

基于微环谐振器的高灵敏度量子传感器

邓玉林 周圣航 史喜尚 尚梧松 冯馨怡 衣品芳 隋修宝

High-sensitivity quantum sensor based on micro-ring resonators

DENG Yulin, ZHOU Shenghang, SHI Xishang, SHANG Wusong, FENG Xinyi, YI Pinfang, SUI Xiubao

引用本文:

邓玉林, 周圣航, 史喜尚, 等. 基于微环谐振器的高灵敏度量子传感器[J]. 应用光学, 2025, 46(6): 1268–1277. DOI: 10.5768/JAO202546.0612008

DENG Yulin, ZHOU Shenghang, SHI Xishang, et al. High-sensitivity quantum sensor based on micro-ring resonators[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(6): 1268–1277. DOI: 10.5768/JAO202546.0612008

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0612008>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于少模-无芯-少模光纤结构的高灵敏度折射率传感器

High-sensitivity refractive index sensor based on FMF-CLF-FMF optical fiber structure

应用光学. 2023, 44(2): 462–468 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0208002>

空心微瓶谐振腔的封装及折射率传感特性研究

Package of hollow micro-bottle resonator and refractive index sensing properties

应用光学. 2022, 43(5): 1001–1006 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0508002>

基于光子集成芯片的可穿戴光纤光栅解调研究

Wearable fiber grating demodulation based on photonic integrated chip

应用光学. 2023, 44(1): 219–225 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0108001>

基于短波红外偏振成像的集成电路芯片污染缺陷检测

Detection of pollution defects in integrated circuit chips using short-wave infrared polarization imaging

应用光学. 2025, 46(2): 388–394 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0203004>

基于高灵敏度探测器的水下光通信系统

Underwater optical communication system based on high sensitivity detector

应用光学. 2025, 46(4): 929–936 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0408001>

基于偏芯光纤手性微锥结构的长周期光纤光栅传感特性

Sensing characteristics of long-period fiber grating based on chiral micro-taper structure of eccentric fiber

应用光学. 2025, 46(5): 1135–1142 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0508002>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 06-1268-10

引用格式: 邓玉林, 周圣航, 史喜尚, 等. 基于微环谐振器的高灵敏度量子传感器 [J]. 应用光学, 2025, 46(6): 1268-1277.

DENG Yulin, ZHOU Shenghang, SHI Xishang, et al. High-sensitivity quantum sensor based on micro-ring resonators[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(6): 1268-1277.



在线阅读

基于微环谐振器的高灵敏度量子传感器

邓玉林, 周圣航, 史喜尚, 尚梧松, 冯馨怡, 衣品芳, 隋修宝

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 量子传感利用微观粒子的量子态作为探测载体, 可通过测量外界物理量对量子态的扰动实现超高精度感知。量子传感作为“第二次量子革命”的核心驱动力, 正从实验室走向产业落地。随着微纳异质集成等关键技术的突破, 量子传感有望极大提高导航、医疗、能源等领域的测量精度量级, 从而成为未来研究的战略制高点。微环谐振器作为光子集成电路的重要元件, 得益于其非线性效应强、CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor) 可兼容、超高集成度等特点, 近年来在量子传感领域展现出革命性潜力。微环谐振器的性能核心在于其拥有较高的品质因子与可调谐的自由光谱范围。前者意味着谐振器内光子寿命较长, 可展现出更为明显的量子效应; 而后者则可实施多参量并行传感, 从而实现多信道量子态同步探测。本文对微环谐振器以及其面向量子传感领域的最新应用进展进行了介绍, 并对未来面临的技术挑战与发展方向进行了展望。

关键词: 微环谐振器; 量子传感技术; 片上光芯片; 集成量子器件

中图分类号: TN206

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202546.0612008](https://doi.org/10.5768/JAO202546.0612008)

High-sensitivity quantum sensor based on micro-ring resonators

DENG Yulin, ZHOU Shenghang, SHI Xishang, SHANG Wusong, FENG Xinyi,
YI Pinfang, SUI Xiubao

(School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Quantum sensing utilizes the quantum state of microscopic particles as the detection carrier, and can realize ultra-high precision sensing by measuring the perturbation of external physical quantities to the quantum state. As the core driving force of the Second Quantum Revolution, quantum sensing is moving from the laboratory to the industry. With the breakthrough of key technologies such as micro-nano heterogeneous integration, quantum sensing is expected to greatly improve the measurement accuracy order of magnitude in navigation, medical care, energy and other fields, thus becoming a strategic high point for future research. As an important component of photonic integrated circuits, microring resonators have shown revolutionary potential in the field of quantum sensing in recent years thanks to their strong nonlinear effect, CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor) compatibility, and ultra-high integration. The core of the performance of microring resonators lies in their high quality factor and tunable free spectral range. The former implies a longer photon lifetime in the resonator, which can show more obvious quantum effects, while the latter enables multi-parameter parallel sensing and thus the simultaneous detection of multi-channel quantum

收稿日期: 2025-09-08; 修回日期: 2025-11-07

基金项目: 国家自然科学基金 (62105152); 国防科技重点实验室基金 (6142113210205); 江苏省卓越博士后计划

第一作者: 邓玉林, E-mail: yulind460@gmail.com

通信作者: 隋修宝, E-mail: sxb@niust.edu.cn

states. This paper introduces the microring resonators, as well as their recent progress toward quantum sensing applications, and provides an outlook on the technical challenges and development directions for the future.

Key words: microring resonator; quantum sensing; on-chip optical chip; integrated quantum device

引言

量子传感技术是一项利用量子叠加态、量子纠缠和量子隧穿效应等量子特性,实现对时间、磁场、重力、电场以及各种物理量超高精度测量的技术^[1-3]。其核心原理是通过操控微观粒子的原子能级和电子自旋,使量子态在外界物理量作用下演化,从而再通过测量量子态的变化反推目标信息^[4]。量子传感器与经典传感器既有显著区别,又有密切联系,区别在于后者涉及的物理量为经典统计极限,而前者则过渡到量子统计极限,其联系在于如除了感知物理量的原子系综处于相干量子态外,操控量子态的输入信号和读出信号仍依赖于经典的电信号^[5-8]。

自 20 世纪 30 年代后,量子传感技术已经历约一个世纪的发展,其技术的进步也伴随着人们对微观物质世界认知的不断深入而大幅拓展^[9-12]。量子传感技术早期以微观粒子分立性为核心,形成了原子陀螺仪、原子钟、原子重力仪、原子磁传感器等第一代量子传感仪器。随着量子技术的发展,后来量子传感技术以量子相干、量子纠缠为核心,完成了对经典统计极限的突破,实现了量子精密测量技术。进入 21 世纪,以多体纠缠操控和环境适应性突破为标志的第三代量子传感技术快速发展,如通过里德堡原子纠缠态制备和混合平台集成,金刚石氮-空位(NV)色心测量精度逼近海森堡极限,借助片上光子集成与冷原子芯片技术,突破传统量子传感器的体积与功耗限制^[13]。这一阶段的技术飞跃,催生了诸多应用,如在导航领域,量子惯性导航系统实现 GPS 拒止环境下的亚米级定位^[14];在生物医疗领域,金刚石传感器实现单癌细胞级磁信号检测^[15];在基础科学中,光晶格钟推动暗物质搜寻精度提升数个量级^[16]。未来,随着极弱磁大科学设施等平台的建设,量子传感将沿芯片化集成路径,向消费电子、深空探测、生物医疗等领域纵深拓展。

目前的基础物理研究,特别是有关暗能量、暗物质、永久性电偶极矩等问题的实验验证中,对传感器测量精度的需求十分迫切,传统的测量技术精度现已无法满足要求,因此在该情况下,量子传感器成为了众多研究学者探索更高精度量级的核

心工具^[17-19]。在探测微弱暗物质信号、测量原子永久性电偶极矩、绘制极高空间分辨率的引力场地图以及构建下一代原子钟等任务中,基于光晶格、离子阱、冷原子、金刚石 NV 色心、超导量子干涉器件(SQUID)等平台的量子传感器正展现出突破标准量子极限、实现前所未有的测量灵敏度和分辨率的巨大潜力^[20-23]。2025 年 4 月,中国科学技术大学团队基于金刚石氮-空位色心研制出一种量子电流互感器,在 0~1 000 A 量程内能够实现 0.05% 的交流幅值测量精度,并且能抑制电流测量中的温度漂移。该量子电流互感器于 110 kV 变电站成功挂网运行,实现了交流电的实时状态监测,验证了量子传感在电力场景中的实用性^[24]。2025 年 5 月,俄亥俄州立大学研究团队基于量子自旋传感器,利用由均匀反铁磁共振模式激发的磁子集体动力引起的低频磁场波动,实现了一种空间局部高灵敏度传感技术^[25]。2025 年 8 月,约翰-斯霍普金斯大学研究团队采用高反射金镜构建光学谐振腔,使捕捉的光线在腔内来回反弹以增强光线与封闭分子的相互作用,受限的光场与分子振动相互密切交织,形成振动极化的全新量子态,实现了利用混合光物质态进行分子传感的重大进步^[26]。2025 年 8 月,北京大学团队揭示了不同载能离子、脉冲电子束等辐照参数对制备高亮度硅空位色心的影响规律,实现了不同亮度色心材料的可控制备,对金刚石 NV 色心、碳化硅硅空位色心等多种色心 ODMR(optically detected magnetic resonance)谱完成了测量^[27]。2025 年 9 月,东京大学团队通过快速改变单个纳米粒子的振荡频率以对其进行量子挤压,测量其自由膨胀度,推算出悬浮纳米粒子的空间状态,从而为量子传感提供了一种新的实现途径^[28]。2025 年 10 月,芝加哥大学团队提出了一种有机铟自旋量子比特,通过电信频率光以高分辨率状态访问自旋自由度并基于自旋光子界面完成光学自旋偏振和读出,以区分分子晶体中的自旋态和磁性不等位点,达到了极高的光学分辨和控制分子磁态的能力,实现了高精度量子传感技术^[29]。同月,圣路易斯华盛顿大学团队开发了一种由超强力结晶氮化硼制成的量子传感器,通过使用去除了硼原子的氮化硼薄片,探测空位所捕获的电子的自旋能量与磁场、应力的关系,实现了在超过地

球大气压 3×10^4 倍的情况下应力和磁场的高精度探测^[30]。此外,近年来诸多国内外的最新研究工作,都在不断推进量子传感技术实现新的突破^[31-47]。

本文介绍了一种关于基于微环谐振器的高灵敏度量子传感器。微环谐振器是一种利用回音壁模式把光子约束在波长尺度的光学谐振腔体,其特点是光沿切向方向进入微腔,由于导光材料与空气接触面的全反射效应,光会沿微腔的外壁反射传播,在腔内形成共振场,这种结构具有模式体积小、品质因子高、超高灵敏度、分辨率高等优势^[48]。回音壁模式其实对于人类来说并不陌生,数百年前,人们在伦敦圣保罗大教堂、北京天坛(图 1(a)、图 1(b))等类似于环形结构的建筑内发现,若两个人靠着侧壁但相隔很远,即使一个人对着回廊呢喃细语,另一个人仍然可以清楚地听见说话的内容。19 世纪,英国物理学家瑞利揭示了这种声波通过连续全反射被约束在边界传播的物理机制,并命名为回音壁模式。后来,人们将这一概念引入至光学,从图 1(c)、图 1(d)可以看出,在具有旋转对称的环形结构内,光线会通过全反射的方式沿着侧壁传输,当光在环内旋转一周的光程等于波长的整数倍时,将会发生谐振增强现象,这种环形结构就称为回音壁模式微环谐振器。

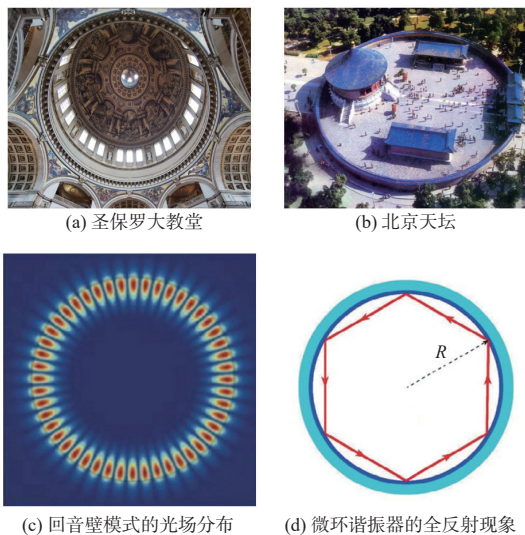


图 1 回音壁模式

Fig. 1 Echoing wall mode

基于微环谐振器的量子传感器其核心在于利用微环结构的回音壁模式增强光与物质相互作用,实现对物理量的超高灵敏度探测。微环谐振器通过全反射将光子约束在微米尺度环状结构内,形成高密度光场,显著提升光与量子体系的耦

合效率^[49-52]。基于微环谐振器的量子传感器凭借高 Q 值、强场约束与多材料兼容性,已成为突破经典传感极限的核心工具,通过在近场区域增强光与目标量子体系的相互作用,传感器能显著放大待测物理量引起的光学响应,从而实现对微弱信号的极限探测。未来,片上集成的微环谐振器阵列、结合新型量子材料和智能调控技术,有望进一步提升系统稳定性和集成度,推动量子精密测量向小型化、实用化和多参量同步测量发展,为凝聚态物理研究、先进材料表征、医学诊断乃至量子信息技术提供前所未有的探测能力,推动精密测量迈向新纪元。

1 微环谐振器的工作原理与优化设计

微环谐振器(microring resonator, MRR)作为集成光子学中的重要器件,通过直波导与环形波导之间的倏逝场耦合完成光场调控。根据功能需求划分,微环谐振器可分为两类,即全通型(All-Pass)与上传-下载型(Add-Drop),图 2(a)、图 2(b)展示了两类结构。

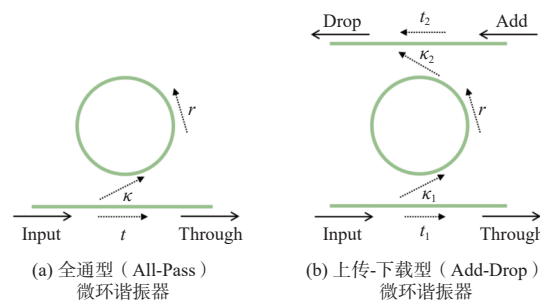


图 2 微环谐振器

Fig. 2 Micro-ring resonator

其中,全通型微环谐振器由一根总线波导与一个环形腔构成,其谐振效应仅需相位调制即可实现。当入射光从输入端(Input)注入直通波导时,部分能量耦合至环形谐振腔内,剩余能量则沿原波导传输,由直通端(Through)输出。耦合至腔内的光场在环形结构中循环传播,每完成一圈相位累积后,部分能量会重新耦合回直通波导,最终由直通端输出。在稳态条件下(即输入光功率恒定),系统会达到动态平衡。谐振腔内循环的光强与直通端输出光强均与输入光强形成固定比例关系,此类 MRR 的光强透过率表达式为

$$T = \frac{I_{\text{through}}}{I_{\text{input}}} = \frac{r^2 - 2tr\cos(\beta L) + t^2}{1 - 2tr\cos(\beta L) + (tr)^2} \quad (1)$$

式中: I_{through} 和 I_{input} 分别代表直通端口与输入端口的光功率; β 为谐振器内光的传播常数; L 为微环谐振器的腔长; r 代表光在谐振器内传播一周后剩余光功率的大小, 一定程度上反映了微环的传输损耗; t 是传输系数, 它与耦合系数 κ 的关系为 $t^2 + \kappa^2 = 1$ 。

对于上传-下载型微环谐振器而言, 采用双总线波导与环形腔的耦合构型, 通过谐振效应实现特定波长的选择性功率传输。当入射光从下方输入端口注入时, 部分能量耦合至环形谐振腔内, 剩余能量沿原波导由直通端输出。谐振腔内的光场通过循环积累相位, 在满足谐振条件时耦合至上/下总线波导; 耦合至上波导的能量从下载端(Drop)输出, 耦合至下波导的能量则汇入直通端(Through)输出。系统达到动态平衡后, 直通端与下载端的光强透过率可分别表示为

$$T_t = \frac{I_{\text{through}}}{I_{\text{input}}} = \frac{t_2^2 r^2 - 2t_1 t_2 r \cos(\beta L) + t_1^2}{1 - 2t_1 t_2 r \cos(\beta L) + (t_1 t_2 r)^2} \quad (2)$$

$$T_d = \frac{I_{\text{drop}}}{I_{\text{input}}} = \frac{(1 - t_1^2)(1 - t_2^2)r}{1 - 2t_1 t_2 r \cos(\beta L) + (t_1 t_2 r)^2} \quad (3)$$

式中: T_t 和 T_d 分别代表直通端与下载端的传输率; I_{through} 、 I_{drop} 以及 I_{input} 代表直通端口、下载端口以及输入端口的光功率; t_1 与 t_2 则代表的是直通端波导与下载端波导与微环腔体的传输系数。

品质因子 Q 是微环谐振器的重要参数, 是衡量微环谐振器性能的重要指标, 用于量化其能量存储效率, 直接影响器件的滤波精度、灵敏度及稳定性。其定义为谐振器储存的总能量与每个周期能量损耗之比, 即:

$$Q = 2\pi \frac{E_{\text{all}}}{E_{\text{loss}}} = \frac{\lambda_0}{\Delta\lambda} \quad (4)$$

式中: E_{all} 代表腔内总光能; E_{loss} 代表光在环内传播一周耗散的光能; $\Delta\lambda$ 为谐振峰的 3 dB 带宽。 Q 值这一无量纲参数越高, 表明微环的能量衰减速率越慢, 那么谐振峰将越尖锐, 系统稳定性越强。

事实上, Q 值的大小也可反映微环谐振器的损耗特性。 Q 值代表谐振腔存储光场能量的能力, 其值越高表示损耗越小, 存储能力越强。因此, 损耗与 Q 值成反比, 故可用其倒数表征, 如式(5)所示:

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_{\text{rad}}} + \frac{1}{Q_{\text{abs}}} + \frac{1}{Q_{\text{sca}}} + \frac{1}{Q_{\text{load}}} \quad (5)$$

式中: Q_{rad} 对应本征辐射损耗, 源于光场在弯曲边界处的能量泄露; Q_{abs} 对应材料吸收损耗, 由微腔材料的本征吸收特性决定; Q_{sca} 对应由微腔谐振器表面粗糙度引起, 由制造厂的工艺误差决定; Q_{load}

对应外部耦合损耗, 如光纤、棱镜与微腔耦合引入的损耗。

因此, 如何增加微环谐振器的 Q 值, 减少回音壁模式微环谐振器内的光损耗, 提升光子在谐振腔体内的寿命是实现高精度量子传感的重要工作。本文介绍了一种基于贝塞尔曲线控制点优化的策略, 旨在通过精确调控微环谐振器边界轮廓的几何形状, 从根本上优化光场约束能力与散射抑制效果。贝塞尔曲线作为一种灵活参数化的曲线工具, 其独特的优势在于能够通过调整少量控制点, 实现对环体轮廓局部曲率的精细调控, 生成更为优化的边界路径。贝塞尔曲线的数学定义为

$$B(t) = \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} (1-t)^{n-i} t^i P_i, t \in [0, 1] \quad (6)$$

贝塞尔曲线二阶导数连续, 消除传统圆形环的曲率突变点, 减少边界衍射。图3给出了通过优化贝塞尔曲线控制点得到的曲率更加平缓、光子过波更加顺滑的微环谐振器的局部示意图。

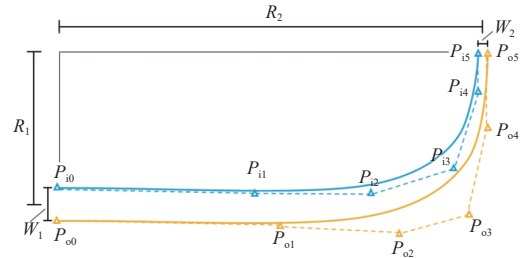


图3 基于贝塞尔曲线控制点优化的微环谐振器

Fig. 3 Micro-ring resonator with bezier curve control point optimization

利用贝塞尔曲线描述微环谐振器的轮廓边界, 能够最大化地适应回音壁模式光场的自然场分布, 增强光场限制能力, 减小能量向非支撑区域的泄露, 同时能够整体上最小化轮廓对理想平滑表面的几何偏离, 从而从根本上降低由表面粗糙度和侧壁缺陷激发的散射损耗。并且通过调制贝塞尔控制点能够引入特定、平缓的曲率过渡, 有效抑制因边界几何突变或不连续引起的光散射。通过建立基于贝塞尔曲线控制点优化的微环谐振器, 能够解决传统微环在光场约束、损耗控制与制造容差上的固有限制, 大幅提升精密传感性能。

2 回音壁模式微环谐振器的传感探测

前文已经介绍过, 微腔的谐振波长 λ 与有效折射率 n_{eff} 成正比, 满足关系式 $2\pi R n_{\text{eff}} = n\lambda$ 。当微环

谐振器外环境折射率改变时, n_{eff} 会随之变化, 导致 λ 偏移, 基于此原理, 可通过监测 λ 的偏移量来探测腔外由表面分子附着引起的折射率变化, 如图 4(a) 所示^[53]。除此之外, 回音壁模式微环谐振器还支持一对频率简并的顺时针 (clockwise, CW) 和逆时针 (counterclockwise, CCW) 传播模式, 当纳米颗粒等散射体附着于微腔表面时, 会扰动模式的倏逝场, 导致部分能量反向散射, 引发 CW 与 CCW 模式间的耦合。此耦合解除模式简并, 形成频率分裂的对称模与反对称模 (即光学超模), 这种单峰分裂为双峰的现象称为谐振峰劈裂^[54-60], 如图 4(b) 所示。

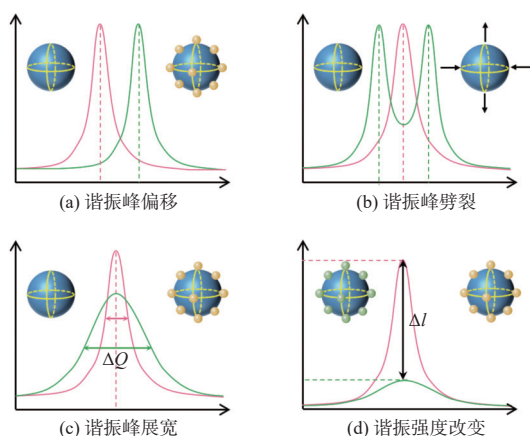


图 4 回音壁模式微环谐振器传感检测示意图

Fig. 4 Schematic of micro-ring resonator sensing detection in echo-wall mode

由 $Q = \frac{\lambda_0}{\Delta\lambda}$ 可知, 谐振峰带宽 $\Delta\lambda$ 与品质因数 Q 呈反比关系。当生物分子或纳米颗粒附着于微腔表面时, 会增大其表面粗糙度, 导致光场发生显著散射损耗, 进而降低 Q 值, 这一过程最终引发谐振峰展宽现象^[54], 如图 4(c) 所示。另外, 谐振峰强度与珀塞尔系数成反比^[53], 该系数可定义为 $3Q \frac{(\lambda/n)^3}{4\pi^2 V_{\text{eff}}} \propto \frac{Q}{V_{\text{eff}}}$, 当待测分子附着在微环谐振器腔体侧壁后, 会使其表面粗糙度升高, 从而降低 Q 值, 进而减小珀塞尔系数, 最终导致谐振峰强度降低, 如图 4(d) 所示。

回音壁模式微环谐振器其模场分布本质上其实就是满足边界条件下麦克斯韦方程组的特定电磁模式解。假设微腔半径为 R , 那么腔外 ($r \geq R$) 以及腔内 ($r \leq R$) 的电磁场分布就具有如下关系:

$$\begin{cases} E(\theta, \varphi, r) \propto \sqrt{r} H_{l+\frac{1}{2}}^{(1)}(k_0 r n) P_m^l e^{\pm i m \varphi} \cos \theta, r \geq R \\ E(\theta, \varphi, r) \propto \sqrt{r} J_{l+\frac{1}{2}}(k_0 r n) P_m^l e^{\pm i m \varphi} \cos \theta, r \leq R \end{cases} \quad (7)$$

式中: P_m^l 为连带勒让德多项式; $H^{(1)}$ 代表汉克尔函

数; J 代表第一类贝塞尔函数。回音壁模式中各个模式都可以用 n 、 l 、 m 3 种量子量来完整表征, 三者的物理意义与电磁场空间分布密切相关, n 代表沿微腔径向方向 r 上模场强度的极大值数目, $2m$ 代表沿方位角方向 φ 上模场强度的极大值数目, $l-m+1$ 代表沿极角方向 θ 上模场强度的极大值数目。

利用有限元模拟分析软件 COMSOL 5.4 对半径 $R = 30 \mu\text{m}$ 的微腔进行电磁场模场分布仿真, 仿真结果如图 5 所示。经推算, 图 5(a)~图 5(d) 中微腔内产生谐振的有效模式对应的频率依次为 441.82 THz、453.24 THz、442.93 THz、456.25 THz, 而与之对应的电磁场模式体积依次为 $356 \mu\text{m}^3$ 、 $435 \mu\text{m}^3$ 、 $480 \mu\text{m}^3$ 、 $670 \mu\text{m}^3$, 据此可得, 微球腔体的场模式体积相当微小, 仅在立方微米量级。微小模式体积能将电磁场精确局域在极小的空间范围内, 显著增强荧光量子点、NV 色心等固态量子探针的自发辐射率, 不仅提高其量子效率, 也允许更快速的量子态初始化和读出, 提高传感带宽和信噪比。

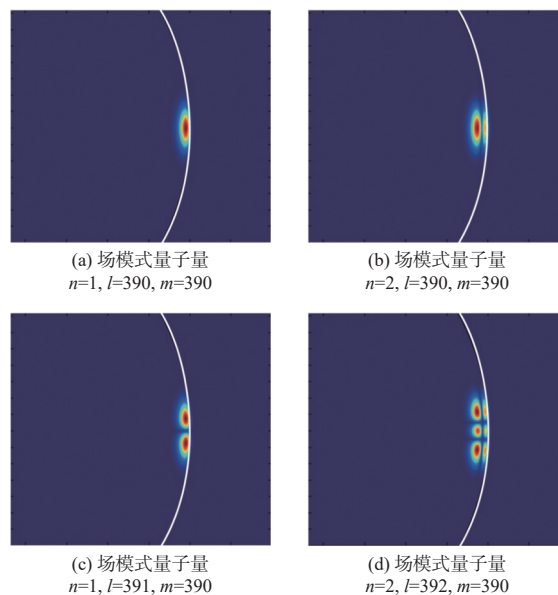


图 5 半径 $R = 30 \mu\text{m}$ 的微腔电磁场模场分布仿真示意图

Fig. 5 Schematic simulation of electromagnetic field mode distribution in a microcavity with radius $R = 30 \mu\text{m}$

通过基于微环谐振器进行 NV 色心的量子磁传感研究, 可实现高灵敏度磁场探测^[61]。图 6(a) 显示了用于评估灵敏度的锁相检测基本原理, 即随着磁场振荡导致微环谐振器的磁检测共振光谱的谐振峰中心位置产生偏移, 从而确定磁场的变化程度。图 6(b) 展示了检测到的锁相电压随施加磁场强度 (单位: $\mu\text{T}/\text{Hz}^{1/2}$) 的变化关系, 为了估计最小可探测磁场, 对所探测到的数据进行了线性拟

合, 拟合曲线如图 5(b) 中蓝色实线所示, 对其中的局部弱磁区域进行放大, 结果于图 5(c) 中呈现, 拟合结果与 $B < 0.2 \mu\text{T}/\text{Hz}^{1/2}$ 时的数据一致, 该图中紫色虚线代表噪声底限, 约为 0.1 nV 。通过拟合结果和噪声底限, 可估计该器件的最小可探测磁场约为 $1.0 \mu\text{T}/\text{Hz}^{1/2}$ 。目前, 典型的单个 NV 色心的直流灵敏度范围为 $2 \mu\text{T}/\text{Hz}^{1/2} \sim 10 \mu\text{T}/\text{Hz}^{1/2}$, 相比之下, 基于微环谐振器的 NV 色心的量子磁传感可达 $1.0 \mu\text{T}/\text{Hz}^{1/2}$, 这标志着基于微环谐振器的量子传感设备具有相当高的空间分辨率和灵敏度。

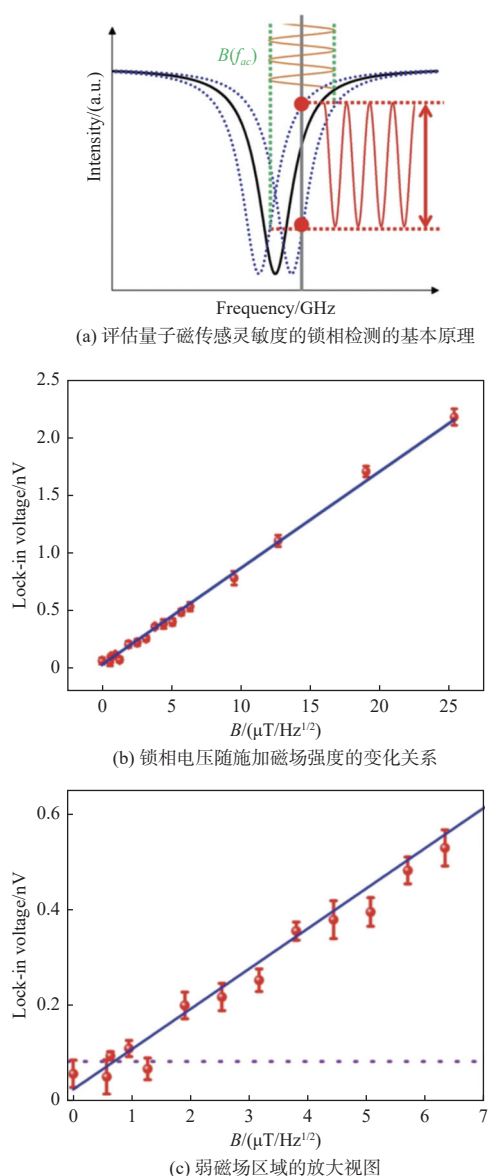


图 6 评估量子磁传感灵敏度的锁相检测

Fig. 6 Phase-locked detection for evaluating quantum magnetic sensing sensitivity

此外, 基于微环谐振器增强里德堡原子和微波电场之间的有效耦合, 也能实现高灵敏度传感探

测^[62]。如图 7 所示, 使用三光子激发方案将原子从基态激发到里德堡态, 具体分别采用 852 nm 探针光驱动完成 $|6S_{1/2}\rangle \rightarrow |6P_{3/2}\rangle$ 、 1470 nm 激光驱动完成 $|6S_{1/2}\rangle \rightarrow |7P_{1/2}\rangle$ 、 780 nm 耦合光驱动完成 $|7P_{1/2}\rangle \rightarrow |5P_{3/2}\rangle$ 。在实验装置中, 探针光被分成两束穿过原子蒸气池, 而修整光和耦合光则与其中一束探针光束相反的方向传播, 以减少多普勒展宽效应。蒸汽池的长度为 7 cm , 探针强度为 $64 \mu\text{W}$, 激光和耦合光强度分别为 16.8 mW 和 1.5 W 。通过光电探测器接收输入光, 从而进行差分放大测量。

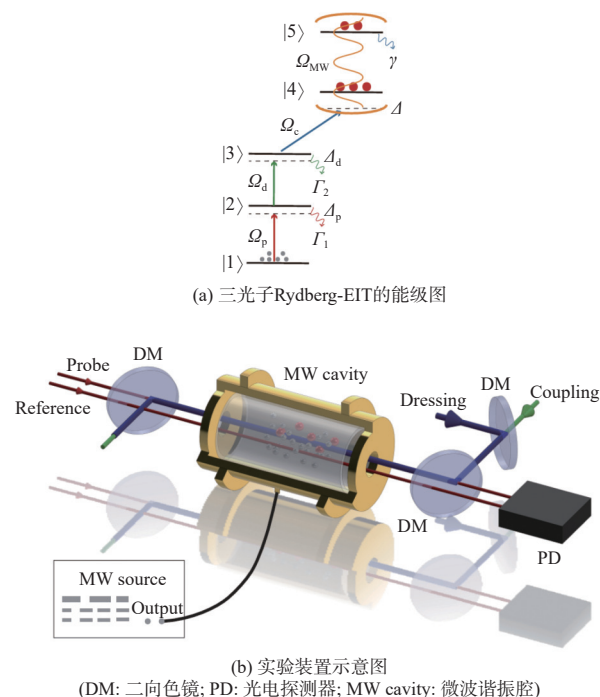


图 7 三光子 Rydberg-EIT 的能级图和实验装置示意图

Fig. 7 Energy level diagram of three-photon Rydberg-EIT and schematic diagram of experimental setup

首先模拟了微波在腔体内的电场分布, 结果如图 8(a) 所示, 可以观察到电场强度最大值位于腔体中心。为利用这一特性, 将原子气室置于腔体内部, 并通过激光将原子精确激发至腔体中心的里德堡态。这种设计能确保感应电场强度达到最大化。此外, 对微波腔的 s_{11} 参数进行了仿真, 并与矢量网络分析仪的实际测量结果进行对比, 如图 8(b) 所示。仿真表明微波腔在 4.485 GHz 处谐振现象最为显著, 该结果与实验测量值相符。但实测 s_{11} 参数相对较低, 仅为 -13 dB 。这种衰减可归因于加工工艺以及腔体内原子气室的存在: 一方面, 腔体输入/输出端口未实现精确的阻抗匹配, 导致微波无法在腔内形成增强反射, 从而降低了 s_{11} 参数; 另一方面, 原子气室的引入增大了腔体的

介电常数,进一步加剧了腔体损耗,导致整体性能下降。

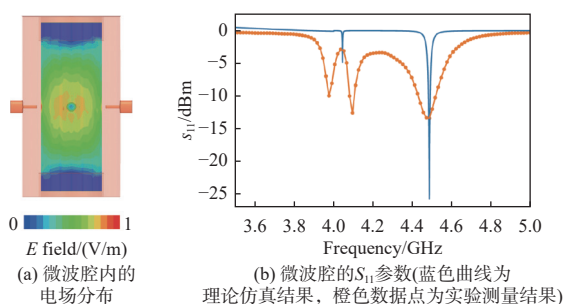


图8 微波腔内的电场分布及 S_{11} 参数

Fig. 8 Electric field distribution inside microwave cavity and parameter S_{11}

随后,通过方波调制的微波信号验证了该系统感知微波电场的性能。该实验直接探测探针光的透射率变化,利用信号源施加调制频率为1 kHz的方波调制微波信号,该信号被里德伯原子系统接收并解调,测量结果如图9所示。通过使用微波谐振腔,实现了信噪比的显著提升(蓝色曲线),其效果远优于无腔体的情况(橙色曲线),这种信噪比的增强对于弱信号接收尤为有利。实测表明,引入谐振腔后方波调制信号的信噪比提升了10.8倍。此外,谐振腔的使用还有效降低了数字调制信号接收过程中的误码率。

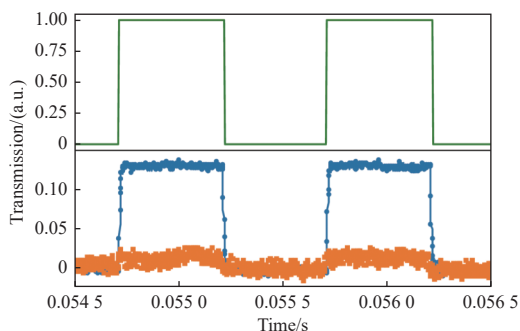


图9 在调制频率1 kHz、调制深度30%、功率 $P=-30$ dBm的方波调制信号作用下,有无谐振腔的里德堡原子系统实时响应谱对比(绿色曲线为载波调制信号,蓝色曲线为基于腔的里德堡原子解调信号,橙色曲线为无腔条件下的解调信号)

Fig. 9 Comparison of real-time response spectra of Rydberg atom system with and without cavity under application of square-wave modulation signal with modulation frequency of 1 kHz, modulation depth of 30%, and $P=-30$ dBm (green curve is modulated signal of carrier, blue curve is signal demodulated from Rydberg atoms with cavity, and orange curve is that without cavity)

因此,通过进行微波谐振腔的共振效应增强里德堡原子和MW电场之间相互作用的实验,可完成里德堡原子与腔内电场之间的有效耦合,从而有效提升功率探测的灵敏度。此外,这种增强效应能够有效提高信号解调中的信噪比,这对于推进里德堡原子电场传感器的实际应用至关重要。

3 结束语

本文系统地介绍了基于回音壁模式微环谐振器的高灵敏度量子传感器。作为一种能将光子约束在波长尺度的光学谐振腔,微环谐振器凭借其极小的模式体积、极高的品质因子和极强的场局域能力,可显著增强光与NV色心、里德堡原子等物质的相互作用,为实现超高灵敏度的物理量探测提供了理想平台。研究表明,基于微环谐振器增强的NV色心磁传感可实现极高的灵敏度,而通过微腔增强里德堡原子与微波的耦合,则能将信号解调的信噪比提升一个数量级,显著降低了探测极限与误码率。这些成果充分展示了微环谐振器在突破标准量子极限、推动量子精密测量发展方面的巨大潜力。

展望未来,基于微环谐振器的量子传感技术正朝着小型化、集成化、实用化和多参量协同测量的方向快速发展。通过构建片上集成的微环谐振器阵列、结合新型量子材料与智能调控算法,有望进一步提升传感器的稳定性、集成度与多功能性。随着芯片化工艺的不断成熟,这类高性能量子传感器有望走出实验室,在凝聚态物性分析、暗物质探测等基础科学,以及电力系统监测、无损检测等工业应用乃至生物医疗诊断等领域发挥革命性作用,推动精密测量技术整体迈向以量子极限为标杆的新纪元。

参考文献:

- [1] ANDERSON M, PAVLOV N G, JOST J D, et al. Highly efficient coupling of crystalline microresonators to integrated photonic waveguides[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(9): 2106-2109.
- [2] NGUYEN P D, ZHANG Xuanru, SU J. One-step controlled synthesis of size-tunable toroidal gold particles for biochemical sensing[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2019, 2(12): 7839-7847.
- [3] LI C, LOHREY T, NGUYEN P D, et al. Part-per-trillion

- trace selective gas detection using frequency locked whispering-gallery mode microtoroids[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(37): 42430-42440.
- [4] LUU G T, GE C, TANG Y S, et al. An integrated approach to protein discovery and detection from complex biofluids[J]. *Molecular & Cellular Proteomics*, 2023, 22(7): 100590.
- [5] KIM S K, SUEBKA S, GIN A, et al. Methotrexate inhibits the binding of the severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 (SARS-CoV-2) receptor binding domain to the host-cell angiotensin-converting enzyme-2 (ACE-2) receptor[J]. *ACS Pharmacology & Translational Science*, 2024, 7(2): 348-362.
- [6] PUCKETT M W, LIU K K, CHAUHAN N, et al. 422 Million intrinsic quality factor planar integrated all-waveguide resonator with sub-MHz linewidth[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 934.
- [7] HUANG M Q, SUN Z L, YAN G, et al. Revealing intrinsic domains and fluctuations of moiré magnetism by a wide-field quantum microscope[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 5259.
- [8] GLENN D R, FU R R, KEHAYIAS P, et al. Micrometer-scale magnetic imaging of geological samples using a quantum diamond microscope[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2017, 18(8): 3254-3267.
- [9] MONGE R, DELORD T, THIERING G, et al. Resonant versus nonresonant spin readout of a nitrogen-vacancy center in diamond under cryogenic conditions[J]. *Physical Review Letters*, 2023, 131(23): 236901.
- [10] TAKADA K, KATSUMI R, YATSUI T. Sensitivity improvement of a single-NV diamond magnetometer using a chiral waveguide[J]. *Optics Express*, 2024, 32(1): 795-802.
- [11] RUF M, WEAVER M J, VAN DAM S B, et al. Resonant excitation and Purcell enhancement of coherent nitrogen-vacancy centers coupled to a Fabry-Perot microcavity[J]. *Physical Review Applied*, 2021, 15(2): 024049.
- [12] BARRY J F, STEINECKER M H, ALSID S T, et al. Sensitive AC and DC magnetometry with nitrogen-vacancy-center ensembles in diamond[J]. *Physical Review Applied*, 2024, 22(4): 044069.
- [13] DOGARIU A, MICHAEL J B, SCULLY M O, et al. High-gain backward lasing in air[J]. *Science*, 2011, 331: 442-445.
- [14] PEDREROS BUSTOS F, BONACCINI CALIA D, BUDKER D, et al. Remote sensing of geomagnetic fields and atomic collisions in the mesosphere[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 3981.
- [15] SUEBKA S, MCLEOD E, SU J. Ultra-high-Q free-space coupling to microtoroid resonators[J]. *Light: Science & Applications*, 2024, 13: 75.
- [16] ARIUNBOLD G O, SAUTENKOV V A, ROSTOVTSSEV Y V, et al. Ultrafast laser control of backward superfluorescence towards standoff sensing[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(2): 021114.
- [17] SAFRONOVA M S, BUDKER D, DEMILLE D, et al. Search for new physics with atoms and molecules[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2018, 90(2): 025008.
- [18] SEKIGUCHI N. Diamond quantum magnetometer with dc sensitivity of sub-10 pT Hz^{-1/2} toward measurement of biomagnetic field[J]. *Physical Review Applied*, 2024, 21, 064010.
- [19] JI X C, OKAWACHI Y, GIL-MOLINA A, et al. Ultra-low-loss silicon nitride photonics based on deposited films compatible with foundries[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023, 17(3): 2200544.
- [20] DING D s, LIU Z k, SHI B s, et al. Enhanced metrology at the critical point of a many-body Rydberg atomic system[J]. *Nature Physics*, 2022, 18(12): 1447-1452.
- [21] COLOMBO S, PEDROZO-PENAFIEL E, ADIYATULLIN A F, et al. Time-reversal-based quantum metrology with many-body entangled states[J]. *Nature Physics*, 2022, 18(8): 925-930.
- [22] LI T C, LIU R B, ZU C. Quantum sensing[J]. *Advanced Quantum Technologies*, 2025, 8(4): 2500120.
- [23] GUO X H, DELEGAN N, KARSCH J C, et al. Tunable and transferable diamond membranes for integrated quantum technologies[J]. *Nano Letters*, 2021, 21(24): 10392-10399.
- [24] ZHANG S C, ZHAO L, et al. High-voltage current sensing with nitrogen-vacancy centers in diamond[J]. *APL Photonics*, 2025, 10(3): 036117.
- [25] MELENDEZ A L, DAS S, RODRIGUEZ F A, et al. Quantum sensing of broadband spin dynamics and magnon transport in antiferromagnets[J]. *Science Advances*, 2025, 11(26): eadu9381.
- [26] ZHENG P, SEMANCIK S, BARMAN I. Quantum vibropolaritonic sensing[J]. *Science Advances*, 2025, 11(33): eady7670.
- [27] TIAN S, HUANG H Q, GUO H Z, et al. Fabrication of

- high-brightness silicon vacancy color-center ensembles in 4H-SiC via MeV particles[J]. *Applied Physics Letters*, 2025, 127(6): 064002.
- [28] KAMBA M, HARA N, AIKAWA K. Quantum squeezing of a levitated nanomechanical oscillator[J]. *Science*, 2025, 389(6766): 1225-1228.
- [29] WEISS L R, SMITH G T, MURPHY R A, et al. A high-resolution molecular spin-photon interface at telecommunication wavelengths[J]. *Science*, 2025, 390(6768): 76-81.
- [30] HE G H, GONG R T, WANG Z P, et al. Probing stress and magnetism at high pressures with two-dimensional quantum sensors[J]. *Nature Communications*, 2025, 16: 8162.
- [31] ASLAM N, ZHOU H Y, URBACH E K, et al. Quantum sensors for biomedical applications[J]. *Nature Reviews Physics*, 2023, 5(3): 157-169.
- [32] DEMILLE D, HUTZLER N R, REY A M, et al. Quantum sensing and metrology for fundamental physics with molecules[J]. *Nature Physics*, 2024, 20(5): 741-749.
- [33] ESAT T, BORODIN D, OH J, et al. A quantum sensor for atomic-scale electric and magnetic fields[J]. *Nature Nanotechnology*, 2024, 19(10): 1466-1471.
- [34] FANG Honghua, WANG Xiaojie, MARIE X, et al. Quantum sensing with optically accessible spin defects in van der Waals layered materials[J]. *Light: Science & Applications*, 2024, 13: 303.
- [35] ROVNY J, GOPALAKRISHNAN S, JAYICH A C B, et al. Nanoscale diamond quantum sensors for many-body physics[J]. *Nature Reviews Physics*, 2024, 6(12): 753-768.
- [36] BONIZZONI C, GHIRRI A, SANTANNI F, et al. Quantum sensing of magnetic fields with molecular spins[J]. *NPJ Quantum Information*, 2024, 10: 41.
- [37] TOBAR G, MANIKANDAN S K, BEITEL T, et al. Detecting single gravitons with quantum sensing[J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 7229.
- [38] YOUSEFJANI R, HE X J, CAROLLO A, et al. Nonlinearity-enhanced quantum sensing in Stark probes[J]. *Physical Review Applied*, 2025, 23: 014019.
- [39] FISHER P, ZAPPACOSTA A, FUHRMANN J, et al. High-resolution nanoscale AC quantum sensing in CMOS compatible SiC[J]. *Nano Letters*, 2025, 25(30): 11626-11631.
- [40] SINGH H, D'SOUZA N, ZHONG K Y, et al. Room-temperature quantum sensing with photoexcited triplet electrons in organic crystals[J]. *Physical Review Research*, 2025, 7: 013192.
- [41] POGORZELSKI J, HORSTHEMKE L, HOMRIGHAUSEN J, et al. Compact and fully integrated LED quantum sensor based on NV centers in diamond[J]. *Sensors*, 2024, 24(3): 743.
- [42] HUANG Z X, LAMI L, WILDE M M. Exact quantum sensing limits for bosonic dephasing channels[J]. *PRX Quantum*, 2024, 5(2): 020354.
- [43] CHENG K H, KAZI Z, ROVNY J, et al. Massively multiplexed nanoscale magnetometry with diamond quantum sensors[J]. *Physical Review X*, 2025, 15(3): 031014.
- [44] FANG H H, WANG X J, MARIE X, et al. Quantum sensing with optically accessible spin defects in van der Waals layered materials[J]. *Light: Science & Applications*, 2024, 13(1): 303.
- [45] LIU Yuchen, CHENG Yuanbin, PAN Xingbo, et al. Quantum integrated sensing and communication via entanglement[J]. *Physical Review Applied*, 2024, 22(3): 034051.
- [46] CHEN X D, WANG E H, SHAN L K, et al. Quantum enhanced radio detection and ranging with solid spins[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 1288.
- [47] JI W T, LIU Z X, GUO Y H, et al. Correlated sensing with a solid-state quantum multisensor system for atomic-scale structural analysis[J]. *Nature Photonics*, 2024, 18(3): 230-235.
- [48] 唐水晶, 李贝贝, 肖云峰. 回音壁模式光学微腔传感[J]. *物理*, 2019, 48(3): 137-147.
- TANG Shuijing, LI Beibei, XIAO Yunfeng. Echo wall mode optical microcavity sensor[J]. *Physics*, 2019, 48(3): 137-147.
- [49] TAKEMURA Y, HAYASHI K, YOSHII Y, et al. Broadband microwave antenna for uniform manipulation of millimeter-scale volumes of diamond quantum sensors[J]. *Journal of Applied Physics*, 2022, 132(22): 224501.
- [50] DING S W, HAAS M, GUO Xinghan, et al. High-Q cavity interface for color centers in thin film diamond[J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 6358.
- [51] AGHAEI RAD H, AINSWORTH T, ALEXANDER R N, et al. Scaling and networking a modular photonic quantum computer[J]. *Nature*, 2025, 638(8052): 912-919.
- [52] YANG J, VAN GASSE K, LUKIN D M, et al. Titanium:

- sapphire-on-insulator integrated lasers and amplifiers[J]. [Nature](#), 2024, 630(8018): 853-859.
- [53] REYNOLDS T, RIESEN N, MELDRUM A, et al. Fluorescent and lasing whispering gallery mode microresonators for sensing applications[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2017, 11(2): 1600265.
- [54] ZHANG Y J, KUANG Y Q, ZHANG Z D, et al. High-sensitivity refractive index sensors based on Fano resonance in the plasmonic system of splitting ring cavity-coupled MIM waveguide with tooth cavity[J]. *Applied Physics A*, 2018, 125(1): 13.
- [55] CHEGEL R. Comparative study of third harmonic generation in carbon and silicene nanotubes under magnetic fields[J]. [Scientific Reports](#), 2024, 14: 31227.
- [56] YUAN J Y, SHI L Y, YUE L, et al. Dynamical interplay between superconductivity and pseudogap in cuprates as revealed by terahertz third-harmonic generation spectroscopy[J]. [Science Advances](#), 2024, 10(6): eadg9211.
- [57] DI GASPARA A, SONG Chao, SCHIATTARELLA C, et al. Compact terahertz harmonic generation in the Reststrahlenband using a graphene-embedded metallic split ring resonator array[J]. [Nature Communications](#), 2024, 15: 2312.
- [58] LI B Y, LIU F, CHEN M, et al. Spectral modulation of high-order harmonics in relativistic laser-solid interaction[J]. [Physical Review E](#), 2024, 109(2): 025212.
- [59] CHOU CHAU Y F. Boosting second harmonic generation efficiency and nonlinear susceptibility via metasurfaces featuring split-ring resonators and bowtie nanoantennas[J]. [Nanomaterials](#), 2024, 14(8): 664.
- [60] PARK S, YU J, BOEHM G, et al. Electrically tunable third-harmonic generation using intersubband polaritonic metasurfaces[J]. *Light: Science & Applications*, 2024, 13: 169.
- [61] KATSUMI R, TAKADA K, KAWAI K, et al. High-sensitivity nanoscale quantum sensors based on a diamond micro-resonator[J]. [Communications Materials](#), 2025, 6: 49.
- [62] LIU B, ZHANG L H, WANG Q F, et al. Cavity-enhanced Rydberg atom microwave receiver[J]. [Chinese Physics Letters](#), 2025, 42(5): 053201.