

2021年光学热点回眸

卢战韬, 李林骏, 邱丽娟, 谢兴龙*, 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2021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、量子计算与光通信、生物光子学、量子光学、光学探测与整形、涡旋光、孤子光学、人工智能、光学传感、太赫兹光学、光伏光电、照明显示和拓扑光子学等15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的巨大影响。

关键词 光学; 2021年研究热点; 光学进展

光学是研究光的行为和性质的物理学科, 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 γ 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。

2021年光学方面的重大进展, 发生在激光惯

性约束核聚变方面。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。为此, 美国于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共有192路光束, 最大输出能量达2 MJ, 但是十余年来, NIF一直未能实现点火。直到2021年8月, 在NIF上开展的新一轮惯性约束聚变实验实现了1.3 MJ的里程碑式能量产出, 这比2021年2月的170 kJ峰值产额提升了8倍。这次实验的聚变增益达到了输入激光能量的2/3,

收稿日期: 2021-12-03; 修回日期: 2021-12-28

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: 卢战韬, 博士研究生, 研究方向为高功率激光和ICF聚变物理, 电子信箱: luzhantao@siom.ac.cn; 谢兴龙(通信作者), 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(共同通信作者), 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: 卢战韬, 李林骏, 邱丽娟, 等. 2021年光学热点回眸[J]. 科技导报, 2022, 40(1): 25-51; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2022.01.002

离真正意义上实现聚变增益大于1的目标更近了一步(图1)^[1]。

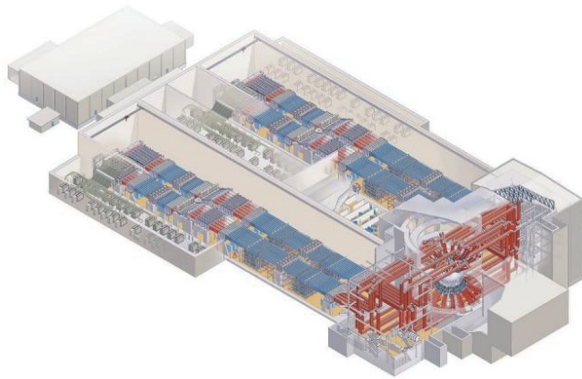


图1 美国国家点火装置NIF

除了NIF,目前国际上运行的高功率纳秒激光系统还有6台,包括美国的OMEGA装置、英国的Vulcan装置、法国的LMJ装置、日本的Gekko-XII装置以及中国的神光II和神光III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 $0.35\ \mu\text{m}$ 的紫外光波段输出1.4 MJ的能量。中国ICF点火研究采取从万焦耳级到10万焦耳级,进而发展到百万焦耳级的渐进式方案,目前已于2012年建成了共48路光束,输出总能量200 kJ的神光III装置,主要进行ICF的物理分解实验研究。

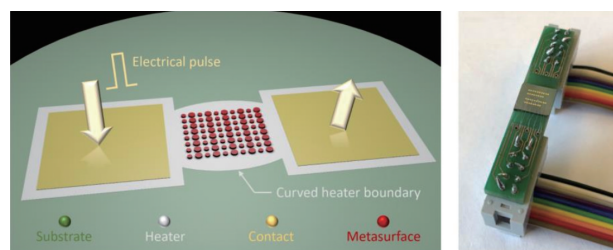
2021年,光学与光电子进展还有很多方面,下面从微纳光学、强激光与超快光学、超分辨与成像技术、量子计算与光通信、生物光子学、量子光学、光学探测与整形、涡旋光、孤子光学、人工智能、光学传感、太赫兹光学、光伏光电、照明显示和拓扑光子学等方面分别介绍。

1 微纳光学

微纳光学^[2-4]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。

光学超表面是一种由亚波长纳米结构阵列组成的人工二维结构,为光场调控及光信息处理提供了一个紧凑而强大的平台。与传统光学相比,它具有实现灵活光操纵的潜力,并提供尺寸、重量、功率和成本优势。由于超表面在成像、传感、显示和光学测距等方面具有广泛的应用前景,且其光学特性在制造后可进行调制,近年来引起人们极大兴趣。2021年,研究人员首次展示了基于光学相变材料的电可重构非易失性超表面,该超表面与电微加热器集成,以实现可逆切换,并产生了创纪录的半倍频程光谱调谐范围和超过400%的大光学对比度(图2)^[5]。研究者还通过利用相同的设备架构,进一步对偏振不敏感的相位梯度超表面进行原型设计,以实现动态光束控制。研究表明,有源超表面可以实现与涉及机械运动部件的传统精密体光学器件相当的光学质量。



(a) 电热超表面切换构造示意

(b) 封装的超表面阵列器件

图2 电热超表面切换构造和封装的超表面阵列器件

基于超表面的光学全息术具有视场角大、分辨率高等优点。研究人员提出了一种由几何相位单元组成的四原子宏像素超表面,可以将多个波长的振幅与相位信息编码到任意偏振通道中,有效地避免了复杂的结构搜索和制备过程(图3)^[6]。此外,通过非均匀偏振编码,实现了HSB(hue, saturation, brightness)三维色彩空间全息显示。得益于偏振和色彩空间的全自由度调谐,该器件在全息3D成像/显示、信息加密、AR/VR、高密度数据存储等应用中展现出巨大的潜力。

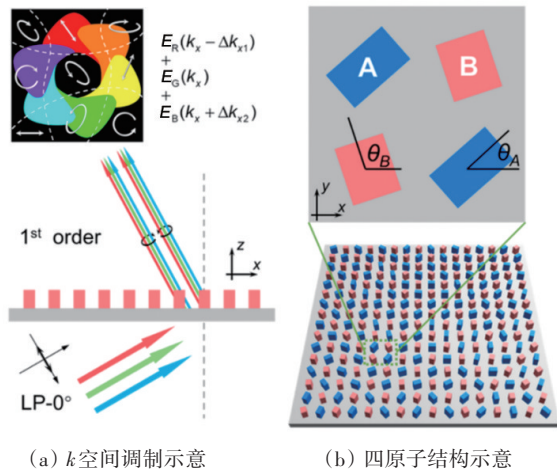
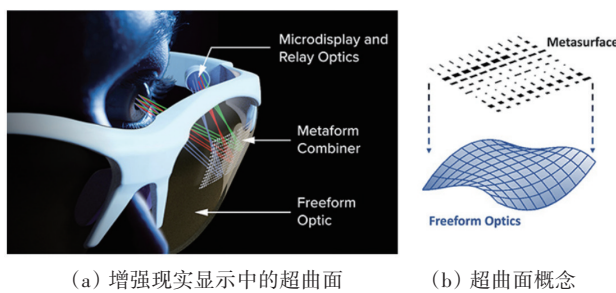


图3 全偏振自由度调控彩色全息超表面结构示意图

自由曲面是没有旋转不变轴的表面^[7]。自由曲面光学是近期光学设计革命的基石,它基于自由曲面的内在弯曲形状控制光,而超表面通过光与修饰平面表面的亚波长结构的相互作用实现光控制。最近,研究人员将超表面和自由曲面光学技术结合起来,实现了一种新的光学组件,称为超曲面(图4)^[8]。超曲面由与弯曲的自由曲面基板一致的超表面组成,建立在先前开发的自由曲面设计框架之上,以利用自由曲面光学和超表面的成像优势。研究者还开发了一种增强型电子束光刻工艺(通常仅用于平面基板),使超曲面制造成为可能。这为更紧凑的AR/VR眼镜以及从LED照明到医疗和军事光学设备等应用提供了一种可行的技术。



(a) 增强现实显示中的超曲面组合器应用示例 (b) 超曲面概念应用示例和超曲面概念图示

图4 增强现实显示中的超曲面组合器应用示例和超曲面概念图示

基于辐射制冷技术的人体热管理织物(辐射制冷织物)在近年来被广泛研究,在个人热管理领域逐渐受到重视。但目前织物的光谱调控范围主要

集中在中红外波段,这虽能满足热学调控的基本要求,但太阳辐射波段的吸收使得这类织物在户外暴晒环境难以实现有效的辐射制冷。2021年,研究人员基于辐射制冷原理和结构分级设计理念,研发了具有形态分级结构的超材料织物,在户外暴晒环境可为人体表面降温近5℃(图5)^[9]。研究者基于批量纤维制备技术获得了均匀连续的超材料纤维,进一步利用纺纱织造和层压技术,制备得到了超材料织物,可以与整个成熟纺织行业相兼容,克服了长期以来将实验室规模的织物应用于热管理实际场景的挑战。超材料织物将有望打造具有超高产业附加值特征的战略新型产业,推动从基础材料到功能性纺织成品的全链条产业服务,实现以交叉学科创新驱动促进纺织业的转型升级。

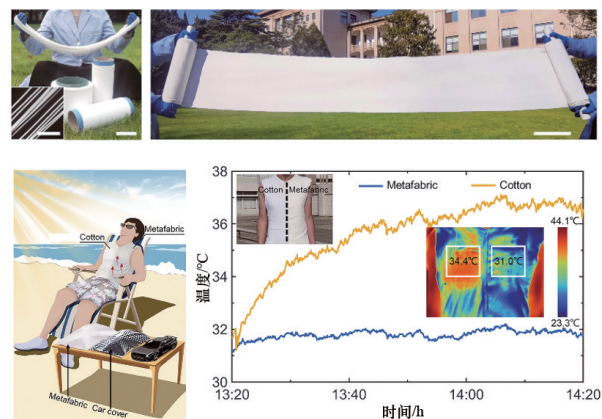


图5 超材料纤维及织物照片和超材料织物降温性能测试

红外成像是夜视、自动驾驶汽车导航、光学断层扫描和食品质量控制等许多应用中的一项关键技术,然而传统的红外成像技术需要使用窄带隙半导体等材料,这些材料对热噪声很敏感,通常需要低温冷却,这使得仪器体积庞大且笨重。2021年,研究人员使用精心设计的超表面纳米晶体层,以新的方式操纵光,只需要一个简单的激光就可以将红外光转换为佩戴者可以看到的图像,在实现红外成像的同时,保证了正常的视觉(图6)^[10]。该研究结果为开发用于红外视觉和生命科学的紧凑型红外成像设备开辟了新的机遇。

极化激元是由光和物质强耦合作用产生的一种“半光-半物质”准粒子,能够突破衍射极限将光

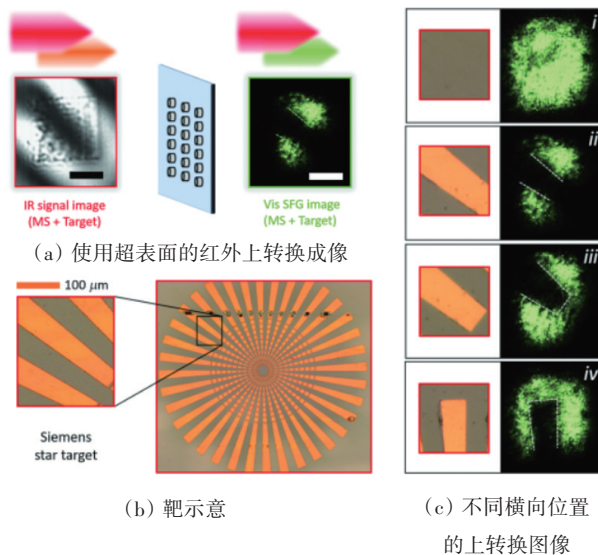


图6 红外上转换成像过程和效果示意

场压缩聚焦到很小的尺度,实现奇异的微纳光学现象和重要应用。近年来,各向异性传播的极化激元被广泛研究,尤其是具有双曲色散的极化激元,因为它具备极强的电磁场压缩能力、各向异性的传播方式、较低的传播损耗等优异性能。这些不同种类的双曲极化激元一般被归纳为2类传播模式:沿着材料界面传播的表面模式和在材料内部传播的体模式。2021年,研究人员证明了在各向异性的双折射晶体方解石中,存在第3种极化激元模式——“幽灵”双曲极化激元,这种特殊的双曲极化激元可看成是由表面模式和体模式复合而成,表现出独特的传播特性:既束缚在界面上传播,同时又在晶体内部表现出倾斜的波前传输,特别是在垂直界面的方向电场呈现“振荡衰减”的传播特性(图7)^[11]。该研究证明了储量丰富、可大规模制备的传统块体极性晶体在微纳光学领域具有极大应用潜力,在振动分子传感、亚波长信息传递、超分辨聚焦成像、纳米尺度辐射调控等诸多方面都有着重要的应用前景。

传统的光隔离器是通过使用磁光材料或磁场实现的,然而无论是磁光材料还是用来产生磁场的磁铁均无法与当前的半导体大规模集成工艺兼容,因此通过磁光材料制成的光隔离器无法有效集成在单个小芯片上。随着纳米加工工艺的逐渐成熟,科学家们已经可以将半导体激光器、光调制器、低

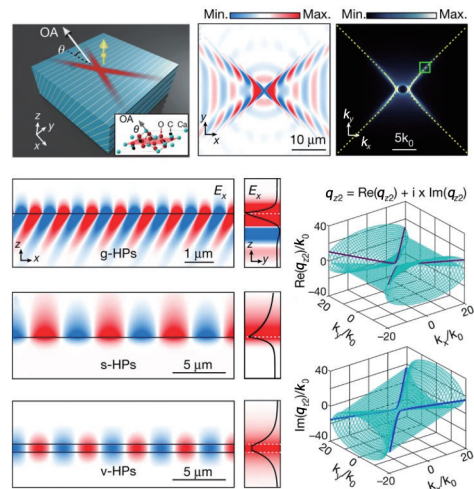


图7 块状方解石晶体界面上的“幽灵”双曲极化激元

损耗光波导以及光探测器集成在芯片上。而集成光隔离器却成为阻碍将全部光学元件集成在同一芯片上的瓶颈,也逐渐成为近几年的研究热点。2021年,研究人员结合集成光子学和微机电系统技术,利用压电氮化铝单片将光隔离器集成在了超低损耗氮化硅光子集成电路上,并实现了光隔离器信号耗损的大幅度降低——由商业化光隔离器的1 dB水平降低到0.1 dB水平(图8)^[12]。研究者在氮化硅制成的微环谐振器上等间距地集成了3个氮化铝体声波谐振器,当声波经过光学微环谐振腔的时候,声波产生的压力会改变光波导的折射率,同时也会改变波导的形状。这2个效应加在一起就对光波导产生了调制作用,而调制的频率就是声波震动的频率。

2 强激光与超快光学

超短超强激光是探索物理学、宇宙学、材料科学等未知领域的有力工具。凭借啁啾脉冲放大(CPA)技术,人们已经实现10 PW的激光能量输出(欧洲的ELI-NP装置和中国的SULF装置),并向着艾瓦级别激光峰值功率而努力^[13]。为此,研究人员提出了利用双光束泵浦广角非共线光学参量啁啾脉冲放大(WNOPCPA)的设计方案,并精心优化相位匹配,完全避免了泵浦干扰,实现了具有2个

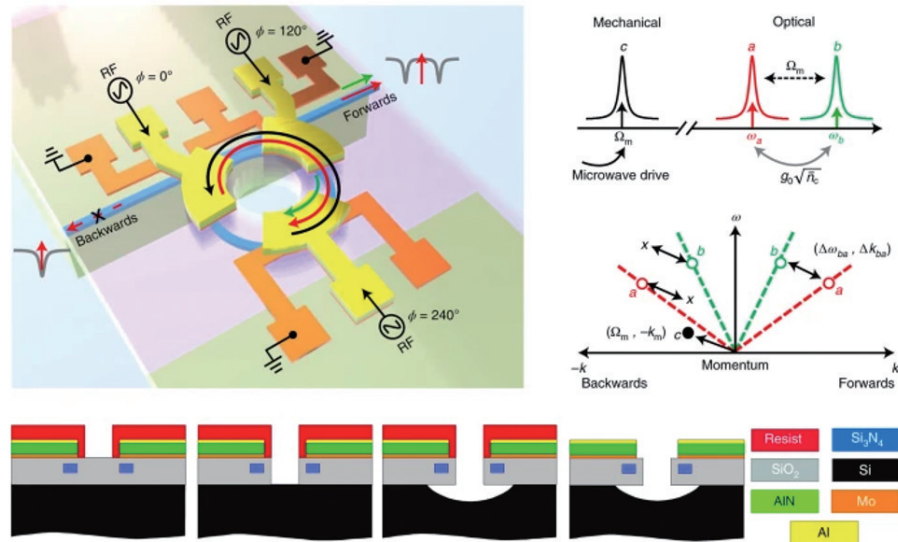


图8 无磁氮化物光隔离器原理

宽光谱的超宽带带宽,使得<10 fs的高能激光放大,与压缩技术相结合,由非线性效应引起的光谱

展宽会显著增强,模拟峰值功率可达到艾瓦量级(图9)^[14]。该设计有望推进艾瓦量级激光器发展。

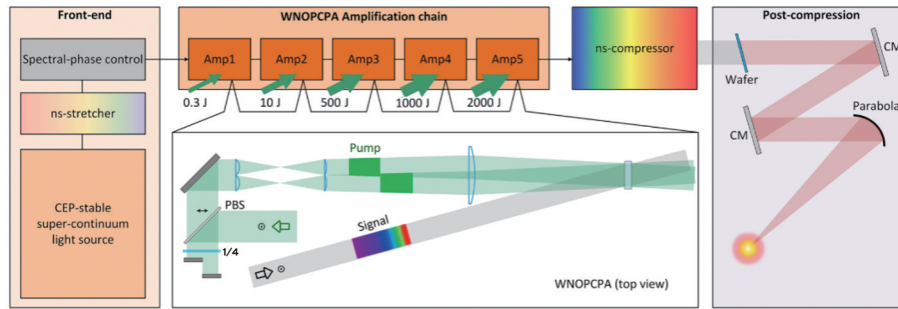


图9 WNOPCPA 概念示意

2021年,中国科学院上海光学精密机械研究所神光II设施运维团队对第九路皮秒拍瓦装置进行了光参量啁啾脉冲放大(OPCPA)技术升级、CPA能流及隔离优化、靶场透过率提升及焦斑优化等提升措施,激光信噪比和焦斑等参数获得了显著提升,为物理实验结果的提高起到了关键作用。11月,上海激光等离子体研究所在神光II第九路皮秒拍瓦装置上开展激光驱动质子加速实验并取得重大进展,获得了最高能量超过70 MeV的基于靶背鞘场加速机制(TNSA)的高能质子束输出,该结果是目

前同类机制下国内已知的最高输出能量^[15]。型投入使用。这种定向能机动短程防空系统激光武器被安装在一辆 Stryker 战车上,并首次作为陆军机动部队的一部分参加了在俄克拉荷马州西尔堡举行的战斗射击(图10)^[16]。美国陆军在一份声



图10 Stryker 激光战车

强激光在军事上也有重要的应用。2021年,美国陆军已将其首个具有作战能力的激光武器原

明中表明:“激光武器系统对无人机、火箭弹、火炮炮弹和迫击炮弹都具有杀伤力,可以用于提高美国陆军的防御能力,同时降低后勤需求和使用成本。”美国陆军快速能力和关键技术办公室计划在2022财年向实战部队交付4辆Stryker激光战车。

自由电子激光是实现X射线波段高亮度相干光源的迄今最佳技术途径,X射线自由电子激光可用于探测物质内部动态结构和研究光与原子、分子和凝聚态物质的相互作用过程,极大地促进物理、化学、结构生物学、医学、材料、能源、环境等多学科的发展。研制小型化、低成本的X射线自由电子激光成为其重要发展方向,对于拓展应用和产生变革

型技术极其重要。2021年,中国科学院上海光学精密机械研究所强场激光物理国家重点实验室利用自行研制的具有国际领先综合性能的超强超短激光装置,在基于激光加速器的小型化自由电子激光研究方面取得突破性进展(图11)^[17]。研究团队通过显著提升激光尾波场加速的电子束品质,并结合创新设计的紧凑型束流传输与辐射系统,实验上首次实现了基于激光加速器的自由电子激光放大输出,典型激光波长为27 nm,最短激光波长可达10 nm级,单脉冲能量可达100 nJ级,国际率先完成了台式化自由电子激光原理的实验验证,对于发展小型化、低成本自由电子激光器具有重大意义。

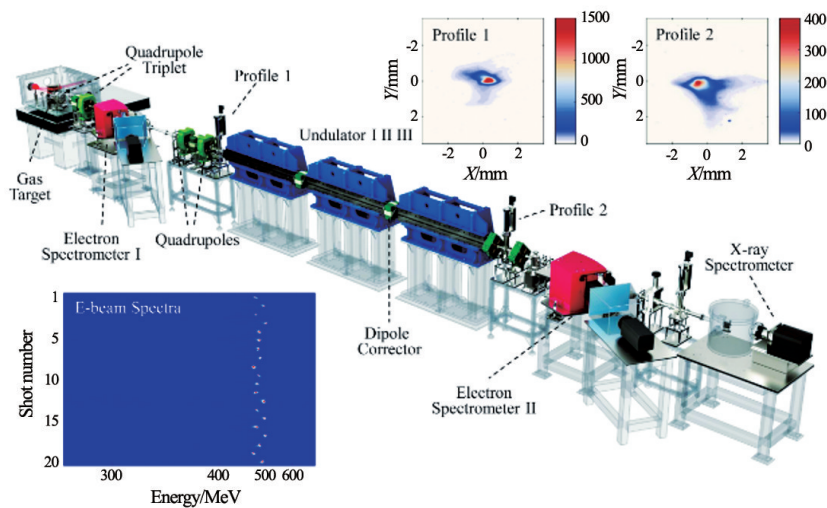


图11 小型化自由电子激光装置示意

虽然线偏振高斯模式激光器已经被很好地研究和开发了几十年,但具有空间变化偏振的矢量激光束最近引起广泛研究兴趣。径向偏振激光器可以清晰聚焦并表现出强烈的纵向场,这可用于高分辨率成像、光镊和原子捕获等应用。为了促进它们在材料加工和电子加速等领域的应用,非常需要将径向偏振激光器推入飞秒和高峰值功率范围。然而径向偏振光中包含了一切可能的线偏振分量,这从根本上限制了CPA技术在径向偏振光等矢量光场上的应用。目前已报道径向偏振光的最高峰值功率为85 GW,与现如今线偏振超快激光>10 PW的峰值功率相比,有着巨大的差距。因此,研究人员创新设计了对偏振不敏感的超快光参量放大构

型,实现了对飞秒径向偏振光>1000倍的高增益光参量放大(图12)^[18]。该研究为破解径向偏振光峰值功率的受限瓶颈提供了新的思路。在此基础上构建径向偏振的光参量OPCPA系统,有望将径向偏振光的峰值光强提升至相对论强度,为强场物理领域的研究提供新的实验手段。

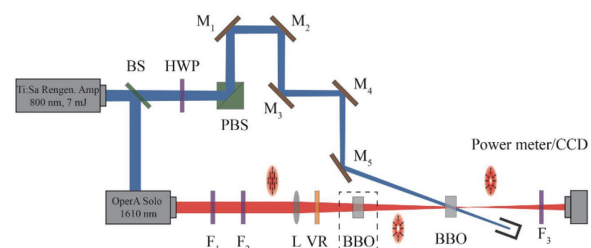


图12 径向偏振的光参量放大实验装置

近几年,光子的轨道角动量通过高次谐波过程被引入了强场科学。在强场电离中,光子的空间结构也在逐渐引起重视。相对论强度激光场的自旋-轨道态及其耦合,在光与物质的非线性相互作用中扮演着十分重要的角色,特别是其可以产生具有高轨道态、自旋态可控的极紫外光子束和电子束。但由于巨大的光子能量密度,传统的光学方法在强场领域已经完全失效。研究人员利用高分辨光电子成像技术,使用径向偏振的涡旋光束作为驱动光与超音速氙原子进行相互作用,在实验上首次实现了强激光场中光子轨道-自旋耦合过程的探测以及调控(图13)^[19]。该实验将飞秒结构光场引入强场电离过程,为极紫外光子束的超快时空调控提供了全新途径。同时该工作首次在实验上证实了在光学聚焦系统中,光子轨道自旋转化的存在,在强光场拓扑结构的原位探测方面也具有深远意义。这为强场科学以及结构光学的基础研究和应用提供了一个全新的思路,开辟了结构光场驱动的强场电离的研究。

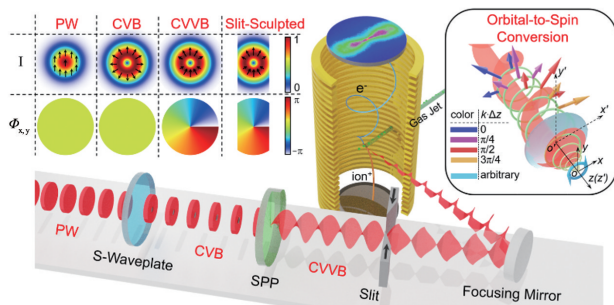


图13 光子轨道-自旋相互作用及强场电离检测实验示意

3 超分辨与成像技术

光场成像可以同时捕捉入射光线的4D信息,实现多视角观察、数字重新聚焦和深度估计。这些优势刺激了从消费摄影到生物医学研究等各个领域的应用。然而,基于微透镜阵列的传统光场成像涉及空间分辨率和角分辨率之间的内在权衡。虽然编码孔径光场(CALF)成像可以解决这种权衡问题,但现有的CALF成像系统受限于孔径编码设备的性能,很少用于宽带光和动态事件。2021年,研

究人员实现了克服这些限制的色散消除CALF成像(DECALF),它建立在2个相互关联的4f成像系统上,其中2个相同的数字微镜器件(DMD)放置在它们的傅立叶平面上。利用系统设计中的对称性,第一个DMD引起的色散由第二个DMD完全补偿,这使DECALF能够处理覆盖整个可见光谱的光,并能够以20帧/s的速度完成宽带光场成像(图14)^[20]。

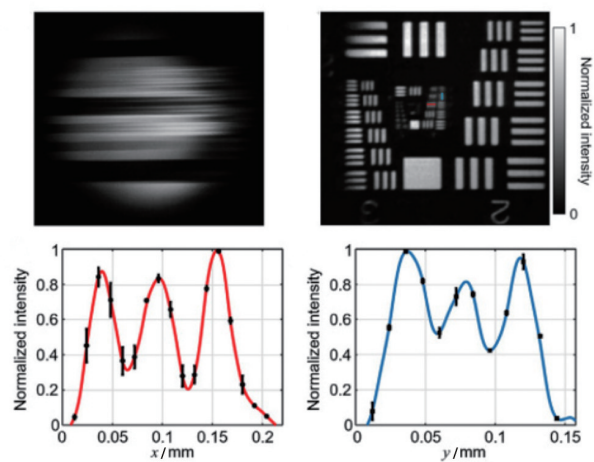


图14 DECALF系统表征

目前,克服光学衍射极限的方法主要有近场和远场2种。近场方法使用纳米级尖端扫描样品,直接与倏逝波相互作用,这种方式可实现高保真度成像,但耗时长;另一方面,受激发射损耗显微成像(STED)、随机光学重建显微成像(STORM)和结构光照明显微成像(SIM)等远场方法,都需要借助荧光染料进行标记。在半导体产业中,需要一种无需近场扫描、纳米加工和荧光标记的方式。研究人员发明了一种打破阿贝衍射极限的替代方法,能以全光学方式实现亚波长成像,该方法使用一种硅表面四波混频过程激发的局域倏逝波照明,这种激发波可将目标的部分倏逝波散射到远场,从而实现超分辨率成像(图15)^[21]。

电致化学发光是利用电极表面发生的一系列化学反应实现发光的形式。相比于传统的荧光成像技术,由于不需要光激发,电致化学发光几乎没有背景。研究人员通过联用自制的具有皮安水平电流检出能力的电化学测量系统以及宽场超分辨光学显微镜,搭建了一套高效的电致化学发光控

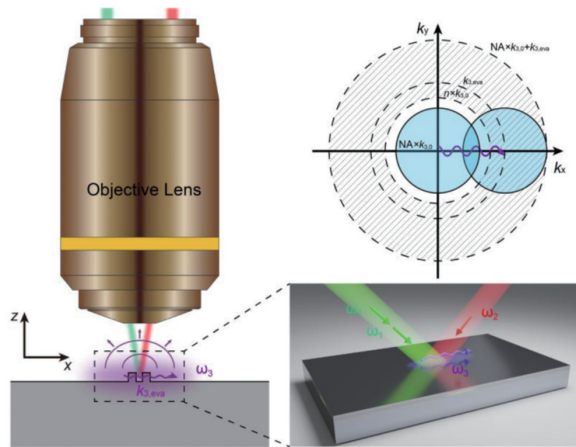


图 15 基于非线性激发倏逝波的远场超分辨成像工作原理

制、测量和成像系统,首次实现了单分子电致化学发光信号的宽场空间成像,并在此基础上成功突破了光学衍射极限,第一次实现了电致化学发光的超分辨成像(图 16)^[22]。单分子电致化学发光成像将传统上数百纳米的电致化学发光显微成像空间分辨率提升至前所未有的 24 nm。在生物细胞显微成像上,该技术有着同荧光超分辨显微镜相媲美的空间分辨率,同时避免了激光和细胞标记的使用。这项技术将作为一项研究工具为化学反应位点可视化、单分子测量、化学和生物成像等领域提供新的可能。

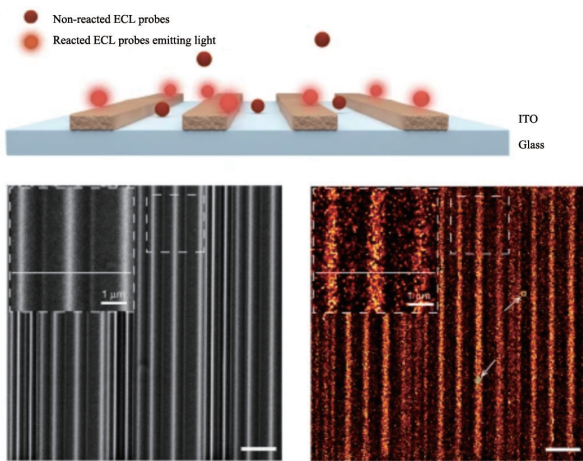


图 16 钢锡氧化物结构的单分子电致化学发光成像

传统光学成像手段只能对相机视场范围内的目标物体进行成像。非视域成像利用单光子探测技术记录单个光子的飞行时间信息,结合相关计算

成像算法,可以实现对相机视场范围外的目标成像。传统的非视域成像实验受限于单光子探测器的时间分辨能力,其成像精度仅能达到厘米级。研究人员利用脉冲泵浦频率上转换探测技术,实现了时间分辨能力达到 1.4 ps 的近红外单光子探测器,使得所搭建的非视域成像系统成功对视域外毫米级大小的字母实现了高精度非视域成像,是目前非视域成像的最高精度(图 17)^[23]。研究人员还针对非视域探测过程中激光回波弱、信噪比低,导致难以获得高质量反演重构结果的问题,提出了一种基于信号与目标联合正则化的创新重建方法,该方法重构的非视域目标不但具有清晰的视觉效果,重建误差与现有方法相比也有显著降低(图 18)^[24]。

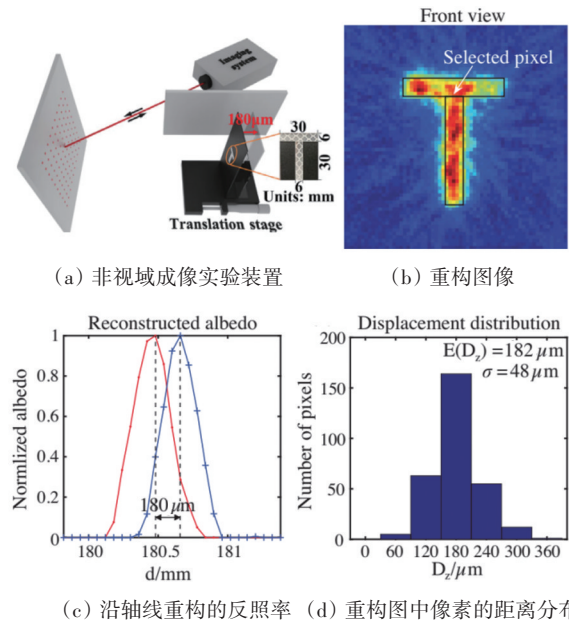


图 17 非视域成像实验和重构图像

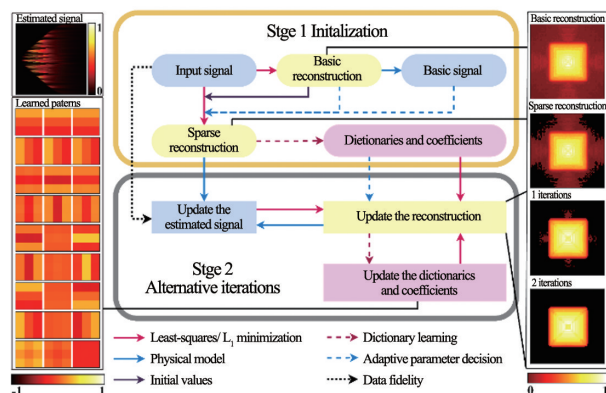


图 18 基于信号与目标联合正则化重建算法

长期以来,科学家一直追求对活体高速、高分辨率、长时观测能力。然而受到三维组织分布、光学像差、光毒性等诸多问题的限制,在哺乳动物活体环境下进行高速亚细胞分辨率长时程观测始终悬而未决,极大地制约了脑科学、肿瘤学与免疫学的深入研究。对此,研究人员提出了数字自适应光学扫描光场迭代层析成像技术(DAOSLIMIT),在 $225\ \mu\text{m}\times 225\ \mu\text{m}\times 16\ \mu\text{m}$ 的成像视野范围内,以横向 $220\ \text{nm}$ 和轴向 $400\ \text{nm}$ 光学衍射极限分辨率,将以毫秒级活体三维连续观测时长从数分钟提高到小时级,活体成像时空分辨率提升2个数量级,光毒性降低3个数量级,为揭示哺乳动物活体多细胞、多细胞器间的相互作用提供了全新路径(图19)^[25]。

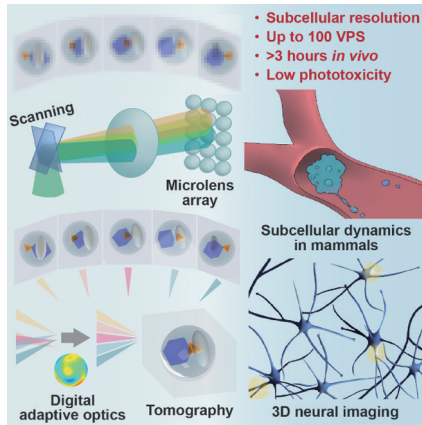


图19 DAOSLIMIT概念原理与应用

生物组织的精细结构复杂多样,如何在三维空间用光学方法对其进行全面准确观测是公认的难题。形态复杂的神经元是大脑基本的功能单元,如何获取其完整结构对现有技术提出了极大挑战。对此,研究人员提出了一种高清晰度、高通量的光学层析显微成像新方法——线照明调制光学层析成像(LiMo),该方法巧妙地将线照明光强的高斯分布作为一种天然的照明强度调制模式,然后采用多线探测的方式一次性记录这些被不同强度调制的信号,从而获得清晰的焦面光学层析图像(图20)^[26]。研究者基于此进一步发展了高清荧光显微光学切片断层成像技术(HD-fMOST),将全脑光学成像从高分辨率提升到高清晰度的新标准,该技术极大地提高了全脑光学成像的数据质量,在数据存储、传输、处理和分析等方面显著提高了效率。

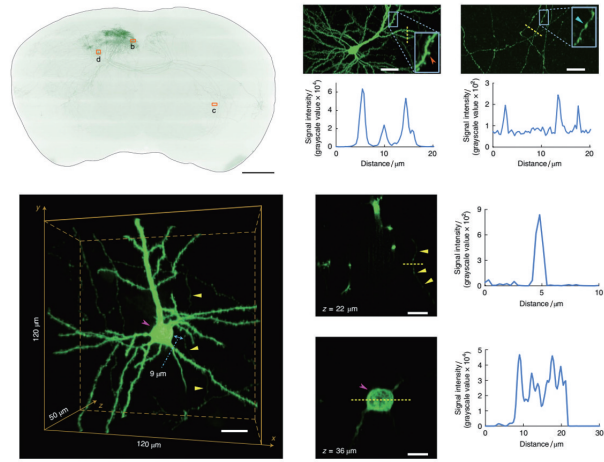


图20 HD-fMOST对稀疏标记特定神经元的小鼠全脑进行高清三维成像的结果

多维光学成像能够同时获取探测目标多个维度的信息,例如空间、时间、光谱、偏振等,为观察和分析探测目标提供了更加充分的条件。超快光学成像作为多维光学成像中一种具有超高时间分辨率的成像技术,可以捕获皮秒甚至飞秒时间尺度的超快动力学场景。近年来,超快光学成像已经获得迅速发展,在众多超快现象的研究过程中,人们格外关注待测动态场景的空间立体分布及光谱信息,这些信息对于观察超快现象发生的动力学过程并探索其内在的机制尤为关键。然而目前还没有一项能够在单次曝光下同时获取时间-空间-光谱(x, y, z, t, λ)五维信息的超快光学成像技术。为此,研究人员发明了一种光谱立体压缩超快成像技术(SV-CUP),该技术将飞行时间压缩超快成像(ToF-CUP)和高光谱压缩超快成像(HCUP)这2种技术巧妙地结合,提供了一种拓展超快光学成像维度的新方案,实现了立体动态场景的高光谱超快成像,表现出了令人振奋的五维成像性能(图21)^[27]。

4 量子计算与光通信

随着人们越来越依赖数字网络,快速生成大量高质量的随机数成为网络安全的迫切需要。目前,随机数通常是“伪随机”,由确定性算法生成。因此,它们使信息安全和密码学应用程序易受攻击,

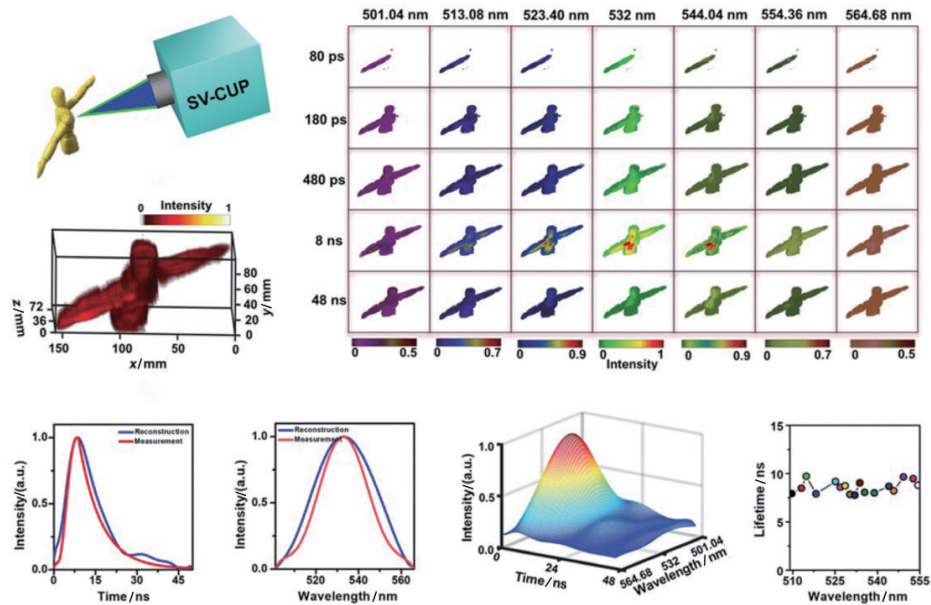
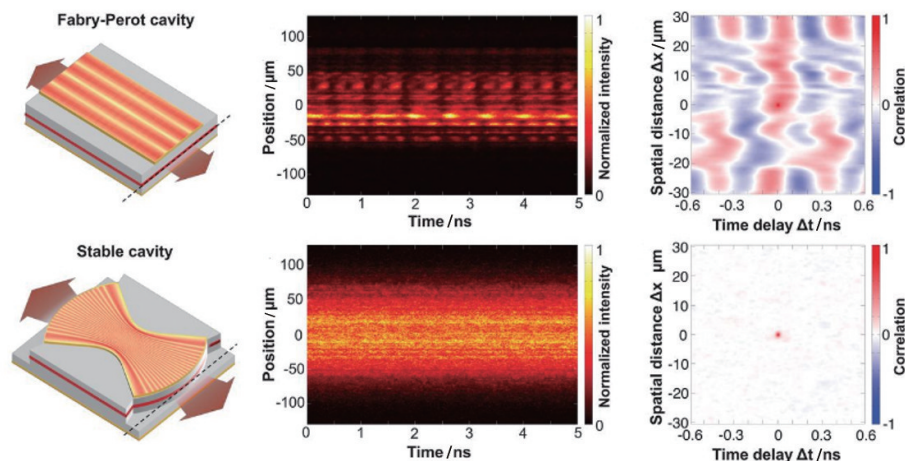


图21 对三维人偶模型的SV-CUP五维成像

并可能在其他应用程序(如随机建模和量子模拟)中产生不准确或错误的结果。此类敏感应用所需的真随机数是通过真实物理现象进行采样生成的,但在大多数情况下,生成率低且成本高。为此,研究人员设计了一种芯片级激光二极管,该二极管可以超高速率生成随机位,该系统利用一个带有特殊沙漏型腔的激光器产生随机图案,这些图案是由光线在腔内相互反射和相互作用形成的(图22)^[28]。通过读取模式,系统同时生成许多随机数序列。该方法不仅可以极大地提高单个通道中的随机比特

率,而且还可以提供数百个通道用于同时生成独立的比特流。该方法离线后处理可实现每秒250 TB的总比特率,比当前的后处理记录高出2个数量级。

量子中继可以解决光纤直接传输的指数损耗问题,实现远程的量子纠缠分发,是构建大尺度量子网络的基础。目前已有的量子中继基本链路的演示均基于发射型量子存储器,其纠缠光子是由存储器本身发射出来的,难以同时支持确定性光子发射和多模式复用存储,从根本上限制了纠缠分发的速率。基于吸收型量子存储器的量子中继可以解



(a) 传统的边缘发射半导体激光器

(b) 新的系统设计

图22 传统的边缘发射半导体激光器和新的系统设计

决这一问题,其结构同时兼容确定性光子源和多模式复用。2021年,中国科学技术大学研究人员利用固态量子存储器和外置纠缠光源,首次实现2个吸收型量子存储器之间的可预报量子纠缠,演示量子中继的基本链路。实验实现了4个时间模式的

复用,实测的纠缠保真度达到了80.4%。该研究证实了基于吸收型量子存储构建量子中继的可行性,首次展现了多模式复用在量子中继中的加速作用,为实用化高速量子网络的构建打下了坚实的基础(图23)^[29]。

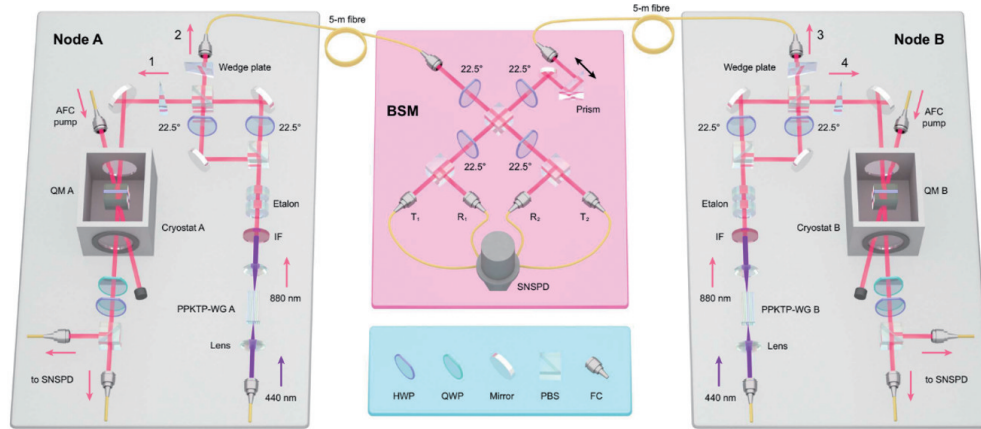


图23 基于吸收型量子存储器实现量子中继的装置示意

量子密钥分发(QKD)是在2个远程用户之间建立一个共享位串,可用于加密。与传统密码学不同,QKD可以抵抗量子计算机的攻击。单光子通过光纤等通信通道发送时,会被介质散射,到达线路末端的概率很小。严格的定理将点对点QKD传送的安全比特数限制为 1.44η ,其中 η 是信道传输,这种“无中继密钥容量”一直被认为是当今技术下QKD的极限,直到双场QKD协议的提出,该协议提供了与信道损耗的平方根成正比的关键速率。然而由于双场QKD基于一阶干扰,对相位稳定信道有很高的要求。这需要对由振动和温度波动等因素引起的长距离相变进行主动补偿。虽然已经使用时间复用参考信号和编码位演示了补偿技术,但由于其长度相关的噪声,这些技术在距离上受到了根本性的限制。研究人员开发了一种新技术来解决这个问题,即双频段稳定。时分复用稳定技术的主要限制是随着光纤长度的增加需要更亮的参考信号,这会导致双重瑞利背向散射,从而污染微弱的量子信号。双波段稳定克服了这个问题,使用额外的多路复用波长作为参考来消除快速变化的波动,让原始相位参考进行更简单的微调任务(图24)^[30]。由此,研究者实现了第一个超越600 km和

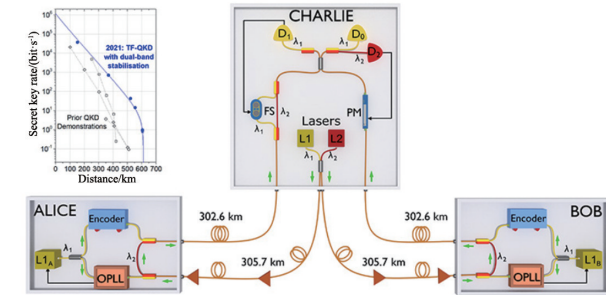


图24 双频段稳定实验装置

100 db损耗障碍的基于光纤的安全量子通信系统。

量子计算需要构建能够最大限度地减少能量耗散并保护脆弱的量子态免受嘈杂环境影响的设备。一种方法是依赖光诱导的、受对称保护的拓扑光电流,其理论上不受噪声影响,并且能够通过量子相干运动以最小的能量损失实现手性转换。研究人员开发了一种光致对称开关,其中光以选择性模式对称扭曲狄拉克材料的晶格,将狄拉克点连贯地分裂为2对外尔点,光生巨大的低耗散电流。研究者使用光和太赫兹脉冲来驱动相干红外和拉曼声子展示了这种光驱动拓扑控制,这些反过来又诱导了ZrTe₅中从狄拉克到外尔半金属态的拓扑相变(图25)^[31]。实验结果和建模表明,通过破坏反转对称性的光诱导模式选择声子泵浦可以动态地产生

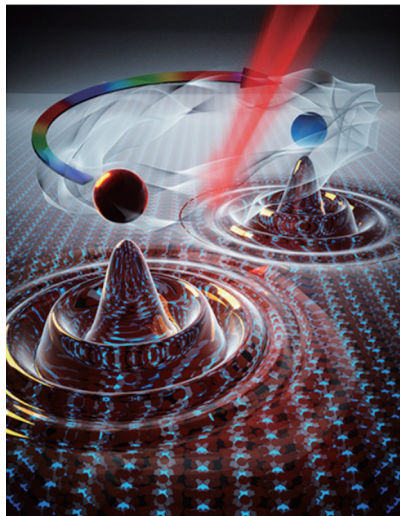
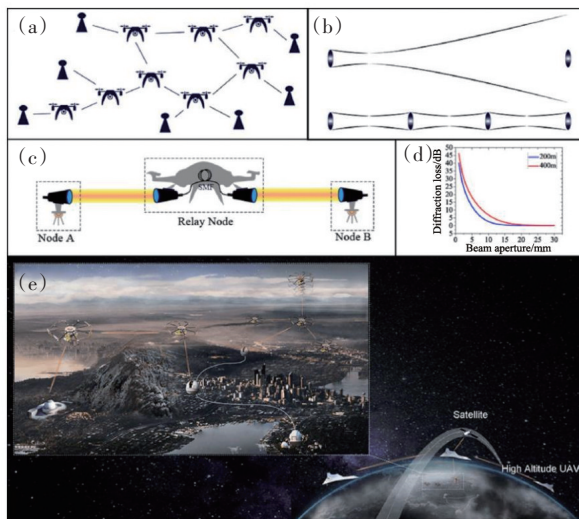


图 25 ZrTe₅狄拉克材料中的光诱导外尔点

2 对外尔点。这种声子太赫兹光控制为外尔节点的相干操纵和稳健的量子传输开辟了新天地,而无需应用静电或磁场。这一发现为自旋电子学、拓扑效应晶体管和量子计算带来了巨大的前景。

量子纠缠分发已在光纤链路或者卫星和地面之间的自由空间链路获得成功。其中,光纤链路可以利用现有光纤网络,但远距离传输受到光纤固有传输损耗的限制。卫星能够实现远距离传输,但又受到固定轨道约束,单颗卫星对于特定的地面基站只能在有限时间内建立通信。相比于这 2 种量子链路,以无人机为代表的移动信息平台,可以发挥其机动灵活、组网迅速、成本低廉等优势,与已有的地基、天基量子链路功能互补,有可能构建成即搭即撤的另一种移动量子网络,但难点在于要在无人机有限的载荷能力范围内实现整套量子通信器件搭载。为此,研究人员已于去年以光学超晶格为核心元件研发了高效集成的偏振纠缠源,配置轻量化高精度跟踪瞄准系统,成功搭载于自主开发的小型多旋翼实验用无人机,实现了飞行中的无人机与地面之间单光子链路连接和光量子纠缠分发^[32]。以此为基础,该团队进而实现了飞行中无人机之间的光量子链路,完成了移动量子节点数“从一到二”的跨越,基于此实现了首个自由空间光学中继的纠缠分发(图 26)^[33]。该工作将量子纠缠光源和光中继系统分别搭载在 2 架无人机上,在数千克的载荷限制内实现单光子的高精度跟瞄接收和重新发射。



(a) 由多节点结构组成的量子网络;(b) 节点之间的中继收发器;
(c) 光中继示意;(d) 衍射损失随光束孔径的变化;
(e) 使用无人机的移动量子网络方案

图 26 基于移动无人机节点的量子网络和物理实现

该工作有望从根本上解决自由空间量子链路中衍射损耗的核心问题,并可以衍生出复杂拓扑结构网络,奠定了多节点移动量子网络的基础。

5 生物光子学

超过 5% 的世界人口患有致残性听力障碍,大多数听力障碍是所谓的感音神经性听力障碍,这种情况源于耳蜗的紊乱。助听器和电动人工耳蜗是大多数人听力康复的关键手段。然而,人工耳蜗的听力远非正常,在日常生活的嘈杂环境中难以理解语音,难以跟踪旋律和欣赏音乐。研究人员提出了结合光遗传学和专门的光学人工耳蜗的听力恢复方法,他们开发了多通道光学人工耳蜗,使用微型蓝光发光二极管(μ LED)来刺激光遗传学修饰的神经元,重量轻(小于 15 g)、电池驱动的无线可控系统从外部捕获和处理声音,并以无线方式操作植入的 μ LED。实验表明,光遗传学刺激的光谱选择性接近正常听力的光谱选择性,并且大大超过了最先进的电子耳蜗植入物的光谱选择性。另外最近发现了通道视紫红质,使红光刺激成为可能,可以保证更好的光谱选择性,降低对神经细胞的潜在光毒

性。为此研究者开发了结合激光二极管和聚合物波导的实验性红光光学人工耳蜗。该系统的第一次人体试验计划在2025年底之前开始(图27)^[34]。

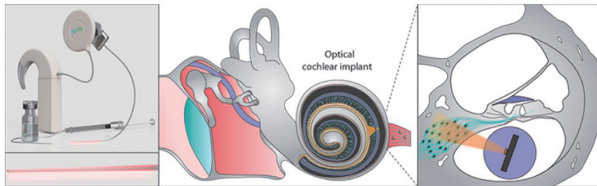


图27 光遗传听力恢复系统

快速、准确检测病毒对于遏制当前和未来大流行至关重要。研究人员开发了一种可以在无标记的情况下快速识别COVID-19病毒的**光学方法**，将空间光干涉显微镜(SLIM)与深度学习算法相结合，并使用深度学习进行检测和分类。SLIM不仅可以检测到病毒，还可以区分不同类型的病毒。尽管单个病毒低于显微镜的衍射极限，但SLIM检索到的光程长度信息揭示了与单个和聚集病毒颗粒相关折射率的纳米级分布，这一相位信息可用于提取特定的生物物理信息，特别是干质量密度参数，该参数可有效地作为不同类型病毒的标记(图28)^[35]。

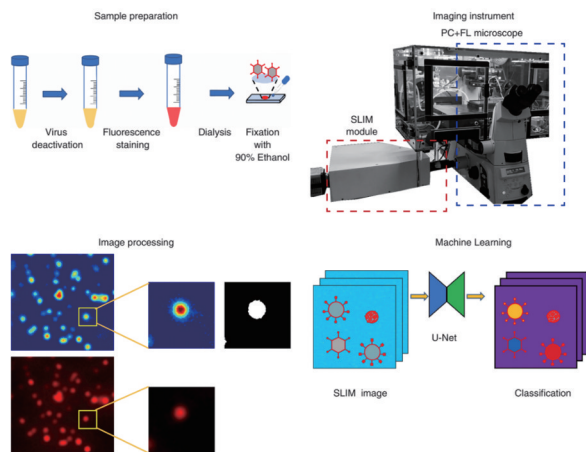


图28 利用SLIM和机器学习进行病毒粒子分类

人造智能皮肤是指能够模仿或者增强人体皮肤功能的一系列柔性功能元器件，在健康监测、人机交互、增强现实、义肢和仿生机器人等诸多领域都有重要应用。尽管柔性电子学在人造智能皮肤设计方面已经取得了巨大成功，以光子作为信号载体的柔性光子学由于具有非侵入性、超灵敏性、无电磁干扰以及并行处理等优点，在新型人造皮肤的开发和应用

方面展示出巨大的前景。研究人员结合有机激光材料在高灵敏传感和可控加工等方面的优势，首次提出了基于柔性有机微纳激光阵列实现人造光子皮肤的新思路，研究者开发了一种双层电子束直写技术，实现了全有机柔性微腔激光阵列的大规模制备，进而设计了基于耦合腔结构的光子学传感器网络，最终展示了其类皮肤的机械传感应用(图29)^[36]。

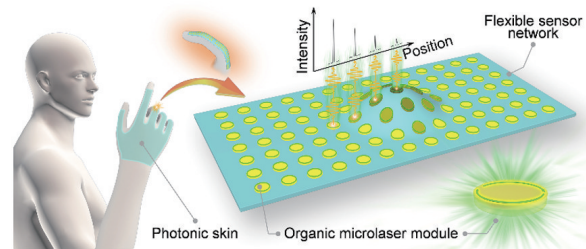


图29 基于有机微纳激光阵列实现人造光子皮肤概念

传统光学镜是越亮越清晰，但太强的光束对微小的细胞具有杀伤性，人类往往只能在看“活细胞”和“看得更清楚”之间二选一。通过操控量子，利用量子幽灵般的超距作用，研究人员发明了能够将活着的细胞结构细节看得更清晰的显微镜，这种显微镜巧妙地突破了传统光学镜的瓶颈，可以看到其他方式无法揭示的生物结构细节(图30)^[37]。研究者使用了一种带有2个激光光源的显微镜，通过在激光束中的光粒子中引入量子纠缠“挤压”了其中一束光线，使光子被耦合成相互关联的对，其中任何具有不同于其他光子能量的光子都被丢弃，而不是被配对。这一过程降低了光束的强度，同时降低了其噪声，从而可以进行更精确的成像。

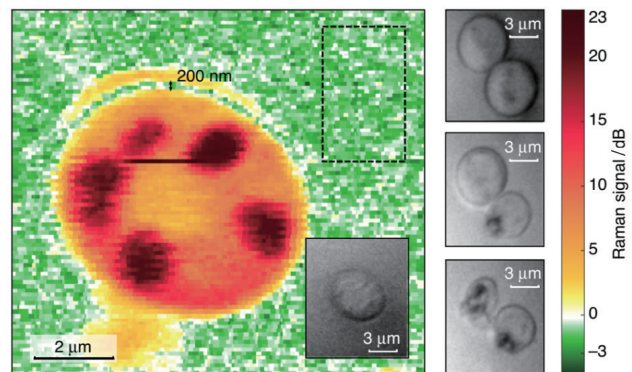


图30 活酵母菌细胞的量子增强成像

肥胖是一个非常严峻的全球性公共健康问题,是糖尿病、心脑血管疾病以及多种肿瘤的危险因素。光动力疗法(PDT)和脂肪棕化诱导是两种独特的减肥方法,前者起效迅速但范围小,后者作用相对缓慢但影响广泛,它们存在互补性。由此,研究人员提出了一种新颖的光声分子成像护航下的光动力/棕化抗肥胖策略,并研发了具有白色脂肪靶向的乙肝病毒核心蛋白(HBc)复合物(图31)^[38]。所采用的光声分子影像技术不仅能精确地示踪HBc复合物的脂肪归巢,反馈光动力治疗的最佳时间窗,而且从分子的角度无创地监测了整个治疗过程,以评估肥胖治疗效果。在脂肪棕化光声成像方面,动态无损可视化了脂肪棕化的2个关键生理特征——血管生成和脂质代谢。

光镊技术于1986年发明,并获得2018年诺贝尔物理学奖,它是采用以芯片为基础的光子共振捕获技术的光阱,能对纳米至微米级的粒子进行操纵和捕获。2021年,该技术领域涌现出很多新的成果。研究人员发明了一种激光镊子,可以精确地重新定位单个病毒,使其瞄准细胞的特定部分,并在1 min内将受损或不完整的病毒从数千个其他样本中分离出来^[39]。研究人员开发了一种光制冷光镊,它利用固态光学制冷和热电泳技术在激光产生的

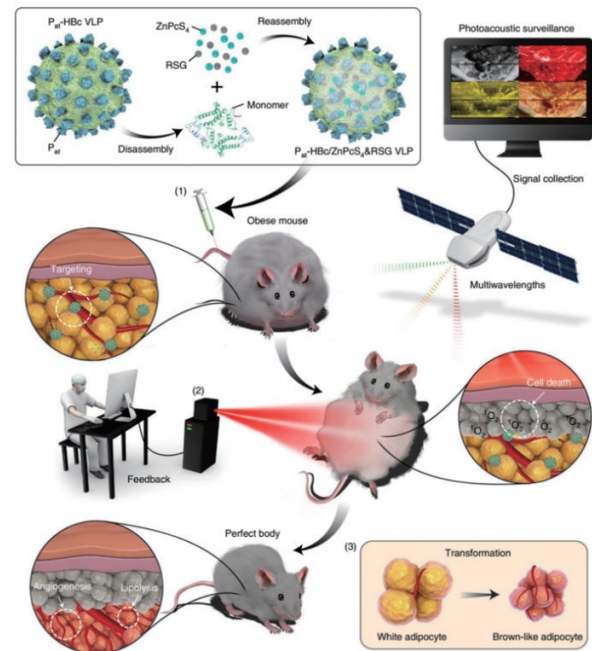


图31 光声分子成像护航下的脂肪
光动力/棕化抗肥胖策略

寒冷区域捕获粒子和分子,激光制冷可以避免光热加热,使用弱聚焦激光束可以进一步减少光对目标物体的热损伤(图32)^[40]。研究人员开发出了光镊耦合拉曼光谱,可直接探测与帕金森病密切相关的固有无序蛋白(IDPs)的结构特征,以单个蛋白分子为研究对象,从生理浓度上对IDPs进行了研究^[41]。

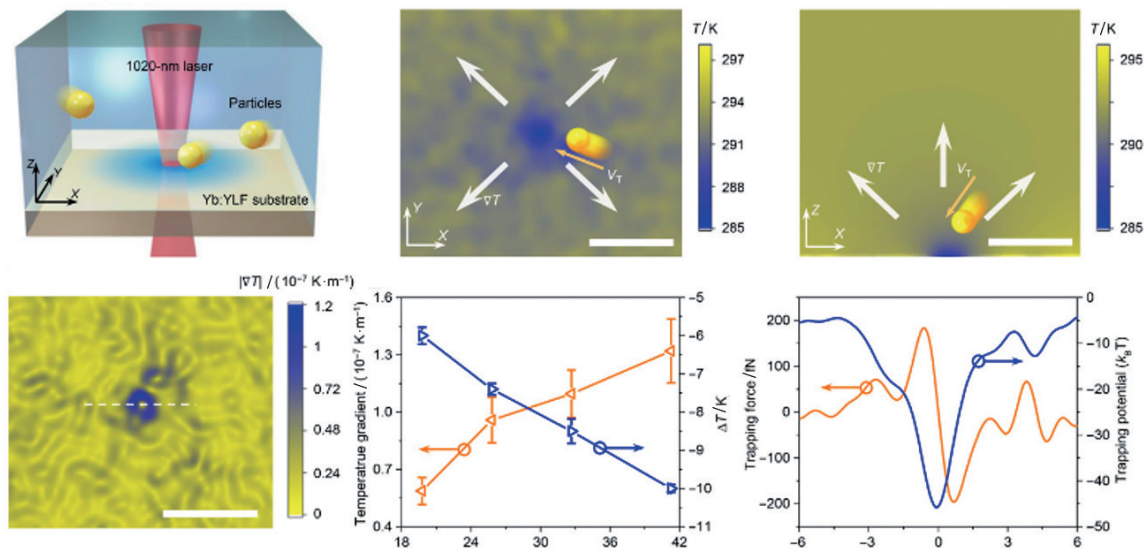


图32 光制冷光镊工作原理

6 量子光学

人类正稳步迈向一个以量子物理为基础的技术时代。但要做到这一点,首先必须掌握使光子与原子相互作用的能力。这已经在空腔量子电动力学(QED)领域一定程度上实现了,但还有很长的路要走。目前的光与物质相互作用仅限于单个原子,这限制了人们在涉及量子技术的复杂系统中研究它们的能力。研究人员首次发现了一种让光子与成对原子相互作用的方法,这一突破有望促进量子技术的发展(图 33)^[42]。研究人员使用了被称为费米气体的物质,它由原子构成,在没有光子的情况下,费米气体可以在原子相互作用非常强烈的状态下制备,在此情况下,这些原子会形成松散的结合对,当光进入气体时,其中一些原子对可以通过吸收光子而变成化学结合分子。

虽然单个光子的量子态很容易被调控,但是如何有效控制光子之间的相互作用却是量子光学研究的核心之一,也是实现量子技术的最大困难之一。为此,研究人员研发了新型的纳米超材料,在量子光学中引入一个新的自由度,从而首次实现了对光子之间量子相互作用的任意操控,为量子科学和技术的发展提供了一个崭新的思路(图 34)^[43]。研究者提出核心器件的属性和光子的量子本性在某些场合是不可区分的,从而可以等效地相互转

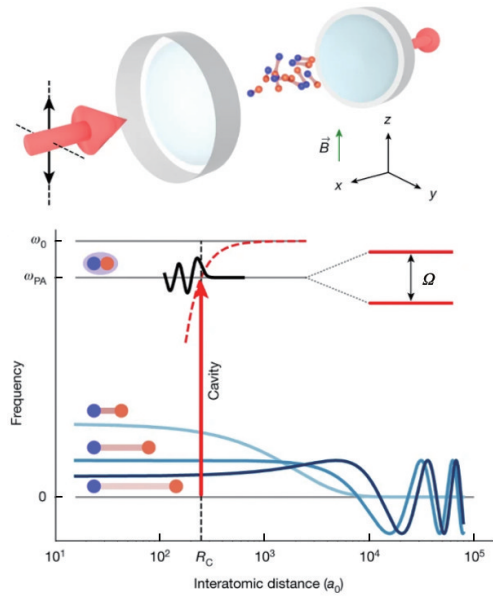


图 33 费米气体空腔实验概念

化,即原理上可以通过人工设计量子器件的属性作为新的自由度来等效地改变光子的量子本性。由此,研究者将纳米超材料的空间旋转自由度设计为光子量子相互作用的新自由度,通过旋转纳米超材料或者改变单光子的偏振,实验上首次实现了连续和动态地控制双光子的量子干涉,从而等效地实现了对光子量子本性和光子之间量子相互作用的任意操控。这使得光子可以表现得有时像玻色子,有时又像费米子,或者介于两者之间的任意状态,从而超越了光子固有的玻色子本性。

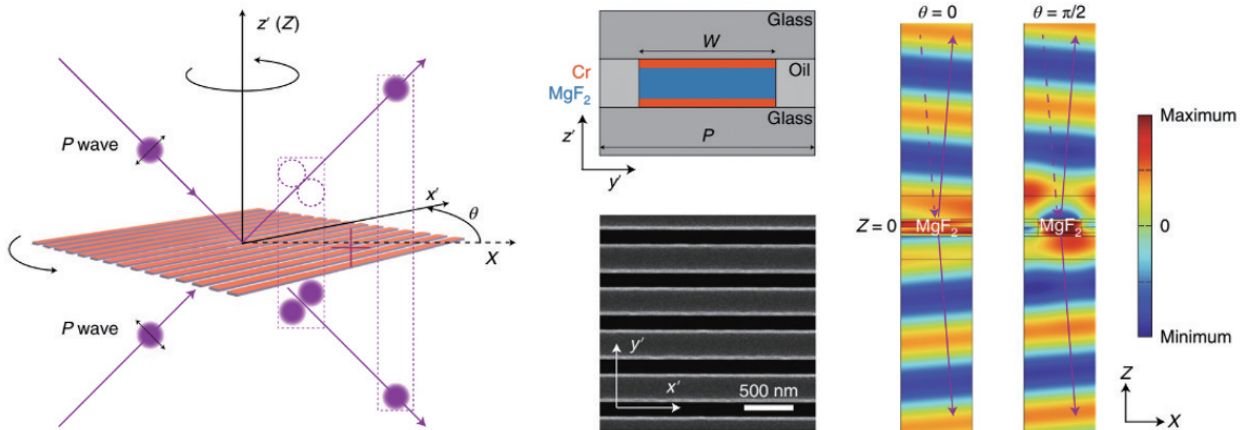


图 34 非么正超表面光量子干涉中引入一种新的自由度

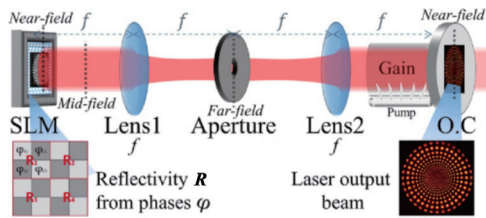


图 37 数字简并腔激光器

且可以高保真地生成极高阶的激光模式。

主动式遥感技术中,激光雷达因具有远距离非接触式探测、高时空分辨率等特点而备受关注。现有的气体探测激光雷达主要包括 2 种:一种是距离分辨差分吸收激光雷达,通过比较待测气体光谱强吸收位置和弱吸收位置的激光后向散射信号强度的差异,实现有距离分辨率的气体浓度遥感,但是数据反演时需要已知气体光谱线型。另一种是路径积分差分吸收激光雷达,探测远端目标反射信号的强度来实现。当增加激光波长采样数量时,可获得路径积分的平均光谱,但无法获得距离分辨信息。2021 年,研究人员发明了一种单光子探测自由空间区段光谱遥感技术,实现了自由大气中二氧化碳和半重水(HDO)有距离分辨率的光谱遥感分析(图 38)^[47]。该系统采用 30 组探测激光和参考激光时分复用,相当于集成了 30 套双波长差分吸收激光雷达。通过脉冲式光纤放大器的优化,该系统可实现光通信波段中的多种气体光谱的遥感分析。

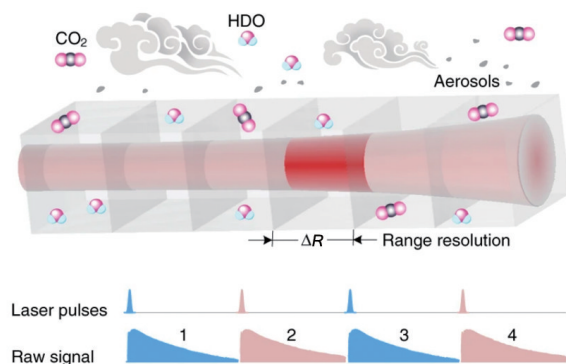


图 38 探测激光和参考激光时分复用

8 涡旋光

光学涡旋光束由于其拓扑-相位奇异性而引起了人们的广泛关注,其奇异性与轨道角动量和环

形强度分布有关。开发涡旋光束的关键挑战包括设计其特性及限制或抑制不利的衍射效应。为此,研究人员将光学针状光束(OPB)的概念和方案扩展到携带轨道角动量的光学光束,在理论和实验上证明了针状光学涡旋光束(POVBs)(图 39)^[48-49]。POVBs 是通过调制实空间中初始单色平面波的相位和振幅分布而产生的,通过在螺旋相结构上叠加一个径向对称的幂律相,嵌入具有任意拓扑电荷的轨道角动量项,从而获得相结构。振幅结构经过适当设计以控制传播范围内的峰值强度演变并增加抗衍射特征。实验中,研究者通过基于空间光调制器的整形技术调制输入光束的相位来实现 POVBs,从而对幅度和相位进行编码。该研究扩展了对针状反衍射涡旋光束的理解,并在长距离自由空间光学中建立了奇异光学和结构光之间的联系。

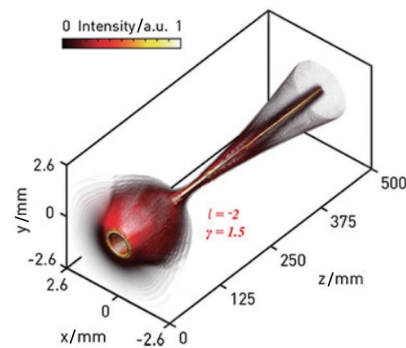


图 39 针状光学涡旋光束动力学表征

9 孤子光学

孤子是在自然界中发现的自持粒子状波包。早期对孤子的研究假设了一种无损介质以及色散(或衍射)效应与非线性之间的保守平衡。然而后来发现,如果外部能源持续供应给系统,在存在耗散的情况下也可以形成孤子。驱动光腔中的耗散孤子引起了科学家很大的兴趣,因为它们能够实现稳定的光频率梳,频率间隔超过一个倍频程,适用于波形合成、大容量电信、天体物理光谱仪校准、原子钟和双梳光谱等。研究人员展示了一类新的光学孤子的理论和实验观察,其特征是在具有强光谱滤波的正常色散谐振器中具有大且正啁啾的脉冲。尽管耗散很大,但啁啾脉冲在低品质因数谐振器中

仍然保持稳定,这为非线性模式的形成提供了新的机会(图40)^[50]。通过将脉冲生成扩展到正常色散系统还可以使其支持更高的脉冲能量,从而使超短脉冲和频率梳源成为可能,进而使其可以更简易地应用于光谱学、通信和计量学等领域。

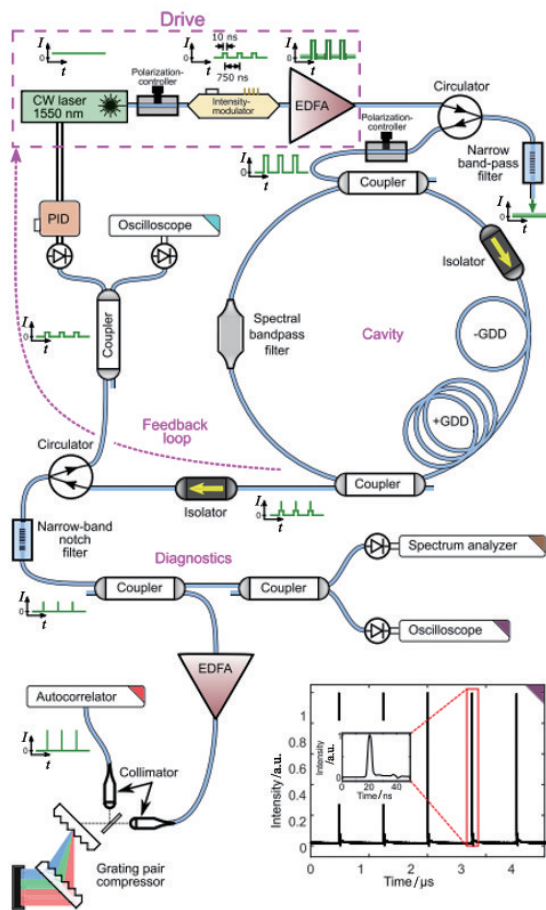


图40 啁啾耗散孤子的实验原理

时域折射是指光束在折射率时变介质中通过时域边界时在时域坐标轴上发生折射现象。时域边界由于打破时间平移对称性,导致光通过其传输时会发生频率变化,出现光子加速现象。因此关于光束与时域边界相互作用的光学性质研究已渗透时域全反射、光学非互易性、负折射、光子拓扑绝缘体等学科中。光畸波起源于海洋动力学畸形波的研究,它的存在会对光学器件造成损伤,但是通过对时域边界进行调控,可在脉冲放大、高阶鬼成像等领域有着重要的应用价值。2021年,研究人员对高功率脉冲在非线形反常散射介质中与时域边界相互作用的光学性质进行了研究,发现对入射脉冲的脉宽与

功率值进行合理调控,可在时域边界处形成表面光孤子^[51]。该类光孤子极其不稳定,易受到环境等扰动而实现光子加速。研究者获得了巨大超热光统计,实现光畸波的产生与调控。该研究揭示了在具有事件视界的非线性光学系统中一种全新产生光畸波的机制,并在时域边界表面光孤子理论和光畸波物理学之间建立了联系,在高阶鬼成像、频率转换、全光信号处理等方面有着重要的应用价值。

10 人工智能

几十年来,科学家一直在努力理解控制超短脉冲与物质相互作用的复杂非线性动力学。2021年,研究人员演示了神经网络如何精确模拟和预测光纤中复杂的非线性动力学,包括光学杂散波生成和宽带超连续谱生成^[52]。当超短脉冲在光纤中传播时,线性和非线性相互作用会引起其时间和光谱特性的复杂变化,这对于使用传统方法进行建模和模拟是具有挑战性的。研究人员应用深度学习技术来克服这个问题,并表明可以训练神经网络来识别非线性传播中固有的复杂时间和频谱模式(图41)^[53]。该技术使用具有内部存储器的专用递归神经网络架构。这种网络具有时间维度,通常用于语言处理、语音识别或预测问题等任务。它们既能识别特定的动态模式,也能了解模式如何随着距离的推移而演变。研究者将这个递归神经网络应用于非线性光纤中的脉冲压缩和超宽带超连续谱产生的动力学预测中,取得了很好的效果。

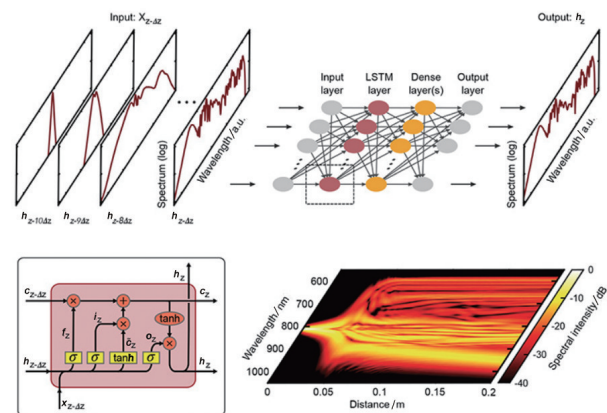


图41 递归神经网络及预测

类脑智能是受大脑神经运行机制和认知行为机制启发,以计算建模为手段,通过软硬件协同实现的机器智能。实现类脑智能是人类长期以来一直追求的梦想,国务院《新一代人工智能发展规划》提出了2030年类脑智能领域取得重大突破的发展目标。2021年,研究人员突破了信息传感、存储和计算之间信息交换时存在的性能瓶颈,创新性地提出了一种同质晶体管-存储器架构和新型类脑神经形态硬件(图42)^[54]。为了实现存算一体的类脑神经形态硬件,存储器阵列通常需要与外围电路连接,但是器件集成及其相互耦合限制了类脑芯片的设计。为此,研究者提出了二维材料与铁电近邻耦合实现感-存-算一体的新方法。一方面,固定的铁电极化等效为非易失栅极电场对二维材料沟道进行电学掺杂,从而构建pn结、结型晶体管(BJT)等器件,用于构建外围电路;另一方面,铁电畴的极化翻转调制能够改变BJT的结区内建势垒,用于构建非易失存储器,并提升高低阻值比,以实现存内计算。研究者基于同质晶体管-存储器架构还提出了一种三维集成结构,对推动基于二维材料的新型神经形态硬件的产业化和应用具有极其重要的意义。

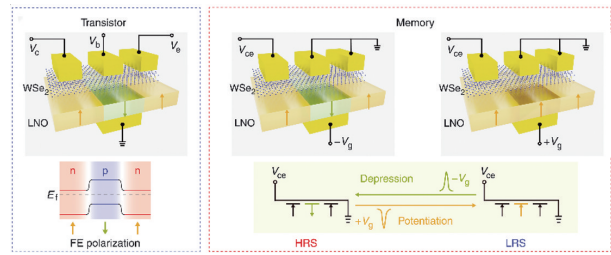


图42 同质晶体管-存储器架构的原理及器件结构

11 光学传感

螳螂的眼睛非常擅长准确捕捉细微的颜色渐变,受其启发,研究人员创造了一种模仿螳螂眼的新型有机电子传感器,称为SIMPOL传感器(图43)^[55]。该传感器小到可以装在智能手机上,但能够进行高光谱和偏振成像。智能手机中使用的电荷耦合设备只有3个光谱成像传感器,分别检测红色、绿色和蓝色,且只有2个偏振通道,SIMPOL传感器可以在1个点上测量4个颜色通道和3个偏振通道,而CCD传感器则依赖于分布在多个点上的成像传感器。螳螂眼横纹肌包含有分层的微绒毛,向4个独特的方向排列,在螳螂的眼睛上偏移45°,这使它们能够感知偏振光。有机传感器

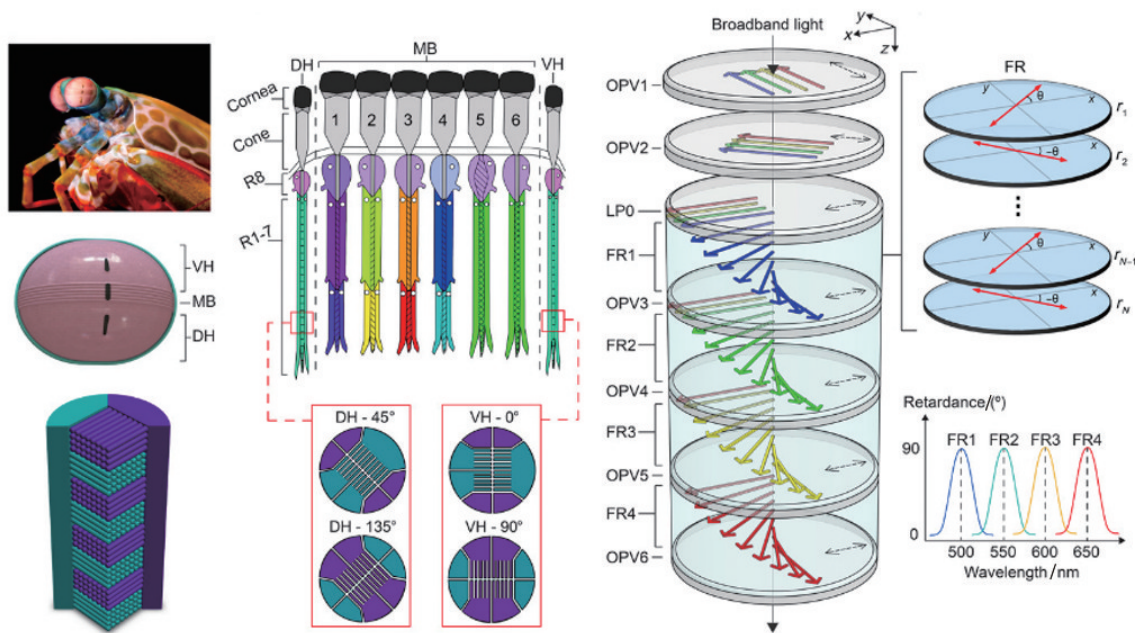


图43 螳螂眼和仿生传感器

由光谱选择性元素(折叠延迟器)和偏振敏感元素(有机光伏)组成,它们沿着单个光轴垂直堆叠,光谱和偏振信息以类似螳螂虾眼的方式检测,使光谱和偏振同时检测成为可能。SIMPOL的颜色通道可以辨别典型成像传感器 1/10 的光谱特征。这为新型有机电子传感技术打开了大门。

“片上实验室”将传统实验室中样品输送、混合与反应过程转移到小巧的微流控芯片上进行,不仅显著降低了样品用量,而且极大地提升了反应效率,但如何对直径仅为几毫米甚至几百微米的液流通道中样品混合与反应过程进行实时监测是具有挑战性的技术难题。研究人员提出了一种高空间/时间分辨率的光纤光声传感技术,该技术可以“拍摄”出微流通道中 2 种透明溶液的相互扩散过程,以 $10\ \mu\text{m}$ 的空间分辨率、50 Hz 的帧速度对扩散界面的建立、稳定与消退过程进行可视化(图 44)^[56]。光纤光声传感器的实现方式是,由脉冲激光在光纤上通过光声效应激发出声学振动,声学振动模式中包含着周围环境信息,利用光纤纤芯中的探测光来“读取”声学振动模式,获得周围环境介质信息。例如,溶液浓度越高,其声学阻抗越大,对应的振动信号衰减越快,通过衰减速率的测量结果反映样品浓度。该技术开启了光纤传感新模式,有望在细胞分析、疾病内窥探测等领域取得新应用。

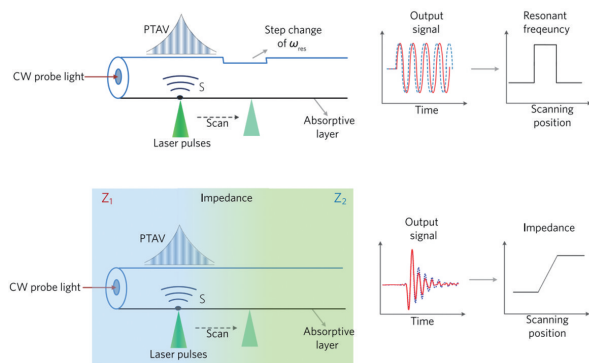


图 44 基于光热引起声学振动的光纤光声传感器

12 太赫兹光学

太赫兹技术在高速通信、生物医学成像、雷达和安全检测等领域具有变革性的应用前景。特别是随着无线带宽需求的增加,以太赫兹波为载波的

无线通信系统将提供超过 5G 通信系统的超高通信速率。强太赫兹源的缺乏是制约太赫兹科学与技术发展的关键。当太赫兹源的单脉冲能量提高到 mJ 以上、峰值功率超过 GW、场强远高于 MV/cm 时,太赫兹电磁波与物质强相互作用的效应将显著增强,这将助力全光太赫兹电子加速器的实现。利用飞秒激光泵浦材料产生太赫兹电磁波的方法有很多,其中铌酸锂晶体倾斜波前法是最有效的途径之一。研究人员针对铌酸锂晶体在高能激光泵浦下产生太赫兹辐射效率低、易饱和问题,通过深入研究铌酸锂倾斜波前技术原理,发现了效率饱和的物理本质,在实验上通过调控泵浦激光的啁啾和频谱分布,优化泵浦激光光斑和能量分布,降低晶体温度以克服太赫兹强吸收等方法,全面提升了泵浦激光转化为太赫兹辐射的能量转化效率,获得了单脉冲能量 1.4 mJ、峰值电场 6.3 MV/cm、峰值磁场 2.1 T、能量转化效率 0.7% 的国际领先超强太赫兹辐射(图 45)^[57]。

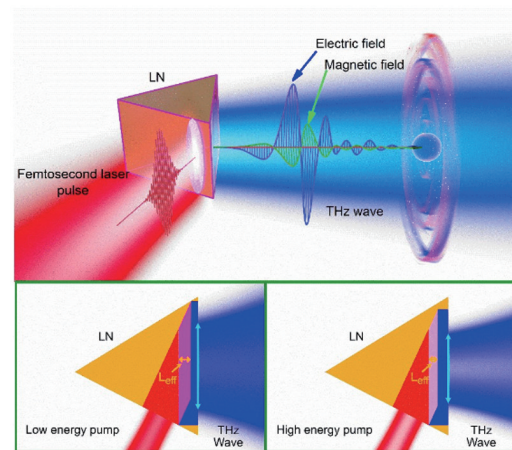


图 45 利用铌酸锂倾斜波前技术产生太赫兹辐射的原理示意

太赫兹系统的需求推动了高性能太赫兹集成器件的发展,因此如何对太赫兹波的相位和振幅进行有效的动态调控已成为研究的热门。传统方法是利用超材料或超表面结构和一种可动态调谐的材料组成的动态阵列器件来调控太赫兹波相位。然而这种方法通常依赖于自由空间太赫兹波与人工微结构谐振模式相互作用,太赫兹波的振幅和相位受自由空间波与结构耦合的影响,相位调控过程

中会引入较大的幅度波动,且相位的线性调控范围和精度有限。同时,复合人工微结构阵列相位调制器都是自由空间准光型器件,而不是波导集成型的,这也限制了太赫兹波相位调控的整体效率和可集成性。为此,研究人员提出了一种利用片上多路数字编码控制二维电子气微扰结构单元微扰谐振态实现对片上传输太赫兹波高精度相位调控的新方法,形成了多路可编码的超构芯片新结构(图46)^[58]。该方法通过控制片上微结构单元局部扰动谐振来调控传输的太赫兹波的相位,使用多通道外部电压编码控制各个扰动单元二维电子气的电子传输特性来调节局部扰动的强度和分布特性,从而影响片上传输太赫兹导波的相位。这种方法可实现对太赫兹波的相位进行高精度的数字操控,在0.26~0.27 THz的频率范围内最高可达 $2^{\circ}\sim 5^{\circ}$ 。

粒子加速器是现代科学发展的重要研究工具,人们通过大型粒子对撞机研究物质世界的基本组成,利用先进的加速器光源探索精细的微观结构。然而受限于射频击穿效应,基于传统射频加速技术的下一代高能粒子加速器面临装置结构复杂、造价昂贵等技术挑战。太赫兹加速技术以其超高的加速梯度、极短的脉冲宽度和可靠的时间同步特性,有望将大型加速器缩小到普通的实验室规模,在保证束流品质的同时极大地降低了研究成本,为下一代大型加速器的发展带来重大的技术革新。目前太赫兹加速的研究多集中在低能电子加速领域,相

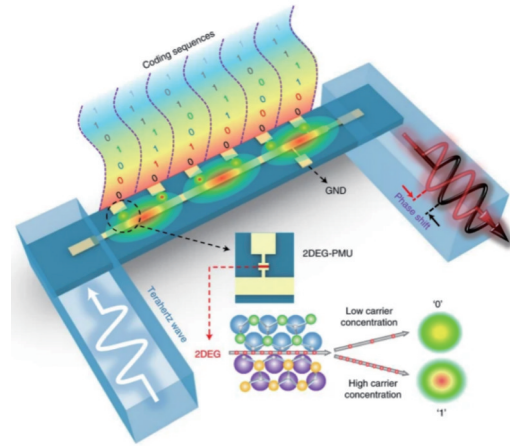


图46 多通道场微扰编码芯片结构

对论电子的太赫兹加速由于缺少超强太赫兹辐射源、高品质超短超快电子束以及精密的同步控制技术,近年来一直发展缓慢。此外,相对论电子束的级联加速作为加速器迈向高能不可缺少的核心技术,仍是太赫兹加速领域中一个未被攻克的难题。2021年,清华大学研究团队完成了世界上首次相对论电子束的级联太赫兹加速方案的原理性验证实验,实现了太赫兹波对相对论电子束的两级级联加速,将太赫兹加速领域的加速梯度和能量增益提高了1个量级(图47)^[59]。该成果填补了长期以来太赫兹加速在高性能段的技术空白,验证了一条切实可行的高能太赫兹加速器的技术路线,并为太赫兹加速技术在超快科学、强场物理、先进光源与新加速器等领域的应用带来全新的机遇。

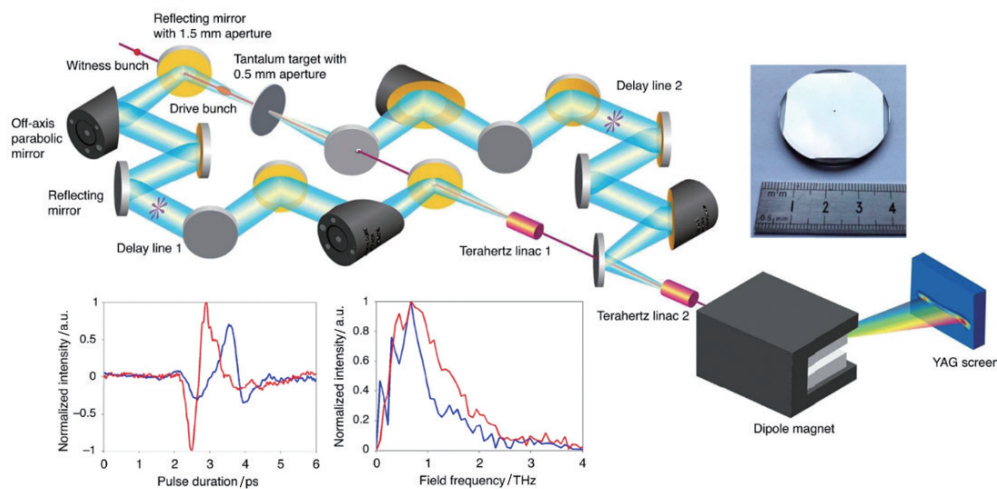


图47 级联太赫兹加速实验

13 光伏光电

多年来,钙钛矿一直是一个热门的研究课题。金属卤化物钙钛矿代表了一类与天然存在的钛酸钙具有相似结构的晶体化合物,可以用 ABX_3 的通式描述,其中A是一价阳离子,B是二价金属阳离子,X是卤素阴离子。对于太阳能电池,A位的典型材料是甲基铵、甲脒、铯。B位通常使用铅和锡等金属,X位通常使用碘化物和溴化物。金属卤化物钙钛矿之所以有趣,是因为它们具有光活性并且具有非常好的吸收系数,从而可以使用非常薄的钙钛矿层制造太阳能电池。钙钛矿太阳能电池的厚度不到 $1\ \mu\text{m}$,是现有硅太阳能电池厚度的 $1/200$ 。此外,与硅太阳能电池制造的温度(几百到 1000°C)相比,它们可以使用溶液工艺和低得多的温度($100\sim 200^\circ\text{C}$)制造。钙钛矿前驱体可以溶解在溶剂中并进行印刷和涂覆以在柔性表面上形成太阳能电池,而刚性硅则不可弯曲。

半导体的溶液制程在工艺成本上具有独特优势,在电子器件、光电器件中具有广泛的应用前景。虽然目前有机无机杂化钙钛矿在多种器件中得以发展,但是实现高质量材料的同时,改善器件制备的可重复性、合成大面积器件仍具有非常大的难度。对此,研究人员提出了一种液体介质退火技术(LMA)制备钙钛矿太阳能电池的薄膜(图48)^[60]。该技术在钙钛矿薄膜生长过程中构建了高活性化

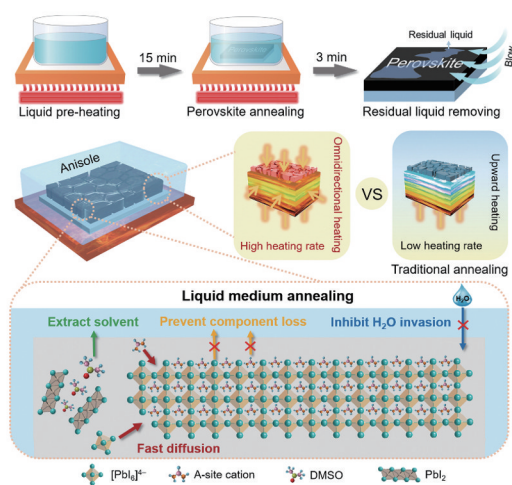


图48 液体介质退火合成钙钛矿的过程

学环境和稳定的加热场,通过这种方法合成的钙钛矿材料表现出优异的结晶度、更低的缺陷密度、理想的化学计量比、较高的化学组成均匀性。该方法得到的钙钛矿薄膜太阳能电池的稳定输出功率达到 24.04% (面积为 $0.08\ \text{cm}^2$ 的钙钛矿电池器件认证功率为 23.7%),并在 $2000\ \text{h}$ 连续工作后仍保持 95% 的最初效率。这个结果说明这种溶液相处理过程具有大规模化制备电池器件的可能性。

14 照明显示

近几十年来,显示器朝着轻量化、柔性化、集成化方向发展,由最初的块状阴极射线管显示、液晶显示、有机发光二极管显示发展到现在的柔性薄膜,经历了从模糊到清晰,从单色到彩色,从笨重到轻薄的发展过程。随着智能电子织物等可穿戴电子设备的蓬勃发展,如何将显示功能与织物融合集成,在实现显示的同时又确保织物的柔软、透气导湿、适应复杂形变等特性,从而满足未来物联网、人机交互、大数据、人工智能等新兴领域的快速发展要求,是这个领域的一个难题。复旦大学研究团队突破传统显示器件经典三明治结构的研究范式,提出在聚合物复合纤维交织点集成微型发光器件,将显示器件的制备与织物编织过程融合在一起,实现了大面积柔性显示织物和智能集成系统。除了显示织物,该研究团队还发展了高效的集成方法,实现了集能量转化/储存、传感、实时通信等功能于一体的智能织物显示系统(图49)^[61]。

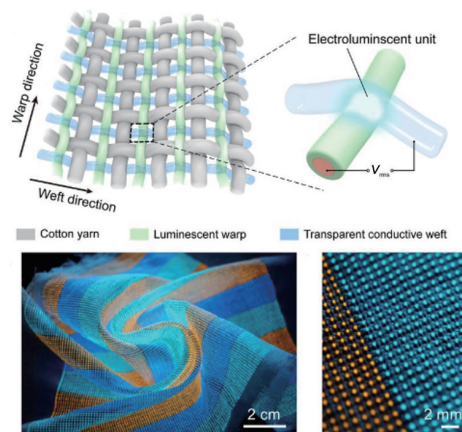


图49 显示织物结构和发光点照片

红外 II 区(1000~1700 nm)在光通信、纳米光子学、生物医学等领域的应用愈来愈显示出其重要性。已有上转换发光研究主要基于传统的 980 nm 和短波长近红外 I 区波段激发调控,如何实现更长的红外波段尤其是红外 II 区响应的上转换发光对于稀土发光基础研究及前沿应用具有重要研究意义。2021 年,研究人员提出了一种可以有效实现红外 II 区响应的上转换发光机理模型,通过引入

亚晶格选择性调控敏化剂铈与发光离子之间的相互作用,成功获得了 Tm^{3+} 、 Ho^{3+} 、 Gd^{3+} 、 Eu^{3+} 、 Tb^{3+} 等多种离子的上转换发光(图 50)^[62]。除此之外,本概念模型还获得了高达 1219 nm 反斯托克斯位移的紫外上转换发光。该研究促进了对微观尺度能量迁移和稀土发光物理本质的理解,有望进一步推动稀土发光基础研究以及研发新型高效上转换发光材料体系。

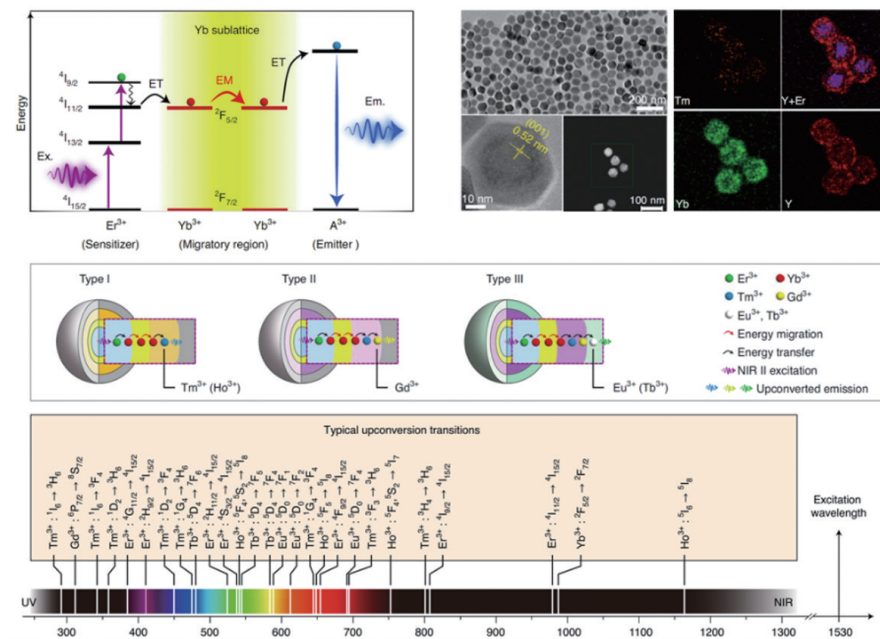


图 50 镱亚晶格实现红外 II 区响应上转换发光原理和纳米粒子结构设计

钙钛矿量子点作为一种新型显示材料,具备优异的发光效率和色纯度,而且材料本身制备简单、成本低、易放大生产,成为照明显示领域基础和应用的热点材料。钙钛矿量子点电致发光 LED 的稳定性是决定其实现规模化商业应用的关键因素。然而,量子点环境温度升高的情况下面临发光强度变弱的问题,即所谓的荧光“热猝灭”,这对实际应用产生非常不利的影响。研究人员通过氟化物后处理钙钛矿量子点的方式,首次实现环境温度处于 100℃ 范围内量子点荧光性能近乎零“热猝灭”,所制备的 LED 电致发光器件也具有优异的抗“热猝灭”性能。此外,研究者结合钙钛矿量子点温度依赖的荧光数据、第一性原理计算及多种结构表征,明确了氟离子部分占据量子点表面溴离子位

置,揭示了量子点抗“热猝灭”性能的内在线理^[63]。另外,研究人员首次报道了明亮高效的单层超薄钙钛矿白光 LED。研究者构筑了基于同质异相 α - δ - CsPbI_3 单层薄膜的 LED 器件,利用两相之间的光电协同效应,通过精确设计两相比,实现了载流子的可分配,并最终实现了输出可调的高效电致白光,外量子效率达 6.5%,最大亮度为 12200 cd/m^2 (图 51)^[64]。

15 拓扑光子学

近年来,拓扑光子学和非厄米光学成为光子学中两个最活跃的新兴研究领域。拓扑的概念最初来自数学,用来研究几何图形在连续形变下保持不

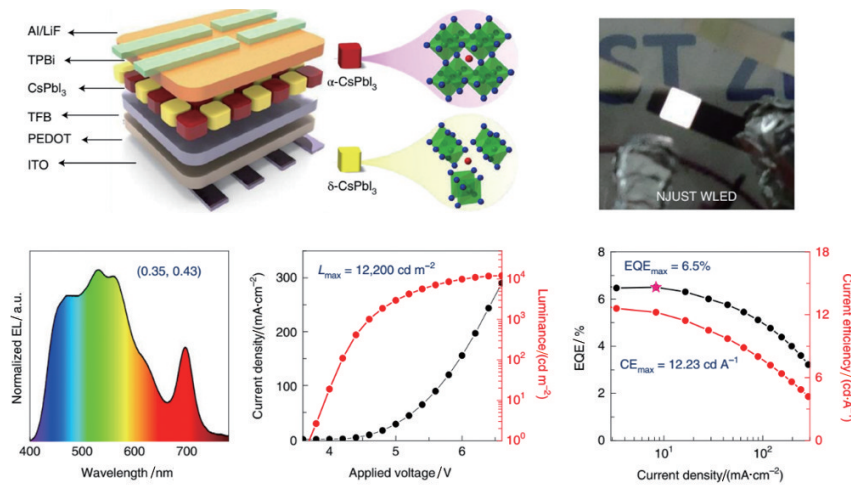


图 51 单层超薄钙钛矿白光LED结构及性能

变的性质。拓扑光子学的发展起源于凝聚态物理学中拓扑物态的研究,起初拓扑概念引入到物理学是用来解释著名的量子霍尔效应,随后,拓扑的概念被扩展到光学、声学、超材料和冷原子体系等领域,极大地促进了拓扑物理学的发展。尤其是在光学领域的研究突飞猛进,从最初单向传输电磁波拓扑态的实验观测到最近拓扑激光器的备受青睐,拓扑光子学逐渐成为光学和相关科学领域一个重要的前沿交叉领域。另一方面,非厄米的概念来自量子力学,一般认为非厄米体系没有可测量的具有物理意义的本征能量,而宇称时间(PT)对称性的引入,改变了人们对非厄米开放系统能量守恒判断标准的传统认识。当非厄米量子力学中PT对称的概念引入到光学领域后,精心设计的增益和损耗可方便地调控系统的PT对称,从而不断带来新的发现。非厄米光学的发展也为传感探测、无线传能、单模激光等一系列应用技术带来了诱人的前景。由于实验和理论上的困难,过去拓扑光子学和非厄米光学的大多数研究各安生业,而且几乎都集中在线性效应上。最近人们发现,在光学拓扑系统中考虑非线性时会出现许多有趣的现象,比如拓扑光孤子、拓扑激光、非线性拓扑绝缘体等。但是,对于一个同时具有拓扑特性与非厄米特性的复杂系统,目前对非线性效应的研究几乎是空白。即便是在光学领域,也还没有能找到或是搭建一个可调控的非线性非厄密拓光子学实验平台。

对此,研究人员利用自主研发的连续激光直写技术,首次在非线性晶体中制备了非厄米拓扑光子晶格,实现了非线性对宇称时间对称性与非厄米拓扑态的调控,并且理论上进一步揭示了非线性效应对非厄米体系中奇异点的影响以及拓扑态接近奇异点时敏感性和鲁棒性的拮抗效应。结果预示,局部非线性效应可以影响和改变系统的整体PT对称性,可以引起拓扑态的产生和消失以及对非厄米奇异点的动态调控(图52)^[65]。该成果改变了人们对非线性复杂系统中多重特性相互作用的认知,为非厄米拓扑光子学及其交叉领域提供了新的研究方向。

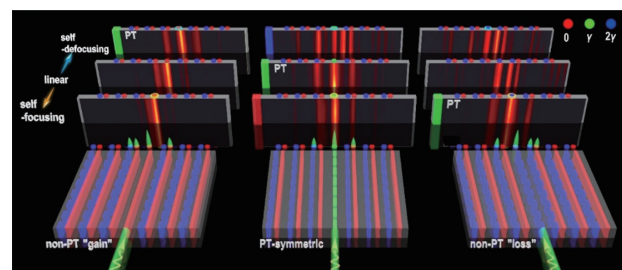


图 52 PT对称性和拓扑状态的单通道非线性调控

拓扑光子学中,体-边对应关系作为一种实验方法常用于区分和表征拓扑材料。拓扑保护的边界态也在光学系统中找到了一系列应用。然而,最近人们发现体-边对应关系不足以区分许多由晶格对称性保护的拓扑材料,即拓扑晶体材料。在物质的拓扑态研究中,对称性起着重要的作用,由于晶体的边界相比于晶体内部的对称性更低,并没有

携带晶体的全部对称性信息,因而体-边对应关系不能很好地完成这项任务,如何通过实验方法确定拓扑晶体材料的拓扑性质也随之成为一个重大的挑战。2021年,研究人员借鉴自然界中常见的晶体缺陷结构,即旋错结构,设计提出了一种基于具有六重旋转对称性的可重构光子晶体的人工旋错模型,发现在体-旋错对应关系中,诱导出的分数荷量子数完全依赖于拓扑指标,因此可以用来表征拓扑晶体材料^[66]。该工作成功观测到拓扑材料中旋错结构导致的稳健光子局域态和分数荷量子数,首次实验证实了体-旋错对应关系,在拓扑物理和材料研究领域开辟了新的道路,为未来构造拓扑光学微腔提供了重要的理论基础。

16 结论

美国光学学会《Optics & Photonics News》从129项光学光电子进展中推出了30项热点^[67]。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2021年中国光学十大进展评选,参选论文有132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^[68]。本文回顾了2021年光学领域的15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] National Ignition Facility experiment puts researchers at threshold of fusion ignition[EB/OL]. (2021-08-18) [2021-12-01]. <https://www.llnl.gov/news/national-ignition-facility-experiment-puts-researchers-threshold-fusion-ignition>.
- [2] Stockman M I. Nanoplasmonics: Past, present, and glimpse into future[J]. Optics Express, 2011, 19(22): 22029-22106.
- [3] Halas N J, Lal S, Chang W S, et al. Plasmons in strongly coupled metallic nanostructures[J]. Chemical Reviews, 2011, 111(6): 3913-3961.
- [4] 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.
- [5] Zhang Y F, Fowler C F, Liang J H, et al. Electrically reconfigurable non-volatile metasurface using low-loss optical phase-change material[J]. Nature Nanotechnology, 2021, 16(6): 661.
- [6] Guo X, Zhong J, Li B, et al. Full-color holographic display and encryption with full-polarization degree of freedom[J]. Advanced Materials, 2021, 5742(5742): 130-139.
- [7] Rolland J P, Davies M A, Suleski T J, et al. Freeform optics for imaging[J]. Optica, 2021, 8(2): 161-176.
- [8] Nikolov D K, Bauer A, Cheng F, et al. Metaform optics: Bridging nanophotonics and freeform optics[J]. Science Advances, 2021, 7(18): eabe5112.
- [9] Zeng S N, Pian S J, Su M Y, et al. Hierarchical-morphology metafabric for scalable passive daytime radiative cooling[J]. Science, 2021, 373(6555): 692-696.
- [10] Camacho-Morales R, Rocco D, Xu L, et al. Infrared up-conversion imaging in nonlinear metasurfaces [J]. Advanced Photonics, 2021, 3(3): 036002.
- [11] Ma W L, Hu G W, Hu D B, et al. Ghost hyperbolic surface polaritons in bulk anisotropic crystals[J]. Nature, 2021, 596(7872): 362-366.
- [12] Tian H, Liu J Q, Siddharth A, et al. Magnetic-free silicon nitride integrated optical isolator[J]. Nature Photonics, 2021, 15(11): 828-836.
- [13] Danson C N, Haefner C, Bromage J, et al. Petawatt and exawatt class lasers worldwide[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2019, 7(3): 1-53.
- [14] Li Z Y, Kato Y, Kawanaka J. Simulating an ultra-broadband concept for Exawatt-class lasers[J]. Scientific Reports, 2021, 11: 151.
- [15] 神光II设施第九路皮秒拍瓦开展激光驱动质子加速实验取得重大进展[EB/OL]. (2021-11-22) [2021-12-01]. http://www.siom.cas.cn/xwzx/kydt/202111/t20211123_6267460.html.
- [16] US Army demonstrates first laser weapon in "combat shoot-off"[EB/OL]. (2021-08-18) [2021-12-01]. <https://optics.org/news/12/8/23>.
- [17] Wang W T, Feng K, Ke L T, et al. Free electron lasing at 27 nanometers based on a laser wakefield accelerator [J]. Nature, 2021, 595(7868): 516.
- [18] Zhong H Z, Qian L J, Dai S Y, et al. Polarization-insensitive, high-gain parametric amplification of radially polarized femtosecond pulses[J]. Optica, 2021, 8(1): 62-69.
- [19] Fang Y Q, Han M, Ge P P, et al. Photoelectronic mapping of the spin-orbit interaction of intense light fields

- [J]. *Nature Photonics*, 2021, 15(2): 115–120.
- [20] Liu J D, Charlotte Z, Liu X P, et al. Coded-aperture broadband light field imaging using digital micromirror devices[J]. *Optica*, 2021, 8(2): 139–142.
- [21] Zhou Z H, Liu W, He J J, et al. Far-field super-resolution imaging by nonlinearly excited evanescent waves[J]. *Advanced Photonics*, 2021, 3(2): 025001.
- [22] Dong J R, Lu Y X, Xu Y, et al. Direct imaging of single-molecule electrochemical reactions in solution[J]. *Nature*, 2021, 596: 244–249.
- [23] Wang B, Zheng M Y, Han J J, et al. Non-line-of-sight imaging with picosecond temporal resolution[J]. *Physical Review Letters*, 2021, 127(5): 053602.
- [24] Liu X T, Wang J Y, Li Z P, et al. Non-line-of-sight reconstruction with signal-object collaborative regularization[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10: 198.
- [25] Wu J M, Lu Z, Jiang D, et al. Iterative tomography with digital adaptive optics permits hour-long intravital observation of 3D subcellular dynamics at millisecond scale [J]. *Cell*, 2021, 184(12): 3318–3332.
- [26] Zhong Q Y, Li A N, Jin R, et al. High-definition imaging using line-illumination modulation microscopy[J]. *Nature Methods*, 2021, 18(3): 309–315.
- [27] Ding P P, Yao Y H, Qi D L, et al. Single-shot spectral-volumetric compressed ultrafast photography[J]. *Advanced Photonics*, 2021, 3(4): 045001.
- [28] Kim K, Bittner S, Zeng Y, et al. Massively parallel ultrafast random bit generation with a chip-scale laser[J]. *Science*, 2021, 371(6532): 948–952.
- [29] Liu X, Hu J, Li Z F, et al. Heralded entanglement distribution between two absorptive quantum memories[J]. *Nature*, 2021, 594(7861): 41–45.
- [30] Pittaluga M, Minder M, Lucamarini M, et al. 600-km repeater-like quantum communications with dual-band stabilization[J]. *Nature Photonics*, 2021, 15(7): 530.
- [31] Luo L, Cheng D, Song B Q, et al. A light-induced phononic symmetry switch and giant dissipationless topological photocurrent in $ZrTe_3$ [J]. *Nature Materials*, 2021, 20(3): 329–334.
- [32] Liu H Y, Tian X H, Gu C S, et al. Drone-based entanglement distribution towards mobile quantum networks [J]. *National Science Review*, 2020, 7(5): 921–928.
- [33] Liu H Y, Tian X H, Gu C S, et al. Optical-relayed entanglement distribution using drones as mobile nodes[J]. *Physical Review Letters*, 2021, 126: 020503.
- [34] Hearing the Light[EB/OL]. (2021-10-01) [2021-12-01]. https://www.optica-opn.org/home/articles/volume_32/october_2021/features/hearing_the_light/.
- [35] Goswami N, He Y H R, Deng Y, et al. Label-free SARS-CoV-2 detection and classification using phase imaging with computational specificity[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10(1): 176.
- [36] Zhang C H, Dong H Y, Zhang C, et al. Photonic skins based on flexible organic microlaser arrays[J]. *Science Advances*, 2021, 7(31): eabh3530.
- [37] Casacio C A, Madsen L S, Terrasson A, et al. Quantum-enhanced nonlinear microscopy[J]. *Nature*, 2021, 594(7862): 201–206.
- [38] Chen R H, Huang S S, Lin T T, et al. Photoacoustic molecular imaging-escorted adipose photodynamic-browning synergy for fighting obesity with virus-like complexes[J]. *Nature Nanotechnology*, 2021, 16(4): 455–465.
- [39] Scientists create device that uses laser tweezers to trap viruses[EB/OL]. (2021-11-01) [2021-12-01]. <https://optics.org/news/12/10/43>.
- [40] Li J G, Chen Z H, Liu Y R, et al. Opto-refrigerative tweezers[J]. *Science Advances*, 2021, 7(26): eabh1101.
- [41] Dai X, Fu W H, Chi H Y, et al. Optical tweezers-controlled hotspot for sensitive and reproducible surface-enhanced Raman spectroscopy characterization of native protein structures[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 1292.
- [42] Konishi H, Roux K, Helson V, et al. Universal pair-polaritons in a strongly interacting Fermi gas[J]. *Nature*, 2021, 596(7873): 509–513.
- [43] Li Q W, Bao W, Nie Z Y, et al. A non-unitary metasurface enables continuous control of quantum photon-photon interactions from bosonic to fermionic[J]. *Nature Photonics*, 2021, 15(4): 267–271.
- [44] Li G Z, Zheng Y L, Dutt A, et al. Dynamic band structure measurement in the synthetic space[J]. *Science Advances*, 2021, 7(2): eabe4335.
- [45] Yao J P, Wang L J, Chen J M, et al. Photon retention in coherently excited nitrogen ions[J]. *Science Bulletin*, 2021, 66(15): 1511–1517.
- [46] Tradonsky C, Mahler S, Cai G D, et al. High-resolution digital spatial control of a highly multimode laser[J]. *Optica*, 2021, 8(6): 880–884.
- [47] Yu S F, Zhang Z, Xia H Y, et al. Photon-counting distributed free-space spectroscopy[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10: 212.
- [48] Efremidis N, Goutsoulas M, Bongiovanni D, et al. Tunable self-similar Bessel-like beams of arbitrary order[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(7): 1830–1833.
- [49] Bongiovanni D, Li D H, Goutsoulas M, et al. Free-space realization of tunable pin-like optical vortex beams[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(7): 1204–1212.
- [50] Christopher S, Qian Y, Xue D, et al. Chirped dissipative

- solitons in driven optical resonators[J]. *Optica*, 2021, 8(6): 861–869.
- [51] Liang C H, Ponomarenko S A, Wang F, et al. Temporal boundary solitons and extreme super thermal light statistics[J]. *Physical Review Letters*, 2021, 127: 053901.
- [52] Salmela L, Tsipinakis N, Foi A, et al. Predicting ultrafast nonlinear dynamics in fibre optics with a recurrent neural network[J]. *Nature Machine Intelligence*, 2021, 3(4): 344.
- [53] Genty G, Salmela L, Dudley J M, et al. Machine learning and applications in ultrafast photonics[J]. *Nature Photonics*, 2021, 15(2): 91–101.
- [54] Tong L, Peng Z R, Lin R F, et al. 2D materials-based homogeneous transistor-memory architecture for neuro-morphic hardware[J]. *Science*, 2021, 373(6561): 1353–1358.
- [55] Altaqui A, Sen P, Schrickx H, et al. Mantis shrimp-inspired organic photodetector for simultaneous hyperspectral and polarimetric imaging[J]. *Science Advances*, 2021, 7(10): eabe3196.
- [56] Liang Y Z, Sun H J, Cheng L H, et al. High spatiotemporal resolution optoacoustic sensing with photothermally induced acoustic vibrations in optical fibres[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 4139.
- [57] Zhang B L, Ma Z Z, Ma J L, et al. 1.4-mJ high energy terahertz radiation from lithium niobates[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2021, 15(3): 2000295.
- [58] Zeng H X, Liang H J, Zhang Y X, et al. High-precision digital terahertz phase manipulation within a multichannel field perturbation coding chip[J]. *Nature Photonics*, 2021, 15(10): 751–757.
- [59] Xu H X, Yan L X, Du Y C, et al. Cascaded high-gradient terahertz-driven acceleration of relativistic electron beams[J]. *Nature Photonics*, 2021, 15(6): 426–430.
- [60] Li N X, Niu X X, Li L, et al. Liquid medium annealing for fabricating durable perovskite solar cells with improved reproducibility[J]. *Science*, 2021, 373(6554): 561–567.
- [61] Shi X, Zuo Y, Zhai P, et al. Large-area display textiles integrated with functional systems[J]. *Nature*, 2021, 591: 240–245.
- [62] Zhou B, Yan L, Huang J S, et al. NIR II-responsive photon upconversion through energy migration in an ytterbium sublattice[J]. *Nature Photonics*, 2021, 14: 760–766.
- [63] Liu M M, Wan Q, Wang H M, et al. Suppression of temperature quenching in perovskite nanocrystals for efficient and thermally stable light-emitting diodes[J]. *Nature Photonics*, 2021, 15(5): 379–385.
- [64] Chen J W, Wang J, Xu X B, et al. Efficient and bright white light-emitting diodes based on single-layer heterophase halide perovskites[J]. *Nature Photonics*, 2021, 15(3): 238–244.
- [65] Xia S Q, Kaltsas D, Song D H, et al. Nonlinear tuning of PT symmetry and non-Hermitian topological states[J]. *Science*, 2021, 372(6537): 72–76.
- [66] Liu Y, Leung S, Li F F, et al. Bulk-disclination correspondence in topological crystalline insulators[J]. *Nature*, 2021, 589(7842): 381–385.
- [67] Optics in 2021[EB/OL]. (2021-12-01) [2021-12-05]. https://www.optica-opn.org/home/articles/volume_32/december_2021/features/optics_in_2021/.
- [68] 中国光学十大进展 2021 年候选成果推荐[EB/OL]. (2021-11-29) [2021-12-01]. <http://www.opticsjournal.net/Columns/ZGGX?type=IntjList&year=2021>.

Memorable sounds in the optics and photonics in 2021

LU Zhantao, LI Linjun, QIU Lijuan, XIE Xinglong*, 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 Since the birth of laser, optics and photonics have penetrated into all aspects of people's life. This article reviews the 2021 major progress in the field of optics and photonics and draws up an inventory of fifteen 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; 2021 hotspot; development of optics ●



(责任编辑 王志敏)