

光学学报

法布里-珀罗光学微腔及其应用

刘清权^{1,3}, 关学显^{1,3,4}, 崔恒毅^{1,3,4}, 王少伟^{1,3,4*}, 陆卫^{1,2,3,4**}

¹中国科学院上海技术物理研究所红外物理国家重点实验室, 上海 200083;

²上海科技大学物质科学与技术学院, 上海 201210;

³上海节能镀膜玻璃工程技术研究中心, 上海 200083;

⁴中国科学院大学, 北京 100049

摘要 法布里-珀罗(F-P)微腔作为基础的光学谐振器,因其结构设计方法成熟、品质因子高等特性,在近现代光学领域中具有举足轻重的地位。近年来,随着微纳加工技术的不断成熟,F-P微腔进入了一个新的发展阶段,其结构展现出集成化、多样化、功能定制化的特点,其应用领域也得到进一步拓展。本文总结了近20年来F-P微腔在光场调控领域的研究进展,重点介绍了基于F-P微腔的分光结构及光谱探测应用、F-P微腔中光子与低维材料相互作用的研究,以及F-P微腔在参数精密测量、生物检测、多维光场调控等方面的潜在应用,并对未来F-P微腔的发展及新的应用前景进行了展望。

关键词 光学器件; 法布里-珀罗微腔; 微型光谱仪; 低维材料; 精密测量; 光场调控; 耦合

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230904

1 引言

法布里-珀罗(F-P)微腔是一种由两片具有一定反射率的平行平板和中间介质层构成的光学腔,最早于1897年由法国人 Charles Fabry 和 Alfred Pérot 共同发明^[1],主要具备以下功能:1) 当光源波长已知时,用于长度精密测量;2) 具有光谱滤光功能,用于谱线间隔和谱线宽度测量;3) 用于构建各种类型的激光器。目前已被广泛应用于光通信、激光以及光谱技术等诸多领域。

随着薄膜技术的发展,F-P微腔的腔长可以被轻易控制在数个波长内,同时人们可以利用微纳加工手段对F-P微腔内部结构进行高效和精确操控,使得F-P微腔的发展进入了一个新的阶段。譬如,人们可以将成百上千个不同的F-P微腔进行单片集成,从而制备微型多光谱或高光谱相机^[2-10];将低维材料与F-P微腔结合,研究腔中的光与物质相互作用,观测激子极化激元的玻色-爱因斯坦凝聚等现象^[11];将光学超表面与F-P微腔结合,实现多维光场调控^[12-19]等等。

针对F-P微腔在微尺度方向的快速发展,本文对F-P微腔在微纳光学领域的发展进行了综述和展望。首先介绍了F-P微腔的基本原理,然后结合其高品质因子(Q)值、高精细度、小模式体积、易集成等优势,针

对其在光谱探测、光与物质相互作用、参数精密测量(如材料折射率、环境温度)等领域的应用进行了介绍。

2 F-P微腔的基本原理

在介绍F-P微腔的前沿应用之前,首先对其基本光学原理进行简要介绍。

F-P微腔的基本结构如图1(a)所示,由两面反射镜M1、M2和中间腔层构成。设光的传输方向由上往下,反射镜的透射系数分别为 t_1^+ 、 t_1^- 、 t_2^+ 、 t_2^- ,反射系数分别 r_1^+ 、 r_1^- 、 r_2^+ 、 r_2^- ,其中下标1、2代表反射镜M1、M2,上标+、-代表光的传输方向。

根据光的干涉特性,其总的透射系数 $t^{[1]}$ 可以表示为

$$t = \frac{t_1^+ t_2^+ e^{-i\delta}}{1 - r_1^- r_2^+ e^{-2i\delta}}, \quad (1)$$

式中, δ 代表光从界面1到界面2的相位, $\delta = 2\pi nd/\lambda$,其中 n 、 d 、 λ 分别代表腔层的折射率、厚度以及入射光的波长。

若令 $r_1^- = \sqrt{R_1} e^{i\varphi_1}$ 、 $r_2^+ = \sqrt{R_2} e^{i\varphi_2}$ 、 $T_1 = |t_1^+|^2$ 、 $T_2 = |t_2^+|^2$,则透过率可以写为

$$T = |t|^2 = \frac{T_0}{1 + F \sin^2 \theta}, \quad (2)$$

收稿日期: 2023-05-04; 修回日期: 2023-06-12; 录用日期: 2023-06-27; 网络首发日期: 2023-07-13

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFA0715500)、国家自然科学基金重大仪器专项(12227901)、上海市市级科技重大专项(2019SHZDZX01)、中国科学院国际人才计划(2021PT0007)

通信作者: *wangshw@mail.sitp.ac.cn; **luwei@mail.sitp.ac.cn

式中： $T_0 = \frac{T_1 T_2}{(1 - \bar{R})^2}$, $\bar{R} = \sqrt{R_1 R_2}$; $F = \frac{4\bar{R}}{(1 - \bar{R})^2}$; $\theta = \frac{1}{2}(\varphi_1 + \varphi_2 - 2\delta)$ 。

由式(2)可以看出,当 $\theta = 0$ 时,透射光由于相长干涉会获得最大透过率 T_0 ,之后,随着 θ 的增加透过率降低。可以看出,M1和M2的反射率越高, F 越大,透射峰越窄;并且当 $\theta = n\pi$ 时存在次级干涉峰。

可以用同样的方式分析F-P微腔的反射,得到总反射系数 r 的表达式^[1]为

$$r = r_1^+ + \frac{r_2^+ t_1^- e^{-2i\delta}}{1 - r_2^+ r_1^- e^{-2i\delta}}, \quad (3)$$

式(3)中涉及了5个变量: $r_1^+, r_1^-, r_2^+, t_1^+, t_1^-$,使得难以对其结果进行分析。但是,可以证明^[18, 20-21],如果反射镜M1无吸收,那么会得到一个非常简单的充要条件:

$$r = 0 \Leftrightarrow r_1^- e^{-i\delta} = (r_2^+)^*, \quad (4)$$

式中,符号*代表共轭。

如果取中间介质层的厚度为0(即把腔层并入到反射镜中),则 $\delta = 0$,上述表达式将进一步简化为

$$r = 0 \Leftrightarrow r_1^- = (r_2^+)^*, \quad (5)$$

式(5)清晰地表明了界面反射系数与总反射系数之间的关系,为光学Tamm态^[22]、Tamm等离子激元^[20, 23]、F-P多维光场调控^[18]等方向的研究提供了简洁而准确的理论表达。

进一步地,根据式(5)和式(3)可以简化为(同样,设 $\delta = 0$)^[18]

$$r = r_1^+ \left[1 - \frac{r_2^+ (1 - |r_1^-|^2)}{(r_1^-)^* \cdot (1 - r_2^+ r_1^-)} \right]. \quad (6)$$

早期用于F-P滤光片的反射镜一般选用金属,然而由于金属吸收高,导致透过率低。20世纪70年代发展起来了一种分布式布拉格发射镜(DBR)^[24],由折射率不同的两种材料交替组成,其高反射的原理可以用光子晶体理论来解释^[25-26]:在周期势的作用下,光子能带会被打开,形成光子带隙,不允许相应频率的光在周期介质内传输,从而实现高反射率。交替介质薄膜一般选用无吸收介质,光在其中传输损耗极小,并且反射率也能比金属高(对于无吸收的理想介质而言,其反射率能无限接近1),因此,用DBR做反射镜的F-P滤光片[又称全介质滤光片,如图1(c)所示]能实现更窄的

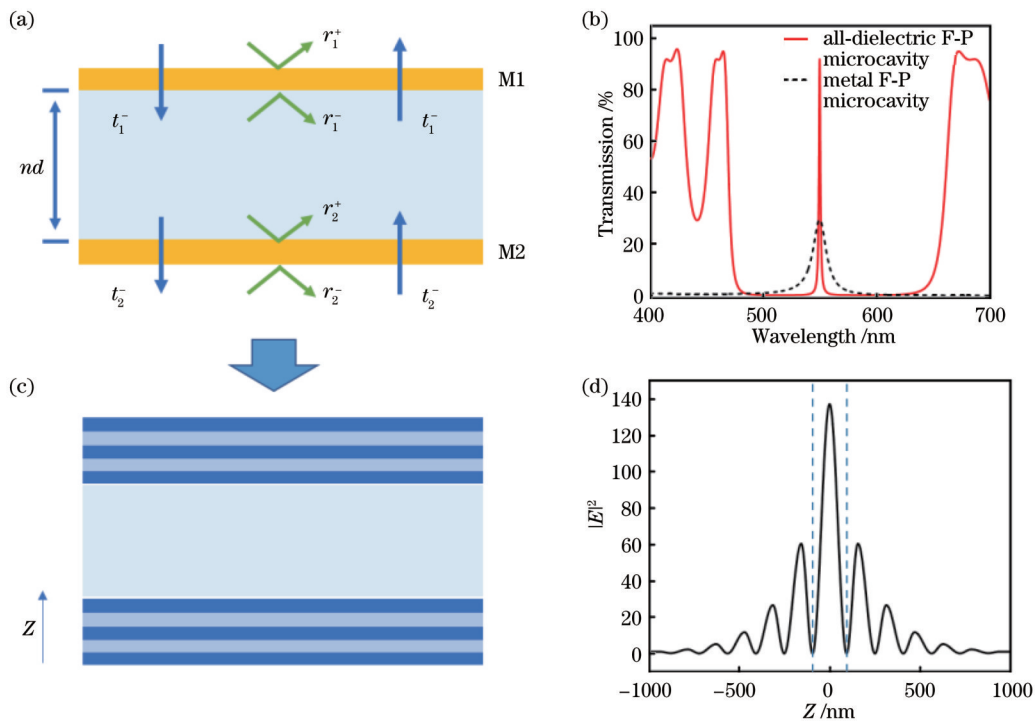


图1 F-P微腔的基本原理。(a)F-P微腔的一般模型;(b)F-P滤光片的透过率随波长的变化,其中实线和虚线分别代表全介质F-P微腔和金属F-P微腔的透过率。金属F-P滤光片选用50 nm厚的银膜^[28],腔层选用厚度为135 nm的SiO₂层(@550 nm);全介质F-P的膜堆表达式为Sub(HL)⁶H 2L H (LH)⁶,Sub代表石英衬底,H为厚度为62.5 nm的Ta₂O₅(@550 nm),L为厚度为94.18 nm的SiO₂;

Fig. 1 Basic principle of F-P microcavity. (a) General model of F-P microcavity; (b) transmission rate of F-P filter as a function of wavelength, where solid line and dashed line represent transmission rate of all-dielectric F-P microcavity and metal F-P microcavity, respectively. A 50 nm thick silver film is used in metal F-P filter^[28], and a 135 nm thick SiO₂ layer (@550 nm) is used in cavity layer. Multilayer stack expression for all-dielectric F-P filter is Sub(HL)⁶H 2L H (LH)⁶, where Sub represents quartz substrate, H represents a 62.5 nm thick Ta₂O₅ layer (@550 nm), and L represents a 94.18 nm thick SiO₂ layer; (c) all-dielectric F-P microcavity; (d) electric field distribution of all-dielectric F-P microcavity

透射光谱峰带宽和更高的透过率。图 1(b)给出了金属 F-P 滤光片和全介质 F-P 滤光片的透过率理论计算结果,给读者更直观的理解。这里,金属 F-P 滤光片的透射半峰全宽为 14 nm,透过率仅 30%,而全介质 F-P 滤光片的半峰全宽要小一个数量级可窄至 1.4 nm,而透过率则高达 92%。美中不足的是,全介质 F-P 滤光片的截止带宽有限,但是可以通过叠加截止带膜系来增加截止带宽,理论上,通过优化的多层膜系,可以实现不同设计要求带宽的带通滤光片,这属于薄膜光学的领域,有兴趣的读者可翻阅相关文献^[1, 27]。

除了对透射与反射光谱进行调控外,F-P 微腔对光场的调控也是值得关注的一部分。图 1(d)展示了利用传输矩阵法计算得到的上述全介质 F-P 微腔中的电场分布^[1],虚线内代表 2L 的光学腔,光在腔中来回反射形成共振,使得腔中部分区域处的电场急剧放大,这为光与物质相互作用提供了一个非常优异的条件和平台。

3 基于 F-P 微腔的新型分光结构及光谱探测应用

波长是光的基本属性之一。单一波长的光可作为信息的载体,是光通信^[29]和量子通信^[30]的基础。而将光线中不同波长的光进行逐一探测分析,则形成了另一个学科——光谱分析^[31]。由于不同的分子或原子会

吸收或发射不同波长的光,通过检测物质的光谱,便能获得物质的成分信息^[32]。光谱探测有着快速、非接触、无损/无创等优点,被广泛应用于生物医学、航空航天、农业、海洋等诸多领域^[32-33]。

光谱分光是 F-P 微腔的重要应用之一,相较于光栅、棱镜等色散型的光分器件,F-P 微腔的光谱分辨率与自由空间距离无关,可与探测器零距离集成^[9-10, 34],能极大地减小光谱仪器的体积和质量。本节将介绍基于 F-P 微腔新型分光结构的发展现状,包括线性渐变滤光片、集成 F-P 滤光片,以及基于 F-P 微腔的重构型光谱仪等。

3.1 线性渐变滤光片

线性渐变滤光片(LVF)是一种光谱特性会随位置线性变化的滤光片,有带通、高通、低通等类型。而线性渐变 F-P 滤光片是一种窄带通道随位置线性变化的滤光片,可用于成像光谱仪中^[35-36]。线性渐变 F-P 滤光片的基本结构如图 2 所示,通过非均匀的薄膜沉积手段来改变薄膜厚度,使得不同位置处的透射峰位不同。与集成 F-P 滤光片相比,线性渐变 F-P 滤光片无需光刻、刻蚀等微纳制备工艺,制备方式简单,通道数量极多(取决于探测器的规模),但其缺点在于透射带宽会有一定展宽(约为集成 F-P 滤光片的 7~10 倍),透过率较低,透射峰位之间难以按需任意定制且存在相互串扰问题^[8, 36]。

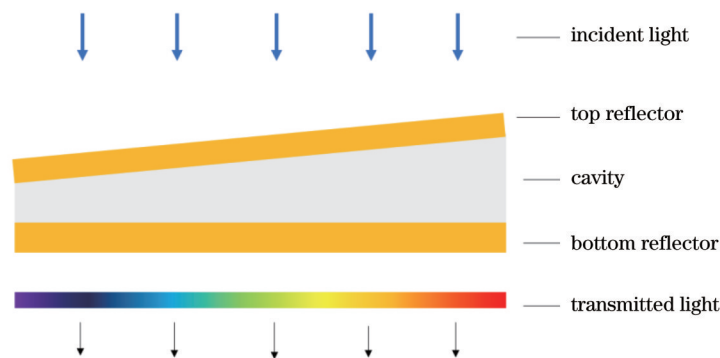


图 2 线性渐变 F-P 滤光片示意图

Fig. 2 Schematic diagram of linearly variable F-P filter

LVF 的发展比集成 F-P 滤光片早许多。早在 20 世纪 80 年代,美国 Hughes Santa Barbara 研究中心便开始 LVF 的研制工作,在 1989 年进行成像演示论证,并在 1992 年进行机载实验^[37-38]。该 LVF 与 64×128 像素规模的硅探测器组装,能获得 64 个光谱波段和 128 个空间像元,光谱范围为 400~1030 nm,光谱通道带宽为 0.5%~3%。1997 年,美国加利福尼亚州光知识系统公司(Opto-Knowledge Systems Inc)报道了第一个工作在热红外(7.5~14 μm)的 LVF^[39],该滤光片与 20×64 像元的 Si:As 探测器组装,制备光谱成像探测器,工作温度为 10 K,光谱带宽为 100 nm。2000 年左右,美国 OCLI 公司(Optical Coating Laboratory,

Inc.)推出了商品化的 Micropac 系列光谱仪,仪器的工作波段为可见近红外区域(400~700 nm 和 600~1100 nm),光谱带宽小于 2.5%。该系列可能是首款使用 LVF 的高光谱相机^[40]。2001 年,美国 Raheon Santa Barbara Remote Sensing 研制了基于 LVF 的红外成像光谱探测系统,光谱范围为 3.45~14.08 μm ,光谱分辨率约 10^{-6} nm^{-1} (10 μm 处)。随后,印度空间研究中心(Space Applications Centre)^[41]、法国国家太空研究中心(Centre National d'Etudes Spatiales, CNES)^[42]、加拿大航天局(Canadian Space Agency)^[43]、欧洲空间研究与技术中心(the European Space Research and Technology Centre, ESTEC)^[44]、

法国巴黎天文台(Observatoire de Paris)^[45]等多国研究机构相继展开对 LVF 及其成像光谱仪的研究。

2002 年,我国清华大学首先对基于 LVF 的成像光谱仪进行了理论设计的报道^[46],同年,南开大学对 LVF 的成像光谱仪进行了原理性验证^[47]。2006 年,同济大学王占山等^[48]与日本株式会社光驰合作,共同研究了多种 LVF 的制备工艺。2007 年,兰州物理研究所罗崇泰等^[49-50]也对 LVF 的制备工艺进行了深入研究。2015 年,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的张建^[51]采用双离子束溅射物理沉积方法制备了高透过率、高色散系数的 LVF。其光谱范围为 650~1050 nm,峰值透过率均达到 85% 以上,中心波长的线性变化率为 20 nm/mm。随后,该研究所的研究人员利用 LVF 分别实现了手持式近红外光谱仪^[52]、人体血红蛋白无创分析仪^[53]的研制。2021 年,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的刘春雨团队^[54]研制了一款

工作波段为 400~1000 nm、地面分辨率为 10 m、平均光谱分辨率为 8.9 nm、系统总质量为 7 kg 的轻小型星载高光谱成像光谱仪。同年,该团队又公布了使用多片 LVF 与探测器拼接技术的高分辨率大幅宽高光谱相机,该相机在 500 km 轨道处幅宽为 150 km,质量为 9.2 kg^[55]。随着镀膜工艺及探测器技术的进步,基于 LVF 的光谱仪器不断朝着更小型化、分辨率更高的目标发展。

3.2 集成 F-P 滤光片及制备方法

单一的 F-P 微腔只有一个透射波长,若想获得多个透射波长,实现多光谱或高光谱探测,则需将多个不同腔长的 F-P 滤光片集成于一体,即集成 F-P 滤光片,如图 3 所示。该结构在微型光谱仪^[6,10]、多/高光谱成像仪^[7-8]中有着广泛的应用价值。集成 F-P 滤光片的难点在于多个不同厚度中间腔层的高效制备,本节将从工艺制备的角度阐述集成 F-P 滤光片的发展现状。

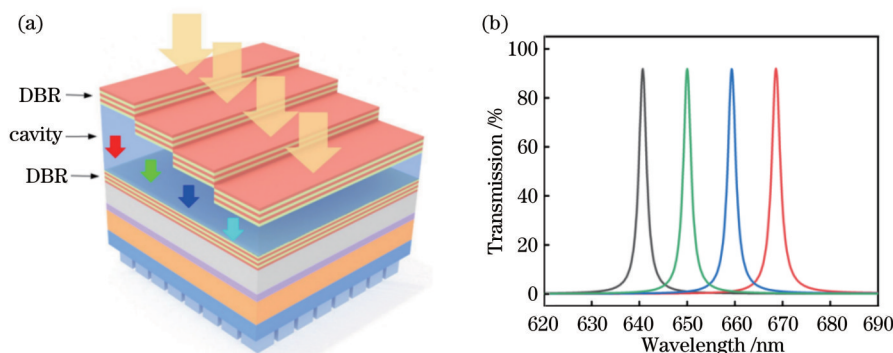


图 3 集成 F-P 滤光片示意图。(a) 集成 F-P 滤光片三维结构示意图;(b) 透射谱示意图

Fig. 3 Schematic diagram of integrated F-P filter. (a) Schematic illustration of 3D structure of integrated F-P filter; (b) schematic diagram of transmission spectrum

2000 年,荷兰代尔夫特科技大学的 Correia 等^[34]在 CMOS 探测表面制备了集成金属 F-P 微腔结构 (Al-SiO₂-Ag),通过光刻刻蚀的方法改变 SiO₂ 层的厚度,从而获得一系列不同的窄带光透射。该器件的光谱通道数为 16 个,光谱范围为 225~300 nm,半峰全宽为 18 nm,相对带宽($\delta\lambda/\lambda$)约 6%。

2003 年,中国科学院上海技术物理研究所的王少伟等^[2]提出通过改变全介质 F-P 微腔层厚度获得集成 F-P 滤光片的方法,并于 2004 年进行了实验验证^[56]。2006 年^[3-4]和 2007 年^[5],该团队又分别提出组合刻蚀和组合沉积的方法,实现了中波红外和近红外的全介质集成滤光片的制备,如图 4 所示。其中,图 4(a)为组合刻蚀法示意图,只需通过 N 次刻蚀便可获得 2^N 个通道,组合沉积的原理类似,该方法可极大地提升多通道光学腔的制备效率和成品率。图 3(b1)~3(b2)为中波红外集成滤光片,该器件光谱通道数为 16 个,光谱范围为 2.5~2.9 μm ,半峰全宽为 13 nm,相对带宽为 0.5%。图 4(c1)~4(c2)为近红外集成滤光片,只需 7 次组合刻蚀就能使光谱通道数达到 128 个,光谱范围

为 72~880 nm,半峰全宽为 1.2 nm,相对带宽达到 0.2%。该新模式分光器件无需任何色散距离,可与探测器完全匹配甚至一体化构成微型光谱仪,结构简单、设计灵活,去掉了整个复杂的分光系统,很好地解决了传统分光方式集成度与光谱分辨率之间的矛盾。该技术已成功用于 2016 年实践十号卫星上植物的多光谱荧光成像探测,实现了新概念分光器件的首次航天应用验证^[57]。

2007 年,同济大学焦宏飞与王少伟等^[58]合作,利用组合刻蚀的方法,制备了集成双腔 F-P 滤光片,通道数为 32,光谱范围为 0.77~0.85 μm ,带宽约为 8 nm。相比于单腔 F-P 滤光片,双腔 F-P 滤光片具有更好的带通矩形度和更高的带外截止效果。虽然组合刻蚀/沉积方法能在很大程度上提高多通道集成 F-P 滤光片的制备效率,但是仍然需要多次的对准、刻蚀/沉积工艺,这也会降低集成 F-P 微腔的制备效率。为了更快速、廉价地完成集成 F-P 滤光片的制备,2013 年,德国卡塞尔大学 Meinel 课题组^[59]提出利用纳米压印的方法实现多个腔层的制备。纳米压印制备多腔集成 F-P 滤

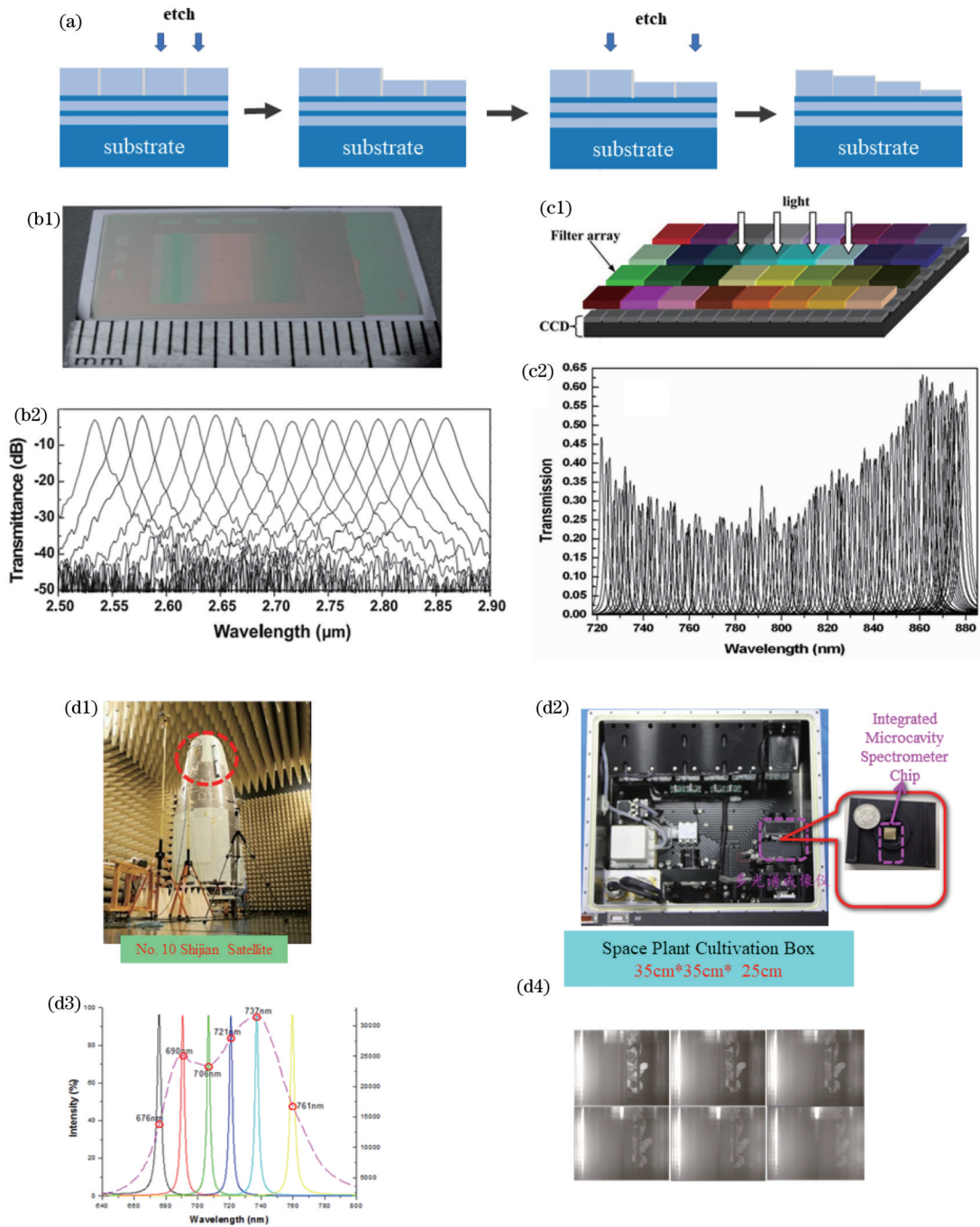


图 4 全介质集成 F-P 滤光片。(a) 组合刻蚀法示意图; (b1) 16 通道中红外集成 F-P 滤光片^[4]; (b2) 16 通道中红外集成 F-P 滤光片透过率^[4]; (c1) 128 通道近红外集成 F-P 滤光片^[5]; (c2) 128 通道近红外集成 F-P 滤光片透过率^[5]; (d1)~(d4) 实现实践十号卫星在轨验证^[57]

Fig. 4 All-dielectric integrated F-P filter. (a) Schematic diagram of combinatorial etching technique; (b1) infrared integrated F-P filter with 16 channels^[4]; (b2) transmittance of infrared integrated F-P filter with 16 channels^[4]; (c1) near-infrared integrated F-P filter with 128 channels^[5]; (c2) transmittance of near-infrared integrated F-P filter with 128 channels^[5]; (d1)–(d4) realizing in-orbit verification of No. 10 Shijian Satellite^[57]

光片的方法如图 5(b) 所示, 它有着简单、高效、低成本等优点, 可一次性完成多个腔层的制备, 并且没有光学曝光中的衍射现象, 能实现高分辨图像的加工。借助纳米压印技术, 该课题组制备了 64 通道集成滤光片, 单通道尺寸为 $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$, 光谱范围在可见-近红外区域, 光谱分辨率为 2 nm。

除了纳米压印技术外, 灰度电子束曝光技术也被研究用于集成 F-P 微腔的制备^[6, 39-40]。由于电子束具有较短的波长, 使用电子束曝光的分辨率远高于普通紫外光刻; 其次, 电子束曝光可根据所设计的图形使用电子束斑直接曝光, 无须制备曝光掩模板, 避免了纳米压印制作模板的繁琐过程。2017 年, 美国加利福尼亚

大学 Huang 等^[6]和我国湖南大学段辉高团队^[60]先后报道了利用灰度电子束曝光技术制备的集成 F-P 滤光片。利用电子束灰度曝光技术,段辉高团队制备的单个 F-P 微腔的最小边长仅为 433 nm。2019 年,英国剑桥大学的 Williams 等^[61]也发表了利用电子束灰度光刻制备的金属 F-P 微腔,光谱范围覆盖整个可见波段,光谱带宽约为 25 nm。

使用电子束曝光进行灰度光刻,其优点在于在选取灰度剂量时电子束的束流控制比较稳定,能够准确地输出所选定的剂量值。此外,电子束曝光的分辨率极高,可以制备纳米级别的灰度结构。但同时该方法也存在一定的缺点,在制备大面阵、大像元的结构时,电子束光刻的曝光速率慢,需要耗费很长时间,且价格昂贵,仅适用于小尺寸、高分辨率的研发领域。

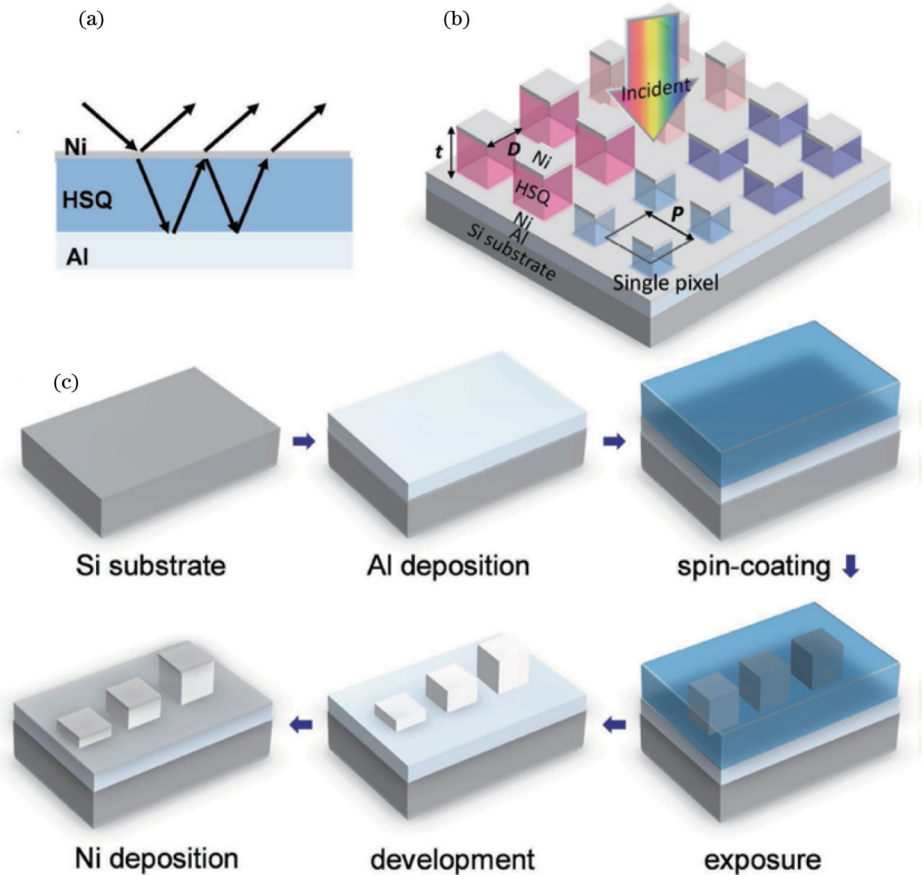


图 5 电子束灰度光刻制备集成金属 F-P 滤光片^[60]。(a)~(b)集成金属 F-P 滤光片示意图;(c)电子束灰度曝光技术
Fig. 5 Fabrication of integrated metal F-P filter using electron beam grayscale lithography^[60]. (a)~(b) Schematic diagram of integrated metal F-P filter; (c) electron beam grayscale exposure technique

2022 年,中国科学院上海技术物理研究所的陆卫和王少伟团队^[10]首次利用激光直写紫外灰度光刻工艺,在 InGaAs 短波红外探测器上直接集成了像素级全介质 F-P 滤光片,使探测器本身就具备了光谱分辨能力,如图 6 所示。激光直写紫外灰度光刻过程与电子束灰度光刻工艺过程类似,虽然激光直写的精度不如电子束,但是其成本低廉且曝光速度远快于电子束曝光。该集成 F-P 滤光片的光谱范围为 0.9~1.7 μm ,通道数最多达 100 个,每个通道尺寸为 60 μm ×60 μm 。该工作还采用了光谱重构技术提高短波红外光谱探测芯片的光谱分辨率,仅需 20 个像元通道,就可以实现 0.9~1.7 μm 宽波段范围内 5 nm 的光谱分辨率,只需 50 个像元通道,就可以实现该波段范围内高达 2 nm 的光谱分辨率,关于光谱重构技术将在 2.3 节进行详细

介绍。

上述介绍的工艺均为改变光学腔的长度获得不同的透射谱。2016 年,美国加州理工大学的 Faraon 团队^[62]提出通过改变介质层等效折射率的方式改变 F-P 微腔的透射峰位,如图 7 所示。该团队利用电子束光刻和离子刻蚀的方法,在全介质 F-P 微腔中间制备了高为 400 nm、周期为 600 nm 的硅纳米柱,通过改变纳米柱的边长来改变纳米柱超表面的等效折射率,当纳米柱的边长从 120 nm 增加到 430 nm 的时候, F-P 滤光片的中心峰位从 1.45 μm 移动到了 1.7 μm ,品质因子保持在 700 左右。该方法与灰度光刻有异曲同工之处,即不需要反复套刻刻蚀腔层来获得不同的透过率,但是它需要比灰度光刻更精细的束斑来进行纳米结构制备,成本将会更高。

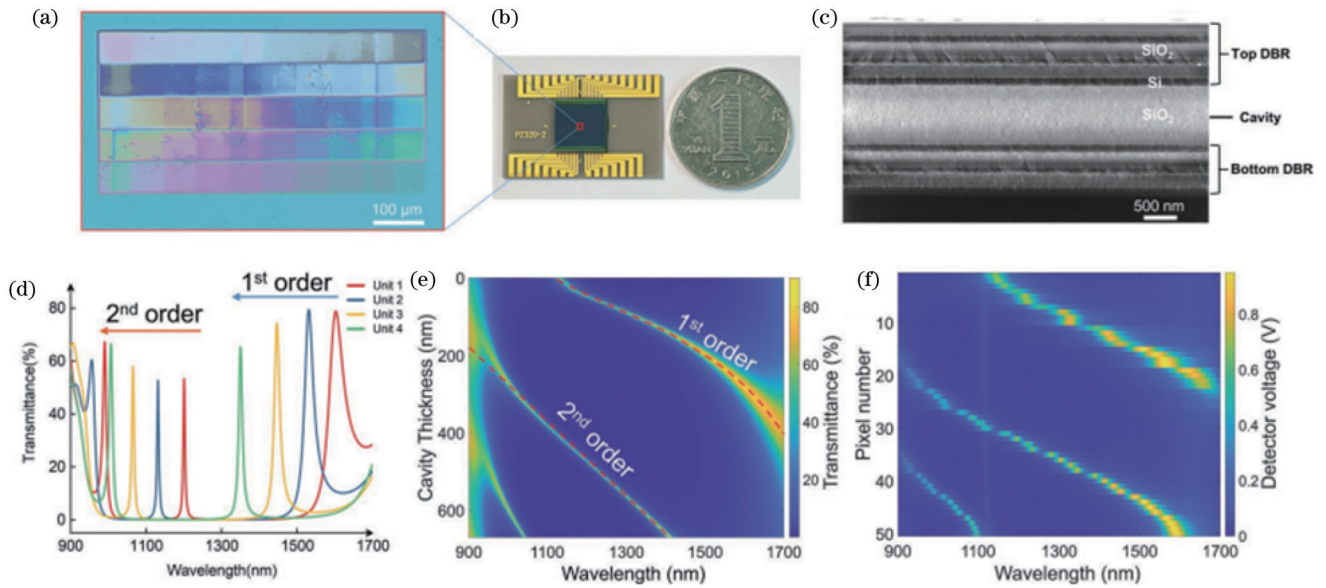


图 6 激光直写灰度光刻技术制备集成 F-P 滤光片^[10]。(a)~(b) 在 InGaAs 探测器上集成的全介质 F-P 滤光片；(c) F-P 滤光片的扫描电镜 (SEM) 截面图；(d)~(e) 透过率随腔长变化图；(f) 探测器中不同像元响应随波长变化图
 Fig. 6 Fabrication of integrated F-P filter using laser direct-writing grayscale lithography^[10]. (a)~(b) Integrated all-dielectric F-P filter on InGaAs detector; (c) scanning electron microscope (SEM) cross-sectional image of F-P filter; (d)~(e) transmission variation with cavity length; (f) wavelength-dependent response of different pixels in detector

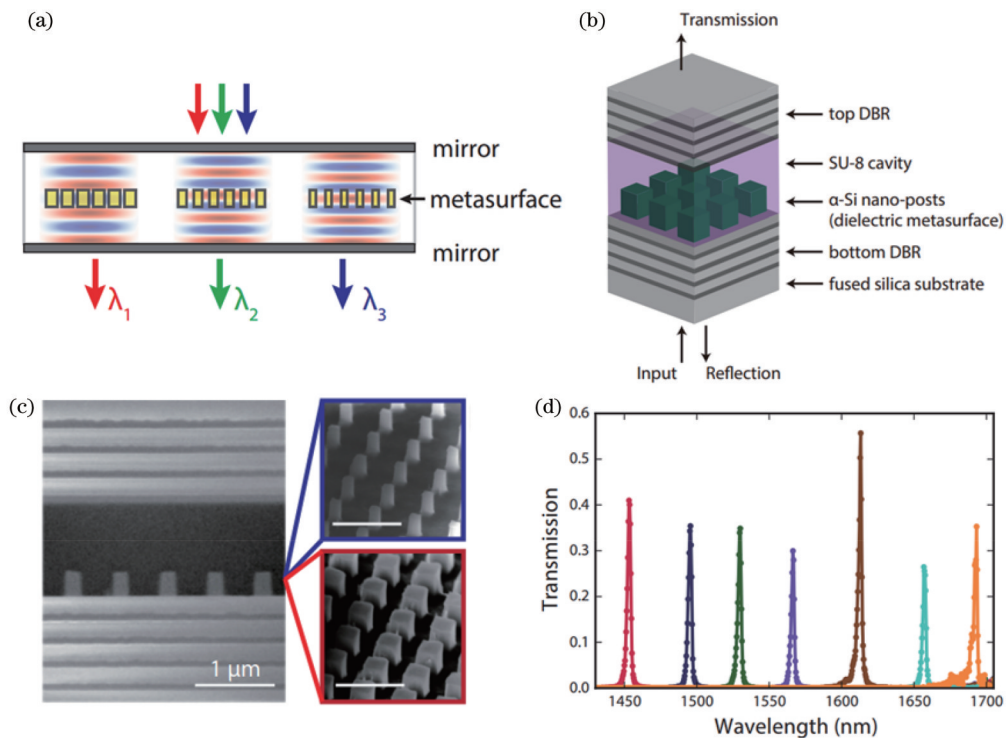


图 7 超表面 F-P 滤光片^[62]。(a)~(b) 超表面 F-P 滤光片示意图；(c) 超表面 F-P 滤光片制备 SEM 结果；(d) 实验测得的透过率图
 Fig. 7 Metasurface-based F-P filter^[62]. (a)~(b) Schematic diagrams of metasurface-based F-P filter; (c) SEM image of fabricated metasurface-based F-P filter; (d) experimentally measured transmission spectrum of filter

3.3 基于 F-P 微腔的重构型光谱仪和光谱重构算法

如前所述, F-P 微腔分光器件的光谱分辨率与距离无关, 可与探测直接集成, 所构成的光谱仪具有体积小、质量轻、稳定性高等诸多优势。但是在具体制备的

过程中, 会遇到两大问题: 一是腔长增加会引入高级次的透射峰, 从而干扰光谱测试; 二是过高的光谱分辨率难以实现, 无论是集成 F-P 滤光片还是线性渐变 F-P 滤光片都需要对腔层进行额外加工, 这会在一定程度

上破坏谐振条件,进而使得高光谱分辨率的 F-P 微腔难以制备。高光谱分辨率的 F-P 微腔需要更高层数的 DBR 以及更严格的镀膜条件,且由于光通道变窄,透射光能量急剧下降,对探测器的响应要求也更高。为此,光谱重构算法被引入 F-P 微腔微型光谱仪中,从软件算法方面缓解上述难点引发的问题,而使用了光谱重构算法的光谱仪又被称为重构型光谱仪^[63]。

光谱重构算法如图 8 所示,假设有一系列具有不同光谱响应的探测像元,其中第 i 个探测像元的光谱响应函数为 $T_i(\lambda)$,当光谱为 $X(\lambda)$ 的入射光照射在这些探测像元上时,它们将产生强度为 M_i 的探测值。

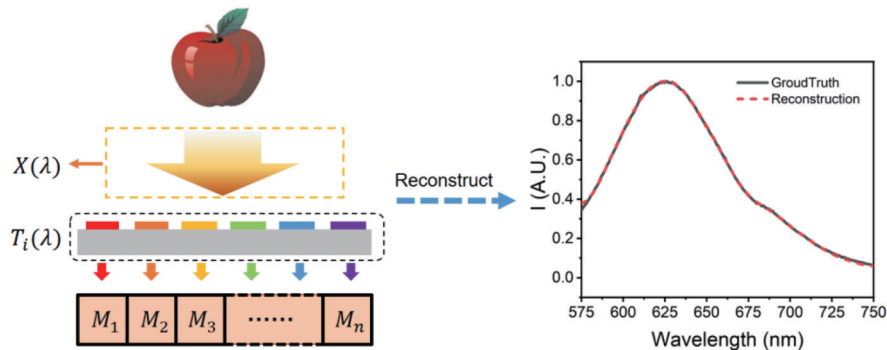


图 8 光谱重构算法示意图^[21]

Fig. 8 Schematic diagram of spectral reconstruction algorithm^[21]

2008年,美国匹兹堡大学的 Chang 等^[69]首次提出将光谱重构算法引入集成滤光片的微型光谱仪中,用来矫正光谱图像、提升光谱分辨率。他们比较了奇异值分解算法(SVD)和非负的最小二乘算法(NNLS),并指出 NNLS 算法可更好地反解出目标光谱,但是由于引入了额外约束条件,使得 NNLS 算法消耗的时间比 SVD 算法高了两个数量级。2017年,美国加利福尼亚大学的 Huang 等^[6]报道的基于电子束灰度光刻制备的 F-P 滤光片微型光谱仪中,使用 L1 正则化的压缩感知算法,获得了约 8 nm 的极限分辨率。

2022年,中国科学院上海技术物理研究所陆卫和王少伟团队^[10]将光谱重构算法引入激光直写灰度光刻制备的短波红外微型光谱仪中,用以进一步提升光谱仪的光谱分辨率,利用压缩感知算法,在 50 个光谱通道的情况下,获得了在整个 900~1700 nm 波段内 2 nm 的光谱分辨率,如图 9 所示。同年,该团队提出了基于光谱特征的光谱重构算法,在重构算法中引入绝对值项代替原来的非负约束条件,使算法的抗噪能力相比于压缩感知算法提升了 4 倍,是传统吉洪诺夫正则算法的 20 倍,很好地解决了重构型光谱仪抗噪能力差的一大难题^[64]。同时利用纳米压印技术制备了集成 F-P 滤光片,并与廉价的 CMOS 相机芯片(8 位)相混成,制备了微型光谱相机原理样机。结合光谱重构算法,该光谱相机的测试波段为 600~750 nm,分辨率达到 3 nm^[64]。

当探测值和入射光强度为线性关系时,就有如下表达式^[21]:

$$M_i = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} X(\lambda) T_i(\lambda) d\lambda, \quad (7)$$

式中, λ_1 和 λ_2 分别为探测像元光谱响应的下限和上限。在式(7)中, M_i 和 $T_i(\lambda)$ 已知,借此可反解出入射光谱 $X(\lambda)$ 。值得一提的是,除了集成 F-P 滤光片^[6, 10, 64]外,光谱重构算法已广泛应用于量子点^[65]、纳米线^[66-67]、光子晶体^[68]等诸多微型光谱仪中,而重构算法的鲁棒性则主要取决于光谱响应函数为 $T_i(\lambda)$ 的正交特性。

4 全介质 F-P 微腔中光子与低维材料的相互作用

除了上节所述的光谱分光功能外, F-P 微腔可以将光子极大程度地束缚在光学腔内,极大地增强了光与物质的相互作用,早期的激光器便是基于 F-P 微腔制备而成的。

21 世纪以来,低维半导体材料引起了人们广泛关注。低维半导体材料是指材料体系至少在一个维度上对其载流子输运和跃迁等物理行为具有量子限域作用的半导体材料或结构,这是它们区别于体材料的一个主要特征。集成电路与集成光子学的快速发展,使得低维半导体材料及其特性的研究以及相关器件的设计与制备成为半导体领域发展的当务之急。本节主要介绍基于全介质 DBR 的 F-P 腔与低维材料结合的相关工作进展。

4.1 基于全介质 F-P 微腔的低维半导体激光器

自半导体激光器问世以来,其微小型化研究便成为了光子学领域的焦点,具有广阔的应用前景。分布式反馈腔(DFB)、DBR 激光器到垂直腔面发射激光器(VCSEL)、光子晶体缺陷腔激光器的问世为激光器的微小型化提供了新思路。同时,随着微纳生长和加工技术的进步,各种新型材料体系如量子点、二维材料、微纳材料被应用于激光器,成为纳米激光器研究的热点。

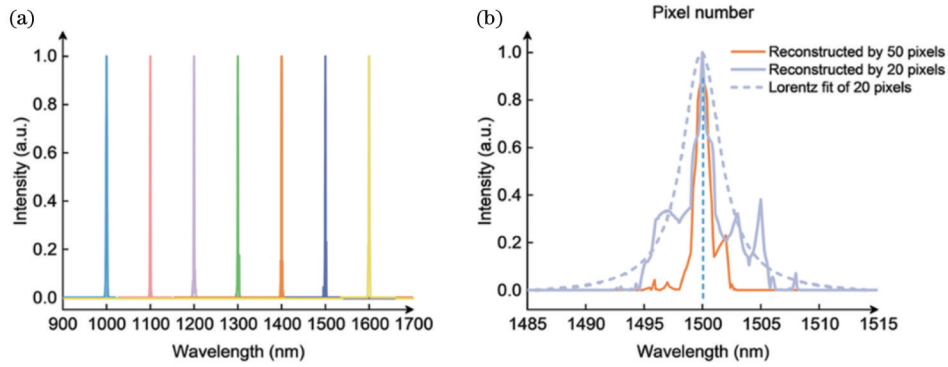


图 9 短波红外微型光谱仪重构结果^[10]。(a)以 100 nm 步长从 1000 nm 到 1600 nm 的重构窄带光谱；(b)用 2 nm 半峰全宽 (FWHM) × 50 像素组和 5 nm FWHM × 20 像素组重构了 1500 nm 处的窄带光谱。虚线是由 20 像素芯片光谱重构的光谱的 Lorentz 拟合,其带宽为 5 nm

Fig. 9 Reconstruction results of shortwave infrared miniature spectrometer^[10]. (a) Reconstructed narrowband spectra from 1000 nm to 1600 nm with 100 nm step; (b) reconstructed narrowband spectra of 1500 nm with 2 nm full width at half maximum (FWHM) by 50 pixel set, and 5 nm FWHM by 20 pixel set. Dashed line is Lorentz fit of spectrum reconstructed by 20 pixel chip-spectrum, and its FWHM is 5 nm

2001年,美国加州大学伯克利分校的杨培东等^[70]制备出一种高质量的 ZnO 纳米线,该纳米线上下两个端面形成了高质量自构型 F-P 微腔,在室温下利用光泵浦成功地实现了紫外波段的激射,这也是纳米线激光器的首次实现。此后,基于各类半导体材料的纳米激光器也相继出现^[71-74],激光范围能够覆盖紫外至近红外波段。然而,由于自构型腔腔长太大导致材料本身的吸收过强,使基于自构腔的半导体激光器阈值较高。因此,人们通过制备外部结构腔,并将增益材料置于腔中来实现激射,这样既可以降低阈值,也易于进行规模化集成。由于全介质谐振腔具有发散角小、光束质量高和易集成二维阵列结构等优点,被广泛用于实现 VCSEL 的低阈值激射。2016年,湖南大学潘安练

团队和中国科学院上海技术物理研究所王少伟等^[75]将 CdS 纳米带嵌入全介质 DBR 微腔中实现了光泵浦下的单模激射,如图 10 所示。其激光阈值低至 $8 \mu\text{J}/\text{cm}^2$,比裸 CdS 带的激光阈值低一个数量级,此外,激光模式的波长可以通过改变 CdS 纳米棒的厚度实现 498~520 nm 范围内的连续调谐,能够覆盖 CdS 的整个带边发射带。2022年,中国科学院上海技术物理研究所陆卫和王少伟团队^[76]实现了一种基于全介质 DBR 微腔的片上集成光源,他们通过组合刻蚀技术来控制微腔腔长,进而实现了多波长单模激射的单片集成,激光波长范围可达 678.9~744.4 nm,最低阈值达到 $5.4 \text{ kW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

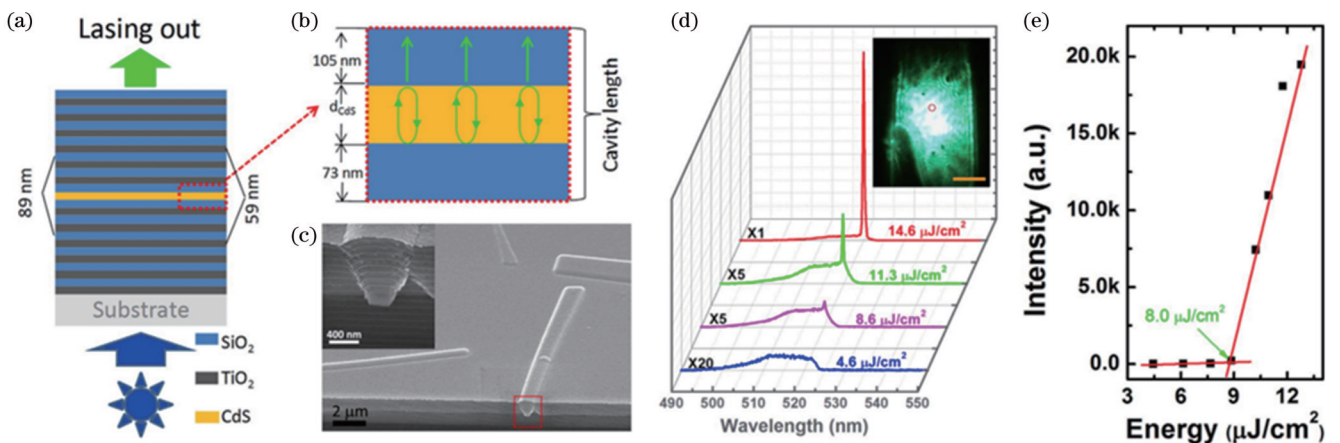


图 10 CdS 激光器结构及表征、测试结果^[75]。(a)CdS 激光器结构示意图；(b)CdS 纳米带与微腔光子作用界面示意图；(c)CdS 纳米带与 DBR 的 SEM 图；(d)CdS 激光器在不同泵浦功率下的光致发光光谱；(e)CdS 激光器辐射强度与泵浦功率的关系

Fig. 10 Structure diagram and characterization and measurement results of CdS laser^[75]. (a) Schematic diagram of CdS laser structure; (b) schematic illustration of interface between CdS nanoribbon and microcavity photon; (c) SEM images of CdS nanoribbon and DBR; (d) photoluminescence spectra of CdS laser at different pump powers; (e) relationship between emission intensity of CdS laser and pump power

除了微纳材料体系,量子点体系、层状二维材料体系、微盘体系激光器也在 DBR 微腔中实现。2015 年,美国华盛顿大学的 Huang 等^[77]实现了基于全介质 F-P 微腔的全无机 CsPbBr₃量子点 VSCEL,并实现了 0.39 μJ/cm² 的超低阈值,此外量子点还表现出超稳定性,在飞秒激光和准连续波纳米激光泵浦下,激光器能够保持数小时的运行时间。

2020 年,湖南大学潘安练团队和中国科学院上海技术物理研究所王少伟团队^[78]合作展示了一种基于层

状二维材料的纳米激光器,如图 11 所示。他们将层状黑磷(BP)嵌入全介质 DBR 微腔中,首次实现了室温下中红外波段的低阈值单模激光,通过改变腔和 BP 层的厚度实现了激光波长从 3.42 μm 到 4.07 μm 的调谐。2022 年,中国科学院上海技术物理研究所陆卫和王少伟团队^[79]利用类似结构实现了全无机钙钛矿结构 CsPbCl₃微盘单模激光器,其阈值低至 1.3 μJ/cm²,通过调节微盘厚度实现了激光波长从 529.6 nm 到 544.1 nm 的调谐。

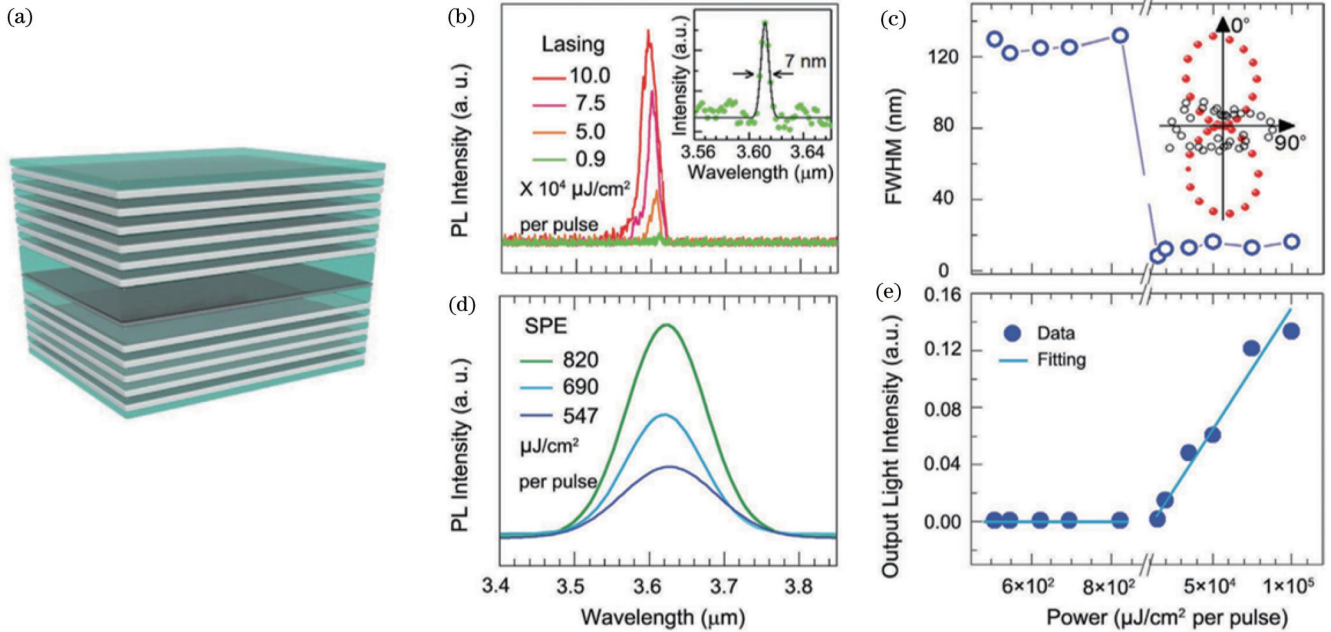


图 11 BP 激光器结构及表征、测试结果^[78]。(a)BP 纳米片嵌入 DBR 微腔结构示意图;(b)BP 激光器在不同泵浦功率下的光致发光光谱;(c)自发辐射状态下不同泵浦功率所对应的 BP 激光器光致发光光谱;(d)激光 FWHM 与泵浦功率的关系曲线;(e)BP 激光器辐射强度与泵浦功率的关系

Fig. 11 Structure diagram and characterization and measurement results of BP laser^[78]. (a) Schematic diagram of BP nanosheet embedded in a DBR microcavity structure; (b) photoluminescence spectra of BP laser at different pump powers; (c) photoluminescence spectra of BP laser under spontaneous emission states at different pump powers; (d) relationship curve between laser FWHM and pump power; (e) relationship between BP laser radiation intensity and pump power

4.2 全介质 F-P 微腔中光与物质的耦合作用

当微腔中量子体系的辐射波长和微腔的谐振波长一致时,量子体系和腔模式之间不断进行能量交换,会发生光-物质耦合现象,该现象可以用腔量子电动力学(CQED)的观点来解释。

假设增益材料位于腔模电磁场的波腹处,耦合强度 g 与振子强度 f 和模式体积 V 有关^[11, 80-81]:

$$g = \frac{(\pi e^2 f)^{\frac{1}{2}}}{(4\pi\epsilon_r\epsilon_0 m_0 V)^{\frac{1}{2}}} \quad (8)$$

式中: e 为单位电荷量; ϵ_r 和 ϵ_0 分别为介电材料与真空的介电常数; m_0 为自由电子质量;

$$f = \frac{2m^* \omega}{\hbar} |\langle u_v | r \cdot e | u_c \rangle|^2 \frac{V}{\pi a_B^3}, \quad (9)$$

式中: m^* 为激子的有效质量; \hbar 为约化普朗克常量; $|u_c\rangle$

和 $|u_v\rangle$ 分别为电子和空穴的 Bloch 函数; V 为腔模式体积; a_B 为激子的玻尔半径。

1) 弱耦合作用

当 $g < \sqrt{(\gamma_{cav}^2 + \gamma_{ex}^2)}/2$ 时,光与物质之间能量的交换速率远小于系统耗散速率,此时体系处于弱耦合区,可以用 Purcell 效应解释,即由于腔光子态密度的增加,腔内激子自发辐射速率可以被增大(或减小) F_P 倍。 F_P 越大,越容易将激子复合产生的光子与腔模式耦合在一起,进而耦合到自由空间中。这个倍数即为 Purcell 因子,当原子的跃迁频率与腔谐振频率相等且原子跃迁取向与腔光场的电场匹配时, F_P ^[82] 可表示为

$$F_P = \frac{3}{4\pi^2} \left(\frac{\lambda_c}{n} \right)^3 \frac{Q}{V} \quad (10)$$

Purcell 效应是调控半导体光学特性的重要手段。

在弱耦合区域,最为人们所关注的就是如何对自发辐射的速率进行增强或抑制,以及如何将随机辐射的光子耦合到单一的腔模式中,微腔中量子体系自发辐射速率的提高,有利于实现 Purcell 效应在量子光源、光子开关、量子点激光器等光子器件领域的应用^[83-85]。

2) 强耦合作用

当耦合强度 $g > \sqrt{(\gamma_{cav}^2 + \gamma_{ex}^2)}/2$ 时,体系处于强耦合区域,会出现以激子-腔模能级反交叉为标志的真空 Rabi 分裂,激子和光子将耦合在一起形成新的半光-半物质的准粒子,即激子极化激元。由于反交叉,激子极化激元形成上极化激元(UP)和下极化激元(LP)。其能量本征值为

$$E_{LP,UP}(k_{//}) = \frac{1}{2} \left[E_{exc} + E_{cav} \pm \sqrt{4g^2 + (E_{exc} - E_{cav})^2} \right]. \quad (11)$$

当考虑到腔光子和激子的有限寿命时,能量本征值修正为

$$E_{LP,UP}(k_{//}) = \frac{1}{2} \left\{ E_{exc} + E_{cav} + i(\gamma_{cav} + \gamma_{exc}) \pm \sqrt{4g^2 + [E_{exc} - E_{cav} + i(\gamma_{cav} - \gamma_{exc})]^2} \right\}, \quad (12)$$

式中: γ_{cav} 是微腔品质引起的腔模退耦合速率; γ_{ex} 是激子非辐射弛豫速率。

强耦合效应可以验证量子物理的一些基本问题,是研究光与物质相互作用的理想系统,依托此平台进行研究有望开发出低功率有源光学器件。

4.3 全介质 F-P 微腔中光与低维材料的强耦合作用

DBR 微腔因其较高的 Q 因子而常被用来与低维半导体材料结合研究光与物质的耦合作用,人们将其与不同量子体系进行组合尝试,发现了很多新奇的物理效应。1992 年,东京大学的 Weisbuch 等^[86]将二维 GaAs 量子阱嵌入在 DBR 微腔中,将光场有效地限制

在介质体系内,首次实现了微腔光子与激子的强耦合,观察到量子阱体系的真空 Rabi 分裂,为微腔极化激元研究奠定了基础。此后随着人们对微腔中光与物质相互作用研究的不断深入,微纳材料、层状二维材料、有机半导体等材料体系的研究也相继出现,本节主要介绍二维材料体系的强耦合现象。

自 2004 年曼彻斯特大学 Geim 小组^[87]成功分离出单分子层的石墨烯材料以来,二维层状材料由于其优异的光学、电学、热学特性,受到了人们的广泛关注,过渡金属硫族化合物(TMDC)材料便是其中的代表。TMDCs 一般具有 MX_2 的化学式, M 表示过渡金属(W、Mo 等), X 表示硫族元素(S、Se 等),其具有激子束缚能大、单层直接带隙发光等特点。2014 年,美国纽约市立大学的 Menon 等^[88]将单原子层 MoS_2 材料嵌入由 SiO_2/Si_3N_4 构成的全介质 DBR 微腔中,首次在室温下实现了二维材料激子与微腔光子的强耦合。2020 年,中国科学院上海技术物理研究所陆卫和王少伟团队^[89]在室温下的 Ta_2O_5/SiO_2 全介质微腔体系中实现了单层 WS_2 激子与微腔光子之间的强光-物质耦合作用,并在角分辨反射光谱中观察到 36 meV 的 Rabi 分裂,如图 12 所示。除此之外,其他单层 TMDCs 材料也由于其大的激子束缚能而被应用于全介质 F-P 微腔中,并观察到了强耦合效应^[90-91]。

随着二维材料制备技术的发展,研究人员发现了层间堆叠产生的协同效应,例如用于探究激子-光子相互作用的 Moiré 超晶格,能够在二维异质结构中产生新的量子现象,且单原子层间的相互作用还能够定性改变超晶格的电子带结构^[92-94]。六方氮化硼(h-BN)作为一种宽带隙绝缘体,可以显著改善石墨烯或 TMDCs 的光学和电学性能,因此常被用来与二维半导体材料集成为异质结构。近年来,基于全介质 F-P 微腔的 hBN/TMDC 中的激子-极化激元的研究已经

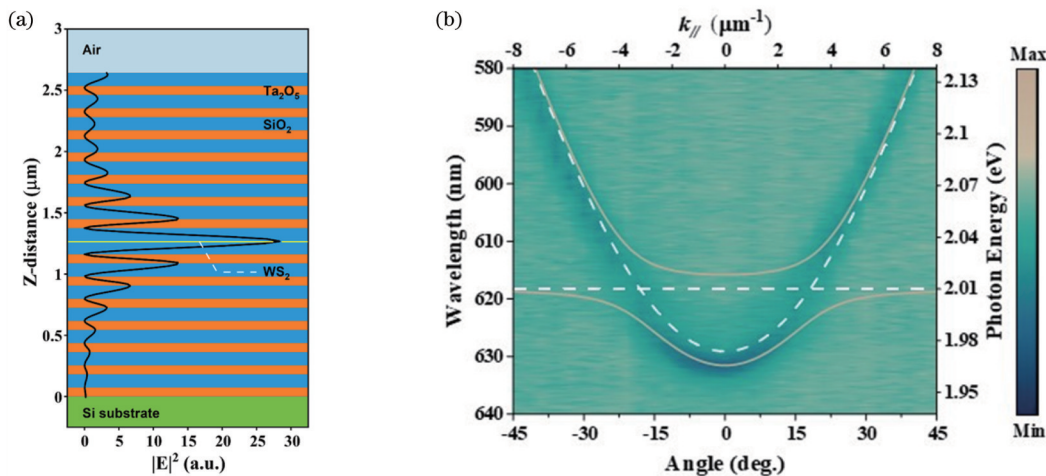


图 12 单层 WS_2 微腔结构示意图及测试结果^[89]。(a) 单层 WS_2 嵌入 DBR 微腔结构; (b) 单层 WS_2 在 DBR 微腔内的强耦合效应
Fig. 12 Schematic of structure of monolayer WS_2 embedded in a microcavity and its measurement results^[89]. (a) Structure of monolayer WS_2 embedded in a DBR microcavity; (b) strong coupling effect of monolayer WS_2 in DBR microcavity

有不少报道。2019 年,波兰华沙大学的 Pietka 等^[95]将 hBN/WS₂/hBN 结构嵌入全介质微腔中,在 5 K 的低温下观察到了强耦合现象,并通过调节 WS₂ 的层数和布拉格反射镜之间的距离,调节了激子-极化激元的本征能量。2020 年,同样是基于全介质 F-P 微腔,德国维尔茨堡大学的 Schneider 等^[96]采用 WS₂/hBN/WS₂ 结

构观察到了室温下的强耦合现象。2022 年,中国科学院上海技术物理研究所陆卫和王少伟团队^[97]通过在 DBR 半导体微腔中嵌埋 WS₂/hBN/WS₂ 异质结构,在室温下观察到了强耦合现象和 15 meV 的 Rabi 分裂,如图 13 所示。

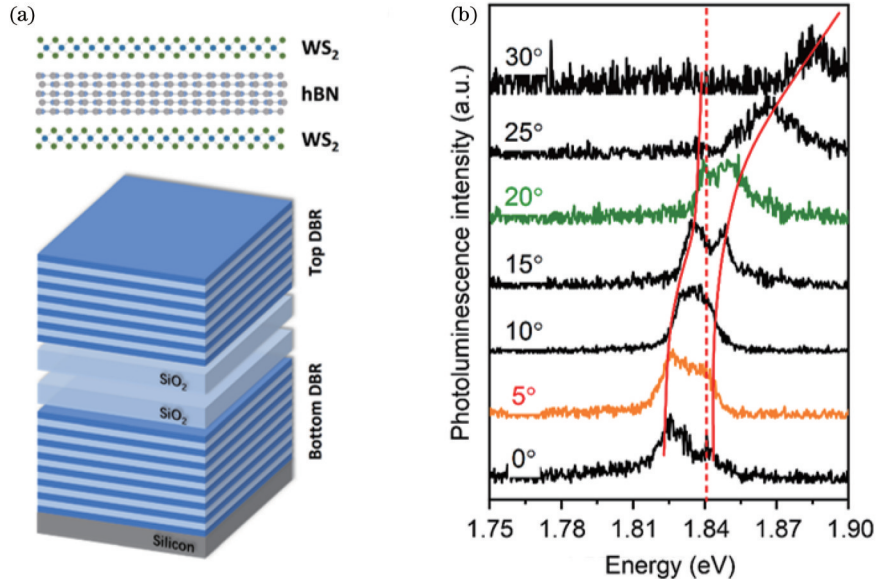


图 13 WS₂/hBN/WS₂ 异质结微腔结构示意图及测试结果^[97]。(a) WS₂/hBN/WS₂ 异质结嵌埋微腔结构与异质结的结构示意图;(b) 异质结激子与微腔光子的强耦合现象

Fig. 13 Schematic of structure of WS₂/hBN/WS₂ heterostructure embedded in a microcavity and its measurement results^[97]. (a) Schematic of structures of WS₂/hBN/WS₂ heterostructure embedded in a microcavity and heterostructure; (b) strong coupling phenomenon between heterostructure excitons and microcavity photons

4.4 激子极化激元激光器

当激子被非共振激发光激发时,会形成激子-极化激元凝聚体。与通过受激发射产生光的常规激光器不同,极化激元激光器能够自发产生激光,不需要粒子数反转,其原理是基于宏观数量的轻准粒子的积累^[98],这些准粒子处于相同的量子态,即玻色子凝聚体。美国斯坦福大学的 Yamamoto 等^[99]早在 1996 年便预测了极化激元激光的可能性,并于 2002 年通过 GaAs 多量子阱 DBR 微腔在实验上得到实现^[100],为微腔极化激元玻色-爱因斯坦凝聚(BEC)的研究打开了新的思路。在这之后,基于全介质微腔体系的量子阱极化激元激光器逐渐发展起来^[101-102],一些大激子结合能量量子阱的出现,也使室温极化激元凝聚态的出现成为可能^[103-104]。

随着光电子器件的快速发展,微型化、集成化应用已成趋势,因此人们将极化激元激光器研究的焦点逐渐放在了钙钛矿、TMDCs 等低维新材料体系上。2017 年,熊启华课题组^[106]将全无机 CsPbBr₃ 钙钛矿结构纳米片嵌入由 HfO₂/SiO₂ 构成的 DBR 微腔中,实现了激子极化激元的室温 BEC 现象和超低阈值激射,之后,该课题组又将单原子层 WS₂^[105] 嵌入全介质 F-P 微

腔中实现了极化激元激射,如图 14 所示。BEC 物理机制的发现和新材料体系的不断丰富,将为激子极化激元在量子信息处理、拓扑激光和量子光学等方面的应用铺平道路。

5 F-P 微腔在参数精密测量上的应用

F-P 微腔因其简单的结构、高品质因子和强的光学共振响应,在参数精密测量领域得到了广泛的应用。F-P 微腔传感器主要利用多光束干涉的原理,即一组相互平行的、相邻两束光的光程差固定不变的、频率相同的相干光束的叠加。当微腔内的折射率或厚度发生变化时,干涉条件也会发生改变,从而导致输出光谱的移动^[107]。通过检测输出光的变化,可以建立待测参数与输出光之间的联系,从而实现参数测量传感,如折射率^[108-109]、温度^[110-111]、湿度^[112-113]、压力^[114-115]、声音等^[116-117]。

F-P 微腔常与光纤传感器相结合,形成开放式腔或制成传感头来实现各种参数的精密测量。如图 15(a) 所示, F-P 微腔由两段单模光纤和一段空心毛细管组成,两段光纤端面形成两个反射镜,与带有缺口的毛细管形成一个开放式的 F-P 干涉仪^[109]。通过探测 F-P 干涉仪的干涉频谱强度以及信号处理,进而实现

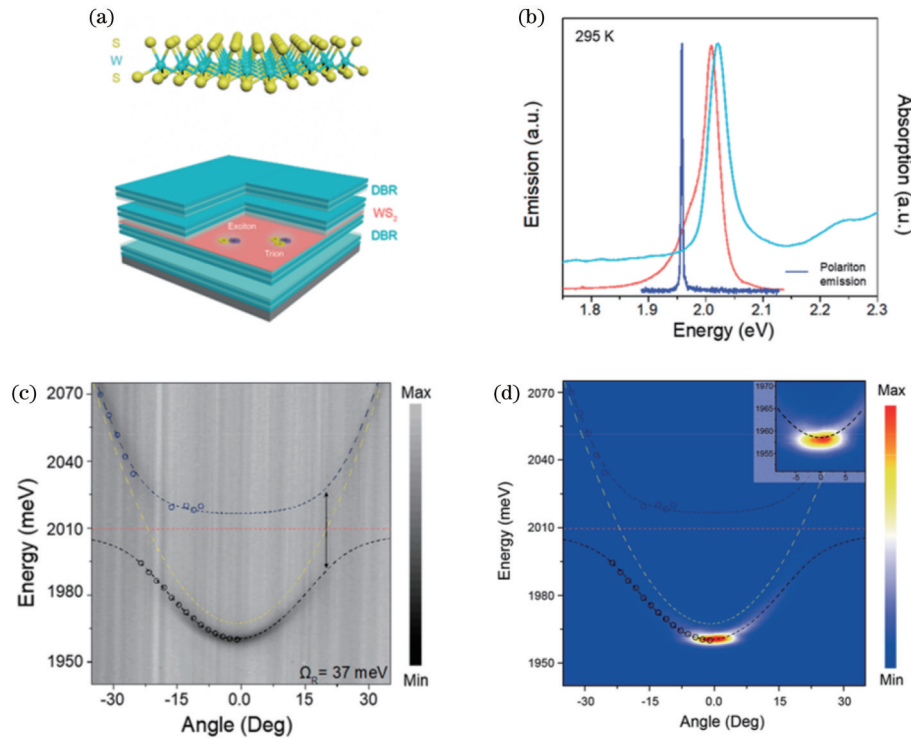


图 14 单层 WS_2 微腔结构及其测试结果^[105]。(a)单层 WS_2 嵌入 DBR 微腔结构;(b)室温下单层 WS_2 的表征。蓝色曲线为 PDMS 上单层 WS_2 的吸收光谱,红色曲线为底部 DBR 上单层 WS_2 的光致发光光谱,深蓝色曲线为极化激元辐射光谱;(c)角度分辨反射率光谱,显示单层 WS_2 嵌入 DBR 微腔结构强耦合现象;(d)阈值以上角分辨光致发光光谱,显示单层 WS_2 的 BEC 现象

Fig. 14 Schematic of structure of monolayer WS_2 embedded in microcavity and its measurement results^[105]. (a) Structure of monolayer WS_2 embedded in a DBR microcavity; (b) characterization of monolayer WS_2 at room temperature. Blue curve represents absorption spectrum of monolayer WS_2 on PDMS, red curve represents photoluminescence spectrum of monolayer WS_2 on bottom DBR, and dark blue curve represents polariton radiation spectrum; (c) angle-resolved reflectivity spectrum, showing strong coupling phenomenon of structure of monolayer WS_2 embedded in DBR microcavity; (d) angle-resolved photoluminescence spectrum above threshold, showing Bose-Einstein condensation (BEC) phenomenon of monolayer WS_2

对待测物体折射率的测量。

在温度传感检测方面,由于温度会引起传感器的轻微形变,从而导致 F-P 微腔长的缓慢变化,通过光谱解调获取腔长与温度变化之间的关系。如图 15(b)所示是传感器受温度影响引起的形变,当温度变化时,输出干涉光谱会出现一定程度的偏移,通过参数解调即可获得图 15(d)中腔长与温度的对应关系实现对温度的传感探测^[110]。2021 年,黑龙江大学柳春郁等^[111]采用光纤陶瓷头形成开放式 F-P 微腔,实现了腔内物质分别为气体、液体和固体三种不同状态时的温度测量。

在湿度传感检测方面,西安工业大学王伟等^[112]采用琼脂薄膜作为湿敏材料,以类似的双腔结构实现了在 50%RH 至 80%RH 的湿度环境范围内检测相对湿度。2023 年,中国计量大学沈常宇等^[113]在空心毛细管光纤与单模光纤中引入钛酸钡微球和聚乙烯醇(PVA)薄膜构建多个 F-P 微腔。当湿度发生变化时,PVA 薄膜会吸收或释放水分,从而改变 F-P 微腔的长度,进而引起干涉条纹的移动。通过 Vernier 效应放大这种移动,可以提高传感器的灵敏度和准确性。

在压力传感检测方面,往往也基于相似的探测原

理:当外界施加压力时,微腔光程差发生变化,通过测量传感器的输出光谱响应,可以计算出压力大小以及传感器的灵敏度、分辨率等性能指标^[114]。2022 年,北京信息科技大学何彦霖等^[115]设计了一种可集成于探针的 F-P 微腔级联布拉格光栅(FBG)的光纤力传感器,用于满足穿刺手术探针末端力测量的需求,以实现精准控制和手术质量。该传感器光纤 F-P 微腔力灵敏度可达 331.8 pm/N,FBG 力灵敏度可达 159.9 pm/N。

在声音传感检测方面,声信号的传入会引起光纤 F-P 微腔长变化,进而通过光谱解调可以对声信号进行探测。图 16 是典型的膜片式 F-P 声传感器结构,膜片材料的不同会导致传感检测效果差异频率效应的不同。二氧化硅、金属、硅胶聚合物、石墨烯等材料作为声压薄膜广泛应用于 F-P 光纤声传感器中。2021 年,南昌航空大学万生鹏等^[117]采用 GO 薄膜(石墨烯的衍生材料)与单模光纤贴合形成光纤 F-P 微腔,当声波引起 GO 薄膜振动时,腔长会发生变化,通过信号采集与滤波算法处理,可以实现较好的语音传感效果。

在气体传感检测方面,光纤 F-P 传感器也有广泛

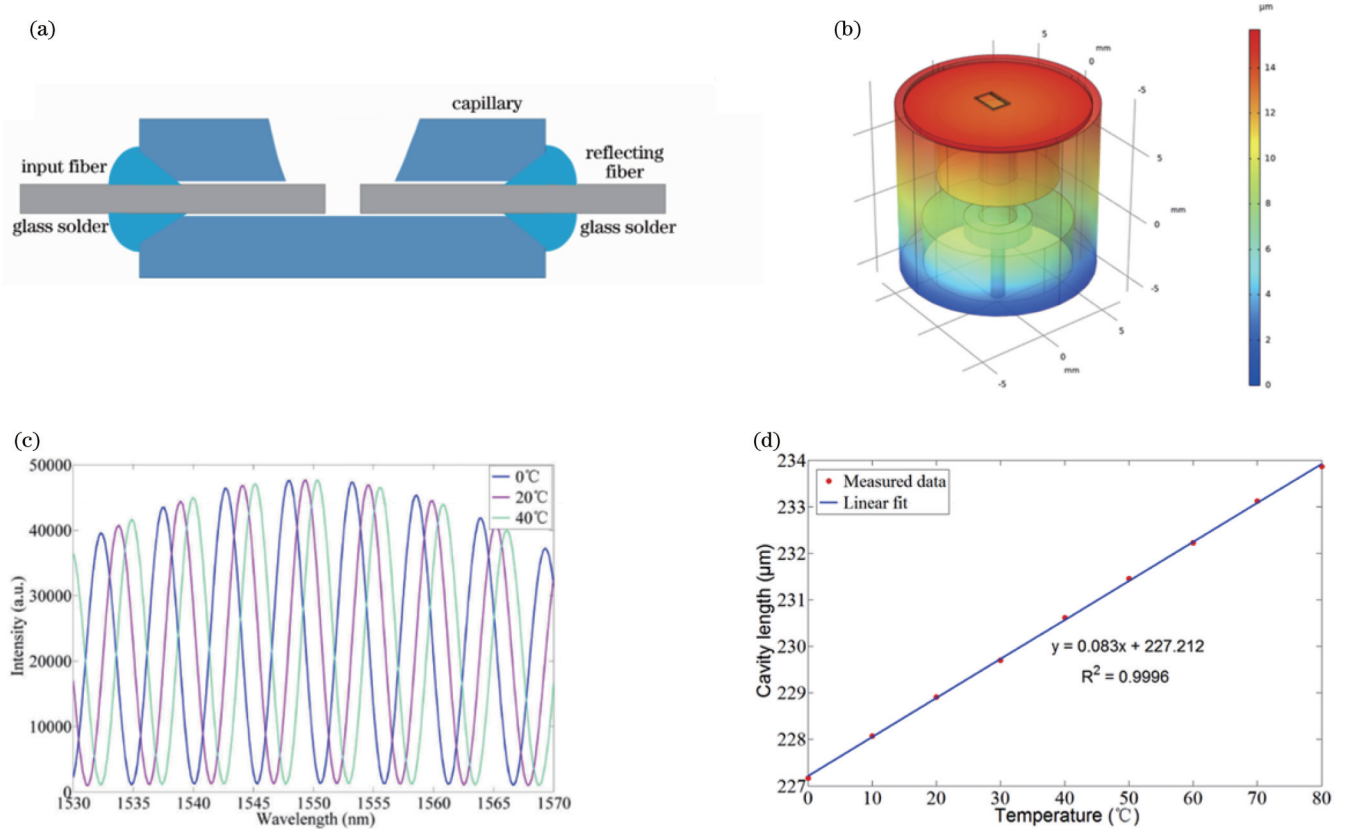


图 15 光纤 F-P 微腔用于折射率、温度传感示例。(a) 光纤 F-P 干涉仪(FPI)的基本结构^[109]; (b) 温度诱导传感器形变模拟图^[110]; (c) 不同温度下(0、20、40 °C)光纤 FPI 悬臂的干涉光谱^[110]; (d) 随温度变化的 F-P 微腔腔长解调关系^[110]

Fig. 15 Examples of fiber F-P microcavity used for refractive index and temperature sensing. (a) Basic structure of fiber F-P interferometer (FPI)^[109]; (b) simulation image of temperature-induced sensor deformation^[110]; (c) interference spectra of fiber FPI cantilever at different temperatures (0, 20, and 40 °C)^[110]; (d) demodulation relationship of F-P microcavity length with temperature change^[110]

的应用。2018年,电子科技大学代志勇等^[118]提出了一种有机聚合物敏感结合光波相位检测的光纤气体传感方法。在 F-P 微腔中填充有机聚合物薄膜,这种薄膜

材料的折射率会随着酸性气体的浓度变化而变化,因此可以通过分析光纤 F-P 微腔输出的光谱特性,实现对酸性气体浓度的测量。

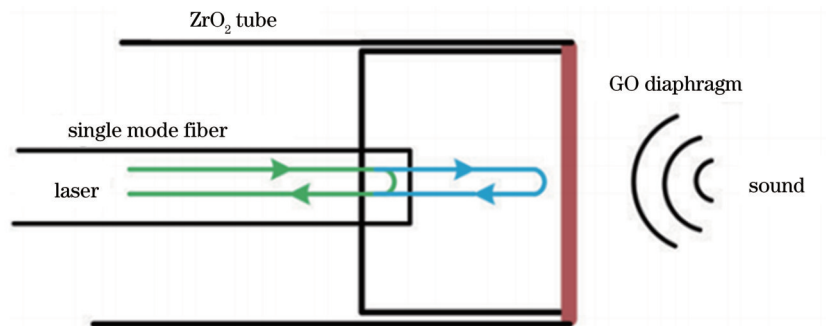


图 16 基于 GO 薄膜的 F-P 微腔声传感原理图^[117]

Fig. 16 Schematic of acoustic sensing principle of F-P microcavity based on GO (graphene oxide) film^[117]

在流体传感检测方面,光纤 F-P 微腔传感器也有相关应用。2020年,天津大学刘铁根等^[119]针对水利枢纽高速气流的流速测量需求,提出了一种基于光纤 F-P 传感技术的湍流流速测量系统,如图 17 所示。该系统由风速测量探头和偏振低相干干涉解调单元组成,

利用两支 F-P 传感器检测流场的压力和温度变化,以实现流速的计算。其中 F-P 传感器的硅膜片会因外界气压发生形变进而改变 F-P 微腔长, F-P 微腔内含有微量气体,温度变化也会导致腔长变化,因此该传感器具有压力、温度双敏感特性。

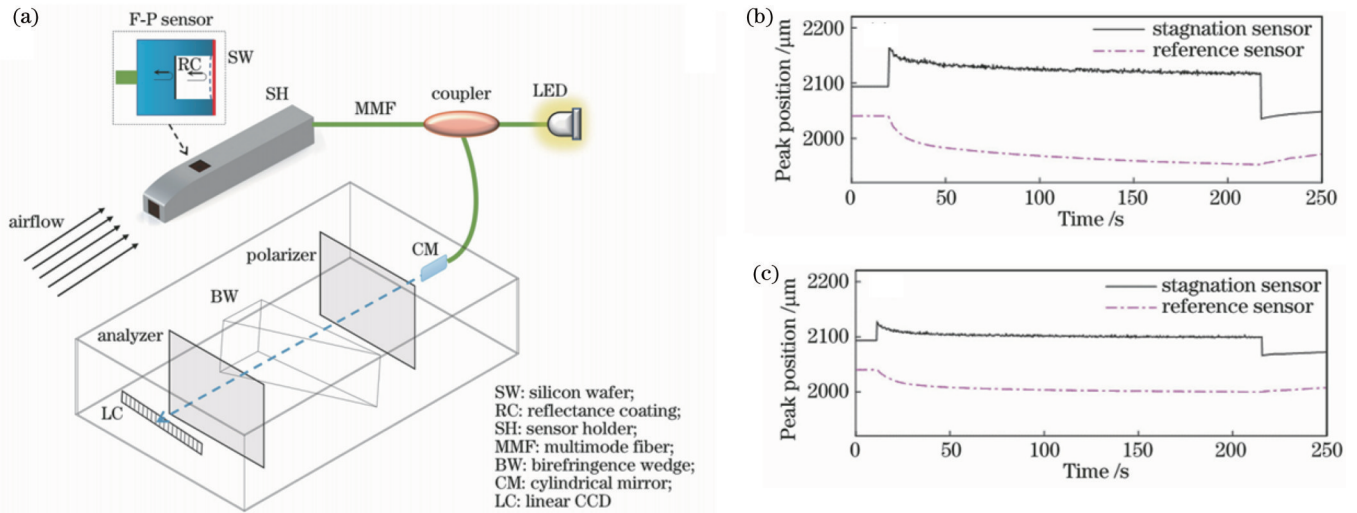


图 17 湍流流速测量系统^[119]。(a)气流流速测量系统示意图;在气流流速为(b)93 m/s;(c)54.5 m/s下,两传感器的峰位置变化
Fig. 17 Turbulent airflow velocity measurement system^[119]. (a) Schematic diagram of airflow velocity measurement system; peak position change of two sensors at airflow velocity of (b) 93 m/s; (c) 54.5 m/s

当前,光纤 F-P 微腔用于参量传感时正朝着多参量同时检测、便携式微型化等方向发展。2023 年,桂林电子科技大学苑立波等^[120]提出了一种基于多模光纤(MCF)的双 FBG 和 F-P 微腔复合光纤传感器。在单模光纤(SMF)和 MCF 之间熔接空心光纤(HCF)以形成 F-P 微腔。在 MCF 的侧芯(SC)和中心芯(CC)上分别制备了两种具有不同反射波长的 FBG。CC 上的 F-P 微腔和 FBG 组合可以同时测量温度和轴向应变,SC 上的 FBG 对弯曲敏感可以用于曲率测量。因此在单个光纤上的复合传感器可以同时测量曲率、轴向应变和温度。类似地,还有对声压和温度同时测量^[110]、温度和折射率同时测量^[121]、应变和温度同时测量^[122]的工作报道。

除了与光纤结合进行参数的传感测量以外,还可以利用 F-P 微腔强的共振模式进行材料的折射率测量。2022 年,中国科学院上海技术物理研究所陆卫和王少伟团队^[123]针对传统方法[椭圆偏振法、基于 Kramers-Kronig (K-K)关系参数反解、基于菲涅耳方程的衬度光谱拟合等]无法精确测量微小尺寸低维材料的复折射率问题,提出将待测材料嵌埋在介质光学微腔中,通过测量嵌埋材料和空腔区域共振模式的峰位变化和强度变化,精确获取低维材料的复折射率,如图 18 所示。该方法还可以区分各向异性材料的 o 光和 e 光的折射率。同时还利用组合刻蚀技术制备了一系列具有不同腔长的集成光学微腔,实现了不同波长下低维材料折射率的测量。

6 F-P 微腔在生物检测方面的应用

由于 F-P 微腔具有高灵敏度、高分辨率、高选择性等特点,其在生物领域具有广泛的应用潜力。当生物材料或生物分子被置于微腔之中,其产生的荧光等微

弱信号会被反复放大,当生物分子作为增益材料引入微腔中时,产生的激光信号在输出强度、光谱特征上远优于单独探测生物分子所获取的信号,可以用于揭示细胞及生物分子特征^[124-125]、描述内部分子相互作用变化^[126]、生物分子检测与识别^[127-128]和生物成像^[129]等。这一类应用也是光流控生物激光器中的一种类型^[122]。

世界上第一个生物细胞激光器于 2011 年正式被报道,美国哈佛医学院的 Yun 等^[130]展示了使用重组绿色荧光蛋白(GFP)的体外蛋白质激光器,并引入了基于表达 GFP 的单个活细胞激光器。2015 年,该团队^[124]又提出一种通过使用各种标准荧光染料来提供光学增益的方法。染料增益培养基可以位于细胞内部或外部,或者同时位于两者中,适用于不同类型的细胞。由于细胞种类、内部成分结构不同,将导致激光器输出发生变化。2017 年,美国密歇根大学范旭东等^[125]通过介质镜形成高品质因子的 F-P 微腔,将带有荧光染料的组织夹在其中,实现了来自肌肉和脂肪组织的不同激光发射。该平台具有窄光谱带宽、高发射强度以及强的背景抑制,能显著提高组织表征中的灵敏度、特异性和成像对比度。如图 19(c)所示,南洋理工大学 Yu-Cheng Chen(陈又诚)团队^[126]将具有自组装脂质单层的仿生液晶液滴夹在 F-P 微腔中,可实现蛋白质-脂质膜相互作用导致的输出矢量束拓扑变换,揭示了结构光-分子相互作用引起的微腔内动态特征的显著变化。

2020 年, Yu-Cheng Chen 团队^[127]提出了分子激光偏振的概念。由于 F-P 微腔提供的强光学反馈和受激发射的相干性质,通过检测受激发射过程中的分子旋转相关时间,就可以将小分子区分出来,而传统荧光偏振则无法实现这一功能。这项技术也为检测和识别不同类型的生物大分子和小分子提供了新途径。2021

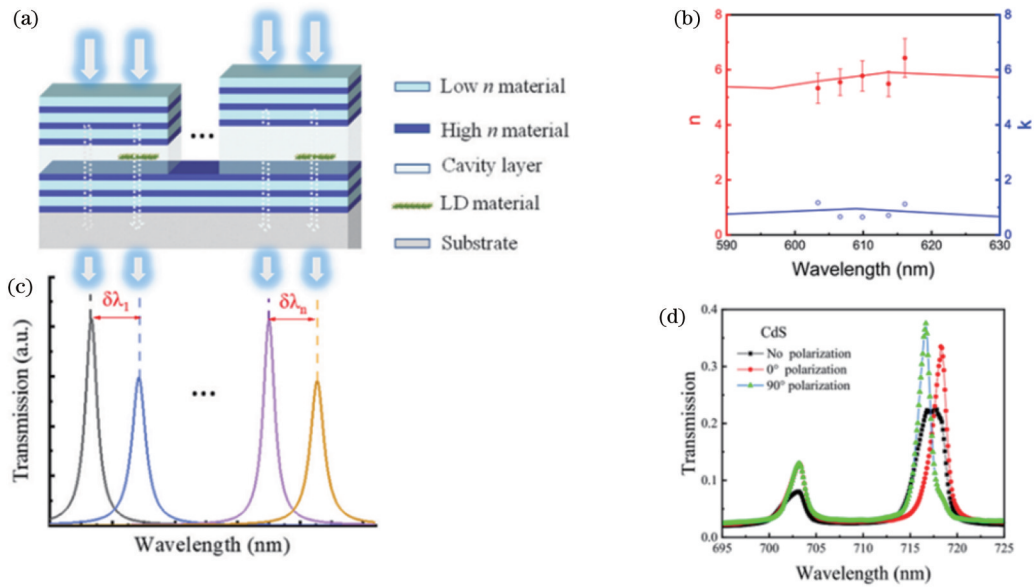


图 18 腔共振辅助测量低维材料折射率的原理示意图^[123]。(a)将低维材料嵌埋到 n 个腔中的结构示意图;(b)相对应的有无嵌埋低维材料区域的透射谱;(c)实心点和空心点表示通过腔共振法计算出的单层 WS_2 材料的 n 和 k , 相对应的实线为文献中椭偏仪测得的结果;(d)无偏振、 0° 偏振以及 90° 偏振下的嵌埋 CdS 纳米带的微腔微区透射谱, 通过腔共振法测量得到 CdS 纳米带在 716.7 nm 波长处 o 光和 e 光的折射率分别为 2.42 和 2.45

Fig. 18 Schematic diagram of principle of cavity resonance-assisted measurement of low-dimensional material refractive index^[123]. (a) Structure diagram of embedding low-dimensional material into n cavities; (b) transmission spectra of corresponding regions with and without embedded low-dimensional material; (c) solid and hollow points represent n and k of monolayer WS_2 material calculated by cavity resonance method, and corresponding lines are from recent work determined by spectroscopic ellipsometry for reference; (d) no polarization, 0° polarization, and 90° polarization microcavity microregion transmission spectra of embedded CdS nanoribbon. Refractive indices of o and e lights of CdS nanoribbon are 2.42 and 2.45 at wavelength of 716.7 nm extracted by cavity resonance method, respectively

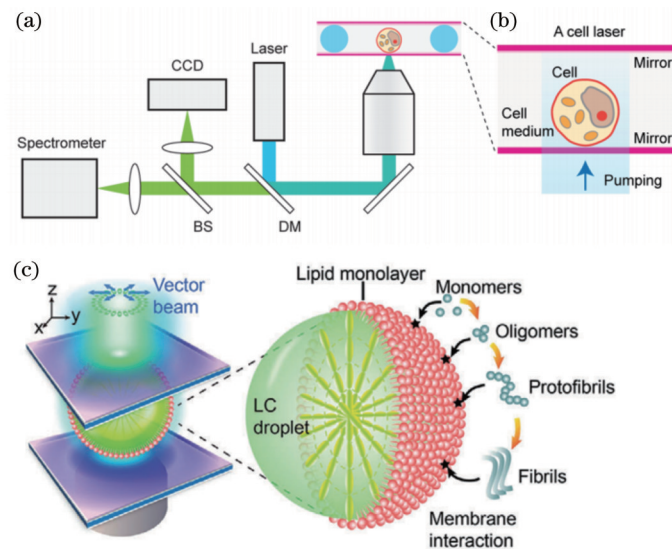


图 19 细胞激光器示例。(a)细胞激光的实验配置^[124]。细胞激光通过显微镜物镜由外部激光泵浦。通过同一物镜收集的荧光光线, 通过分光镜分离并发送到光谱仪和相机;(b)细胞被放置在两个高反射镜之间并沉降到底部镜面上;(c)通过分子相互作用产生矢量光束的示意图^[126]。不同组装(单体、寡聚体、原纤维和纤维)的淀粉样蛋白($A\beta$)与涂覆在 LC 液滴上的脂质单层相互作用, 触发矢量光束的拓扑转换

Fig. 19 Examples of cell laser. (a) Experimental setup for cell laser^[124]. Cell laser is externally pumped by a laser through a microscope objective. Fluorescence light collected by same objective is separated by a dichroic mirror and sent to a spectrometer and a camera; (b) cells are placed between two high-reflective mirrors and settle onto bottom mirror surface; (c) schematic of generating vector beams through molecular interactions^[126]. Interactions of amyloid-beta ($A\beta$) with lipid monolayers coated on LC droplets with different assemblies (monomers, oligomers, protofibrils, and fibrils), triggering topological transformation of vector beams

年,该团队^[128]将绿色荧光蛋白或手性生物分子封装在 F-P 微腔中用作增益材料,在被左旋或右旋圆偏振泵浦激光激发时,由于受激发射的非线性泵浦能量依赖性,手性光物质相互作用得到了显著增强,如图 20(a) 所示。因此,这一工作可以揭示手性光物质相互作用的更多信息和特征。

在生物成像方面,激光发射成像作为一种新兴的技术,可以通过收集发射激光来形成具有亚波长分辨率和高对比度的图像。如图 20(b) 所示, Yu-Cheng Chen 团队^[129]在 2022 年提出一种基于混合液晶微球

的、可用于细胞成像和生物传感的微激光谐振器。混合液晶微球具有高折射率,可以支持激光发射,并且无需标记即可响应生化信号。当目标分子结合到液晶微球表面时,会引起液晶分子的定向变化,从而导致散射损失增加和激光强度降低。随着技术的不断发展和进步,生物激光及其增强技术在生物分子检测以及临床应用中将提供更高灵敏度、更高分辨率的检测和分析手段。展望未来,生物激光器有望与其他成像和检测技术相融合,为生物研究、疾病诊断和治疗提供独特的解决方案。

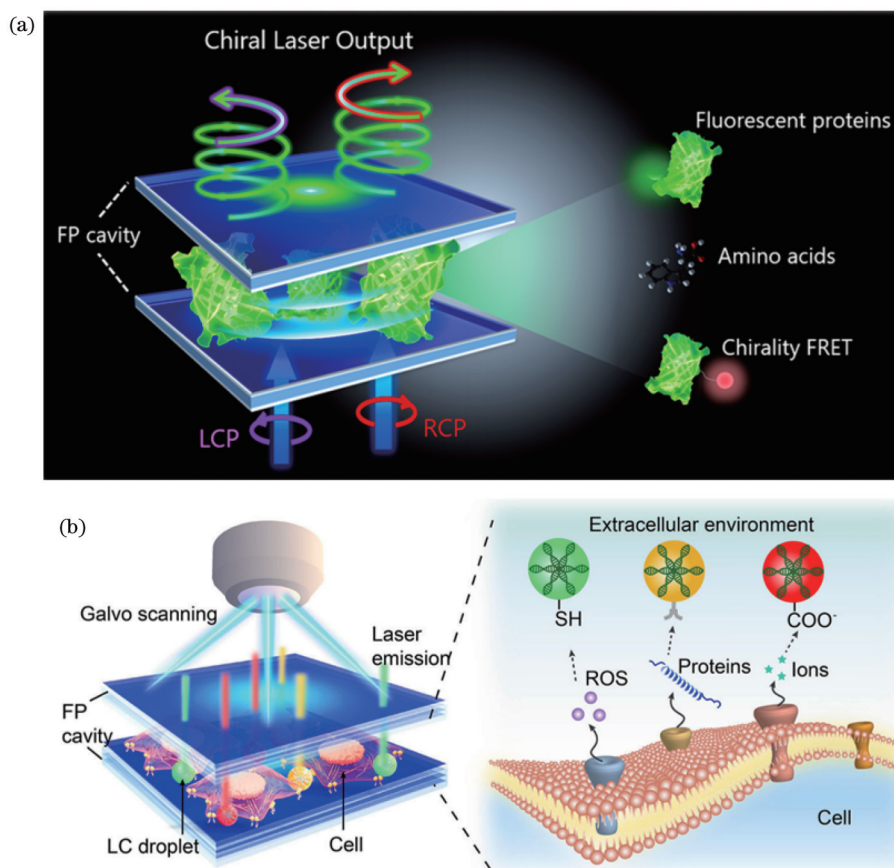


图 20 手性激光器与激光发射成像示例^[129]。(a)左图:手性分子作为激光增益介质,夹在 F-P 微腔中的手性激光器示意图。左旋(L)和右旋(R)圆偏振激光交替使用作为泵浦光源。右图:手性生物分子的细节^[128]; (b)实验装置示意图。插图是检测细胞外环境中不同类型生化信号的示意图

Fig. 20 Example of chiral laser and laser emission imaging. (a) Figure on left: schematic diagram of a chiral laser with chiral molecules as gain media sandwiched in an F-P microcavity. Left-handed (L) and right-handed (R) circularly polarized lasers are alternately used as pump light sources. Figure on right: details of chiral biomolecules^[128]; (b) schematic diagram of experimental setup. Illustration is diagram of detecting different types of biochemical signals in extracellular environment^[129]

7 基于 F-P 微腔的多维光场调控

微纳光学在偏振/光谱调控、光束整形以及涡旋光场等多维光场调控方面取得了显著进展,为光学领域的相关应用提供了新的可能性。在这些领域中,基于 F-P 微腔的多维光场调控技术尤为引人注目,因为它结合了 F-P 微腔的高品质因子和窄谱线特性,从而实现了高精度和高灵敏度的光场控制。此外, F-P 微腔

结构的可调性使得这一技术能够适应各种不同的应用场景,满足多样化的需求。这些特点使得基于 F-P 微腔的多维光场调控技术在光学研究和实际应用中具有重要价值。近年来,越来越多的研究者开始关注基于 F-P 微腔的多维光场调控技术,并在实验和理论研究中取得了丰富的成果。通过引入先进的光学元件和设计创新的光学结构,研究者们已经实现了各种高效、灵活的光场调控方案。这些进展为实现更高性能、更多

功能的光场调控提供了坚实的基础。

在偏振/光谱调控上,研究人员通过将超表面等结构引入 F-P 微腔中,改善 F-P 微腔对光场的调控能力。2019 年,美国普渡大学 Alexander V. Kildishev 团队^[14]提出如图 21(a)所示的结构,在 F-P 微腔层中引入 Ag 光栅,实现复合结构对不同偏振入射光的响应。通过改变光栅占空比,实现对 F-P 微腔共振峰位的调谐。2023 年,中国科学院上海技术物理研究所陆卫和王少伟团队^[18]提出并验证相位调控超界面的偏振-光谱同

时分光理论,将金属超表面结构嵌入于介质 F-P 微腔中,利用超界面结构对 F-P 微腔的界面相位调控效应,同时实现了 800 和 113 的高偏振消光比和光谱分辨力。此外,在金属端面散射效应和 F-P 微腔共振的共同作用下,波面将向两端压缩,从而具备衍射抑制效应。理论计算表明,在 10 μm 像元级尺寸下,该超界面器件比传统光栅器件的偏振消光比提升了 6 倍,为大规模像素级偏振探测消光比极低的原理性难题提供了一种有效的解决途径。

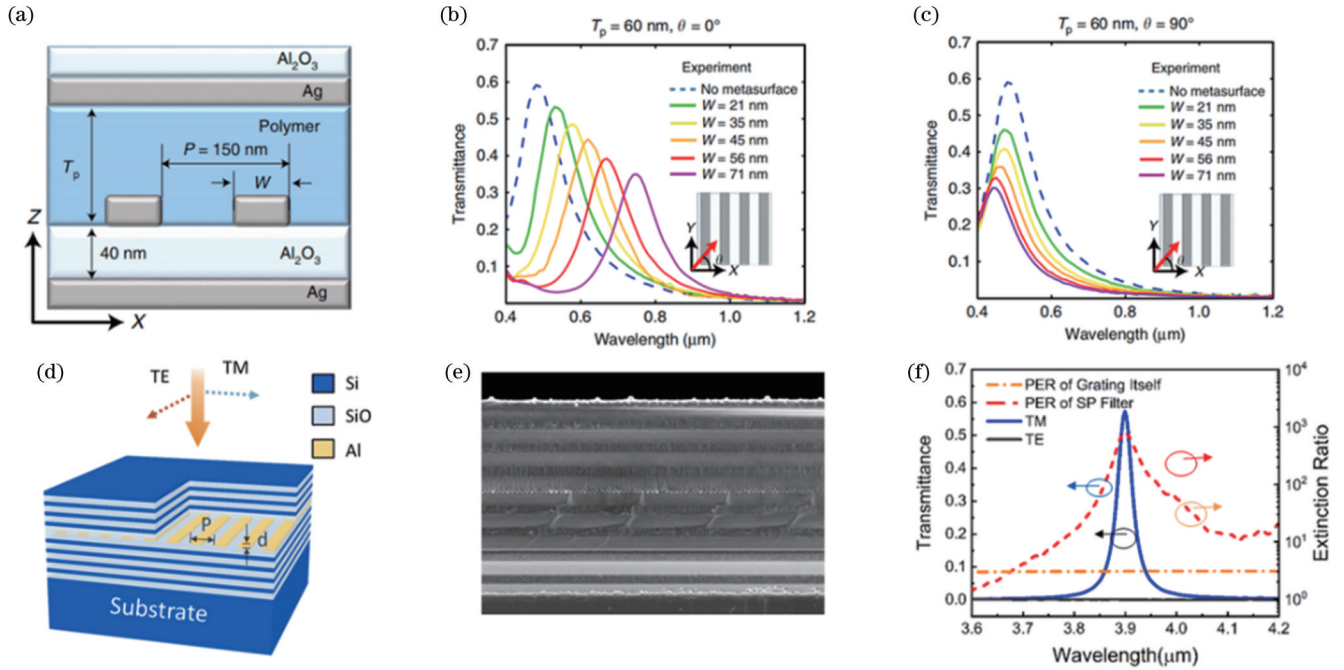


图 21 基于 F-P 微腔的偏振/光谱调控。(a)基于超表面的纳米腔的横截面示意图^[14]; (b)、(c)图(a)结构在不同偏振入射光下透射谱的实验结果^[14]; (d)超界面光谱-偏振滤波器模型^[18]; (e)超界面滤波器的 SEM 截面测试图像^[18]; (f)超界面滤波器实验测试结果。实线和点线分别为超界面滤波器的 TM 波和 TE 波透过率,而虚线和点划线分别为超界面滤波器和裸光栅的偏振消光比^[18]

Fig. 21 Polarization/spectral control based on F-P microcavity. (a) Schematic cross-section of a nano-cavity based on a metasurface^[14]; (b), (c) experimental results of transmission spectra of structure in (a) under different polarized incident lights^[14]; (d) metainterface spectrum-polarization filter model^[18]; (e) cross-sectional image of metainterface filter captured by SEM^[18]; (f) experimental results of metainterface filter. Solid line and dotted line are transmittances of TM and TE lights of metainterface filter, respectively, while dashed line and dash-dot line are polarization extinction ratios of metainterface filter and bare grating, respectively^[18]

在光束整形中,可以通过对传统平面 F-P 微腔的腔型结构进行优化设计,用于获取光束的准直、更小模式体积、更高品质因子等优良特性^[131]。2015 年,英国牛津大学 Trichet 等^[12]采用聚焦离子束(FIB)的方式对衬底进行溅射处理,然后生长 DBR 层状结构,以构建凹面反射镜,如图 22(a)所示。微腔反射镜有效率半径缩小至 4.3 μm,模式体积为 $16 \times \left(\frac{\lambda}{2}\right)^3$ 。2016 年,英国牛津大学 Flatten 等^[13]采用类似的方式生长了曲率半径为 6 μm 的微腔,并研究了两个微腔之间的耦合过程,观察到了从独立腔向耦合腔转化过程中微腔模

式的演变以及模式分裂,如图 22(b)所示。除了上述对 F-P 微腔镜面结构的修饰,研究人员通过在 F-P 微腔中引入超表面结构,对入射光束相位进行调制,实现了品质因子为 4600、线宽小于 0.4 nm、模式体积小于 2.7 λ³ 的微腔结构。通过对超表面进行精心设计,还可以实现其他形状的光斑图案,如图 23 所示^[19]。

类似地,将 F-P 微腔与涡旋光的螺旋相位结构相结合,可以实现涡旋光的产生和调控。F-P 微腔的高品质因子等特性,可以使得涡旋光束具有较高的光谱纯度和稳定性,有利于实际应用。这些涡旋光束在光通信、光操控、光学传感和量子信息等领域具有潜在的应用

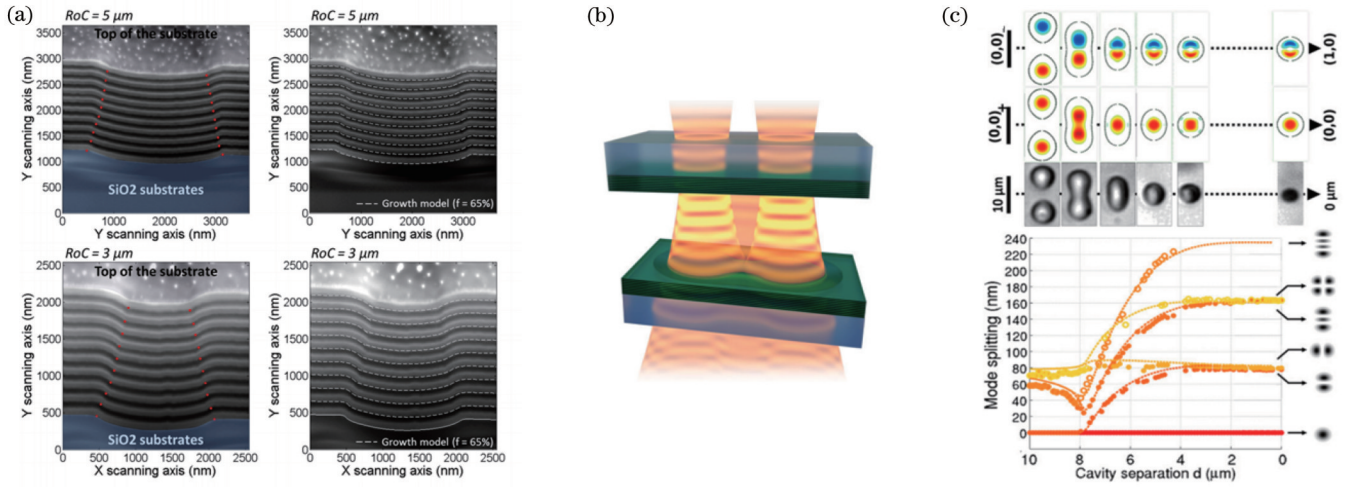


图 22 基于 F-P 微腔的光束整形示例。(a) 曲率半径分别为 $5\ \mu\text{m}$ (顶部) 和 $3\ \mu\text{m}$ (底部) 的半球微腔的 SEM 横截面图像^[12]。左侧图形显示原始图像, 点显示裂缝。右侧图形显示生长模型的虚线图像; (b) 耦合开放式微腔结构示意图^[13]; (c) 模式分裂及相应耦合腔结构图示(上图), 以及激光透射实验获得的实验结果(点)和理论值(虚线)(下图)^[13]

Fig. 22 Example of beam shaping based on F-P microcavity. (a) SEM cross-sectional images of a hemispherical microcavity with a radius of curvature of $5\ \mu\text{m}$ (top) and $3\ \mu\text{m}$ (bottom), respectively. Left graph shows original image, and dots show cracks. Right graph shows dashed image of growth model^[12]; (b) schematic diagram of structure of coupled open microcavity^[13]; (c) schematic diagram of mode splitting and corresponding coupled cavity structure (top panel), and experimental results (dots) and theoretical values (dashed lines) obtained from laser transmission experiments (bottom panel)^[13]

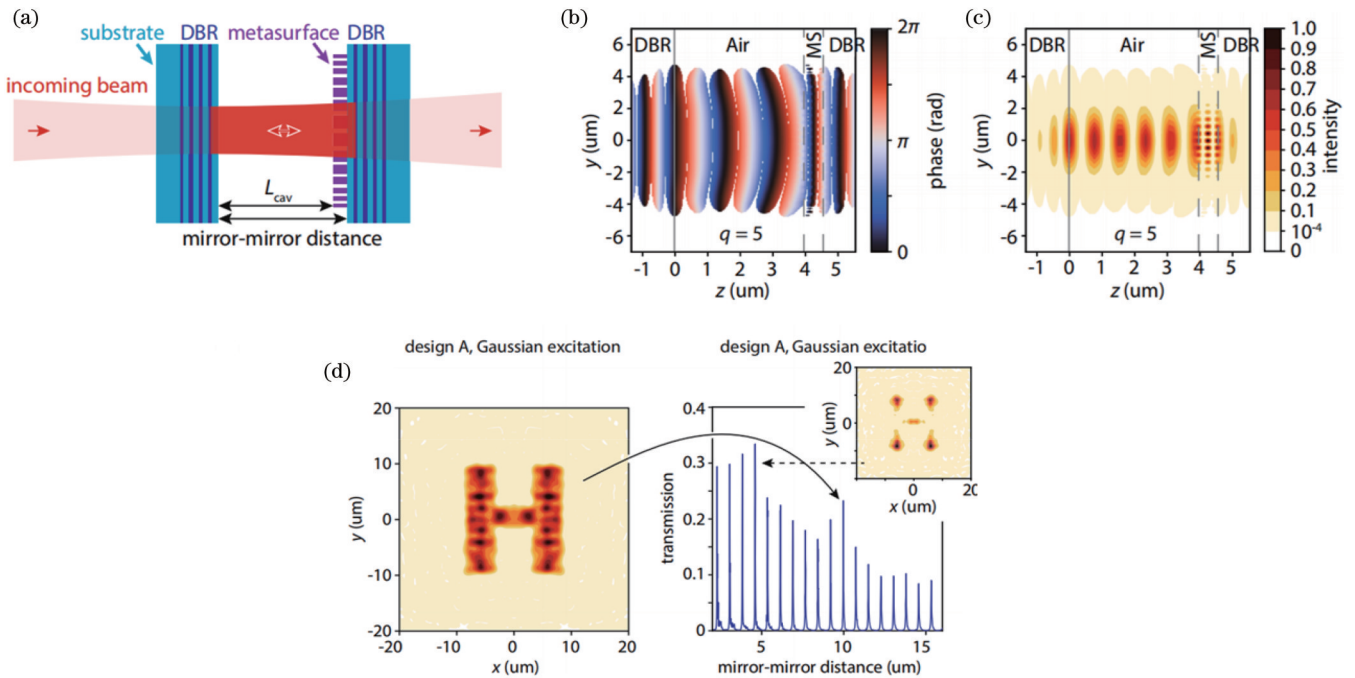


图 23 引入超表面结构的 F-P 微腔光束整形结果。(a) 结构示意图。放置在第二个 DBR 表面上的超表面与聚焦的高斯光束的相位演化相匹配, 从而在横向方向 (xy 方向) 也限制光场; (b) 纵向模式指数 $q = 5$ 时, 有限差分建模计算的相位演化; (c) 图 (b) 模式的光强分布; (d) 设计“H”型图案的超表面微腔^[19]。

Fig. 23 Beam shaping results of F-P microcavity with introduction of metasurface structure. (a) Structure diagram. Metasurface placed on second DBR surface matches phase evolution of focused Gaussian beam, thus limiting optical field in transverse direction (xy direction) as well; (b) phase evolution calculated by finite-difference time-domain modeling for longitudinal mode index $q = 5$; (c) light intensity distribution of mode in (b); (d) design of “H” pattern of metasurface microcavity^[19]

价值。2019 年, 法国巴黎萨克雷大学 Zambon^[15] 提出采用带有旋转对称性的平面微腔, 通过圆偏振光旋转

偏振激发增益介质的方法, 来调控光束的轨道角动量。2020 年, 上海交通大学谢国强团队^[16] 提出可以通过在

激光器腔镜上印制特殊设计的同心环图案来直接产生多个涡旋光束,如图 24 所示。这些光束具有独特的空间和时间特性,通过控制不同涡旋组分的强度和相位,就可以实现多涡旋激光器的空间和时间编码,可以用于数据传输等应用领域。南非威特沃特斯兰

德大学 Forbes 等^[17]提出一种腔内超表面增强激光器,通过对超表面进行相位设计,可以实现任意轨道角动量(OAM)耦合至线偏振态,量子数最高可达 100。这种设计能有效减少激光器元件的数量和复杂性。

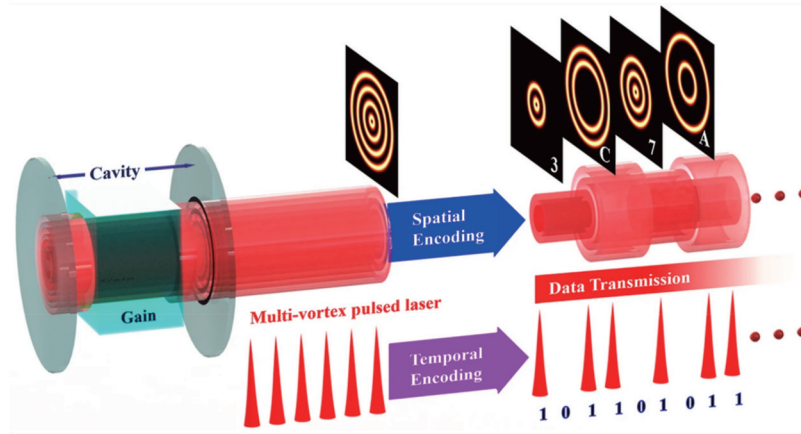


图 24 多涡旋脉冲光束激光器^[16]。空间编码通过组合涡旋光束的特定组件实现,而时间编码则通过调制脉冲实现

Fig. 24 Multivortex pulsed beam laser^[16]. Spatial encoding is achieved by combining specific components of vortex beam, while temporal encoding is achieved by modulating pulse

8 总结与展望

21 世纪以来,随着微纳加工技术的引入,基于 F-P 微腔的相关研究及应用进入了新的发展阶段。本文综述了 F-P 微腔在光谱探测、微纳激光器、传感监测等诸多方向的前沿研究。在分光和光谱探测方面, F-P 微腔因其光学分辨率与距离无关的特性被广泛用于分光器件的制备,为光谱探测系统的微小型化、集成化提供了新的解决途径,随着微纳加工技术的不断发展,基于集成 F-P 微腔的成像光谱探测器向更高分辨率和多维光场探测方向发展;在量子光学方面,全介质 F-P 微腔因其易制备、具有高品质因子及与各类半导体材料兼容,已经观察到了室温下激子-极化激元的 BEC 现象,相信随着激子-微腔体系耦合机制的深入研究,在将来能够实现激子极化激元超低阈值激光器的实际应用;在传感方面, F-P 微腔因其简单的结构、强的光学共振响应和可调谐性被用于温度传感、湿度传感、压力传感、气体传感等诸多领域,且已逐渐向多参量同时检测的方向发展。未来, F-P 微腔的发展势必与超表面技术相结合,形成光谱-偏振-涡旋等多维光场的调控模式,为光通信、量子通信、光传感等领域带来新的发展机遇。

参 考 文 献

- [1] 唐晋发, 顾培夫, 刘旭. 现代光学薄膜技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006.
Tang J F, Gu P F, Liu X. Modern optical thin film technology [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006.
- [2] 王少伟. 新型光、电功能材料研究[D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2003.

Wang S W. Research on new optical and electronic functional materials[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2003.

- [3] Wang S W, Chen X S, Lu W, et al. Integrated optical filter arrays fabricated by using the combinatorial etching technique[J]. Optics Letters, 2006, 31(3): 332-334.
- [4] Wang S W, Liu D, Lin B, et al. 16×1 integrated filter array in the MIR region prepared by using a combinatorial etching technique[J]. Applied Physics B, 2006, 82(4): 637-641.
- [5] Wang S W, Xia C S, Chen X S, et al. Concept of a high-resolution miniature spectrometer using an integrated filter array [J]. Optics Letters, 2007, 32(6): 632-634.
- [6] Huang E, Ma Q, Liu Z W. Etalon array reconstructive spectrometry[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 40693.
- [7] McClung A, Samudrala S, Torfeh M, et al. Snapshot spectral imaging with parallel metasystems[J]. Science Advances, 2020, 6(38): eabc7646.
- [8] 刘春雨, 丁祎, 刘帅, 等. 滤光片分光型高光谱相机发展现状 & 趋势(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(1): 20210981.
Liu C Y, Ding Y, Liu S, et al. Development status and trend of filter hyperspectral camera(Invited) [J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(1): 20210981.
- [9] Xuan Z Y, Liu Q Q, Cui Z Z, et al. On-chip short-wave infrared multispectral detector based on integrated Fabry-Pérot microcavities array[J]. Chinese Optics Letters, 2022, 20(6): 061302.
- [10] Xuan Z Y, Wang Z, Liu Q Q, et al. Short-wave infrared chip-spectrometer by using laser direct-writing grayscale lithography [J]. Advanced Optical Materials, 2022, 10(19): 2200284.
- [11] Deng H, Haug H, Yamamoto Y. Exciton-polariton bose-einstein condensation[J]. Reviews of Modern Physics, 2010, 82(2): 1489-1537.
- [12] Trichet A A P, Dolan P R, Coles D M, et al. Topographic control of open-access microcavities at the nanometer scale[J]. Optics Express, 2015, 23(13): 17205-17216.
- [13] Flatten L C, Trichet A A P, Smith J M. Spectral engineering of coupled open-access microcavities[J]. Laser & Photonics Reviews, 2016, 10(2): 257-263.

- [14] Shaltout A M, Kim J, Boltasseva A, et al. Ultrathin and multicolour optical cavities with embedded metasurfaces[J]. Nature Communications, 2018, 9: 2673.
- [15] Zambon N C, St-Jean P, Miličević M, et al. Optically controlling the emission chirality of microlasers[J]. Nature Photonics, 2019, 13(4): 283-288.
- [16] Qiao Z, Wan Z Y, Xie G Q, et al. Multi-vortex laser enabling spatial and temporal encoding[J]. Photonix, 2020, 1(1): 1-14.
- [17] Sroor H, Huang Y W, Sephton B, et al. High-purity orbital angular momentum states from a visible metasurface laser[J]. Nature Photonics, 2020, 14(8): 498-503.
- [18] Liu Q Q, Li C L, Xie M B, et al. Metainterface and application for high-performance spectro-polarimetric filter[J]. ACS Photonics, 2023, 10(1): 125-133.
- [19] Ossiander M, Meretska M L, Rourke S, et al. Metasurface-stabilized optical microcavities[J]. Nature Communications, 2023, 14: 1114.
- [20] Liu Q Q, Zhao X C, Li C L, et al. Coupled Tamm plasmon polaritons induced narrow bandpass filter with ultra-wide stopband[J]. Nano Research, 2022, 15(5): 4563-4568.
- [21] 刘清权. 微纳结构窄光谱调控新效应研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2023.
- Liu Q Q. Research on new effects of narrow band spectrum regulation of micro/nano structures[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2023.
- [22] Kavokin A V, Shelykh I A, Malpuech G. Lossless interface modes at the boundary between two periodic dielectric structures[J]. Physical Review B, 2005, 72(23): 233102.
- [23] Kaliteevski M, Iorsh I, Brand S, et al. Tamm plasmon-polaritons: possible electromagnetic states at the interface of a metal and a dielectric Bragg mirror[J]. Physical Review B, 2007, 76(16): 165415.
- [24] Wang S. Principles of distributed feedback and distributed Bragg-reflector lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1974, 10(4): 413-427.
- [25] Joannopoulos J D, Meade R, Winn J N. Photonic crystals: molding the flow of light[J]. Princeton: Princeton Univ Press, 1995.
- [26] Sakoda K. Optical properties of photonic crystals[M]. 2nd ed. New York: Springer, 2004.
- [27] MacLeod H A, MacLeod H A. Thin-film optical filters[M]. Boston: CRC Press, 2010.
- [28] Yang H U, D'Archangel J, Sundheimer M L, et al. Optical dielectric function of silver[J]. Physical Review B, 2015, 91(23): 235137.
- [29] 钱磊. 可见光通信网络物理层安全及时延保障技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- Qian L. Research on physical layer security and delay guarantee technology of visible light communication network[D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [30] 陈圆缘. 光子纠缠在量子信息处理中的应用[D]. 南京: 南京大学, 2019.
- Chen Y Y. Application of photon entanglement in quantum information processing[D]. Nanjing: Nanjing University, 2019.
- [31] 李民赞, 韩东海, 王秀. 光谱分析技术及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- Li M Z, Han D H, Wang X. Spectral analysis technology and its application[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [32] 刘建学. 实用近红外光谱分析技术[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- Liu J X. Practical near infrared spectroscopy analysis technology [M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [33] Percival D B, Walden A T. Spectral analysis for physical applications[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.
- [34] Correia J H, de Graaf G, Kong S H, et al. Single-chip CMOS optical microspectrometer[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2000, 82(1/2/3): 191-197.
- [35] 王颖, 巩岩. LVF 型多光谱成像光谱仪设计[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(1): 013003.
- Wang Y, Gong Y. Design of multispectral imaging spectrometer using linear variable filter[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(1): 013003.
- [36] 李洪波. 基于 LVF 的光谱成像技术研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2018.
- Li H B. Research on spectral imaging technology based on linear gradient filter[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [37] Vane G, Mika A M. Linear-wedge spectrometer[J]. Proceedings of SPIE, 1990, 1298: 127-131.
- [38] 李文杰, 王成良, 郑新波, 等. 基于 LVF 的成像光谱仪综述[J]. 红外, 2015, 36(3): 1-7.
- Li W J, Wang C L, Zheng X B, et al. Review of imaging spectrometer based on linear variable filter[J]. Infrared, 2015, 36(3): 1-7.
- [39] Gat N, Subramanian S, Ross S, et al. Thermal Infrared Imaging Spectrometer (TIRIS) status report[J]. Proceedings of SPIE, 1997, 3061: 284-291.
- [40] Zhang L, Anthon E W, Harrison J C, et al. Miniature spectrometer based on linear variable interference filters[J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3855: 42-50.
- [41] Kiran Kumar A S, Chowdhury A R. Hyper-Spectral Imager in visible and near-infrared band for lunar compositional mapping [J]. Journal of Earth System Science, 2005, 114(6): 721-724.
- [42] Loesel J, Laubier D. Study of accessible performances of a spectro imager using a wedge filter[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7100: 710013.
- [43] Qian S N, Bergeron M, Girard R, et al. Concept study of Canadian hyperspectral mission[C]//2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, July 13-18, 2014, Quebec City, QC, Canada. New York: IEEE Press, 2014: 2578-2581.
- [44] Grabarnik S, Taccola M, Maresi L, et al. Compact multispectral and hyperspectral imagers based on a wide field of view TMA[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10565: 1056505.
- [45] Sémerly A, Réess J M, Lemarquais F, et al. Wedge filter imaging spectrometer[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10567: 1056720.
- [46] 董瑛, 尤政, 郝云彩. 纳型卫星高光谱遥感系统一基于空间线性可变滤波器的成像光谱仪(SVFIS)[J]. 宇航学报, 2002, 23(4): 12-14, 29.
- Dong Y, You Z, Hao Y C. Hyperspectral remote sensing system for nanosatellite-imaging spectrometer based on spatially linear variable filter (SVFIS)[J]. Journal of Astronautics, 2002, 23(4): 12-14, 29.
- [47] 徐晓轩, 林海波, 俞钢, 等. 小型线形可变滤光片分光的可见成像光谱仪及其特性研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2002, 22(5): 713-717.
- Xu X X, Lin H B, Yu G, et al. Research of image spectrometer using linear variable interference filter[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2002, 22(5): 713-717.
- [48] 范滨, 李刚正, 程鑫彬, 等. LVF 的制备与测试[J]. 光学仪器, 2006, 28(4): 95-103.
- Fan B, Li G Z, Cheng X B, et al. Production and measurement of linear variable filter[J]. Optical Instruments, 2006, 28(4): 95-103.
- [49] 陈焘, 罗崇泰, 刘宏开, 等. 多光谱带通 LVF 的研制[J]. 光电工程, 2007, 34(7): 72-75.
- Chen T, Luo C T, Liu H K, et al. Development of multi-band linear variable filters[J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34(7): 72-75.
- [50] 秦洁玉, 罗崇泰, 马勉军. LVF 镀制挡板设计[J]. 真空与低温, 2007, 13(1): 57-62.
- Qin J Y, Luo C T, Ma M J. Mask design for linear variable filters[J]. Vacuum and Cryogenics, 2007, 13(1): 57-62.
- [51] 张建, 高劲松, 李玉东. 高色散系数 LVF 的研制[J]. 光学精密

- 工程, 2015, 23(5): 1221-1226.
- Zhang J, Gao J S, Li Y D. Linear variable filter with high dispersion coefficient[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(5): 1221-1226.
- [52] 于新洋. LVF 型近红外水果品质分析仪及应用研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017.
- Yu X Y. Development and application of a handheld near-infrared spectrometer based on a linear variable filter for measuring the internal quality of fruit[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [53] 袁境泽. 人体血红蛋白近红外光谱无创分析方法研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017.
- Yuan J Z. Research on noninvasive measurement of human hemoglobin by near infrared spectroscopy[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [54] 樊星皓, 刘春雨, 金光, 等. 轻小型高分辨率星载高光谱成像光谱仪[J]. 光学精密工程, 2021, 29(3): 463-473.
- Fan X H, Liu C Y, Jin G, et al. Small and high-resolution spaceborne hyperspectral imaging spectrometer[J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(3): 463-473.
- [55] Fan X H, Liu C Y, Liu S A, et al. The instrument design of lightweight and large field of view high-resolution hyperspectral camera[J]. Sensors, 2021, 21(7): 2276.
- [56] Wang S W, Liu D Q, Lin B, et al. Realization of integrated narrow bandpass filters in the infrared region[J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2004, 25(11): 1677-1683.
- [57] Wang S W, Ji R N, Lu W. Applications of optical coatings on spectral selective structures[M]//Aliofkhaezai M, Ali N, Chipara M, et al. Handbook of modern coating technologies. Amsterdam: Elsevier, 2021: 269-319.
- [58] Jiao H F, Wu Y G, Tian G X, et al. Two-chamber integrated multichannel narrowband filter prepared by a multistep etching method[J]. Applied Optics, 2007, 46(6): 867-871.
- [59] Wang X L, Albrecht A, Mai H H, et al. High resolution 3D NanoImprint technology: template fabrication, application in Fabry-Pérot-filter-array-based optical nanospectrometers[J]. Microelectronic Engineering, 2013, 110: 44-51.
- [60] Yang Z M, Chen Y Q, Zhou Y M, et al. Microscopic interference full-color printing using grayscale-patterned fabry-perot resonance cavities[J]. Advanced Optical Materials, 2017, 5(10): 1700029.
- [61] Williams C, Gordon G S D, Wilkinson T D, et al. Grayscale-to-color: scalable fabrication of custom multispectral filter arrays[J]. ACS Photonics, 2019, 6(12): 3132-3141.
- [62] Horie Y, Arbabi A, Arbabi E, et al. Wide bandwidth and high resolution planar filter array based on DBR-metasurface-DBR structures[J]. Optics Express, 2016, 24(11): 11677-11682.
- [63] Yang Z Y, Albrow-Owen T, Cai W W, et al. Miniaturization of optical spectrometers[J]. Science, 2021, 371(6528): eabe0722.
- [64] Liu Q Q, Xuan Z Y, Wang Z, et al. Low-cost micro-spectrometer based on a nano-imprint and spectral-feature reconstruction algorithm[J]. Optics Letters, 2022, 47(11): 2923-2926.
- [65] Bao J, Bawendi M G. A colloidal quantum dot spectrometer[J]. Nature, 2015, 523(7558): 67-70.
- [66] Yang Z, Albrow-Owen T, Cui H, et al. Single-nanowire spectrometers[J]. Science, 2019, 365(6547): 1017-1020.
- [67] Meng J J, Cadusch J J, Crozier K B. Detector-only spectrometer based on structurally colored silicon nanowires and a reconstruction algorithm[J]. Nano Letters, 2020, 20(1): 320-328.
- [68] Wang Z, Yi S, Chen A, et al. Single-shot on-chip spectral sensors based on photonic crystal slabs[J]. Nature Communications, 2019, 10: 1020.
- [69] Chang C C, Lee H N. On the estimation of target spectrum for filter-array based spectrometers[J]. Optics Express, 2008, 16(2): 1056-1061.
- [70] Huang M H, Mao S, Feick H, et al. Room-temperature ultraviolet nanowire nanolasers[J]. Science, 2001, 292(5523): 1897-1899.
- [71] Choi H J, Johnson J C, He R R, et al. Self-organized GaN quantum wire UV lasers[J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2003, 107(34): 8721-8725.
- [72] Agarwal R, Barrelet C J, Lieber C M. Lasing in single cadmium sulfide nanowire optical cavities[J]. Nano Letters, 2005, 5(5): 917-920.
- [73] Pan A L, Liu R B, Zhang Q L, et al. Fabrication and red-color lasing of individual highly uniform single-crystal CdSe nanobelts [J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2007, 111(38): 14253-14256.
- [74] Saxena D, Mokkapatil S, Parkinson P, et al. Optically pumped room-temperature GaAs nanowire lasers[J]. Nature Photonics, 2013, 7(12): 963-968.
- [75] Zhang Q L, Wang S W, Liu X X, et al. Low threshold, single-mode laser based on individual CdS nanoribbons in dielectric DBR microcavity[J]. Nano Energy, 2016, 30: 481-487.
- [76] Cui Z Z, Yu Z P, Zhao X C, et al. On-chip multiwavelength single-mode lasers with CdSe nanoribbons-embedded microcavities[J]. Physica Status Solidi (RRL)-Rapid Research Letters, 2023, 17(3): 2370005.
- [77] Huang C Y, Zou C, Mao C Y, et al. CsPbBr₃ perovskite quantum dot vertical cavity lasers with low threshold and high stability[J]. ACS Photonics, 2017, 4(9): 2281-2289.
- [78] Zhang Y S, Wang S W, Chen S L, et al. Wavelength-tunable mid-infrared lasing from black phosphorus nanosheets[J]. Advanced Materials, 2020, 32(17): 1808319.
- [79] Zhang J A, Zhao X C, Liu Q Q, et al. Low-threshold single-mode laser in perovskite microdiscs direct-synthesized into planar microcavity[J]. Applied Physics Letters, 2022, 120(7): 071110.
- [80] Andreani L C, Panzarini G, Gérard J M. Strong-coupling regime for quantum boxes in pillar microcavities: theory[J]. Physical Review B, 1999, 60(19): 13276-13279.
- [81] Cui Z Z, Liu Q Q, Xie M B, et al. Effects of embedded low-dimensional materials on resonant mode of distributed Bragg reflector cavity[EB/OL]. [2023-02-03]. <http://journal.sitp.ac.cn/hwyhmb/hwyhmben/article/abstract/2023016>.
- [82] Purcell E M. Spontaneous emission probabilities at radio frequencies[J]. Physical Review, 1946, 69(11): 681.
- [83] Notomi M. Manipulating light with strongly modulated photonic crystals[J]. Reports on Progress in Physics, 2010, 73(9): 096501.
- [84] Gibbs H M, Khitrova G, Koch S W. Exciton-polariton light-semiconductor coupling effects[J]. Nature Photonics, 2011, 5(5): 273-282.
- [85] 刘晓泽, 张馨元, 张顺平, 等. 二维半导体微纳光腔中光与物质的耦合[J]. 光学学报, 2021, 41(8): 0823003.
- Liu X Z, Zhang X Y, Zhang S P, et al. Light-matter coupling of two-dimensional semiconductors in micro-nano optical cavities [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(8): 0823003.
- [86] Weisbuch C, Nishioka M, Ishikawa A, et al. Observation of the coupled exciton-photon mode splitting in a semiconductor quantum microcavity[J]. Physical Review Letters, 1992, 69(23): 3314-3317.
- [87] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al. Electric field effect in atomically thin carbon films[J]. Science, 2004, 306(5696): 666-669.
- [88] Liu X Z, Gafsky T, Sun Z, et al. Strong light-matter coupling in two-dimensional atomic crystals[J]. Nature Photonics, 2015, 9(1): 30-34.
- [89] Zhao X C, Yan Y H, Cui Z Z, et al. Realization of strong

- coupling between 2D excitons and cavity photons at room temperature[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(24): 6571-6574.
- [90] Dufferwiel S, Lyons T P, Solnyshkov D D, et al. Valley-addressable polaritons in atomically thin semiconductors[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(8): 497-501.
- [91] Król M, Lekenta K, Mirek R, et al. Valley polarization of exciton-polaritons in monolayer WSe_2 in a tunable microcavity[J]. *Nanoscale*, 2019, 11(19): 9574-9579.
- [92] Jin C H, Regan E C, Yan A M, et al. Observation of Moiré excitons in WSe_2/WS_2 heterostructure superlattices[J]. *Nature*, 2019, 567(7746): 76-80.
- [93] Tran K, Moody G, Wu F C, et al. Evidence for Moiré excitons in van der waals heterostructures[J]. *Nature*, 2019, 567(7746): 71-75.
- [94] Yuan L, Zheng B Y, Kunstmann J, et al. Twist-angle-dependent interlayer exciton diffusion in $\text{WS}_2\text{-WSe}_2$ heterobilayers[J]. *Nature Materials*, 2020, 19(6): 617-623.
- [95] Król M, Rechcińska K, Nogajewski K, et al. Exciton-polaritons in multilayer WSe_2 in a planar microcavity[J]. *2D Materials*, 2019, 7(1): 015006.
- [96] Rupprecht C, Klaas M, Knopf H, et al. Demonstration of a polariton step potential by local variation of light-matter coupling in a van-der-Waals heterostructure[J]. *Optics Express*, 2020, 28(13): 18649-18657.
- [97] Zhao X C, Cui Z Z, Ge A P, et al. Exciton - polaritons of hBN/ WS_2 heterostructure in cavity observed at room temperature[J]. *Applied Physics Letters*, 2022, 121(23): 231106.
- [98] Kavokin A, Liew T C H, Schneider C, et al. Polariton condensates for classical and quantum computing[J]. *Nature Reviews Physics*, 2022, 4(7): 435-451.
- [99] Imamoglu A, Ram R J, Pau S, et al. Nonequilibrium condensates and lasers without inversion: exciton-polariton lasers[J]. *Physical Review A*, 1996, 53(6): 4250-4253.
- [100] Deng H, Weihs G, Santori C, et al. Condensation of semiconductor microcavity exciton polaritons[J]. *Science*, 2002, 298(5591): 199-202.
- [101] Richard M, Kasprzak J, André R, et al. Experimental evidence for nonequilibrium Bose condensation of exciton polaritons[J]. *Physical Review B*, 2005, 72(20): 201301.
- [102] Kasprzak J, Richard M, Kundermann S, et al. Bose-einstein condensation of exciton polaritons[J]. *Nature*, 2006, 443(7110): 409-414.
- [103] Christopoulos S, von Högersthal G B H, Grundy A J D, et al. Room-temperature polariton lasing in semiconductor microcavities[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 98(12): 126405.
- [104] Bajoni D, Senellart P, Wertz E, et al. Polariton laser using single micropillar GaAs - GaAlAs semiconductor cavities[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(4): 047401.
- [105] Zhao J X, Su R, Fieramosca A, et al. Ultralow threshold polariton condensate in a monolayer semiconductor microcavity at room temperature[J]. *Nano Letters*, 2021, 21(7): 3331-3339.
- [106] Su R, Wang J, Zhao J X, et al. Room temperature long-range coherent exciton polariton condensate flow in lead halide perovskites[J]. *Science Advances*, 2018, 4(10): eaau0244.
- [107] 罗春晖, 陈晓旭, 吴舜. 基于游标效应的并联法布里-珀罗干涉仪传感特性的分析[J]. *光学学报*, 2023, 43(5): 0506002.
- Luo C H, Chen X X, Wu S. Analysis of sensing characteristics of parallel Fabry-Pérot interferometer based on vernier effect[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(5): 0506002.
- [108] 王婷婷, 葛益娴, 常建华, 等. 基于椭球封闭气腔的光纤复合法布里-珀罗结构折射率传感特性研究[J]. *物理学报*, 2014, 63(24): 240701.
- Wang T T, Ge Y X, Chang J H, et al. Refractive index sensing characteristic of a hybrid-Fabry-Pérot interferometer based on an in-fiber ellipsoidal cavity[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(24): 240701.
- [109] 宋鹏, 荆振国, 李昂, 等. 基于光纤开放式法布里-珀罗干涉仪的液体折射率测量[J]. *中国激光*, 2017, 44(12): 1204007.
- Song P, Jing Z G, Li A, et al. Refractive index measurement of liquid based on open fiber fabry-perot interferometer[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(12): 1204007.
- [110] Chen K, Yang B L, Deng H, et al. Simultaneous measurement of acoustic pressure and temperature using a Fabry-Perot interferometric fiber-optic cantilever sensor[J]. *Optics Express*, 2020, 28(10): 15050-15061.
- [111] 苏杭, 赵纯龙, 张钊溶, 等. 基于三种不同微腔状态的 F-P 干涉型高灵敏度温度传感器[J]. *光子学报*, 2021, 50(9): 0906007.
- Su H, Zhao C L, Zhang Z R, et al. High sensitivity fabry-Pérot interferometric temperature sensor based on three different microcavity states[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(9): 0906007.
- [112] 赵云楠, 王伟, 牛慧莉, 等. 基于琼脂薄膜的微型端面光纤 F-P 湿度传感器[J]. *光电子·激光*, 2022, 33(5): 465-470.
- Zhao Y N, Wang W, Niu H L, et al. Micro end fiber F-P humidity sensor based on Agr film[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2022, 33(5): 465-470.
- [113] Liu Y T, Gong H P, Lu X, et al. Optical fiber humidity sensor based on vernier effect of Fabry-Perot interferometers with microsphere[J]. *Optical Fiber Technology*, 2023, 76: 103222.
- [114] Cui Q S, Thakur P, Rablau C, et al. Miniature optical fiber pressure sensor with exfoliated graphene diaphragm[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(14): 5621-5631.
- [115] 于昌新, 何彦霖, 何超江, 等. 用于微创手术探针的光纤力传感器设计[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(20): 2421-2429.
- Yu C X, He Y L, He C J, et al. Design of optical fiber force sensor for minimally invasive surgical probe[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(20): 2421-2429.
- [116] Huang Y, Tao J, Huang X. Research progress on F-P interference-based fiber-optic sensors[J]. *Sensors*, 2016, 16(9): 1424.
- [117] 尹玺, 万生鹏, 熊新中, 等. 基于法布里-珀罗微腔结构的光纤声传感系统研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(3): 0312003.
- Yin X, Wan S P, Xiong X Z, et al. Study of a optical fiber acoustic sensing system based on F-P microcavity structure[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(3): 0312003.
- [118] 吴梓楠, 唐冬林, 王岩岩, 等. 基于有机聚合物的光纤气体传感器[J]. *光子学报*, 2018, 47(3): 0306003.
- Wu Z N, Tang D L, Wang Y Y, et al. Optical fiber gas sensor based on organic polymer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(3): 0306003.
- [119] 王超, 张学智, 江俊峰, 等. 基于光纤法布里-珀罗传感的高速气流测量系统[J]. *光学学报*, 2020, 40(12): 1206005.
- Wang C, Zhang X Z, Jiang J F, et al. High-speed airflow measurement system based on optical fiber fabry-perot sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(12): 1206005.
- [120] Yang S T, Wang H Y, Meng L Z, et al. Dual-FBG and F-P cavity compound optical fiber sensor for simultaneous measurement of bending, temperature and strain[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2023, 41(5): 1582-1588.
- [121] Fu X H, Liu L X, Huang S M, et al. Simultaneous measurement of temperature and refractive index with F-P microcavity sensor based on graded-index few mode fiber[J]. *Optics Communications*, 2020, 455: 124577.
- [122] Markowski K, Jędrzejewski K, Marzęcki M, et al. Linearly chirped tapered fiber-Bragg-grating-based Fabry - Perot cavity and its application in simultaneous strain and temperature measurement[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(7): 1464-1467.
- [123] Cui Z Z, Yan Y H, Liu Q Q, et al. Accurate determination of low-dimensional materials' complex refractive index by cavity resonant method[J]. *Optical Materials*, 2022, 131: 112682.
- [124] Humar M, Gather M C, Yun S H. Cellular dye lasers: lasing thresholds and sensing in a planar resonator[J]. *Optics Express*,

- 2015, 23(21): 27865-27679.
- [125] Chen Y C, Chen Q S, Zhang T T, et al. Versatile tissue lasers based on high-Q Fabry-Pérot microcavities[J]. *Lab on a Chip*, 2017, 17(3): 538-548.
- [126] Gong C Y, Qiao Z, Yuan Z Y, et al. Laser modes: topological encoded vector beams for monitoring amyloid-lipid interactions in microcavity[J]. *Advanced Science*, 2021, 8(12): 2170066.
- [127] Yuan Z Y, Cheng X, Zhou Y K, et al. Distinguishing small molecules in microcavity with molecular laser polarization[J]. *ACS Photonics*, 2020, 7(8): 1908-1914.
- [128] Yuan Z Y, Zhou Y K, Qiao Z, et al. Stimulated chiral light - matter interactions in biological microlasers[J]. *ACS Nano*, 2021, 15(5): 8965-8975.
- [129] Gong C Y, Sun F Y, Yang G, et al. Multifunctional laser imaging of cancer cell secretion with hybrid liquid crystal resonators[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(8): 2270036.
- [130] Gather M C, Yun S H. Single-cell biological lasers[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(7): 406-410.
- [131] Li F, Li Y M, Cai Y, et al. Tunable open-access microcavities for solid-state quantum photonics and polaritonics[J]. *Advanced Quantum Technologies*, 2019, 2(10): 1970061.

Fabry-Pérot Optical Microcavity and Its Application

Liu Qingquan^{1,3}, Guan Xueyu^{1,3,4}, Cui Hengyi^{1,3,4}, Wang Shaowei^{1,3,4*}, Lu Wei^{1,2,3,4**}

¹State Key Laboratory of Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

²School of Physical Science and Technology, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China;

³Shanghai Engineering Research Center of Energy-Saving Coatings, Shanghai 200083, China;

⁴University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract

Significance In the 20th century, the research of the Fabry-Pérot (F-P) cavity mainly focused on basic optical properties and light source stabilization technology. However, with the development of quantum optics and nanotechnology, the research field of F-P microcavity has expanded rapidly in the 21st century. Nowadays, F-P microcavity is not only employed as an optical measurement tool, but also an important platform for studying the light-matter interactions to realize accurate parameter measurement, biological detection, and regulation for multi-dimensional light fields.

The F-P microcavity is an ideal tool for measuring the frequency of the light source and stabilizing the laser frequency due to its interference properties. The spectrometer based on the F-P microcavity can achieve very accurate spectral resolution, which can meet the demand for a wide range of fields from astronomical observation to optical fiber communication.

In terms of light-matter interactions, the F-P microcavity provides an ideal platform for exploring the coupling of photons and matter quantum systems. The photons in the microcavity can be strongly coupled with the material quantum systems such as atoms, molecules, or quantum dots, leading to some new physical phenomena. This provides possibilities for the development of new technologies such as quantum information processing based on light and ultra-low threshold lasers.

In precision parameter measurement, F-P microcavity is widely applied to measure physical parameters such as temperature, pressure, refractive index, and pressure due to its high sensitivity to small changes in the environment. By accurately measuring the changing interference mode of light in the microcavity, accurate information about the microcavity environment can be obtained to achieve a very accurate measurement. In biological detection, F-P microcavity is adopted to detect the characteristics of cells, viruses, proteins, and other biomolecules due to its high sensitivity to small changes in tissues. This is of significance for early diagnosis of diseases, pathological research, and other applications in the biomedical field. Additionally, F-P microcavity also plays an important role in multi-dimensional light field control by precisely controlling the microcavity.

Progress First, the principle of the F-P microcavity is introduced based on thin-film optical theory (Fig. 1). The work progress of linear variable filter, integrated F-P filter, and reconfigurable spectrometer based on the F-P microcavity is presented according to the sequence of research development. The research team at Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, has carried out extensive research and application of linear gradient filter. In integrated F-P filter, Wang et al. from Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, proposed a method of combinatorial etching and deposition (Fig. 4) to prepare integrated F-P filter. As technology advances, nano-imprint lithography and grayscale lithography have also been applied to fabricate integrated F-P filter. F-P microcavities can be integrated with detectors, and the resulting spectrometers feature small size, light weight, and high

stability. To overcome the difficulty in achieving high resolution in spectrometers based on F-P microcavities and the associated manufacturing challenges, spectral reconstruction algorithms have been introduced to significantly improve the spectral resolution of spectrometers. In the interactions between photons and low-dimensional materials in an all-dielectric F-P microcavity, low-dimensional semiconductor lasers based on all-dielectric F-P microcavities are introduced first. Based on the theory of cavity quantum electrodynamics, the weak and strong coupling interactions between light and low-dimensional materials are discussed. With the developing fabrication technology of two-dimensional materials, researchers continued to deepen the research on light-material interactions in microcavities, and strong coupling phenomena and research related to exciton-polariton lasers have gradually been reported.

In F-P microcavity applications, its application in precision parameter measurement is first introduced. Due to the high-quality factor and strong resonance effect of the F-P microcavity, researchers have achieved precision measurement of parameters such as environmental refractive index, temperature, humidity, pressure, and sound through the utilization of optical fibers and corresponding sensing materials. Meanwhile, the teams of Lu Wei and Wang Shaowei from Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, have further expanded the measurement field to achieve measurements of the complex refractive index of low-dimensional materials of tiny dimensions. In biological detection, the F-P microcavity can be employed to reveal the characteristics of cells and biomolecules, describe changes in internal molecular interactions, and aid in the detection, identification, and imaging of biomolecules. In multi-dimensional optical field control, by combining the high quality factor of the F-P microcavity, narrow spectral features, and introduction of emerging micro/nano devices such as metasurfaces, it is possible to achieve control and generation of polarization/spectrum, beam shaping, and vortex light fields. This lays the foundation for high-performance and multi-functional optical field control.

Conclusions and Prospects This review summarizes the research progress in optical field control in F-P microcavities over the past 20 years. The research is focused on the introduction of spectroscopic structures and spectroscopic detection applications based on F-P microcavities, the interaction study of photons with low-dimensional materials in F-P microcavities, and potential applications of F-P microcavities in precision measurement of parameters, biological detection, and multi-dimensional optical field control. Further exploration and in-depth studies are essential for issues such as optimizing the design of the microcavity, accurately manipulating its parameters, and enhancing its stability. The research field of F-P microcavities will be further expanded.

Key words optical devices; Fabry-Pérot microcavity; miniature spectrometer; low-dimensional materials; precision measurement; optical field control; coupling