

文章编号: 1000-7032(XXXX)XX-0001-11

基于 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 复合硅基微球腔回音壁模式的多级调制

薄夫森^{1,2}, 叶俊杰^{1,2}, 王建伟¹, 潘 登¹, 孙家鹏¹, 刘 禄¹,
李寒阳^{1,2*}, 刘志海^{1,2}

(1. 哈尔滨工程大学物理与光电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;
2. 哈尔滨工程大学纤维集成光学教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 本文聚焦于相变材料 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST) 复合微球腔的回音壁模式 (WGM) 光谱多级调制展开研究。其目标在于借助 GST 材料相态可逆的特性, 达成高效且可重复的 WGM 光谱多级调控。为突破传统 WGM 微腔多级调制的调制深度不足和中间态不稳定的瓶颈, 本研究过程中, 先制备了 GST 复合微球腔并对其光学性能进行测试, 随后结合不同相态下的仿真分析, 对比该复合微球腔与本征硅基微球腔在基本光学特性方面的差异, 最后开展了消光比测试以及多级调制实验。研究结果显示, GST 复合微球腔的 WGM 共振峰有效维持了本征硅基微球腔的谐振特性, 并且具备较高的品质因子。同时, GST 复合微球腔在静态相变调制下能够稳定且可重复地实现约 15 dB 的强度调制, 获得七个稳定的调制层级。本研究为多级光存储、可编程光调制以及集成传感等应用提供了切实可行的器件方案与实验依据, 在集成光学领域展现出广阔的应用潜力。

关 键 词: 复合微球腔; $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$; 回音壁模式; 高品质因子; 光谱多级调制

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20260082

CSTR: 32170.14.CJL.20260082

Multilevel Modulation of Whispering Gallery Modes Based on $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ -coated Silicon Microsphere Cavities

BO Fusen^{1,2}, YE Junjie^{1,2}, WANG Jianwei¹, PAN Deng¹, SUN Jiapeng¹,
LIU Lu¹, LI Hanyang^{1,2*}, LIU Zhihai^{1,2}

(1. College of Physics and Optoelectronic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, Heilongjiang, China;
2. Key Laboratory of In-fiber Integrated Optics of Ministry of Education, Harbin Engineering University,
Harbin 150001, Heilongjiang, China)

* Corresponding Author, E-mail: hanyang_li@hrbeu.edu.cn

Abstract: This paper focuses on the investigation of multilevel modulation of whispering gallery mode (WGM) spectra based on the $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST) phase - change material composite microsphere cavity. Its objective is to achieve efficient and reproducible multilevel regulation of WGM spectra by virtue of the reversible phase transition property of GST materials. To break through the bottlenecks of insufficient modulation depth and unstable intermediate states in traditional multilevel modulation of WGM microcavities, in the course of this study, the GST-coated microsphere cavity was first fabricated and its optical properties were tested. Subsequently, combined with simulation analyses under different phase states, the differences in basic optical properties between this composite microsphere cavity and intrinsic silicon - based microsphere cavities were compared. Finally, extinction ratio tests and multilevel modulation experiments were carried out. The research results show that the WGM resonance peaks of the GST-coated microsphere cavity effectively maintain the resonant characteristics of intrinsic silicon - based microsphere cavities and possess a high quality factor. Meanwhile, the GST-coated microsphere cavity can stably and reproducibly

收稿日期: XXXX-XX-XX; 修订日期: XXXX-XX-XX

基金项目: 国家自然科学基金(52271344); 中央高校基本科研业务费

Supported by National Natural Science Foundation of China (52271344) and Fundamental Research Funds for the Central Universities.

achieve an intensity modulation of approximately 15 dB under static phase transition modulation, with seven stable modulation levels obtained. This study provides a feasible device scheme and experimental basis for applications such as multilevel optical storage, programmable optical modulation and integrated sensing, and exhibits broad application prospects in the field of integrated optics.

Keywords: Composite Microsphere Cavity; $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$; Whispering Gallery Modes; High Quality Factor; Multilevel Spectral Modulation

1 引 言

光学微腔,尤其 WGM 模式的微球腔,由于其具有超高 Q 值和极小的体积等优点,是基础光物理研究与高性能光子器件开发的重要平台^[1-2]。且因其加工方便、场增强效应明显等优势,成为构建高灵敏度传感器及非线性光学元件等的优良载体^[3-5]。然而,传统的单一介质微球腔一旦制备完成,其光学谐振特性就固定不变。因此其无法满足现代光通信和复杂传感系统等对器件“智能可调”与“多功能集成”日益增长的需求^[6]。

针对光学微腔的主动调制方法,研究者们发展热光、电光、载流子色散等多种调谐手段^[7-9]。但这些传统的调谐方法大多是基于持续的能量输入以维持状态,难以实现非易失的多级稳定调控,因此其在低功耗可编程光子电路等前沿领域应用具有局限性^[10-11]。然而近年来,具有相变过程可逆和非易失等特点的相变材料(Phase Change Materials, PCMs)成为突破这一困境的有效方式之一^[12]。其中, $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST)因在非晶态与晶态之间具有显著且可逆的光学常数(折射率与消光系数)突变,和相变过程的高度可控性而受研究者们关注^[13-14]。所以将 GST 薄膜与光学微腔结合,利用 GST 的相变过程调制腔体的有效折射率与损耗,从而实现对谐振特性的动态和非易失重构。

本研究聚焦于 GST 的优异相变特性和高 Q 值二氧化硅微球腔的强场局域的优势,构建并制备一种 GST-二氧化硅复合微球腔(GST 复合微球腔)。其不仅继承了二氧化硅微球腔本身低损耗、高 Q 值的优势,而且能够利用表面的纳米级 GST 薄膜,实现其通过外部激励(如光脉冲)进行快速、可逆、非易失的调谐^[15]。本文重点研究基于 GST 复合微球腔的 WGM 光谱的多级调制行为,研究中通过精确控制 GST 的相变程度(GST 的晶化程度),实现谐振波长与透射谱的多阶、离散且稳定的状态切换,并系统的进行其调制的消光比和可

重复性等关键性能指标的特征。本研究为开发非易失、可重构的微型光子调制器与存储器提供了一种有效的器件方案的同时,也为探索基于相变材料的神经形态光子计算与多值光逻辑奠定了一定基础。

2 复合微球腔的制备和表征

2.1 本征硅基微球腔制备和表征

微球腔的材料与结构直接影响其 Q 值与 WGM 谐振特性。为获得低损耗、高 Q 值的本征硅基微球腔,本研究选用单模光纤为前驱体材料,并采用光纤熔接机(FSM-80S)进行局部熔融与拉伸法制备,具体流程如图 1(a):首先将光纤剥除涂覆层并擦拭干净,固定于熔接机电极两侧;通过手动控制放电频率、先对光纤中段进行高温熔融,同时进行匀速拉伸,再根据需要的微球尺寸在光纤中

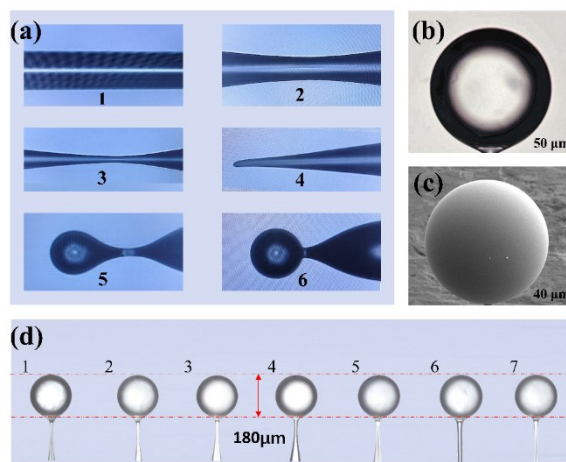


图 1 (a) 光纤熔接机制备光纤微球流程;(b) 光纤微球的显微图像;(c) 电子显微镜图像;(d) 直径约 180 μm 本征硅基微球腔的重复制备

Fig. 1 (a) Fabrication process of fiber microspheres using a fiber fusion splicer; (b) Microscopic images of the fiber microspheres; (c) Electron microscopy images of the fiber microspheres; (d) Reproducible fabrication of intrinsic silicon-based microsphere cavities with a diameter of approximately 180 μm

段预留出部分形成锥形光纤结构;随后在锥腰附近再次施加短时高强度放电,同时手动快速拉伸形成具有尖端的光纤,再将具有尖端的光纤放置熔融区域在表面张力作用下自发收缩、球化,最终形成轮廓对称、表面光滑的硅基微球腔^[16-17]。

如图 1(b)、(c)为制备微球腔的显微镜图像与 SEM 图像。可知微球腔整体呈高度对称的球形,轮廓清晰,无明显形貌缺陷;同时表面连续平滑,SEM 放大观察未发现明显颗粒残留或裂纹,说明该工艺能够得到较高球形度与较低表面缺陷的微球,有利于降低散射损耗。此外,图 1(d)对直径约 $180\text{ }\mu\text{m}$ 的微球腔的统计表明,在相同工艺下多次制备得到的微球直径波动较小、形貌一致性较好,体现出较好的重复性与稳定性,可满足高 Q 微球腔对结构均匀性与表面质量的要求。

2.2 复合微球腔制备和表征

完成本征硅基微球腔的制备后,本研究在微球腔表面沉积纳米级 GST 相变薄膜,构建 GST 复合微球腔。复合结构采用磁控溅射法制备^[18]:筛选球形度良好的微球腔后固定于样品台并置入高真空腔室,通过控制氩气氛围、溅射功率与沉积时间,以 $0.1 - 0.2\text{ nm/s}$ 的速率在微球表面沉积厚度

约 $10 - 100\text{ nm}$ 的 GST 薄膜,并通过样品台旋转提高膜层覆盖均匀性;随后进行低温退火以提升薄膜致密性,获得附着良好且覆盖连续的 GST 复合微球腔。为提高多次热激励与相变循环过程中的环境稳定性,在 GST 层外表面依次溅射沉积 ITO 与 Au 薄膜。复合微球腔的结构示意及截面 SEM 如图 2(a):其中 ITO 层具有较高光透性,可在不显著削弱光场耦合的前提下抑制 GST 在空气中的氧化^[19];Au 层提供良好的导电导热性,有助于在高功率光驱条件下实现更均匀的热分布与相变过程,以提升 GST 复合微球腔的热循环稳定性^[20]。

为探究 GST 涂覆微球腔对微球腔形貌的变化,本实验分别对不同直径复合微球腔在非晶态和晶态时的结构及表面形貌进行表征。由图 2(b)可知:GST 涂覆微球腔的整个过程中不会破坏微球完整性和球形对称性,并且 GST 可以均匀覆盖到整个微球表面形成完整包覆层;相较于本征微球腔的光滑表面,在 GST 涂覆后形成的表面呈现轻微纹理和细微粗糙特征,此现象是薄膜在沉积与固化过程所引起的表面微观形貌变化。该层包覆结构不仅确保 WGM 模式在腔体边界处的有效约束,而且为后续实现相变调控提供界面区域。

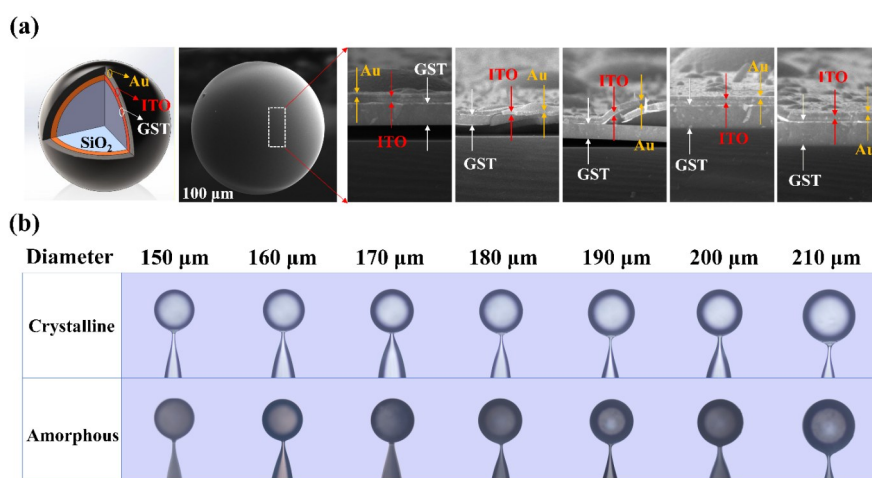


图 2 (a) GST 复合微球腔的结构示意及 SEM 图像; (b) 两种相态下的 GST 复合微球腔

Fig. 2 (a) Structural schematic and SEM images of the GST-coated microsphere cavity; (b) GST-coated microsphere cavities in two phase states

3 实验装置

为了将 GST 复合微球腔的调控能力应用于具体器件中,本研究搭建了一套 GST 复合微球腔的光谱调制实验装置(如图 3)。此装置是通过调制光诱发 GST 相变,并在同一耦合条件下同步测量

WGM 透射谱,从而进行谐振峰强度与共振波长变化的表征,最后实现对复合微球腔的主动调制。

整个装置按功能分为输入光源区域、光谱接收区域、耦合区域和调制区域。输入光源区域提供探测光,包括可调谐窄带激光器(TNL)、宽带

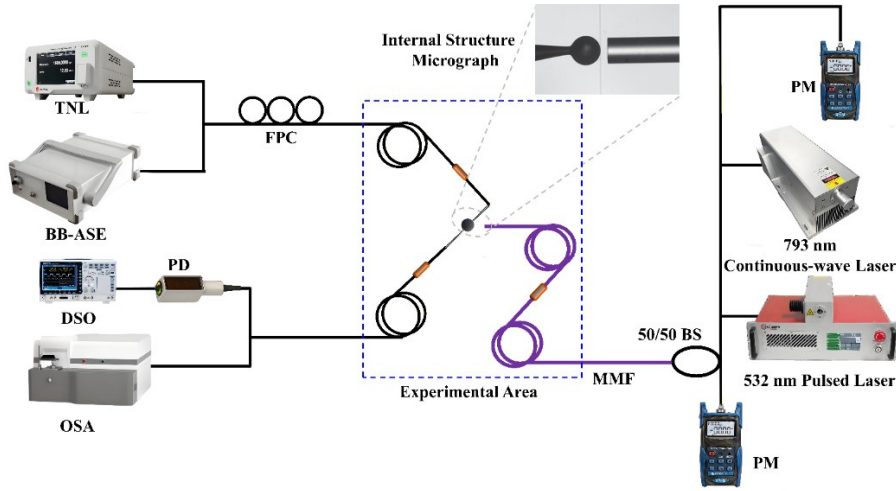


图3 GST复合微球腔光谱调制装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the spectral modulation setup for GST-coated microsphere cavities

ASE光源(BB-ASE)以及光纤偏振控制器(FPC)。可调谐激光器(中心波长约1550 nm)用于高分辨扫描单个谐振峰,宽带ASE光源(1525 - 1570 nm)用于获取宽带透射光谱;两路光源经光纤开接入同一输入光纤,经偏振控制器后耦合进入锥形光纤输入端。光谱接收区域用于采集透射信号:锥形光纤输出端直接接入光谱分析仪(OSA)记录宽带光谱,为得到更加精密的图谱锥形光纤输出端也可接入光电探测器(PD)并由数字示波器(DSO)采集,用于记录可调谐激光扫描得到的透射曲线。

耦合区域由锥形光纤与GST复合微球腔组成。锥形光纤锥腰直径约1.5 μm ,并预先固定在石英载玻片上;GST复合微球腔通过导电胶粘接在三维位移平台上。在显微镜下将锥腰对准微球腔赤道位置,缓慢调节间距并实时监测透射谱,使耦合状态由欠耦合调整至接近临界耦合;后续调制保持耦合位置不变,仅改变GST的相态与调制条件。调制区域包括793 nm连续激光(793 nm Continuous-wave Laser)、532 nm脉冲激光(532 nm Pulsed Laser)、多模光纤(MMF)、50/50光纤分束器(50/50 BS)与功率计(PM)监测链路。两路调制激光分别通过耦合器接入多模光纤合束器,合束后由同一多模调制光纤传输;其后接入50/50分束器,一路连接显微物镜将调制光聚焦到微球腔赤道,另一路接入功率计用于功率监测与标定。

4 复合微球腔的光学特性

4.1 性能参数

为建立后续调制的基准,本研究采用输入光

源区域、光谱接收区域与耦合区域,对本征硅基微球腔的WGM透射谱进行性能参数表征。实验中将锥形光纤(锥腰约1.5 μm)一端经偏振控制器连接可调谐激光器作为窄线宽探测光源,另一端连接光电探测器与示波器实时记录透射强度随波长的变化。通过三维位移台将锥形光纤缓慢靠近直径 $D \approx 138 \mu\text{m}$ 的微球腔,在最佳耦合位置将系统调节至临界耦合附近,获得高对比度的WGM谐振透射光谱如图4(a)。对得到谐振谷进行洛伦兹拟合,并计算Q值^[4]:

$$Q = \frac{\lambda_{\text{WGM}}}{\text{FWHM}} \quad (1)$$

式中, λ_{WGM} 为共振波长,FWHM为其对应的半高全宽。也可从透射谱中得到自由光谱范围(FSR)。对WGM模式与能量耦合进行分析以研究锥形光纤与硅基微球腔的能量传输规律。锥形光纤波导靠近微球腔表面时,波导模式倏逝场与WGM模式场发生空间重叠和能量交换。耦合过程可由耦合模理论^[21](Coupled Mode Theory, CMT)描述,耦合系数为:

$$\kappa = \int E_{\text{wg}}(r) \cdot E_{\text{cav}}(r) dr \quad (2)$$

式中: E_{wg} 与 E_{cav} 分别为波导与腔体模式的电场分布, κ 反映了两者的能量耦合强度。根据CMT理论,系统的耦合效率可表示为:

$$\eta = \frac{\kappa^2}{(\kappa + \gamma)^2} \quad (3)$$

式中: γ 为腔内内在损耗系数。 $\kappa = \gamma$ 时,系统达到临界耦合,波导中透射光强出现最深共振峰,即腔内能量积累最大^[22]。为判断耦合系统的运行状态并实现耦合深度的定量描述,定义耦合深度(Cou-

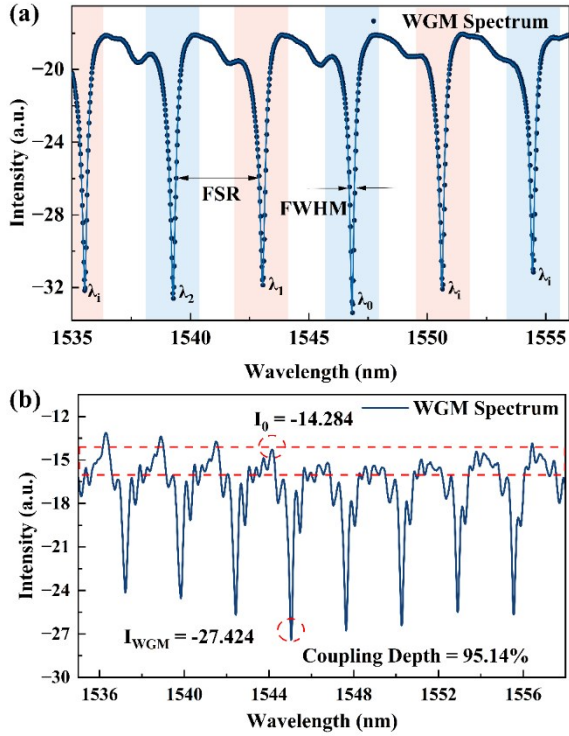


图 4 (a)本征硅基微球腔的 WGM 谐振峰及其拟合曲线;
(b)本征硅基微球腔的 WGM 透射光谱

Fig. 4 (a) WGM resonant peaks and their fitting curves of the intrinsic silicon-based microsphere cavity; (b) WGM transmission spectra of the intrinsic silicon-based microsphere cavity

pling Depth)为:

$$\text{Coupling Depth} = \frac{I_0 - I_{\text{WGM}}}{I_0} \times 100\% \quad (4)$$

式中: I_0 为未耦合时透射光谱的基线强度,记录此时 WGM 共振峰处的最小透射强度 I_{WGM} 。同时为保证数值计算结果的准确性,将所有光强数据转化为线性单位($I = 10^{\text{IdB}/10}$),以本征硅基微球腔-锥形光纤耦合为例,在微调耦合间距后,测得其耦合深度约 95.14%,如图 4(b)所示。该参数反映了入射光中被成功耦合进入微球腔并在腔内形成稳定共振模式的光能比例,也能够有效评估光场能量在波导与腔体之间的耦合效率和模式之间匹配程度,所以本研究的后续实验均在临界耦合状态进行。

4.2 复合微球腔光学特性仿真

接下来对 GST 在非晶态与晶态下的光吸收特性进行了仿真分析,以理解 GST 薄膜在复合微球腔中所起的调制作用,并为其相变调控提供理论依据。因此,为研究相变材料 GST 层与硅基微球腔内倏逝场的作用机理,基于时域有限差分法

(FDTD)建立了硅基微球腔-GST 薄膜的仿真模型。模型中硅基微球腔的直径 $d=30 \mu\text{m}$ 以及折射率分别对应 GST 的非晶态($n_a=3.9+0.02k$)、晶态($n_c=6.5+1.1k$)以及介于晶态与非晶态之间的四等步长的折射率,外侧包覆一圈均匀厚度为 40 nm 的 GST 薄膜形成复合微球腔,背景介质为空气。仿真结果如图 5(a)和(b)表征了不同结晶程度的 GST 光学特性得出:非晶态时高场区域主要分布于硅和 GST 界面附近, GST 层内部的场强分布较为平缓,外侧空气中的倏逝场占有一定比例;晶态时高场区域在 GST 层内部呈现出最为集中的分布形态,模式在径向上的主峰相对于非晶态出现清晰的外移,表现为更多的能量被束缚在 GST 层内。同时在此仿真模型基础上添加锥形光纤波导(Tapered Fiber Waveguide)在复合 GST 微腔附近,再次对晶态与非晶态 GST 的光吸收特性进行仿真。仿真结果如图 5(c),在近红外工作波段(约 1550 nm),晶态 GST 有更高的消光系数,导致电场强度显著下降;而非晶态 GST 吸收较弱,可在

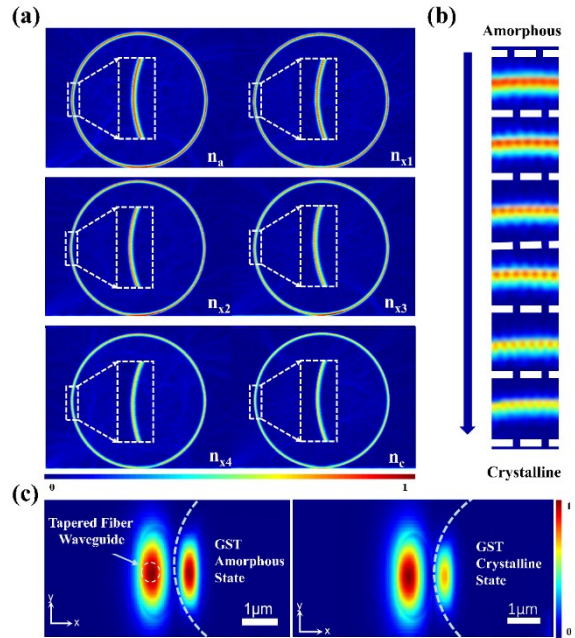


图 5 (a)复合微球腔的耦合电场随 GST 相态变化;(b) GST 非晶态至晶态复合微球腔耦合电场的对比;
(c)非晶态和晶态 GST 复合微球腔的光吸收仿真

Fig. 5 (a) Coupling electric field of the composite microsphere cavity varying with GST phase states; (b) Comparison of the coupling electric field of the composite microsphere cavity from GST amorphous state to crystalline state; (c) Light absorption simulations of the GST-coated microsphere cavity in amorphous and crystalline states

维持模式完整性的同时实现适度的折射率调制。结果表明,通过晶态和非晶态之间的相变切换,可在复合微球腔中实现对模场分布、谐振位置及耦合强度的可逆调控,为构建相变可重构光学谐振器提供了理论依据。

4.3 微球腔的基本光学特性对比

进一步对 GST 复合微球腔进行了同条件的光谱测试,并开展本征腔与复合腔基本光学特性的对比。该对比聚焦二者在相同模式阶数下 Q 值的变化、FSR 的一致性以及谐振对比度。图 6 (a) 和 (b) 对比硅基光纤微球腔与 GST 复合微球腔的 WGM 光谱。图中清楚地看到,涂覆 GST 薄膜后,原本微腔的共振峰整体向长波方向发生明显红移。这一红移效应^[23]主要因为 GST 层较高的折射率,改变了腔体边界处的等效折射率分布,使得光在腔体内的有效光程增大,使回音壁模式的相位匹配条件改变,引起共振波长向长波方向偏移。同时为进一步验证模式周期性与场分布稳定性,对图 6(a)、(b) 的透射光谱分别进行快速傅里叶变换(FFT)分析,由空间频谱主峰提取自由光谱

范围 FSR,采用公式 $L_{\text{eff}} = \lambda^2 / \text{FSR}$ 计算微腔有效腔长(L_{eff} 为有效腔长, λ 为光谱中心波长),结果表明本征腔与 GST 复合腔均对应的 FSR 分别约为 3.135 nm 与 1.957 nm,有效腔长分别约为 763.2 μm 与 1224 μm ,GST 复合后有效光程明显增大,与谐振峰红移规律高度一致,证明 GST 层对等效光程与模场分布的调控作用。

同时,对硅基微球腔和 GST 复合微球腔在临界耦合下进行 WGM 谐振测试,并用洛伦兹函数拟合其共振峰,得到线宽和 Q 值,具体 5 组参数均值如表 1:相较于本征硅基微球腔,虽然 GST 复合微球腔的 Q 值略有下降,但仍维持在 10^7 量级;FWHM 表现为小幅展宽;中心波长 λ 发生明显红移。其中图 6(c) 和 (d) 为典型的 WGM 光谱,对应的本征硅基微球腔样品对应的 Q 值为 1.55×10^8 ,而 GST 复合微球腔的 Q 值为 0.77×10^7 ,它们均表现为狭窄而深的线型特征,说明复合结构的谐振特性得到有效保留。

表 1 微腔参数均值对比 ($n=5$)

Tab. 1 Comparison of Average Microcavity Parameters ($n=5$)

Characteristic Parameters	Silicon Microsphere Cavity	GST-coated microsphere cavity
Q	1.554×10^7	0.604×10^7
FWHM/nm	1.024×10^{-5}	3.248×10^{-4}
λ/nm	1568.08334	1569.89954
$R/\mu\text{m}$	160	170

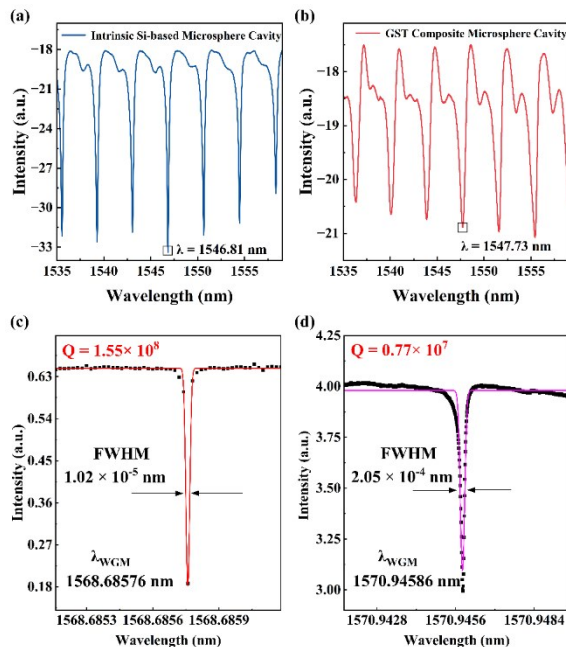


图 6 (a) 本征硅基微球腔的 WGM 光谱; (b) GST 涂层微球腔的 WGM 光谱; (c) 本征硅基微球腔的 Q 值; (d) GST 涂层微球腔的 Q 值

Fig. 6 (a) WGM spectra of the intrinsic silicon-based microsphere cavity; (b) WGM spectra of the GST-coated microsphere cavity; (c) Q -factor of the intrinsic silicon-based microsphere cavity; (d) Q -factor of the GST-coated microsphere cavity

5 GST 复合微球腔多级调制研究

5.1 GST 复合微球腔谐振消光比测试

接下来对 GST 复合微球腔进行谐振消光比测试。该测试能对比 GST 处于非晶态与晶态,且目标 WGM 谐振峰在固定波长处透射强度的最大时,量化其“开”与“关”两种极端状态的调制深度与信号区分能力。

根据搭建的 GST 复合微球腔耦合测试系统开展静态调谐实验。每一轮测试的操作流程为:首先利用 532 nm 脉冲激光^[24]对 GST 复合微球腔复位;随后关闭所有调制光,仅保留弱功率探测光,在临界耦合附近实现锥形光纤与微球腔耦合,并扫描透射谱,选取同一阶次 WGM 模式,记录非晶态的谐振峰强度 I_A (dB) 与共振波长 λ_A (nm)。晶态测量时,保持耦合条件不变,开启 793 nm 连续激光^[24],通过控制功率将 GST 从非晶态转化为晶

态;相变完成并冷却至室温后关闭 793 nm 激光,再次用探测光扫描同一谐振模,记录晶态下的谐振峰强度 $I_C(\text{dB})$ 与共振波长 $\lambda_C(\text{nm})$ 。比较两种相态下的强度与波长变化,即可量化 GST 相变对微腔谐振特性的调制效果。

将谐振消光比定义为 $\text{ER}=|I_A - I_C|(\text{dB})$,共振波长变化量为 $\Delta\lambda=\lambda_C-\lambda_A$ 。因晶态 GST 的折射率与吸收系数高于非晶态,实验中观测到 $\lambda_C > \lambda_A$,表现为共振波长红移如图 7(a)。重复上述“非晶态-晶态”相变与光谱测量共 12 次,测试结果如图 7(b)-(d)所示,统计结果如表 2,结果表明 GST 复

表 2 消光比测试数据统计

Tab. 2 Statistical Results of ER Test Data

Characteristic Parameters	Average Value	Standard Deviation
I_A/dB	-37.66	0.67
I_C/dB	-22.46	0.16
λ_A/nm	1546.79	0.007
λ_C/nm	1547.02	0.022
ER/dB	15.20	0.70

合微球腔在静态相变调制下可稳定实现约 15 dB 量级的强度调制,并具有良好的重现性,为后续多级可调制实验提供基础。

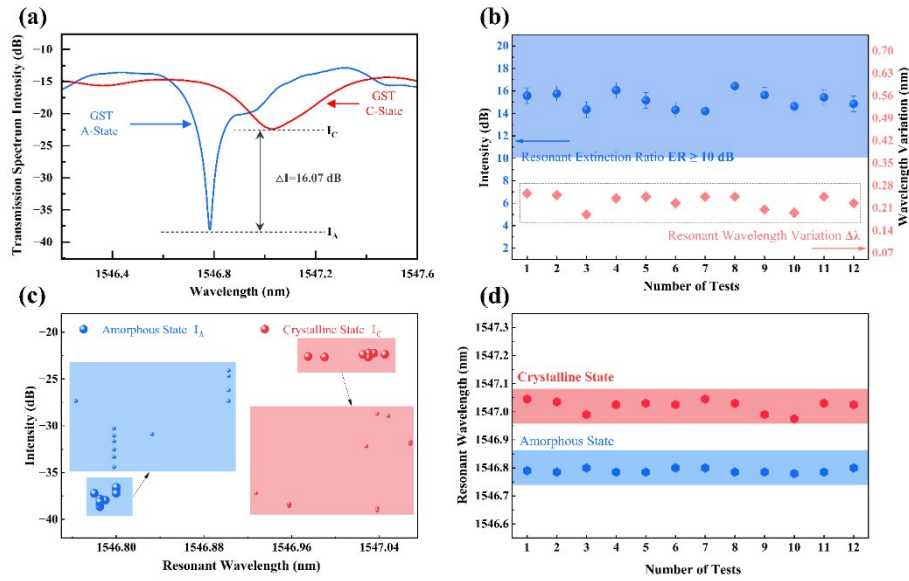


图 7 (a) GST 两种相态下复合微球腔的 WGM 谐振光谱图; (b) 复合微球腔的消光比及共振波长变化量的一致性; (c) 两种相态下复合微球腔的谐振特性; (d) 两种相态下复合微球腔的共振波长

Fig. 7 (a) WGM resonant spectra of the GST-coated microsphere cavity in two GST phase states; (b) Consistency between the extinction ratio and the variation of resonant wavelength of the GST-coated microsphere cavity; (c) Resonant characteristics of the GST-coated microsphere cavity in two phase states; (d) Resonant wavelengths of the GST-coated microsphere cavity in two phase states

5.2 GST 复合微球腔的多级调制

为实现 GST 复合微球腔的光谱主动调制,实验使用实验装置中的四个模块并采用以下参数进行相关操作:擦除使用 532 nm 纳秒脉冲激光(脉冲宽度 10 ns,单脉冲能量 0.423 - 1.206 mJ 可调),写入使用 793 nm 连续激光(输出功率 4 - 11 mW 可调)。在多级调制过程中 GST 从非晶态向晶态的转变是热激活成核与晶粒生长的渐进过程^[12],并且通过逐步增加 793 nm 连续激光的功率,可精确调控 GST 的晶化分数,使其处于部分结晶状态^[24]。随晶化分数增加,GST 的折射率 n 与消光系数 k 呈单调增大(接近线性关系)^[14]。部分结晶态可视为非晶与晶态组分的有效介质,其光学常

数由组分体积分数加权决定。具体过程为:首先用 532 nm 脉冲激光使 GST 恢复至完全非晶态,获得的 WGM 光谱定义为 M_0 ,记录该模式的谐振峰强度 I_{M0} 与共振波长 λ_{M0} 。保持耦合条件基本不变,仅改变 793 nm 连续激光的激励条件,使 GST 形成结晶程度不同且在测试时间尺度内稳定存在的部分结晶态;当写入后 WGM 光谱稳定在新的水平时,即定义为新的调制级 $M_X(X=1,2,3\cdots)$ 。对每一级,关闭写入光,仅用锥形光纤在近临界耦合条件下读取同一阶次 WGM 模式的透射谱,记录 I_{MX} 与 λ_{MX} 。重复上述“复位—写入—读出”步骤,可在同一 GST 复合微球腔上从 M_0 依次获得多个稳定调制级。

图 8 展示 GST 复合微球腔在相变调制下的 WGM 透射光谱变化,在宽波段范围内如图 8(a),非晶态与晶态下均可观测到稳定的 WGM 谐振谷,同时谐振谷深度(透射强度 I_A 和 I_C)会随相态发生显著变化,而当放大单一谐振后如图 8(b),从非晶态逐步结晶形成的多个中间态(M_X),谐振谷随调制级数增加呈阶梯式变浅并且伴有小幅波长漂移,这一现象源于 GST 结晶度增加导致的消

光系数与折射率同步增大,分别增强了腔体吸收损耗和延长了有效光程,说明 GST 复合微球腔可以实现可分辨的多级、非易失光谱调制。同时在整个调制过程中 WGM 谐振峰均呈现良好的洛伦兹线型。表明尽管激光激励具有方向性,但在 Au 层的均热辅助下, GST 的相变主要发生在赤道环带且具有较高的环向均匀性,未对 WGM 模式的旋转对称性造成可观测的破坏。

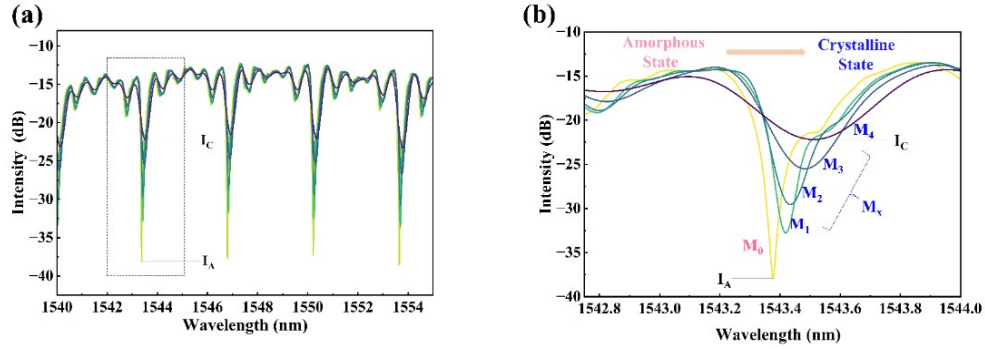


图 8(a) 不同相态下复合微球腔的调制等级光谱;(b) 复合微球腔调制示意图

Fig. 8 (a) Modulation level spectra of the GST-coated microsphere cavity in different phase states; (b) Schematic diagram of the modulation of the GST-coated microsphere cavity

确认其具备静态相变调制能力后,开展多级调制。图 9(a)为一次完整“从 M_0 到 M_6 ”的调制过

程,显示 7 个稳定相态下 WGM 谐振谷随调制级数逐级变浅并伴随红移演化轨迹,该演化规律与

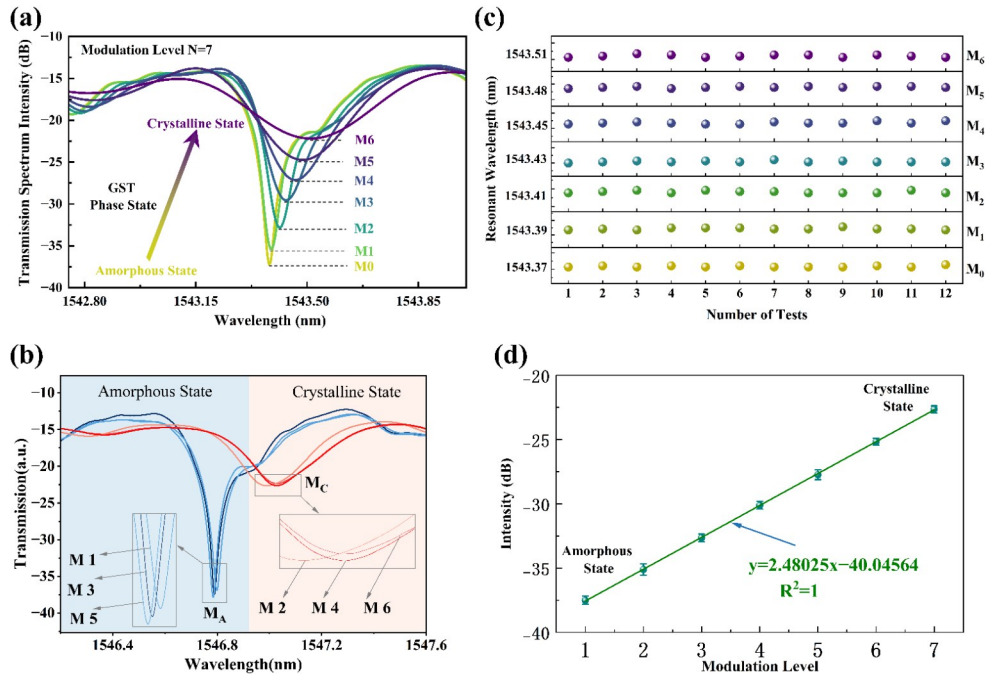


图 9 (a) GST 复合微球腔的多级调制光谱;(b) GST 复合微球腔的循环调制光谱;(c) GST 复合微球腔对应的各级共振波长;(d) GST 复合微球腔多级调制强度分布与线性拟合

Fig. 9 (a) Multilevel modulation spectra of the GST-coated microsphere cavity; (b) Cyclic modulation spectra of the GST-coated microsphere cavity; (c) Corresponding resonant wavelengths at each level for the GST-coated microsphere cavity; (d) Intensity distribution and linear fitting results of the multi-level modulation for GST-coated microsphere cavity

GST 部分结晶态下光学常数随晶化分数单调变化的物理机制一致。其中, 折射率的逐步增大导致共振波长单调红移, 消光系数的同步增大则使谐振谷深度逐级变浅。为考察可重复性与循环稳定性, 在同一 GST 复合微球腔上进行多轮“非晶态光谱 M_A - 晶态光谱 M_C () - 非晶态 M_A ()”的循环调制(图 9(b))。可知: 同一相态各次测得的谱线基本重合, 仅存在少量环境扰动引起的微小波动, 且不同相态之间的消光比无较大差异, 可得光谱响应具有良好重复性, 且相变过程具有较好可逆性。

对同一 GST 复合微球腔在相同实验条件下进行了 12 次独立多级调制测试, 记录统计如图 9(c)、(d), 表 3 为具体数据。谐振峰强度方面, M_0 - M_6 标准差约 0.32 - 0.43 dB, 波动幅度小, 体现优异的强度稳定性; 相邻级之间的平均强度差约 2.5 dB, 在 12 次测试中有良好的一致性。同时对图 9(d) 中各等级的平均谐振峰强度进行线性拟合 ($R^2 \approx 0.992$), 表明了多级调制过程稳定可控、梯度均匀。共振波长方面, 标准差约 0.003 - 0.005 nm, 波长漂移极小, 具备出色的波长稳定性; 相邻级之间的波长差主要分布在 0.018 - 0.030 nm, 平均约 0.024 nm, 呈现出单调且可分辨的红移规律。综上, 通过仅调节 793 nm 连续光的激励条件, 即可在同一 GST 复合微球腔上获得 M_0 - M_6 七个稳定调制级别, 且各级对应的谐振峰强度与共振波长波动较小, 体现出良好的非易失性、稳定性和重现性。

表 3 调制等级数据统计

Tab. 3 Modulation Level Data Statistics

Modulation Level	Average Value of I/nm	Average Value of λ /dB
M_0	1543.372	-37.51
M_1	1543.391	-35.11
M_2	1543.419	-32.65
M_3	1543.437	-30.11
M_4	1543.456	-27.73
M_5	1543.486	-25.17
M_6	1543.516	-22.64

为验证 GST 复合微球腔的动态响应能力, 开展了动态光脉冲操控的连续循环调制实验。实验采用 793 nm 连续波激光为写入信号, 驱动 GST 从非晶态 (M_0) 逐步结晶, 实现 M_1 至 M_6 共 6 级 WGM 谐振波长的阶梯式红移, 并记录对应时间和对应谐振波长; 同时采用 532 nm 纳秒脉冲激

光为擦除信号, 实现 GST 从晶态向非晶态的复位, 完成完整的“写入 - 擦除”调制循环。如图 10, 在本实验连续光写入与光谱采集条件下, 相邻稳定调制级之间的状态建立和观测时间共约 3 s。随后在 532 nm 纳秒脉冲作用下, 谐振波长在脉冲作用瞬间 (<10 ns) 快速复位至初始 M_0 状态。三组独立重复实验的谐振波长演化轨迹高度重合。结果表明, GST 复合微球腔依托相变材料的可逆相变特性, 在纳秒级脉冲擦除、多级非易失状态保持以及循环稳定性方面展现出良好性能。

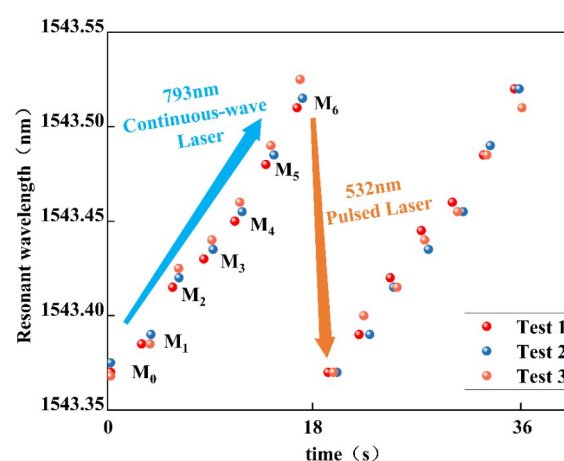


图 10 GST 复合微球腔动态调制实验

Fig. 10 Dynamic modulation of GST-coated microsphere cavity

6 结 论

本文的对比实验得知 GST 微球腔虽使 Q 值有所降低但仍保持较高水平, 且谐振峰清晰可拟合。另外在具备显著强度调制能力的基础上仅调节 793 nm 激光的激励条件就能实现 M_0 - M_6 七级稳定态, 平均消光比达到约 15 dB 并且多轮循环与多次独立测试中, 各等级光谱位置与强度变化波动小, 表现出良好的非易失性、可重复性与稳定性。由此, GST 复合微球腔实现了高对比度、可编程的七级 WGM 光谱调制, 改善传统 WGM 微腔调制的调制深度的不足和中间态的不稳定。同时在光纤通信系统中 GST 复合微球腔的七级调制提高了存储密度, 单波长信道速率提升至传统二进制的 2.8 倍, 且状态保持无需供电, 待机功耗降低。此外, 其七级调制梯度均匀并可由纳秒脉冲快速复位, 为神经形态光子计算中的多级突触器件提供一种器件方案。

参 考 文 献:

- [1] VOLLMER F, ARNOLD S. Whispering-gallery-mode biosensing: label-free detection down to single molecules[J]. *Nat Methods*, 2008, 5(7): 591 – 596.
- [2] 邵欲欣,张庆礼,刘学军,等. Er^{3+} 掺杂氟碲酸盐玻璃微球腔的激光性能及其温度传感研究[J]. *发光学报*, 2023,44(5):845-851.
SHAO Y X,ZHANG Q L,LIU X J, *et al.* The laser performance and temperature sensing properties of Er^{3+} -doped fluortellurite glass microsphere cavities [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023,44(5):845-851. (in Chinese)
- [3] ARMESON M, KIPPENBERG T J, VOLLMER F, *et al.* Ultra-high-Q toroid microcavity on a chip[J]. *Nature*, 2003, 421(6926): 925 – 928.
- [4] ILCHENKO V S, MATSUKO A B. Optical resonators with whispering-gallery modes—Part II: Applications[J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2006, 12(1): 15 – 32.
- [5] 姚瑶,闫胤洲,蒋毅坚,等. 光学微腔荧光和拉曼光谱增强技术研究进展[J]. *发光学报*, 2025,46(1):23-45.
YAO Y,YAN Y Z,JIANG Y J, *et al.* Recent advances in optical microcavity enhanced fluorescence and Raman spectroscopy [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025,46(1):23-45. (in Chinese)
- [6] MILLER D A B. Are optical transistors the logical next step?[J]. *Nat Photonics*, 2010, 4(1): 3 – 5.
- [7] CARMON T, YANG L, VOLLMER F, *et al.* Dynamical thermal behavior and thermal self-stability of microcavities[J]. *Opt Express*, 2004, 12(20): 4742 – 4750.
- [8] PAPP S B, DEL' HAYE P, KIPPENBERG T J. Mechanical control of a microrod-resonator optical frequency comb[J]. *Phys Rev X*, 2013, 3(3): 031003.
- [9] XU Q, SCHMIDT B, PRAKASH S, *et al.* Micrometre-scale silicon electro-optic modulator[J]. *Nature*, 2005, 435(7040): 325 – 327.
- [10] SHEN Y, HARRIS N C, SKIRLO S, *et al.* Deep learning with coherent nanophotonic circuits[J]. *Nat Photonics*, 2017, 11(7): 441 – 446.
- [11] 李黎嘉,丛春晓. 二维黑磷的光电特性及光电器件研究进展[J]. *发光学报*, 2023,44(6):987-995.
LI L J,CONG C X. Research progress of mid-wavelength infrared optoelectronic devices based on two-dimensional black phosphorus [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023,44(6):987-995. (in Chinese)
- [12] WUTTIG M, YAMADA N. Phase-change materials for rewriteable data storage[J]. *Nat Mater*, 2007, 6(11): 824 – 832.
- [13] WANG Q, ROGERS E T F, GADGETT A, *et al.* Optically reconfigurable metasurfaces and photonic devices based on phase change materials[J]. *Nat Photonics*, 2016, 10(1): 60 – 65.
- [14] SHPORTKO K, KRENN J R, WODA M, *et al.* Resonant bonding in crystalline phase-change materials[J]. *Nat Mater*, 2008, 7(8): 653 – 658.
- [15] 李文媛,付鑫鹏,姚聪,等. 基于回音壁模式光学微腔的低阈值激光器研究进展[J]. *发光学报*, 2022,43(12): 1823-1838.
LI W Y,FU X P,YAO C, *et al.* Research progress of low-threshold lasers based on whispering gallery mode optical microcavities [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2022,43(12):1823-1838. (in Chinese)
- [16] MURPHY R M J, LEI F, WARD J M, *et al.* All-optical nanopositioning of high-Q silica microspheres[J]. *Opt Express*, 2017, 25(12): 13101.
- [17] SALGAL T, ALNIS J, OZOLINS O, *et al.* Silica microsphere WGMR-based Kerr-OFC light source and its application for high-speed IM/DD short-reach optical interconnects[J]. *Appl Sci*, 2022, 12(9): 4722.
- [18] TEFAN I-D, STANCIU F, BOLDEIU A-T, *et al.* Influence of deposition method on the structural and optical properties of $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ [J]. *Materials*, 2021, 14(13): 3663.
- [19] KIM J, SHRESTHA S, SOURI M, *et al.* High-temperature optical properties of indium tin oxide thin-films[J]. *Sci Rep*, 2020, 10(1): 12486.
- [20] LIN H, KOU A, CHENG J, *et al.* Characterization of thermal and electrical transport in 6.4 nm Au films on polyimide film and fiber substrates[J]. *Sci Rep*, 2020, 10(1): 9165.
- [21] LITTLE B E, CHU S T, HAUS H A, *et al.* Microring resonator channel dropping filters[J]. *Journal of Lightwave Technol-*

- ogy, 1997, 15(6): 998 – 1005.
- [22] YARIV A. Universal relations for coupling of optical power between microresonators and dielectric waveguides[J]. *Electron Lett*, 2000, 36(4): 321 – 322.
- [23] TERAOKA I, ARNOLD S. 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.
- [24] SUN J, LI H, CHENG S, *et al.* A nonvolatile bipolar optical fiber memory based on phase change materials[J]. *ACS Photonics*, 2023, 11(1): 102 – 110.



薄夫森(1986–),男,博士研究生,现就读于哈尔滨工程大学物理与光电工程学院光学工程专业,主要从事回音壁模式微球腔等方面研究。

E-mail: bofusen@163.com



李寒阳(1982–),男,黑龙江人,博士,副教授,2015年于哈尔滨工业大学获得博士学位,现任职哈尔滨工程大学物理与光电工程学院,主要从事光学人工智能器件、微纳米光纤传感和微腔光学等方面的研究。

E-mail: hanyang_li@hrbeu.edu.cn