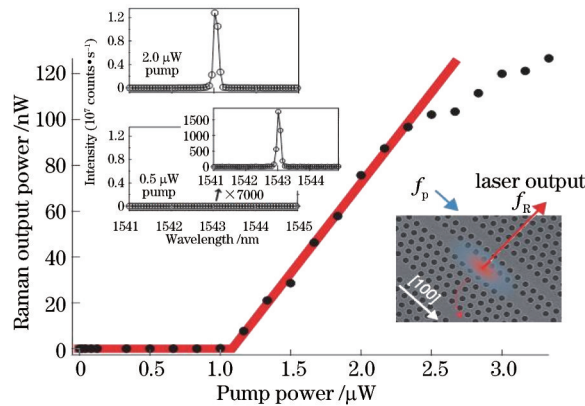


图1 拉曼激光器输出功率随抽运功率的变化

Fig.1 Output power of Raman laser versus pump power

1.2 腔量子电动力学

自1916年爱因斯坦首次提出自发辐射概念后,很长一段时间内,人们都认为自发辐射是原子的固有性质,不可改变。实际上,自发辐射是原子与真空电磁量子涨落的相互作用过程。当原子处于尺度在波长量级的微腔中,由于腔内真空的量子起伏受到腔体边界条件的制约,原子的自发辐射特性发生改变。腔量子电动力学就是要研究微腔中原子与光场的量子相互作用过程^[3],对量子光学的发展具有十分重要的意义。

当原子体系与腔内电磁场相互作用处于弱耦合状态下时^[4-5],谐振腔内的自发辐射会产生增强^[4,6]或抑制^[7]等效应。当两者处于强耦合状态下时,此时系统处在非经典的状态下,在这种状态下出现了单原子激光^[8]、光子阻塞^[9]、真空 Rabi 劈裂^[10]以及 Rabi 振荡^[11]等一系列量子现象。基于这些现象,新型灵敏光电子器件、纠缠操控以及可控单光子源都得到了快速发展。

1.3 生物探测

生物探测是指利用光学手段对生物小分子进行探测,在医疗、环境监测、国防军事等方面具有重要作用。光学微腔作为一种高 Q 值的微米级谐振腔,是理想的生物探测传感元件。当生物分子[如细菌、脱氧核糖核酸(DNA)、蛋白质等]附着在微腔表面,会导致微腔的输出频谱发生明显频移。这种探测手段具有极高的灵敏度。2003年,Vollmer等^[12]成功利用双微球腔探测DNA分子,标志着微腔在生物传感领域的突破。如图2所示,当DNA分子附着在微腔表面时,微腔共振波长向长波方向发生明显推移,根据频移量来对微腔表面DNA分子的浓度进行探测,探测精度高于 10 pg/mm^2 。

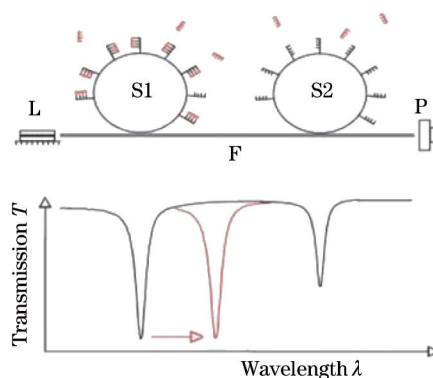


图2 双微球腔探测DNA分子结构和输出频谱图

Fig.2 Detection of molecular structure of DNA by dual microsphere cavity and output spectrum

2011年,随着等离激元的增强,Dantham等^[13]成功利用回音壁模式(WGM)微腔实现核糖核酸(RNA)病毒分子的检测。WGM微腔还可应用于粒子的位置精确探测。2009年,Arnold等利用旋转微球腔成功探测到纳米颗粒,如图3所示。2012年,北京大学物理学院金伟良教授等^[14]利用高品质因子的光学微腔实现了低浓度纳米粒子的高稳定性检测。

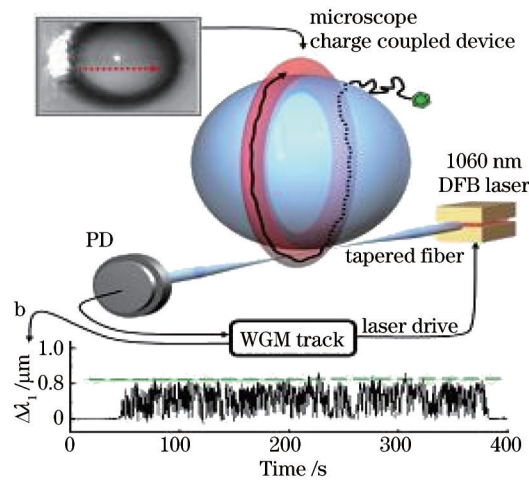


图3 旋转微球腔探测纳米颗粒结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of rotary microsphere particles nano-cavity probe

1.4 动态滤波器

近几十年来,由于波分复用(WDM)系统具有大的传输带宽,在光纤远距离通信系统中得到广泛应用^[15]。增大信号带宽和波长范围在一定程度上可以增强信息传输能力,而动态滤波器具有动态的带宽和中心频率,拥有很强的灵活性,在光通信领域发挥着重要作用^[16]。近年来,一种基于光学微腔的新型滤波器和转换器引起了各国科学家的广泛关注^[17]。光学微腔凭借其结构优势,易与波导等其他光学器件互连。如图4所示回音壁模式微盘腔与双波导耦合结构。作为被动滤波器,这种结构可以实现信号通道增加和减少的功能,具有高度的波长选择性^[17-19]。此外,其他结构的光学微腔在动态滤波器中也得到了广泛应用^[20-26]。

1999年,Cai等^[27]利用微球腔与光纤耦合制备出四端口上行下载滤波器,基本结构如图5所示。这种滤波器损耗低,适用于远距离光通信。

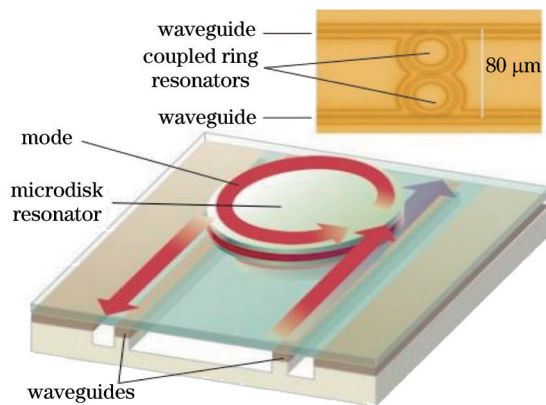


图4 回音壁模式光学微腔动态滤波器工作原理图

Fig.4 Operating principle of whispering gallery mode optical microcavities dynamic filter

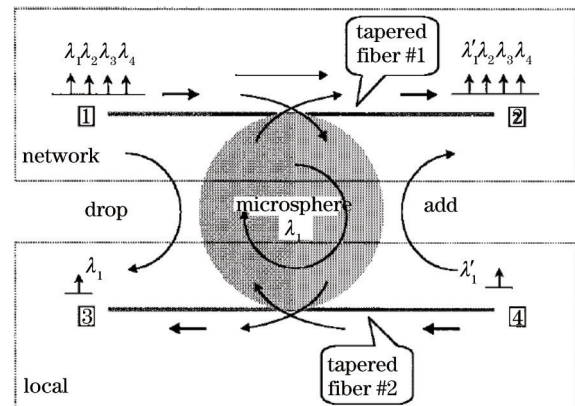


图5 四端口上行下载滤波器结构示意图

Fig.5 Structure diagram of four-port uplink download filter

2 回音壁模式光学微腔

光学微腔是一种尺寸在微米量级或亚微米量级的光学谐振腔,利用在折射率不连续的介质界面上的反射、全反射、或者衍射等效效应,将光限制在一个很小的空间区域。

2.1 回音壁模式的光学微腔

基于回音壁模式的光学微腔成为了近来研究的热点^[28]。声波可以低损耗地在弯曲光滑的墙面反射而传播很远的距离,这样的声波模式被称为回音壁模式(WGM)。同样,当光从光密介质入射到光疏介质且入射角大于临界角时,会在两种介质的交界面上发生全反射,从而在弯曲的高低折射率介质交界面也存在光学

WGM,光可以通过全反射一直被局域在腔内而保持稳定的行波传输。

2.2 微腔的形状

法布里-珀罗(F-P)腔是应用最广的传统光学谐振腔之一,品质因子可以做到很高。但是目前来说,高 Q 值F-P腔对腔镜要求很高,需要先进的镀膜工艺,造价昂贵。其次,F-P腔对外界震动敏感,需要复杂的稳定装置。另外,目前F-P腔还不能做到纳米量级,这限制了其在集成光学方面的应用。然而,WGM微腔不仅继承了F-P腔的高 Q 值特性,还具有体积小、成本低、易制备的优点,应用前景十分广阔。随着纳米光学和材料学的发展及半导体工艺的进步,不同材料的WGM微腔陆续出现。腔的形状也多种多样,有微球腔^[29],微盘腔^[30],微环芯腔^[31]等,如图6所示^[28]。

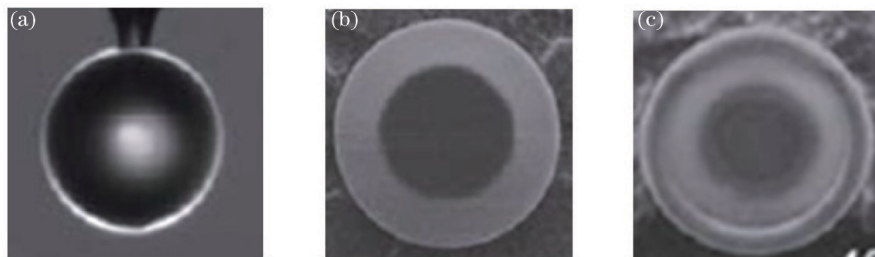


图6 微腔形状图。(a)微球腔;(b)微盘腔;(c)微环芯腔

Fig.6 Shape of optical micro-resonator. (a) Microsphere cavity; (b)microdisk cavity; (c)micro-ring cavity

2.3 腔内模式

微腔内的模式求解是基于经典的麦克斯韦方程组及其边界条件。对于几何形状对称的规则腔体,可以数学推演出腔模的解析解。对于一般形状的微腔,一般不存在解析解,需要通过软件进行数值计算。计算微腔模式的软件有很多,如Comsol, Rsoft, FDTD等。图7(a)所示为半径为10 nm、折射率为3.4的硅球腔赤道面的光线传播示意图,并且数值计算出其腔内模式分布,如图7(b)所示。

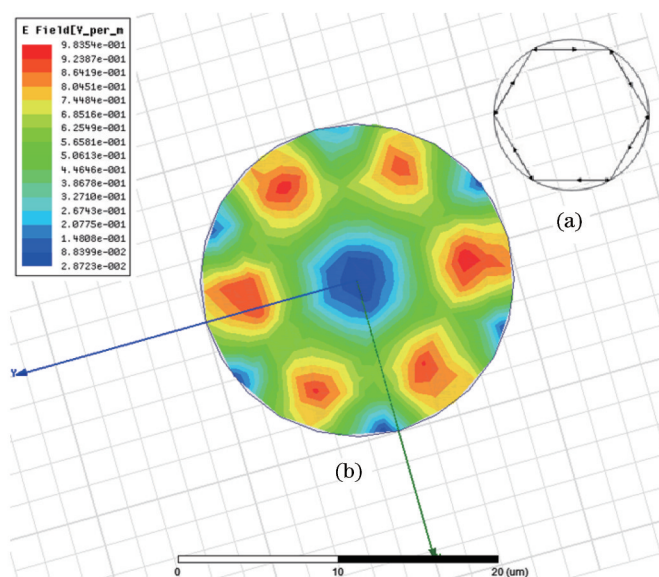


图7 (a)微球腔赤道面光线示意图;(b)模式分布

Fig.7 (a) Schematic of translating light at equatorial plane of microsphere cavity; (b)its mode distribution

3 光子晶体缺陷腔

光子晶体微腔作为最理想的光学微腔,是近年来国内外的研究热点。从微腔结构、工作原理、腔体制备及耦合方式、腔模数值仿真等方面,对光子晶体微腔展开深入的理论研究。

3.1 光子晶体简介

光子晶体是一类具有光子带隙特性的周期性人工电介质,其中周期方向的自由度称为光子晶体的维

数,图8所示分别为一维、二维、三维的光子晶体示意图^[32]。从结构上来说,光子晶体分为有限维光子晶体和无限维光子晶体。从应用上来说,光子晶体器件主要分为光子晶体微腔和光子晶体波导两大类^[33]。

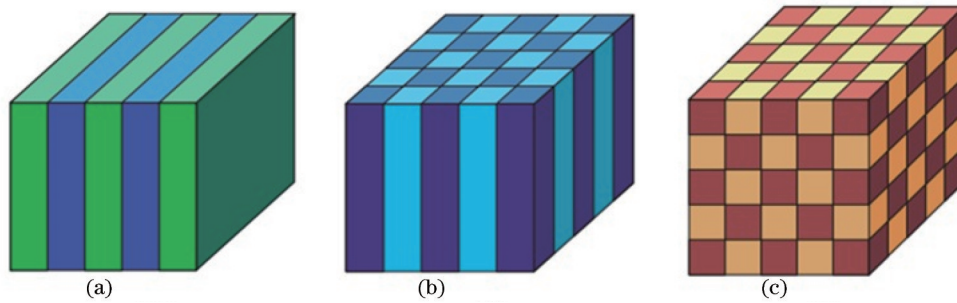


图8 不同维数的光子晶体。(a)一维;(b)二维;(c)三维

Fig.8 Photonic crystals with different dimensions. (a) One-dimension; (b) two-dimension; (c) three-dimension

3.2 光子晶体缺陷结构

禁带理论是光子晶体的基本物理特性和应用基础。根据现代物理观点,光子晶体出现电磁波带隙是由于单个周期单元内非均匀介质对电磁波的强散射与布拉格散射相互耦合^[33]。图9为光子晶体禁带示意图。频率处在禁带内的电磁波不能在晶体内部传播。禁带以外的频率范围则称为光子晶体的通带,即图中白色与灰色带隙。

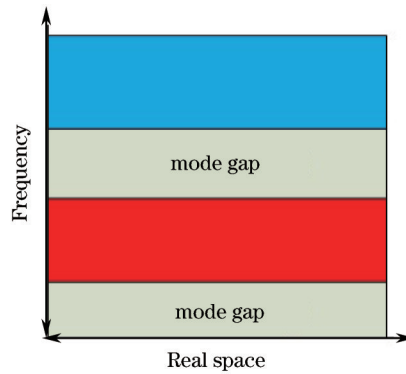


图9 光子晶体禁带图

Fig.9 Band-gap of photonic crystal

在光子晶体中人为地引入或者去除某种结构,破坏介质分布的周期排列,就会形成光子晶体缺陷结构。一般来说,主要有两类缺陷结构。一类是线缺陷(缺陷结构与晶体连通),另一类是点缺陷(缺陷结构孤立,不与晶体连通)^[33],如图10所示。频率处在禁带范围内的电磁波在光子晶体的缺陷结构中传播损耗很低,基本可以忽略(不考虑工艺水平),光波几乎以“全反射”的形式传播,这种电磁波模式称为该缺陷结构的缺陷模。

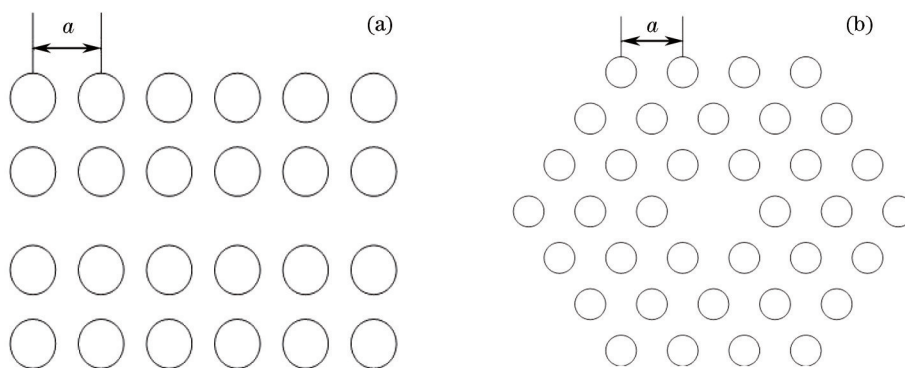


图10 光子晶体缺陷结构。(a)线缺陷;(b)点缺陷

Fig.10 Photonic crystal defect structure. (a) Spot defect; (b) line defect

光子晶体缺陷结构不仅具有波长选择性,还能通过调节结构参数控制光场的空间分布^[33],可用于制造多种光学器件,如光子晶体波导、光子晶体微腔、滤波器、光开关等,具有十分重要的研究价值。

3.3 光子晶体微腔

传统的光学谐振腔主要利用光在腔镜间的反射实现,因而尺度相对较大。基于禁带结构,光子晶体点缺陷能将一定频率范围内的光约束在其中,具有谐振腔的一般功能,简称光子晶体微腔。

图 11 为 Nature 上发表的光子晶体微腔结构示意图^[2]。在一块硅基板上均匀打上空气孔柱(中间形成线缺陷),空气孔间距为 a 。稍稍改变中央区域的空气孔间距 a' ,破坏光子晶体的局部周期性,图 11 中阴影部分即形成一个纳米腔。通过合理设计光子晶体及其缺陷结构的几何参数和物理参数,可以制备出超低阈值超小体积的激光器。

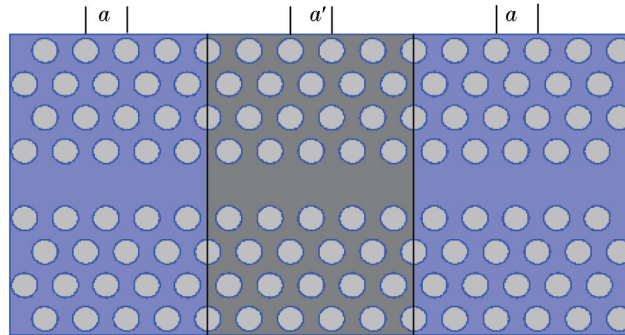


图 11 平板光子晶体微腔结构图

Fig.11 Structure of slab photonic crystal micro-cavity

设定该平板光子晶体微腔的参数, a 为 410 nm , a' 为 415 nm ,硅平板折射率为 3.4 ,真空波长为 $1.5\text{ }\mu\text{m}$,则通过 Rsoft 软件数值计算,得到波导模式传输如图 12 所示。由于 $1.5\text{ }\mu\text{m}$ 处于该结构的禁带范围内,电磁波被局域在中央线缺陷区域,无法进入晶体内部传播,类似于在介质交界面的“全反射”。

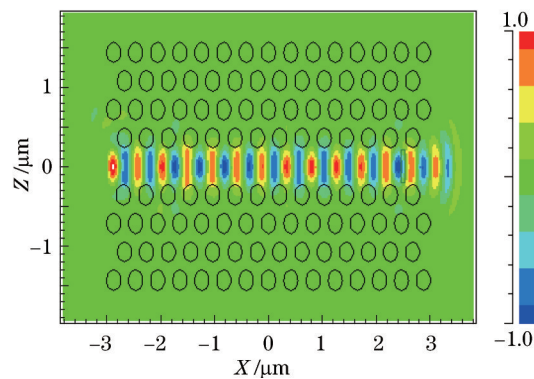


图 12 平板光子晶体波导模式传输图

Fig.12 Mode transmission of slab photonic crystal waveguide

作为实用的光器件,光子晶体微腔根据其结构分为三维光子晶体点缺陷和平板光子晶体点缺陷。根据禁带原理,三维光子晶体点缺陷可以实现光的三维约束,达到高 Q 值,但由于目前技术不成熟,难以达到制作器件所需要的工艺水平。图 13 所示的是一种典型的三维光子晶体微腔的切面示意图。处在禁带频率范围的光只能在中间空心区域传播,即实现了光的三维约束。平板光子晶体点缺陷是光子晶体微腔应用的主要结构,虽然平板光子晶体点缺陷只能对平板的导模实现三维约束^[34],但通过设计合理参数,可实现高 Q 值和小模场体积,且现有的半导体纳米制备工艺足以实现其器件的制作^[33]。

如图 13 所示,在平板上均匀打上空气孔(不考虑平板厚度),形成正六面体空气孔阵列,抽去中央空气孔形成点缺陷。设定平板折射率为 3.37 ,空气孔间距 $a = 0.4\text{ }\mu\text{m}$,孔半径 $r = 0.13\text{ }\mu\text{m}$ 。利用软件数值计算腔内模式要分两个步骤:首先要寻找本征共振频率,然后计算在该共振频率下的模场分布。为找出腔的共振频率,要将激励源设定为宽谱函数(时域上输入一个 δ 脉冲函数即可),得出微腔的频率响应曲线。挑选其中一个峰值,作为共振频率。

如图 14 所示,该点缺陷微腔的谱宽极窄,共振波长在 $1.1 \mu\text{m}$ 附近。将输入光波长设定为 $1.1 \mu\text{m}$, 仿真得到腔内模场分布如图 15 所示。

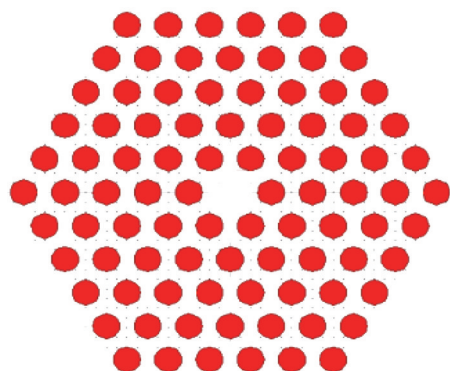


图 13 三维光子晶体微腔切面图

Fig.13 Section of three-dimensional photonic crystal micro-cavity

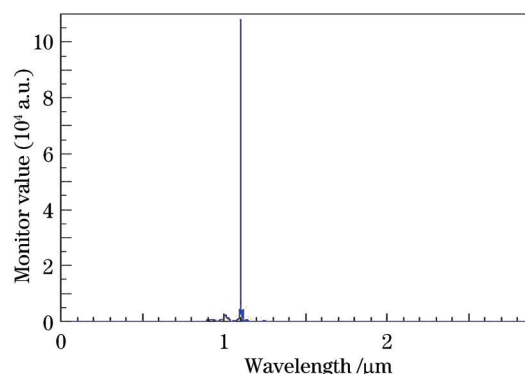


图 14 点缺陷微腔的某一共振峰

Fig.14 A resonance peak of point defect micro-cavity

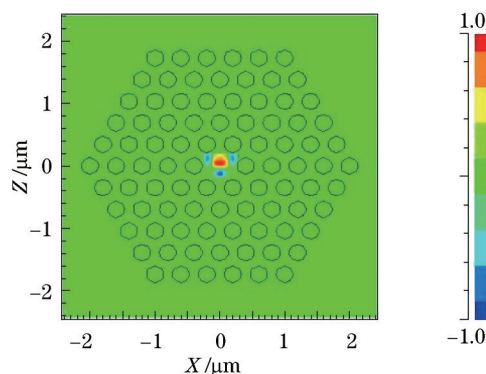


图 15 点缺陷微腔内模场分布图

Fig.15 Mode field distribution of point defect micro-cavity

从图 15 中可以看出,当种子光频率设定在腔的本征频率附近,光波在点缺陷内发生谐振,被强局域在点缺陷处,不能进入晶体内部传播,中央的点缺陷形成尺寸在微米量级的谐振腔,腔内光场能量流密度非常高。另外,由于光子晶体的“全反射”特性,该谐振腔损耗极低,品质因子非常高。

4 光学微腔的研究进展

4.1 回音壁模式微腔的进展

WGM 微腔结构多样,且具有品质因子高、有效模体积小、易集成等性能优势,在激光技术、生物探测以及量子物理中已经得到了广泛应用。早在 1939 年,Richtmyer^[35]就提出了光学回音壁模式的概念。然而受半导体加工技术的制约,回音壁模式微腔的发展受到阻碍,一直停留在理论水平上。直到 20 世纪 60 年代,贝尔实验室的 Garrett 等^[36]成功制备了 CaF_2 微波谐振腔,首次在微波波段实现了 WGM 的激光输出。1969 年,Marcatili 等^[37]提出将微环腔应用于集成光学滤波器件,大大改善了滤波性能,促进了 WGM 微腔在高性能滤波器领域的发展。1992 年,Knight 等^[38]利用毛细管形成回音壁模式,制备出毛细管激光器,促进了微流控光学的发展。

1996 年,Sandoghdar 等^[39]成功制备了低阈值的微球腔激光器,抽运阈值低至 200 nW,如图 16 所示。

随着微纳加工技术的发展,各种不同形状的回音壁模式微腔被设计制造。2009 年,Pöllinger 等^[40]提出了一种瓶状的微腔,腔体尺寸为 $30 \mu\text{m}$ 左右,品质因子可达 3.6×10^8 。

2004 年,Matsko 等^[41]提出将微球腔阵列与波导耦合制成陀螺仪,灵敏度可提高几个量级,对芯片陀螺仪的发展具有重大意义。陀螺仪基本结构如图 17 所示。

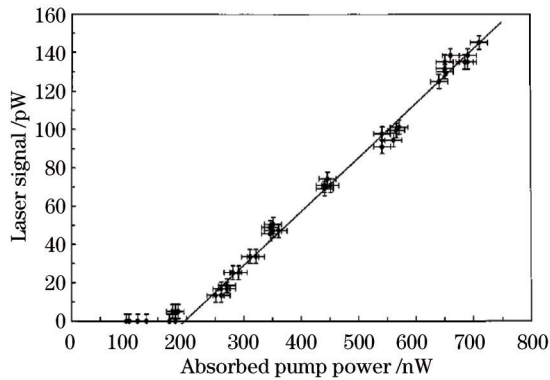


图16 微球腔激光器激光输出与抽运功率关系曲线

Fig.16 Output power of microsphere laser versus pump power

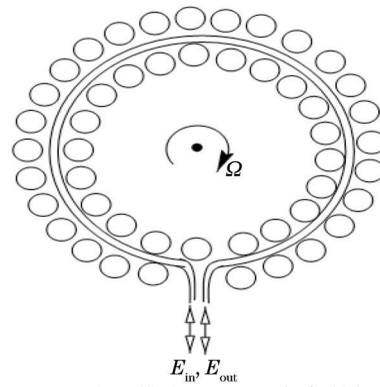


图17 基于回音壁模式微腔的陀螺仪结构示意图

Fig.17 Gyroscope structure diagram based on whispering gallery mode microcavities

2007年, Takahashi等^[42]已经成功制备出光子寿命为2 ns、标准偏差低于1 ns的高Q值纳米腔。2003年, Ilchenko等^[43]将LiNbO₃微腔与微波起振器结合, 成功制备出宽带工作的电光调制器和微波接收器。2004年, Rosenblit等^[44]利用微盘腔成功实现了单个冷原子的探测。如图18所示, 其中1,2,3,4分别为平板波导、微盘腔、楔形波导、冷原子。

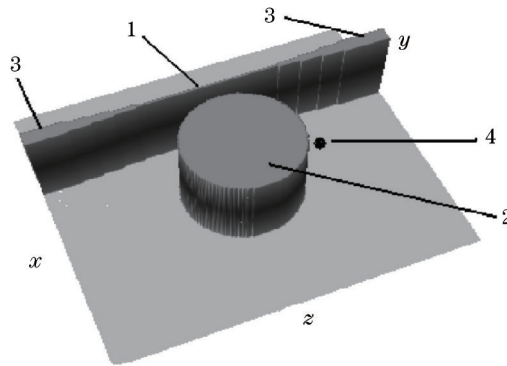


图18 微盘腔单原子探测示意图

Fig.18 Probe of micro-cavity detection of single atom

2006年, Teraoka等^[45]通过在微球腔表面增加高折射率介质层, 进一步压缩了共振线宽, 并大大提高了传感灵敏度。2011年, Dantham等^[46]成功利用WGM微腔实现RNA病毒分子的检测, 标志着微腔在生物传感领域的突破。

今年, 北京大学肖云峰教授在微腔光学领域取得突破。通过暗态相互作用实现光子与原子的强耦合, 实现了在单个微腔中同时达到极小模式体积和超高品质因子, 为研究单量子水平下光与物质相互作用提供了新的思路^[47]。另外, 通过对微腔内共振模式的损耗进行动态调控, 克服了量子反作用的热效应, 加快了机械振子的冷却速率, 且将冷却极限降低了2~3个数量级, 为操控并利用光力相互作用指明了新的方向^[48]。

4.2 光子晶体微腔的进展

自1987年, Yablonovitch^[49]提出利用光子晶体抑制介质的自发辐射这一概念后, 国内外科学家开始了研究光子晶体的热潮。光子晶体微腔是利用光子晶体禁带特性, 将处于禁带频率范围内的光禁锢在其中, 有效模体积小, 品质因子高。目前, 微腔尺寸可以做到纳米量级, 在小尺度、高性能谐振腔领域具有明显的竞争优势^[33]。

第一台光子晶体微腔激光器由Painter于1999年制得, 采用光抽运方式^[50]。2004年, 为解决光抽运效率不高这一问题, Park等^[51]采用载流子电注入方式, 成功制备出电抽运光子晶体微腔激光器。

2005年, Altug等^[52]设计制造出光子晶体纳米腔阵列激光器, 峰值输出功率比单个光子晶体微腔激光器高出2个数量级, 标志着微腔激光器向大功率方向迈进了重要一步。

随着量子光学的发展, 人们逐渐认识到在微腔中植入量子点, 能进一步降低光子晶体的出光阈值。

2004年, Yoshie等^[53]在平板光子晶体微腔中植入单层量子点, 观察到了Rabi的荧光谱。2010年, Andrei Faraon等^[54]在光子晶体微腔中掺入单个InAs量子点, 强耦合的量子点与腔内光子发生量子关联, 降低了激光器的振荡阈值并提高了峰值输出功率, 促进了腔量子电动力学的发展。

2012年, Mahmoud等^[55]利用光子晶体环形腔成功制备出下载滤波器, 如图19(a)所示。从图19(b)中可以看出, 该滤波器在1550 nm处下载效率可达100%, 对波分复用系统具有重大应用价值, 极大地促进了光通信的发展。

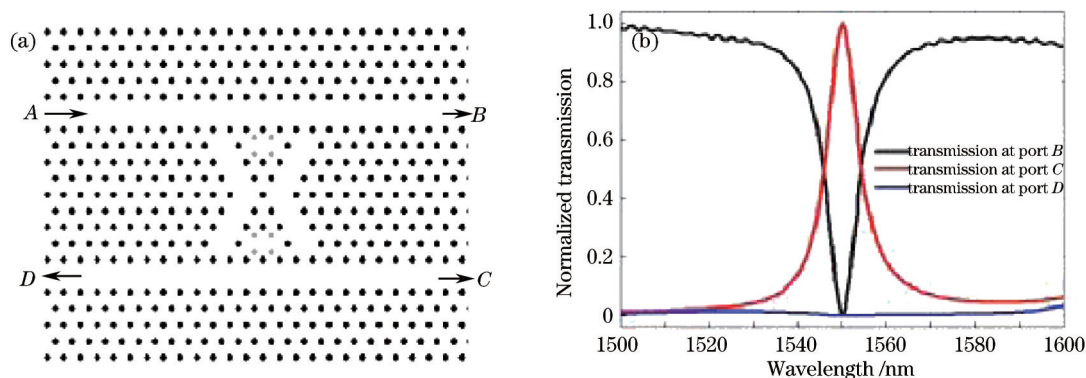


图19 光子晶体下载滤波器结构及滤波效果图

Fig.19 Download photonic crystal filter structure and the diagram of filtering effect

2013年, Takahashi等^[2]通过光子晶体线缺陷波导成功制备出微瓦阈值微米级拉曼硅基激光器, 实现了激光阈值的大幅度降低, 向低功耗高集成迈进了重要一步。

4.3 光学微腔的前景

目前信息与通信技术正以前所未有的速度发展, 根据摩尔定律的预测, 大约每18个月处理器的速度和内存的大小就会翻倍, 而且这个速度还将持续十年。如果光学能够在信息与通信领域发挥重大的作用, 前景和收益无疑是巨大的。全光信号处理技术, 由于无需进行光-电转换, 逐渐成为全光网络系统中前景广阔的领域之一。而实现全光网络需要一些体积小、结构简单、性能稳定的光学器件。光学谐振腔就是一个重要的光学器件, 它在光通讯、光纤传感等领域里得到了广泛的应用, 同时也是激光器的重要组成部分。所以高集成度的微纳米光学谐振腔必将具有巨大的应用前景。

参考文献

- 1 E M Purcell. Spontaneous emission probabilities at radio frequencies [J]. Phys Rev, 1946, 69: 681.
- 2 Y Takahashi, Y Inui, M Chihara, *et al.*. A micrometre-scale Raman silicon laser with a microwatt threshold [J]. Nature, 2013, 498(7455): 470-474.
- 3 S Haroche, D Kleppner. Cavity quantum electrodynamics [J]. Phys Tod, 1989, 42(1): 24-30.
- 4 J M Gerard, B Sermage, B Gayral, *et al.*. Enhanced spontaneous emission by quantum boxes in a monolithic optical microcavity [J]. Phys Rev Lett, 1998, 81(5): 1110-1113.
- 5 H J Kimble. Strong interaction of single atoms and photons in cavity QED [J]. Physica Scripta, 1998, 1998(T76): 127-137.
- 6 P Goy, J M Raimond, M Gross, *et al.*. Observation of cavity enhanced single-atom spontaneous emission [J]. Phys Rev Lett, 1983, 50(24): 1903-1906.
- 7 R G Hulet, E S Hilfer, D Kleppner, *et al.*. Inhibited spontaneous emission by a Rydberg atom [J]. Phys Rev Lett, 1985, 55(20): 2137-2140.
- 8 J McKeever, A Boca, A D Boozer, *et al.*. Experimental realization of a one-atom laser in the regime of strong coupling [J]. Nature, 2003, 425(6955): 268-271.
- 9 K M Birnbaum, A Boca, R Miller, *et al.*. Photon blockade in an optical cavity with one trapped atom [J]. Nature, 2005, 436(7047): 87-90.
- 10 T Yoshie, A Seherer, J Hendrickson, *et al.*. Vacuum Rabi splitting with a single quantum dot in a photonic crystal nanocavity [J]. Nature, 2003, 432(7014): 200-203.

- 11 M Brune, F S Kaler, A Maali, *et al.*. Quantum Rabi oscillation: A direct test of field quantization in a cavity [J]. *Phys Rev Lett*, 1996, 76(11): 1800–1803.
- 12 F Vollmer, S Arnold, D Braun, *et al.*. Multiplexed DNA quantification by spectroscopic shift of two microsphere cavities [J]. *Biophysical Journal*, 2003, 85(3): 1974–1979.
- 13 V R Dantham, S Holler, V Kolchenko, *et al.*. Taking whispering-gallery-mode single virus detection and sizing to the limit [J]. *Appl Phys Lett*, 2011, 101(4): 043704.
- 14 W L Jin, X Yi, Y W Hu, *et al.*. Temperature-insensitive detection of low-concentration nanoparticles using a functionalized high-Q microcavity [J]. *Appl Opt*, 2013, 52(2): 155–161.
- 15 I P Kaminow, T L San. *Optical Fiber Telecommunications IV: Components* [M]. San Diego: Academic Press, 2002.
- 16 S B Alexander, R S Bondurant, D Byrne, *et al.*. A precompetitive consortium on wide-band all-optical networks [J]. *J Lightwave Technol*, 1993, 11(5): 714–735.
- 17 Y Hibino, T Maruno, K Okamoto. Recent progress on large-scale PLC technologies with advanced functions [J]. *NTT Review*, 2001, 13(5): 4–9.
- 18 A S Kewitsch, G A Rakuljic, P A Willems, *et al.*. All-fiber zero-insertion-loss add-drop filter for wavelength-division multiplexing [J]. *Opt Lett*, 1998, 23(2): 106–108.
- 19 C R Doerr, L W Stulz, M Cappuzzo, *et al.*. 40-wavelength add-drop filter [J]. *IEEE Phot Technol Lett*, 1999, 11(11): 1437–1439.
- 20 K Djordjev, S J Choi, P D Dapkus. Microdisk tunable resonant filters and switches [J]. *IEEE Phot Technol Lett*, 2002, 14(6): 828–830.
- 21 P Rabiei, W H Steier, C Zhang, *et al.*. Polymer micro-ring filters and modulators [J]. *J Lightwave Technol*, 2002, 20(11): 1968–1975.
- 22 B E Little, H A Haus, J S Foresi, *et al.*. Wavelength switching and routing using absorption and resonance [J]. *IEEE Phot Technol Lett*, 1998, 10(6): 816–818.
- 23 K Djordjev, S J Choi, P D Dapkus. Vertically coupled InP microdisk switching devices with electro absorptive active regions [J]. *IEEE Phot Technol Lett*, 2002, 14(8): 1115–1117.
- 24 A Yariv. Critical coupling and its control in optical waveguide-ring resonator systems [J]. *IEEE Phot Technol Lett*, 2002, 14(4): 483–485.
- 25 R A Soref, B E Little. Proposed N-wavelength M-fiber WDM crossconnect switch using active microring resonators [J]. *IEEE Phot Technol Lett*, 1998, 10(8): 1121–1123.
- 26 S T Chu, B E Little, W Pan, *et al.*. An eight-channel add-drop filter using vertically coupled micro-ring resonators over a cross grid [J]. *IEEE Phot Technol Lett*, 1999, 11(6): 691–693.
- 27 M Cai, G Hunziker, K Vahala, *et al.*. Fiber-optic add-drop device based on a silica microsphere-whispering gallery mode system [J]. *IEEE Phot Technol Lett*, 1999, 11(6): 686–687.
- 28 Zou Changling, Dong Chunhua, Cui Jinming, *et al.*. Whispering gallery mode optical micro-resonator: Foundation and application [J]. *Phys Sci China*, 2012, 42(11): 1155–1175.
邹长铃, 董春华, 崔金明, 等. 回音壁模式光学微腔: 基础与应用 [J]. *中国科学*, 2012, 42(11): 1155–1175.
- 29 V B Braginsky, M L Gorodetsky, V S Ilchenko. Quality factor and nonlinear properties of optical whispering-gallery modes [J]. *Phys Lett A*, 1989, 137(7): 393–397.
- 30 S L McCall, A F K Levi, R E Slusher, *et al.*. Whispering-gallery mode microdisk lasers [J]. *Appl Phys Lett*, 1992, 60(3): 289–291.
- 31 D K Armani, T J Kippenberg, S M Spillane, *et al.*. Ultra-high-Q toroid microcavity on a chip [J]. *Nature*, 2003, 421(6926): 925–928.
- 32 J D Joannopoulos, S G Johnson, J N Winn, *et al.*. *Photonic Crystals Molding the Flow of Light* [M]. Princeton University Press, 2008.
- 33 Ye Weimin. *Introduction to Photonic Crystal* [M]. Beijing: Science Press, 2010.
叶卫名. *光子晶体导论* [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- 34 Zhu Zhihong, Ye Weimin, Yuan Xiaodong, *et al.*. Directional coupler of photonic crystal waveguide [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(10): 1237–1240.
朱志宏, 叶卫民, 袁晓东, 等. 光子晶体波导定向耦合器 [J]. *光学学报*, 2003, 23(10): 1237–1240.

- 35 R D Richtmyer. Dielectric resonators [J]. Appl Phys, 1939, 10(6): 391–398.
- 36 C G B Garrett, W Kaiser, W L Bond. Stimulated emission into optical whispering modes of spheres [J]. Phys Rev, 1961, 124(6): 1807–1809.
- 37 E A J Marcatili. Bends in optical dielectric guides [J]. Bell Syst Tech Jour, 1969, 48(7): 2103–2132.
- 38 J C Knight, H S T Driver, R J Hutcheon, *et al.*. Core resonance capillary fiber whispering gallery mode laser [J]. Opt Lett, 1992, 17(18): 1280–1282.
- 39 V Sandoghdar, F Treussart, J Hare, *et al.*. Very low threshold whispering-gallery-mode microsphere laser [J]. Phys Rev A, 1996, 54(3): R1777.
- 40 M Poëllinger, D O'Shea, F Warken, *et al.*. Ultrahigh- Q tunable whispering-gallery-mode microresonator [J]. Phys Rev Lett, 2009, 103(5): 053901.
- 41 A B Matsko, A A Savchenkov, V S Ilchenko, *et al.*. Optical gyroscope with whispering gallery mode optical cavities [J]. Opt Commun, 2004, 233(1): 107–112.
- 42 Y Takahashi, H Hagino, Y Tanaka, *et al.*. High- Q nanocavity with a 2-ns photon lifetime [J]. Opt Express, 2007, 15(25): 17206–17213.
- 42 V S Ilchenko, A A Savchenkov, A B Matsko, *et al.*. Whispering-gallery-mode electro-optic modulator and photonic microwave receiver [J]. J Opt Soc Am B, 2003, 20(2): 333–342.
- 44 M Rosenblit, P Horak, S Hellsby, *et al.*. Single-atom detection using whispering-gallery modes of microdisk resonators [J]. Phys Rev, 2004, A70(5): 053808.
- 45 I Teraoka, S Arnold. Enhancing the sensitivity of a whispering-gallery-mode microsphere sensor by a high-refractive-index surface layer [J]. J Opt Soc Am B, 2006, 23(7): 1434–1441.
- 46 V R Dantham, S Holler, V Kolchenko, *et al.*. Taking whispering-gallery-mode single virus detection and sizing to the limit [J]. Appl Phys Lett, 2011, 101(4): 043704.
- 47 Y C Liu, X Luan, H K Li, *et al.*. Coherent polariton dynamics in coupled highly dissipative cavities [J]. Phys Rev Lett, 2014, 112(21): 213602.
- 48 Y C Liu, Y F Xiao, X Luan, *et al.*. Dynamic dissipative cooling of a mechanical resonator in strong coupling optomechanics [J]. Phys Rev Lett, 2013, 110(15): 153606.
- 49 E Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(20): 2059–2062.
- 50 O Painter, R K Lee, A Ascherer, *et al.*. Two-dimensional photonic band-gap defect mode laser [J]. Science, 1999, 284(5421): 1819–1821.
- 51 H G Park, S H Kim, S H Kwon, *et al.*. Electrically driven single-cell photonic crystal laser [J]. Science, 2004, 305(5689): 1444–1447.
- 52 H Altug, J Vučković. Photonic crystal nanocavity array laser [J]. Opt Express, 2005, 13(22): 8819–8828.
- 53 T Yoshie, A Scherer, J Hendrickson, *et al.*. Vacuum Rabi splitting with a single quantum dot in a photonic crystal nanocavity [J]. Nature, 2004, 432(7014): 200–203.
- 54 A Faraon, A Majumdar, H Kim, *et al.*. Fast electrical control of a quantum dot strongly coupled to a photonic-crystal cavity [J]. Phys Rev Lett, 2010, 104(4): 047402.
- 55 M Y Mahmoud, G Bassou, A Taalbi, *et al.*. Optical channel drop filters based on photonic crystal ring resonators [J]. Opt Commun, 2012, 285(3): 368–372.

栏目编辑: 张浩佳