

2023 年光学热点回眸

谢兴龙^{1,2}, 李昕然², 童妙妍², 朱健强^{1,2*}

1. 中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800

2. 中国科学院大学光电工程与材料科学中心, 北京 100049

摘要 回顾了光学领域2023年的重大进展, 盘点了光物理、光学材料和结构、生物和医疗光学、光与物质相互作用、光电子学、光学设计和仪器仪表、光学信息处理、光源与强场激光等研究领域的重要成果, 探讨了其在未来可能会对人类生存及生活方式产生的积极影响。

关键词 光物理; 生物和医疗光学; 光电子学

光学(optics)是研究光的行为和性质的物理学, 也是与光学工程技术相关的学科。光学是研究从微波、红外线、可见光、紫外线直到X射线和 γ 射线的宽广波段范围内的电磁辐射的产生、传播、接收和显示, 以及与物质相互作用的科学, 它是物理学的一个重要组成部分。激光器的诞生产生了现代光学, 并随着激光技术的进步得到迅猛发展。激光科学和激光技术极大地促进了物理学、化学、生命科学和环境科学等学科的发展, 形成了一批十分活跃的新兴学科和交叉学科, 如激光化学、激光生物学、激光医学和信息光学等; 同时, 激光在精密计量、遥感和遥测、通信、全息术、医疗、材料加工、激光制导和激光引发核聚变等方面获得广泛应用。

2023年光学重大突出进展是激光惯性约束核聚变, 标志成果是美国能源部公布劳伦斯利弗莫尔国家实验室(LLNL)激光核聚变实现了二次点火成功的消息。激光惯性约束聚变(ICF)是利用激光作为驱动源, 将装填氘氚燃料的球状靶丸压缩到高温高密度, 并在燃料飞散之前进行点火和热核燃烧, 从而获取聚变能的方法。ICF领域的研究工作对于建成聚变电站, 探索受控热核新能源, 研究核武器物理并模拟核爆炸效应, 以及极端条件下的物性研究有重要意义。

美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室2009年建成了世界上最大的激光聚变实验装置——美国国家点火装置(NIF)。NIF共拥有192路光束, 最大输出

收稿日期: 2023-12-20; 修回日期: 2024-01-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(12074399); 科技部国际合作项目(2021YFE0116700)

作者简介: 谢兴龙, 研究员, 研究方向为超短脉冲激光技术, 电子信箱: xiexl329@siom.ac.cn; 李昕然(共同第一作者), 硕士研究生, 研究方向为超短脉冲激光技术, 电子信箱: 1654708581@qq.com; 童妙妍(共同第一作者), 硕士研究生, 研究方向为超快光学诊断, 电子信箱: tmy11233@163.com; 朱健强(通信作者), 研究员, 研究方向为高功率激光技术, 电子信箱: jqzhu@siom.ac.cn

引用格式: 谢兴龙, 李昕然, 童妙妍, 等. 2023年光学热点回眸[J]. 科技导报, 2024, 42(14): 5-37; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.12.01971

能量可达 2 MJ。目前国际上运行的高功率纳秒激光系统还有美国 OMEGA 装置、英国 Vulcan 装置、法国 LMJ 装置、日本 Gekko-XII 装置以及中国神光系列装置。其中 LMJ 装置即将完成全部 176 路光束的调试,届时将可在 0.35 μm 紫外光波段输出 1.4 MJ 能量。

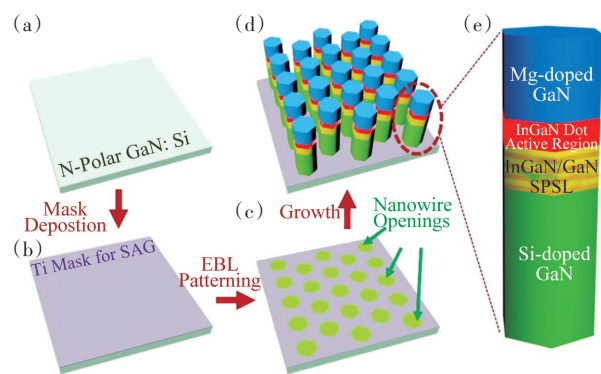
北京时间 2023 年 7 月 30 日,美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室的科学家在 NIF 上进行激光核聚变点火,成功实现 2.05 MJ 的输入能量,3.88 MJ 输出能量,创下历史最高。10 月 30 日,在 NIF 上再一次进行了激光核聚变点火,输入能量首次达到 2.2 MJ,同时 3.4 MJ 的输出能量也位列第 2。专家表示,NIF 能实现 2.2 MJ 的输入能量主要是因为完成了 2 项关键的改进措施,在 NIF 中 2/3 的光束线上使用熔融二氧化硅碎片屏蔽以及在 32 条下半球光束线上安装金属屏蔽。这些改进将由碎片引起的损伤率减少了 90% 以上。除此之外,其他改进还包括新的抗反射涂层、蒸汽六甲基二硅氮烷(HMDS)处理和光学回收循环容量的增加,以及新的“灰边阻断器”。此外,要维持 NIF 在科学领域取得的惊人突破,单靠增加注入脉冲的能量是远远不够的,因为激光脉冲的持续时间仅为几十亿分之一秒,因此需要极高的精确度才能达到理想效果,为达到这个目标,该团队最近完成了高保真脉冲整形(HiFiPS)系统的部署工作,HiFiPS 能够实现更精确、更准确的脉冲整形,进而在内爆中实现更好的功率平衡和对称性控制。然而,从目前的技术水平到实现向电网提供聚变能源仍然有很长的路要走。尽管 NIF 拥有目前世界上最大的激光器,但该系统效率极低,每次点火中有超过 99% 的能量在到达目标前就已损失殆尽。因此开发更高效激光系统,是激光惯性核聚变领域的一个重要目标。

2023 年,激光惯性约束核聚变的科技成果无疑对全世界是振奋人心的。2023 年度,光学与光电子新进展和成果还有很多方面,以下从光物理,光学材料和结构,生物和医疗光学,光与物质相互作用,光电子学,光学设计和仪器仪表,光学信息处理,光源与强场激光,光子学交叉领域,视觉色彩,太赫兹光学等方面分别介绍。

1 光电子学

光电子学是研究光与电子相互作用的学科。光电子学研究光的产生、传播、检测和调制等过程及光与电子之间的相互作用,其涵盖的应用广泛,包括光通信、光储存、光传感、激光技术、光电显示以及各种光电子器件的制造等领域。简而言之,光电子学研究光和电子之间的关系,以及如何利用光与电子相互作用产生的现象和效应来实现各种应用,对现代科技和生活产生了重要影响。2023 年,该领域涌现了多项杰出的成果。

微型发光二极管(microLED)作为下一代 LED 技术,将在未来几年得到巨大的增长,因其纳入了许多新兴应用领域,包括虚拟/增强现实、超高分辨率移动显示器、可穿戴电子设备、生物医学传感和超高速光学互连等。微型发光二极管的发展将推动 LED 技术进一步演进,提供更高分辨率和更小尺寸,为多个行业带来更出色的性能和创新。迄今为止,微型发光二极管受限于蚀刻引起的结构损伤和缺陷,效率仍然极低。2023 年,Pandey 等^[1]提出的亚微米级高效率红色 LED,发射波长为 630 nm,未封装的器件峰值外部量子效率为 2.2%,这种改进 LED 结构器件的设计可以最大限度地减少损伤,显示了基于纳米线的高效微型 LED 技术的前景。利用选择性区域外延技术生长 N 极性 InGaN/GaN 纳米线 LED 异质结构的步骤如图 1 所示。



(a)~(d) N 极性 InGaN/GaN 纳米线 LED 异质结构的选择性区域外延示意;(e) 单个纳米线 LED 异质结构示意图

图 1 选择性区域外延技术生长 N 极性 InGaN/GaN 纳米线 LED 异质结构的步骤

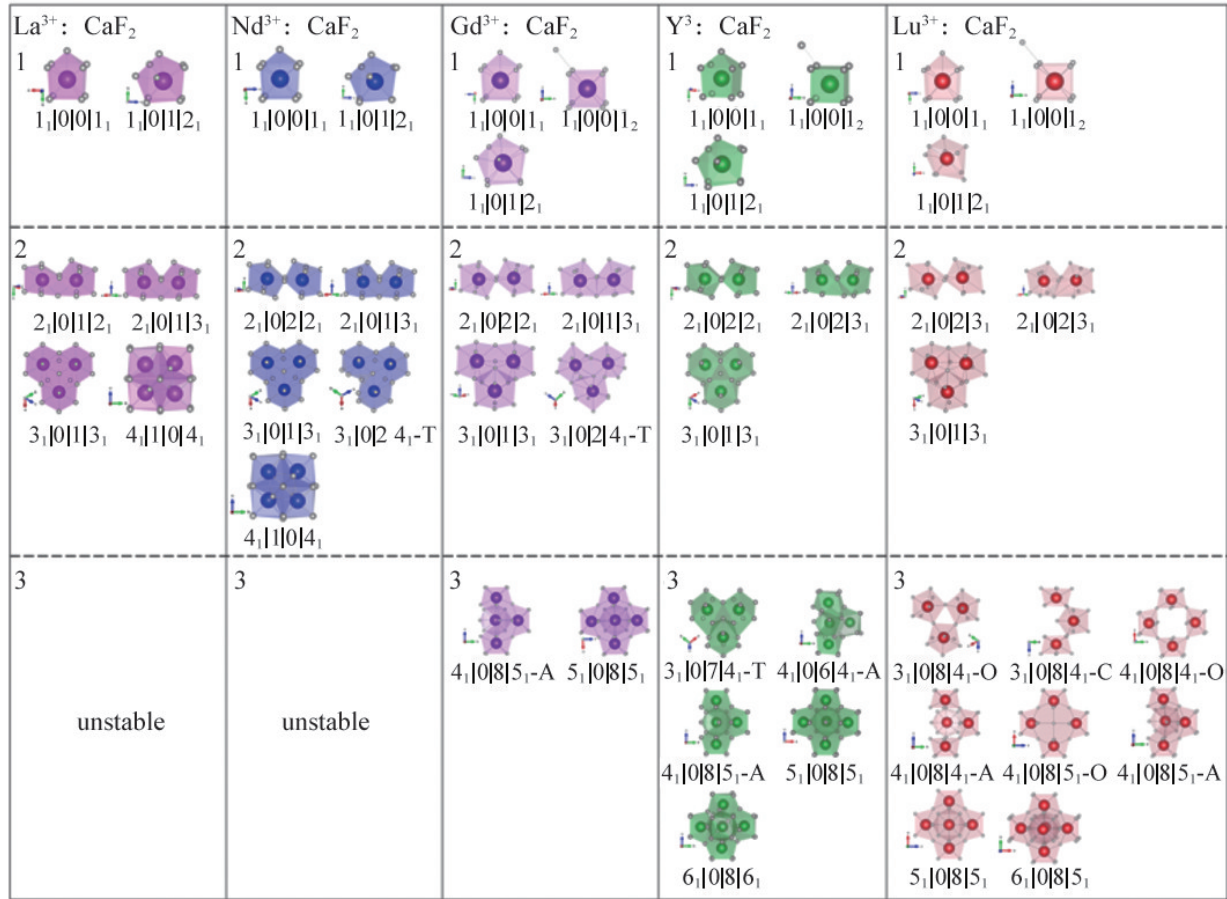
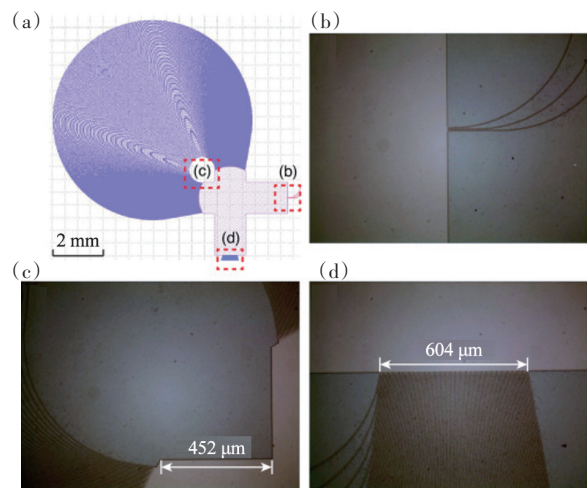


图3 La^{3+} 、 Nd^{3+} 、 Gd^{3+} 、 Y^{3+} 、 Lu^{3+} 掺杂 CaF_2 晶体中热力学稳定的团簇

天体光子学的新领域是指应用多功能光子技术操纵从望远镜收集的导光以实现天文学观测的科学目标,其中一个重大挑战为下一代天文仪器的小型化,其关键思想为将体光学元件折叠成二维光子集成电路以利用集成光子平台的低成本、紧凑和鲁棒性。为此,科研人员提出了一种集成光谱仪(IPS),其中阵列波导光栅(AWG)作为光散射组件,被广泛应用于多路复用器和信号路由器,主要功能为在空间上分离不同波长以获得完整的二维光谱,但存在传统AWG非平坦焦面导致散焦像差大的问题。为最大限度地减小散焦像差,2023年,Zhan等^[4]设计了 Si_3N_4 通过实验实现了具有3个输入的三柱头点阵列波导光栅(TSP AWG),如图4所示,光谱分辨能力超过17000,尺寸仅 $9.3 \times 9.3 \text{ mm}^2$ 。



(a) TSP AWG 布局图; (b)~(d) 是 (a) 中红色虚线矩形标记的 3 个区域的相应光学显微镜图像

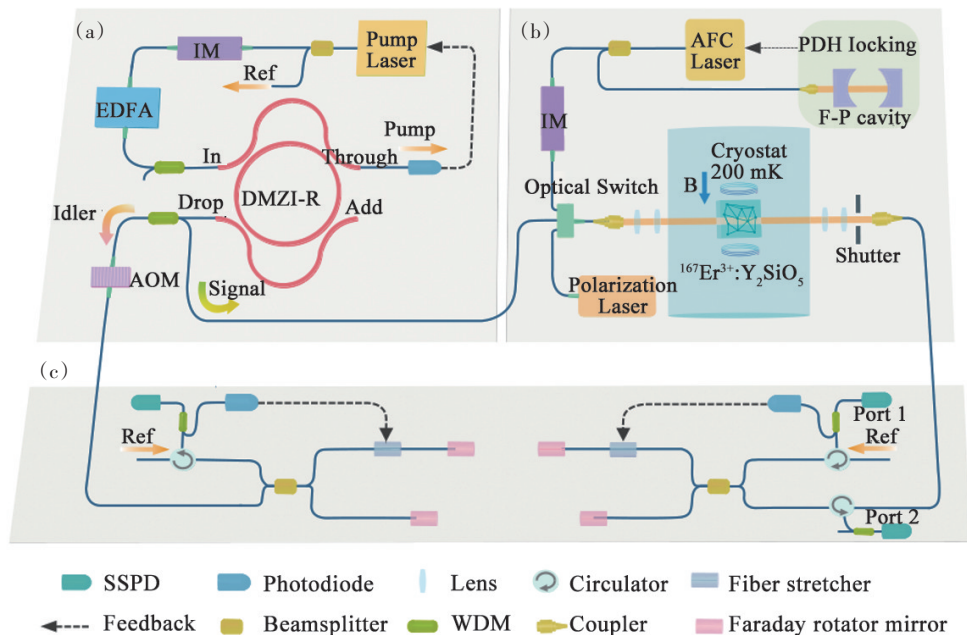
图4 TSP AWG 布局及对应虚线标记区域的光学显微镜图像

2 光物理

光物理学是研究光与物质相互作用的学科,涵盖了光的产生、传播、操控和检测等方面内容。近年来,光物理学在多个领域展现出重要的应用价值和科学意义,研究内容包括光的传播和散射、光的相干性和干涉、光的吸收和发射、非线性光学效应、激光物理、光谱学和光子学等,旨在通过研究光的行为和与物质相互作用的机制深入了解光的本质,进而推动光学在通信、医学、能源、材料科学等领域的应用。光物理学在过去几十年里取得了显著进展,超快光学技术的崛起使我们能够观察和控制飞秒和阿秒级的光脉冲,揭示了物质的超快动态行为;激光技术的发展使高功率、高精度的激光器得以应用于医学、制造和科学研究领域;光子学的发展带来了用于信息处理和通信的新型光子器件和光子集成电路的实现。未来,光物理学将继续蓬勃发展,超快光学将探索更短的光脉冲和更高的时间分辨率,新型光源和调控方法的开发将推动光学成像和光传感技术的发展,光子学与量子科学的交叉

研究将促进光量子计算和通信的进一步突破,拓展信息科学的边界。

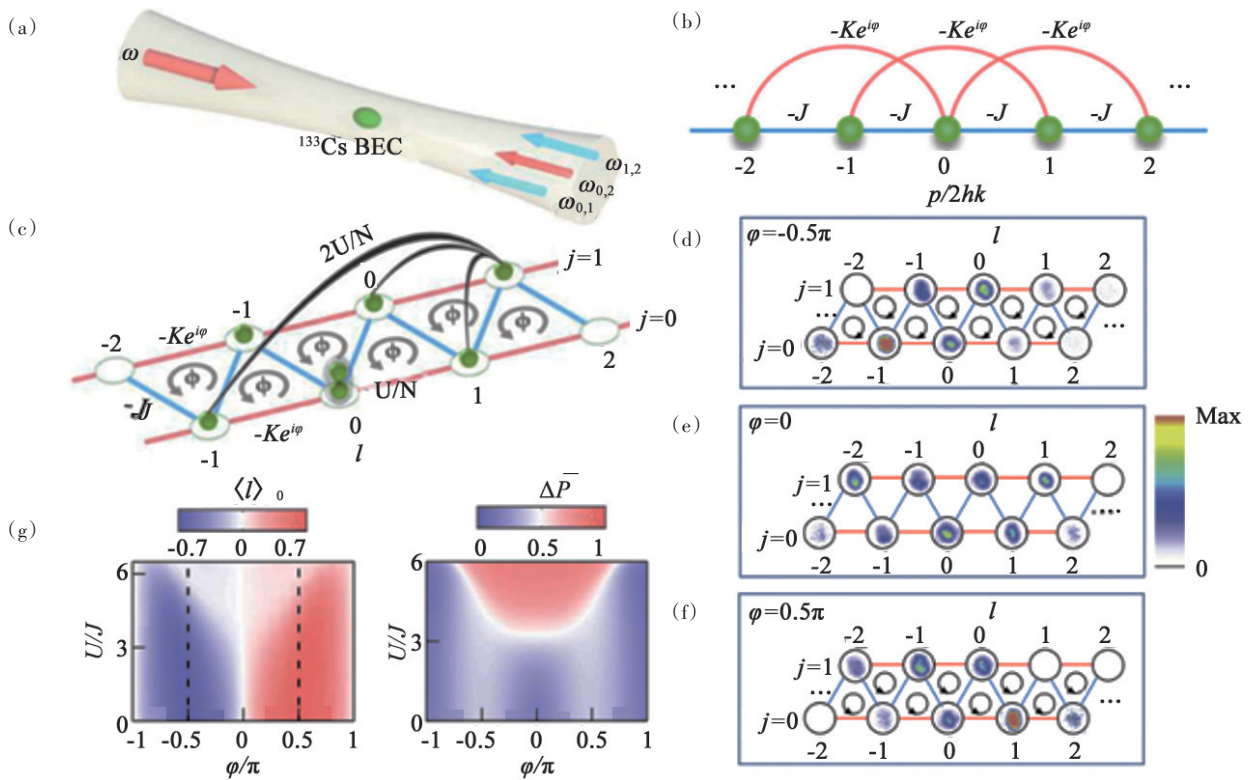
量子互联网是一种基于量子力学原理的全新类型的互联网网络,旨在实现更高级别的安全性和传输效率,量子互联网与如今的互联网协同作用有望成为下一代信息处理的赋能平台。基于光纤的量子网络由于光纤中的损耗传输距离被限制在100 km左右,但可以利用量子中继器架构来提高量子通信效率,这种架构的关键模块是量子存储器,最近 $^{167}\text{Er}^{3+}$ 被确定为高效电信量子存储器的有希望的候选者,然而迄今为止还没有报道使用 $^{167}\text{Er}^{3+}$ 来储存纠缠光子。2023年,南京大学马小松、陆延青、祝世宁团队结合铒离子的高核自旋能级相干性和氮化硅光子芯片的窄线宽、高亮度量子纠缠光源,成功演示了在 $^{167}\text{Er}^{3+}$ 离子中2个光子纠缠态的存储和恢复,存储时间为 $1.936\ \mu\text{s}$,实验系统如图5所示^[5]。此项工作大幅增加了通信波段纠缠光子的存储时间,超越之前世界纪录2个数量级以上,首次实现光量子芯片光源与量子存储器的对接,有望在规模化量子网络等方面实现重要应用。



当代物理学的重要任务是理解相互作用和规范场的相互作用,对于描述不同能量和温度尺度的物理现象至关重要,例如,从基本粒子的出现到分数量子霍尔效应。超冷原子量子气体具有优越的可调控性,利用Feshbach共振可以调控原子的相互作用,为在量子多体系统中合成人工规范场及研究相互作用的影响提供了一个理想的实验平台。目前,实验上已经发展了多种方法合成规范场,包括快速旋转原子气体、拉曼跃迁、晃动光晶格等,并观测到了手征性原子流和拓扑特性。然而,目前相关研究主要聚焦在单粒子模型和弱相互作用范围,对于相互作用和规范场之间的竞争机制尚未深入研究。尤其是在几何阻挫的晶格中,相互作用可能会诱导新奇的物理效应。2023年,山西大学贾锁堂、马杰、李玉清3个实验课题组与中国科技大学易为合作^[6],在几何阻挫三角形动量晶格中相互作用超冷原子人工规范场的研究方面取得重要进展。

他们首次在相互作用可精确调控的超冷原子玻色量子气体中合成了几何阻挫的三角形动量晶格,通过控制格点间的隧穿相位产生了人工规范场,揭示了原子相互作用、规范场和几何阻挫之间的竞争机制、原理如图6所示。研究结果展现了相互作用可以诱导三角形动量晶格中超冷原子的局域化,且局域化的转变点依赖于规范场,观测到超冷原子偏向性的手征性动力学,证明了几何阻挫效应导致三角形格子2条链之间的对称性发生动力学破坏。

基于原子物理的量子信息处理(QIP)技术正在朝着商业化的方向发展,其中需要紫外线激光源的原子类型对紫外线激光源的成本和可靠性存在很高的要求。铍离子的离子质量低,有助于实现更快的量子门和离子传输,由于优良的物理性质以及简单的实现方式,捕获铍离子给QIP技术带来很多优势。垂直外腔表面发射激光器(VECSEL)结合了固态外腔圆盘激光器和量子阱半导体激光器的



(a)~(c) 合成具有可调通量和相互作用的三角形梯子示意;(d)~(f) 实验观察到的非相互作用状态下梯子中原子的种群分布

图6 在超冷铯原子量子气体中合成几何阻挫的三角形动量晶格,精确控制规范场和原子相互作用

优点,是实现铍离子 QIP 技术的一种很有前途的方案。2023 年, Burd 等^[7]展示了 2 个用于产生 2 个不同波长的适用于捕获铍离子 QIP 的 VECSEL 系统, 每个系统都由一个紧凑的单频连续波 VECSEL 组成, 调谐范围在数十纳米以内, 可产生高功率近红外光。一个系统使用基于 GaInAs/GaAs 量子阱的增益镜在 940 nm 处产生 2.4 W 的功率, 该增益镜被转换为 54 mW 的 235 nm 光, 用于中性铍原子的光电离。另一个系统使用基于 GaInNAs/GaAs 量子阱的增益镜, 使波长扩展到 1200 nm 以上, 在 GaAs 晶格中具有可控的应变, 该系统在 1252 nm 处产生 1.6 W 的功率, 并将其转换为 41 mW 的 313 nm 光, 用于激光冷却捕获铍离子并实现量子态的制备和检测, 具体配置如图 7^[7]所示。

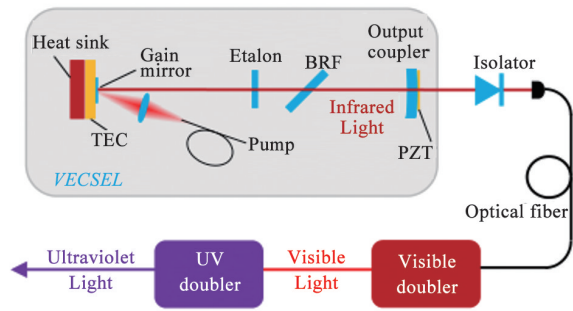


图7 VECSEL腔配置

拓扑陈绝缘体(TI)是一种奇特材料,具有体积带隙但无间隙的边缘状态,由于时间反称性具有拓扑稳健的散射保护作用。普通绝缘体和拓扑绝缘体的区别体现在量子霍尔效应,该效应描述了在磁场存在下的边缘电导的量子化,自从量子自旋霍尔效应在 HgTe 量子阱中得到证实,研究人员开始在其他电子结构、固态极化电子器件和光子系统中探索拓扑性质。极化子是以强耦合状态出现的混合轻物质准粒子,具有极轻的有效质量和强相互作用,很适合探索光子学和凝聚态物质界面处的非平衡玻色-爱因斯坦凝聚以及高温。基于先前对 TI 的研究, Harrison 等^[8]在 2023 年发展了应用于蜂窝晶格的一种局部极化激元涡旋的紧密结合理论,展示了涡旋拓扑绝缘体并概述了其与传统自旋极化激元陈绝缘体的密切类比(图 8)。该工作提供了

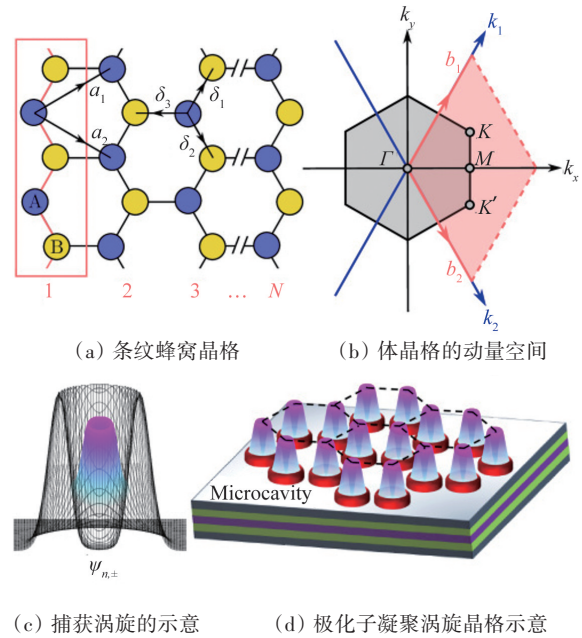


图8 局部极化激元涡旋应用于蜂窝晶格的实验原理

一种模拟自旋极化激元现象的途径,具有可调的非线性和各向异性耦合强度,且由于系统模型的驱动耗散部分在博戈洛子的拓扑间隙打开中起着纯粹的支持作用,因此可以扩散到其他类型的结构量子流体或具有自发破坏对称性的非线性激光器,也可以在基于光学的非线性拓扑信号处理中发挥作用。

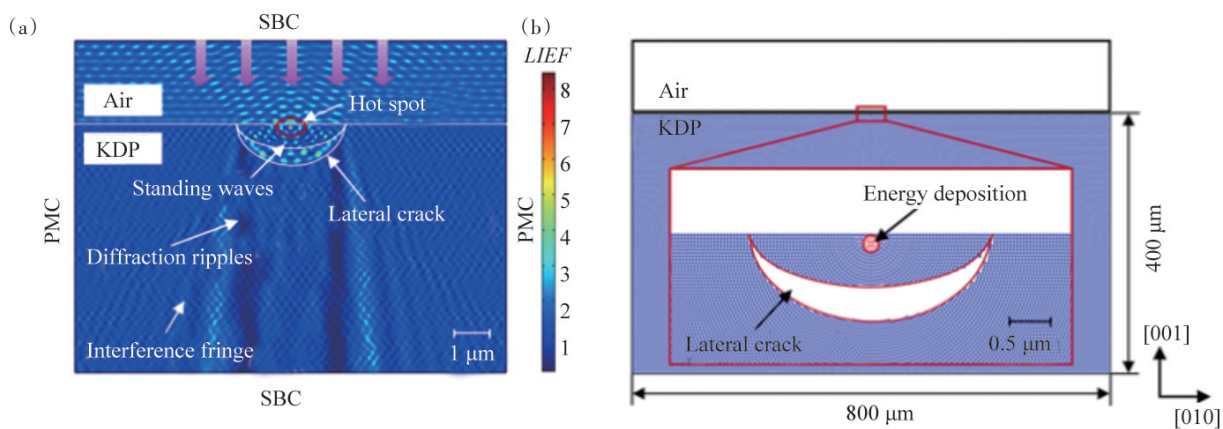
3 光物质相互作用

光物质相互作用是研究光与物质之间相互作用的领域,涉及光的吸收、发射、散射、传输以及光引起的物质的响应和变化等过程。这个领域的研究内容十分广泛,从纳米材料到生物分子,从固体到气体,涵盖了多个学科领域。过去几十年,光物质相互作用的研究取得了显著的进展。一方面,研究人员借助先进的光学技术,例如激光技术和非线性光学技术,能够精确地测量和操控光与物质相互作用的行为;另一方面,纳米技术的发展使人们能够制备具有特定结构和性质的材料,进一步深入研究光与材料之间的相互作用。光物质相互作用的研究有助于深入了解光与物质的相互作用机制,还可以为其他学科领域提供支撑。随着先进技术和

新材料的发展,这个领域将会继续取得突破,为光学科学的发展和相关应用带来新的突破和创新。

磷酸二氢钾(KDP)晶体具有优异的光学性能,光学均匀性好、电光系数大以及在宽光谱范围内透射率高,由于这些特性,KDP晶体已经被广泛应用于高功率激光系统中的光电开关和频率转换组件,特别是在ICF系统中,需要很大的抗激光损伤性,然而KDP晶体表面的残余裂纹缺陷是限制高功率激光器器件应用中提高抗激光损伤能力的瓶颈。在纳秒强激光与KDP晶体介电材料之间的相互作用过程中,激光能量会在短时间内沉积到材料引起材料的物理改性,在随后的强激光照射下,由于材料内部的局部能量沉积,具有高温高压特性的能量

沉积点区域会产生微爆炸行为进而导致应力传播和激光诱导损伤断裂等动力学行为。迄今为止,强激光照射下表面缺陷会引入相互耦合的多个应力波导致晶体中更复杂的传播,应力波与激光损伤演化之间的相互作用机制尚未得到定量表征。2023年,哈尔滨工业大学Ding等^[9]采用有限元法对麦克斯韦方程数值求解建立了表面横向裂纹的激光损伤动力学模型,揭示了横向裂纹引起损伤演化的物理机制,为制定光学超精密加工过程中表面裂纹缺陷的控制标准提供了有效的指导,对提高高功率激光系统中KDP晶体的抗激光损伤性能具有重要意义。具有横向裂纹缺陷的多物理场耦合损伤动力学模型如图9^[9]所示。



(a) 缺陷引起的电磁场下的光学调制效应;(b) 通过SPH(平滑粒子流体动力学)

方法在(100)平面上构建的与电磁场和应力场耦合的损伤动力学模型的二维截面图

图9 横向裂纹缺陷的多物理场耦合损伤动力学模型

增材制造技术(AM)由于其任意复杂的三维制造能力已被广泛应用于各种领域,在微纳米结构的制造中基于激光直接打印的AM因其高分辨的特点被认为是最有前途的方法之一,但是其生产能力有限、操作成本高、打印速度慢,通常在每秒微米或毫米的水平。最近,光刻领域再次面临13.5 nm波长的光源功率限制,基于金属氧化物的光致抗蚀剂的出现为极紫外光源和反射镜带来了解决方案,其中氧化锆混合光刻胶在极紫外光刻领域保持了最高灵敏度记录。2023年,清华大学何向明/徐宏课题组展示了一种高速双光子光刻(two-photon li-

thography, TPL)制造的极其灵敏的氧化锆杂化光致抗蚀剂系统,利用氧化锆杂化物(ZrO_2 -BTMST)的有效光致极性变化可以实现7.77 m/s的打印速度,基于这种抗蚀剂构建了基于多边形激光扫描仪的双光子光刻机,线性步进速度接近10 m/s,且能实现高精度图案化^[10]。该系统打印速度比传统的聚合物激光致抗蚀剂高3~5个数量级,设计出具有卓越打印速度的高灵敏度光刻胶材料将大大促进AM技术在微纳米增材制造领域的实际大规模应用。图10^[10]为光敏剂(BTMST)和氧化锆杂化物的TPL浸油曝光模式示意和结构。

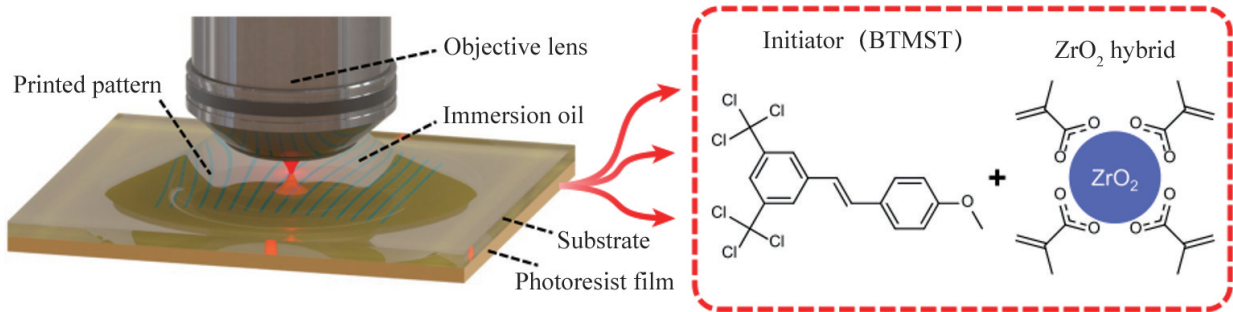


图10 BTMST和氧化锆杂化物的TPL浸油曝光模式示意和结构

元表面是一种基于布拉格衍射的二元衍射结构,通过作为信息载体的表面起伏光栅来实现。通过精确控制光栅的结构和参数,元表面能够对入射光波的相位、强度和偏振等进行精确调控,从而实现对光波的高度定向操控。元表面的微结构可以采用周期性阵列、声子晶体、等离子体共振器等形式,并且这些微结构的尺度远小于入射光波长。元表面的出现推动了纳米光学和光子学的发展,为纳米尺度的光学器件和系统提供了新的思路,通过将信息编码到表面起伏光栅中,元表面能够实现更高效、更紧凑、更灵活的光学器件与系统,具有重要的科学意义和应用潜力。2023年,芬兰 Calpe 等^[11]提出了一种使用准平面元表面生成具有真正相关函数的空间相关光束的实验系统,具体为通过随机旋转漫射器降低激光束的空间相干性,然后将散射场成像到强度调制元表面上来产生所需的强度分布的空间变化,其中元表面的实现采用离轴编码方案,该系统适用于生成任何物理上可实现的波束,其实验设计和光路图如图11所示。

电磁超材料由于具有亚波长周期结构,可以设计成具有任意介电常数和磁导率的合成复合结构,可具有自然界中没有的许多奇特性质和功能,其中,由超表面发展而来的三维超材料——超结构(MS)是一个研究热点。随着技术和科学的迅速普及,电磁波的应用变得越来越普遍,因此控制和操纵电磁波的偏振态很重要。太赫兹波已经被证实具有2种不同的偏振态,包含线极性波(LP)和圆极化波(CP),可以通过偏振控制器控制电磁波的相位、幅度和状态等特性进而广泛应用于复杂的电磁

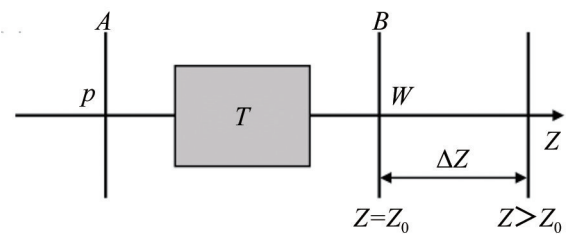
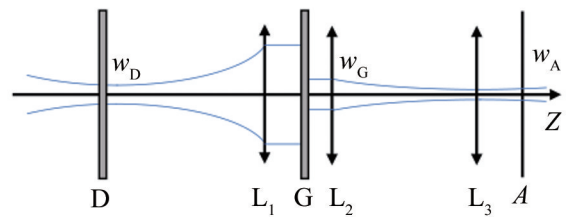
(a) 使用线性光学变换系统 T 将平面 A 处的全局非相干场变换为平面 B 处的定制设计的部分相干光束的实验装置(b) 在平面 A 处产生全局非相干场的光路

图11 准平面元表面生成具有真正相关函数的空间相关光束的实验系统光路

环境。由于复杂的工作环境和集成化趋势,只有单一功能或固定工作频段的变频器是远远不够的,二氧化钒(VO_2)以其快速和突然的相变而著称,当温度低于 68°C 时,呈现绝缘体或半导体状态,超过 68°C 呈现金属状态,电导率可调使其在器件领域具有广泛的潜在应用。但是关于 VO_2 的研究只是在单一的反射或透射状态下进行,针对透射和反射同时发挥作用的变换器研究较少。2023年,南京邮电大学廖思远课题组提出一种多功能可调谐超宽带偏振变换器,通过操纵 VO_2 可以使提出的 MS 具有4种不同的功能,不同的温度对应不同的透射反

射功能状态,提出的MS示意如图12^[12]所示,MS多采用多金属结构,通常由3层不同厚度的介电基板组成,这里选用介电常数3.5、损耗角正切0.0027的有损聚酰亚胺作为介电材料,金作为金属谐振器的材料。顶部金属谐振器为X形,第二个谐振器是2对不同尺寸的C形,蓝色的L形用来支撑连接2个介电基板,中间金层由空心金属片和可调材料组成VO₂,底部选择X形作为主要谐振器,包含1对C形分裂谐振器环,所有谐振器都放置在y轴偏离45°方向上。该MS具有多功能协同处理和宽工作频率的优点,丰富了功能器件的设计,在太赫兹器件中提供了潜在的应用。

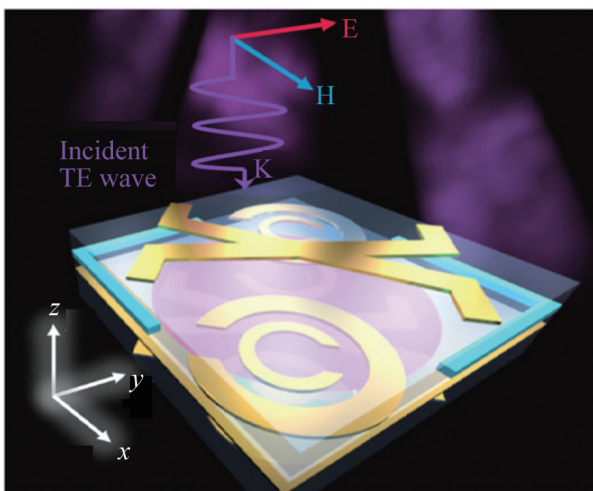


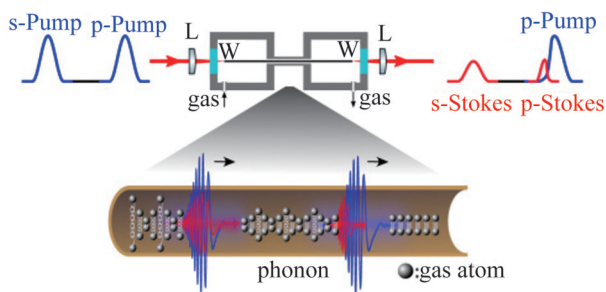
图12 多金属结构的MS示意

超快光纤源在科学界和工业界引起了广泛兴趣,因为它们具备坚固性、紧凑性和免校准操作等优势。然而,传统的二氧化硅基实芯光纤的光谱范围受限于350~2500 nm。尽管硫族化物玻璃已经将透射窗口扩展至12 μm,但其制造仍然具有挑战性。空芯光纤在各种光谱范围内已被广泛用于气体非线性光学研究,通过选择适当的气体种类,可以通过超连续谱、拉曼散射或光学参量放大,产生从紫外到中波红外的脉冲。超短长波红外脉冲在超快分子光谱学和强场光-物质物理等领域得到了广泛应用,高峰功率的超快脉冲还可诱导产生长波红外机制特有的非线性多光子相互作用。目前,尚未报道从实芯或空芯光纤产生短长波红外脉

冲,CO₂激光器和固态变频器是常见的长波红外光源,其中CO₂激光器已经成熟且广泛应用,但固态光源更紧凑且易于维护。受激拉曼散射(SRS)在下变频中得到广泛应用,但其在瞬态拉曼状态下的转换效率受到自相位调制的影响。2023年,Chen等^[13]报道了在长波红外范围内产生飞秒激光脉冲的理论研究,其原理如图13所示,并讨论了在近红外和长波红外斯托克斯生成中发挥不同作用的几个因素,提出了基于双色光源SRS在充满氢气的波导中产生长波红外范围内的飞秒斯托克斯脉冲的方法,数值模拟预测能够以近50%的量子效率在12 μm处产生低于100 fs的脉冲。该工作为在长波红外波长下基于波导的高能飞秒脉冲源提供了有希望的途径。



(a) 单脉冲方案,泵浦脉冲是变换极限或者含有一定的啁啾量



(b) 双啁啾脉冲方案

图13 超短脉冲SRS技术

4 光学材料与结构

光学材料与结构研究领域主要涉及光学材料的设计、合成、制备与表征,以及光学结构的调控与应用。这一领域的研究内容广泛,涵盖了光学材料的基础原理、光学性质的调控、新型光学器件的设计与应用等多方面。在光学材料的设计与合成方面,研究人员致力于寻找新型材料,通过材料结构

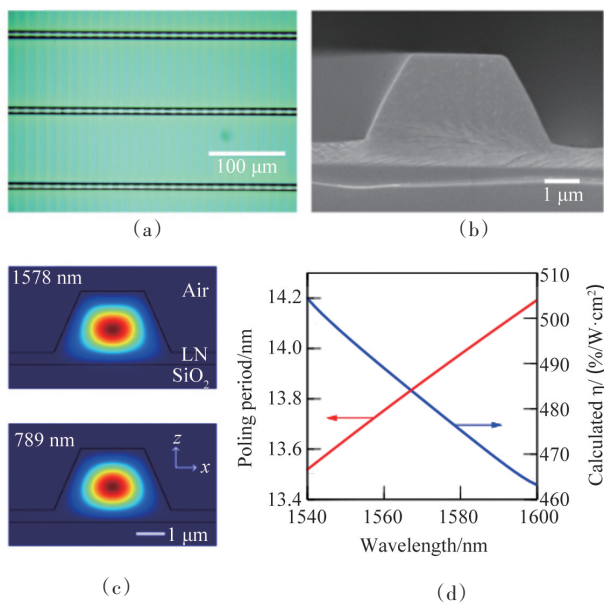
的调控,可以实现对光的吸收、透射、折射、散射等光学特性的调节。此外,研究人员还通过改变材料的组成、控制晶体结构等手段,提高光学材料的特定性能,材料光学结构的调控与应用是光学材料与结构研究的另一个重点。随着纳米技术、光子学、材料科学等领域的迅猛发展,越来越多的新型材料和结构被应用于光学器件和光学系统中。近年来,人工智能、机器学习等技术的引入,也为光学材料与结构的设计和优化提供了新的可能性。在2023年,更多的研究聚焦于实现更高效、更可靠、更紧凑的光学器件,推动光学科学和技术的深入发展。

金属在许多光子和光电子器件应用中起着关键作用。金属中大量的自由电子使其具有高度导电性,并适用于构建宽频率范围的天线,即从射频到光谱区域。此外,由电磁场驱动的金属结构中自由电子的集体振荡运动可以导致强烈的等离子体响应,这与高场限制/增强有关,从而增强了光与物质的相互作用。现有的光子结构和器件大多采用固相中的金属,这些金属具有优异的材料性能(例如,高电导率和热导率),并广泛用于基于刚性衬底(例如,半导体、玻璃)的器件中。然而,固体金属通常不适合于需要器件的大柔性、可拉伸性和可变形性的应用。

相比之下,液态金属可以自然地满足新兴器件应用的这些非常规要求。汞具有高毒性和高蒸气压(在室温下容易蒸发),因此不适合大多数应用。另一方面,碱金属具有高反应性,严重限制了它们的应用范围。幸运的是,Ga和富Ga合金不具有这些主要缺点,是目前唯一适合于广泛应用的液态金属。Ga的熔点为29.8°C,液态Ga的沸点为2400°C,因此可适于很多应用。近年来,Ga在各种光子学中的应用也得到了探索,并证明了与基于固体金属的传统光子结构和器件相比的一些独特优势。2023年3月,Liu等^[14]重点讨论了基于液态金属Ga的光子结构和器件技术的最新进展以及为不同光谱区域和应用开发的各种类型的液态金属光子结构和器件。形成具有强光学和等离子体响应的液态金属纳米颗粒的简单方法有助于开发用于传感和非线性光学等各种应用的高性能和成本效益的

纳米光子系统。基于宏观液态金属的光子结构具有高度的灵活性和可重构性,从而产生具有自修复能力的动态可调谐太赫兹和射频(RF)光子器件。目前液态金属光子学的研究领域仍处于起步阶段,许多潜在的机会有待进一步探索。

基于二阶非线性的有效非线性波混合在经典和量子光子学中非常重要,其中高性能、可扩展的制造能力以及与光纤的兼容性是这类器件在现实应用中的核心优点。在所有具有二阶非线性材料中,薄膜铌酸锂(LNOI)是最好的材料之一,LNOI具有高折射率,高对比度等特征,对于在各种经典和量子光子学应用中的光子集成电路中的有效非线性波混合非常具有价值。光被强烈限制在纳米波导中以增强非线性,目前在LNOI上制造纳米波导的主流方法包括电感耦合等离子体(ICP)蚀刻和化学机械抛光(CMP)。但是,光在纳米波导中的耦合和出射存在问题,由于巨大的模式失配和较小的对准公差,光纤到芯片的低耦合效率成为实际应用的障碍,尽管可以通过引入耦合光栅、多层锥形边缘耦合器或光斑尺寸转换器(SSC)等高要求组件来改善这一问题,但是相比之下,微米厚度的LNOI更适合光纤兼容系统中的现成应用,但其制作技术大都局限于高精度光学级切割。2023年,上海交通大学陈险峰、郑远林课题组成功演示了在3 μm厚度的LNOI平台上使用紫外(UV)光刻和深度干蚀刻制造周期性极化LNOI微波导的过程,解决了铌酸锂芯片中光纤-波导-光纤耦合难题,突破了基于铌酸锂薄膜器件实际应用中的瓶颈^[15]。图14展示了研究团队通过自主研发的薄膜极化和深刻蚀工艺,制备了高品质周期极化铌酸锂微米波导,并实现了高效二阶非线性与低耦合损耗的整体性能,在光纤-芯片-光纤的层面实现了二次谐波转换效率~1320%/W,通信波段传播损耗小于0.5 dB/cm。此外,研究团队还演示了周期极化铌酸锂微米波导中自发参量下转换(SPDC)产生高质量光子对,在亚毫瓦泵浦功率下的光子对产生速率(PGR)达到178 MHz/mW,在微瓦泵浦功率下的符合计数比(CAR)可达到8000以上。实验结果证明了该器件在经典与量子领域的总体性能与当下铌酸锂薄膜



(a) 微波导和周期性极化的显微镜视图; (b) 制造的微波导端面的扫描电子显微镜 (SEM) 图像; (c) 微波导中 1578 nm 处的基波 (FH) 和 789 nm 处的二次谐波 (SHG) 的基本横向磁 (TM) 模式的数值模拟光学模式轮廓, 这是实验观察到的 0 型准相位匹配 (QPM) 的波长;

(d) 相对于 FH 波长计算的 QPM 周期

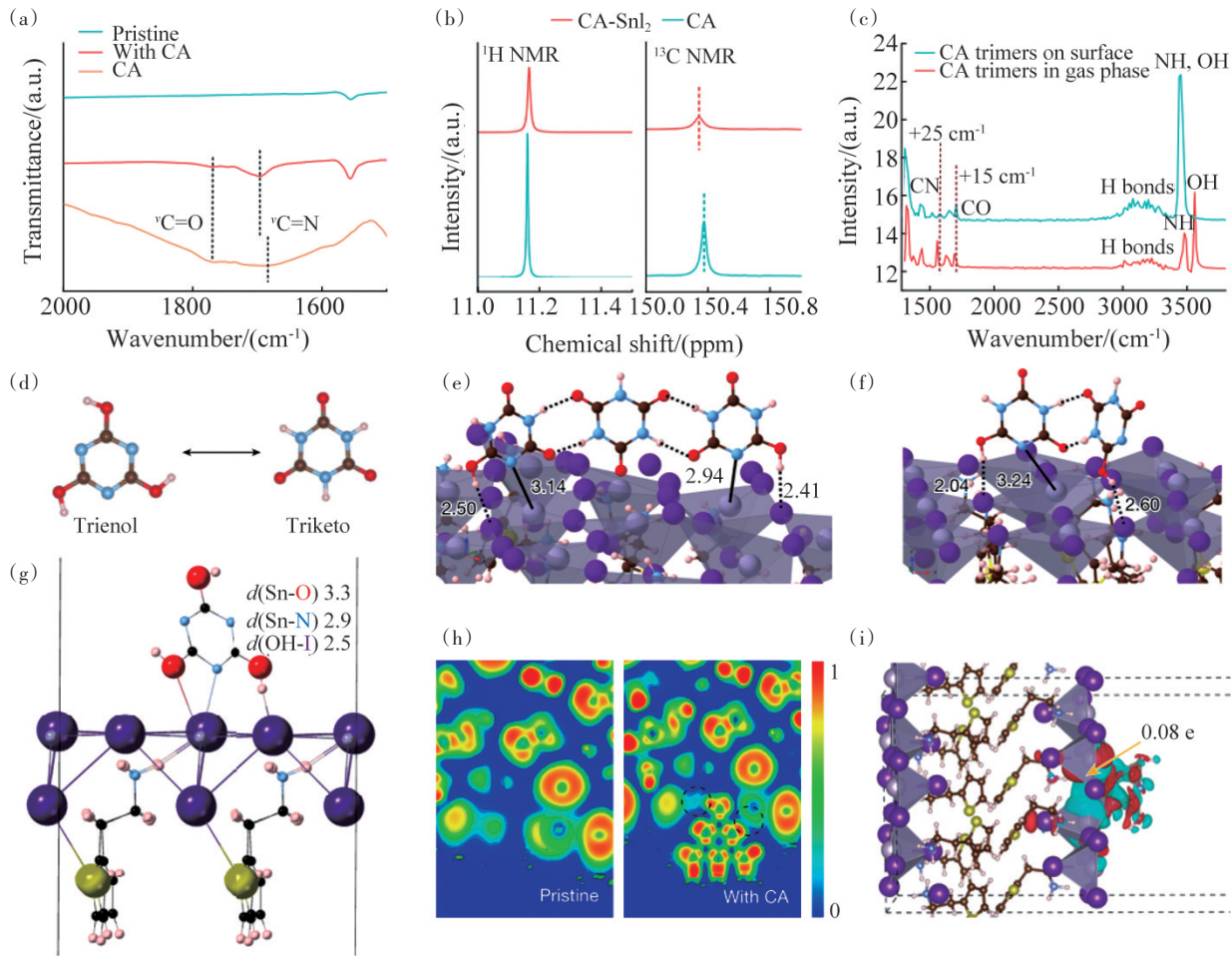
图 14 铌酸锂薄膜纳米微波导图像

纳米波导的最优结果不相上下。同时由于其在量化制备以及光纤兼容性方面的优势, 使其与片上光源集成或者与光纤链路链接都具备更大优势, 更利于在应用上推广。

锡 (Sn) 被认为是金属卤化物钙钛矿中铅的可行替代品, 因为它具有与铅相似的价电子构型和离子半径。尽管如此, Sn 基钙钛矿发光二极管 (PELED) 的外量子效率 (EQE) 仍低于铅基对应部分。大多数用于改进 Sn 基 PELED 的策略集中在通过引入 Sn 补偿器和还原剂来抑制 Sn²⁺ 的氧化。然而, 由于这些技术不能有效地去除所得 Sn 钙钛矿膜中的缺陷, 因此仅实现了有限的改进。此外, 残留的化学试剂经常破坏锡钙钛矿晶格的有序性, 导致 Anderson 局域化, 这对光电性能不利, 因此开发了形态控制和溶剂工程方法, 可将 Sn 基 PELED 的 EQE 提高 5.4%。最近一项研究证明了一种减少 Sn⁴⁺ 的化学配位策略, 该策略提高了基于 Sn 的 PELED 的 EQE (高达 5%) 和稳定性。此外, 另一项研究报道了用于改进 Sn 基钙钛矿太阳能电池的局

部电子工程。氰尿酸 (CA) 是一种典型的离域芳香族化合物, 具有低电负性和强给电子能力, 有利于与 Sn²⁺ 的相互作用。值得注意的是, 从头算分子动力学 (AIMD) 模拟表明, CA 互变异构体的混合物是在 Sn 钙钛矿表面形成强化学键的关键。2023 年 8 月, 吉林大学物理学院凝聚态物理系王宁课题组^[16] 通过将 CA 集成到二维 TEA₂SnI₄ 中, 克服了无铅 PELED 现有的性能障碍, 实现超过 20% 的 EQE。CA 的多功能特性导致形成取向良好且高度稳定的互变异构 CA 络合物, 该络合物能够与 Sn (II) 进行强化学配位, 对 Sn 钙钛矿膜的结晶取向和化合价稳定性产生有益影响, 从而改善辐射复合, 其中使用 CA 二元或三聚表面络合物的协同配位诱导的 Sn (II) 的电子局域化是稳定 Sn (II) 的关键。除了固态电致发光, 这一基本进展还可以广泛应用于许多无铅钙钛矿半导体。图 15^[16] 为 CA 和 TEA₂SnI₄ 钙钛矿的相互作用和构型。

自 Novoselov 等发现石墨烯以来, 二维 (2D) 材料由于其优异的性能, 包括高载流子迁移率、大热导率, 已在各种光电和电子设备中得到不同的应用, 如光电探测器、宽带偏振器等。然而, 由于其原子级的厚度, 导致材料的超低光吸收 (例如, 单层石墨烯 2.3% 的吸收), 严重限制了其在各个领域的潜在应用。目前为克服这一关键问题, 研究人员已提出不同方法, 包括表面等离子体共振、法布里-珀罗模式和连续体中的对称保护束缚态 (SP-BIC)。具体来说, 表面等离子体共振已被证明可以实现石墨烯近红外区域的完美吸收, 但它会带来不可避免的欧姆损失。此外, 由于法布里-珀罗腔需要相当多的介电层才能实现高吸收, 因此它们通常涉及复杂的制备过程, 并表现出非常敏感的入射角依赖性。值得注意的是, 复合光栅结构支撑的环形偶极子 (TD) 被认为是增强光与物质相互作用的理想平台。迄今为止, 在任意选择的波长下实现完美吸收仍然是不可克服的。2023 年 9 月, 中国科学院上海技术物理研究所李冠海、陈效双、陆卫研究员团队和华东师范大学黄陆军研究员通过在支持 BICs 的硅化合物光栅上集成单层石墨烯, 证明了在近红外区域的完美吸收^[17]。能带结构分析表明, 这种连续

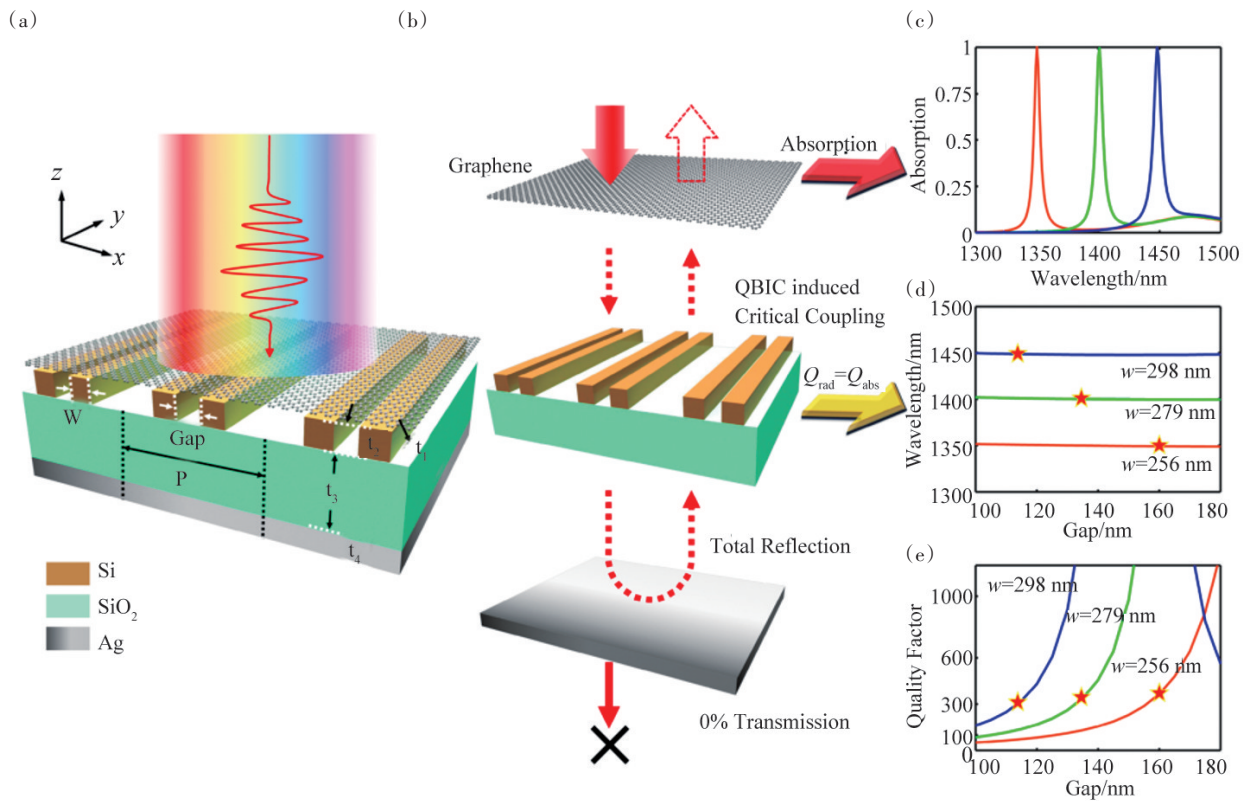


(a) 含有和不含有CA的 TEA_2SnI_4 的傅里叶变换红外(FTIR)光谱,以及纯CA;(b) 纯CA和复合 CA-SnI_2 的 ^1H NMR(左)和 ^{13}C NMR(右)光谱;(c) 真空中最稳定的三聚体构型并吸附在钙钛矿表面的振动功率谱;(d) CA的三醇和三酮形式;(e)、(f) 与 SnI_4 钙钛矿表面结合的互变异构CA三聚体(e)和二聚体(f)的最稳定构型,颜色代码:Sn灰色;I紫色;S黄色;C黑色;H粉红色;O红色;N蓝色;(g) CA在 TEA_2SnI_4 钙钛矿表面上的构型和特征相互作用,颜色代码:Sn灰色;I紫色;S黄色;C黑色;H粉红色;O红色;N蓝色;(h) 在具有碘化物空位的系统中获得的原始钙钛矿(左)和具有CA的钙钛矿(右)的电子定位函数图像;(i) SnI_4 钙钛矿和CA之间的电荷密度差

图15 CA和 TEA_2SnI_4 钙钛矿相互作用和构型

域束缚态(BIC)是由能带边缘的能带折叠到第一布里渊区的 Γ 点引起的。多极分解表明,这种BIC的性质由环形偶极子主导。由于二聚体光栅结构支撑的环形偶极子的 Q 因子随着二聚体纳米线之间间隙的调节而变化,因此通过将本征吸收 Q 因子与BIC的辐射 Q 因子相匹配,可以很容易地满足临界耦合,从而在单层石墨烯中产生完美的吸收。该结构的波长稳定性也得到了证明,并与其他研究进行了比较,该设计策略是稳健的,适用于其他类型

的2D材料,并且可以通过选择合适的2D材料将吸收中心波长从可见光到近红外到中红外区域进行调谐,研究结果可能会在基于2D材料的光电器件中找到有前景的应用,如光电探测器、传感器和滤波器。为在恒定的中心波长下实现完美的吸收,研究者设计了一种反射复合光栅结构,如图16(a)^[7]所示,该结构的功能如图16(b)所示,通过Ag反射层,外耦合通道被阻断,然后通过QBIC诱导的临界耦合可以将近红外区域的吸收提高到100%。



(a) 反射复合光栅结构;(b) 该结构功能示意图;(c) 不同波长下加载石墨烯的吸收光谱;(d) 共振波长是不同宽度下间隙的函数;
(e) QBIC的 Q 因子与不同宽度下间隙的关系

图16 完美吸收的石墨烯负载超表面及过程示意

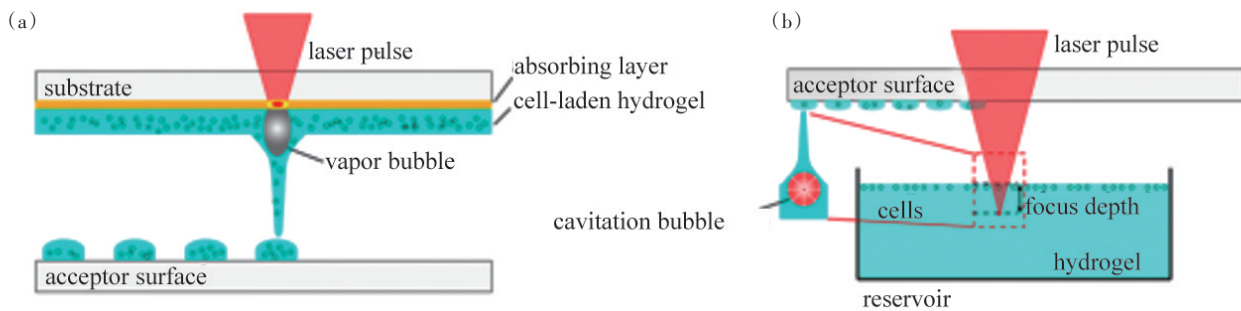
5 生物和医疗光学

生物和医疗光学领域的研究内容主要包括光学显微镜技术、光学成像技术、光谱分析技术、光学传感器以及光学治疗和光动力学疗法等。该领域的发展历史可以追溯到20世纪70年代和80年代,当时人们开始利用光学技术研究生物体内部的结构和功能。随着技术的进步和需求的增加,光学显微镜、光学成像技术以及光谱分析技术等取得了快速的发展,尤其是20世纪90年代,光学断层扫描成像(OCT)技术的引入,使非侵入性获取组织结构的高分辨率成像成为可能,为医学诊断提供了重要的工具。光学技术可以进一步改进医学诊断的准确性和敏感性,提供更精确和高分辨率的生物组织成像和分析方法。生物和医疗光学技术可以实现个性化医疗,通过实时监测个体的生物参数,制定个

性化的医疗方案和治疗策略,提高治疗效果。此外,光学治疗和光动力学疗法有望成为更有效的疾病治疗手段,尤其在肿瘤治疗和神经疾病治疗方面具有潜力。此外,生物和医疗光学领域与其他领域的交叉与融合,如人工智能、纳米技术等,将提高技术的综合性能和应用范围。因此生物和医疗光学领域在医学诊断、治疗和监测等方面具有广泛的应用前景,将为医疗行业的发展和疾病治疗带来创新和突破。2023年,生物和医疗光学领域取得了许多令人瞩目的成果,为医学诊断、治疗和监测带来了重大的进展。近年来,在组织工程和再生医学领域,生物材料的激光打印已成为精确灵活定位生物分子、蛋白质或DNA以及哺乳动物细胞的一种很有前途的方法,几乎不会损失生物活性。在大多数激光诱导生物打印技术中,入射激光能量被牺牲层吸收,其由用于近红外(NIR)吸收的无机材料或用

于紫外线吸收的基于蛋白质的水凝胶组成。通过吸收激光能量,牺牲吸收层被蒸发,从而产生高压,将含有活细胞的生物材料推向受体表面。然而,如果无机吸收层转移到印刷的靶结构上,它会分解成污染靶的微米和纳米颗粒。另一方面,紫外线激光会导致严重的DNA损伤,包括双链断裂和光化学交联,这两者都可能导致细胞死亡或致癌。为避免这种情况,通过将飞秒(fs)近红外激光脉冲的非线性吸收引导到透明液体中,开发了一种替代的基于无膜激光的生物打印方法。在聚焦激光束的腰部,主要通过多光子吸收和雪崩电离产生具有高密度能量的空间受限光学击穿,这导致空化气泡的形成。如果这种膨胀的空化气泡的球形对称性被液面破坏,就会产生射流,将生物材料推向受体基质。与光学显微镜相结合,这种方法允许从复杂

的细胞混合物中选择单细胞(基于例如粒子大小或荧光),并将它们定位在2D靶底物或3D预处理支架上,具有单细胞空间分辨率和约95%的细胞存活率。为了通过提高定位精度和细胞活力来进一步优化这一过程,需要详细了解水凝胶和细胞转移过程及其对激光参数的依赖性。因此,Zhang等^[18]在2023年通过时间分辨成像研究了在激光脉冲能量和聚焦深度变化下无细胞和载有细胞的水凝胶射流的动力学,用无量纲流体力学Weber和Rayleigh数量化观察到的射流形式,并将Rayleigh破碎状态确定为单细胞生物打印的首选过程窗口,达到了 $(42\pm 3)\ \mu\text{m}$ 的最佳空间打印分辨率和 $12.4\ \mu\text{m}$ 的单细胞定位精度^[18](图17)。该研究揭示了受控和确定产生液体射流的基本机制。这些结果将进一步用于生成2D和3D细胞微环境以及人工组织。

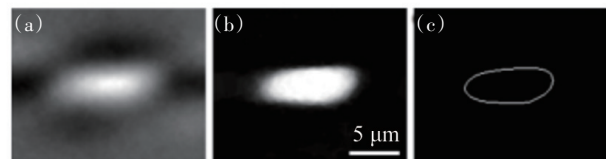


(a) 具有牺牲吸收层的标准激光诱导细胞正向转移的示意图设置;(b) 通过将激光脉冲聚焦到透明水凝胶中,用于无膜fs激光生物打印的示意图设置

图17 基于无膜激光的生物打印方法示意

氧气交换发生在直径为 $5\sim 10\ \mu\text{m}$ 的毛细管内。在神经组织中,毛细血管直径通常更接近这个范围的较窄端。给定 $0.5\sim 1.0\ \mu\text{m}$ 厚的无细胞层,细胞可通过的通道可能小至 $3\ \mu\text{m}$ 。由于这比红细胞的自由直径($\sim 8\ \mu\text{m}$)窄得多,因此需要显著改变细胞形状才能挤过毛细管网络。目前对这一过程的理解主要基于计算机建模和体外制备,其中血细胞通过体外制备的合成通道被推动。由于这些毛细血管的直径小,组织的代谢活性高,因此评估人类的细胞转运,特别是神经组织内的细胞转运尤其令人感兴趣。以往研究已经实现了毛细管流动通道的可视化以及流速和流量(细胞计数)的量化,但还没有

给出活体视网膜中红细胞形状的定量描述。2023年3月,Bedgood等^[19]描述了一种测量红细胞穿过狭窄毛细管时形状的新方法,如图18所示,该方法使用高速泛光照明自适应光学系统获取视网膜毛



(a) 平均强度与位于图像中心的细胞质心的距离函数;(b) 概率图,显示观察细胞的可能性与质心距离的函数;

(c) 二进制细胞轮廓,取自图18(b)中50%概率的平滑轮廓

图18 单个毛细管中“平均细胞”的示例表示

细血管网中单排细胞流动的无创视频数据,开发了一种新的分析方法来绘制不同尺寸毛细管内红细胞的平均形状,进而可以量化细胞的形状和方向^[19]。

20世纪80年代初,Alfano小组测量人类肺、肝和前列腺组织的恶性和非恶性组织之间的发射光谱差异,“光学活检”(OB)首次被用作癌症检测的新方法。人体组织与光相互作用的突出光谱特性为在分子水平上解决医学问题提供了新的途径。传统的光谱方法不能用于解析组织中多个生物分子的光谱,即通过一次扫描获得每个成分的光谱信息,因此需要一种快速获得与组织内恶性肿瘤相关的多个荧光团的复杂混合物的光谱信息的有效方法,Alfano结合了荧光光谱和吸收光谱引入了一种称为斯托克斯位移光谱(S3)的方法来解决这个问题。2023年2月,Pu等^[20]在选定的40 nm波长间隔下,无标记地收集人类癌症和正常前列腺组织的S3光谱,以研究基于3种关键分子——色氨酸、胶原蛋白和还原烟酰胺腺嘌呤二核苷酸(NADH)——作为癌症生物标志物的鉴别功效。该方法采用主成分分析(PCA)和非负矩阵分解(NMF)对光谱分量进行降维和特征提取,用于创建前列腺癌检测标准,训练向量机(SVM)分类器来分离这两种类型的组织。研究表明,具有分解方法的S3光谱是一种很有前途的技术,可以为疾病和健康样本的分类提供特征信息,同时显著降低样本维数并保持光谱强度。图19^[20]为使用S3光谱记录的前列腺癌

症组织和正常组织的光谱,295 nm处峰值对应色氨酸,340 nm处峰值对应胶原蛋白,表明与正常组织相比,癌症组织中的色氨酸增加,胶原蛋白减少。

微型多光子显微镜的进步使得对自由行为的啮齿动物进行高分辨率的大脑成像得以实现,然而,微创台式二光子显微镜(m2PM)脑成像仅限于啮齿类动物的上层皮层,而台式三光子显微镜可以记录完整大脑中的神经元活动。但是对于较小的动物来说,微型物镜太大,因此,对自由运动小鼠的皮层下结构(如海马体)进行微创成像仍然具有挑战性。2023年2月,北京大学程和平与王爱民团队报道了一台2.17 g的微型三光子显微镜(m3PM),其配置在高散射状态下成像时可最大限度地收集荧光,并通过在安全的激光功率下对整个皮层和海马CA1亚区(深度达1.2 mm)的钙信号进行成像来证明其能力^[21]。它能够检测自由移动小鼠在单颗粒到达任务中后顶叶皮层第6层神经元的运动行为相关活动。因此,m3PM增强成像可以研究行为自由的动物的深层皮层和皮层下结构的神经机制,如背侧海马体和背侧纹状体,这一系统将促进对大脑皮层、小脑皮层和皮层下结构的机制研究,对脑深部成像技术的未来发展有更广泛的应用。图20^[21]为微型化三光子显微镜示意,经典阿贝聚光镜结构被引入构型设计中:微型阿贝聚光镜与简化的无限远物镜密接可以提高散射光的通透效率;阿贝聚光镜与激发光路中的微型管镜部分复用,可以进一步简化结构,降低损耗。

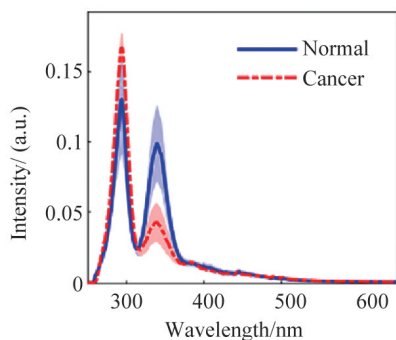


图19 用具有标准偏差误差边界的选择性波长偏移常数 $\Delta\lambda_c=40$ nm获得的癌症组织(点划线)和正常(实线)前列腺组织的平均S3光谱

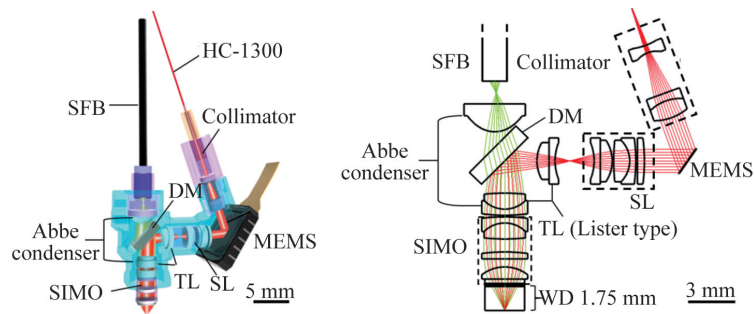


图20 微型化三光子显微镜示意

6 光学设计和仪器仪表

多光子光刻技术(MPL)是当前最具发展前景的三维纳米制造技术之一,在实验室和工业应用中具有巨大的潜力,但同时实现高通量、高精度、高设

计自由度和广泛的材料结构能力仍然是一个长期悬而未决的挑战。2023年5月,武汉光电国家研究中心熊伟团队首次提出了一种基于无惯量声光扫描与空间开关(acousto-optic scanning spatial-switching, AOSS)的双光子聚合光刻术(图21)^[22]。

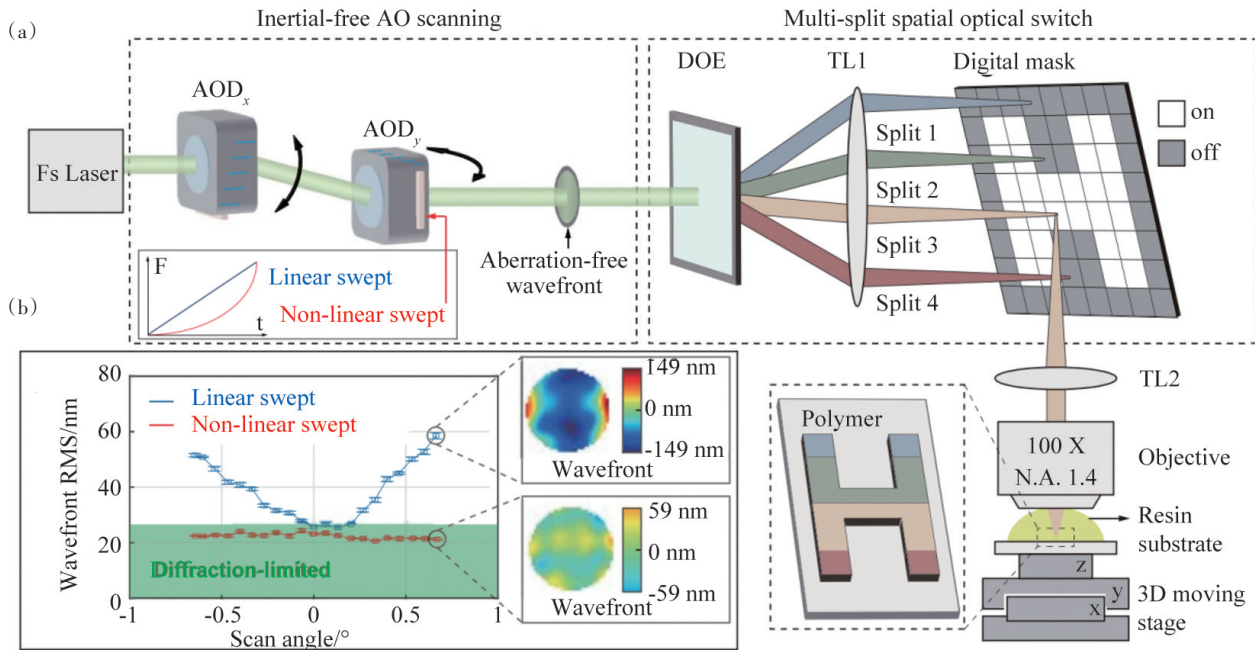


图21 微纳3D打印系统示意(a)和分别用线性扫频信号和非线性扫频信号驱动AOD_y时的波面比较(b)

AOSS系统框架如图21(a)所示,包括了无畸变声光扫描模块与空间光开关模块。传统的扫描式双光子光刻技术通常使用振镜等机械扫描方式,扫描速度受惯性限制。该工作则利用声光偏转器(AOD)实现了无惯量的声光扫描方法,相较于传统的机械振镜扫描方法,激光扫描速度提升了5~20倍。为了实现无畸变声光扫描,研究团队开发了AOD的非线性信号调制技术,使扫场边缘的波前像差的方均根RMS值不超过21.2 nm,确保在高速声光扫描过程中光斑尺寸接近衍射极限。同时,该工作结合衍射光学器件实现了多焦点并行声光扫描以进一步提高加工通量,其中多焦点由空间光开关的不同区域独立控制,可以实现任意非周期性结构的3D打印。该光刻技术3D打印速率达到了创纪录的 7.6×10^7 voxel/s,比其他扫描式双光子光刻

方法的产率高出近1个数量级,为大规模双光子聚合3D打印方法的实现提供了可行的技术路线。

光学微腔将光限制在小模体内,从而产生更强的光-物质相互作用。其结构可分为2种,第一种,光可以完全限制在材料内部,即在器件层的平面内,如光机械晶体、耳语廊模式谐振器。第二种,通过使用高反射镜,如法布里-珀罗型微腔,可以将光限制在自由空间内,即平面外。虽然第一种实现方式允许片上集成,具有机械稳定性和微纳加工灵活性,但可能会受到光吸收的影响,第二种实现方式规避了这一缺陷,但缺乏微细加工的灵活性和固有的机械稳定性。2023年12月,Kini Manjeshwar等通过结合面内和面外光传播来实现高质量的光学微腔(图22、图23)^[23],具有机械稳定性,以及片上可扩展性和设计参数的灵活性等优点。

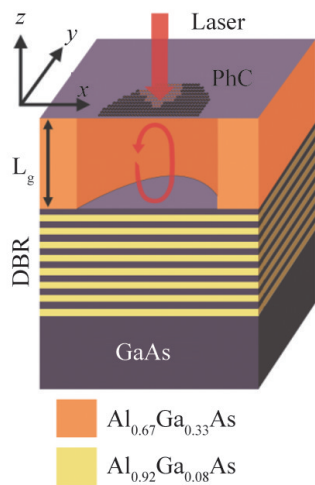


图22 由(Al,Ga)As异质结单片制备的PhC镜和DBR镜形成的微腔示意

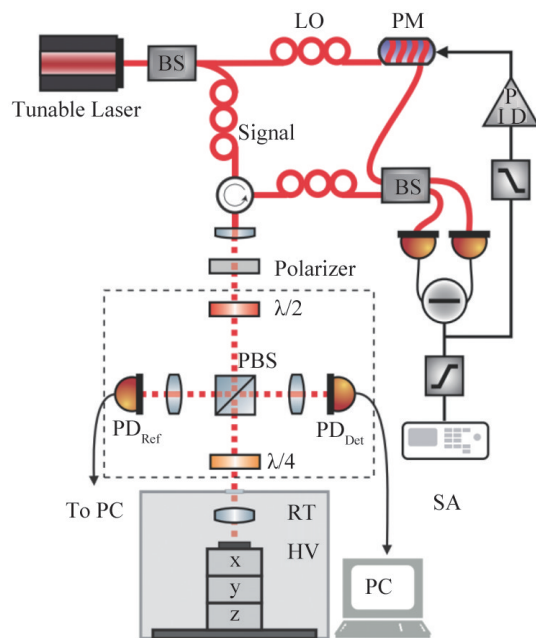


图23 用于表征微腔光机械特性的实验装置

光机微腔由悬浮光子晶体(PhC)和分布式布拉格反射(DBR)镜形成。虽然DBR的阻带由异质结构生长决定,但膜的反射率可以通过PhC的模式来设计。该装置利用这种灵活性来验证微腔共振波长的可调性,只需改变PhC孔的半径,即PhC和DBR反射镜之间的间隙即可实现对微腔共振波长的调控。由(Al,Ga)As异质结构单片制造的亚波

长的片上自由空间光机械微腔。通过简单改变PhC空穴的半径来展示腔共振波长的可调性。DBR的微腔模式和透射模式可以强耦合,这可能为视光领域提供新的应用。该方法允许多个悬浮的PhC板的平滑集成,从而在芯片上实现多元件光力学,这已被提出来实现难以捉摸的单光子强耦合。此外,该方法将能够在单个芯片上实现光机微腔阵列,并应用于传感和光网络。最后,通过使用多个PhC板实现连续体中的束缚态,并解决目前实现强光机耦合物理的障碍,即降低了光能的损耗。

发展太空或气球上的超大望远镜的一个关键因素是减少主镜的面重。大型薄膜反射镜的面重很低,但很难制造出天文望远镜所需的光学质量。2023年6月,Max Planck物理研究所提出了在旋转液体上生长出光学质量的抛物面膜反射镜的方法(图24)^[24]。即在真空化学气相沉积工艺中由旋转液体形成的抛物面上生长这种膜,其尺寸仅受真空室的限制,利用辐射自适应光学方法对抛物线形状进行局部操纵,可以修正抛物线形状的缺陷或变化。仅由辐射引起的微小局部温度变化,就导致微米量级的行程。利用现有技术,将所研究的方法扩展到生产直径数米的镜子是可行的。

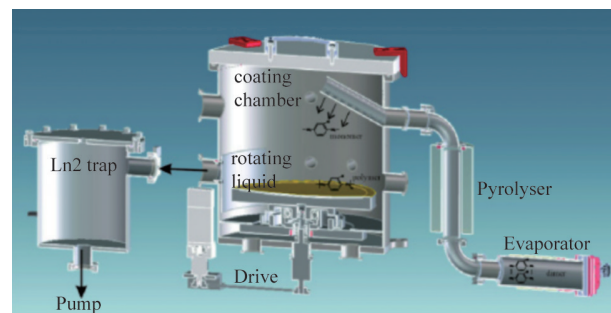
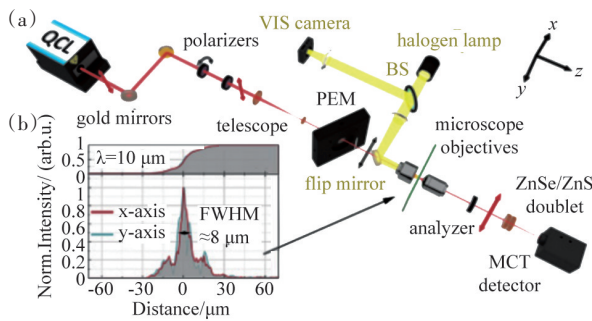


图24 涂覆反应器示意

目前,利用该方法已成功沉积了直径达30 cm的抛物面膜,这些抛物面膜的光学质量达到要求,并且可以通过辐射自适应方法变形,下一步要探索的是大规模膜的行为、边界效应在该水平上的影响、在米尺度上的滚动和包装,以及它们的自适应成形。一旦建立了一个允许这些大尺寸膜生长的设施,就可以在短时间内以较低成本生产许多抛物面膜。

椭圆偏振仪(椭偏仪)是一种先进的偏振敏感测量技术,适用于测定各种样品特性。其原理是基于分析光与物质相互作用引起的偏振变化,迄今为止,商用红外椭偏仪依赖于傅里叶变换红外(FT-IR)光谱仪和热红外发射器,其光谱亮度受到强烈限制。此外,它们的全向发射导致了信噪比(SNR)、测量次数和光斑大小的限制。因此,在2023年6月,Ebner等首次提出了一种衍射受限空间分辨率优于 $13.3\ \mu\text{m}$ 的增强型高光谱相位调制微椭偏仪(图25)^[25]。



(a) 红色和黄色为光束路径;

(b) 焦平面和派生光束轮廓的刀口测量结果

图25 QCL微椭偏仪和可见光显微镜

实验中,通过展示光谱范围内的第一个衍射极限微椭偏仪设置,中红外(MIR)中光谱椭偏仪(SE)的空间分辨率达到了一个新的水平。量子级联激光器(QCL)作为SE的中红外源具有突出优势,可实现亚秒级采集时间,并具有衍射极限的空间分辨率,出色的消除噪声的性能,以及衍射限制光斑尺寸。使其能够以前所未有的方式深入了解复杂的样品特性和参数。

金刚石量子传感器近年来受到广泛关注并得到快速发展。利用光学检测磁共振(ODMR)方法,可以很容易地实现对温度、磁场和压力等可能影响NV(金刚石氮空位)中心量子态的各种物理参数的检测,而大多数传感器,采用了自由光耦合方法,导致传感器的集成度和便携性仍然较差。因此,仍需要新的方法或技术来提高基于光纤的传感器检测弱磁场的灵敏度。2023年6月,暨南大学邵杰团队通过引入一对高磁导率锥形磁通集中器,提出了一

种灵敏度增强的光纤耦合金刚石磁传感器(图26)^[26]。

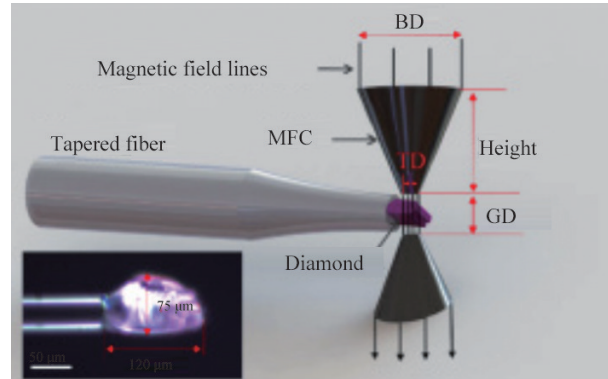


图26 基于金刚石的纤维磁传感器示意

实验中,光纤耦合金刚石磁传感器锥形尖端与普通光纤尖端相比,前者可以显著提高对金刚石荧光的光激发和收集效率。为了提高磁探测灵敏度,通过一对锥形磁通量集中器(MFCs)夹住金刚石,该聚光器可以从更大的区域收集环境通量并将其集中在金刚石上。

腔磁共振中光场和磁模之间的非线性相互作用构成了光学和量子信息处理中各种非平凡效应的丰富来源。2023年8月,Munir等根据腔磁力学中,由于场不均匀性,偏置铁磁材料同时表现出静磁模式和Kittle模式的原理,提出了一种研究由微波腔和铁磁材料(钕铁石榴石球)组成的腔体磁振系统中探针场传输曲线的方案(图27)^[27]。

在实验中,研究团队报告了单双磁振子引起的透明度(MIT)下降和磁振子诱导的急剧吸收峰,并证明了非线性交叉和自克尔相互作用如何显著增强或抑制这些现象。且观察到,当结合磁振子-磁振子模式耦合时,会发生MIT窗口的分裂,有助于为光-物质相互作用问题引入一定程度的自由度。此外,实验团队还研究了群延迟在透明度附近的传播,并展示了急剧下降如何允许在更长的时间内实现慢光。实验团队还发现腔-基特和磁振子-磁振子模式耦合参数都会影响群延迟的传播,这解释了亚光速到超光速(反之亦然)传播现象发生和转变的过程。这些发现可为未来研究非线性效应铺

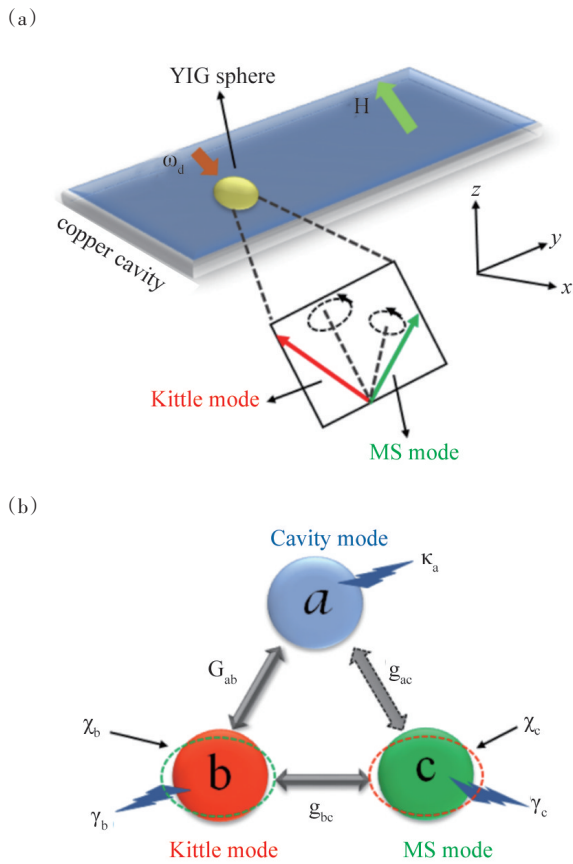


图27 腔体磁振系统示意

平道路,这些非线性效应在腔磁力器件中的新应用,可用于量子计算设备和量子存储器等。

7 光学信息处理

激光三维成像技术因具有成像分辨率高、测量距离远、探测信息丰富等优点而被广泛应用,长期以来,如何实现趋近单光子水平的探测灵敏度,对于促进其在低光通量、光子稀疏的微光探测场景下的应用具有积极意义。2023年6月,华东师范大学曾和平与黄坤团队在中红外三维成像领域取得进展(图28)^[28],发展了基于高精度非线性光学取样的中红外上转换测控技术,实现了超灵敏、高分辨、大视场的中红外三维成像,展示了单光子探测灵敏度、飞秒门控时间精度以及百万像素宽画幅。该技术主要采用非线性光学和频过程将信号波长高效转换至可见光波段,利用高性能硅基相机即可实现红外成像,从而规避了现有红外焦平面阵列灵敏度不足的技术瓶颈,同时,该上转换成像系统采用同步脉冲泵浦方案,可将背景噪声限制在极窄时间窗口内,结合精密频谱滤波可以有效提升探测信噪比,进而实现单光子水平的成像灵敏度。此外,研究人员还利用非线性广角成像技术,通过单次曝光获得大视场成像,免除了逐点机械扫描过程,大幅提升了成像速度。另外,研究人员还采用超快光学符合门控技术,精确测量中红外信号的相对飞行时间,从而得到被测物体表面的形貌信息。该系统的时间分辨率可以达到飞秒水平的

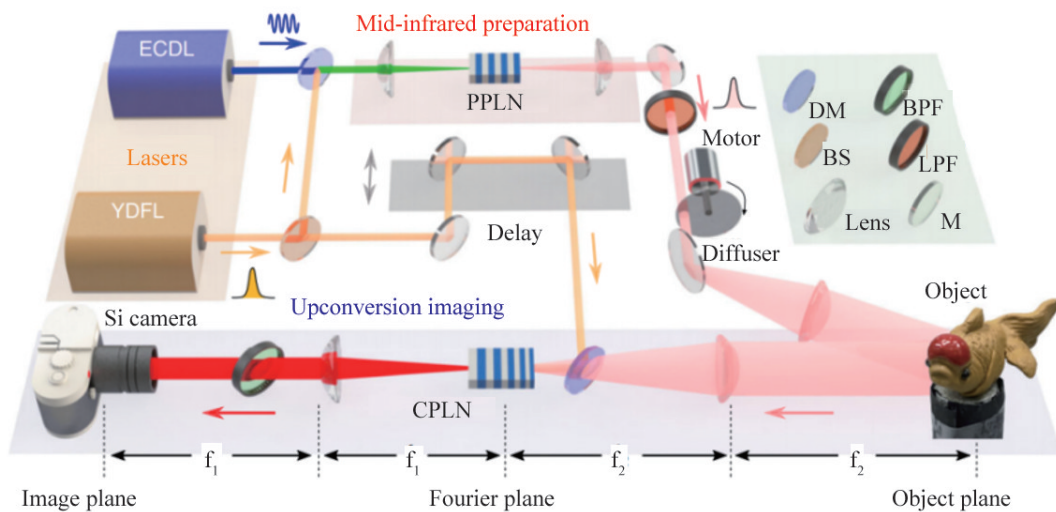


图28 MIR单光子上转换三维成像实验装置

过高速延时扫描与宽场全幅采集,对被测场景进行快速时域切片,进而反演出目标界面的反射率、透射率以及材料的吸收率、折射率、色散量等丰富信息。

目前,腔衰荡光谱是商业化程度最高的超高灵敏探测技术,但受限于高昂的成本、较大的光学腔气室和有限的测量动态范围。2023年1月,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所王强团队和香港中文大学任伟团队,合作提出了一种声学-光学双共振增强的新型光声光谱技术(图29)^[29],采用6 cm的微小光学腔,探测下限可达 0.5×10^{-12} ,动态范围覆盖8个数量级,达到了目前光声光谱气体传感领域前所未有的技术指标,可以兼具超高灵敏度和超大动态范围。

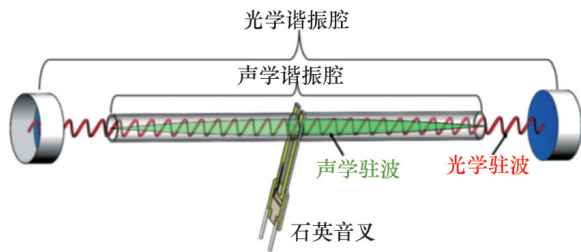


图29 声学-光学双共振增强方法示意

该装置的核心元件包括光学谐振腔、声学谐振腔和声波探测器。当入射激光与光学谐振腔共振时,在谐振腔腔镜之间形成光学驻波,通过激光强度调制产生的声波在声学谐振腔内形成声学驻波,从而进一步被放大。此工作中采用了高品质因子($Q=8000$)的石英音叉作为声波探测器,将声波频率调制为石英音叉的谐振频率时,能激发音叉震动,最后通过石英的压电效应转化为待测的电信号。这项研究工作是高灵敏激光光谱技术的一个突破,首次将光声光谱的灵敏度提高到与最灵敏腔衰荡光谱相当的水平,并将传感器的尺寸缩小了90%~95%,动态范围提升了2~3个数量级,成本也得到大幅降低。

超分辨荧光显微镜已经广泛应用于生物医学研究,但基于荧光辐射的成像技术存在荧光标记效率和细胞毒性等问题,并未被广泛运用。2023年12月,浙江大学张德龙团队在无标记超分辨成像

方面取得重要进展(图30)^[30]。团队通过提取光热弛豫过程中的亚衍射极限特征,实现了突破衍射极限的无标记超分辨成像。这种光热弛豫定位超分辨成像方法适用于广泛分子的光吸收现象,不需要依赖荧光分子的标记或者非线性光学激发,具有更广泛的适用性。

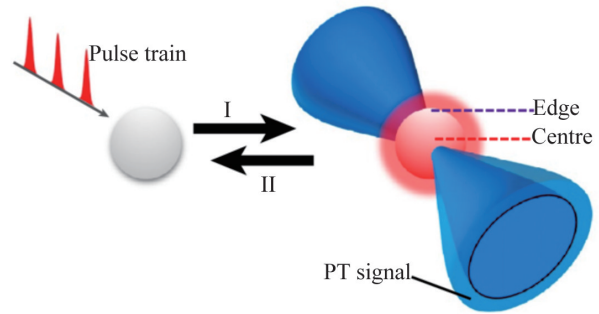


图30 光热弛豫定位显微镜概念图

研究团队提出了一种名为光热弛豫定位(PEARL)显微镜的光热成像方法,通过光学探测光热弛豫的时空不均匀性来突破光学衍射极限。PEARL显微镜通过提取光热弛豫过程中的高阶谐波分量来实现超分辨成像。脉冲泵浦光激发的光热过程包括光吸收产生的加热阶段和光热弛豫产生的能量耗散阶段。这种光热耗散在空间和时间上演化,并由探测光的焦斑进行探测。由于空间位置依赖光热耗散,光热弛豫过程在时间动力学上产生差异,导致光热信号在高频处的成分会比加热体边缘处下降更快。这种特征可以在频率域提取,例如利用锁相放大器进行谐波解调。数值模拟以及实验表明,通过提取光热弛豫中的高阶谐波分量,可以观察到明显的分辨率提高趋势。

通过长光纤传输光以执行中红外光谱分析,为医疗应用以及危险或难以接近的环境中的遥感提供了巨大的潜力。2023年12月,Castro-Marín等通过在不平衡的迈克尔逊干涉仪的一个臂中引入空心芯光纤(HCF)来进行光纤传输光谱(图31)^[31],该方案具有一系列优点,例如抑制传输路径上的干扰特征以及将所有检测设备定位在光纤的近端等。

该团队所研究的光纤传输外差光谱,是由中红外频率梳光源的一系列超快脉冲存在的长期时间

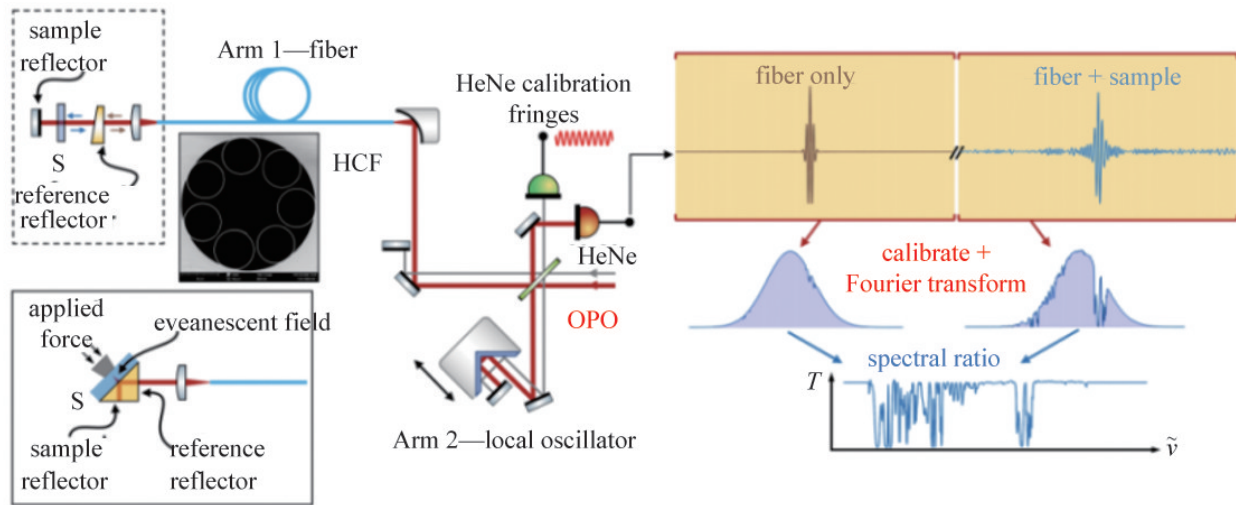


图31 光纤传输光谱的实验原理

相干性所独特实现的。虽然排除了热、超发光和非相干超连续源,但对梳状特性的限制并不严格,不需要稳定的重复率。同样,自由运行的光学参量振荡(OPO)的载波包络相位足够稳定,可以在微秒级别内实现相干性,有可能观察到相隔数百次往返的脉冲之间的干扰。通过在传输光纤之后但在样品之前使用正入射菲涅耳反射,可以获得接近理想的光谱基线测量,并能够将传输路径(自由空间和光纤内)中的光谱干扰特征视为仪器响应函数,在随后的光谱中进行校正。实验团队通过在长度40 m的光纤中对塑料样品进行反射光谱分析来验证该系统,表明了新方案有望在远程环境中实现多物种气体监测。

8 光源与强场激光

为深刻理解宇宙起源和获得聚变能源,需要将大能量激光聚焦于一个极小时空区域来模拟类太阳恒星内部或者黑洞边缘等极端的环境条件。而当前的激光系统不仅缺乏产生所需超高功率的架构,而且缺乏能容纳、传输和反复承载超大能量超短脉冲的光学元件。2023年11月,中国科学院上海光学精密机械研究所邵建达、晋云霞团队成功研发400 nm超宽带金光栅(图32)^[32],带宽比现役金光栅提升近1倍,并且研制的光栅口径进一步实现

了国际最大口径1620 mm×1070 mm,在张江实验室李朝阳团队设计于广角非共线光参量啁啾脉冲放大(WNOPACPA)技术路线中,可支撑当前拍瓦激光器的脉冲宽度从目前10~20个周期压缩到近单周期(3.3 fs),解决了实现单周期数百拍瓦乃至艾瓦激光脉冲宽度压窄和大能量传输的一个核心技术难题。

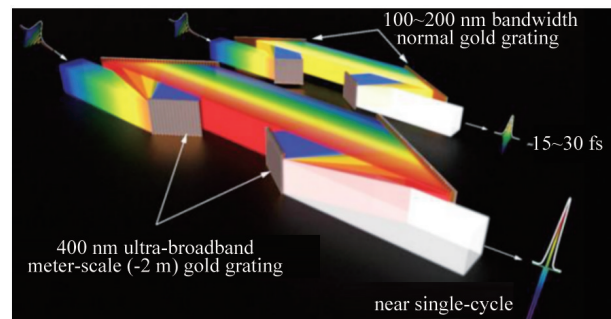


图32 大口径超宽带压缩概念示意

实验团队在设计上利用超弦形特征轮廓对全息式光栅结构进行优化,并引入方位角扩展了设计 and 应用自由度,该光栅兼容 $\pm 15^\circ$ 方位角,使三维压缩器成为可能;实验上掌握了光栅槽形演化规律,揭示并发明了大底宽小尖角金光栅技术,将高衍射效率带宽从目前的100~200 nm大幅拓宽1倍以上,成功研制超400 nm宽带金光栅,在750~1150 nm光谱范围内,超宽带金光栅作为啁啾脉冲放大的核

心光学元件,其-1阶衍射效率大于90%,可用于近单循环脉冲的拉伸和压缩。如此宽带与所提出的WNOPACPA技术的光谱一致,可支持近单周期激光脉冲。搭建了首套依托于SEL-100 PW样机的损伤测试系统(脉宽15 fs,中心波长925 nm,带宽200 nm),近倍频程超宽带光栅表现出的高抗激光通量损伤阈值(0.57 ± 0.02) J/cm²和高效均匀性(高于90%),将在近倍频程超宽带展宽、放大和压缩系统中发挥关键性作用。该工作解决了数十年来传统金光栅带宽受限的问题,扫除了实现激光系统极限强度——“ $\lambda 3$ ”激光——的一大障碍,完成了未来单周期艾瓦激光近倍频程大口径超宽带脉冲压缩光栅的技术储备工作。

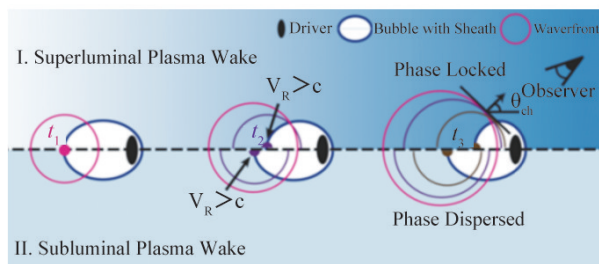
目前通过光脉冲的调制和压缩,可以获得持续时间极短、峰值功率极高的相干光源,为人类探测微观超快物理过程提供了独一无二的重要利器。2023年11月,深圳技术大学研究人员在国际上首次提出基于超光速等离子体尾波场产生阿秒脉冲相干光源的物理方案(图33)^[33],并阐释了一种由电

子集体作用主导的全新相干辐射产生机制。

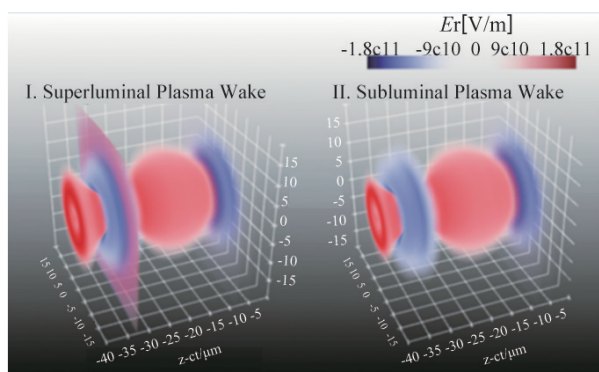
该研究团队从激波锁相原理出发,提出了一种基于电子集体作用的全新相干辐射机制:通过相对论电子束与具有缓变上升密度梯度的等离子体相互作用,可以激发一个尺寸逐渐变小的等离子体空泡(空泡尺寸与等离子体密度成负相关),不同位置处的等离子体电子在空泡尾端反弹并在此辐射。虽然每个电子的运动速度小于光速,但空泡尾端前进的集体速度大于驱动电子束速度(接近光速),满足“超光速”条件,因而不同电子在此处产生的辐射沿着契伦科夫角度相干叠加形成光激波。这种基于电子集体作用的新型相干辐射机制,突破了经典相干辐射理论中要求辐射电子束尺寸远小于辐射波长的限制。同时,该辐射光源具有非常独特的性质:不仅脉冲宽度极短,达到阿秒尺度,并且强度很高,与传播距离的平方成正比,同时具有极佳的空间指向性、极小的角散、稳定的载波包络相位和超宽的频率调谐范围。此外,该工作开发了远场时域相干辐射的并行计算程序,解决了传统模拟方法中数值色散、近远场变换噪声等瓶颈问题,实现了高频辐射的高时空分辨自洽模拟,为新型相干辐射源的开发和研究提供了新的技术方法。

高能伽马辐射源在基础科学研究、医学、工业等领域具有广泛的应用。目前,利用高能电子束通过同步辐射、韧致辐射和康普顿散射等机制可以产生伽马射线,但由于其较宽束斑、较低转化效率和较大发散角的局限,难以大幅提高伽马辐射源的亮度。2023年2月,上海交通大学张杰、盛政明团队提出了一种简洁、高效的GeV伽马射线源的产生方案^[34],有望实现峰值亮度达到自由电子激光亮度。

该团队提出方案的独特之处是不再使用激光脉冲驱动,而是用电量在几个纳库的相对论电子束与固体靶的直接相互作用。通过将一束电量在nC级的GeV电子束以小角度斜入射到固体平板靶上,由此激发固体靶中的电子回流产生超强自生磁场。该磁场反过来又会对电子束进行横向压缩和聚焦。当经过约百微米的作用距离后,电子束可以聚焦到初始半径的1/10以内,即对应的束密度增加2个数量级以上。高密度电子束可以驱动固体靶



(a) 相对论电子束打到等离子体中在空泡尾端产生光激波的示意



(b) 大型超算数值模拟中看到的超光速空泡尾端的光激波辐射

图33 产生阿秒脉冲相干光源的实验原理

产生强度高达 10^{14} V/m 以上的超强表面准静态场, 进而触发光电效应 (QED) 并产生大量准直的伽马光子。该辐射机制的转化效率达 60% 以上, 获得的光子能量高达 GeV (最大可接近初始电子能量)。由于产生的伽马光束具有亚微米级束斑、毫弧度级发散角、飞秒级脉宽和 10^{12} 量级高光子产额, 每 0.1% 的带宽可获得 10^{28} 个光子 $\text{s}^{-1} \cdot \text{mm}^{-2} \cdot \text{mrad}^{-2}$ 的高亮度, 比现有的其他方案高了几个数量级。这种前所未有的极高亮度 GeV 伽马射线源有望为强场 QED 物理、核物理、高能物理和实验室天体物理等领域研究提供新的机遇。

9 光子学交叉领域

现今主流计算性能提升的增速已放缓, 近 10 年甚至面临失效, 这是因为电子晶体管大小逼近物理极限, 因此计算平台算力和能效的提升迫在眉睫。而光电计算以其超高的并行度和速度, 被认为是未来颠覆性计算架构的有力竞争方案之一, 但目前光电计算芯片要直接替代现有电子器件实现系

统级应用, 仍面临几个关键瓶颈。2023 年 11 月, 清华大学自动化系成像与智能技术实验室和电子工程系智能感知集成电路与系统实验室联合提出一种纯模拟光电融合计算芯片 (图 34)^[35], 并在国际上首次实测光电计算可以在系统层面达到高性能图形处理器 (GPU) 算力的 3000 余倍, 能效的 400 万余倍, 证明光电计算在诸多人工智能任务中的优越性。

实验团队创造性地提出了模拟电融合模拟光的计算框架, 将进行视觉特征提取的大规模衍射神经网络和基于基尔霍夫定律的纯模拟电子计算, 集成在同一枚芯片框架内。绕过模数转换器 (ADC) 速度、精度与功耗相互制约的物理瓶颈, 在一枚芯片上突破大规模计算单元集成、高效非线性、高速光电接口 3 个关键瓶颈。在三分类 ImageNet 等任务上实测表现如下: 提出的 ACCEL 芯片系统级算力达到 4.6 Peta-OPS, 是现有高性能光计算芯片的 400 余倍, 模拟电计算芯片的 4000 余倍。同时系统级能效 ACCEL 达到了 74.8 Peta-OPS/W, 比现有高性能光计算、模拟电计算、GPU 和张量处理单元 (TPU) 等架构提升了数百万倍。又因为超高计算

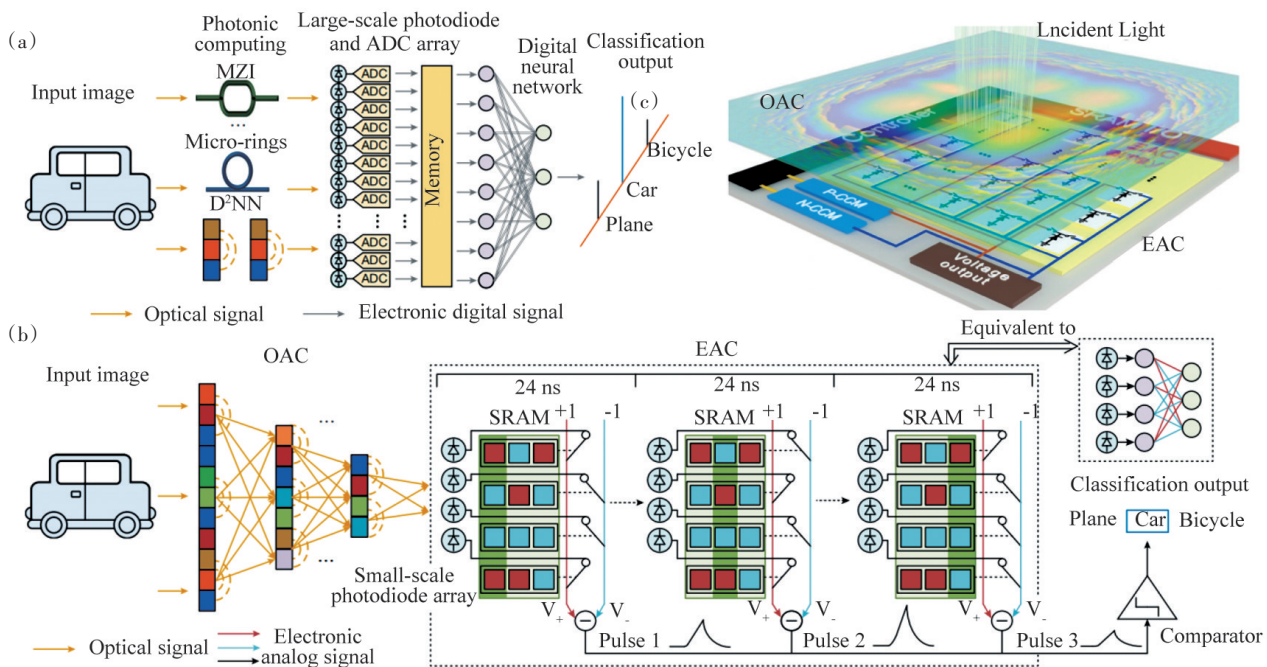
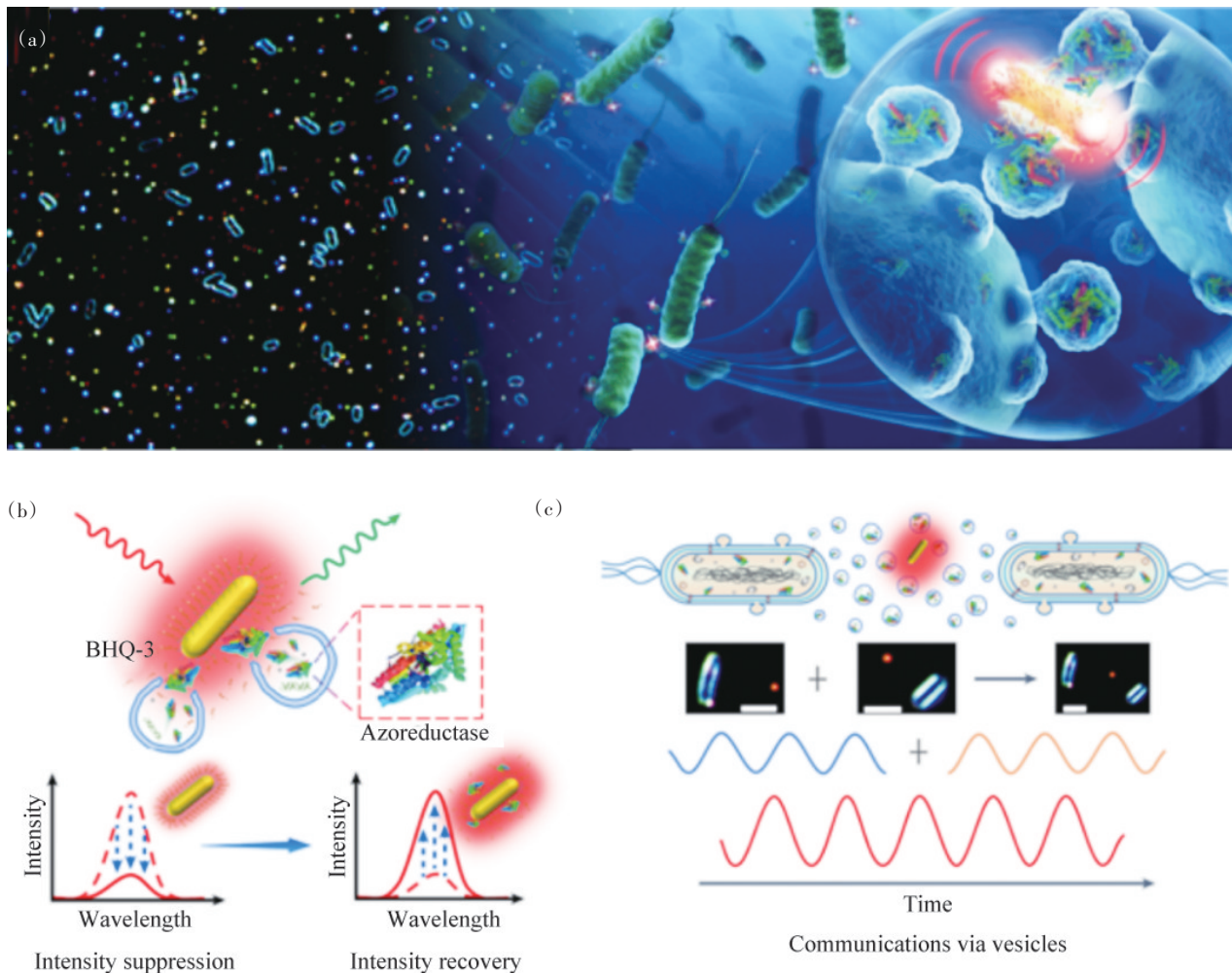


图 34 光电计算芯片 ACCEL 的计算原理和芯片架构

速度必然伴随着每帧图像极短的曝光时间,研发团队对此又提出了一个系统级解决方案:基于光与电模块物理本质上的优势互补,采用联合设计。光模块高并行地提取特征的同时,非监督地学习光强汇聚到某些特征点的编码方式,在总光强极低的情况下,提升局部光强,从而提高对应光电二极管的信噪比。同时利用电模块便于可重构的特性,开发自适应训练算法,让接续的电模块能够对前面多层光模块的加工误差和对齐误差进行有效纠正。并且在训练时引入对弱光噪声环境的建模。结果表明,ACCEL芯片比单一光计算或模拟电计算模块,在

各类光强尤其是弱光下的准确率有了显著提升。

细菌是诸多感染性疾病的病原体,而酶分子在细菌感染及抗生素分解过程中扮演着重要角色。然而,由于外膜囊泡携带的酶分子含量低,且缺乏长时间高精度实时监测酶分子的方法,人们一直无法观察到细菌外膜囊泡酶分子的释放过程,也无法知道酶分子如何调控细胞通讯,致使其成为悬而未决的难题。2023年8月,暨南大学李宝军等与哈佛大学 Luke P. Lee 合作,借助等离激元光学纳米天线揭示了细菌酶分子的释放及释放过程中的周期振荡特性(图 35)^[36]。



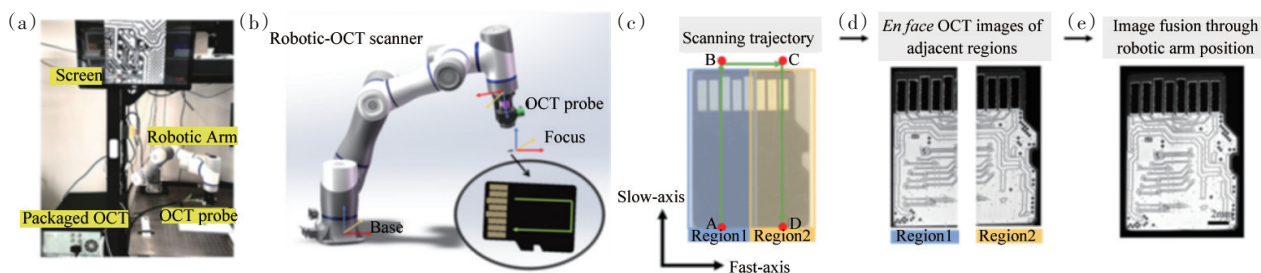
(a) 左半部分为等离激元光学纳米天线放置于细菌生存环境的暗场图片,右半部分为等离激元光学纳米天线揭示细菌酶分子释放周期振荡特性的示意;(b) 等离激元光学纳米天线工作原理;(c) 等离激元光学纳米天线探测细菌酶分子振荡特性的示意

图 35 等离激元光学纳米天线的构建及用于细菌酶分子探测

在实验中,他们将具有共振波长匹配的金纳米棒(长度约 77 nm,直径约 38 nm)与黑洞猝灭分子(BHQ 分子)通过静电作用连接在一起,构建出等离激元光学纳米天线(图 35(b))。由于 BHQ 分子的强吸收峰与金纳米棒的等离激元共振峰重叠,BHQ 分子会通过共振调控减小金纳米棒的散射截面,从而降低金纳米棒的散射强度(也就是金纳米棒的散射强度被 BHQ 分子的吸收峰有效抑制)。具体来说,当 BHQ 分子遇到细菌外膜囊泡释放的偶氮还原酶分子时,BHQ 分子的偶氮双键会被偶氮还原酶分子切断,使得 BHQ 分子不再具有强吸收峰,此时,被抑制的金纳米棒的散射强度得到恢复,从而得知有偶氮还原酶分子出现。等离激元光学纳米天线再将探测到的偶氮还原酶分子信号以光信号形式发射出去,完成了细菌酶分子释放规律的实验探测(图 35(c))。实验结果表明,这种等离激元光学纳米天线的探测时间长(长达数小时至数

十小时)、探测灵敏度高(单分子级别)、稳定性好(无光漂白),该项工作为深入研究细菌与宿主细胞之间的通讯以及与细菌感染相关重大疾病的传播机制提供了新方法,也为研究超级细菌耐药性问题提供了新思路。

随着数字化时代的到来,单体存储芯片(MSDs),如 micro-SD 卡、USB 闪存驱动器和多媒体 MMC 卡等应用十分广泛,但是,由于损坏、故障或故意删除,常常导致 MSDs 中一些关键或敏感数据丢失。因此,如何从 MSDs 中恢复和解析这些数据,成为公共安全领域的重大需求。2023 年 11 月,公安部鉴定中心张宁与清华大学薛平团队合作,通过融合光学相干层析(OCT)、机器人智能和激光刻蚀消融(laser ablation)等技术,成功研发了一种针对芯片物证的智能 3D 断层光学影像手术机器人,实现了对芯片内部电路的智能精准检测和微创手术(图 36)^[37]。



(a) Robotic-OCT 系统照片;(b) Robotic-OCT 扫描仪示意;(c) 机械臂的扫描轨迹以及 2 个相邻的连续扫描区域;(d) 2 个相邻区域
OCT enface 图像;(e) 覆盖整个 micro-SD 卡区域的融合图像

图 36 智能 3D 断层光学影像手术机器人原理

合作团队研制出基于六轴高精度机械臂的可调视场智能 OCT 成像系统(Robotic-OCT, 图 36)。机械臂精确且自动地将扫描探头移动到不同的位置和角度,实现视场灵活可调的 3D 断层成像,以适应各种样品大小和形状,同时减少饱和信号和伪影。同时,首次提出一种连续扫描(continuous scanning)策略,利用机械臂的智能扫描来替代传统 OCT 扫描成像中的振镜慢轴扫描,通过自动优化扫描角度和持续扫描,消除成像过程中的中断或不连续性,显著减少总体扫描时间,确保在整个感兴趣

区域内获得均匀且无缝的图像采集,实现了对 MSDs 的高速、高分辨率三维成像检测。该策略相比传统的停止-凝视(stop-and-stare)扫描模式,成像速度提升了 1 个数量级以上。通过对不同类型的 MSDs 进行智能 3D 断层成像,验证了在确保样品完整性情况下,该机器人系统具备的芯片逆向工程分析、印制电路板(PCB)通孔识别、芯片引脚定位等能力,并且可以诊断识别损坏类型,自动量化分析划痕深度、烧伤程度和折痕损坏区域等,为芯片损伤程度分析、功能修复提供重要依据。

在中国消化道癌症高发,为此产生了将消化道内窥镜的成像探头伸入体内对病灶进行观察并以无创方式获取疾病信息的技术手段,然而,现有医用内窥镜难以提供血氧饱和度、血流速度等功能信息,难以满足临床需求。2023年11月,暨南大学关柏鸥团队以光纤为技术载体,以超声为信息传递媒介,赋予了光纤内窥镜新的技术内涵(图37)^[38]。团队研制的新型光纤内窥镜不仅能以高空间分辨率提供血管结构信息,还能实时监测血氧饱和度分布的变化过程,为消化道疾病的观察与诊断提供了一种新的影像学手段。

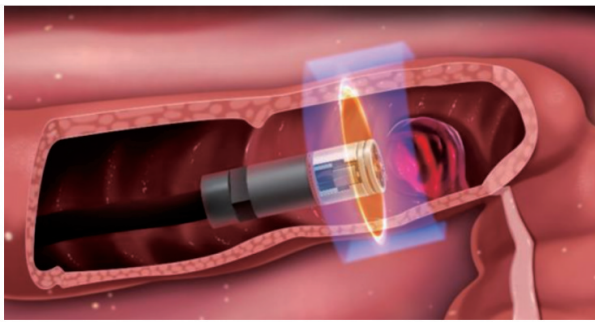


图37 光纤内窥镜示意

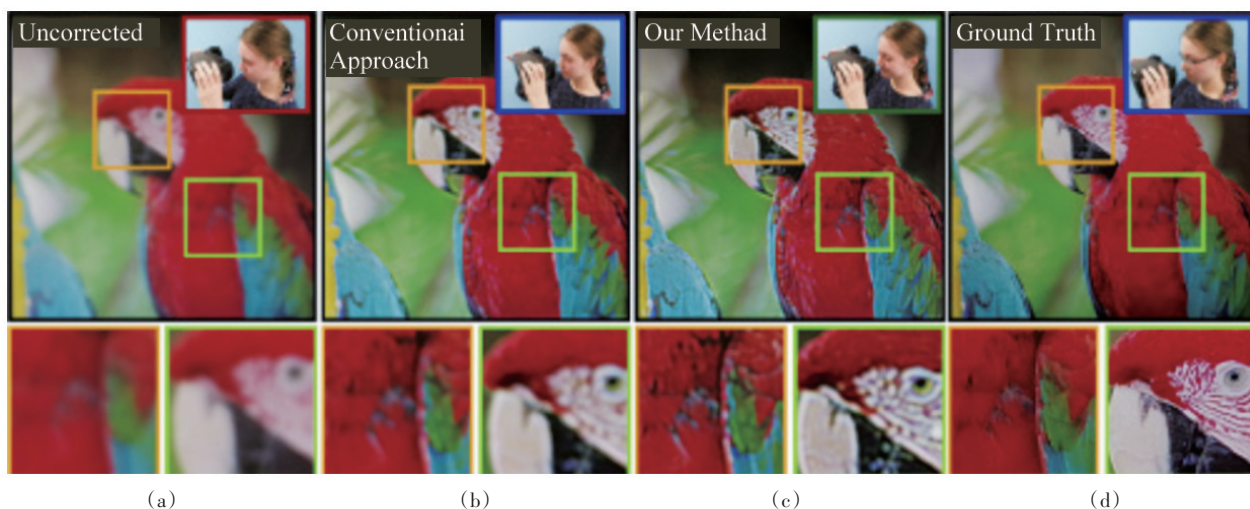
关柏鸥团队研制出的基于光纤技术的高灵敏度超声传感器,在原来内窥镜基础原理上,将超声

信号转换为激光频率变化并进行信号放大,以光外差探测方式实现信号读出。该传感器只有头发丝般粗细,其灵敏度比同尺寸压电传感器高出2个数量级,并具有极好的抗干扰能力,能够在探头快速旋转时稳定工作,使高性能光声内窥成像成为可能。对于消化道疾病诊断来说,该技术有望帮助对早期癌变与良性肿瘤进行区分,并确定癌变与健康组织的边界,助力精准实施手术。

10 视觉色彩

世界上有很大一部分人患有视力障碍,戴着处方眼镜。然而,当与虚拟现实(VR)头显一起使用时,处方眼镜会显得额外笨重并感到不适,对观看者的视觉体验产生负面影响。2023年6月,Güzel等提出一种处方感知渲染的方法(图38)^[39],为屏幕提供更清晰、更身临其境的图像,包括VR头显。

实验团队开发了可微分的显示和视觉感知模型,该模型封装了人类视觉系统的显示特定参数、颜色、视觉灵敏度和用户特定的屈光不正。利用这种可微分的视觉感知模型,团队使用梯度下降求解器优化显示中的渲染图像。如图39^[39]所示:(1)原色(RGB)屏幕显示输入图像。(2)观看者的眼睛用



(a) 在没有任何处方校正的情况下,由于屈光不正引起的散焦的感知图像;(b) 在相同屈光不正的情况下,传统的处方矫正算法所显示的图像;(c) 经过团队提出的算法处方补偿的计算方法提高了感知图像的颜色和对比度;(d) 聚焦在显示平面上的地面真实照片

图38 感知渲染方法获取的VR图像

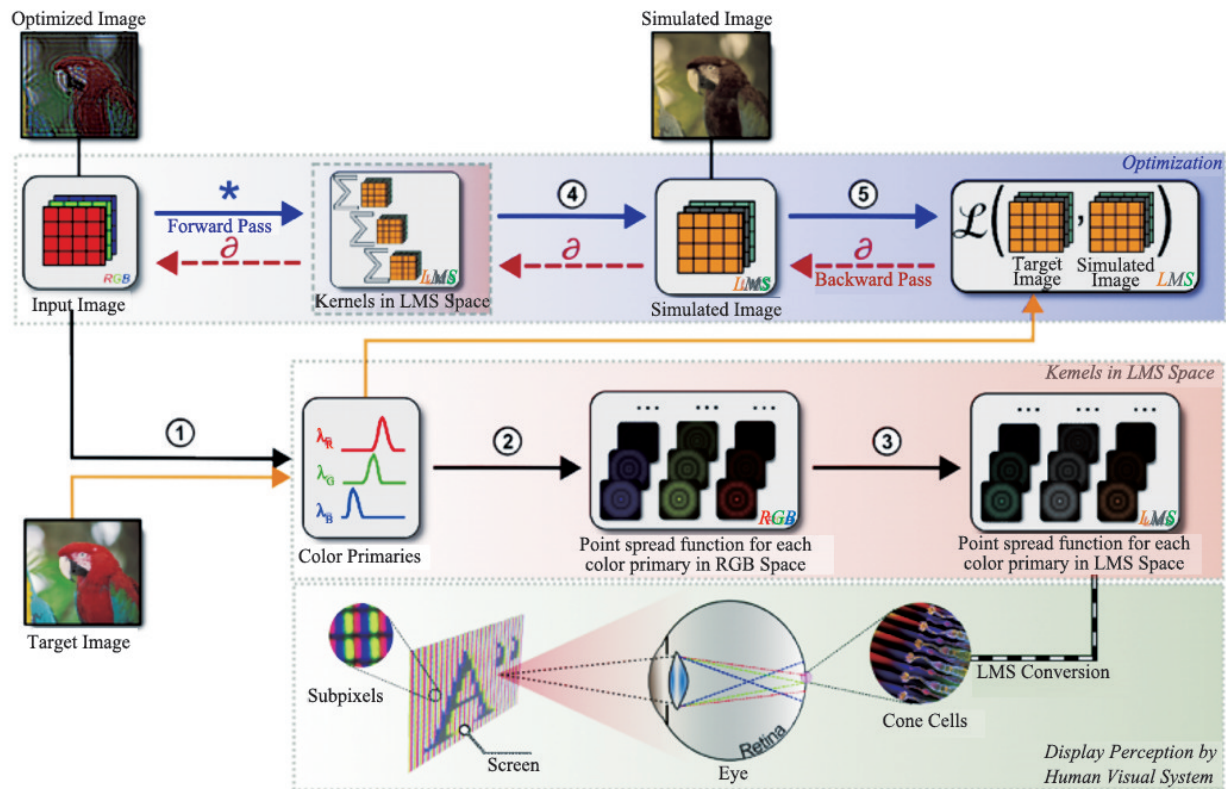


图39 可微分的显示和视觉感知模型实验原理

一个独特的点扩散函数(PSF)将显示的图像成像到视网膜上,该函数描述了该人眼睛的光学像差。(3) 视网膜细胞将畸变的RGB图像转换为三色感觉,也称为长-中-短(LMS)锥体感知。(4) 优化管道依赖于前面步骤((1)~(3))中描述的感知引导模型。因此,优化管道在每个优化步骤将给定的RGB图像转换为LMS空间,同时考虑使用Zernike多项式建模的查看器的PSF。(5) 损失函数对LMS空间中由感知引导模型导出的模拟图像对目标图像进行优化。最后,团队的可微优化管道使用随机梯度下降求解器识别适当的输入RGB图像。

11 太赫兹光学

目前太赫兹脉冲源的功率仅有微瓦级别,导致测量信号的信噪比极低。现有太赫兹检测技术通常仅针对厚度2 mm以下、层数10层以内的结构,

而工业中常见的多层复杂结构的缺陷检测仍极具挑战。2023年11月,西安交通大学张留洋团队提出了一套在极低信噪比下进行高对比度成像的太赫兹信号处理体系(图40)^[40],极大地扩展了太赫兹时域光谱的检测深度和成像对比度,为数十层的超多层结构的检测成像提出了新的解决方案。

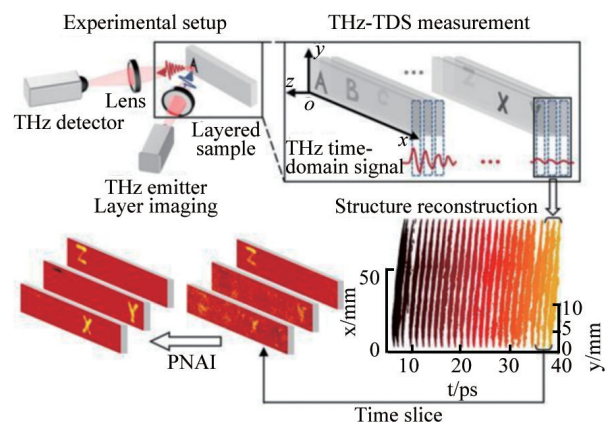


图40 太赫兹多层结构检测成像框架

该实验采用反射式太赫兹时域光谱系统进行测量。通过分析参考信号的双高斯拟合模型,提出了一种基于局部对称性的脉冲提取算法,利用对称度函数在太赫兹脉冲边沿和峰值的周期性变化,抑制检测信号中低频零漂和低频噪声,准确实现了极低信噪比下的脉冲峰位置提取。根据层状结构的界面反射特性,提出了一种基于点云密度的点云分割方法,使用高斯窗函数进行密度计算,提高了算法的稳定性和鲁棒性,实现层状结构的精确重建。

实验团队针对多次反射所引起的时域信号振荡导致的低信噪比问题,提出了一种太赫兹均值成像策略,根据区间内多次反射能量之和近似守恒原理抑制了多次反射所引起的噪声,从而大大提高了太赫兹图像的对比度。针对太赫兹成像中的阴影

和图像叠加问题,提出了一种基于高阶统计量的线性叠加消除方法,利用图像4阶中心矩这一极值条件消除其他层对本层图像的干扰,最终获得结构清晰、可辨识的太赫兹图像。

基于光子辅助的太赫兹波通信(0.3~10)THz已成为未来第六代移动通信(6G)网络的关键技术。然而由于传输损耗等因素的影响,实现超大容量、超长距离、实时传输以及通感一体化的光载太赫兹无线通信也面临着巨大的挑战。2023年11月,复旦大学余建军团队与紫金山实验室尤肖虎院士团队、北京邮电大学余建国团队及西安邮电大学赵峰团队合作,基于光子辅助技术在太赫兹大容量、远距离传输、实时传输、通感一体化等不同应用领域取得了突出成果(图41)^[41]。

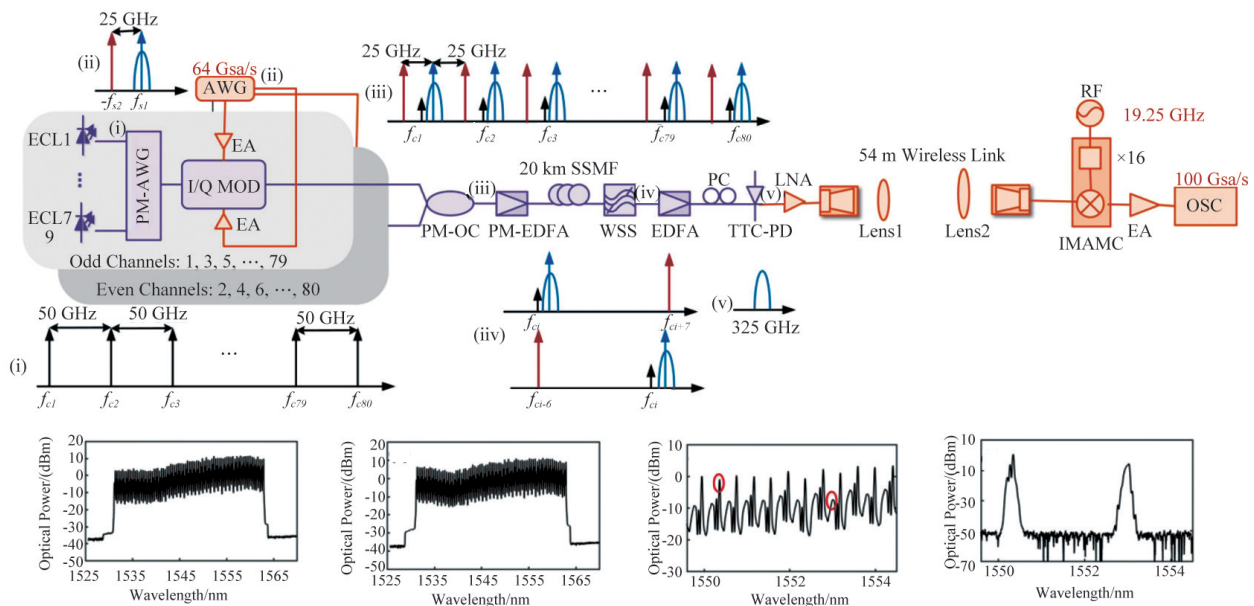


图41 超大容量光载太赫兹传输的原理及实验装置

在大容量太赫兹通信传输方面,团队通过采用多维复用、高阶QAM(指将信号加载到2个正交的载波上)调制、电/光多载波调制、多输入多输出(MIMO)传输等多种复用技术来获得更大的容量,并通过实验实现了基于波分复用架构的超大容量光载太赫兹信号传输,在50 GHz间距的80信道波分复用系统中,实现了总净速度5.12 Tbit/s的光载太赫兹波信号20 km有线和54 m无线长距离传输,

创造了光载太赫兹的最大传输容量纪录,利用光子辅助进行太赫兹无线传输的装置如图42^[41]所示。

在长距离太赫兹通信传输方面,团队利用商用单行载流子光电二极管、太赫兹低噪声放大器、一对聚四氟乙烯透镜、概率整形技术和先进的数字信号处理技术,在距离分别为104、200和400 m的情况下实现速率为124.8、56和32 Gbit/s的太赫兹信号传输。

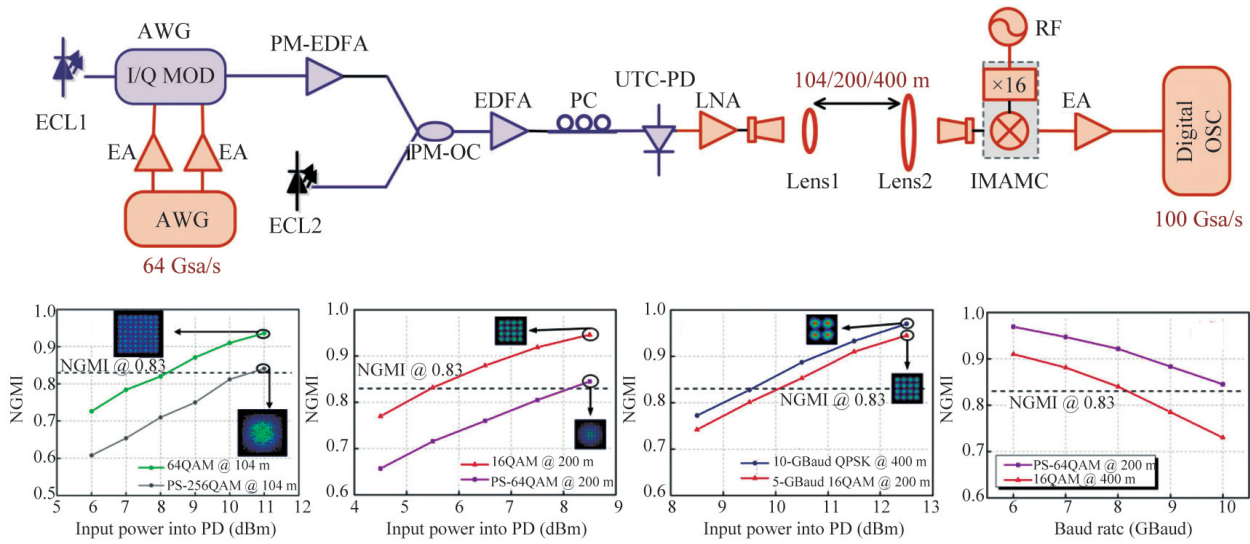


图42 光子辅助 104、200、400 m 太赫兹无线传输装置和实验结果

在太赫兹通信实时传输方面,团队提出实时 2×2 MIMO 太赫兹系统架构方案,并结合光-太赫兹(O/T)、太赫兹-光(T/O)和商用CFP2-DOC模块,首次实现了光子辅助的(360~430) GHz 太赫兹(100~200) Gbps 实时无线传输通信实验系统,面向 6G 实现了单波长净速率为 103.125 Gbps、双波长净速率为 206.25 Gbps 的太赫兹实时无线传输,创造出目前世界上公开报道的太赫兹实时无线通信的最高实时传输记录(图43)^[41]。

光子辅助太赫兹技术已经被广泛应用于太赫兹波段无线传输实验中,而目前基于正交频分复用

(OFDM)技术的光子辅助太赫兹通信仅限于低阶调制和短距离通信,这也成为许多研究人员试图解决的基本问题。2023年4月,复旦大学余建军、南京紫金山实验室和东南大学朱敏以及北京邮电大学余建国组成的联合团队,首次成功提出并演示了基于 2-bit 动态源管理(DSM)技术的光子太赫兹通信系统,结合 OFDM 和脉冲密度调制(PDM)技术,可在 320 GHz 频段实现 65536-QAM 信号的传输(图44^[41])。在经过 20 km 标准单模光纤(SSMF)和长度为 3 m 的 2×2 MIMO 无线链路传输后,净速率可达 60.5 Gbit/s, 低于误差矢量幅度(EVM)阈值

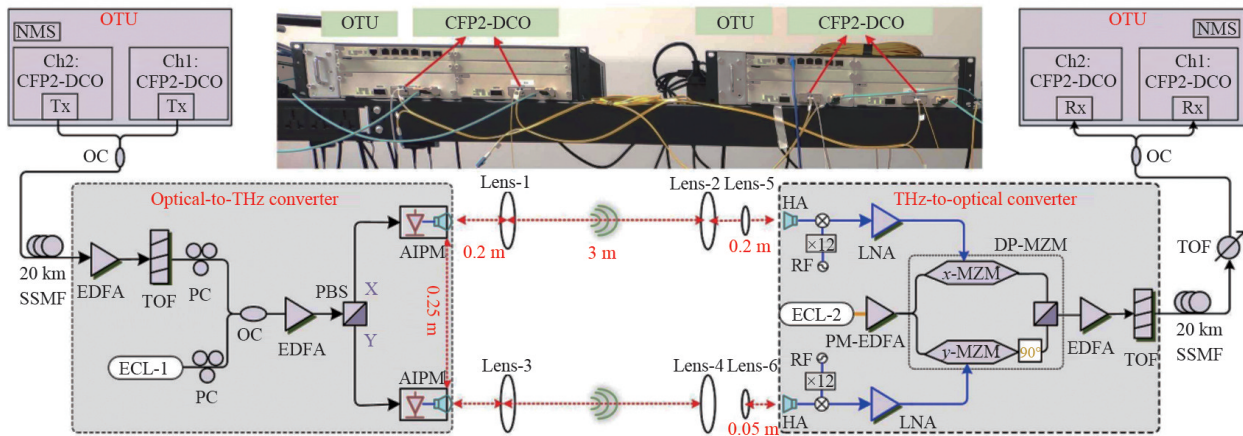


图43 100/200 G 实时 2×2 MIMO 太赫兹系统架构方案和实验装置

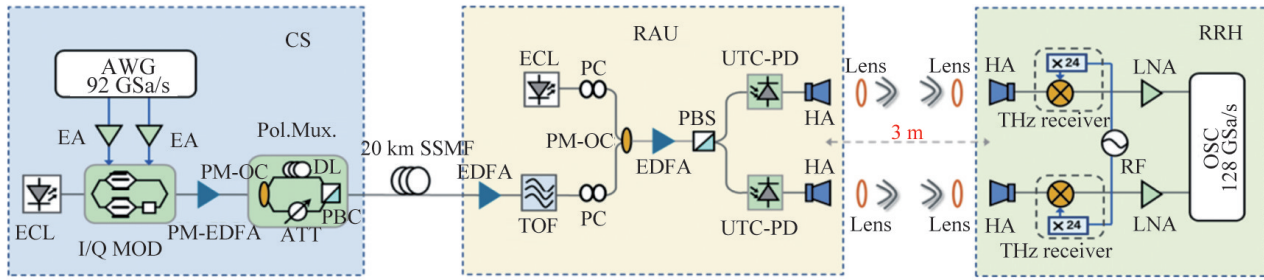


图44 2×2 MIMO光子辅助太赫兹波无线传输系统的原理及实验装置

0.34%，信噪比高达52.6 dB。另外，该实验装置基于delta-sigma调制技术的MIMO太赫兹通信系统，将多位高阶信号序列数字化成低阶符号，可以有效降低非线性效应带来的影响，突出潜在量化信噪比增益的优势；MIMO也为太赫兹通信技术提供巨大的空间分集，提升频谱效率。据了解，这是在太赫兹传输中DSM可实现的最高调制阶数，为下一代移动通信系统提供了一个高速且高保真的对抗非线性和频率选择性衰落的解决方案。

12 结论

美国光学学会《Optics & Photonics News》从115项光学光电子进展中推出了30项热点^[43]。中国科学院上海光学精密机械研究所中国激光杂志社也推出了2023年中国光学十大进展评选，参选论文有220多篇，涉及到光物理、光学材料与结构、光源、光技术、应用光学、光子学交叉领域6大类^[44]。本文回顾了2023年光学领域的11个重要研究方向，在过去的一年里，这些领域的很多方面都取得了令人瞩目的成果，而这些成果的发展，在未来将会与人类的日常生活息息相关，也许会改变整个人类的生活方式，影响每个人的衣食住行。

参考文献(References)

- [1] Pandey A, Min J, Malhotra Y, et al. Strain-engineered N-polar InGaN nanowires: Towards high-efficiency red LEDs on the micrometer scale[J]. *Photonics Research*, 2022, 10(12): 2809–2815.
- [2] Liu T Y, Ran P, Su Y R, et al. Solution-processed halide perovskite microcavity exciton-polariton light-emitting diodes working at room temperature[J]. *Photonics Research*, 2023, 11(10): 1791.
- [3] Liu J Y, Wang Y X, Zhang Z, et al. Insight into neodymium clusters and spectroscopic properties in CaF₂ single crystals[J]. *Optical Materials Express*, 2023, 13(8): 2288.
- [4] Zhan J H, Zhang Y, Hsu W L, et al. Design and implementation of a Si₃N₄ three-stigmatic-point arrayed waveguide grating with a resolving power over 17000[J]. *Optics Express*, 2023, 31(4): 6389.
- [5] Jiang M H, Xue W Y, He Q, et al. Quantum storage of entangled photons at telecom wavelengths in a crystal[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 6995.
- [6] Li Y Q, Du H Y, Wang Y F, et al. Observation of frustrated chiral dynamics in an interacting triangular flux ladder[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 7560.
- [7] Burd S C, Penttinen J P, Hou P Y, et al. VECSEL systems for quantum information processing with trapped beryllium ions[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2023, 40(4): 773–781.
- [8] Harrison S L, Nalitov A, Lagoudakis P G, et al. Polariton vortex Chern insulator[J]. *Optical Materials Express*, 2023, 13(9): 2550–2562.
- [9] Ding W Y, Zhao L J, Chen M J, et al. Determination of stress waves and their effect on the damage extension induced by surface defects of KDP crystals under intense laser irradiation[J]. *Optica*, 2023, 10(6): 671–681.
- [10] Liu T Q, Tao P P, Wang X L, et al. Ultrahigh-printing-speed photoresists for additive manufacturing[J]. *Nature Nanotechnology*, 2024, 19: 51–57.
- [11] Calpe R, Halder A, Luo M L, et al. Partially coherent beam generation with metasurfaces[J]. *Photonics Research*, 2023, 11(9): 1535–1541.

- [12] Qiao Z, Cao R J, Liao S Y, et al. Multifunctional and tunable ultra-broadband linear to circle polarization converter based on VO₂-integrated material[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2023, 40(2): 388-397.
- [13] Chen Y H, Moses J, Wise F. Femtosecond long-wave-infrared generation in hydrogen-filled hollow-core fiber[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2023, 40(4): 796-806.
- [14] Liu P Q, Miao X L, Datta S. Recent advances in liquid metal photonics: Technologies and applications[J]. *Optical Materials Express*, 2023, 13(3): 699-727.
- [15] Zhang Y T, Li H, Ding T T, et al. Scalable, fiber-compatible lithium-niobate-on-insulator micro-waveguides for efficient nonlinear photonics[J]. *Optica*, 2023, 10(6): 688-693.
- [16] Han D Y, Wang J, Agosta L, et al. Tautomeric mixture coordination enables efficient lead-free perovskite LEDs[J]. *Nature*, 2023, 622: 493-498.
- [17] Jin R, Huang L J, Zhou C B, et al. Toroidal dipole BIC-driven highly robust perfect absorption with a graphene-loaded metasurface[J]. *Nano Letters*, 2023, 23(19): 9105-9113.
- [18] Zhang J, Frank C, Byers P, et al. Dynamics of single cell femtosecond laser printing[J]. *Biomedical Optics Express*, 2023, 14(5): 2276-2292.
- [19] Bedggood P, Ding Y F, Metha A. Measuring red blood cell shape in the human retina[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(7): 1554-1557.
- [20] Pu Y, Wu B L, Mo H D, et al. Stokes shift spectroscopy and machine learning for label-free human prostate cancer detection[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(4): 936-939.
- [21] Zhao C Z, Chen S Y, Zhang L F, et al. Miniature three-photon microscopy maximized for scattered fluorescence collection[J]. *Nature Methods*, 2023, 20: 617-622.
- [22] Jiao B J, Chen F Y, Liu Y C, et al. Acousto-optic scanning spatial-switching multiphoton lithography[J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2023: 035008.
- [23] Kini Manjeshwar S, Ciers A, Monsel J, et al. Integrated microcavity optomechanics with a suspended photonic crystal mirror above a distributed Bragg reflector[J]. *Optics Express*, 2023, 31(19): 30212.
- [24] Rabien S. Adaptive parabolic membrane mirrors for large deployable space telescopes[J]. *Applied Optics*, 2023, 62(11): 2835.
- [25] Ebner A, Brunner M, Hingerl K, et al. Diffraction-limited hyperspectral mid-infrared micro-ellipsometry[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(9): 2293.
- [26] Shao J, Luo Y H, Chen J Y, et al. High-sensitivity optical-fiber magnetic sensor based on diamond and magnetic flux concentrators[J]. *Optics Express*, 2023, 31(9): 14685.
- [27] Munir A, Abbas M, Ziauddin U, et al. Controllable magnon-induced transparency in a ferromagnetic material via cross- and self-Kerr effects[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2023, 40(7): 1756.
- [28] Fang J N, Huang K, Wu E, et al. Mid-infrared single-photon 3D imaging[J]. *Light: Science & Applications*, 2023, 12: 144.
- [29] Wang Z, Wang Q, Zhang H, et al. Doubly resonant sub-ppt photoacoustic gas detection with eight decades dynamic range[J]. *Photoacoustics*, 2022, 27: 100387.
- [30] Fu P C, Cao W L, Chen T R, et al. Super-resolution imaging of non-fluorescent molecules by photothermal relaxation localization microscopy[J]. *Nature Photonics*, 2023, 17: 330-337.
- [31] Castro-Marin P, Johnson K, Farrell C, et al. Fiber-delivered heterodyne spectroscopy with a mid-infrared frequency comb[J]. *Optics Express*, 2023, 31(21): 34064.
- [32] Han Y X, Li Z Y, Zhang Y B, et al. 400 nm ultra-broadband gratings for near-single-cycle 100 Petawatt lasers[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 3632.
- [33] Peng H, Huang T W, Jiang K, et al. Coherent subcycle optical shock from a superluminal plasma wake[J]. *Physical Review Letters*, 2023, 131(14): 145003.
- [34] Zhu X L, Liu W Y, Chen M, et al. Efficient generation of collimated multi-GeV gamma-rays along solid surfaces[J]. *Optica*, 2023, 10(1): 118.
- [35] Chen Y T, Nazhamaiti M, Xu H, et al. All-analog photoelectronic chip for high-speed vision tasks[J]. *Nature*, 2023, 623(7985): 48-57.
- [36] Lu D Y, Zhu G S, Li X, et al. Dynamic monitoring of oscillatory enzyme activity of individual live bacteria via nanoplasmonic optical antennas[J]. *Nature Photonics*, 2023, 17: 904-911.
- [37] He B, Zhang Y X, Zhao L, et al. Robotic-OCT guided inspection and microsurgery of monolithic storage devices[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 5701.
- [38] Liang Y Z, Fu W B, Li Q, et al. Optical-resolution functional gastrointestinal photoacoustic endoscopy based on

- optical heterodyne detection of ultrasound[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 7604.
- [39] Güzel A H, Beyazian J, Chakravarthula P, et al. Prescription correction in virtual reality headsets through perceptual guidance[J]. *Biomedical Optics Express*, 2022, doi: 10.1364/boe.485776.
- [40] Cui Y Q, Xu Y F, Han D H, et al. Hidden-information extraction from layered structures through terahertz imaging down to ultralow SNR[J]. *Science Advances*, 2023, 9 (40): eadg8435.
- [41] Yu J J, Wang Y Y, Ding J J, et al. Broadband photon-assisted terahertz communication and sensing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2023, 41(11): 3332–3349.
- [42] Shi J T, Yu J J, Zhang J, et al. 65, 536-QAM OFDM signal transmission over a fiber-THz system at 320 GHz with delta-sigma modulation[J]. *Optics Letters*, 2023, 48 (8): 2098–2101.
- [43] *Optics in 2023*[EB/OL]. (2023-12-01)[2023-12-01]. https://www.opticaopn.org/home/articles/volume_34/december_2023/features/optics_in_2023.
- [44] 中国光学十大进展 2023 年候选成果推荐[EB/OL]. (2023-11-29) [2023-12-01]. <http://www.opticsjournal.net/CL/ZGGX?type=Intj>.

Major optical advances in 2023

XIE Xinglong^{1,2}, LI Xinran², TONG Miaoyan², ZHU Jianqiang^{1,2*}

1. National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
2. Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract This paper reviews the major optical advances in 2023 by retrospectively reviewing progress made in the fields of optical technology research, such as photophysics, optical material and structures, bio-medical optics, light-matter interaction, optoelectronics, optical design and instrumentation, optical information processing, light source and high field laser, interdisciplinary photonics, visual color, terahertz optics. It may have a great impact on human existence and life style in the future.

Keywords photophysics; bio-medical optics; optoelectronics ●



(责任编辑 傅雪)