

# 2020年光学热点回眸

朱海东, 谢兴龙, 沈卫星, 朱健强\*

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

**摘要** 回顾了光学领域在2020年的重大进展, 盘点了微纳光学、强激光与超快光学、超分辨与成像技术、量子计算与光学通信、光束传输、生物光子学、量子光学、紫外光源、光束整形与探测、等离子体光学、人工智能、光伏光电、涡旋光和孤子光学等14个光学技术研究领域的重大进展, 探讨了其在未来可能会对人类生存及生活方式产生巨大影响。

**关键词** 光学; 2020年研究热点; 光学进展

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。光学研究从微波、红外线、可见光、紫外线直到X射线和 $\gamma$ 射线的宽广波段范围内电磁辐射的产生、传播、接收和显示, 以及与物质的相互作用, 是物理学的一个重要组成部分。现代光学伴随激光器的诞生而产生, 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, 例如激光化学、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。

2020年12月17日, 嫦娥五号返回器携带从月球表面采集的月壤样品在内蒙古四子王旗预定区域成功着陆, 圆了中华民族自强不息的飞天揽月之梦。嫦娥五号任务作为中国复杂度最高、技术跨度最大的航天系统工程, 首次实现了中国地外天体采样返回(图1)<sup>[1]</sup>。这是发挥新型举国体制优势攻坚克难取得的又一重大成就, 标志着中国航天向前迈出的一大步, 将为深化人类对月球成因和太阳系演化历史的科学认知作出贡献。其中光学载荷为其

收稿日期: 2020-12-30; 修回日期: 2021-01-05

基金项目: 中国科学院国际合作项目(29201631251100101)

作者简介: 朱海东, 副研究员, 研究方向为超短超强激光技术及光束质量控制, 电子信箱: hdzhu@siom.ac.cn; 谢兴龙(共同第一作者), 研究员, 研究方向为超短脉冲激光技术, 电子信箱: xiexl329@mail.shenc.ac.cn; 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@mail.shenc.ac.cn

引用格式: 朱海东, 谢兴龙, 沈卫星, 等. 2020年光学热点回眸[J]. 科技导报, 2021, 39(1): 17-43; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2021.01.002

成功提供了科技支撑。2020年10月16日,中共中央政治局就量子科技研究和应用前景举行第24次集体学习。中国信息通信研究院编写了《量子信息技术发展与应用研究报告(2020年)》<sup>[2]</sup>。习近平总书记发表重要讲话,为当前和今后一个时期中国量子科技发展做出重要战略谋划和系统布局。以量子计算、量子通信和量子测量为代表的量子信息技术作为量子科技领域的重要组成部分,将为推动基础科学研究探索、信息通信技术演进和数字经济产业发展注入新动能。量子信息技术已经成为全球各主要国家在科技领域关注的焦点之一,规划布局和投资支持力度进一步加大,量子计算、量子通信和量子测量三大领域科研探索和技术创新保持活跃,代表性研究成果和应用探索进展亮点纷呈,在前沿科技领域和信息通信行业受到广泛关注和讨论。2020年12月,潘建伟、陆朝阳等科学家组成的团队成功构建76个光子的量子计算原型机——九章。九章处理“高斯玻色取样”任务的速度比目前最快的超级计算机快100万亿倍,与2019年9月美国谷歌公司研制的53个量子比特计算机“悬铃木”相比,计算速度快100亿倍,实现了量子霸权的又一里程碑<sup>[3-4]</sup>(图2<sup>[4]</sup>)。

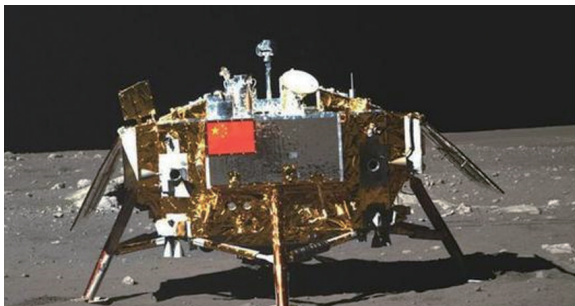


图1 嫦娥五号登月采集月壤



图2 九章量子计算优越性(量子霸权)

2020年,上述2项科技成果对于科学领域无疑是振奋人心的和催人奋进的,但光学与电子新进展和成果还有很多,下面将从微纳光学、强激光与超快光学、超分辨与成像技术、量子计算与光学通信、光束传输、生物光子学、量子光学、紫外光源、光束整形与探测、等离子体光学、人工智能、光伏光电、涡旋光和孤子光学等方面分别介绍。

## 1 微纳光学

微纳光学<sup>[5-7]</sup>指利用微结构材料作为光学元件的光学分支,它的发展得益于20世纪80年代纳米技术的诞生,由于其对航空、航天、军事、生命科学和健康保健、汽车工业、仿生机器人、家用电器等领域具有巨大的应用前景,一经问世就成为了科技界的热门研究领域之一。微纳光学涉及的尺度范畴为原子、分子量级,随着生长技术、精密加工技术的进步,其微结构的尺度已经下降到纳米量级,从而包含了许许多多新的光学特性,这些“新”的光学规律是宏观上无法体现的,这就要求必须对其微观光学特征进行研究,直接催生了微纳光学这一领域的诞生。微纳光学的研究热度不断上升,2020年持续涌现多项创新成果。

由曲面或物体反射或折射的光线的焦散包络线,定义了一个集中强度的边界。在它们美丽的外表下,焦散线表现出强度奇异性,尽管焦散线具有诱人的传播特性,包括弯曲光、加速光和超聚焦光,但很少有人为地生成焦散线或将其作为结构光制造的基本实体。2020年,研究人员开发了一种设计、定制和制造任意横向形状的结构焦散光的通用方法,使用智能光束设计,将锐利的焦散边界高强度特性与传播不变性相结合,演示了各种传播不变形状,如直线、抛物线或天体线,但也有复杂的形状,如字母(图3)<sup>[8]</sup>。这些强度结构在微扰下具有很强的稳定性,这使得它们在高维量子通信中具有很强的吸引力。研究者还将焦散光从一小部分自然产生的光束推广到一整套定制的、传播不变的结构,其强度集中在任何期望的边缘曲线附近,可满足物理研究领域定制高强度分布的需要,包括连

续波或脉冲光、电子束、声波或弹性波等,并为具有复杂形状且可控能量沉积的先进、高分辨率纳米加工工艺提供了有希望的应用前景。

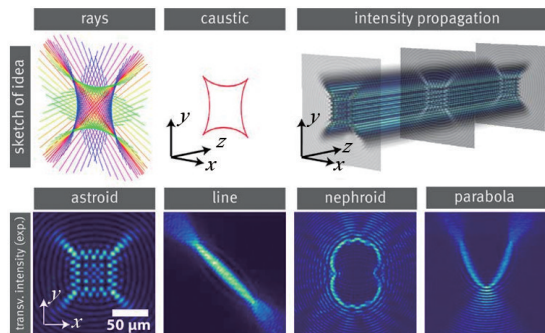


图3 聚焦工程设计概念

颜色是人类视觉感知的主要属性,它是光与原子和分子离散能量状态共振相互作用的结果。它在成像和显示技术以及艺术中都起着至关重要的作用。研究人员展示了在透射光中调节色彩色调和亮度的能力,采用一种特殊设计的超微表面,足以创造并再现出一幅著名艺术品的“纳米画”<sup>[9]</sup>。他们通过纳米绘画展示了高效而又平滑地控制整个可见光谱范围内结构颜色亮度的能力,使用低损耗介质超表面技术,复制了荷兰艺术家约翰内斯·弗米尔(Johannes Vermeer)1665年的杰作《佩戴珍珠耳环女士》(图4<sup>[9]</sup>)。它的表面包括一系列空间尺寸可变的二氧化钛纳米柱,它们决定了输出颜色的色调,而旋转方向决定了它的亮度。纳米柱被设计成单独作为窄带半波片,能够旋转线偏振入射光的偏振,仅适用于目标滤色红、绿、蓝。在白光照明和正交偏振器-分析器定向下,元表面生成的图像显示了这幅画逼真的、高分辨率的复制品,展示了其标志性的主题,包括戴着蓝色头巾、金色夹克、明亮的白领和发光的珍珠耳环。

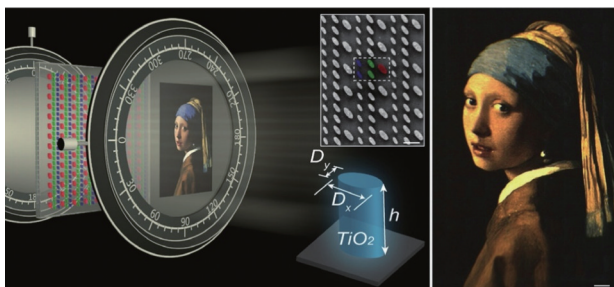


图4 生成全彩色纳米技术绘画

光子结构为许多动物提供了生动的色彩,同时也充当了视觉的反射器和滤光片。其中一个反射镜是位于眼睛光感受器后面的绒毡层。那些在第一次通过视网膜时没有被视网膜吸收的光子会被绒毡层反射回来,以获得第二次吸收的机会,从而增加眼睛的灵敏度。最近研究表明,在一些十足甲壳类动物中,绒毡层由直径约为300 nm的球形纳米颗粒组成<sup>[10]</sup>。出于对双折射在这些反射结构性能中的作用的好奇,科学家计算了单个异黄嘌呤球晶的后向散射特性(图5<sup>[10]</sup>)。结果发现,双折射导致可见光波长的后向散射强度增加了2倍,特别是在与海洋甲壳动物视觉最相关的光谱蓝色区域。在这种粒子以面为中心的立方体组合中,双折射会导致蓝波长的宽波段高反射率,其跨度约为50 nm。对于厚度仅为几微米的结构,高反射率是由于光子带结构在相关传播方向上的间隙造成的。每个球晶的旋转对称性确保单个球晶取向不会影响组件整体的光学特性。每个球晶的直径和壳层厚度似乎都经过了进化优化,以在光谱的蓝色区域作为反射镜获得最佳性能,研究证明了组装纳米球晶的实用性,并推动了在超薄反射光子结构设计中利用双折射空间变化的进一步研究。

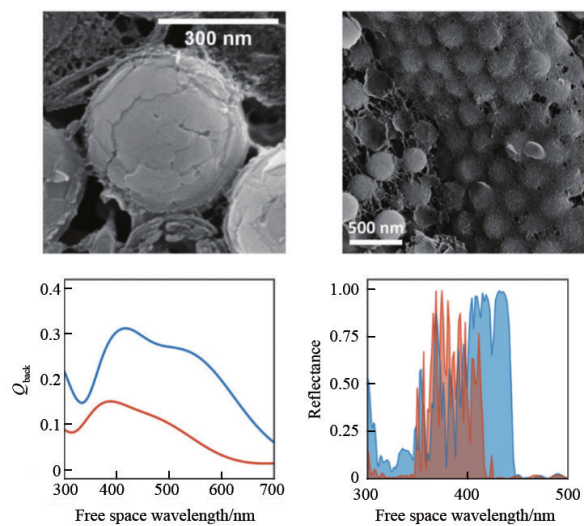


图5 由结晶异黄嘌呤板制成的球状壳和短程有序的异黄嘌呤球晶密集填充组装及实验结果

气候变化、人口增长和废水管理不力的综合影响,引发了全球水危机。废水循环利用可能是环境

可行解决方案的一部分。2020年,科研人员向这一目标迈进,推出了一种用于水卫生的超级吸芯、超吸光(SWSA)太阳能可跟踪面板(图6)<sup>[11]</sup>。在开发的系统中,一块闪亮的黑色铝片,通过飞秒( $10^{-15}$ s)激光加工进行超芯处理,得到的SWSA表面平均吸收率约为97%,水在垂直安装的表面上高速向上流动,展示了太阳能热产生水蒸汽的高效,其蒸发率超过了理想装置在100%效率下的蒸发率。

SWSA表面有一系列平行于表面的开放式微柱阵列,支持以任何角度安装面板上的高速率水传输。因此,SWSA表面可与商业可跟踪太阳能热技术集成,以增加有效蒸汽产生的总可用太阳通量。试验表明,基于SWSA的装置可用于从一系列污染物中净化水,净化水中的污染物水平远低于世界卫生组织(WHO)和美国国家环境保护局(EPA)关于安全饮用水的标准。

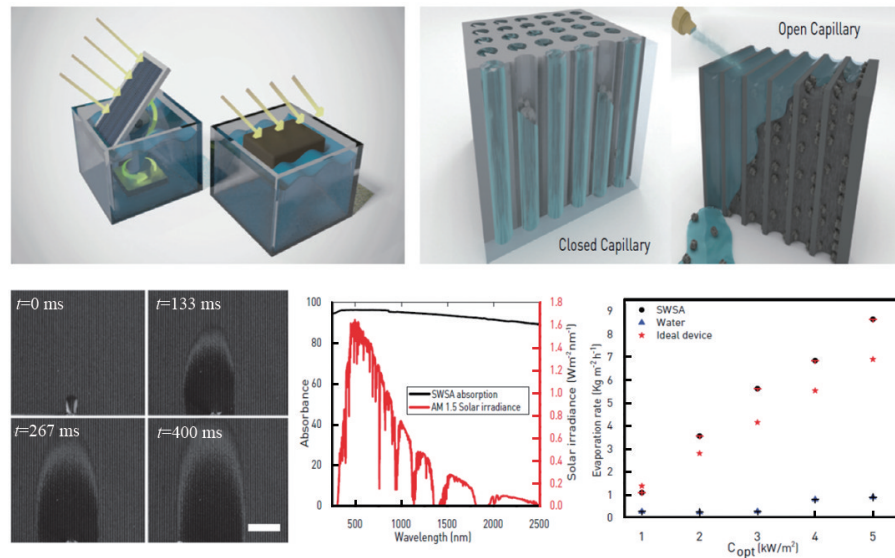


图6 太阳能跟踪式平板式蒸发器和封闭型开放式微柱结构的对比

研究人员首次将轨道角动量(OAM)维度用作全息过程的信息载体,提出了超宽带轨道角动量全息理论(图7)<sup>[12]</sup>。试验中实现了高阶轨道角动量的操控,由此大大提升了信息光学领域的安全性能。OAM全息编码技术可以增强光学衍射神经网络的信息处理能力,为下一代大容量人工智能光学芯片的到来提供理论支撑。研究创造性地将布拉格衍射定律延伸到了傅里叶空间。在傅里叶空间中,具有不同螺旋阶数的OAM光束表现出不同的空间频率分布,螺旋阶数越大则空间频率越大。研究团队利用这一特性,根据入射OAM光束的空间频率分布设计出相应的采样阵列,对数字图像进行重新编码,由此计算出能够保存螺旋相位的全息图。

2020年,研究人员研制出新型高性能单光子发射器,实现了在室温条件下产生带有自旋角动量(spin angular momentum, SAM)编码的单光子束

流。该单光子发射器无需传统的四分之一波片,偏振片即可在微纳尺寸直接实现偏振态的调控,有利于促进量子发射器在集成光学系统、纳米光学芯片中的应用。单光子发射器是量子通信、量子计算等领域中的核心器件。然而常见的量子发射器(如量子点、单分子等)自身通常具有低发射率、非定向辐射、偏振态不稳定等特点,通常难以直接在各项量子技术中使用。该研究在量子发射器周围引入超表面结构作为微纳天线,将量子发射器的辐射耦合为表面等离子激元,继而通过精准地设计周向纳米结构的尺寸来调节其不同方向散射场的相位,当任何方位两垂直方向上散射的电磁场均具有 $90^\circ$ 相位差时即具备了实现圆偏振态的条件(图8)<sup>[13]</sup>。

研究的设计方法及所设计制备的带有圆偏振态的单光子发射器为在量子通信、量子计算和集成光学等领域的应用提供了新的可能,同时由于手性

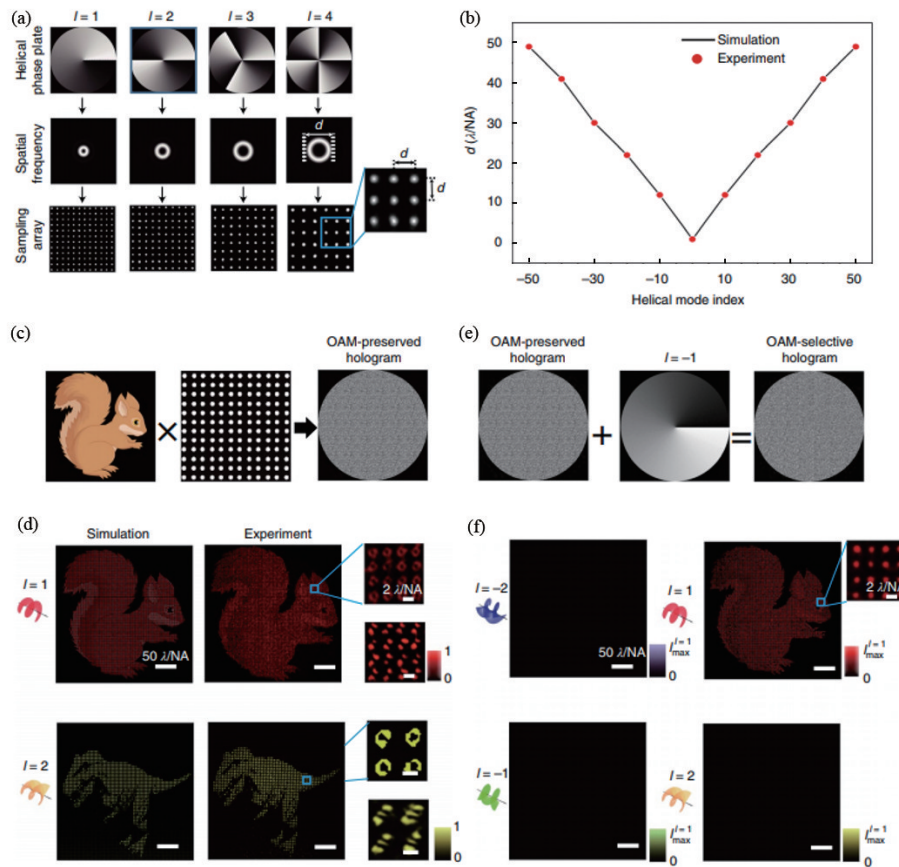


图7 OAM全息理论示意

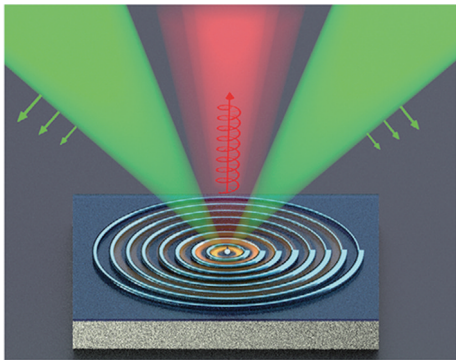


图8 圆偏振态单光子发射器示意

的实现无需强磁场和低温环境,为手性量子光学的研究提供了新的思路。

在分子和生物传感、食品检测和有害物质识别等领域,中红外和太赫兹区域的光谱至关重要,因为分子共振存在于该范围的光谱。检测分子特征需要很大的场强,例如可以通过将光场紧密聚焦到小尺寸来实现。然而,紧密聚焦却受到衍射极限的

限制。研究者引入了一种新的方法来为全球定位系统(GPS)创建纳米级的空腔(图9)<sup>[4]</sup>。在石墨烯片上沉积了大小约为75 nm的随机定位银立方体,单个纳米立方体的性质决定了光学响应,每个纳米立方体充当GPS一个单独的空腔,将它们压缩到石墨烯和纳米立方体之间的纳米级体积。尽管中红外光的微米级波长和纳米级立方体之间存在很大的不匹配,但GPS的激发依然非常有效,因为空腔

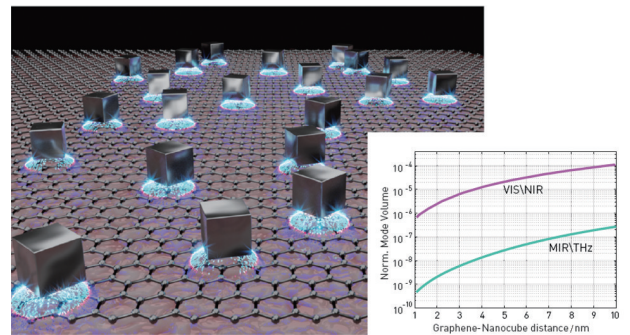


图9 用于中红外约束的纳米级微腔

作为GPS纳米天线,与红外辐射有效地相互作用,而GPS作为纳米天线的磁共振模式被激发出来。新的方法能够将中红外辐射压缩到超小模式体积,从而大大增强中红外辐射,可更好地检测分子材料,并提供一种更有意义的传感技术。

## 2 强激光与超快光学

中国工程物理研究院激光聚变研究中心(LFRC)、北京应用物理与计算数学研究所(IAP-CM)、国防科技大学、北京大学、深圳技术大学以及中国科学院上海光学精密机械研究所联合的激光聚变研究团队完成的国际首轮间接驱动高增益激光聚变快点火集成实验研究(图10)<sup>[15]</sup>。该研究团队在神光II升级装置上提高相对论电子束品质和能量沉积效率与中子产额方面取得重要进展。惯性约束聚变(ICF)是利用高功率激光等驱动源实现聚变点火进而获得较大能量增益的一种受控聚变实现方式,因其有望解决全球能源问题而备受瞩目。快点火研究作为实现高增益聚变点火的一种可能技术途径,其物理是ICF领域研究的热点之一。

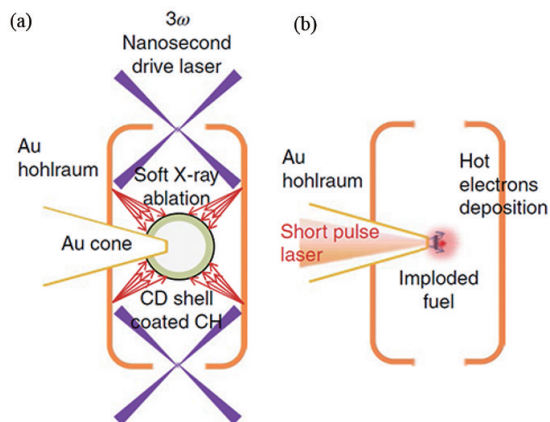


图10 间接驱动快点火方案示意

不同于目前在美国国家点火装置(NIF)上采用的中心点火方式,快点火将实现热核聚变点火过程分为内爆预压缩和快速等容加热2个阶段。首先通过激光直接烧蚀(直接驱动)或者激光转换为X光对燃料进行预压缩;然后通过一束或多束皮秒激光产生相对论电子束作为能量载体,将预压缩燃料迅

速加热至点火温度从而实现热核聚变点火。相比中心点火方式,快点火降低了对总激光能量的需求,同时理论上也可提供更高的能量增益。然而,近年来由于在靶丸预压缩状态控制和相对论电子束控制方面遇到困难,快点火研究进展较缓慢。为了克服困难,该聚变研究团队在神光II升级装置上完成了国际首轮间接驱动快点火集成实验,验证了间接驱动快点火设计方案的科学可行性(图11)<sup>[15]</sup>。

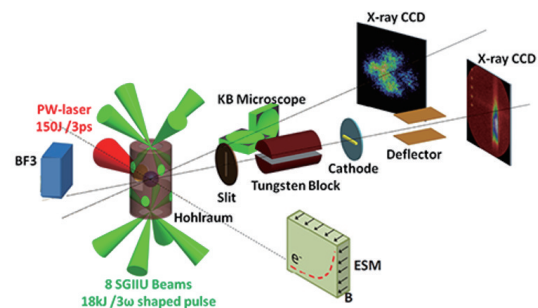


图11 神光II升级装置上间接驱动快点火实验装配

皮秒激光束至靶丸的能量耦合效率达到了9.4%,对预压缩靶丸有显著的加热作用,内爆中子产额增加了280倍。该研究成果对理解快点火物理有重要意义。神光II升级装置上间接驱动快点火实验的成果表明,过去直接驱动快点火所面临的一些困难可以在间接驱动中得到改善甚至解决,而间接驱动也是目前国际上超大型惯性约束聚变装置如美国NIF、中国神光系列装置等所采用的驱动方式,因此这些成果有望在这些超大型装置上得到应用。

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与上海激光等离子体研究所、欧盟极端光学基础设置阿秒光脉冲源研究所(ELI-ALPS)2家研究团队开展合作,分别在神光II 5PW装置上进行了两轮飞秒拍瓦激光与大能量纳秒激光组合打靶物理实验,激光条件满足物理实验要求,物理结果达到预期实验效果,装置运行能力得到了中外研究团队的高度认可(图12)<sup>[16]</sup>。实验准备期间,神光II装置与神光II 5PW装置经升级改造后,具备百焦耳级纳秒二倍频长脉冲激光与拍瓦级飞秒短脉冲激光共同打靶能力,可实现纳秒激光与飞秒激光的精密同步测量与控制,并具备长短

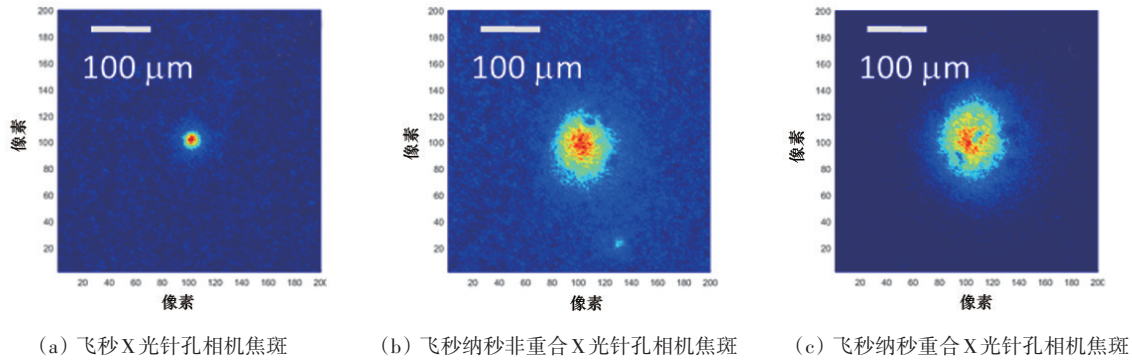


图 12 SG-II 5PW 装置激光聚焦打靶性能

脉冲任意延迟可调功能, 提供一种飞秒+纳秒组合打靶的装置运行新模式, 为物理用户提供更多功能的多样化物理实验条件。物理实验期间, 激光装置运行输出稳定, 纳秒二倍频激光到靶能量 200 J, 脉宽 1 ns, X 光针孔相机实测焦斑小于 200  $\mu\text{m}$ , 飞秒拍瓦激光到靶能量 30 J, 脉宽 30 fs, X 光针孔相机实测焦斑小于 20  $\mu\text{m}$ 。ELI-ALPS 研究团队开展了相对论飞秒激光探针诊断纳秒激光修型的等离子体演化实验研究, 上海激光等离子体研究所研究团队开展了强激光驱动质子束流的品质优化实验研究, 合作研究团队进行多项质子束源优化方案探索, 获得比以往同驱动能力条件下更高能量、更强束流强度的高品质质子束探针源。神光 II 5PW 装置提升脉冲峰值功率、聚焦功率密度、脉冲信噪比等激光输出性能、扩展多样化打靶功能, 激光装置运行能力与物理参数诊断能力得到了国内外用户和专家的一致认可。

透射电镜与纳米光子学领域结合, 研究人员利用透射电子显微镜中的电子能量损失谱 (STEM-EELS) 直接探测到超高波长压缩的单层六方氮化硼 (h-BN) 声子极化激元, 将光波长压缩为小于原来的 1/487, 为超表面设计和超强光与物质相互作用提供了重要的研究基础 (图 13)<sup>[17]</sup>。

采用 STEM-EELS, 研究人员直接在实验中观察到了具有超高的光场束缚 (超过 487) 和超慢的群速度 (大约  $10^{-5}c$ ) 的单层 h-BN 声子极化激元。这是因为电子激发的动量补偿 ( $>10^8 \text{ cm}^{-1}$ ) 比光学方法 ( $\sim 10^5 \text{ cm}^{-1}$ ) 提高约 3 个数量级, 极大地提高了激发效率, 而电子束的高空间分辨 ( $<2 \text{ nm}$ ) 和高能

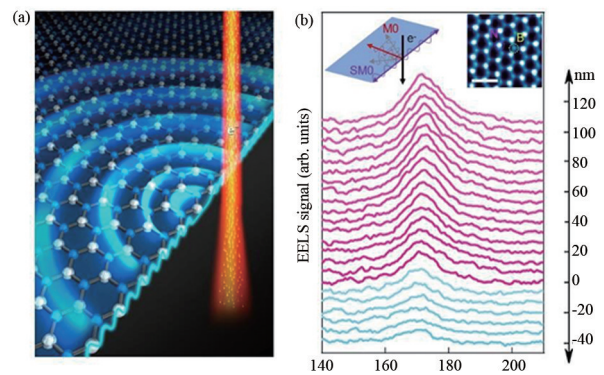


图 13 电子激发单层六方氮化硼 (h-BN) 声子极化激元示意

量分辨 ( $\sim 7.5 \text{ meV}$ ) 使得极化波的定量研究成为可能。该方法还探测到超薄 h-BN 片 (3、4、7 和 10 nm) 中几乎整个上剩余射线带中的声子极化激元。这非同寻常的光场束缚和超慢的群速度的声子极化激元可以有效增强光与物质相互作用, 在光子集成回路和传感等方面有重要的应用。

研究人员在钙钛矿量子点可控发光领域取得突破 (图 14)<sup>[18]</sup>。利用飞秒激光辐照和热处理在玻璃内部实现了钙钛矿量子点任意形状的可控生长,

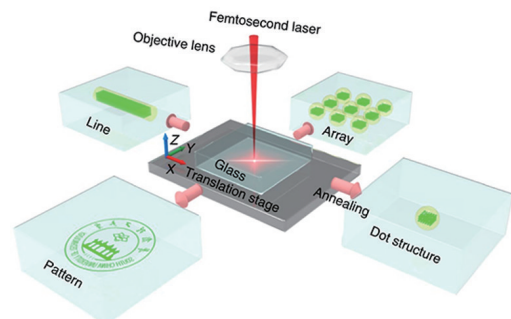


图 14 飞秒激光直写钙钛矿量子点示意

并实现了利用飞秒激光擦除和热处理的再次析出生长,实现了空间选择性钙钛矿量子点的可逆发光,拓展了钙钛矿量子点在三维显示、信息防伪以及可擦重写超高密度信息存储领域的潜在应用。研究团队报道了一种利用飞秒激光和热处理在透明介质中可逆操控钙钛矿量子点生长的方法。研究人员首先制备含有钙钛矿前驱体元素的透明玻璃,然后将飞秒激光聚焦于玻璃内部,飞秒激光极高的峰值功率使激光焦点附近瞬间产生高温,促使原子迁移形成晶核。再通过后续热处理,激光辐照区域的晶核长大形成 CsPbBr<sub>3</sub> 量子点,而非激光辐照区域保持不变。在激发光照射下,激光辐照区域获得强烈的绿光发射。得益于具有无规则网络结构的透明玻璃介质的保护,钙钛矿量子点的抗湿和抗热能力大大提高。

2020年,研究人员利用超快飞秒激光和单个分子内部相干动力学探测技术,首次实验观测到了单分子体系。双缝衍射实验被誉为最经典的单粒子量子干涉物理实验。在双缝实验中,每次最多只有1个电子或光子到达双缝,单光子或单电子以叠加态的形式“同时”穿过2个狭缝后,在观测屏幕上呈现出独特的空间干涉条纹。类似地,在单分子回声工作中,在一束飞秒激光脉冲的作用下,激发出多个振动波函数相干叠加构成的振动波包,虽然振动波包由于色散快速退相,但研究人员利用了第2束飞秒激光脉冲实现振动波包的重建,即分子振动回声。在探测光的作用下,通过单个分子内部相干动力学探测分子解离产生的离子信号,扫描探测光延时即可在时间域上获得与双缝衍射实验相似的分佈结构。与传统的回声相比,振动波包回声发生在单个孤立分子内,表现出强烈的量子效应(图15)<sup>[19]</sup>。分子振动波包回声在其他体系内具有普适性,随着探测技术的发展,研究人员有望借助单分子振动回声揭示大分子内部的超快动力学过程和更多的物理信息。

### 3 超分辨与成像技术

长距离主动成像在遥感和目标识别等方面有

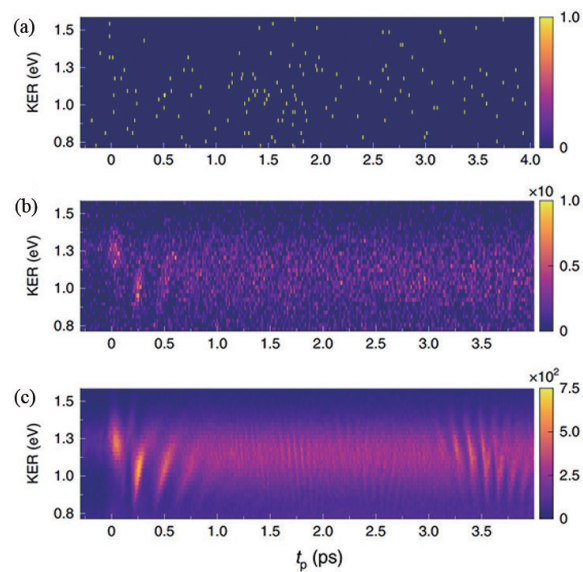


图15 单个氩二聚体分子的振动波包随时间的自由演化,在时间轴上呈现出与单粒子双缝衍射实验类似的干涉条纹结构

着广泛的应用前景。单光子光探测与测距具有单光子灵敏度和皮秒时间分辨率,是远程成像的理想选择。在这一领域有报道称三维成像可达10 km的范围,但进一步扩大成像范围面临着巨大的挑战,因为微弱的回波光光子返回时也掺杂着强噪声。2020年,中国科学家显著提高了成像范围,并超过了先前单光子成像范围记录(图16)<sup>[20]</sup>。在实验中展示了在城市环境中,单光子三维成像的范围可达45 km,信号电平为每像素1个光子。他们专门为远程单光子激光雷达设计、开发了一种基于硬件和软件实现的先进技术。一个高效率、低噪声的同轴扫描硬件系统既能有效地收集微弱的回波光光子,又能很好地抑制背景噪声。在软件方面,研究者开发

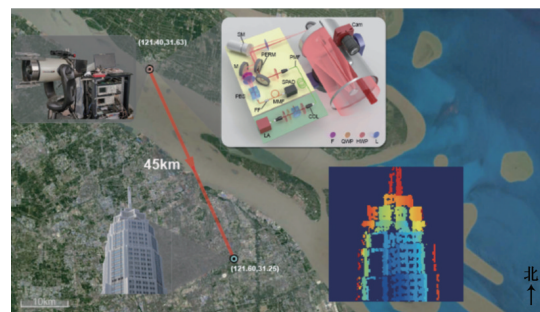


图16 生成66个光学轨道角动量模式量子网络的原理和实验装置示意

了一种在低光子探测条件下实现超分辨率和高光子效率的计算算法。研制的系统代表了超远距离、低功耗、高分辨率激光雷达的一个重要里程碑。结果不仅可以为遥感和监视提供新的成像系统,而且对成像科学中的最终灵敏度极限这一基本问题也有重要意义。

研究人员提出一种涡流辅助瞬态微透镜,在不需额外的光学元件或外部标记条件下,仅利用光-物质相互作用,就可以实现超出衍射极限的物理聚焦(图17)<sup>[21]</sup>。为了实现探针光束的紧密聚焦,研究者使用了不同波长的辅助光束,它被样品强烈吸收。在水基溶液中,折射率的温度依赖性为负( $dn/dt < 0$ )。因此,辅助光束由涡流相位板成形,以产生圆环形状的瞬态吸收,也就是说,在中心有一个衍射受限的空穴。这种热分布聚焦透镜的腰部产生折射率梯度,最高折射率位于光环的中心,而折射率向外围单调递减。该工艺有效地塑造了直径等于光学衍射极限的瞬时会聚微透镜。因此,当探测光束通过雕刻的微透镜(无论是准直的还是聚焦的),它将聚集到一个比光学系统允许的更紧密的焦点。由于塑造热轮廓所需的脉冲持续时间较短,成像方式的曝光通量低于组织损伤阈值,因此适合于生物应用。较小的焦点还可以用作扫描探针,用于以更高分辨率成像,而无需任何标记过程或材料插入,从而在光学配置中提供了高度灵活性。

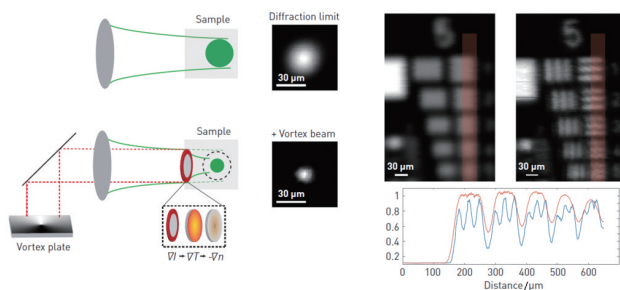


图17 涡流辅助聚焦视图解及实验结果对比

场景中每一个物体反射的光用透镜收集起来,并投射(成像)到记录光强度的像素阵列(传感器)上,进而获得场景图像的方法是显而易见并直观的。单像素成像是最近发展起来的另一种模式,它依赖于照明中的像素阵列而不是探测器。通过以

某种形式对场景进行空间扫描,并使用单像素传感器测量从场景反射回来的总强度,可以形成图像。在最近的研究工作中,为解决该问题,研究者使用了一个具有时间分辨能力的单点传感器,这意味着传感器没有空间分辨率,但可测量来自场景光子的到达时间(图18)<sup>[22]</sup>。在研究中,场景是由脉冲激光泛光照明,而反射光是由单点、单光子雪崩二极管(SPAD)探测器聚焦和收集的。探测器以时间直方图的形式提供来自整个场景返回光子的到达时间,然后由人工智能算法用于渲染场景的三维估计。通过上述方法,研究人员演示了不同场景的三维成像,包括多人和深度到达4 m的场景。一次分辨的单像素传感器足以进行空间成像,这一事实拓宽了传统上认为构成图像信息的范围,也适用于任何能够用短脉冲探测场景并精确测量返回“回波”的设备,例如雷达和声学距离传感器。这为利用现有技术进行成像和传感提供了多种可能性,特别是在自主车辆、智能设备和可穿戴技术中的应用。

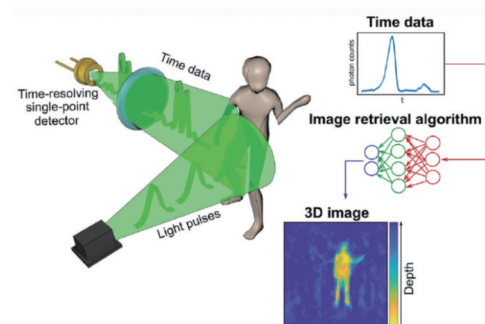


图18 利用测量时间进行成像示意

透镜是任何成像系统中最基本的光学元件,但传统的折射透镜源于曲率而体积庞大。平面衍射透镜可以克服这一困难,但传统的衍射光学由于色度的原因,应用范围有限。研究人员通过将“成像”现象简单地视为从物体到像平面的信息传递,焦平面相位空间分布可以是任意函数,在绝大多数成像应用中,只有图像传感器记录的强度才是产生图像的主要部分<sup>[23]</sup>。利用这一概念,允许平面透镜成像平面中的相位为自由参数,使得平面透镜的成像特性具有前所未有的多功能性,即通过精心设计多级衍射透镜(MDL)具备不同的衍射

面(图19<sup>[23]</sup>)。这种平板透镜的特性具有超高消色差、极限焦深(EDOF)和高数值孔径。长波红外、近红外、可见、长波红外光甚至远红外光都可以设计和制备超级消色差MDL。研究者反向设计的平板MDL,在重量和限制形状因素是重要考虑因素时,可以使用低成本的压印等技术制造并可以广泛使用。

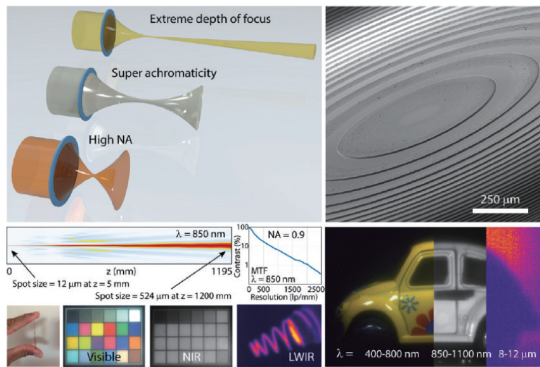


图19 通过精心设计多级衍射透镜(MDL)进行平面透镜成像

高通量体积荧光显微成像技术是生物、生命科学和工程领域的一个重要挑战。三维荧光样品的成像通常需要扫描不同焦平面的图像,由于重复曝光和激发,不可避免地降低了成像速度,增加了样

品上的光子剂量。虽然许多方法已经实现了无扫描体积荧光显微成像,这些早期技术通常需要添加定制的光学组件,会导致光子损失和像差增加。研究人员创建了一个基于深度学习的框架Deep-Z,将二维荧光显微图像数字化地重新聚焦到用户定义的三维表面上(图20)<sup>[24]</sup>。该框架能够从标准的宽视场荧光显微镜图像中进行推断,而无需任何机械扫描、额外硬件或权衡成像分辨率和速度。在Deep-Z中,一个卷积神经网络(CNN)被训练成以一个二维快照荧光图像和一个表示每像素轴向再聚焦距离的用户定义的数字传播矩阵(DPM)作为输入。在Deep-Z输出端,输入图像中不可分辨的荧光特征可以根据其在三维空间中的真实轴向位置进行聚焦和不同深度的分辨,与聚焦扫描的地面真实情况相匹配,而无需进行实际的机械扫描。这种方法减少共焦扫描过程中可能出现的成像时间和光损伤。

研究人员在近场荧光成像领域取得重要进展,将成像空间分辨率大幅提升,推进至0.8 nm的亚纳米分辨水平,在世界上首次实现了亚分子分辨的单分子光致荧光成像,为在原子尺度上展现物质结构、揭示光与物质相互作用本质提供了新的技术手段(图21)<sup>[25]</sup>。

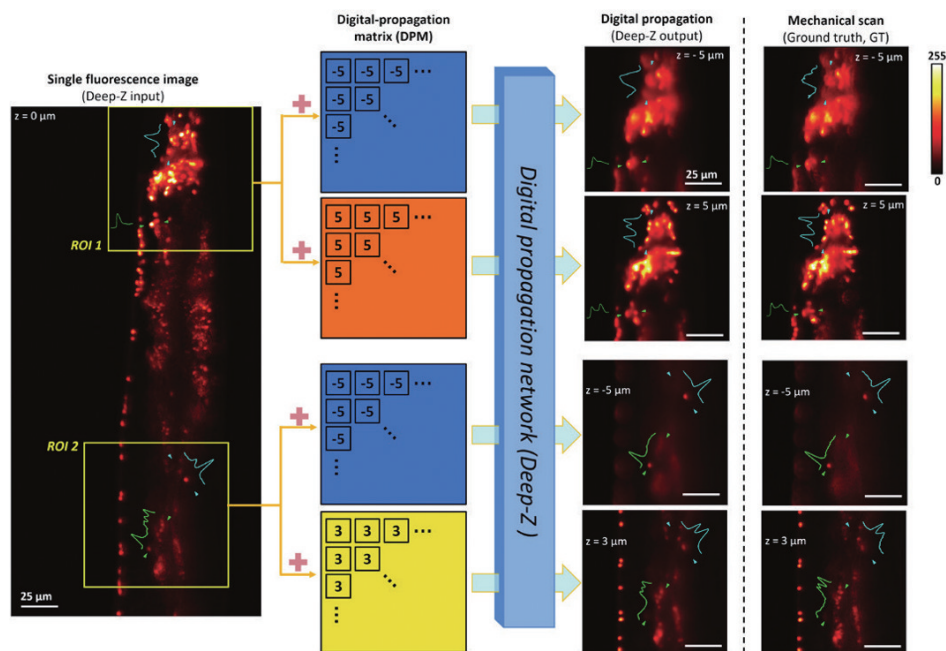
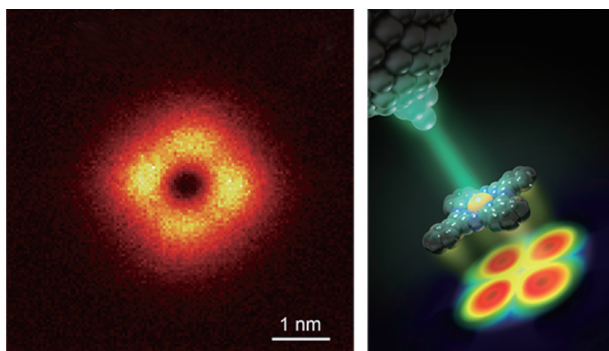


图20 利用Deep-Z三维数字聚焦进行成像



(a) 单分子光致发光成像 (b) 光致发光成像技术原理

图 21 亚纳米分辨的单分子光致发光成像和光致发光成像技术原理

研究团队对等离激元纳腔结构进行了进一步的精细调控,特别是探针尖端原子级结构的制作与控制。他们通过精致的针尖修饰方法在探针尖端构筑了一个原子尺度的银团簇突起结构,并将纳腔等离激元共振模式调控到与入射激光和分子发光的能量均能有效匹配的状态,再采用超薄的3个原子层厚的氯化钠介电层恰当隔绝酞青分子与银金属衬底之间的电荷转移,既抑制了荧光淬灭效应,又规避了远场背景噪音的干扰,从而成功实现了亚纳米分辨的单分子光致发光成像。当探针逼近分子时,即便间距在1 nm以下,光致发光的强度还是一直在随间距的变小而单调增强,通常存在的荧光淬灭现象完全消失。这充分保证了这项技术发明的普适性,为广泛应用于物理、化学、材料、生物等领域提供了坚实的基础。研究结果实现了扫描近场光学显微领域长期期待的用光解析分子内部结构的目标,为在亚纳米尺度上探测和调控分子局域环境以及光与物质相互作用提供了新的技术方法,对于近场光谱学和显微学的基础认知与技术发展至关重要。

## 4 量子计算和光通信

中国科学家取得里程碑式成功构建了76个光子的量子计算原型机“九章”,实现了具有实用前景的“高斯玻色取样”任务的快速求解<sup>[4]</sup>。量子计算机的概念自提出以来便吸引了许多人的关注,因为在

解决一些特定任务时其计算能力将远超经典计算机。2012年,物理学家 John Preskill 提出了“量子霸权”(或“量子计算优越性”)一词,它是指量子计算机超越最先进的超级计算机的时刻。2019年,谷歌宣布首次实现量子霸权,其量子计算原型机“悬铃木”是基于由超导材料构成的53个量子比特研制而成的。2020年,研究团队成功构建76个光子的量子计算原型机“九章”。光子也属于玻色子,九章在处理被称为“高斯玻色取样”任务的速度比目前最快的超级计算机快100万亿倍。作为对比,“九章”的计算速度等效地比“悬铃木”快100亿倍,实现了量子霸权的又一里程碑式突破<sup>[26]</sup>。

空心光子晶体光纤被认为是未来光通信的主干。这些光纤具有较低的传输损耗,与标准实心光纤相比,具有更低的延迟、更宽的光谱传输、更高的功率损伤阈值、更低的非线性和更低的色散。2020年,英国南安普敦大学将中空纤维的损耗降低到0.28 dB/km,接近标准单模光纤的损耗极限。空心光纤的低损耗特性是由于光子与致密光纤材料之间的相互作用小,极大减少了损耗,但也难以通过光与物质的相互作用直接进行光放大。2020年,科研人员提供了一个有效的解决方案,他们直接用填充空心光纤的气体介质(如空气)中的受激布里渊散射实现大规模的光放大,放大倍数为20万,还证明了空心光纤的增益比标准单模光纤中的增益强得多,并确定可以优于任何非线性光纤波导材料的增益(图22)<sup>[27]</sup>。在试验中,科学家发现这些光纤的峰值增益与气体压力的平方成正比,并且在只有几兆帕的气压下,实际上超过了固体材料中观

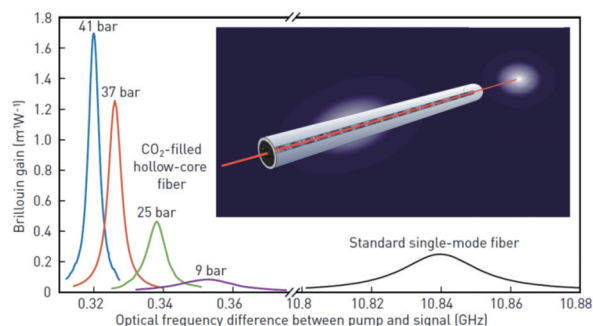


图 22 不同压力下充 CO<sub>2</sub> 空心光纤的布里渊增益与实心石英光纤的增益对比

察到的布里渊增益。光纤激光、分布式传感以及慢光和快光都可在空心光纤中实现受激布里渊散射,并且具有更高的效率。科学家首次展示了一种基于光-声相互作用的气体激光器,它可以在从紫外到中红外的任何波长下工作。使用空心光纤的分布式传感显示出前所未有的温度精度和空间分辨率,同时完全没有应变-温度交叉敏感,研究工作中展示的激光和传感器可以直接应用于高辐射环境,如航天器或核反应堆。

全光交换作为现代光通信和信息处理的基础,对下一代光和量子计算提出了新的要求。这些新兴技术强调低能耗、高速度、强调制比和高密度集成。传统上,超快全光开关依赖于光学材料的非线性响应。这些微小的效应通常需要一个额外的谐振器来增强光与物质的相互作用并且需要减少能量消耗。而共振寿命与 $Q/\omega$ 成正比,它影响着衰荡时间并限制了响应时间。在超高速和超高速的设计之间,这是一个严峻的挑战。2020年,研究者证明了一种可以打破这一长期挑战的全光交换的替代方法,即一种基于连续介质中拓扑保护的光学束缚态(BIC)的物理方法(图23)<sup>[28]</sup>。BIC提供的非常大的Q因子可以促进光子结构对入射光的巨大响应。另外,对称保护的BIC对局部对称扰动非常敏感,通过考虑外部激励和光增益之间的对应关系,在拓扑保护的BIC上,可以使用泵浦剖面控制远场激光剖面。对于方形周期晶格,拓扑保护的BIC激光器出现在 $\Gamma$ 点。当系统以圆光束泵浦时,增益区保持了4倍对称性,产生了环形光束轮廓的BIC激光器。一旦增益区退化到双重对称,输出迅速切换到两个波瓣。相应的时间分辨实验表明,跃迁过程发生在1~1.5 ps,比相应的微激光器寿命快1个数量级。BIC微激光器的远场光束分布由辐射通道处的破坏性干涉决定。因此,远场轮廓中的跃迁过程只需要重新分布激光发射,而不需要打开和关闭激光模式。这项研究工作表明开关时间可以独立于共振寿命。进一步利用BIC的超高Q因子,可以大大降低激光阈值。因此,超低能耗和超快响应之间的权衡最终被打破,相信这种新的交换机制会对光学和量子计算产生重大影响。

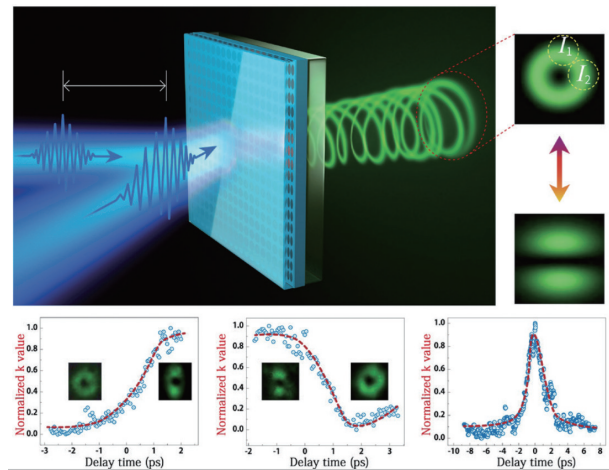


图23 空间和时间分离的激光束泵浦

宽频带和超高速雷达波形分析(RT-SA)是许多重要的宽带和实时波形分析工具,它可用于传感和光谱学以及射电天文学研究。这些应用需要实时计算输入时间信号的傅里叶变换(FT),同时必须在高于GHz范围的瞬时频率带宽上以连续和无间隙的方式进行,要求时间分辨率仅为几纳秒甚至更短。这些性能指标超出了现有RT-SA解决方案的范围,包括最先进的数字信号处理(DSP)方法。2020年,研究人员克服了这一局限性,提出并演示了一种通用的模拟信号处理架构,该架构实现了无间隙短时傅里叶变换或频谱图的直接和连续时间映射,对任意甚至无限长的输入信号进行全动态傅里叶分析或联合时频(T-F)信号表示,可称为时间映射谱图(TM-SP)的方法(图24)<sup>[29]</sup>。TM-SP利用了色散诱导时间Talbot或自成像效应的数学模型。研究人员设计并演示了一种基于光子学的方案,用于在接近5 GHz的瞬时带宽上对宽带微波信号进行连续无间隙的RT-SA,时间分辨率降至几纳秒,计算速度接近每秒50亿FTs(傅里叶变换)。这种性能超过了现有解决方案的能力,可以满足广泛领域的关键需求,使超高速宽带波形的实时分析和处理成为一种全新的可能。

## 5 光束传输

来自以色列理工学院的研究人员首次观察到

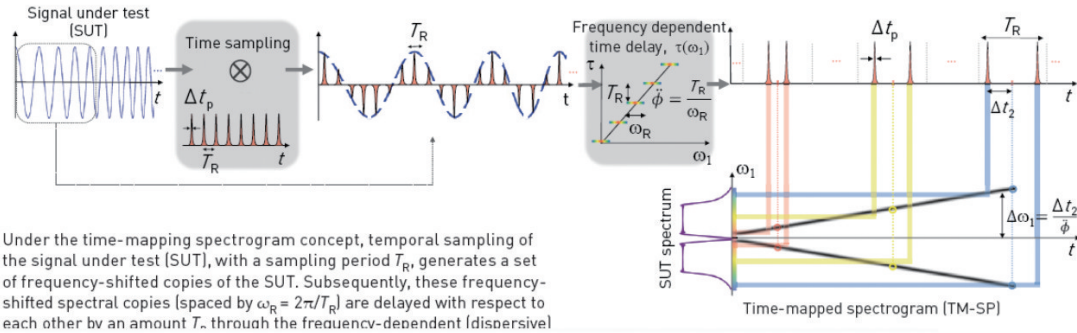


图24 时间映射谱概念

了分支的光流,当波穿过干扰的物体时,它们自然会向各个方向散射<sup>[30]</sup>。光的散射是自然现象,在自然界的许多地方都可以发现。事实证明,当干扰变化的长度远大于波长时,波以一种不寻常的方式散射:它形成强度增强的分支通道,并随着波的传播而继续分裂或分支。这种现象称为分支流。2020年,研究人员将这种分支流带入光的领域:将一根光缆插入肥皂泡膜中,当光在肥皂膜中传播而不是被散射时,光会形成细长的分支,从而形成光的分支流动现象(图25)<sup>[30]</sup>。通过限制气泡周围的空气流动测试肥皂泡激光技术在稳定膜和活动膜方面的作用,白光分成了多个厚度和颜色。在光学领域产生这种分支流的现象为研究和理解这种普遍波动现象提供了新的令人兴奋的机会,为研究提供了巨大的新可能性,首先是可以表征光在其中传播的介质的精度很高,其次还可以准确地跟踪这些分支以研究它们的特性。

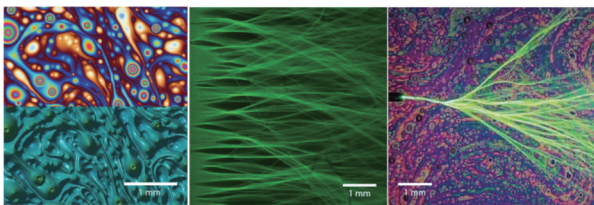


图25 激光束耦合到肥皂膜后分支光流

光束单向传播是各种应用光学的基础。单向光传播可用于隐身技术,研究人员一直想通过合成材料或超材料实现隐身。最近,研究人员发现,单向光传播可发生在简单的天然晶体材料,如石英晶体(图26)中<sup>[31]</sup>。虽然这种光学响应在天然晶体材

料中似乎是违反直觉的,但这些材料在特定频率下具有显著的电磁共振特性,同时共振与方向有关联,在接近共振频率的情况下,由于双曲线色散(即介电常数张量的主分量具有相反的符号),会出现类似超材料的光学行为,包括负折射。另外,通过改变晶体表面的各向异性方向控制这些共振,研究人员可创造或破坏可能发生光传播的区域,可以有效地创造出一种“双向”的材料,使其对一侧入射的光不透明,而对另一侧入射的光透明。研究结果表明,天然晶体可以作为高效和功能导向的非对称吸收体,同时具有广泛的应用前景。

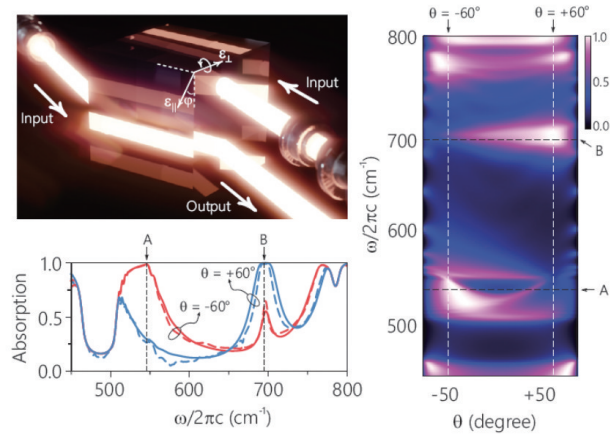


图26 石英晶体中的光线单向传输

控制波的扩散使其局域在某个有限的空间之内是一个长期存在的重要科学问题。最近,以光波的局域为例,科研人员率先发现并揭示了一种新的波包局域机制:基于莫尔晶格的极平带结构(图27)<sup>[32]</sup>,该发现具有重要的物理意义和广泛的适用性。科研人员首次在光学上产生了高度可调的莫

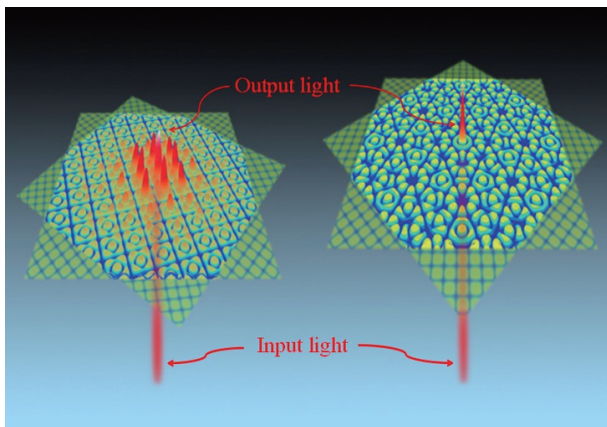


图27 2个方形晶格叠加且旋转一定的角度后形成光子莫尔晶格

尔晶格,并研究了光子莫尔晶格中的物理特性。他们利用光学诱导的办法,将2个周期晶格写入到同一块晶体中,得到了首个高度可调的光子莫尔晶格。借助于该莫尔晶格的连续可调性,并通过大量的数值模拟和实验证实,课题组发现了波包在莫尔晶格中的演化规律:随着2个周期晶格的相对权重和它们之间相对转角的变化,波包在莫尔晶格中演化时,出现了波形散开和局域的显著变化。莫尔晶格提供了对光控制的一种全新手段。相比于之前将波局域的方式,莫尔晶格提供的局域方式更加简单易行——它既不需要较强的折射率反差,也不需要特殊的结构设计,更不依赖于较强的激光功率,但同时它又具有高度的可调性——通过简单的莫尔转角的调节,光子可以自由地从“静止”转为“运动”,也可将其从“缓慢”的运动转为高速的“运动”,可谓动静皆宜,快慢自由。因此,莫尔晶格为未来的光束控制、图像传输、信息处理提供了一种更加简单易行的手段,也为研究低功率下的非线性光学提供了易于执行的平台。此外,光子莫尔晶格的研究也为二维材料和冷原子系统中莫尔晶格的研究提供了极其有益的借鉴。

## 6 生物光子学

超黑材料反射率小于0.5%,可以用于望远镜、照相机和光学设备中,在杂散光到达探测器之前吸收它,或者改善太阳能电池板等吸收器进行光捕

获。在深海鱼类中产生了超黑的皮肤。深海鱼类是地球上最黑的动物之一,也是已知的第一种水生超黑色动物,他们的一种色素包装机制可能已经进化了多次。利用时域有限差分模型,发现超黑鱼的黑素体在大小和形状上都得到了优化,达到反射系数最小。这些鱼体内的超黑物质依赖于2个过程——吸收和散射(图28)<sup>[33]</sup>。在鸟类和蝴蝶中,散射来自角蛋白或几丁质纳米结构,而吸收则来自嵌入这些基质中的黑色素。然而,在这种鱼类中,散射和吸收都来自同一个成分——黑色素。这种合适的随机紧密堆积纳米颗粒为制造坚固、易于制造的超黑材料提供了一个潜在且有效的解决方案。

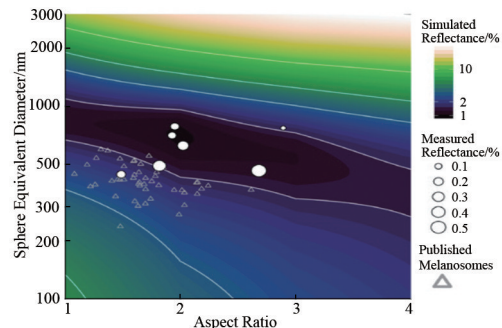
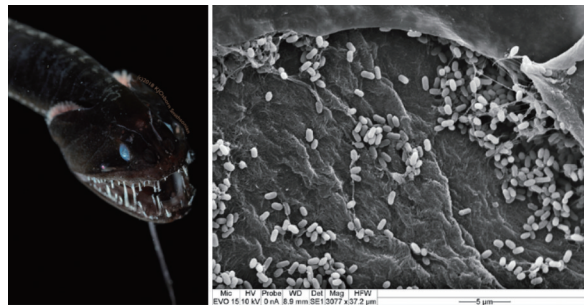


图28 超黑深海鱼类进化后的反射系数最小和黑色素大小及几何结构

视觉使人类能够与环境进行充分的感官互动,理解环境的复杂性,并做出完全明智的决策。因此,视觉常常被认为是最重要的感官。在最简单的描述中,人眼是一个由2个光学镜片(角膜和晶状体)和一个屏幕(视网膜)组成的系统,在视网膜上形成透镜的图像。在最近的工作中,研究者展示了如何使用单一功能来模拟晶体的光学响应,将人工晶体植入等应用和更广泛的光学领域的设计提供参考(图29)<sup>[34]</sup>。他们研究梯度折射率和透镜形

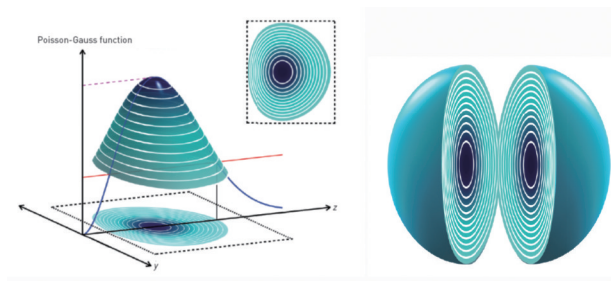


图29 水平面与泊松-高斯函数交集启用渐变等高线对晶体透镜的模型

状之间的动态相互关系,以及当透镜改变焦距时它们是如何同时变化的。通过结合2个统计函数——泊松分布和高斯分布,可以创建一个动态3D模型,同时也考虑了梯度折射率和它如何改变时,调整镜头形状,以达到在大范围距离的聚焦,这个模型很好地模仿了生物晶状体的功能。正如预期所料,这种先进的透镜模型被整合到一个示意性的眼睛中,显示出最小的像差,并可根据不同年龄的眼睛进行修改设计。随着组织工程和三维生物打印技术的最新进展,该模型可用于人工晶状体的制作和白内障手术后个性化人工晶状体的设计,相信它在生物医学光学、眼科和工程学科等领域也有着广泛的潜在应用。

由于超快组织动力和密集肌肉纤维具有严重光散射特征,即使是最先进的显微镜技术观察跳动的心脏也是一个极其苛刻的要求。然而,描述单个心脏细胞收缩的特征对于理解心脏病和改善心脏病至关重要。为了克服心脏感应所面临的局限性,研究人员探索将显微激光作为新型的、超灵敏的、明亮的心脏组织收缩性探针。源于微激光器对局部折射率变化的敏感性,通过对放置在心肌细胞中的微激光器发射光谱的分析,研究人员可提取出它们在周围环境中的瞬时且定量的收缩曲线,同时可以与形成肌肉纤维的收缩丝(肌原纤维)的蛋白质密度关联起来。每个微激光器的光谱分布均可提供一个独特的光学条形码,并可以在较长的时间内跟踪单个心脏细胞(图30)<sup>[55]</sup>。研究人员在活体斑马鱼的心脏上进行了光学心脏传感实验,证明这项技术不受心脏自身快速运动的影响。研究人员还探索了通过将微激光集成到活体心肌切片中来探测这些散射组织内部轮廓的能力。实验表明,心脏切片中的微激光传感提供了更深入的穿透力,能够可靠地检测高达400  $\mu\text{m}$  组织深度的收缩性,而无需多光子激发。结合新开发的纳米激光器,这项技术将通过访问移植细胞和工程心脏组织的功能特性,在跳动的心脏深处开辟出新的研究途径。

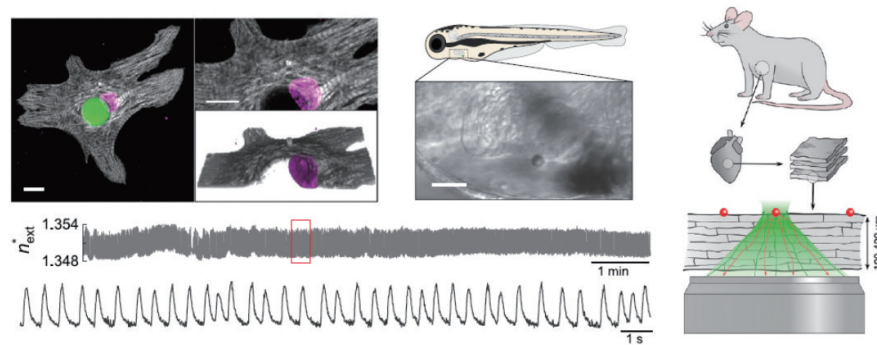


图30 生物集成微型激光器用于心脏传感技术

血小板是提供止血作用的细胞,阻止血液流动,从而确保血液不会通过可能发生的任何小的血管损伤而泄漏。止血反应开始于血小板活化,当血小板感觉到血管外环境特有的刺激时触发。血小板活化的研究是很重要的,因为这一过程在许多病

理条件下起着重要作用。血小板活化的标志是细胞质中钙离子浓度的峰值,可以使用实时钙离子探针追踪血小板动态活化过程。最近,科研人员制定了一个新的实验方案,即血小板激活由光脉冲触发(图31)<sup>[56]</sup>。方案实施中加入激动剂后,不再将血小

板附着在表面上且不起位移,在紫外光照射下释放,可以追踪单个自由运动细胞中血小板活化的早期阶段。实验首次证实了血小板早期活化的单细胞精确测量,为血小板研究开辟了新的途径,包括研究细胞间信号传递和不同生化途径的非线性相互作用,促进血小板在各种生理和病理状态下的功能研究,并有助于心血管疾病的诊断。

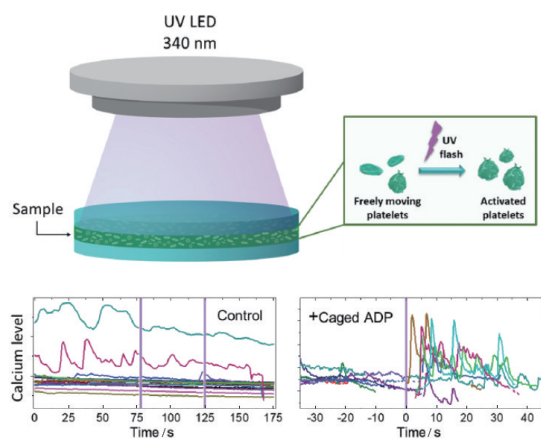


图31 光脉冲触发激活血小板

包括梯度折射率(GRIN)透镜在内的许多光学器件在制造过程中,应力诱导双折射是一种常见的干扰现象。2020年,研究人员证明这种缺陷可以被利用,而且还可用于包括矢量涡旋光束产生、聚焦修正和 snapshot Mueller矩阵偏振测量这些超出传统 GRIN 透镜新应用范围。梯度折射率透镜通过径向对称折射率分布聚焦光,它具有表面平坦、耦合容易、质量和尺寸小等独特优点。因此,它们被广泛应用于紧凑型成像系统或耦合到光纤或波导。研究人员证明通过将个或多个梯度折射率透镜与其他光学元件级联,它们的固有双折射可以用来产生具有复杂相位和偏振特性的矢量涡旋光束(图32)<sup>[37]</sup>。此外,通过与其他光学器件的适当组合适应 GRIN 透镜内部的偏振像差,研究人员还证明了可以利用现有的基于 GRIN 透镜的成像系统调制此类透镜的焦点,提出新的基于双级联 GRIN 透镜的 snapshot-Mueller矩阵偏振分析法,也验证了它与传统方法相比在区分健康组织和病变组织方面的潜在用途的原理,为进一步技术发展提供了机会,从量子光学到临床诊断皆可得到广泛应用。

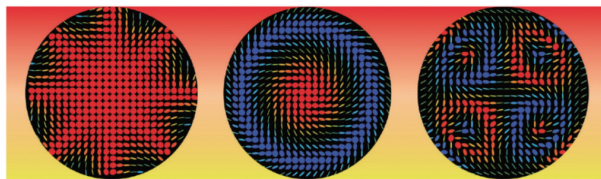


图32 梯度折射率级联透镜产生的矢量光束

在二维共价有机骨架材料的设计合成和光电应用研究中,2020年取得了重要进展。科研人员通过设计,研究出一种具有优异光电性能的新型二维共价有机骨架材料(2D-COFs),并通过将二维共价有机骨架材料与石墨烯材料组合,制备得到高性能光电探测器(图33)<sup>[38]</sup>。研究人员通过选择合适的光活性单体的组合,在铜基石墨烯上合成了具有高度有序的供体-受体拓扑结构的全新光敏2D-COFs,并用得到的2D COFs-石墨烯结构制备了高性能的光电探测器件。

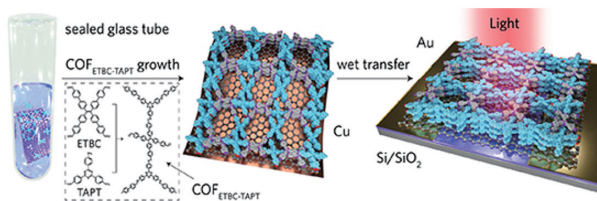


图33 COFETBC-TAPT-石墨烯结构的合成和器件的制备

经过一系列表征和测试,合成的2D-COFs具有高的结晶度、大的比表面积和高的热稳定性,并且和石墨烯很好地结合形成异质结构。此外,由于COFs具有大的比表面积和极性选择性,研究组还成功通过特定的分子可逆地调节了光电探测器的光敏特性。该研究工作为构建具有可编程材料结构和多种调节方法的先进功能型器件提供了新的策略,为COF材料体系在光电子学和许多其他领域的应用铺平了道路。

## 7 量子光学

电子显微术和光谱学在材料和结构研究中无处不在,它们提供了一种低至原子尺度的空间分辨率。利用透射电子显微镜的新方法,如光诱导近场电子显微镜(PINEM),使用电子束以深亚波长分辨

率表征物质中的光场。然而,自由电子和光之间的弱耦合仍然是阻碍人们获得多功能电子-光子物理的限制因素。2020年,科研人员证明了光子腔可以将电子和光的耦合强度提高1个数量级以上。研究者研究了2种广泛应用的光子晶体腔(PhC)和光学回音廊道模式(WGM)微谐振器,探测了2个光子腔的衰荡时间,发现电子-光耦合导致电子同时吸收和发射数百个光子,并且电子速度和光相速度沿电子轨迹精确匹配可实现未来需要的高Q腔,结合相位匹配将使自由电子的强电子-光耦合和量子光学具备可行性(图34)<sup>[39]</sup>。微谐振器和其他光子腔是许多关键构件中的基本单元,与电子束与先进的光子技术相结合后,将提高光子学和分析电子显微镜的研究范围。

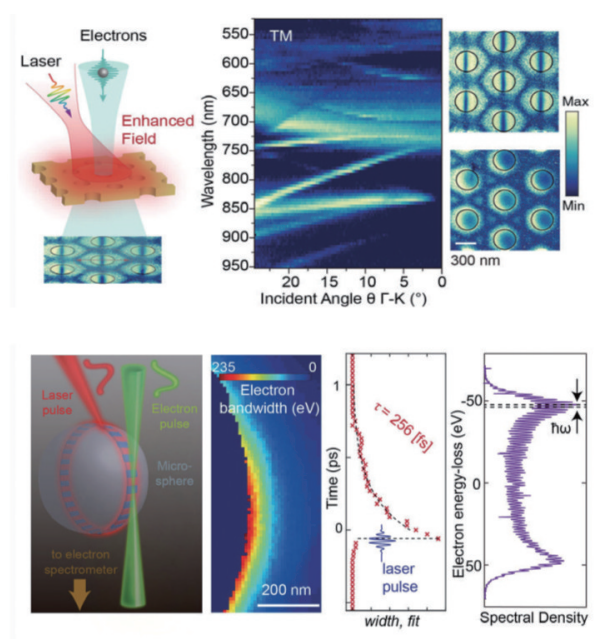


图34 相对论相干电子与光耦合腔增强示意

光子携带角动量,包括与旋转极化向量相关的自旋角动量(SAM)和与螺旋相位相关的轨道角动量(OAM)。光子角动量态自由度的增加,推动了大量的理论和实验研究,在经典光学和量子光学中都有广泛应用。通常研究角动量与坡印廷矢量平行的纵向SAM和OAM。在紧聚焦光束和倏逝波的研究中,横向SAM已引起了人们的关注。在最近的理论研究中,揭示了横向光学OAM的存在,但是还缺乏合适的实验工具来控制这些OAM状态下的

光。2020年,研究人员克服了这一局限性,展示了一种在空间频率-频率域中形成螺旋相位,然后经过二维时空傅里叶变换后保留在时空域中的方法(图35)<sup>[40]</sup>。生成的时空光学涡旋(STOV)类似于快速前进的气旋,横向OAM垂直于传播方向。研究人员开发的简单且极为灵活的生成方法为光学和光子设计打开了一个全新的光子角动量研究方向。通过重新设计要加载到时空域上的相位图,能够展示一个嵌入时变横向OAM且具有亚皮秒时间间隔的波包。超快时间OAM变化适用于高速光通信和纳米结构的超快操作。这种光-物质相互作用局部化的能力对这些应用至关重要。然而,当时空波包通过高数值孔径物镜聚焦时,会产生时空像散效应,使时空涡旋崩溃。与用于产生空间OAM的柱面透镜模式转换器类似,通过对波包进行相位和幅度调制的预处理,实现了具有横向OAM的亚波长STOV。这些研究将推动更多的研究进入这一新

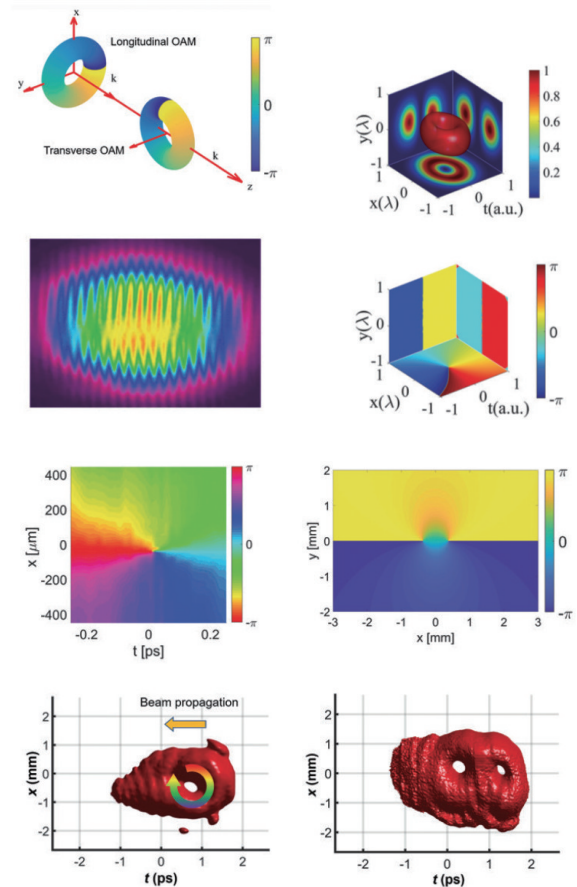


图35 创造光子旋涡

生领域,并在许多应用领域开辟新的途径,包括显微镜、等离子体物理、激光加工和量子信息处理等。

2020年,南京大学、香港理工大学、中国科学技术大学和华东师范大学组成的联合团队在高维量子纠缠光源制备方面取得重要研究进展,通过结合超构透镜阵列与非线性晶体,成功制备出高维路径纠缠光源和多光子光源(图36)<sup>[41]</sup>。

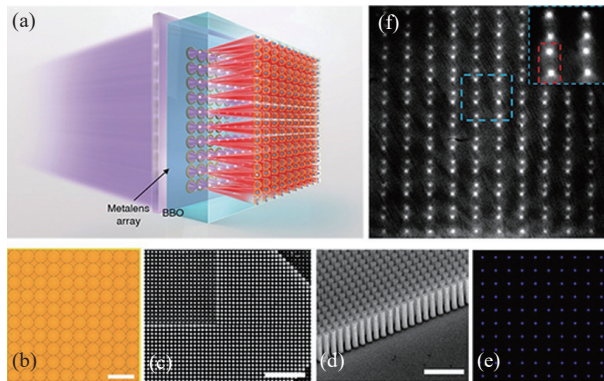
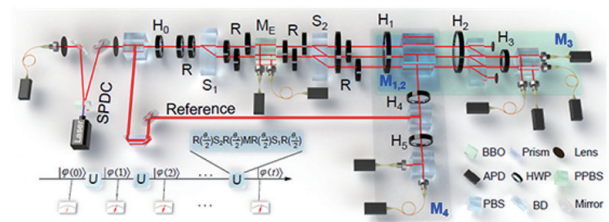


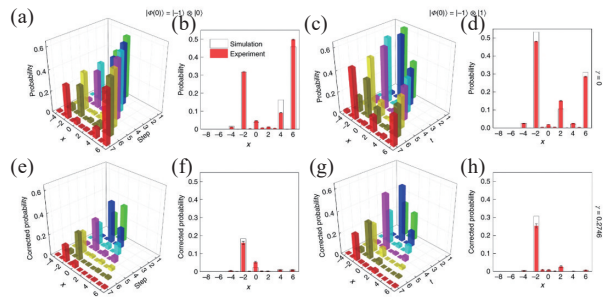
图36 基于超构透镜阵列的量子光源系统

该团队将超构透镜与非线性光学晶体(BBO晶体)组合在一起,构成全新的超构表面量子光源系统。他们设计并制备出 $10 \times 10$ 超构透镜阵列,使用泵浦激光入射到该系统,超构透镜阵列将泵浦激光均分成 $10 \times 10$ 份,并在BBO晶体中聚焦。聚焦的泵浦光在BBO中发生自发参量下的转换过程,产生一系列信号/闲置光子对。理论上,这一结构制备出的路径纠缠光子的维度是100维,而且通过增加透镜阵列数,纠缠光子的维度可以进一步提高。该工作通过将新兴研究领域超构表面技术引入量子信息领域,实现了高维度、集成化的双光子、多光子纠缠光源,突破了现有量子光源的技术瓶颈和信息编码维度限制,有望应用于高维度的量子通信、量子计算、量子存储等领域,对于发展具有更高信息容量和更高安全性的量子信息技术具有重要意义。

科研人员在实验上首次观测到开放量子体系中的非厄米趋肤效应(图37<sup>[42]</sup>),并证实了非厄米体边对应原理。这一成果处于非厄米系统、拓扑相变、量子模拟等量子物理和凝聚态物理学前沿方向的关键结合点,是拓扑物态和开放体系两个方向的基础性进展,对新奇拓扑序的量子模拟及全面理解开放体系拓扑现象有重要意义<sup>[42]</sup>。



(a) 实验装置



(b) 实验结果

图37 非厄米趋肤效应实验及结果

研究人员在单光子量子行走的物理平台上,实现了对具有趋肤效应的非厄米拓扑体系动力学的量子模拟。通过巧妙的实验方案设计,观测到非厄米趋肤效应及稳定的拓扑边缘态。实验观测到的拓扑边缘态与传统体边对应法则不符,而与定义在广义布里渊区上的拓扑不变量精确符合,从而证实了非厄米体边对应原理。实验首次在量子体系中观测到非厄米趋肤效应及非厄米体边对应关系,是进一步探索非厄米体系拓扑效应的实验基点。这一成果有助于深入理解开放系统的拓扑性质及动力学演化中的拓扑现象,对开放体系和拓扑物态的量子模拟具有重要推动作用。

## 8 紫外光源

能量范围在6~15 eV真空紫外(VUV)光谱区域,是唯一能够用于探测物理化学变化过程的理想光源,几乎所有的分子和材料的电离能皆介于这个能量范围内。不幸的是,这种实验具有局限性,因为几乎没有小型高通量真空紫外光束源存在。同步加速器设备可以提供高重复频率脉冲明亮的VUV光,光子能量范围内具有高能量分辨率,但科学家必须带着样品前往这些大型装置才能完成实验。2020年,研究人员报道了一种挑战性技术,即

解决高度级联谐波产生(HCHG)技术(图38)<sup>[43]</sup>。该系统通过红外光纤激光器的上转换产生紫外和真空紫外光谱线,使得每个谐波都有助于形成更高的谐波。通过将2种颜色(平均功率为10 W的Yb:光纤激光器的基频和二次谐波)聚焦到一个充满氙气的负曲率空心光纤中,并通过调节氙气压力来提供最佳相位匹配,得到了3~15的奇偶次谐波。该过程所需的峰值强度约为 $2 \times 10^{12}$  W/cm<sup>2</sup>,约是传统高次谐波产生所需的峰值强度的1/50,在每秒 $10^{12} \sim 10^{16}$ 个光子的情况下,这种光源的光子能量高达10.8 eV,与带宽相近的同步加速器可以相提并论。这种真空紫外光源的高重复频率可以使空间电荷效应、假重合和探测器死区时间最小化。在保证高能量分辨率时,这种真空紫外光源可以根据需求做成一个紧凑的单色器,它所具备的高分辨率对于分辨密集谱带或目标识别至关重要。

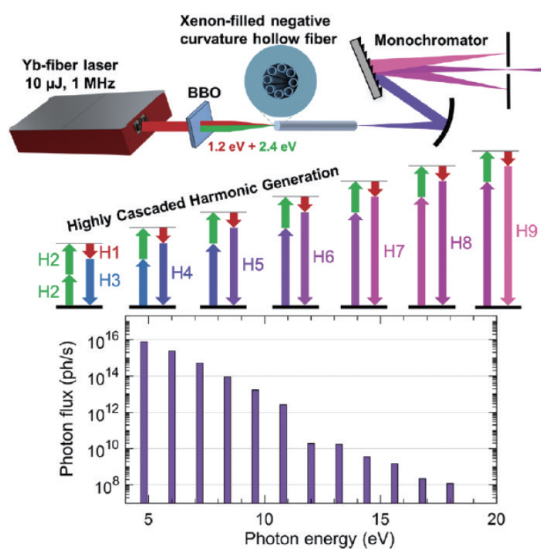


图38 独特的产生高度级联的谐波高通量超快真空紫外光源

## 9 光学探测与整形

将可调变焦镜头集成到毫米厚度的手机、微型显微镜或医用内窥镜的端镜,需要在几毫秒内完成电整形复杂的光学元件。液晶空间光调制器是高分辨率波前整形的首选工具,但其偏振灵敏度、色度、成本和尺寸限制了其在光学实验室之外的应

用。2020年,研究人员展示了准消色差、偏振不敏感的电子元件,可以在微尺度上以前所未有的自由度预定连续局部波前整形,而无需任何机械运动。这种方法称之为Smartlens,电流通过经过优化的微米级电阻器,局部加热改变电阻周围透明聚合物板的折射率分布(图39)<sup>[44]</sup>。这种微米级的智能透镜快速加热和冷却后,一块简单的聚合物板即变成透镜。研究人员证明智能透镜可制造成阵列并激活后,位于不同距离的彩色物体可以同时聚焦在相机传感器上。此外,通过模拟热扩散和光传播,并用遗传算法优化后,此方法可以超越简单的透镜。一个经过适当设计的电阻器进行高水平控制后进行光整形,可实现更广泛的光学功能,例如像散、轴棱柱或自由曲面整形,以动态校正光学仪器的像差。Smartlens技术非常紧凑、经济高效且可扩展,可能应用于高端技术系统以及简单的终端用户的成像设备,并可能对当前的集成光学系统产生重大影响。

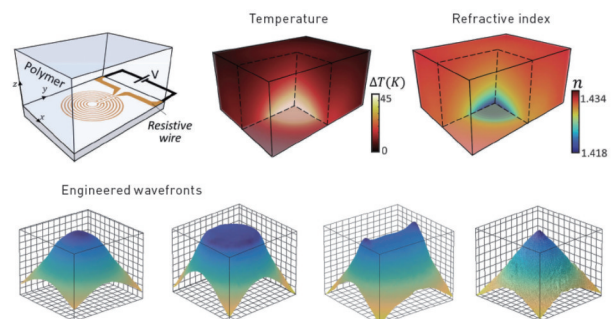


图39 智能透镜温度和折射率分布与实验结果

从显微光刻到定量显微镜,再到引力波观测站,精密光学波前计量在科学、工业和基础研究领域至关重要。目前,对系外行星的直接成像还需要严格的波前传感和皮米级全收集孔径的控制。Zernike相位对比技术由于其固有的简单性和灵敏度等优点,非常适合于上述测量。2020年,研究人员开发了一种更为稳健的相位重建表达式,该表达式可以非常精确地测量最高空间频率下的微小相位变化(由最终的瞳孔成像探测器照亮的像素数设定,图40)<sup>[45]</sup>。实验台的测量重复性受到光子噪声和大气相位湍流的限制,通过连续快速测量变形镜(DM)上平坦的大气湍流,激活每个变形镜DM的

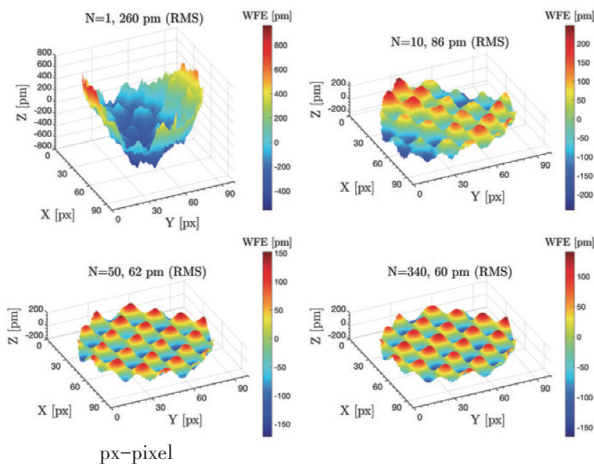
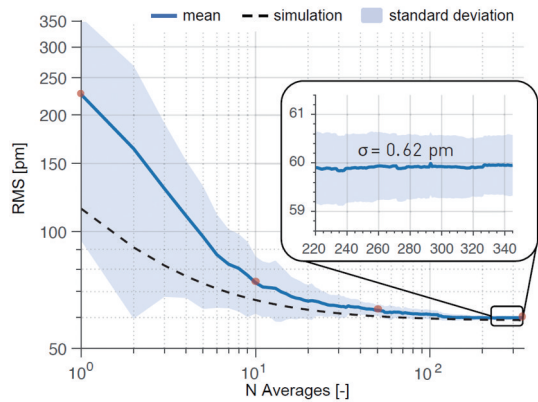


图 40 皮米量级灵敏度光学波前传感图示

驱动器。帧的差分去除大气中的准静态部分,平均差异后可以减少剩余的随时间变化的大气残差以及光子噪声的影响。结果表明,相位对比技术可作为一种强大的波前传感方法,在一个简单的结构中可以达到令人难以置信的精度。

## 10 等离子体光学

基于芯片的纳米光子器件的成功可归结为大规模生产制造技术的成熟和其组成部分如光栅、分光器和耦合器的模块化。另一方面,包含金属的等离子器件能够实现极端的光子小型化和极端的光-物质相互作用,无论是在紧凑性还是光学限制方面,都比其相应的电介质器件高几个数量级。2020年,研究人员提供了一种混合硅-等离子器件的方法,可为实现等离子元件提供模块化设计(图41)<sup>[46]</sup>。科研人员展示了2种不同的等离子体元件,

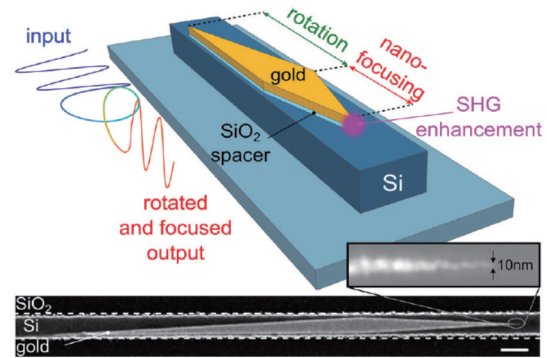


图 41 混合薄片等离子体光子模块化元件示意

由混合的等离子硅/金纳米层结构形成,可以在标准的近红外硅光子波导上进行后处理。这项实验可以估算出,相对于同等的金条而言,纳米IP的光强度增强了100倍以上。等离子体旋转、纳米聚焦和非线性增强这3种功能都发生在小于10 μm的光传播长度上,这是传统介质波导无法实现的。该技术在基于芯片的纳米光谱技术、非线性和原子尺度传感、纳米互连、纳米级太赫兹源和探测器等方面有着广泛的应用,研究人员提供的模块化方法从根本上使混合等离子体技术更容易获得。

用于摄影和显微镜的传统相机采用人眼结构,即镜头将感兴趣的对象图像投影到光电探测器阵列上,这种布局可提供很好的空间分辨率,但由于像差原因,在小尺寸和大视场(FOV)之间存在最根本性权衡。在自然界中,进化论解决这个问题的方案是复眼,但它们的弯曲几何结构与标准平面半导体技术不兼容,使光电实现异常复杂化。2020年,研究人员报道了一种新型复眼相机结构,它利用了亚表面纳米光子学的设计灵活性和计算成像的先进数据处理能力,以平面无透镜格式提供大于150°的超宽视场(图42)<sup>[47]</sup>。在这种结构中,标准图像的每个像素传感器阵列被一套特别设计的金属纳米结构覆盖。计算成像技术可同时从所有像素的组合信号中重建出高质量的图像。研究人员设计、制作一组近红外器件,这些器件提供了不同角度的定向光探测,随后根据响应曲线展示了它们的成像能力。由于其无透镜特性,这种方法可以使器件小型化并具备更高的分辨率,它与现有图像传感器技术

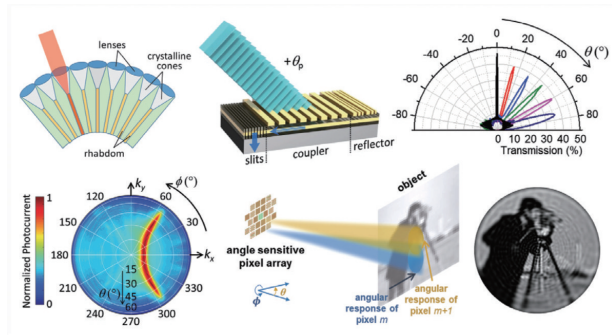


图42 超宽视场亚纳米新型复眼相机

具有潜在的兼容性。研究结果对于极端尺寸小型化和超宽视场的应用具有重要意义,可在芯片上的针尖内窥镜、植入式或可吞咽式摄像机和无人机自主导航上应用。

中国研究团队在金属钠等离子激元光子器件研究方面获得重要突破。基于液态金属旋涂技术,研究团队首次展示了金属钠微结构的制备和近红外波段室温低阈值纳米激光器(图43)<sup>[48]</sup>。碱金属本征的低损耗特性和独特的电化学性质,将有力地推动新型等离子激元功能器件的发展。

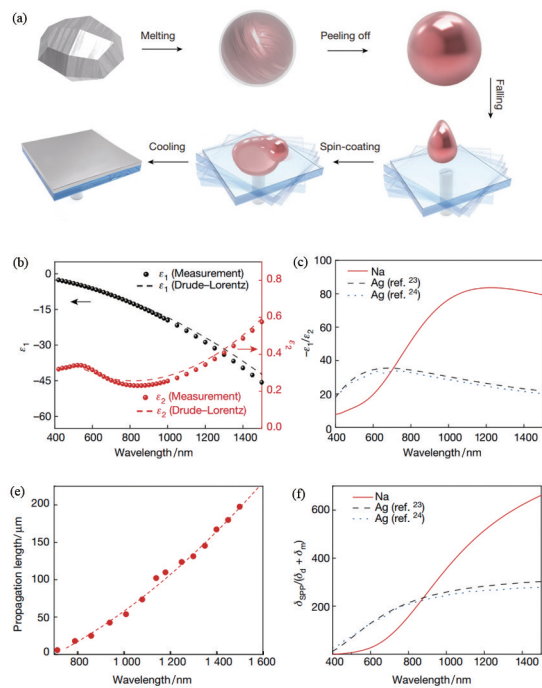


图43 金属钠等离子激元薄膜的制备、介电函数与亚波长波导光传输

寻找具有更低吸收损耗的金属材料,进一步降低等离子激元纳米器件的功耗是等离子激元光子芯片研发的核心问题之一。与贵金属相比,以钠为代表的碱金属更接近自由电子气模型,且带间跃迁损耗较小,一直被认为可能具有更低的光学损耗。然而,由于金属钠活泼的化学性质和严苛的制备条件,基于金属钠等离子激元器件的实验探索鲜有报道。研究团队独辟蹊径,发展了液态金属旋涂工艺结合可控冷却技术,成功获得了高质量的金属钠结构,其自由电子弛豫时间约为单晶银的2倍(图44)<sup>[48]</sup>。在近红外波段,表面等离子极化激元在钠-二氧化硅界面的传播长度超过200  $\mu\text{m}$ ,相应地,钠基波导的品质因数可达金属银的2倍以上。高质量金属钠制备工艺的突破为低损耗的碱金属等离子激元光子器件的研发奠定了技术基础。

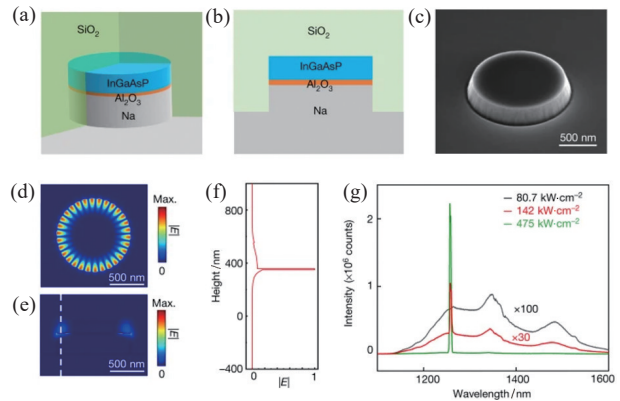


图44 钠基等离子激元纳米激光器结构、激光模场分布和激光光谱

低损耗的钠基等离子激元结构能够显著增强光与物质相互作用。研究人员设计、制备了金属-绝缘体-半导体的间隙等离子激元微纳结构。研究表明,将低损耗的钠基等离子激元结构与高品质因子的In-GaAsP量子阱结构相结合,可有效降低整个器件的欧姆损耗和辐射损耗。制备的钠基等离子激元激光器的室温激光阈值约为140  $\text{kW}/\text{cm}^2$ ,创造了同类型纳米激光器阈值新低。金属钠在近红外波段展现出的优异的光学特性,为探寻低损耗等离子激元材料提供了新的思路;高性能的钠基等离子激元光子器件也推动了等离子激元片上集成应用迈出坚实的一步。

## 11 人工智能

全球塑料生产中有50%是一次性使用后处理的,这导致了污染和自然资源的枯竭。虽然回收可以帮助解决这个问题,但准确识别塑料类型是使其可行的关键步骤。识别中的任何错误都会降低最终产品的质量,同时具有商业和科学意义。2020年,科研人员利用激光诱导击穿光谱(LIBS)和机器学习创建了一种以极低成本快速分类塑料垃圾的方法,能够快速识别10种不同类型的消费后塑料,对消费后塑料进行识别,平均准确率约为97%(图45)<sup>[49]</sup>。研究人员系统地研究了数据采集条件、光谱仪、信噪比和分析方法(主成分分析、人工神经网络和随机森林)的影响关于识别精度和测试时间。在10 ms的时间内,一种未知的塑料即被归类使用的10种类型之一。这项工作实现了一个可现场部署、低成本、紧凑轻便的检测手段,可快速实时分拣塑料废料,并有助于更有效、更可行的塑料回收。

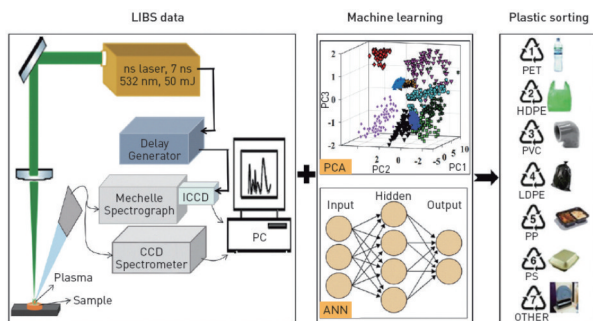


图45 利用激光诱导击穿光谱(LIBS)和机器学习快速分类塑料

## 12 光伏光电

研究人员首次报道了通过层间相互作用调控构建高效稳定的二维层状钙钛矿太阳能电池(图46)<sup>[50]</sup>。研究者通过创新性地引入一种含硫原子的有机胺,实现层间相互作用有效调控,强烈面外优先生长的二维层状钙钛矿薄膜可实现低的缺陷态密度和有效的层间电荷传输,从而提升了太阳能电池的光电转换效率。同时,增强的层间分子相互作用,使得二维层状钙钛矿太阳能电池的稳定性显著

提高。研究构建了效率高达18.06%的层状钙钛矿太阳能电池,器件在最大功率输出点跟踪测试1000 h,仅衰减15%,为目前报道最稳定的二维层状钙钛矿太阳能电池,这为二维层状钙钛矿太阳能电池的性能和稳定性进一步提升提供了新思路。

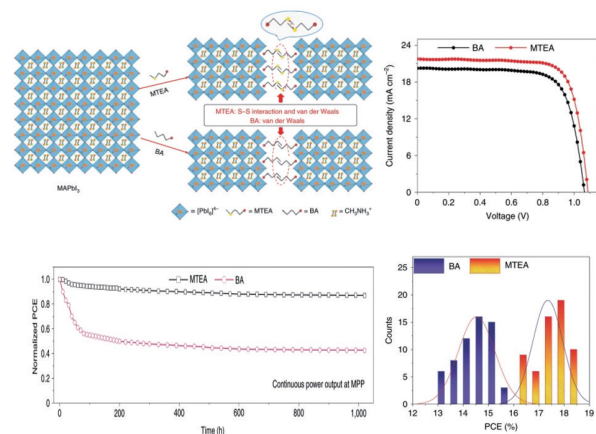


图46 引入含S原子的有机胺实现二维层状钙钛矿半导体层间相互作用的有效调控,获得高效稳定的光伏器件

石墨烯是材料科学领域的一颗迅速崛起的新星,它开启了二维材料的大门。作为纳米光电子器件广泛使用的电极理想材料,石墨烯除了具有优异的弹性和刚度外,还具有最高的载流子迁移率。自石墨烯被发现以来,打开石墨烯零带隙一直是最具挑战性的科学难题之一。最近,研究团队在硫化物钙钛矿的研究中,发现了一种新奇的稳定且环境友好的二维钙钛矿半导体 $\text{Ca}_3\text{Sn}_2\text{S}_7$ 材料(图47)<sup>[51]</sup>。它成为钙钛矿家族的一颗新星,从一个全新的角度实现了“打开石墨烯带隙”的梦想。该项研究将会为二维钙钛矿材料的设计和研发提供新的思路,并进一步促进相关半导体产业的发展。

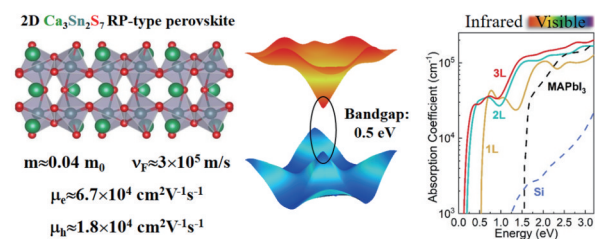


图47 二维 $\text{Ca}_3\text{Sn}_2\text{S}_7$ 材料的结构、能带带色散图及其光吸收系数

### 13 涡旋光

2020年,研究者首次提出利用光子晶体平板结构的动量空间偏振场奇点产生涡旋光束,并在实验上得到验证。光子晶体作为在实空间的周期性结构,没有呈现涡旋状构型,直觉上并不能实现涡旋光束的产生。然而,复旦大学光子晶体课题组发现光子晶体在动量空间连续谱中的束缚态(BIC)附近的远场辐射存在由一系列布洛赫共振态形成的偏振涡旋(图48)<sup>[52]</sup>。BIC正对应于涡旋的奇点。由于实空间和动量空间具有共轭关系,利用动量空间中的这种涡旋结构,也可以实现等价于实空间的涡旋相位调制。研究者提出的新思路揭示了隐藏在动量空间中的偏振和相位调控自由度,也为解释和设计基于光子晶体薄膜的涡旋激光和BIC激光提供了思路。

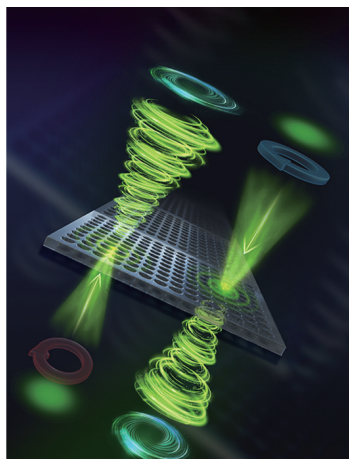
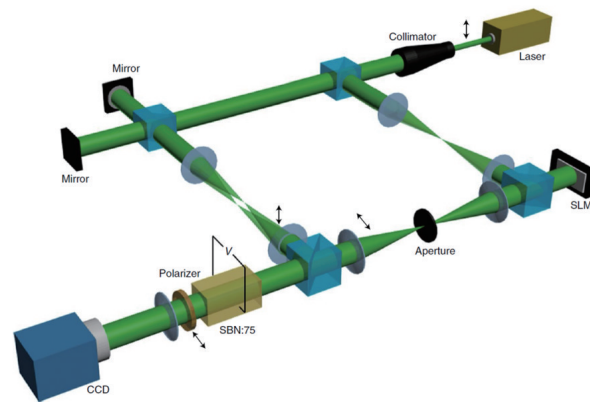
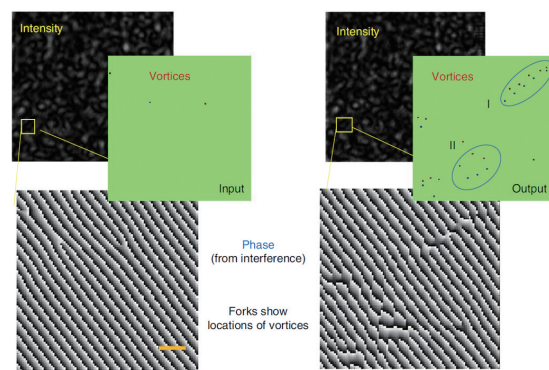


图48 光子晶体薄膜产生涡旋光束示意

研究者对具有不同相干长度随机相位光束经非线性传播后所形成的散斑场的统计性进行了实验测量,观察到随着自由光涡旋的产生,散斑场的自关联函数从幂律衰减退化为指数衰减(图49)<sup>[52]</sup>。这项研究以光子学系统对凝聚态物理中的Berezinskii-Kosterlitz-Thouless (BKT)相变理论进行了量化实验验证,印证了非线性光学与凝聚态物理、冷原子物理等多个学科之间有着某些共同的理论基础,揭示了随机光场的相关性与涡旋动力学之间深刻而复杂的联系,为进一步探索非平衡态下的相干-涡旋动力学提供了一个新的基点。



(a) 光子BKT实验系统示意



(b) 对照输入输出面的相位可发现自由涡旋的产生

图49 对Berezinskii-Kosterlitz-Thouless (BKT)相变理论的实验验证

研究人员在光子轨道角动量研究领域取得新突破,首次从理论到实验展示了具有时空涡旋相位并携带光子横向轨道角动量的新型光场,开创了一个全新的光子轨道角动量自由度(图50)<sup>[53]</sup>。从理论到实验同时证明了与时空涡旋相位关联的光子横向轨道角动量。研究结果表明,光子横向轨道角



图50 携带光子横向轨道角动量的时空涡旋光场

动量在光子自旋霍尔效应、量子纠缠和光子自旋-轨道耦合效应等方面可能会展示独特的性质,也有望应用于高速光通信、光学微操控和新型光电器件等领域。

拓扑光子学开始于拓扑边缘态作为鲁棒波导的发现,而另一种最常用的光学元件——光腔也可以利用拓扑缺陷态做出性能上的独特创新。2020年,研究者从理论提出并且实验证实了一种全新的拓扑光子晶体微腔,不但可以支持任意简并度的腔模,而且是目前已知光腔中大面积单模性最好的。这个拓扑光腔填补了半导体激光器在选模腔体设计上的空白,为下一代高亮度单模面发射器件提供了符合商用激光器历史规律的新发展方向,对激光雷达和激光加工等技术有潜在的积极意义,也是对拓扑物理应用途径的一次探索<sup>[54]</sup>。科研团队通过涡旋调制狄拉克光子晶体设计出了这种拓扑光腔,并且实验上在硅晶片(SOI)上和光通信波段(1550 nm)实现了这种狄拉克涡旋腔(图51)<sup>[54]</sup>。该腔可实现带间单模、任意多简并模式、最大的自由光谱范围、小远场发散角、矢量光场输出、模式面积从微米到毫米范围可调以及多种衬底兼容等优良特性。

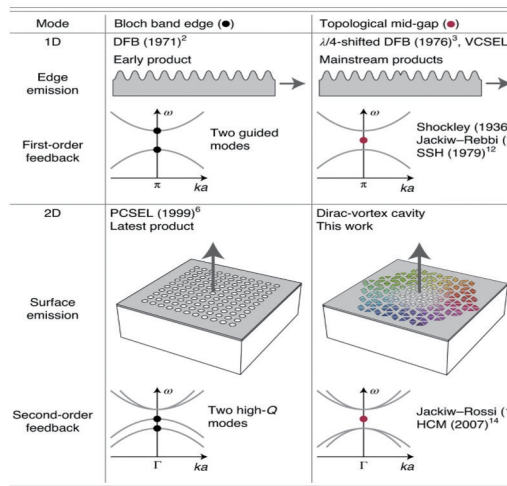
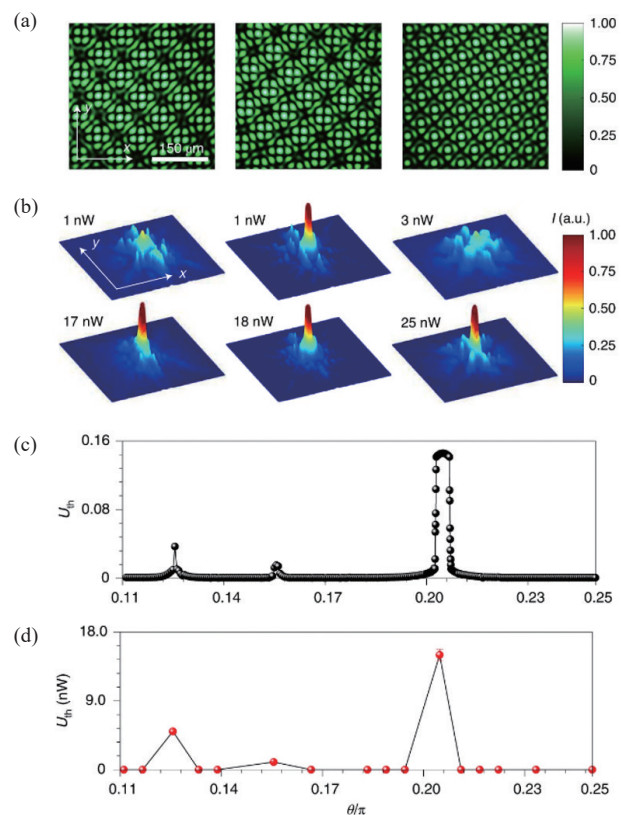


图51 狄拉克涡旋光腔与3种商用单模半导体激光腔的比较(一维到二维,边发射到面发射,周期结构到拓扑缺陷)

## 14 孤子光学

研究人员在国际上首次将莫尔晶格的研究推

进到非线性光学范畴。光孤子是指非线性效应平衡衍射或色散效应,从而在演化过程中始终保持波形不变的一束光或一个光脉冲,光孤子的形成一般需要极高的激光功率。研究团队在空间光孤子方向有长期的工作经验,在均匀材料(非局域非线性材料)和周期结构(金属纳米线周期阵列)中均对光孤子有过深入的研究,此次工作属首次发现了莫尔晶格这类准周期晶格中的空间光孤子(图52)<sup>[55]</sup>。研究发现,在绝大部分莫尔角度(此时莫尔晶格呈现“不可约”相)下,激发莫尔晶格中的空间光孤子所需的阈值功率几近为零。这是由于莫尔晶格中存在着大量平带(这些带并不会引起衍射效应),只有极高阶能带才具有非零曲率所致。因此,莫尔晶格为极低功率条件下光孤子的激发提供了一个独



(a) 3个不同莫尔角下的莫尔晶格;(b) 当高光垂直入射至该三莫尔晶格前表面时,在不同功率条件下莫尔晶格后表面的输出光斑图样。(c)和(d)显示了孤子的阈值功率对莫尔角的依赖,在一般情况下,孤子的激发功率几近为零,但在特殊角附近,则存在非零的功率阈值

图52 发现莫尔晶格中的空间光孤子

特的平台,为光孤子走向实际应用突破了功率条件上的限制。

## 15 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<sup>[56]</sup>。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2020年中国光学十大进展评选,参选论文有121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<sup>[57]</sup>。本文回顾了2020年光学领域的14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] 冯华. 嫦娥五号创造五项中国首次(权威发布)[EB/OL]. (2020-12-18)[2020-12-30]. <http://cpc.people.com.cn/n1/2020/12/18/c419242-31970609.html>.
- [2] 中国信通院发布《量子信息技术发展与应用研究报告(2020年)》[EB/OL]. (2020-12-15)[2020-12-30]. <http://www.mei.net.cn/xghy/202012/1608033574.html>.
- [3] 量子计算原型机“九章”问世,超越谷歌“量子霸权”[EB/OL]. (2020-12-04)[2020-12-30]. <http://dzb.whb.cn/2020-12-04/3/detail-706842.html>.
- [4] Zhong H S, Wang H, Deng Y H, et al. Quantum computational advantage using photons[J]. *Science*, 2020, 370(6523): 1460-1463.
- [5] Stockman M I. Nanoplasmonics: Past, present, and glimpse into future[J]. *Optics Express*, 2011, 19(22): 22029-22106.
- [6] Halas N J, Lal S, Chang W S, et al. Nordlander, plasmons in strongly coupled metallic nanostructures[J]. *Chemical Reviews*, 2011, 111(6): 3913-3961.
- [7] Valev V K, Baumberg J J, Sibilia C, et al. Chirality and chiroptical effects in plasmonic nanostructures: Fundamentals, recent progress, and outlook[J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(18): 2517-2534.
- [8] Zannotti A, Denz C, Alonso M A, et al. Shaping caustics into propagation-invariant light[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 1-7.
- [9] Huo P C, Song M W, Zhu W Q, et al. Photorealistic full-color nanopainting enabled by a low-loss metasurface[J]. *Optica*, 2020, 7(9): 1171-1179.
- [10] Palmer B A, Yallapragada V J, Schiffmann N, et al. A highly reflective biogenic photonic material from core-shell birefringent nanoparticles[J]. *Nature Nanotechnology*, 2020, 15(2): 138-144.
- [11] Singh S C, ElKabbash M, Li Z L, et al. Solar-trackable super-wicking black metal panel for photothermal water sanitation[J]. *Nature Sustainability*, 2020, 3: 938-946.
- [12] Fang X Y, Ren H R, Gu M. Orbital angular momentum holography for high-security encryption[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14: 102-108.
- [13] Kan Y H, Andersen S K H, Ding F, et al. Metasurface-enabled generation of circularly polarized single photons[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(16): 1907832.
- [14] Epstein I, Alcaraz D, Huang Z Q, et al. Far-field excitation of single graphene plasmon cavities with ultracompressed mode volumes[J]. *Science*, 2020, 368(6496): 1219.
- [15] Zhang F, Cai H B, Zhou W M, et al. Enhanced energy coupling for indirect-drive fast-ignition fusion targets[J]. *Nature Physics*, 2020, 16: 810-814.
- [16] 高功率激光物理联合实验室. 上海光机所“神光II”5 PW装置圆满完成“飞秒+纳秒组合打靶”中外合作物理实验[EB/OL]. (2020-03-20)[2020-12-30]. [http://www.siom.cas.cn/jgsz/ggljgwljgjsys/xwdt/202003/t20200330\\_5521787.html](http://www.siom.cas.cn/jgsz/ggljgwljgjsys/xwdt/202003/t20200330_5521787.html).
- [17] Li N, Guo X D, Yang X X, et al. Direct observation of highly confined phonon polaritons in suspended monolayer hexagonal boron nitride[J]. *Nature Materials*, 2021, 20: 43-48.
- [18] Huang X J, Guo Q Y, Yang D D, et al. Reversible 3D laser printing of perovskite quantum dots inside a transparent medium[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14: 82-88.
- [19] Qiang J J, Tutunnikov I, Lu P F, et al. Echo in a single vibrationally excited molecule[J]. *Nature Physics*, 2020, 16: 328-333.
- [20] Li Z P, Huang X, Cao Y, et al. Single-photon computational 3D imaging at 45 km[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(9): 1532-1540.
- [21] Edrei E, Scarcelli G. Optical focusing beyond the diffraction limit via vortex-assisted transient microlenses[J]. *ACS Photonics*, 2020, 7(4): 914-918.
- [22] Turpin A, Musarra G, Kapitany V, et al. Spatial images

- from temporal data[J]. *Optica*, 2020, 7(8): 900–905.
- [23] Meem M, Banerji S, Majumder A, et al. Inverse-designed achromatic flat lens enabling imaging across the visible and near-infrared with diameter >3 mm and NA =0.3[J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 117(4): 041101.
- [24] Wu Y C, Rivenson Y, Wang H D, et al. Three-dimensional virtual refocusing of fluorescence microscopy images using deep learning[J]. *Nature Methods*, 2019, 16: 1323–1331.
- [25] Yang B, Chen G, Ghafoor A, et al. Sub-nanometre resolution in single-molecule photoluminescence imaging[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14: 693–699.
- [26] 中国科学家构建量子计算原型机“九章”[EB/OL]. (2020-12-04)[2020-12-30]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1685117941188828814&wfr=spider&for=pc>.
- [27] Yang F, Gyger F, Thévenaz L, et al. Intense Brillouin amplification in gas using hollow-core waveguides[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14: 700–708.
- [28] Huang C, Zhang C, Xiao S M, et al. Ultrafast control of vortex microlasers[J]. *Science*, 2020, 367(6481): 1018–1021.
- [29] Konatham S R, Maram R, Cortés L R, et al. Real-time gap-free dynamic waveform spectral analysis with nanosecond resolutions through analog signal processing[J]. *Nature Communication*, 2020, 11: 1–12.
- [30] Patsyk A, Sivan U, Segev M, et al. Observation of branched flow of light[J]. *Nature*, 2020, 583: 60–65.
- [31] Shen L, Lin X, Shalaginov M, et al. Broadband enhancement of on-chip single-photon extraction via tilted hyperbolic metamaterials[J]. *Applied Physics Reviews*, 2020, 7: 021403.
- [32] Wang P, Zheng Y L, Chen X F, et al. Localization and delocalization of light in photonic moiré lattices[J]. *Nature*, 2020, 577: 42–46.
- [33] Davis A L, Thomas K N, Goetz F E, et al. Ultra-black camouflage in deep-sea fishes[J]. *Current Biology*, 2020, 30(17): 3470.
- [34] Jaimes-Nájera A, Gómez-Correa J E, Coello V, et al. Single function crystalline lens capable of mimicking ciliary body accommodation[J]. *Optics Express*, 2020, 11(7): 3699–3716.
- [35] Schubert M, Woolfson L, Barnard I R M, et al. Monitoring contractility in cardiac tissue with cellular resolution using biointegrated microlasers[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14: 452–458.
- [36] Spiriyova D, Vorobev A, Klimontov V, et al. Optical uncaging of ADP reveals the early calcium dynamics in single, freely moving platelets[J]. *Biomedical Optics Express*, 2020, 11(6): 3319–3330.
- [37] He C, Chang J T, Hu Q, et al. Complex vectorial optics through gradient index lens cascades[J]. *Nature Communication*, 2019, 10: 1–8.
- [38] Xiong Y F, Liao Q B, Huang Z P, et al. Ultrahigh responsivity photodetectors of 2D covalent organic frameworks integrated on graphene[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(9): 1907242.
- [39] Kfir O, Lourenço-Martins H, Storeck G, et al. Controlling free electrons with optical whispering-gallery modes[J]. *Nature*, 2020, 582(7810): 46–49.
- [40] Chen J, Wan C, Chong A, et al. Subwavelength focusing of a spatio-temporal wave packet with transverse orbital angular momentum[J]. *Optics Express*, 2020, 28(12): 18472–18482.
- [41] Li L, Liu Z X, Ren X F, et al. Metalens-array-based high-dimensional and multiphoton quantum source[J]. *Science*, 2020, 368(6498): 1487.
- [42] Xiao L, Deng T S, Wang K K. Non-Hermitian bulk-boundary correspondence in quantum dynamics[J]. *Nature Physics*, 2020, 16: 761–766.
- [43] Couch D E, Hickstein D D, Winters D G, et al. Ultrafast 1 MHz vacuum-ultraviolet source via highly cascaded harmonic generation in negative-curvature hollow-core fibers[J]. *Optica*, 2020, 7(7): 832–837.
- [44] Berto P, Philippet L, Osmond J, et al. Tunable and free-form planar optics[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13: 649–656.
- [45] Steeves J B, Wallace J K, Kettenbeil C, et al. Picometer wavefront sensing using the phase-contrast technique[J]. *Optica*, 2020, 7(10): 1267–1274.
- [46] Tuniz A, Bickerton O, Diaz F J, et al. Modular nonlinear hybrid plasmonic circuit[J]. *Nature Communication*, 2020, 11: 1–8.
- [47] Kogos L C, Li Y Z, Liu J N, et al. Plasmonic ommatidia for lensless compound-eye vision[J]. *Nature Communication*, 2020, 11: 1–9.
- [48] Wang Y, Yu J Y, Mao Y F, et al. Stable, high-performance sodium-based plasmonic devices in the near infrared[J]. *Nature*, 2020, 581: 401–405.
- [49] Junjuri R, Gundawar M K. A low-cost LIBS detection system combined with chemometrics for rapid identification of plastic waste[J]. *Waste Manage*, 2020, 117: 48–57.

- [50] Ren H, Yu S D, Chao L F, et al. Efficient and stable Ruddlesden–Popper perovskite solar cell with tailored interlayer molecular interaction[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14: 154–163.
- [51] Du J, Shi J J. 2D  $\text{Ca}_3\text{Sn}_2\text{S}_7$  chalcogenide perovskite: A graphene-like semiconductor with direct bandgap 0.5 eV and ultrahigh carrier mobility  $6.7 \times 10^4 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ [J]. *Advanced Materials*, 2019, 31: 1905643.
- [52] Situ G, Fleischer J W. Dynamics of the Berezinskii – Kosterlitz–Thouless transition in a photon fluid[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14: 517–522.
- [53] Chong A, Wan C H, Chen J, et al. Generation of spatiotemporal optical vortices with controllable transverse orbital angular momentum[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14: 350–354.
- [54] Gao X M, Yang L C, Lin H, et al. Dirac–vortex topological cavities[J]. *Nature Nanotechnology*, 2020, 15: 1012–1018.
- [55] Fu Q D, Wang P, Huang C M, et al. Optical soliton formation controlled by angle twisting in photonic moiré lattices[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14: 663–668.
- [56] Optics in 2020[EB/OL]. (2020–12–01) [2020–12–30]. [https://www.osa-opn.org/home/articles/volume\\_31/december\\_2020/features/optics\\_in\\_2020/](https://www.osa-opn.org/home/articles/volume_31/december_2020/features/optics_in_2020/).
- [57] 中国光学十大进展2020入选名单[EB/OL]. (2020–12–18) [2020–12–30]. [http://www.opticsjournal.net/columns/zggx?type=lnj\\_index&year=2020](http://www.opticsjournal.net/columns/zggx?type=lnj_index&year=2020).

## Memorable sounds in the optics and photonics in 2020

ZHU Haidong, XIE Xinglong, SHEN Weixing, ZHU Jianqiang\*

National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

**Abstract** It is well known that today's world is dominated by science and technology. Since the birth of laser, optics and photonics have penetrated into all aspects of people's life. This article reviews the 2020 major progress in the field of optics and photonics and draws up an inventory of ten optical research directions, in which the related research may likely have enormous impact on human existence and way of life in the future.

**Keywords** optics; 2020 hotspot; development of optics ●



(责任编辑 王志敏)