

2022年光学热点回眸

朱海东*, 薛豪, 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2022年的重大进展, 盘点了光电子学、光物理、光物质相互作用、光学材料与结构、光学设计和仪器仪表、光学信息采集和处理、光子学交叉领域、光源与强场激光、生物学和医疗光学、视觉色彩等光学技术研究领域的研究热点, 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; 2022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。令人振奋人心的是激光器的诞生产生了现代光学, 并随着激光技术的进步, 现代光学也得到迅猛发展。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。

2022年光学方面重大突出进展是激光惯性约束核聚变, 其标志成果是美国能源部公布劳伦斯·利弗莫尔国家实验室激光核聚变点火成功的消息。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, 以及研究极端条件下的物性具有重要意义。

美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(LLNL)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装置共拥有192路光束, 最大输出能量可达2 MJ。目前国际上

收稿日期: 2023-01-02; 修回日期: 2023-01-10

基金项目: 中国科学院国际合作项目(29201631251100101)

作者简介: 朱海东(通信作者), 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: 朱海东, 薛豪, 谢兴龙, 等. 2022年光学热点回眸[J]. 科技导报, 2023, 41(1): 30-65; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2023.01.003

运行的高功率纳秒激光系统还有美国的 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。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 1 万 J 级到 10 万 J 级,进而发展到 100 万 J 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。

北京时间 2022 年 12 月 13 日,美国能源部官员宣布,由美国政府资助的加州 LLNL,首次成功在核聚变反应中实现“净能量增益”,即聚变反应产生的能量大于促发该反应的入射能量。实验向目标输入了 2.05 MJ 的能量,产生了 3.15 MJ 的聚变能量输出,能量增益达到 153%。3.15 MJ 的能量相当于 100 g 炸药的爆炸威力。LLNL 武器物理和设计项目主管马克·赫尔曼(Mark Herrmann)介绍,2022 年 12 月 5 日的激光发射到达了被称为空腔的小圆柱形腔室,腔室将紫外线转换为 X 射线。悬浮在里面的是一个涂有金刚石涂层的胡椒粒大小胶囊,里面装有氘-氚燃料,X 射线将其内爆(图 1)^[1]。LLNL 耗资 35 亿美元的 NIF 建成 13 年后,这台巨型激光器的目标终于实现了。这也是在近 70 年的受控聚变研究史上,聚变反应产生的能量首次超过了激发它所需的能量。这一成就将引发人们对聚变作为能源的另一场狂热兴趣,同时如何利用激光聚变能源也存在诸多工程难题等待人们进一步解决。

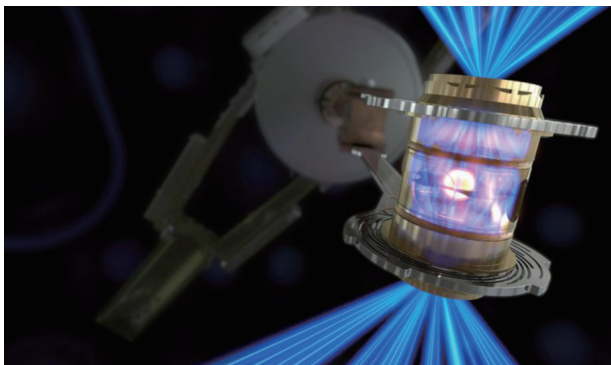


图1 美国国家点火装置间接驱动点火方案(紫外线激光入射空腔圆柱体激发 X 射线后压缩内部燃料)

2022 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。本年度,光学与光电子新进展和成果也还有很多方面,下面将从光电子学、光物理、光物质相互作用、光学材料与结构、光学设计和仪器仪表、光学信息采集和处理、光子学交叉领域、光源与强场激光、生物和医疗光学、视觉色彩 10 个方面分别介绍。

1 光电子学

光电子学是由光学和电子学结合形成的技术学科。使用光电子学技术,可将辐射的光信号、光学图像或能量转换成电信号或电能,并进行处理或传送;同样,使用光电子学技术,可将电信号再转换成光信号或光图像。光电子学技术在光通信系统、电视系统、微光夜视系统中起着重要的作用。2022 年,在该领域涌现了多项杰出成果。

微发光二极管(μLED)因其出色的亮度、优异的化学稳定性和高光学效率而被认为是下一代显示技术最有前途的候选者。迄今为止,大多数研究集中在器件制造和集成水平上。 μLED 有望应用于传统显示器,如电视,以及新兴显示器,包括近眼显示器和汽车显示器。2022 年 1 月,Hsiang 等^[2]所提出的 μLED 显示器设计在高环境照度背景下产生了更高的光学效率、峰值亮度和环境对比度。这些改进对于提高汽车显示器中 μLEDs 的可读性至关重要,使得驾驶员能够更快地得到道路行驶信息,获得更安全的驾驶体验。图 2 为车辆显示器的目盒示意^[2]。

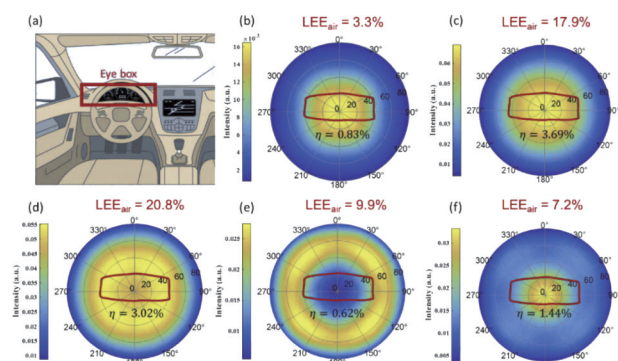


图2 车辆显示器的目盒示意

在实际的低温系统中,使用超导纳米线探测器可以实现在中红外(MIR)波长下具有优异定时分辨率的高效单光子探测。量子技术、遥感和生命科学应用都极大地受益于超导纳米线单光子探测器(SNSPD),该探测器提供了高检测效率、极快的速度和超高的时间精度。但到目前为止,SNSPD的开发主要集中在可见光和近红外光谱区域。近几年,对MIR的应用出现了新的前景,特别是 $2\ \mu\text{m}$ 左右的波长,创新的光源、光纤解决方案和高速调制技术使下一代量子通信实现成为可能。2022年3月,Chang等展示了SNSPD如何将光学测量能力扩展到MIR光谱中的实际相关用途^[3]。虽然已经在原理验证实验表明SNSPD在MIR应用中具有潜力,但相关实验一直较少,Chang等通过对超导纳米线的精心设计和材料成分控制,在 $2\ \mu\text{m}$ 波长下实现了高系统检测效率(高达73%)和仅14 ps的抖动性能。重要的是,这一特性是在一个紧凑的低温系统中实现的,现在许多光学实验室采用这种系统。在明确考虑探测器在实际操作条件下的性能时,作者提出了令人信服的依据,证明该技术具有在以前难以接近的波长范围内的实际适用性(图3)^[3]。

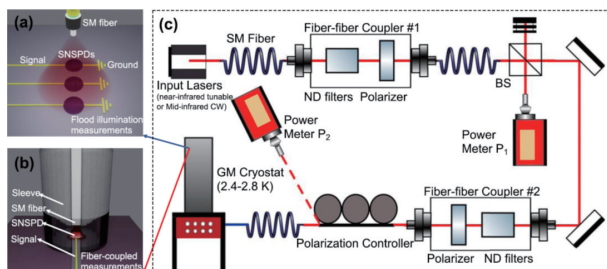


图3 洪水照明探测器(a),一个光纤耦合探测器(b),效率测量装置的原理(c)

紫外线(UV)照射作为一种有效的治疗人类传染病的方法具有很大的潜力。一般来说,紫外线照射,特别是在UVC(100~280 nm)范围内,普遍认为会对人体健康造成,因为细胞在这个光谱范围内的紫外线吸收会导致其DNA出现损伤效应。2022年4月,Wu等^[4]提出了一个基于蒙特卡罗方法的理论模型,该模型可以估计人体皮肤上的紫外线辐射强度以及光子在表皮中的穿透深度。仿真结果与实验结果吻合良好。该研究为皮肤病的紫外线治疗

提供了一个简单的安全指南。图4所示是紫外线光子从空气传播到人类表皮的说明^[4]。

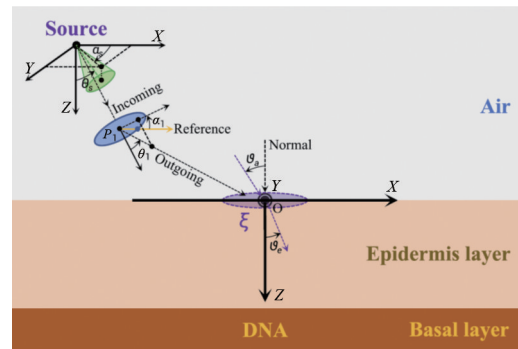


图4 紫外线光子从空气传播到人类表皮的说明

由于量子点激光器设计的进步,可以实现发射对多路通信有用的芯片级宽带频率梳。对于复合波长,梳子的每个齿作为一个独特通道,可以被调制用来传输信息。为了使每个信道携带1个高带宽,调制频率必须为高频。2022年7月,Huang等^[5]在这项工作中展示了另一种方法,他们基于一种被称为碰撞脉冲锁模的技术,将一个长腔划分为多个由饱和和吸收器分隔的短段。获得了发射功率大、线宽小,满足100 GHz梳间距要求的短段。通过对4种梳状源的混合使用,以覆盖不同的光谱范围,这种方法有望为未来电信光互连提供大带宽的数据传输(高达4.8 Tbit/s)。图5(a)是四阶碰撞脉冲锁模激光器(CPML)设计示意,(b)为一种具有 45° 倾斜角的制造器件的横截面扫描电镜图像^[5]。

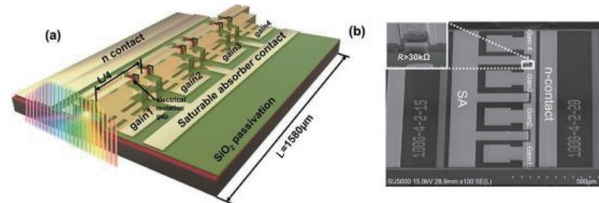


图5 四阶CPML设计示意(a)和一种具有 45° 倾斜角制造器件的横截面扫描电镜图像(b)

光子集成的进步需要不断寻找新的材料平台,以实现更先进的功能,更高的速度和更低的功耗。当一种新的光子技术诞生时,有必要开发一个完整的光子版块堆积技术,其中一些出现得很早,另一些则停滞了数年或几十年。最近,铌酸锂的绝缘体(LNOI)技术出现了令人期待的应用场景,该技术

由于其电光、非线性和透明性特性,将最常用的光学材料之一——铌酸锂(LN)引入了纳米光子尺度。从光调制器和波长转换器开始,许多其他设备已经集成在LNOI上,如频率梳状发生器和激光源。然而,高速光电探测器仍未出现。2022年7月,Guo等填补了这一空白,他们成功地在LNOI平台上集成了快速光电二极管,即在薄膜LN上改进型单载流子光电二极管(图6)^[6]。通过仔细优化InGaAs/InP层堆积的厚度,他们展示了一种不均匀集成的光电二极管,其检测带宽为80 GHz,响应率为0.6 A/W,暗电流低至3 nA。值得注意的是,这种光电二极管的制造过程是基于可扩展的晶圆模具贴合方法,这意味着可以完全兼容的其他器件,如在同一LNOI晶片上的调制器和谐振器。有了这个新的拼图,就有了集成在LNOI平台上的完整芯片系统。

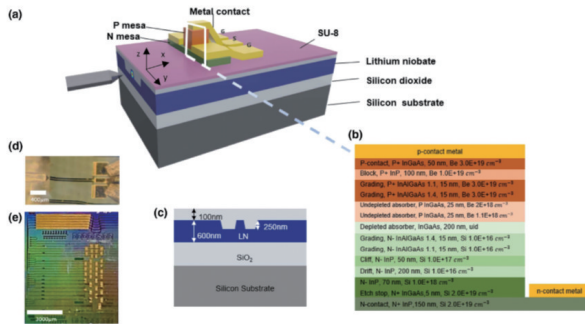


图6 在薄膜LN上改进型单载流子光电二极管

大部分红外能量只能通过红外摄像机、望远镜或夜视镜来观察和测量。这些技术利用红外波追踪由一个物体释放或辐射的热量。事实上,根据温度的变化,内能会发生变化,输出具有相应波长跨度和强度光谱分布的红外光谱。因此,从特定的光谱剖面中,可以检索和分析物体的许多性质,如分子组成、热分布、表面纹理等。为了更好地实现目标识别和识别,可以利用结合不同光谱波段图像的光谱图像融合技术。为了满足对融合多波段红外成像日益增长的需求,2022年9月,Zhang等^[7]提出了一种双模胶体量子点红外探测器。该探测器提供了前所未有的偏置依赖单带短波长红外(SWIR)成像模式和融合带短波长红外/中波长红外(SWIR/MWIR)模式(图7)^[7],可以同时实现双模成像和远

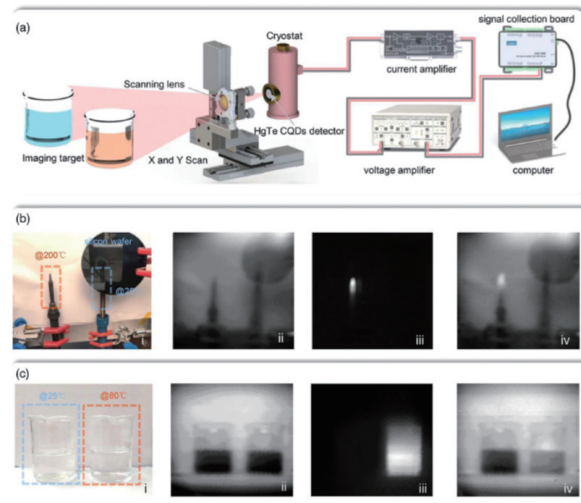


图7 双模式红外成像

程温度传感。由于人类视觉之外的其他信息,包括热分布、夜视和分子组成,利用融合的多光谱信息获取的图像信息,可用于有效的夜视识别和导航。在这项工作中开发了一种胶体量子点双模探测器,能够检测、分离和融合来自不同波长范围的光子。利用3个垂直堆叠的胶体量子点均型结,通过控制偏置极性和幅度,可以实现单波段短波红外成像和融合带成像(短波和中波红外)。双模探测器在融合带模式下检测率高达 $8 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ (Jones),在单带模式下检测率高达 3.1×10^{11} Jones。在没有图像后处理算法的情况下,双模探测器可以同时提供夜视和热信息增强的夜视成像能力。据我们所知,这是第一个可以实现这种功能的胶体量子点探测器。该操作模式可在高达1.7 MHz的高频率下进行改变,从而可以同时实现双模成像和远程温度传感。

撞击覆盖平板波导光栅的光会耦合到其中,产生导模共振(GMR),从而导致透射光的强度降低。这种类型的共振发生在对结构变形敏感的特定波长和入射角上。因此,覆盖有光栅的板波导可以通过光来监测压力的变化,只要这种压力变化能使其结构充分变形。为了生产高效的压力传感器,2022年9月,Kuo等^[8]设计了一种基于独立的低密度聚乙烯板的光栅-波导结构。该结构支持一个GMR,在环境室中用单色光监测,同时改变聚合物板下方的气体压力,以可控的方式使其弯曲。透射光的强度

被测量为这个压力的函数(图8)^[8]。观察到的GMR的变化可以显示0.3~1.8 kPa压力范围内的压力变化,可测量压力变化精度可小至1 kPa。将该设计和之前报告的一些传感器参数进行比较,该设计具有更好的检测极限和更低的材料成本。

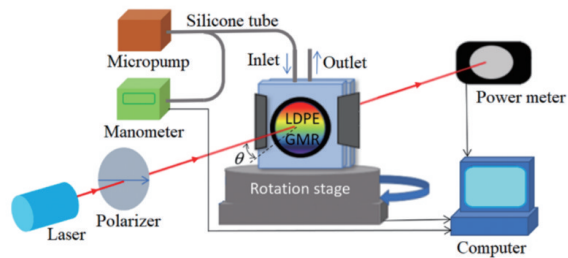


图8 测试装置原理

耗散光孤子是在光学介质中由于线性和非线性效应之间以及增益和损耗之间的动态相互作用而产生的自捕获非线性波。虽然它们最初是在锁模激光器中提出和发现的,但类似的非线性结构也存在于似乎远离光子学的其他领域,如生物学和医学。这种普遍存在的特性使得对它们的存在性和稳定性域、整体性质和相互作用的研究成为理解复杂系统中不同瞬态动力学的关键。2022年11月,Latas等^[9]报告了对一种特殊类型耗散孤立波的正面对撞动力学的理论研究,即所谓的爬行孤子,表现出脉动的非平稳轮廓。模拟这样2个波之间的碰撞显示出丰富的结果,从周期性振荡到复杂的非规则行为,这取决于系统的参数和初始条件。这些有趣的结果可能有助于理解复杂的瞬态动力学发生的操作初始阶段,如新的锁模激光器。图9所示为2个蠕变孤子的相互渗透,产生3种不同的结果^[9]。

红外(中红外)(2~20 μm)硅光子学由于其在自由空间光通信、光检测和测距以及分子分析等方面的应用潜力,在过去几年中受到了人们的广泛关注。2022年11月,Gao等报道了一种具有极低极化依赖性的宽带中红外光栅耦合器(图10)^[10]。他们从更巩固的近红外硅光子平台上借用了偏光分集方案的概念,该方案基于一对二维偏振分光栅耦合器。在中红外范围内达到同类最佳性能的关键是使用悬浮的亚波长波导结构,其中底部的二氧化

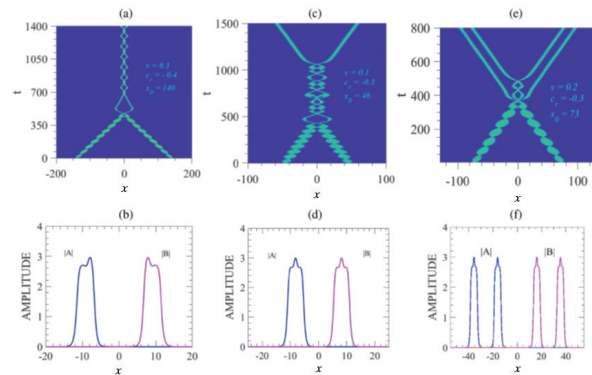


图9 2个蠕变孤子的相互渗透,产生3种不同结果

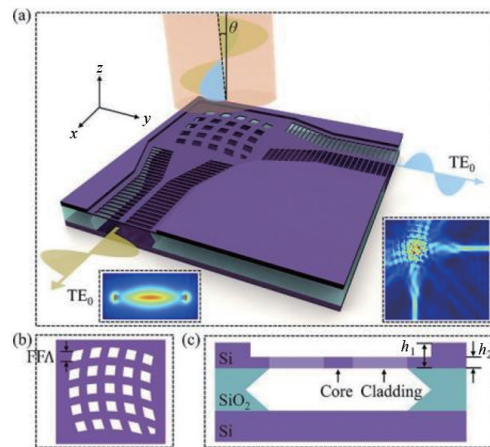


图10 超薄中红外偏振不敏感光栅耦合器和亚波长光栅(SWG)包覆波导的化学特性

硅被去除,中红外吸收被减少。此外,该研究还采用了超薄光栅耦合器结构来减少反向反射,获得了优异的实验结果。值得注意的是,该设备是在硅光子学多项目晶圆(MPW)铸造服务中制造的,因此意味着该设备具有高重现性和低成本的优势。

北京大学王兴军课题组和加州大学圣芭芭拉分校John E. Bowers课题组合作研究在世界上首次报道了由集成微腔光梳驱动的新型硅基光电子片上集成系统,历经3年协同攻关,研究团队终于攻克了这一世界性难题^[11]。王兴军领导的研究团队通过直接由半导体激光器泵浦集成微腔光频梳(图11^[11]),给硅基光电子集成芯片提供了所需的光源大脑,结合硅基光电子集成技术工业上成熟可靠的集成解决方案,完成大规模集成系统的高效并行化。利用这种高集成度的系统,实现Tbit/s速率微

通信和亚 GHz 微波光子信号处理,提出高密度多维复用的微通信和微处理芯片级集成系统的全新架构,开创了下一代多维硅光集成微系统子学科的发展。相关研究成果有望直接应用于数据中心、5/6G 通信、自动驾驶、光计算等领域,为下一代片上光电子信息系统提供了全新的研究范式和发展方向。

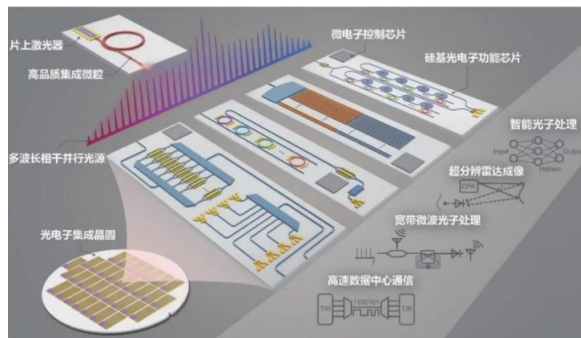


图 11 集成微腔光梳驱动的硅基集成光电子片上系统

2 光物理

光物理是近代物理学发展最活跃的领域之一。特别是近 30 年来,由于激光的问世,光学的面貌发生了深刻的变化,光物理的研究内容也从传统的光学与光谱学迅速扩展到光学与物理其他分支学科的交汇点。诸如激光物理、非线性光学、高分辨率光谱学、强光光学和量子光学正不断趋于完善和成熟,有的则正在积累形成新的分支学科,如光子学、超快光谱学和原子光学等。光物理与化学、生物学、医学及生命科学的交叉也越来越广泛和深入。光物理学中的新理论、新概念和新方法已成为激光、光纤通信等高技术产业发展的重要依托。可以预见,在 21 世纪中,光物理的研究将会有若干突破性进展,并对生命科学、化学等领域的突破,以及光电子、光计算等高技术产业革命起到关键性的先导和推动作用。

量子力学通常是在一个复杂的、抽象的、希尔伯特空间中表述的。然而,量子理论是否真的需要复数的参与,自它诞生以来就一直存在争论。最近,检验复数在量子力学中的必要性的判据也在理论上被提出来,以区分标准量子力学和它的实值模拟。2022 年,中国科学技术大学潘建伟、陆朝阳、

张强等与济南量子技术研究院等单位的科研人员合作,基于超导量子体系完成了排除实数形式描述标准量子力学的第一个实验检验,2 个分离的独立源将纠缠光子传递到 3 个分离的参与者,这些条件通过相关事件的空间分离、快速随机设置生成和快速测量来实现。在公平采样假设和独立源、局部性和测量独立性漏洞的情况下,违反了实值量子力学的约束 5.30 个标准差。其结果证明复数在量子力学中不可或缺的作用。图 12 非定域实验装置图,实验三方处于类空间隔,满足严格的爱因斯坦非定域性条件^[12]。

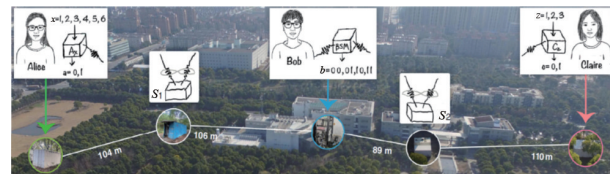


图 12 非定域实验装置

圆偏振光的超紧密光源是经典和量子光学信息处理的重要来源,这一领域的发展主要依赖于手性材料与手性光学腔的进展。传统的手性发射产生方法仅被限制在激发功率范围内,不能提供具有完美偏振转换的高质量辐射。2022 年,哈尔滨工业大学(深圳)宋清海团队利用连续介质中手性准束缚态的物理学,证明了共振超表面圆偏振光的有效和可控发射。利用固有的手性和巨场增强,揭示了如何在不进行任何自旋注入的情况下同时修改和控制光致发光和激光的光谱、辐射模式和自旋角动量。手性发射和激光的优越特性在纳米光子学和量子光学中具有多种应用前景。图 13 为谐振超表面的高纯度圆偏振自发辐射与激光,其辐射的圆偏振度接近^[13]。

具有光涡的光束只能在具有整数轨道角动量的自由空间中传播。在此,通过提出携带自然非整数轨道角动量的光束,提出了理论和实验上的科学共识。这些特殊的涡旋光束是亥姆霍兹方程的唯一解,该方程具有拓扑电荷为 $l+0.5$ 的光学涡旋,其中 l 为整数。在自由空间传播过程中,它们的振幅和具有非整数拓扑电荷的涡相可以稳定地保持。2022 年,上海理工大学庄松林院士团队在新型可

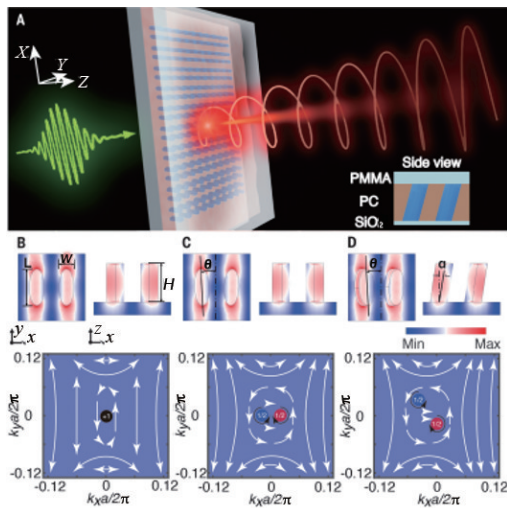


图 13 谐振超表面的高纯度圆偏振自发辐射与激光

稳定传播光学旋涡研究方面取得重要突破,为物理中的光学涡旋提供了另一种状态,可为光学及相关科学领域的创新提供基础^[14]。图 14 为分数拓扑荷旋涡光束空间传输原理图^[14]。

中国科技大学郭光灿领导的中国科学院量子信息重点实验室在量子密钥分发的研究方面取得重要进展。该实验室实现了 830 km 光纤信道量子密钥分发,将安全传输距离的世界纪录提升了 200 余 km,向实现千公里陆基量子保密通信迈出了重要的一步(图 15)^[15]。该研究团队提出了改进的四相位调制双场协议,并进一步提升了独立光源的锁相稳频技术、高带宽信道相位补偿技术以及高信噪比的单光子探测信号甄别技术等关键技术,将光纤

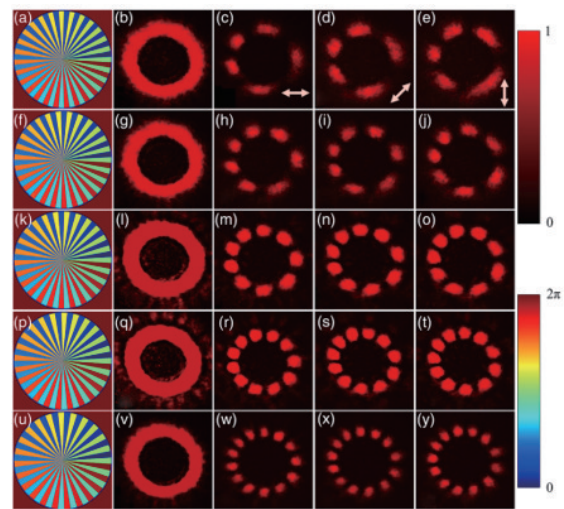


图 14 分数拓扑荷旋涡光束空间传输原理

双场量子密钥分发的安全传输距离延长至 830 km 以上。相比于国内外其他研究团队的工作,该成果不仅将传输距离从 500、600 km 大幅提升至 800 余 km,而且将安全码率提升了 50~1000 倍,为实现千公里量级陆基广域量子保密通信网络迈出了重要的一步。

华南师范大学朱诗亮、颜辉研究团队^[16]在量子网络领域取得重要研究进展:理论提出并实验实现了一种基于非共振六波混频的微波-光波相干转换方案,图 16 为利用冷原子系综实现了效率超过 82% 的微波-光波相干转换,为超导量子计算机光学接口的实用化奠定了基础^[16]。高效率、大带宽、高保真度微波-光波相干转换,不仅对超导量子比

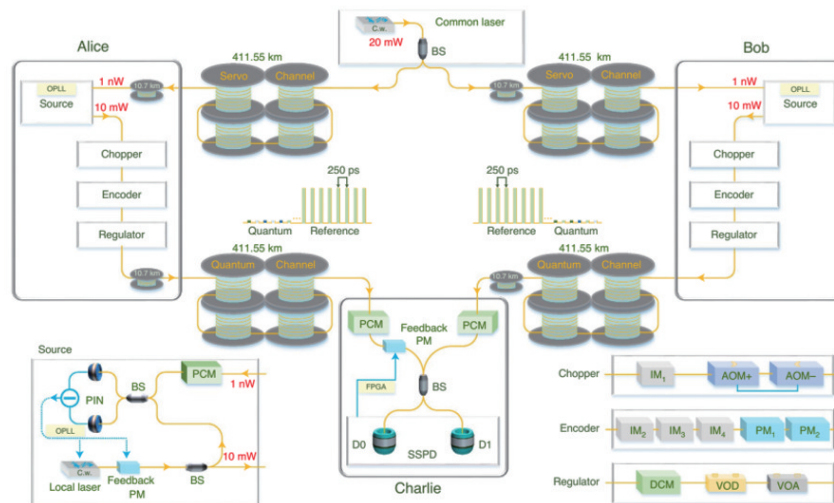
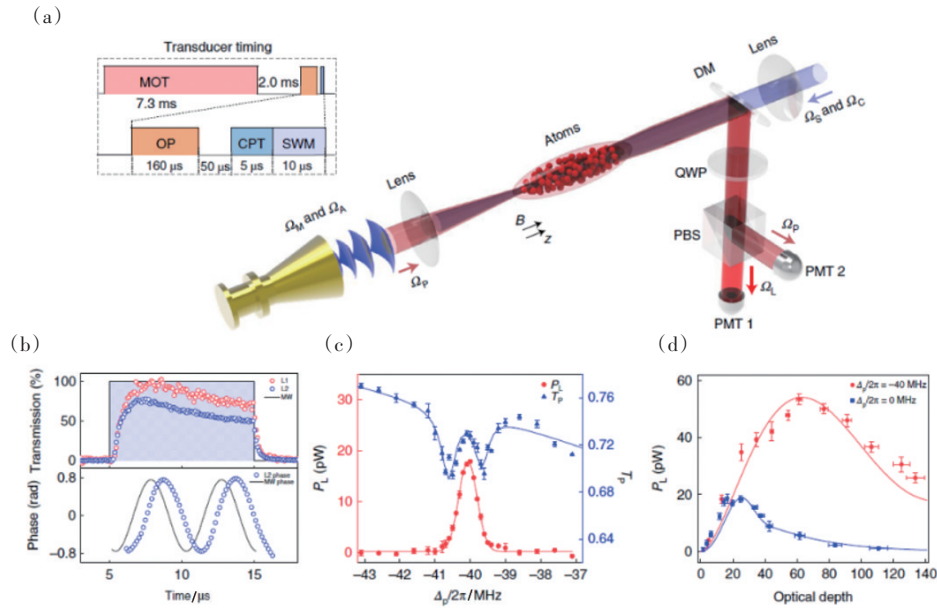


图 15 双场量子密钥分配系统的光学布局



(a) 实验构架与时序; (b) 微波-光波的波形以及光外差检测结果; (c) 探测光与产生光的谱线; (d) 全共振及非共振的微波频率上转换随光学厚度的变化

图 16 微波-光波相干转换实验结果

特的远距离互联以及分布式量子计算具有重要意义,还将带来微波光子学领域的技术进步,从而进一步促进微波光子学在卫星遥感、深空探测、电子对抗等领域的应用。

3 光物质相互作用

2022年, Singh等^[17]发展了光子纳米纤维中的光响应和光电流理论,对纳米纤维核心中嵌入金属纳米粒子和量子点的纳米纤维的光响应和光电流进行了理论描述。充分利用这种复合纤维在光电子领域的应用潜力,需要对其之间的光电转换行为进行适当描述。该研究利用基于麦克斯韦方程的传递矩阵方法计算了纳米纤维杂化体中受限探针光子的束缚态。结果发现,纳米光纤中光子的态密度与偶极-偶极相互作用耦合有关。利用量子力学微扰理论计算了偶极-偶极相互作用率引起的非辐射衰减率。利用密度矩阵法计算了光响应系数和光电流的解析表达式。预测了光电流的猝灭是由于偶极-偶极相互作用。还证明了光致发光猝灭随着偶极-偶极耦合强度的增加而增加。理论与实验结果有很好的的一致性。得到的分析表达

式可被实验人员用来进行新型的实验,并发明了新型的纳米传感器和纳米开关。图 17 为纳米纤维混合体的示意^[17]。

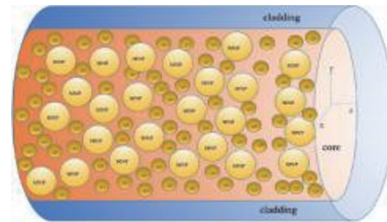


图 17 纳米纤维混合体示意

在某些波长范围内,相干辐射的产生比其他波长范围更困难,因此需要开发光源的新概念。在中红外(MIR)区域,直接激光产生相当复杂,光参量振荡器(OPO)的非线性频率下转换过程提供了一个很好的选择。OPO可用于生成高质量的光频率梳,这对实现先进的光谱学、诊断和传感的高分辨率和高速系统具有重要意义。然而,传统的OPO通常体积笨重,需要在以低阈值功率操作的紧凑设备中产生MIR范围梳的解决方案。在这项工作中, Wang等^[18]展示了一个具有超高质量因子(4.0×10^7)的小尺寸铌酸锂谐振器中有效地产生MIR频

率梳。在 1048 nm 的连续波泵浦时,在 40 nm 宽的波长范围内观察到 2 μm 的高相干梳状波的产生,阈值功率仅为 80 mW,最大输出功率为 340 mW,重复频率为 1.426 GHz。值得注意的是,这种 OPO 概念可以通过优化谐振器的设计灵活地转移到更长的波长,也可以移植到其他技术平台上,如绝缘体上的铌酸锂,从而能够与其他光学功能集成。这一进展很可能为气体传感、计量和光谱学的许多应用开辟新的途径。图 18 为光学超晶格盒式谐振器(OSBR)的实验设置和输出功率调谐测量^[18]。

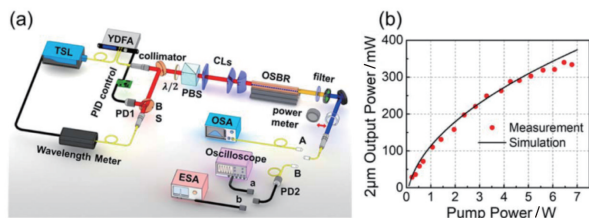


图 18 OSBR 的实验设置(a)和输出功率调谐测量(b)

光学损耗一般被认为是有害的,然而,在奇偶时(PT)对称系统中,光损耗增益之间的联合作用引起了大量有趣的现象。2022年,Kawaguchi 等^[19]研究了一个由损耗磁光环谐振器与另一个增益环谐振器耦合的非互易环谐振器组成的非互易非厄米系统,并证明了该系统可以表现出基于非互易的破奇偶时对称性,且支持单向异常点(图 19)。利用基于耦合模态理论的解析工具和二维有限元方法的模拟,分析了非互反的PT相变。其计算表明,该系统的响应强烈地依赖于操作状态,破坏或保持的PT对称。利用这种响应表明,该系统可以作为一个光学隔离器或单向激光器,通过调整第二环谐振器的损耗/增益进行调谐。因此,所提出的系统在磁性甚至光开关非互易器件和单向微环激光器等器件上有应用前景。

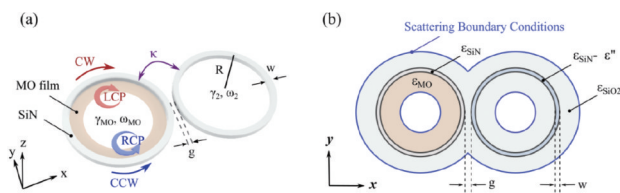


图 19 Mo 环和增益/损耗环谐振器的原理(a)和有限元二维仿真模型(b)

了解高速车辆周围的高超声速流物理学有助于车辆性能(升力和阻力)、热保护、控制和结构设计。在这一领域超过 50 年的长期研究证明了这项工作的困难但潜在的回报也十分可观。到目前为止,用于设计的计算工具(即计算流体动力学,CFD)可能很难预测简单几何图形上的流物理,更不用说整个车辆了。这在一定程度上是因为缺乏用于验证的实验数据,因此根本不存在足够的测量方法。2022年5月,Jiang 等^[20]扩展了一种方法,可以测量 6 Ma 流量中的速度分布。这种非侵入性的方法被称为氦标记测速法。研究中使用脉冲模式激光和光参量振荡器的巧妙组合来创建高强度的深紫外激光脉冲(212 nm, 6 mJ/脉冲, 100 kHz),可以通过 2+1 共振增强的多光子电离(REMPI)激发注入流中的微量氦。也就是说,这种装置可以照亮高超声速 6 Ma 的气流,创造速度剖面,就像在水流中追踪染料来研究流动结构。图 20 为时间分辨氦标记测速法(KTV)图像与 100 kHz 激光重复率下的 6 Ma 自由流^[20]。

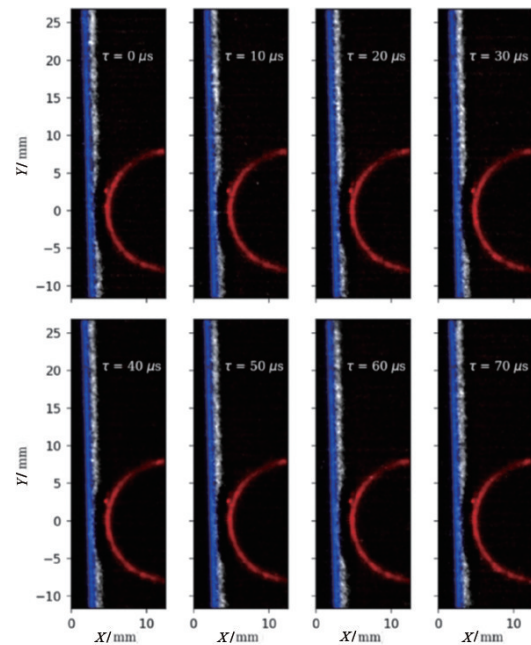


图 20 时间分辨 KTV 图像与 100 kHz 激光重复率 6 Ma 自由流

光学技术涉及材料的一些特性会引起非线性效应,例如相位偏移,它与场的强度成二次方关系。因此,能够描述非线性相移是非常重要的,当使用

简单的工具(如高斯光学)时,甚至更好。2022年6月,Zhang等^[21]展示了一个简单的双模挤压器如何通过相干态输入产生非线性相移的探测态,然后在分束器处对其进行干涉,并用零差检测器进行测量,从而产生了其所称的混合非线性干涉仪。这种智能的设备可以在某些参数范围内达到 Cramer-Rao 界限,这意味着非线性相移的估计具有给定数量的测量所能达到的最小方差。如图 21 为基于非线性混合干涉仪的非线性相移估计方案示意^[21]。

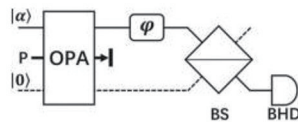


图 21 基于非线性混合干涉仪的非线性相移估计方案示意

尽管超表面具有亚波长的厚度,但它是一种强大的设备,可以以几乎完全的控制水平来操纵电磁波,这就解释了为什么这种结构目前被设想用于如此多的领域。这对于太赫兹技术的发展尤其如此,这是一个非常需要高效和紧凑组件的领域。然而,传统的具有精确响应的器件数值设计方法相当麻烦,因为求解如此复杂结构的麦克斯韦方程会消耗大量的时间和计算能力。这一缺点和针对这类设备设计规则的缺乏,促使人们对人工智能作为一种构思高效光子组件的系统方法越来越感兴趣。目前,许多研究者致力于深度学习架构的概念,以产生尽可能接近预期的光学特性的设计。Gao 等提出了一种先进的人工神经网络,以加速呈现不对称传输特性的太赫兹超表面的设计(图 22)^[22]。这项工作向快速和可靠的超表面自动设计迈出的一步,被认为是设计更复杂的光子元件的一个灵感来源。手性超材料诱导不对称传输(AT)在太赫兹 (THz) 极化应用方面具有很大的潜力,但其设计主要依赖于传统的试错正演策略。初步结果表明,其模型可以准确地预测任何一种超材料结构的太赫兹响应,并从给定的太赫兹响应中反向检索结构参数。结果表明,深度学习辅助设计方法比传统基于物理的超材料设计方法具有更有效的设计性能。这项工作可能为手性超材料提供另一种人工智能

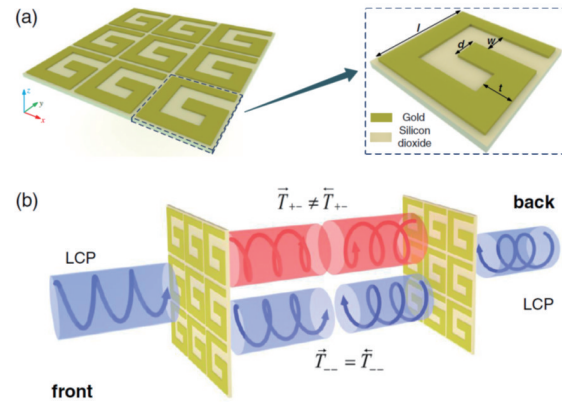


图 22 手性太赫兹超材料的示意图(a)和手性太赫兹超材料的不对称传输说明(b)

设计策略,并为前所未有的太赫兹应用繁荣发展提供线索。

基于倏逝波相互作用的表面等离子体共振 (SPR) 传感器由于其无标记检测和实时监测的优点,在生物和化学分析物的检测中得到了广泛的应用。然而,制作高灵敏度的 SPR 气体传感器仍然是一个挑战,因为气体分子通常比生物分子小得多,导致气体吸附检测灵敏度较差。2022 年 9 月, Zhang 等^[23]展示了一种使用纳米多孔金 (NPG) 薄膜的灵敏 SPR 气体传感器,NPG 的多孔结构增加了气体分子的吸附面积,显著提高了检测灵敏度。通过控制溅射时间和脱容时间来调整薄膜厚度和孔隙率,优化了 NPG-SPR 传感器的性能,获得了 10^{-4} 硫化氢气体的光谱转移,灵敏度是传统 Au-SPR 传感器的 6 倍以上。为敏感的 SPR 气体传感器的实际应用和最终的灵敏度提供了一个潜在富有成效的方法。如图 23 为用于室温下现场气体检测的 Kretschmann 型光谱 NPG-SPR 传感器平台示意^[23]。

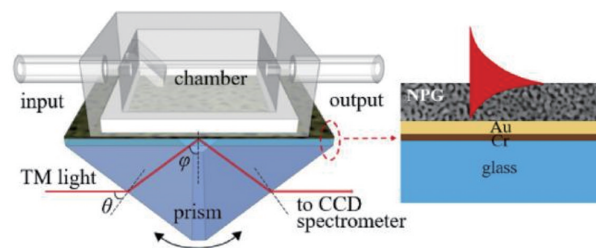


图 23 室温下现场气体检测的 Kretschmann 型光谱 NPG-SPR 传感器平台示意

在可见光和红外光谱的宽光谱范围内,窗户的光学特性对建筑物的能源效率起着重要的影响。根据普朗克定律,窗户必须阻挡携带建筑内部表面辐射能量的中远红外辐射。这使得能量逃逸得以减轻,从而有助于减少供暖系统在寒冷季节的电力消耗。同时,窗户必须有效地在可见光范围内传输阳光,以便在没有人工照明的情况下实现良好的室内视觉。要同时达到这些目标,就需要适当地设计窗口。2022年11月,为了获得合适的光学性能,Shameli等^[24]报告了一项理论工作,建议使用一种薄膜涂层,包括一个包含随机分布的、光学共振的、含有金属钾微粒的透明介质基质。这种材料与其他金属相比,可见光损失更少,红外光损失更多,涂层可以达到50%的可见光透光率,对于未来建筑节能方案设计提供了一种十分有价值的方案。图24为模拟智能窗口的示意^[24]。

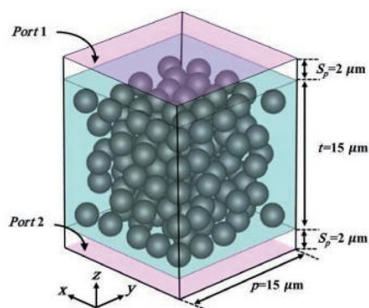
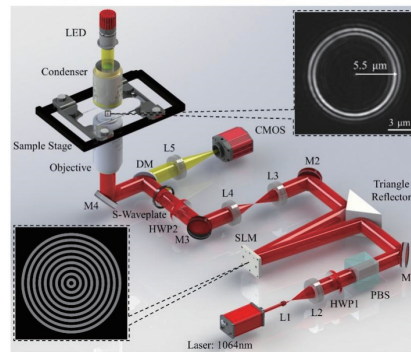
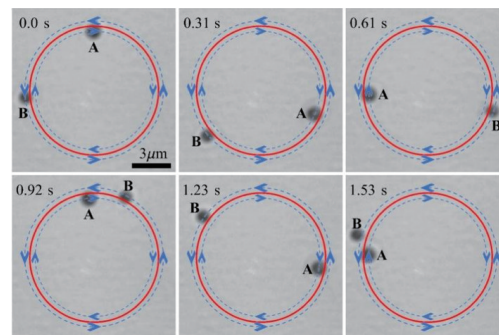


图24 模拟智能窗口的示意

中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室姚保利团队,联合暨南大学李宝军团队、新加坡国立大学仇成伟、西班牙国家研究委员会 Nieto-Vesperinas,提出广义电磁虚动量力的高阶理论模型,全面揭示了光学力与虚坡印廷动量之间的普适性联系,并首次从实验上验证了电磁虚动量力对微粒的动力学操控,为电磁虚动量的有质动力学特性提供了直接证据(图25)^[25]。该项成果是首例基于电磁虚动量的光学微操纵实验,是推动电磁虚动量从理论迈向实际应用的关键一步,对发展新型光扳手与光学转子技术具有重要参考价值,同时也为探索虚动量的其他应用场景(如激光冷却、真空悬浮及光学分选等)提供启发。



(a) 产生光学虚动量涡旋的全息光镊实验装置



(b) 2个金小球被分别捕获在虚坡印廷动量(IPM)涡旋光束的内外侧平衡位置,并沿不同方向做轨道运动
图25 验证光学虚动量力的微粒旋转实验

4 光学材料与结构

光学材料既包括传统的光学玻璃、光学晶体,也包括了硅光子学材料、有机半导体、二维材料和钙钛矿分子等近年来广受关注的新型光学材料,光学材料与结构的不断发展创新对光学应用场景下的多种实验以及器件化应用起着巨大的推动作用,近年来相应优秀成果层出不穷。

基片是现代光学显微和半导体集成电路所必不可少的组成部分。在光学显微领域,基片用于放置被观测的样品,自然地,人们获得的光学信号不仅包括样品的信息而且也包括基片的特征。在过去近20年来,研究人员对散斑来源的认识始终模糊不清,猜测源于照明光的非均匀性、光路中的灰尘、无法消除的杂散光、基片的表面起伏等,或者是这几种因素的结合,但一直未有确定性的研究证明。在现实应用中,散斑图案限制了光学检测纳米颗粒的灵敏度,例如,散斑背景的存在使得人们无

法直接探测依附在玻片上 15 nm 以下的颗粒。因此,破解散斑的起源之谜,研究抑制散斑的影响或者利用散斑,具有重要的基础和应用意义。2022 年 11 月,华中科技大学陈学文团队^[26]用高灵敏度干涉显微镜观察到,表面粗糙度远低于 0.5 nm 的玻璃覆盖物具有明显的散斑图案。发现这些散斑模式明确地来源于亚纳米表面波动,并开发了一个直观模型来说明亚纳米非共振介电特征如何在远场产生明显的干涉对比。证明了这种光学指纹可用于可重复的位置识别和无标记的横向位移检测,实验精度为 0.22 nm。超灵敏位移检测能力可能在半导体工业和超分辨光学显微镜中得到应用。如图 26 为利用基片形貌的光学指纹,实现基片横向位移的无标记监测,精度可达 0.22 nm^[26]。

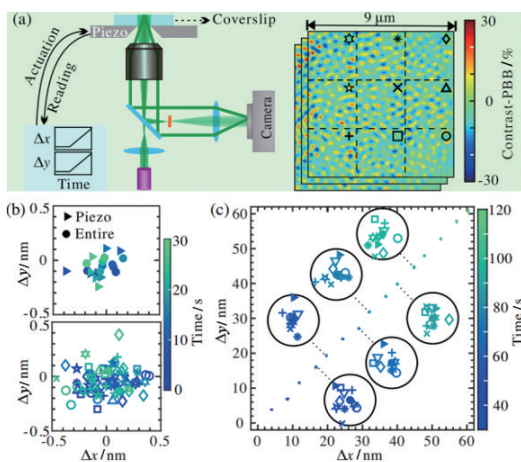


图 26 利用基片形貌的光学指纹

光调制器过去是并将继续是能源和低成本的光通信网络的重要设备。异质硅和铌酸锂调制器已显示出低光损耗、低驱动电压和大调制带宽的良好性能。然而,直流偏置漂移是使用铌酸锂作为活性电光材料光调制器的一个主要缺点。2022 年,中山大学蔡鑫伦课题组^[27]演示了基于非均匀硅和铌酸锂平台的高速和无偏置漂移的 Mach-Zehnder 调制器。该器件结合了硅中稳定的热光直流偏压和铌酸锂中的超快速电光调制,并显示出 1.8 dB 的低插入损耗、3 V 的低半波电压、至少 70 GHz 的电光调制带宽和高达 128 Gb/s 的调制数据率。图 27 为热调控制偏置点硅和铌酸锂异质集成调制器示意^[27]。这为许多对纯相位调制要求严格的应用场

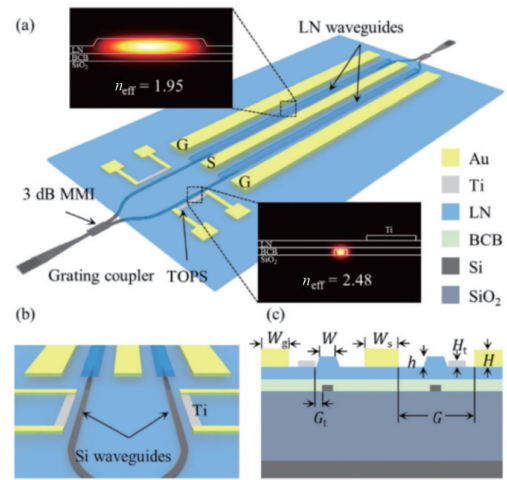


图 27 热调控制偏置点硅和铌酸锂异质集成调制器示意

景,例如量子光学、微波光子学等领域开辟了新的实现途径。

三维(3D)无机纳米结构的精确可控制备技术是近年来的研究热点,在航空航天、微电子器件、量子芯片、太阳能电池和结构材料等领域发挥着至关重要的作用。无机材料前驱物容易结晶,导致难以一次性直接制备 3D 无机微纳结构。激光 3D 打印技术是制备三维无机微结构的重要手段之一,但是在制备无机微结构时,其特征尺寸和加工分辨率受到材料和光学衍射极限的限制,难以实现纳米尺度制备。氢倍半硅氧烷(HSQ)作为一种无机光刻胶,具有 EUV 辐照源和电子束。然而,利用红外光源制造三维纳米级 HSQ 特征仍然具有挑战性。2022 年,中国科学院理化技术研究所郑美玲团队联合暨南大学段宣明团队,以波长为 780 nm 的飞秒激光(重复频率为 80 MHz,脉冲宽度为 120 fs)作为光源,突破光学衍射极限的限制,在无机光刻胶 HSQ 中获得了仅为激光波长 1/30($\lambda/30$)的 26 nm 光刻特征尺寸,并制备出具有优异耐高温和耐溶剂性能的 3D 无机微结构^[28]。此外,还利用飞秒激光超衍射纳米光刻技术构筑了多种基于无机纳米结构的光子学微器件和仿生微结构,为制备具有纳米分辨率、耐热性和耐化学性的微纳器件提供了广阔的应用前景。图 28 为飞秒激光直写无机纳米结构的光场分布示意^[28]。

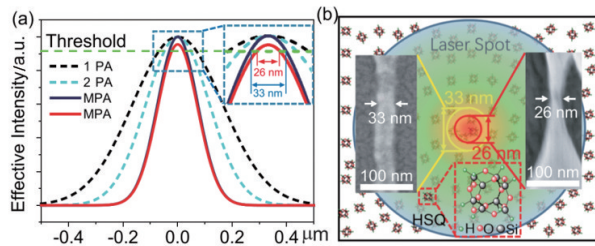


图 28 飞秒激光直写无机纳米结构的光场分布示意

浙江大学邱建荣团队与之江实验室谭德志团队^[29]合作在《Science》上发表了飞秒激光三维极端制造方面的研究成果。他们发现了飞秒激光诱导的空间选择性微纳分相和离子交换规律,开拓了飞秒激光三维极端制造新技术,首次在无色的玻璃材料内部实现了带隙可控的三维半导体纳米晶结构,为新一代显示和存储技术提供了新的方向。开发了利用空间光调制器的多点多层写入技术,并在均匀的玻璃中,通过调整不同元素掺杂,进而产生不同效应的三维立体结构(图 29)^[29]。邱建荣介绍,可以通过这些结构,形成微纳尺度上的新结构,进而产生精密可控的不同颜色的发光,做成各种新的器件。使用上述技术后,光存储不仅功耗小,而且容量有望达到 1 PB/光盘,将是一个大有可为的未来发展方向,预期存储寿命将达到几百万年之久。

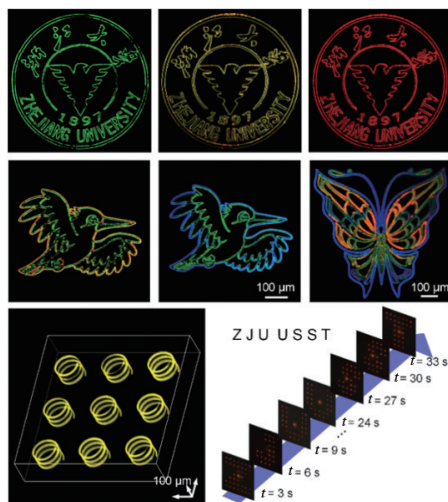
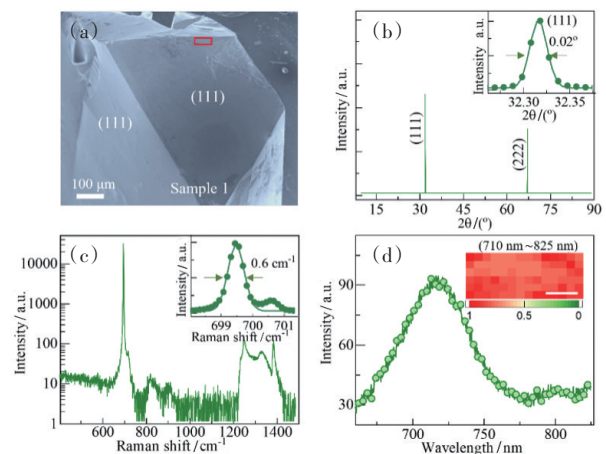


图 29 超快激光 3D 直写玻璃中钙钛矿纳米晶的彩色发光图案和全息显示

国家纳米科学中心刘新风团队与休斯顿大学包吉明团队和任志锋团队合作,在超高热导率半导

体-立方砷化硼(c-BAs)单晶的载流子扩散动力学研究方面取得最新进展,为其在集成电路领域的应用提供重要基础数据指导和帮助。通过大量样品反复比较,如图 30^[30]所示,该团队确定了综合应用 XRD、拉曼和带边荧光信号来判断样品纯度的方法,并挑选出具有锐利 XRD 衍射(0.02°)、窄拉曼线宽(0.6 波数)、拉曼本底接近 0、极微弱带边发光的高纯样品^[30]。立方砷化硼高的载流子和热载流子迁移速率,以及其超高的热导率,表明其可以广泛应用在光电器件、电子元件中。目前砷化硼样品的生产制备还主要停留在实验室级别,是否能够量产并进行商业化应用还存在着诸多不确定因素。尽管如此,它依然是业界将来可以深入探索的研究方向之一,后续的进展和前景也非常值得关注。



(a) c-BAs 单晶的扫描电镜照片;(b) 111 面的 X 射线衍射;
(c) 拉曼散射;(d) 极微弱的带边发光及荧光成像

图 30 c-BAs 单晶的表征

清华大学孙洪波、林琳涵开发了一种独立于聚合的激光直写技术,称为光激发诱导的化学键(PEB)(图 31)^[31]。在没有任何添加剂的情况下,半导体量子点内部激发的空穴被转移到纳米晶体表面,并改善其化学反应性,导致粒子间的化学结合。作为概念验证,作者以超出衍射极限的分辨率打印了任意的三维量子点架构。该策略将使自由形式的量子点光电器件的制造成为可能,如发光器件或光电探测器。研究团队利用 PEB 开发了一种激光纳米打印技术,可以将分散的量子点直接组装成高精度和高分辨率的 3D 结构。在没有任何添加剂或

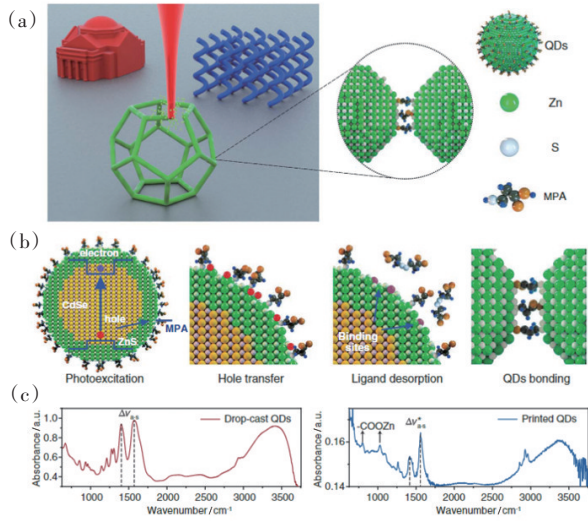


图 31 光激发诱导的化学键(PEB)工作原理

后处理处理的情况下,PEB技术能够在打印过程中保持量子点的光子和光电特性^[31]。尽管这一概念在半导体量子点中得到了证明,但一旦可以产生高能载流子来改变纳米粒子的表面化学性质,它就有可能扩展到非半导体纳米材料。

华东理工大学化学与分子工程学院朱为宏、物理学院郑致刚和费林加诺贝尔奖科学家联合研究中心 Ferin-ga 合作,在光编码液晶超结构应用取得突破性研究进展^[32]。研究团队所发展的独特“位阻性烯桥光控体系”,发展了一类双稳态内源手性二芳基乙烯分子。与外接手性基团所带来的手性调控相比,内源手性的转变仅来自于开环体的轴手性与闭环体的中心手性之间的变化,非常有效地避免了含有多手性源的非对映异构体的产生,从分子设计源头创新解决了液晶微腔中的多畴结构问题(图 32)^[32]。该项研究通过一

种具备热稳定性、强抗疲劳度和广螺旋扭力调制的内源手性分子光开关,完美解决了早期传统外源手性光开关液晶体系所面临的问题,推动相关领域研究向前迈进了重要的一步,解锁了光可编程新技术的发展。

5 光学设计和仪器仪表

采用多路复用技术可以显著提高元表面全息图的信息容量。与波长(即颜色)、角度、轨道角动量和非线性频率复用等其他复用方案相比,偏振复用策略具有操作简单和易于与液晶集成的优点。2022年4月,Zhang等^[33]提出了一种新的元表面编码方法,以实现偏振复用全息,显示了从一个全斯托克斯空间到另一个全空间的灵活偏振变换。通过使用混合遗传算法设计和数字化的元表面,他们通过实时改变输入/输出偏振,演示了时序全息显

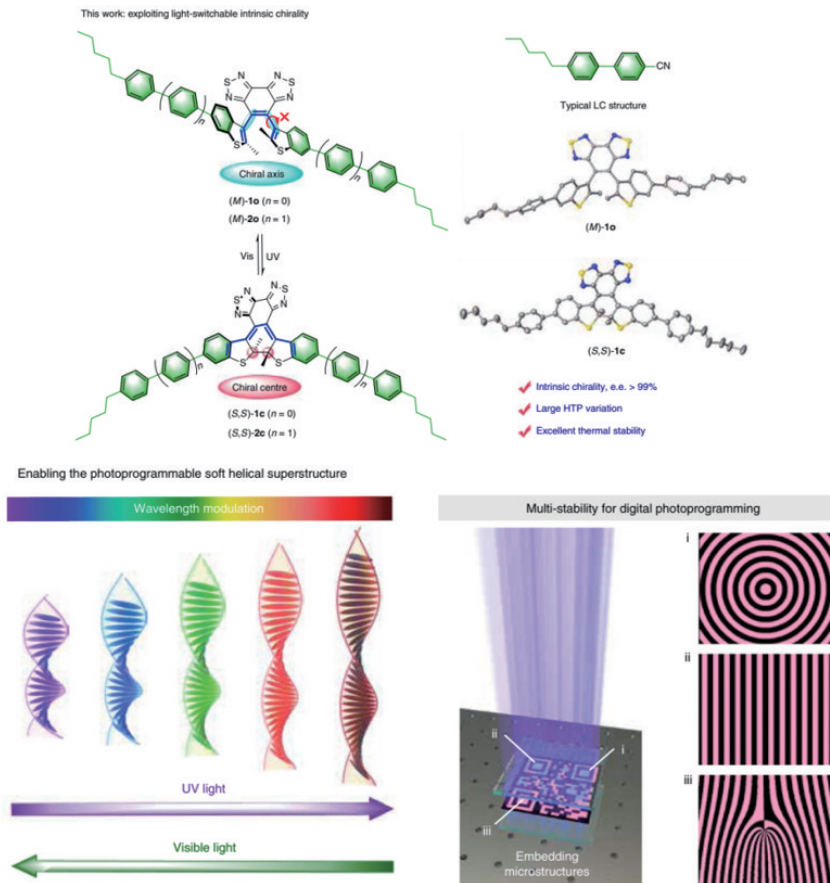


图 32 可控手性赋予光开关光可编程 Lc 螺旋超结构的独特特征

示和复杂光学加密。它们还展示了数值孔径达到0.8的大视场和40%的高转换效率。与其他方案相比,所提出的编码规则具有更大的信息容量,将扩展全息视频的显示内容,增强偏振加密的安全性,促进动态显示和光学加密等应用。图33为双密钥光加密的设计原理^[33]。

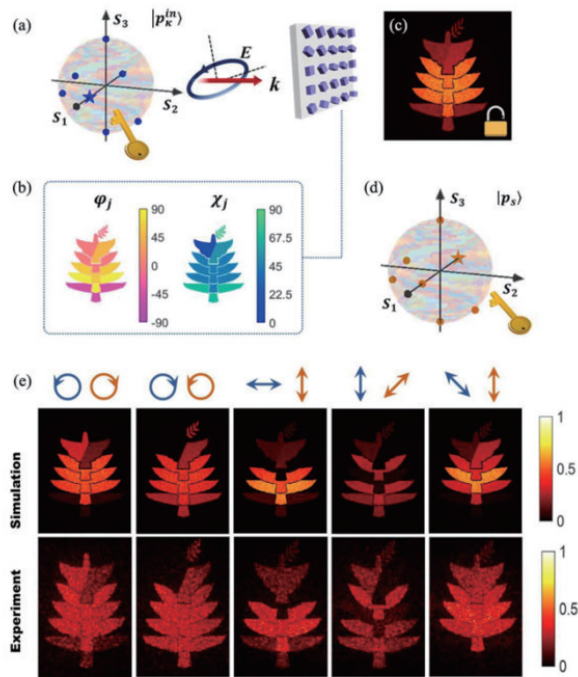


图33 双密钥光加密的设计原理

2022年5月,在磁振子驱动光子学的工作中,Wang等^[34]通过使用衰减全反射技术,重点研究了表面磁振子的激发及其对反射光束的Goos-Hänchen和Imbert-Fedorov位移的影响。表面磁振子极化是一种准粒子,由入射电磁辐射和固体表面的磁偶极子极化耦合产生。磁振子类似于其他形式的极化子,如等离子体激元和声子,它代表了耦合到固体中电子电磁场的磁分量的振荡,而不是其电分量的振荡。通过使用传递矩阵方法,分析推导了Goos-Hänchen和Imbert-Fedorov位移的表达式。数值计算基于反铁磁晶体 FeF_2 。表面磁振子极化激元的激发对这些位移有着神奇的影响。例如,它们可以大大增强反射光束的Imbert-Fedorov位移,这种位移可以用于检测表面极化。这项工作从理论上证明,这些激发是驱动和控制太赫兹频率下光

和物质相互作用的完美工具,这对于磁功能和光学功能相结合的信息处理应用来说至关重要。如图34是在理论推导和数值计算中使用的构型和坐标系^[34]。

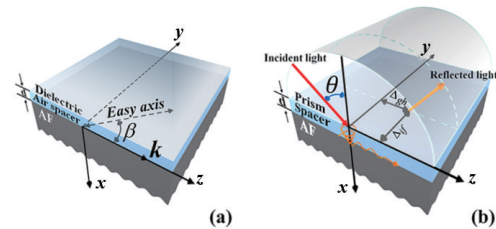


图34 理论推导和数值计算中使用的构型和坐标系

光的结构,即其固有参数如强度、偏振、频率等的空间和时间分布,可以根据需要进行定制和操纵,从而适应具体需要的应用。在许多情况下,要雕刻的参数集是有限的。然而,对完全结构光场或脉冲的探索有助于释放有趣的时空电磁波包。2022年8月,Murat Yessenov等通过研究矢量而不是标量时空波包,将这一讨论提升到一个新的水平。其中新的讨论是通过空间强度和偏振以及对光场的时间操纵而实现的。他们在理论上和实验上证明了所产生的时空波包表现出的独有特征。Yessenov等^[35]设想了在通过湍流大气的自由空间通信中的潜在应用。这种矢量的时空波包(ST-WPs)具有圆柱对称的偏振矢量结构,需要联合操纵光场的空间、时间和偏振自由度。这些结果在粒子操纵、非线性光学和量子光学中有巨大作用。图35是在光锥表面的超光速三维时空波包的光谱支持及其光谱投影^[35]。

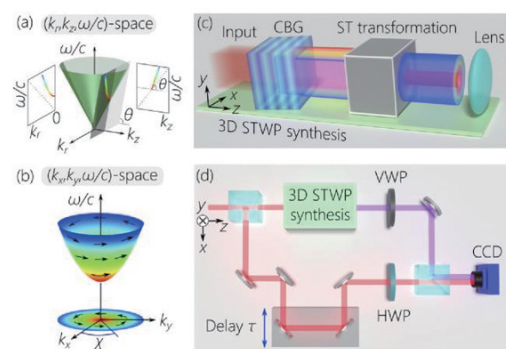


图35 在光锥表面的超光速三维时空波包的光谱支持及其光谱投影

目前的高速成像技术迫使研究人员做出了几个妥协,其中之一是在成像速度和记录持续时间之间的权衡。具体来说,在 MHz 到 GHz 范围内的帧速率下,人们通常只能记录非常短的持续时间。然而,如果希望记录更长的持续时间,现有技术通常将帧率限制在 kHz 到 MHz 范围内。为了缓解这种权衡,Kornienko^[36]等提出了一种混合方法,结合 3 种时间偏移、纳秒脉冲激光器和传统的高速相机,可以记录 kHz 到 MHz 的长时间速率。在一个曝光周期内,相机记录了所有 3 个时间偏移脉冲的一张图像,通过对空间傅里叶域的编码,可以提取出 3 个独立的帧。将 3 种脉冲激光器之间的相对时间延迟根据应用情况进行调整,可以在持续 10 s kHz 的长期记录下,高帧率爆发超过 10 MHz。凭借这种独特的能力,能够研究整个流体注入事件的复杂流体动力学的速度和加速度场。通过较短的脉冲,这种技术可以扩展到研究更快的事件,例如化学反应。如图 36 为能够用 kHz 技术监测微观 MHz 动态的系统^[36]。

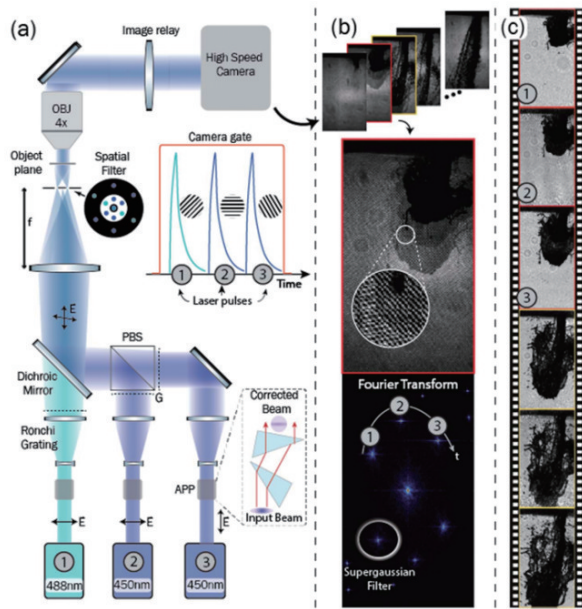
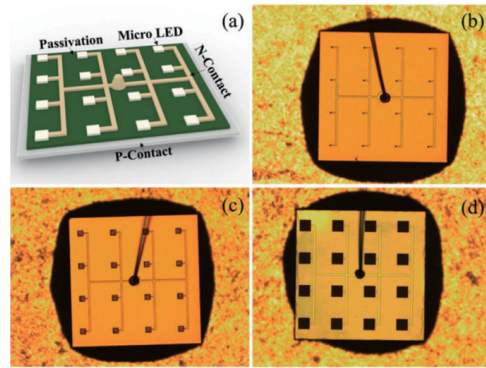


图 36 能够用 kHz 技术监测微观 MHz 动态的系统

几十年来,光探测器已经被优化,用于从 O 波段(1260~1360 nm)到 U 波段(1625~1675 nm)的近红外光谱光纤通信。许多可见光通信(VLC)系统和演示都是基于这些设备的。为了改进 VLC 系

统,必须开发出响应率峰值在 400 nm 左右的新探测器。可见光通信(VLC)已成为 6G 中一种很有发展潜力的通信方法。然而,受材料、结构和制造的限制,接收器件的发展远比传输器件慢得多。2022 年 10 月,Shi 等在硅基板上制造了一种 InGaN/GaN 多量子阱垂直结构微 LED 光电探测器(μ PD,图 37)^[37]。对 μ PD 10、50 和 100 μ m 3 种尺寸的光电性能和通信性能进行了综合比较。3 种 μ PD 的峰值响应均在 400 nm,而 10、50 和 100 μ m μ PD 的半高全宽的通带全宽分别为 87、72 和 78 nm。50 μ m μ PD 在 -20 dB 的截止带宽高达 822 MHz,这是第一次利用基于 GaN 的微 PD 实现超过 10 Gbps 的 VLC 系统。该研究充分证明了 Si 衬底和垂直结构在 InGaN/GaN μ PD 中的优越性,并显示了其在 10 Gbps 以上高速 VLC 链路中的巨大潜力。



(a) 4x4 硅衬底微 LED 阵列布局示意;10 μ m(b)、50 μ m(c) 和 100 μ m(d)微 LED 阵列的光学显微镜图像

图 37 微 LED 阵列

6 光学信息采集和处理

定量相位成像(QPI)在环形照明影响的研究中又向前迈出了一步。几十年来,QPI在各种辐射和物质波场中对光学做出了重要贡献。这个家族包括可见光、电子、X 射线和中子。2022 年 5 月,Kulkarni 等^[38]研究了二维 QPI 中可见光显微镜的环形照明。特别进行了环形照明和圆盘照明之间的比较。散焦产生相对对比度,随后对其进行解码以实现 QPI。QPI 成像协议是个 2 步过程:首先,测量包含编码相位信息的多个散焦图像;其次,对测量的焦点图像序列进行解码,以提供定量的相位信

息。换句话说,这是相位检索计算成像。光学软件构成 QPI 成像系统的固有部分,因此,其光学组件既真实又虚拟。这项工作既重要又有趣。如图 38 为 QPI 系统用于进行二维 QPI 实验^[38]。

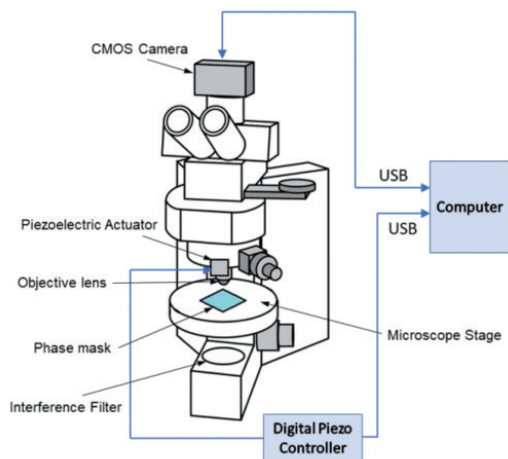


图 38 QPI 系统用于进行二维 QPI 实验

具有单个透镜的暗场数字全息显微镜(df-DHM)显示出在半导体晶片上进行计量的巨大潜力。通过检测位于不同层的参考光栅之间的位移,是一种评估集成电路和芯片结构之间垂直对准的有力技术。然而,需要提高其灵敏度和准确性,以满足新材料和工艺的需求。这需要最小化显微镜设置引入的伪影。在此背景下,2022年6月,Messinis 等^[39]提出了透镜离光瞳中光场的计算变形,作为一个潜在的有效解决方案,以减轻这些相干成像效应。其实验数据和模拟结果比较,证明了这种方法在计量应用中的重要性。此外,研究数据还表明,利用 DHM 的全部潜力需要一个低光学散射水平的成像透镜。这种方法可以将透镜散射抑制到非常低的水平。图 39(a)为光纤耦合 df-DHM, (b) 为全息重建过程^[39]。

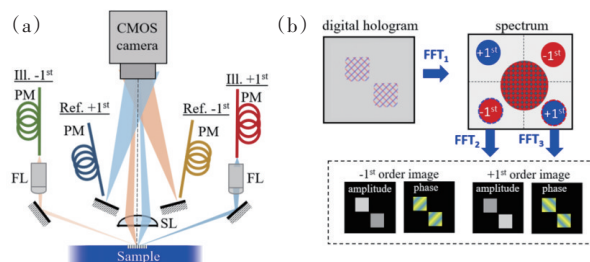


图 39 光纤耦合 df-DHM(a)和全息重建过程(b)

多维光谱学的概念是在 20 世纪 60 年代和 70 年代在核磁共振中发展起来的。它揭示的核自旋之间耦合能力是具有巨大意义的。在过去的几十年里,该方法已经被移植到光学领域,在那里,通过简化光学诱导激发之间相互作用的观察和表征,它也进行了类似的变革。其中一个挑战是光学波长固有的相位波动。令人惊讶的是,在太赫兹频谱区域降低多维光谱学滞后于光学域,尽管较长的波长减少了相位波动的影响。太赫兹地区的挑战是低效的检测方法,因为其需要非常长的平均时间。2022年8月,Gao 等^[40]通过实现一种非常聪明的并行检测方法,解决了这一难题,它使用了反射梯队、双折射棱镜和互补金属氧化物半导体(CMOS)相机的组合。梯队产生一个有空间变化的延迟采样脉冲,然后用相机捕获,从单次拍摄中产生许多相对延迟的完整时间轨迹。结果表明,与传统的延迟扫描方法相比,在保持非线性太赫兹信号精确检索的同时,多维太赫兹谱的采集有了 2 个数量级的加速。这个方案使多维太赫兹光谱学技术的广泛实践成为可能。如图 40 为常规检测和单次检测方法获得的二维太赫兹谱的比较^[40]。

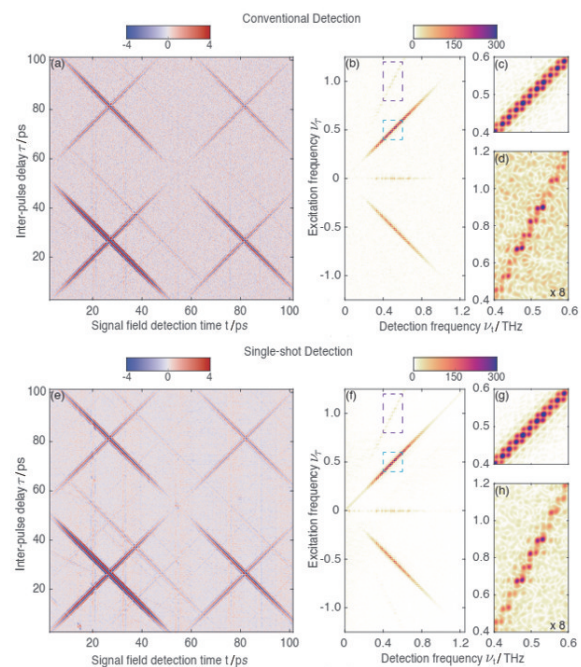


图 40 常规检测和单次检测方法获得的二维太赫兹谱的比较

毫无疑问,智能手机是过去10年中最受欢迎、最有用的技术设备之一。随着内置紧凑型相机的集成,智能手机成为各种常见活动的强大和通用工具。这些相机的分辨率和图像质量都经过了最严格和最详尽的质量测试。这种测试通常在组装的相机上进行。因此,有故障的相机很难修复,在某些情况下,必须完全丢弃。2022年9月,Zhang等^[41]提供了一种革命性的方法来改进这个测试步骤。在该方法中,他们采用了另一种基于液晶技术的革命性设备——空间光调制器(SLM)。他们的建议包括将SLM作为整体测试系统的一部分,并利用其可编程相位调制,以一种快速和可靠的方式解决与被测镜头组相关的典型错误,并以这种方式降低装配公差。通过利用SLM的可编程特性,将要测试的镜头组固定到测试系统中所引起的装配失调,快速进行动态扫描和补偿。Zhang等^[41]通过仿真验证了SLM上加载的相图模式的设计准则,并将其应用于测试系统。这样,该方法显著降低了被测镜头的定位要求,从而提高了测试效率。且测试透镜组的通过率达到92.6%。如图41为手机镜头成像示意^[41]。

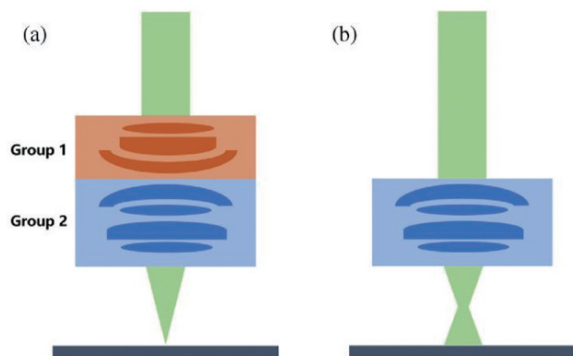


图41 手机镜头成像示意

在航空业,迫切需要对涡轮燃烧有更全面的了解,以提高涡轮发动机效率,减少燃烧排放。可调二极管激光吸收光谱法是一种广泛应用于原位、无创、定量和快速检测燃烧种类、温度和速度的方法。通过结合层析成像方法,视线吸收光谱方法可以扩展到各种燃烧流场的快速二维和三维成像。然而,这种技术在实际航空发动机中的现场部署是相当罕见的。2022年11月,Upadhyay等^[42]成功使用大

规模激光吸收层析成像系统来测量劳斯莱斯现代Trent发动机的排气羽流中的二氧化碳分布数据。激光诊断系统包含126束近红外光束(6个角投影×21个平行光束),安装在一个直径为7 m的框架上,允许60 mm的空间分辨率。通过监测位于发动机出口喷嘴下游3 m处的燃烧流,成功地展示了二氧化碳在1.25帧/s下的空间分布的层析成像。这项工作为提高对大型涡轮机燃烧的理解打开了全新的大门。如图42为在马德里国家航空航天研究所(INTA)的发动机试验台设施后面的光学安装框架(红色)^[42]。



图42 马德里国家航空航天研究所(INTA)的发动机试验台设施后面的光学安装框架(红色)

在低光条件下的三维成像一直是许多应用的挑战,如医学成像、自动驾驶车辆和国防等领域。2022年11月,为了获得这些图像, Lee等^[43]引入了光子计数积分图像,该积分图像可以用泊松分布进行建模,并使用带有统计估计的体积计算重建技术。然而,在光子缺乏的条件下,它可能无法重建高质量的三维图像。为了克服这一缺点, Lee等提出了一种预处理技术,包括对比度限制的自适应直方图均衡(CLAHE)和直方图匹配(图43^[43])。这提高了在光子缺乏条件下的三维图像的视觉质量。通过计算机模拟和光学实验,证明了该方法的实用性,也证明了该方法可以在光子严重缺乏条件下提供精确的三维信息。

优越的并行通信性能使得光子神经网络代替神经网络(NNs)是具有研究价值的。然而,很难在光学上实现这一替代。2022年12月, Huang等^[44]提

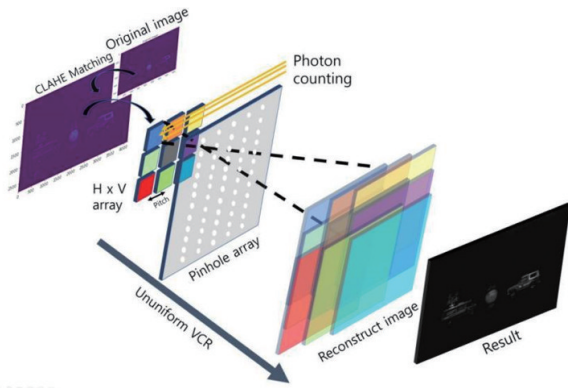
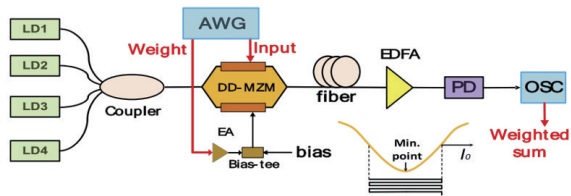


图43 Jiheon Lee等提出方法的程序

出并通过实验演示了一种用于二值化神经网络(NN)的光处理器。二值化神经网络的实现涉及到多重累积运算,其中应该实现正权值和负权值。在该处理器中,通过将双驱动 Mach-Zehnder 调制器(DD-MZM)的操作转换到+1和-1这2个二进制权值对应的2个求交点来实现正负权值,并在DD-MZM上进行乘法。积累操作通过色散诱导的时间延迟和光电探测器(PD)检测来实现。进行了一个概念验证实验,在2个基准图像分类任务上,测试了一个由光处理器以32千兆浮点运算/s(GFLOPS)的速度加速的二值化卷积神经网络(CNN)。该处理器的大带宽和并行处理能力对下一代数据计算具有很高的参考价值,在光子学领域具有巨大的发展潜力。如图44为其实验设置,DD-MZM和PD是光处理器的I/O接口^[44]。



DD-MZM和PD是光处理器的I/O接口。

图44 一种用于二值化神经网络光处理器的实验设置

清华大学成像与智能技术实验室戴琼海院士团队提出了一种集成化的元成像芯片架构(Meta-imaging sensor),开辟了一条新路径^[45]。区别于构建完美透镜,研究团队另辟蹊径,研制了一种超级传感器,记录成像过程而非图像本身,通过实现对非相干复杂光场的超精细感知与融合,即使经过不

完美的光学透镜与复杂的成像环境,依然能够实现完美的三维光学成像。团队攻克了超精细光场感知与超精细光场融合两大核心技术,以分布式感知突破空间带宽积瓶颈,以自组织融合实现多维多尺度高分辨重建,借此能够用对光线的数字调制来替代传统光学系统中的物理模拟调制,并将其精度提升至光学衍射极限。2021年,该研究团队首次提出了数字自适应光学的概念(图45)^[45]。数字自适应光学技术仅仅需要将传统成像传感器替换为元成像芯片,就能为大口径地基天文望远镜提供全场动态像差校正的能力。研究团队在中国国家天文台兴隆观测站上的清华-NAOC 80厘米口径望远镜上进行了测试,元成像芯片显著提升了天文成像的分辨率与信噪比,将自适应光学校正视场直径从40“提升到了1000”。由此进一步研究建立新一代通用像感器架构,有望带来三维感知性能的颠覆性提升,或可广泛用于天文观测、工业检测、移动终端、安防监控、医疗诊断等领域。

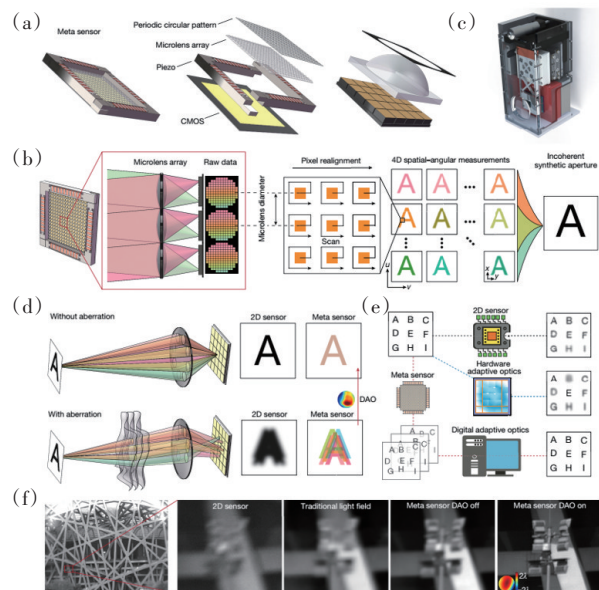


图45 用于像差校正3D摄影的集成成像传感器

刘东与刘崇研究团队所首次报道的双视场高光谱分辨率激光雷达(HSRL)克服了传统遥感方法需要先假设的缺点,实现了对水云微物理特性及气溶胶光学特性垂直结构的全天时、高时空分辨率的精确测量,并通过实测数据验证了云与气溶胶相

互作用的关键机理^[46]。该工作是双视场HSRL在云与气溶胶相互作用研究中的首次应用。双视场高光谱分辨率激光雷达技术实现了大气中云及气溶胶特性的精确、立体探测(图46)^[46],不仅为理清云与气溶胶相互作用机理提供了有力的数据支撑,也对更深入理论、更系统地研究气候气象具有重要的科学意义。

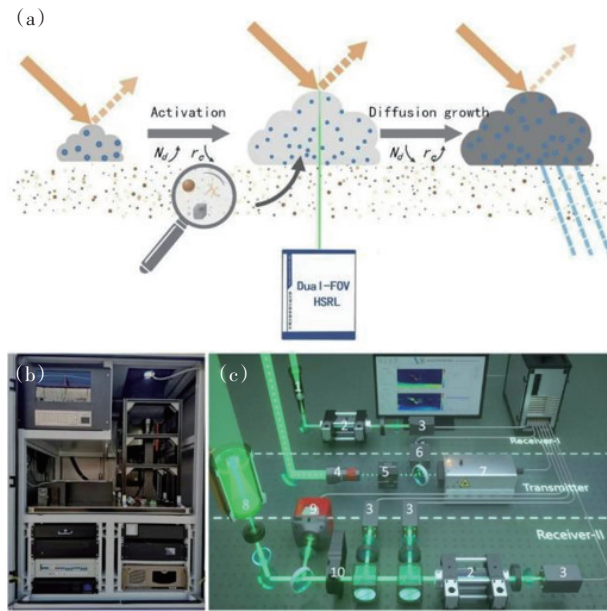


图46 云与气溶胶相互作用示意(a),双视场HSRL系统样机(b)和系统内部结构示意图(c)

7 光子学交叉领域

2022年3月,华中科技大学光学与电子信息学院费鹏课题组与武汉光电国家研究中心张玉慧课题组合作提出了一种新的计算光学成像策略,通过首创的多级衍射调控光片照明成像技术和类脑式分而治之深度学习超分辨算法,大幅突破现有三维超分辨成像的时空分辨率极限,为目前光学显微镜难以完成的活细胞精细动态和相互作用的快速、三维、长时程观测提供了强有力的新工具(图47)^[47]。该团队围绕生物光学成像因光学孔径有限,时-空性能耦合致使通量受限这一关键问题,通过发展原创的荧光调控编码显微技术和先验引导图像解码算法,大幅突破活细胞观测的时长和时空分辨率极限。先进光学和新算法的结合将活细胞三维成像

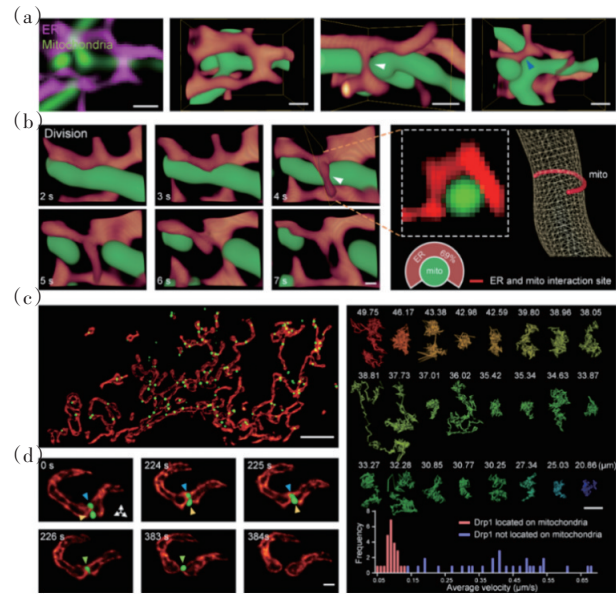


图47 5D活细胞超分辨成像揭示线粒体/内质网,线粒体/Drp1蛋白寡聚体的三维动态相互作用新模式

空间分辨率推至100 nm的同时实现17 Hz的高时间分辨率,并且把传统荧光显微镜对活细胞的光毒性降低为1/100。基于该技术,研究者首次观测到多种细胞器在四维时空的精细相互作用过程,并揭示了内质网、线粒体动力相关蛋白(Drp1)寡聚体介导线粒体分裂的新调控模式(图47)。在此研究中,光学-计算机-生物医学的深度交叉有望以工具进步的新范式实质性推动细胞生物学、分子生物学的创新。

深圳大学物理与光电工程学院张晗研究团队首次报道了联合表面等离子共振技术(SPR)与簇状规则间隔短回复发重复(CRISPR)基因编辑技术的基因序列检测平台,其中光子CRISPR传感新技术(MOPCS)充分发挥了CRISPR技术的基因序列特异性优势,以及SPR技术的灵敏度优势,在实际应用中准确检测出未经扩增的病人核酸样本并同步进行基因分型(图48)^[48]。结果以封面论文形式发表在《National Science Review》上。MOPCS平台具备以下优势:(1)高特异性。该技术基于基因编辑工具CRISPR技术,具备高度核酸序列特异性。(2)高灵敏度。该光传感芯片发挥SPR技术高灵敏度的特点,能够直接检测到新冠患者的病毒样本,无需传统检测方法额外的“扩增”步骤。(3)高

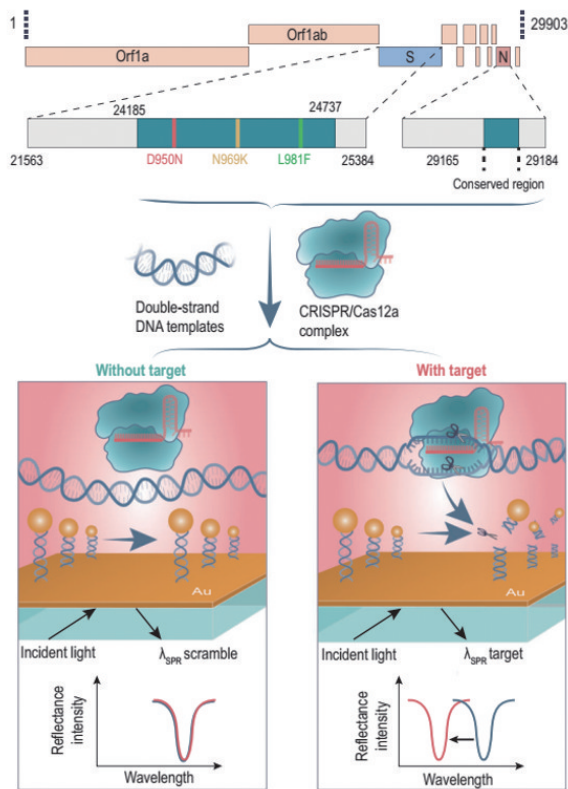


图48 CRISPR 基因编辑传感新技术方案

便利性。随着进一步技术革新,该技术可直接在各公共场合、居民社区当场检测并快速出结果,无需依托实验室进行各项检测流程,进一步优化现有的抗疫模式。(4) 高延展性。该技术除运用于新冠疫情防控,还可广泛应用于各类基因检测,如病毒筛查、癌症早筛、细菌检测等方面,不断为民众提供健康福祉,并对提高国家生物安全治理能力具有重要意义。

暨南大学李宝军研究团队在细胞微机器人研究中取得重大突破。他们用光将白细胞变成医用微机器人,指挥白细胞机器人在斑马鱼体内游走,到达指定位置并执行多项任务,这是活体内中性粒细胞的光学操纵被首次实现(图49)^[49]。相关研究成果以封面论文形式发表在《ACS Central Science》上。该团队结合具有免疫功能的白细胞和智能化的光学操控系统,基于活的斑马鱼体内的白细胞构建出内源性且编程可控的白细胞微机器人,成功实现了白细胞微机器人的远程启动、可控航行、精准负载等系列功能,并可指令其穿越血管壁到达目标

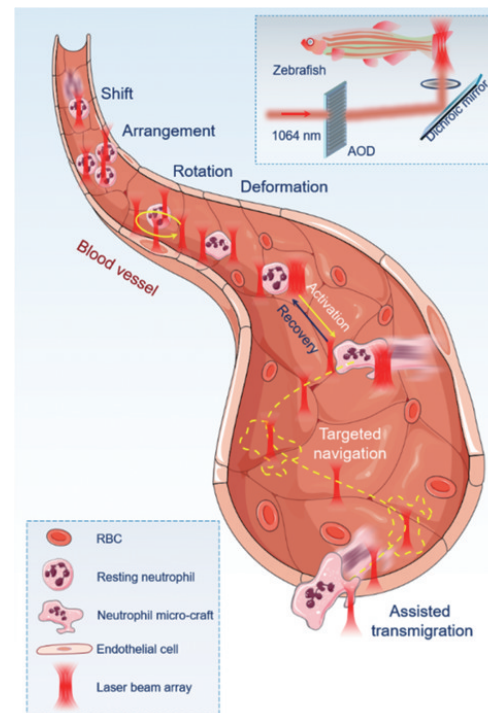


图49 体内光学操纵的中性粒细胞微裂纹示意

组织来执行最终任务。该团队用光对斑马鱼血管内自由流动的白细胞进行了稳定捕获、可控迁移、精准排列、动态旋转,甚至还指令白细胞负载药物,穿过血管壁进入生物组织,在生物组织间隙中按照指令航行,到达指定位置后执行药物释放、细胞碎片清除等任务。这种内源性的白细胞微机器人,无需外界材料的侵入性植入,用近红外光在体外就可以远程操控,使其沿特定轨迹运动到指定地点,执行预设功能。这一突破性研究成果有望在癌细胞的早期清除、侵入性细菌病毒的消灭、退化或死亡神经的修复等方面发挥作用,并带动神经光子学、免疫光子学等新兴学科的发展。

华中科技大学李培宁和张新亮研究团队同新加坡国立大学仇成伟、国家纳米科学中心戴庆、纽约州立大学 Andrea Alu 共同合作,理论提出并实验证明了传统的双折射晶体中存在一种处于中红外波段的“面-体”复合型双曲极化激元电磁波,该原创性成果拓展了极化激元基础物理定义,对凝聚态物理、光物理、电磁学等领域的基础研究具有重要指导意义(图50)^[50]。研究团队的研究成果突破了极化激元模式分类的固有认识,证明了在各向异性

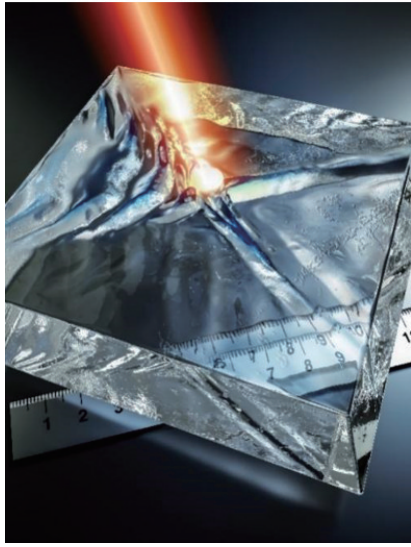


图50 方解石晶体中“幽灵”双曲极化激元各向异性传播示意

的双折射晶体方解石中存在第三种极化激元模式——“幽灵”双曲极化激元(ghost hyperbolic polaritons)。研究团队通过对麦克斯韦方程组严格求解,证明“幽灵”双曲极化激元沿着垂直界面方向的传播常数为复数(同时有实部也有虚部)。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。

南京大学朱嘉和斯坦福大学范汕洄合作,利用加工过后的丝绸来实现亚环境日间冷却^[51]。作者通过分子键合设计和可伸缩耦合试剂辅助浸渍涂层方法探索丝绸的纳米加工,以四丁基钛酸酯用作耦合试剂,促进 Al_2O_3 纳米颗粒(NPs)通过耦合反应与丝绸纤维的结合。四丁基钛酸酯可以与 Al_2O_3 表面的羟基形成氢键,还可以减少 Al_2O_3 颗粒的聚集。同时,四丁基钛酸酯可以与丝绸的氨基酸形成强的共价键。因此,通过这种分子键合设计策略, Al_2O_3 颗粒和丝绸之间形成了强键合力和良好的粘连性。作者证明了纳米加工丝绸可以实现亚环境日间辐射冷却。在阳光直射下(太阳辐射峰值 $>900 \text{ W/m}^2$),观察到独立纳米加工丝绸比环境温度低 3.5°C (环境温度约为 35°C)。与天然丝绸相比,模拟皮肤涂上纳米加工丝绸时降温 8°C (图51)^[51]。这种纳米加工丝绸的亚环境日间辐射冷却是在不影响其耐磨性和舒适性的情况下实现的。这种通过可伸缩纳米加工技术

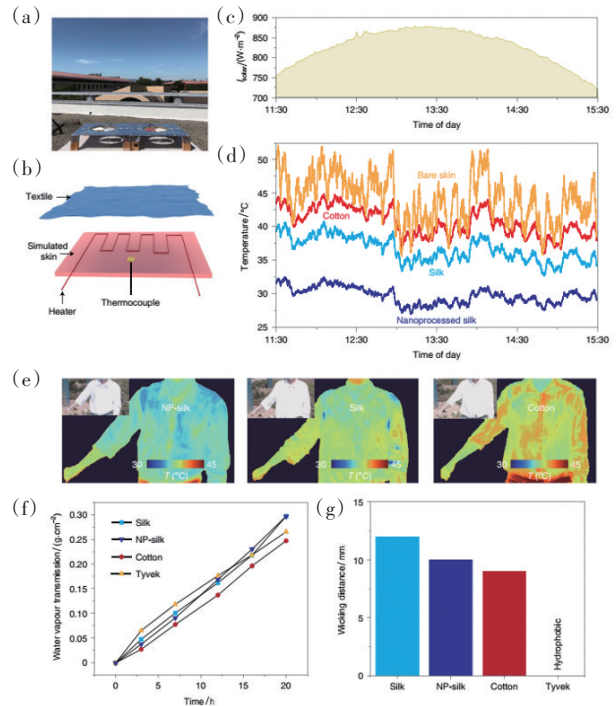


图51 耐磨损纳米丝的热测量及其耐磨性能

裁剪天然织物的策略为实现热调节材料开辟了新途径,并为可持续能源提供了创新方式。

清华大学戴琼海团队提出了一种光电可重构计算模式,通过构造一个衍射处理器(DPU),它可以有效地支持不同的神经网络,并实现数百万个神经元的高模型复杂度^[52]。研究团队展示了如何对DPU重新配置,从而实现各种衍射前馈和循环神经网络,并设计了一种新型的自适应训练方法,能够规避系统缺陷。训练后的神经网络测试结果标明,在手写数字图像和人类动作视频分类基准数据集上,其精度与电子计算方法相当。对此,有评价认为,这篇论文所提出的可重构DPU,是向高性能神经形态光电计算处理器迈出的重要一步。DPU可以编程以适应不同类型的人工神经网络,以实现大规模高性能的光学神经信息处理(图52)^[52];通过有效地设计光电计算系统来融合光学和电子的互补优势。戴海琼团队预计,其所提出的方法将加速开发更强大的光学AI处理器,并作为现代计算的关键支持,迈向人工智能的新时代。

上海理工大学庄松林院士和詹其文研究团队基于麦克斯韦方程组和光学保角变换,首次在光学

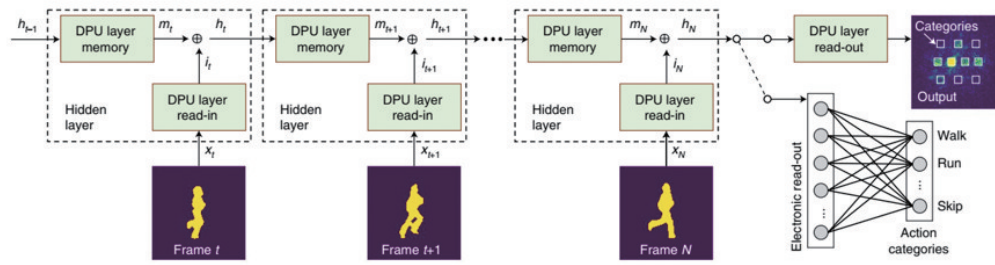


图 52 展开的衍射递归神经网络(D-RNN)的体系结构

领域实现了优美的涡环结构。研究工作从柱坐标系下的麦克斯韦方程组出发,推导出光学涡环是负色散介质中麦克斯韦方程组的近似解。光学涡环是具有中空环状光强分布的波包,环形涡线的周围围绕着时空涡旋相位,波包传播方向与环面垂直方向一致(图 53)^[53]。光学涡环的理论研究给出了麦克斯韦方程组时空光场全新的近似解,而基于光学变换的理论和实验方法,为三维复杂时空光场的生成和表征提供了崭新的思路。光学涡环的诞生对环状对称电动力学、环状对称等离子物理、光学对称和拓扑、量子物理、天体物理等理论研究,以及光学传感、光操纵、光信息与能量传递等应用研究都将具有重要且深远的意义。

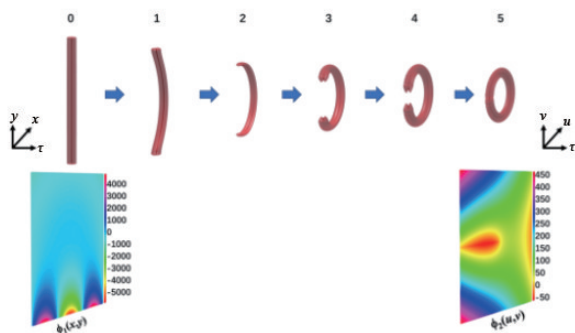


图 53 光学保角变换实现时空涡管到时空涡环的映射

飞秒激光直写技术具有加工速度快、精度高(微纳级别)、可实现真三维结构加工等优势,在丰富的材料体系中获得了应用。利用飞秒激光直写技术制备的光子集成芯片,是面向下一代片上信息处理的重要平台。孙洪波领导的来自吉林大学电子学院、清华大学精仪系和香港浸会大学物理学院的联合研究团队在飞秒激光直写光子集成芯片领

域取得了新进展,成功设计并制备了 2 类基于非阿贝尔和乐原理的三维光子芯片(图 54)^[54]。针对飞秒激光直写三维光子芯片的巨大应用潜力,研究团队发展了飞秒激光立体光刻技术,利用该技术可制备几何精度 10 nm、折射率调控精度万分之一的片上光波导结构,以该结构为基本单元可实现调控模场、相位、分光和偏振等参数的全套片上光学元件。针对飞秒激光制备三维光子芯片存在的像差失焦问题,研究团队发展了变焦扫描方法,成功制备出在 1 mm 大纵深方向上集成了 12000 多根波导的三维光子芯片。该工作提出的基于非阿贝尔和乐原理的新型片上光子器件都将需要三维集成,这体现了飞秒激光直写技术在制备该类型器件上不可替代的地位,而新的机遇也激励着研究者在未来进一步发展和改良该技术。

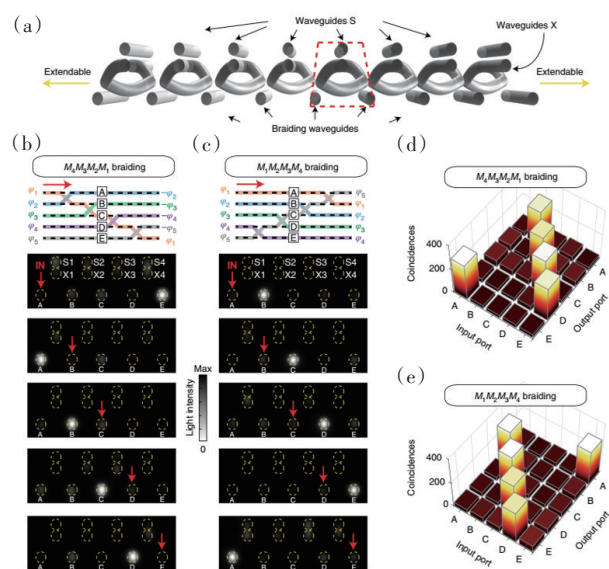


图 54 非阿贝尔编织光子芯片

南京大学科研团队发展了一种新型非互易飞秒激光极化纳米铁电畴技术,并在铌酸锂晶体中成功演示了激光3D打印纳米铁电畴。研究团队将飞秒激光极化技术与铌酸锂铁电畴工程有机结合,突破了传统技术的壁垒,首次在三维空间实现了纳米铁电畴可控制备(图55)^[55]。将其应用于量子光学领域,可实现高效、高维和窄线宽量子纠缠产生;在电子学领域,可以推动高性能铁电畴壁纳米电子器件的发展,譬如大容量可重写非易失性存储器;在声学领域,纳米周期的铁电畴结构可以实现超高频声学谐振器和滤波器。飞秒激光极化技术可以进一步应用于其他铁电晶体,包括钽酸锂和磷酸钛钾晶体等,并促进高性能三维光、声、电集成器件的发展。

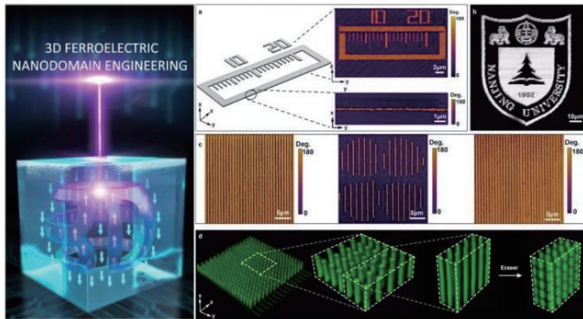


图55 飞秒激光3D打印纳米铁电畴

8 光源与强场激光

中国科学院上海光学精密机械研究所李儒新院士和田野研究员团队在小型化自由电子相干光源研究领域取得突破性进展^[56]。研究团队实验探索飞秒激光驱动的超短电子脉冲泵浦表面等离子极化激元(surface plasmon polariton, SPP)的动力学过程,通过对自由电子脉冲泵浦SPP相干放大的动态过程观测,阐述了自由电子与SPP作用过程中的受激放大机理。该项研究采用超快光学技术探测了自由电子受激辐射放大的全过程,研究成果指明了采用自由电子泵浦SPP实现其相干放大的全新途径,对于发展小型化/集成化的相干光源具有重大意义。作为半导体集成电路基础的微纳制造工艺不断进步,使集成化的自由电子光源成为可能。围绕小型化自由电子相干光源,研究团队展开飞

秒激光驱动的超短电子脉冲泵浦SPP种子研究,采用超快光学泵浦-探测技术,观测到自由电子脉冲对SPP的相干放大。实验通过对SPP电磁场时空波形、能量以及频谱的记录,首次动态演示了SPP受激辐射放大的动力学过程,并揭示了SPP经历高增益自由电子激光中超辐射、指数增长和饱和等3个阶段的受激辐射光放大过程(图56)^[56]。该项研究创新发展了自由电子泵浦实现SPP相干放大的全新途径,在光谱探测、传感、信息处理等应用领域具有重大应用价值。

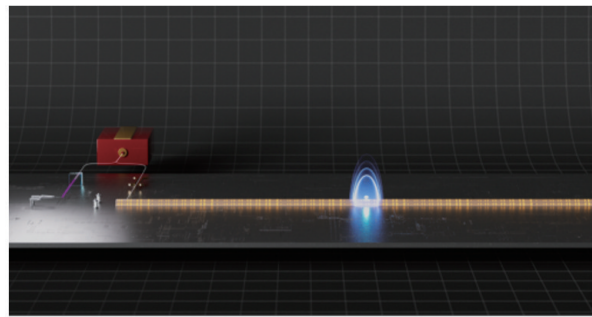


图56 小型化自由电子相干光源

国防科技大学王泽锋课题组在中红外激光领域取得新进展,通过光纤激光泵浦充有溴化氢气体的反谐振空芯光纤,实现了3.8~4.5 μm 范围瓦级中红外激光输出,是已报道的连续波光纤激光最长波长和最大调谐范围^[57]。该工作首次将溴化氢气体充入反谐振空芯光纤中,实现了大范围可调谐的中红外激光输出(图57)^[57]。将来可以采用直接熔接、拉锥耦合、反拉锥等全光纤耦合的方式代替目前常见的空间泵浦光耦合,形成结构紧凑、贴近实用的全光纤中红外激光器;同时,使用软玻璃材料可以拉制传输范围更广的空芯光纤并选择合适的气体介质,进一步实现波长向长波长的拓展。

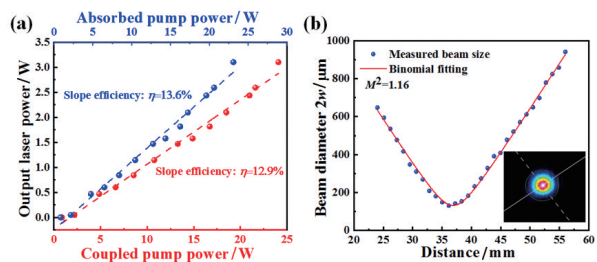


图57 中红外输出功率及光束质量

浙江大学光电学院的狄大卫和赵保丹团队,首次实现了超高稳定性的钙钛矿发光二极管(LED),解决了领域内重要难题^[58]。他们通过引入双极性分子稳定剂,抑制了电场下的离子迁移,阻止了钙钛矿晶体的相变和降解。超长的器件寿命达到了商业化 OLED 的基本要求,消除了卤化物钙钛矿器件可能本征不稳定的担忧,为钙钛矿发光技术的产业化应用奠定了基础。该团队利用双极性分子稳定剂 SFB10 获得高质量 FAPbI₃ 发光钙钛矿,实现了高效(22.8%)和超稳定的钙钛矿 LED(图 58)^[58]。双极性分子稳定剂除了钝化缺陷,还能与晶界处的阴、阳离子相互作用,抑制了电场下的离子迁移,阻碍了碘化铅的生成,从而阻止了 α 相 FAPbI₃ 的相变和降解。器件的超长工作寿命达到了商业化 OLED 对稳定性的基本要求,消除了卤化物钙钛矿器件可能本征不稳定的关键担忧,展示了基于钙钛矿半导体的下一代发光技术的巨大潜力。

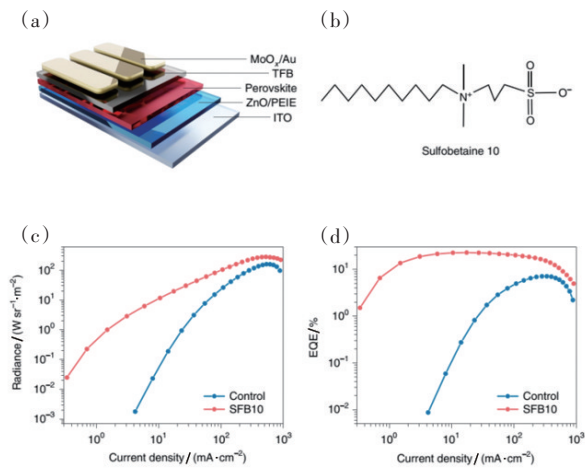


图 58 钙钛矿 LED 结构和发光效率测试

中国科学院上海高等研究院自由电子激光团队在全相干自由电子激光研究方面取得重要突破^[59],基于上海软 X 射线自由电子激光装置成功验证了由中国自主提出的回声谐波级联自由电子激光新机制,并获得了具有优异性能的软 X 射线自由电子激光饱和放大(图 59)^[59]。该项研究成果为产生亚纳米波段的全相干自由电子激光提供了切实可行的技术路线,并为 X 射线非线性光学和超快物理化学等领域提供了理想的研究工具。目前,意

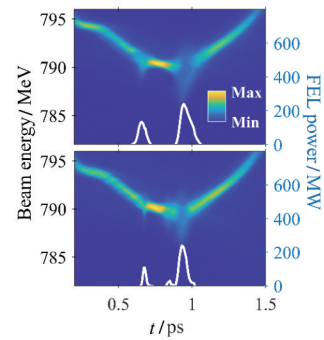
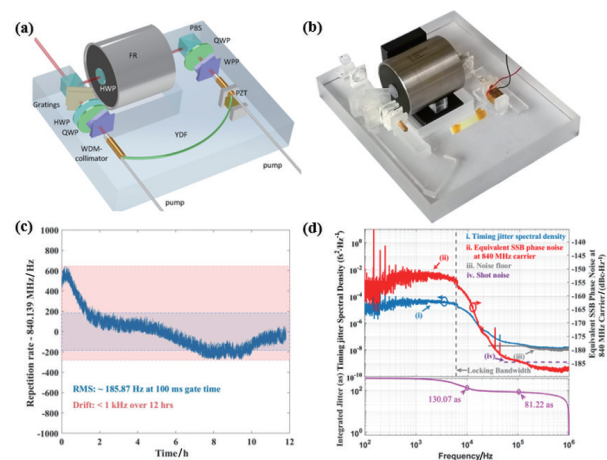


图 59 采用回声谐波级联可实现 X 射线脉冲长度调节和超快脉冲产生

大利的 FERMI 自由电子激光装置和瑞士的 Swiss-FEL 装置均提出采用回声谐波级联机制进一步提升其辐射性能的计划。

北京大学电子学院张志刚、王爱民研究组首次提出“laser/comb on silica”概念,研制成一种“固态-光纤激光器”,揭示了高重复频率飞秒光纤激光器的超低内禀噪声特性(图 60)^[60]。科研团队用玻璃平板上的超低噪声“固态-光纤激光器”,打破了高重复频率光纤激光器高噪声的传统概念,刷新了人们对高重复飞秒光纤激光器的噪声的认知,并将促成 GHz 频率间隔、超低噪声、超小型光纤激光频率梳的诞生。此研究成果不仅可为双光梳测距、高采样速率光谱学、高效率激光精密加工提供小型化超稳定的激光光源,更为其在低噪声微波源产



(a) 固态光纤激光器结构设计; (b) 激光器做在玻璃上: 固态光纤激光器照片; (c) 自由运转状态下 12 h 激光器重复频率的漂移;

(d) 激光器时间抖动噪声功率谱和时间抖动积分

图 60 固态-光纤激光器

生、光频原子钟、天文光梳等重要领域的应用铺平了道路。

中国科学院物理研究所/北京凝聚态物理国家研究中心陆凌团队将原创的拓扑光腔应用于面发射半导体激光器中,研制出了拓扑腔面发射激光器(topological-cavity surface-emitting laser, TCSEL),得到了远超同类商用产品的指标和性能(图 61)^[61]。在 1550 nm 这一最重要的通信和人眼安全波段,同

时实现了单个器件 10 W 峰值功率、小于 1°的远场发散角、60 dB 边模抑制比,和二维多波长阵列的集成能力。拓扑物理自量子霍尔效应发现以来一直是基础研究领域的焦点,获得了多个诺贝尔物理学奖(1985、1998 和 2016 年)。虽然拓扑鲁棒性在理论上可以显著提高器件的稳定性和指标,但至今还没有明确的应用出口,TCSEL 的发明有望解决拓扑物理应用的长期瓶颈。

	Edge emitter	Surface emitter	
	DFB (phase shift)	VCSEL (Bragg mirror)	TCSEL (Dirac vortex)
Device schematics			
Area	~300 μm×1.5 μm	~5 μm×5 μm	>500 μm×500 μm
Power	~ mW	~ mW	~ W
Divergence	~20°×40°	~20°×20°	< 1°×1°
Lasing mode	Single mode	Doubly degenerate	Single mode
Topological mid-gap mode			
Wavelength	Lithographically-defined	Material-limited	Lithographically-defined
Array	1D multi-wavelength	2D mono-wavelength	2D multi-wavelength
	Standard commercial products		This work

图 61 TCSEL 与现有商用单模激光器的对比

北京大学物理学院王剑威、胡小永和龚旗煌课题组与来自中国科学院微电子研究所、上海交通大学、浙江大学、英国布里斯托尔大学、澳大利亚西澳大学等的学者合作,共同实现了拓扑保护的集成量子纠缠光源,在基于硅基二维耦合谐振环构型的反常弗洛凯(Floquet)拓扑绝缘体器件的拓扑边界上,制备出了具有拓扑鲁棒性的 Einstein-Podolsky-Rosen(EPR)纠缠态和多光子纠缠态^[62]。研究团队通过实验观测量子干涉和量子态层析技术,并对比完美无结构缺陷的拓扑量子纠缠光源、带结构缺陷的拓扑量子纠缠光源以及平凡的量子光源等多种构型,首次在实验上证明了量子纠缠源在存在某些类结构缺陷和加工误差的情况下,依然具有和完美器件近乎一致的高量子态保真度和纯度(图 62)^[62]。

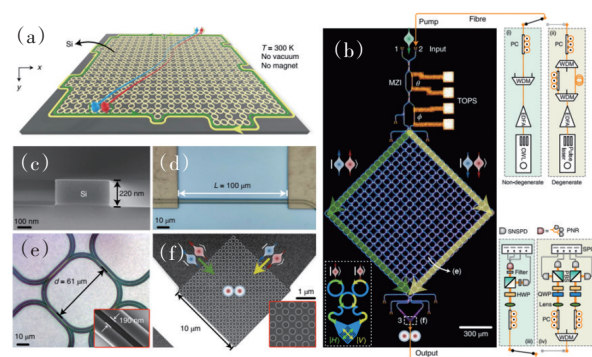


图 62 光子反常 Floquet 拓扑绝缘体中的拓扑量子纠缠发射器

该研究工作实现的拓扑量子纠缠光源,为北京大学团队前期发展的硅基量子芯片技术提供了重要支撑,将有助于研制大规模集成量子芯片和大尺

度光量子计算机。

福州大学李福山教授团队联合中科院宁波材料所钱磊研究员,巧妙地采用有序分子自组装技术(LB膜技术)和转移印刷技术相结合的方法,实现了每英寸9072~25400像素(PPI)的超高分辨率量子点发光二极管(QLED)(图63)^[63]。同时该工作首次提出在发光量子点像素之间嵌入蜂窝图案化的宽带隙非发光量子点层作为电荷阻挡层,从而实现了亮度高达262400 cd/m²,且外量子效率为14.72%的超高分辨率QLED。该项研究为同时实现具有高性能和超高分辨率的QLED器件开辟了一条全新的途径。研究团队提出了一种制备具有优异性能的超高分辨率QLED的简便策略,可以轻松制备出亚微米级像素的超高分辨率量子点发光二极管,其最高分辨率远远超越了人眼分辨率的极限。同时,该工作通过在发光量子点像素之间嵌入蜂窝状图案的非发光电荷阻挡层,极大地抑制了器件的漏电流,从而显著提升了器件的发光效率。该研究成果为实现具有高性能的超高分辨率发光显示开辟了一条全新的路线,并有望在未来进一步实现全彩显示。超高分辨率量子点发光二极管可应用于下一代“近眼显示”设备,如AR/VR头戴式显示器和智能眼镜等,从而开启通往“元宇宙”的新大门,具有广阔的应用前景。

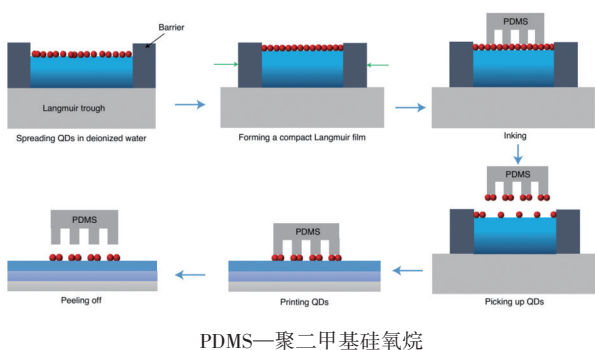


图63 Langmuir-Blodgett膜转移打印制备流程

吉林大学冯晶和清华大学孙洪波课题组合作,将有机单晶材料和光学微腔结构相结合,获得了发光偏振比高达176的有机单晶有机电致发光器件(OLED),是迄今为止基于本征偏振发光材料偏振OLED的最好结果(图64)^[64]。具有高度有序分子排

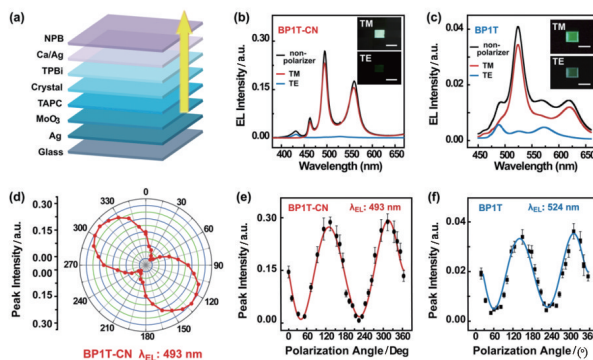


图64 单晶有机发光器件的极化电致发光特性

列的有机单晶材料2,5-bis(4-cyanobiphenyl-4-yl) thiophene(BP1T-CN),具有显著的各向异性 and 偏振特性,但光致发光的偏振比只能达到8,远低于实用需求的30~40。该研究团队提出将BP1T-CN单晶应用于偏振发光OLED器件,设计顶发射OLED微腔结构,实现光学微腔与偏振光的共振耦合,将发光偏振比从8提高到电致发光的176,获得2个数量级的提升。同时,BP1T-CN单晶的分子跃迁偶极与晶面成22°小角度倾斜排布,能够大幅减少光子在电极界面的表面等离子共振损耗,器件最大亮度、电流效率和外量子效率分别达6122 cd/m²、1.86 cd/A和1.44%,是目前非掺杂单晶OLED的最高亮度和效率。这项工作为实现高效率高偏振度的OLED器件提供了一种新的方案,对于推动有机单晶半导体材料的光电器件应用具有重要意义。

中国科学院上海光学精密机械研究所研究团队报导了上海超强超短激光实验装置(羲和激光,SULF)10 PW(图65)^[65]平台磨合阶段的首个实验结果,利用SULF-10 PW激光轰击金属靶,获得了能量高达62.5 MeV的高能质子束^[65]。该团队建立了全球第一个10 PW激光物理实验平台,利用SULF-10 PW激光与铜金属平面靶相互作用开展了激光驱动质子加速的研究,在靶后法线鞘层加速机制(target normal sheath acceleration, TNSA)下获得了能量高达62.5 MeV的高能质子束,该结果是国际报导的飞秒激光质子加速最高水平之一。在SULF-10 PW物理实验平台上开展了首次磨合实验。实验中,激光脉宽30 fs、能量(72±9) J、焦斑6 μm(FWHM),到靶的激光功率和光强分别是2.4 PW、

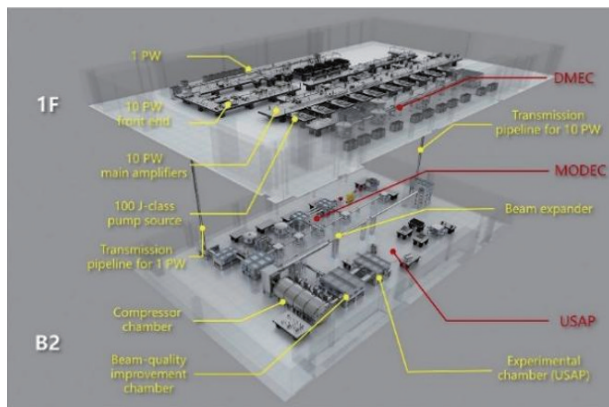


图65 SULF拍瓦激光装置立体布局

$2.0 \times 10^{21} \text{ W/cm}^2$ 。SULF-10 PW 磨合阶段首个实验结果表明,其10 PW激光系统具有较高聚焦光强和良好的光束对比度等条件。未来通过对关键参数的进一步优化,预计可得到 10^{22} W/cm^2 级的激光光强与更高的激光对比度,有望获得 $100 \text{ s} \cdot \text{MeV}$ 的高能质子束,同时为极端强场物理实验提供领先的实验条件。

哈尔滨工业大学(深圳)宋清海团队在高纯度超集成手性光源领域取得重要突破,利用手性准连续域束缚态(bound states in the continuum, BICs)实现了从自发辐射到激光的高纯度、高方向性与高Q值圆偏振光发射(图66)^[66]。哈尔滨工业大学(深

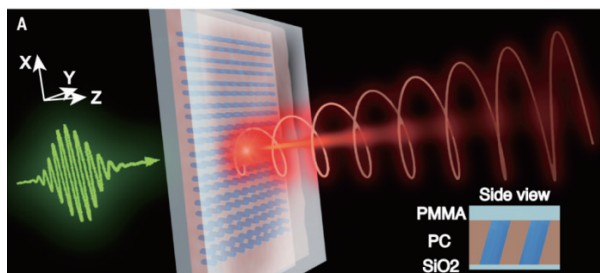


图66 谐振超表面的高纯度圆偏振自发辐射与激光(辐射的圆偏振度接近1)

圳)和澳大利亚国立大学的研究者利用手性准BICs的物理特性,通过谐振超表面实现了高效可控的高纯度圆偏振辐射。研究人员打破面内对称性的同时引入了一种面外的非对称,即结构的倾斜。对于每个固定的面内不对称量,都有一个相应的面外不对称量可以实现将C点移动到Gamma点,并且在面内不对称度较小时,面内和面外的不对称量保持线性关系,可以非常容易地实现最大的固有手性。实验中研究者通过倾斜反应离子刻蚀工艺制备了超表面,并对其进行了表征,成功实现了圆偏振度为0.98,远场发散角为 1.06° 的手性发射。由于该圆偏振光源是通过控制动量空间中的C点与局域态密度来实现的,所以手性辐射与泵浦功率无关,因此可以实现从自发辐射到激光的高纯度、高Q值与高方向性圆偏振光出射。与传统方式相比手性准BICs提供了一种全新的方案,在无需自旋注入的情况下即可实现控制自发辐射和激光的光谱、远场以及自旋角动量,这种方法可以改善当前手性光源的设计并促进其在光子系统与量子系统中的应用。

陕西师范大学张正龙和郑海荣研究组等首次将稀土离子 $f-f$ 跃迁发光寿命压缩至50 ns以下,较目前的世界纪录提高了2个数量级,同时保持约1000倍的量子产率增强,并发现了远场定向发射及可调手性发光等新现象(图67)^[67]。该团队创新性地利用表面原子级平整、欧姆损耗低的单晶银微米片作为纳米光腔的基底,将单个直径为9 nm的稀土掺杂纳米颗粒置于由银纳米立方体和微米片组成的纳米腔中,成功构筑模式体积极小的倾斜纳米光腔。该团队利用新型等离激元纳米光腔,耦合稀土掺杂纳米颗粒产生超快、定向和手性上转换发光,有效解决了稀土发光寿命长、量子产率低等问题,拓宽了单色性好、稳定性高、相干性好的稀土离子发光在下一代高频操纵纳米光子器件上的应用,将有力推动相干单光子源、量子通信和纳米激光器的发展。

山东大学于浩海、张怀金团队和南京大学陈延峰团队合作,在电声耦合的激光晶体和激光物理领域取得重要突破。他们提出了激光产生新机理,获得了突破荧光光谱范围的激光辐射,阐明了该过程

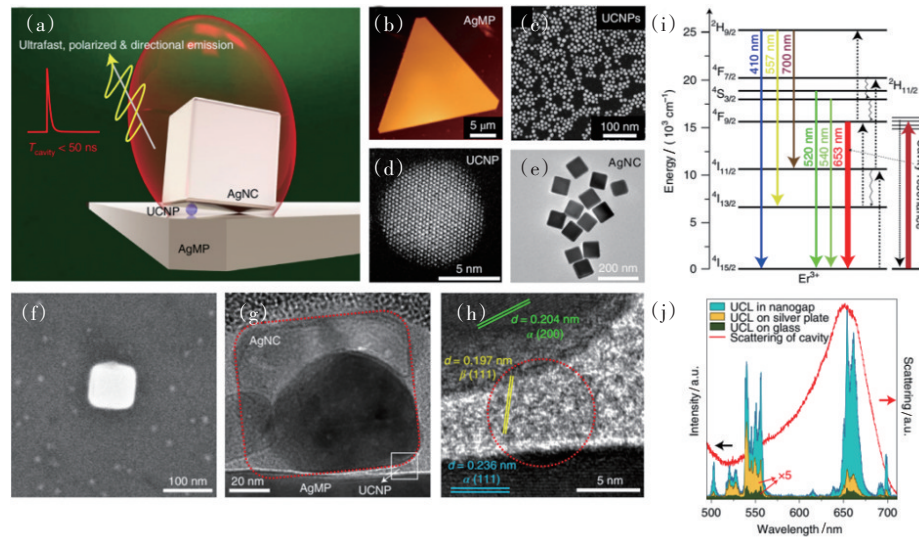


图 67 倾斜纳米光腔和稀土掺杂纳米颗粒耦合体系构建和表征

的物理机制和激光材料的关键功能基元与序构关系(图 68)^[68]。该研究团队通过建立激光过程中电子-声子耦合的物理模型,找到了激光晶体中电子-声子耦合的关键功能基元及其序构方式,实现了电子跃迁过程中的能量传递调控和激光波长拓展。该团队充分利用了激光过程中电子-声子-光子间的动态耦合作用,颠覆了激光物理中荧光光谱决定激光波长的传统思路,证明了在荧光光谱之外直接获得激光输出的可行性。多声子耦合过程,将成为倍频转换、光参量振荡、受激拉曼散射等非线性光学频率变换过程之外一种新的激光波长拓展手段。该物理机制有望在新激光材料探索、高功率激光、集成非线性光学、量子纠缠光源等方面得到应用。

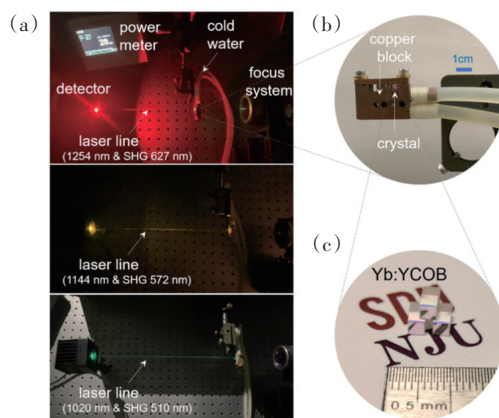


图 68 Yb:YCOB 晶体中实现突破荧光范围的激光辐射

9 生物学和医学中的光学

时间分辨超分辨率图像的定量像素分析使我们能够更深入地了解真核细胞中的重组机制。为了全面了解生物体,必须实时和定量地监测细胞内发生的低于光学衍射极限的动态机制。一个特别相关的机制是真核细胞中内质网(ER)和微管(MT)的重组,它们形成膜和纳米纤维的动态互连网络(图 69)^[69]。为了监测和更好理解内质网(ER)

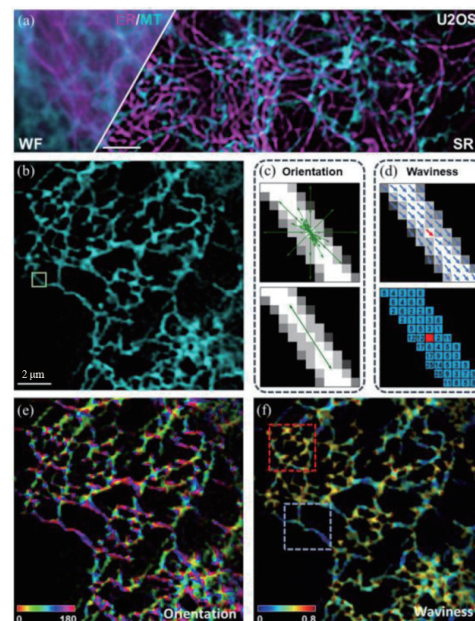


图 69 ER 分析的定向和波纹度量化示意

和微管(MT)的重组,浙江大学光学科学与工程学院钱书豪研究组做出了重要贡献。他们通过时间分辨二维结构光照显微镜观察用ER和MT特异性荧光物质标记的U2OS细胞,这种细胞来源于骨肉瘤的细胞。这种方法能够选择性地对亚波长ER和MT进行成像,并证明了一种称为“挂钩”的新重组过程,其中ER挂在MT上。对结构的定量像素分析得到取向和波纹理2个变量,结构上它们表示在每个像素处的平均局部取向和局部取向无序,而且这些数量的空间和时间变化模式能够具体确定正在进行的重组过程,这些有意义的研究成果有助于自动识别细胞纳米级的动态机制。

利用大脑皮层下结构中光学神经界面全部潜力的能力受到神经组织高散射性质的限制。这将

推动科学界开发新的可植入技术,从大脑深处区域获取和收集光线,旨在以高时空分辨率控制和监测神经活动。美国加利福尼亚理工学院物理、数学和天文学系Sacher及其同事提出了一种具有多个光学相控阵集成的神经光子探针^[70]。通过组合延迟线和输入波长调谐,可以在不移动植入物的情况下获得光束的角度控制。在准透明荧光溶液和固定组织中,获得了光束的连续转向,并且覆盖的尺寸与细胞体的尺寸相当(图70^[70])。研究团队将该装置应用于活体脑切片,并表明其适合于从基因编码的神经活动光学指标中激发荧光,以及光遗传学控制神经活动,这项工作可为可植入设备上的纳米光子元件提供工具,用于光遗传学刺激和钙成像,补充目前适用于光学神经接口技术研究。

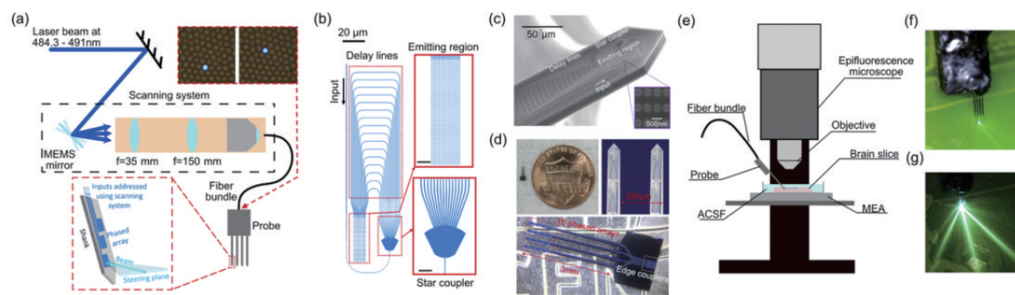


图70 光学相控阵神经探头图像

加利福尼亚理工学院电气工程系Michelle Cua及其同事发明了一种新的非常有吸引力的成像方法^[71]——散斑分辨光学相干层析成像(srOCT)。它填补了低分辨率深度成像(如漫反射光学层析成像)与传统光学相干层析成像(OCT)之间的差距。传统OCT基于弹道光检测能够实现高(衍射受限)分辨率,但在信号深度穿透方面却受到限制。srOCT的信号采集技术快速而简单,不需要解决不适合的逆问题或复杂的实验设置,其主要原理是探测“蛇光子”,这种光子主要是前向散射,保留了更多样本的信息。这种技术实际上是通过倾斜OCT设置的参考臂来实现的,允许对光进行空间角度滤波(图71)^[71]。另外,散斑分辨检测用于通过单镜头非相干平均作用进而显著提高信噪比。最后滤波和非相干平均相结合,可以成像深度达4.5 mm的

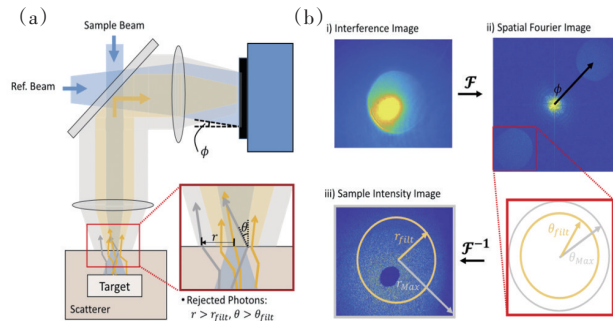


图71 散斑分辨光学相干层析成像原理

真实组织,轴向和横向分辨率约为0.4 mm。这项工作是在概念上的首次突破和证明,还可进一步优化,尤其是在滤波过程中进行应用。

激光扫描显微镜在生物组织的三维体积成像中起着至关重要的作用。然而,传统的点扫描技术通常具有有限的采集速度。日本东北大学先进材

料多学科研究所小泽佑一及其同事开发了一种基于多重计算机生成全息图(CGH)方法——3D体积荧光成像的新方法^[72]。该方法中,光针激发荧光团发射信号调制在物镜瞳孔处的波前,消除了散焦分量,并在限定的深度范围内向荧光发射增加了波前倾斜。光针激发荧光团发射信号的轴向位置线性地平移到探测器平面上的横向位置,从而实现深度分辨成像。研究人员在具有贝塞尔光束照明的双光子显微镜和具有16个通道的一维阵列探测器中演示了这项新技术,实现了在不同轴向位置成像。研究人员展示了固定生物标本实时视频速率的3D成像,成像速度快了约10倍(图72)^[72]。该技术提供了一种无需机械扫描的新方法并实现了高速三维体积成像。

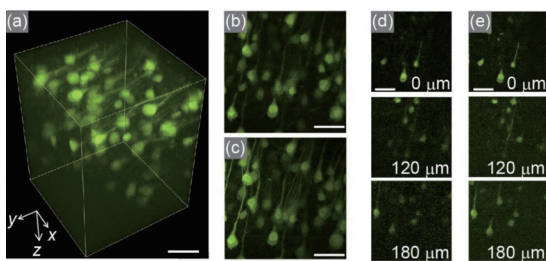


图72 固定H线小鼠大脑锥体神经元的采集图

德国耶拿大学医院眼科 Martin 研究团队展示了如何将荧光寿命成像检眼镜(FLIO)中获得3种不同的测量值,以提高对年龄相关性黄斑变性(AMD)引起的视网膜色素上皮早期变化的诊断敏感性^[73]。AMD是一种影响人类视力的中间部分的疾病,通常会影响到五六十岁的人。在2个光谱通道中FLIO提供荧光寿命和荧光的峰值发射波长(PEW)。传统上需要分别查看用户FLIO每个参数来揭示病理改变的信息,但 Martin 团队将这些措施结合成一个单一的参数——荧光寿命与荧光的峰值发射波长之间的度量关系(图73)^[73]。他们的新方法在健康和AMD个体队列中得到了验证,并被证明效果良好。这种方法可以更快地评估图像,并增强了灵敏度,后续将有更多的研究来证实该方法对其他眼病具有适用性。

北京大学物理学院肖云峰和龚旗煌课题组首次发现了光学微腔中的界面回音壁模式,并成功实

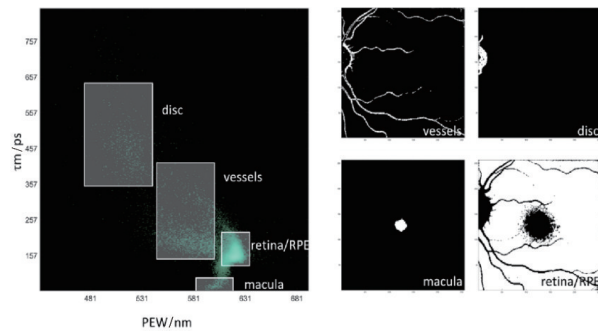
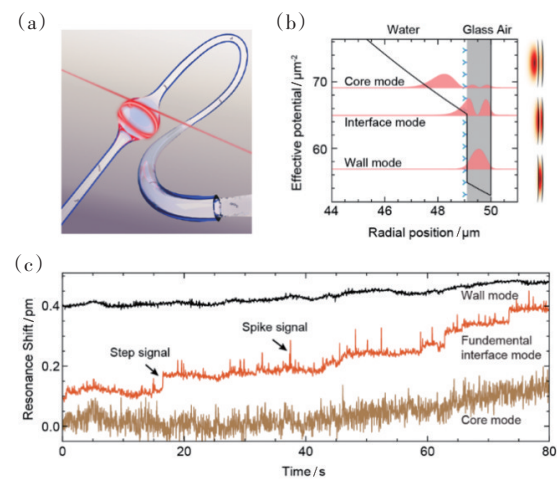


图73 荧光寿命与荧光的峰值发射波长度量关系

现了单个脱氧核糖核酸(DNA)分子的检测^[74]。研究团队选择了微型圆泡腔作为传感核心器件,其不但支持超高品质因子光学回音壁模式,而且天然集成了微流通道——有趣的是,此时微泡腔内表面取代外表面成为传感界面(图74)^[74]。理论分析表明,通过调控壁厚,该微泡腔能够支持3种类型的回音壁模式:壁内模式、界面模式和液芯模式,相应的电磁场峰值分别分布于微腔壁内、内部界面处、液芯内。在以往报道中,微泡腔传感主要基于壁内或者液芯模式;而课题组创造性地提出利用界面模式实现表面传感,使得该体系在保持高品质因子的同时,显著增强了传感表面处的电磁场强度,从而有效突破传统光学倏逝场传感器的灵敏度限制。研究人员开发了微泡腔中的界面模式,增强了传感表



(a) 微泡腔传感示意;(b)微泡腔中的壁内模式、界面模式和液芯模式的典型电磁场分布,界面模式的电磁场峰值恰好位于内部传感表面处;(c)具有等离子体增强基本界面模式(橙色曲线)、壁模式(黑色曲线)和核心模式(棕色曲线)的单个

DNA寡聚体引起的共振位移

图74 光学微腔单个DNA分子检测

面处的电磁场强度,从物理上提高了传感器的光学响应强度,成功实现了具有单分子响应的微流传感器件,对新型微腔传感器件的开发具有指导意义。同时,该方案极佳的可扩展性及微流兼容性使其在微量高灵敏度检测领域具有广泛的应用前景。

10 视觉和色彩

照明物体上的漫射度对于识别该物体的材质方面具有关键作用。为量化其影响确定识别材料的最有利照明条件,日本千叶大学铃木水岛研究人员进行了心理视觉实验^[75],使用真实材料和特定设备进行实验,用于在不同受控漫射度和固定照度下照明物体,向观察者展示了几种材料(聚树脂、毛皮、木材、不锈钢)(图75)^[75]。实验第一步是通过在日常环境中观察和触摸物体来记忆物体的外观。然后在不同的漫射度下对物体进行照明,观察者评估其外观的保真度和理想性。在实践中,他们选择了忠实再现物体外观的最佳照明条件,以及理想再现材料特性的照明条件。实验结果表明,适宜的漫射度值是最合适的,这些值也最符合日常生活中有光泽的材质比无光泽的材质对照明漫射度更敏感的主观感受,论文研究恰恰将本质上主观的观察结果进行了形式化和量化。

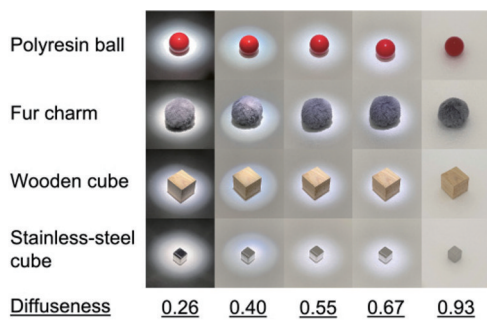


图75 研究聚树脂、球、毛皮符咒、木制立方体和不锈钢立方体刺激实验

在辨析物体色彩时,色觉缺陷(CVD)或具备三色视觉那个更好? CVD通常被人类视为一种缺陷,但人们也同时质疑CVD是否能为生存提供进化优势—即称之为“双重优势”。西班牙格拉纳达

大学理学院 Martine-Z-Domingo 研究团队的研究成果给出这些问题的答案^[76]。作者首先将视觉搜索任务研究分类成速度和准确性2个方面,发现了双色、三色和2种视觉系统优势的研究。研究人员测试不同类型的CVD人类观察者,并使用不同类型的刺激(人工和自然)重复类似的任务。他们在同一实验环境中对三色和CVD人进行直接比较,发现三色视觉人的总体表现最好(图76)^[76]。



图76 实验中2组示例,在这2种伪装下士兵都用红色椭圆突出显示

基于解剖和心理物理研究,挪威科技大学颜色和视觉计算实验室 Aliakbar Bozorgian 研究团队提出对周边视觉的巴顿对比敏感度功能模型进行了一系列修改,修改产生了一个亮度模式检测模型,可以定量地描述真实模式分辨率的程度和混叠区域^[77]。首先,他们用锥体半径代替了光感受器密度参数,接下来作者对开关和关闭p-神经节细胞对空间分辨率做了贡献。最后改进为将神经噪声建模为皮层放大的函数,并不是基于m-神经节细胞密度(图77)^[77]。这个更新的模型再现了外围视觉

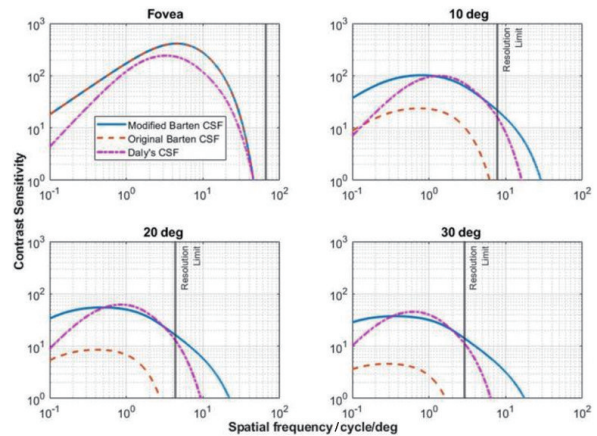


图77 对比Daly,原始的Barten和改进的Barten脑脊液模型在双目模式下的0到30度偏心结果

中的混叠效应,与外围的人类检测极限的经验测量相匹配。他们用周边视觉的心理物理测量来评估模型,数值评估表明,改进后的 Barten 其原始版本实现了更低的估计误差。

11 结论

依据美国光学学会《Spotlight on optics Hight-lighteted Articles from Optica Publishing Group Jouranls》光学光电子进展中推出了 64 项热点^[78],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 2022 年中国光学十大进展评选参选论文 80 多篇^[79],爱光学网站的前沿进展中^[80]推出的 20 多篇论文涉及到光电子学、光物理、光物质相互作用、光学材料与结构、光学设计和仪表、光学信息处理、光子学交叉领域、光源与强场激光、生物和医疗光学、视觉色彩 10 大类别。2022 年上述光学领域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] A shot for the ages: Fusion ignition breakthrough hailed as 'one of the most impressive scientific feats of the 21st century'[EB/OL]. [2022-12-14][2022-12-25]. <https://www.llnl.gov/news/shot-ages-fusion-ignition-breakthrough-hailed-one-most-impressive-scientific-feats-21st>.
- [2] Hsiang E L, He Z Q, Yang Z Y, et al. Tailoring the light distribution of micro-LED displays with a compact compound parabolic concentrator and an engineered diffusor [J]. Optics Express, 2021, 29(24): 39859-39873.
- [3] Chang J, Los J W N, Gourgues R, et al. Efficient mid-infrared single-photon detection using superconducting Nb-TiN nanowires with high time resolution in a Gifford-McMahon cryocooler[J]. Photonics Research, 2022, 10(4): 1063-1070.
- [4] Wu T F, Yang F, Cao T, et al. Modeling of ultraviolet propagation from air to human epidermis with wavelength range of 200-300 nm[J]. Optics Letters, 2022, 47(7): 1662-1665.
- [5] Huang J Z, Ji Z T, Chen J J, et al. Ultra-broadband flat-top quantum dot comb lasers[J]. Photonics Research, 2022, 10(5): 1308-1316.
- [6] Guo X W, Shao L B, He L Y, et al. High-performance modified uni-traveling carrier photodiode integrated on a thin-film lithium niobate platform[J]. Photonics Research, 2022, 10(6): 1338-1343.
- [7] Zhang S, Mu G, Cao J, et al. Single-/fused-band dual-mode mid-infrared imaging with colloidal quantum-dot triple-junctions[J]. Photonics Research, 2022, 10(8): 1987-1995.
- [8] Kuo W K, Lin J X, Tongpakpanang J, et al. Guided-mode resonance pressure sensor based on a stretchable low-density polyethylene film[J]. Applied Optics, 2022, 61(21): 6223-6227.
- [9] Latas S C, Ferreira M F S. Collisions of creeping solitons [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2022, 39: 3035-3040.
- [10] Gao H R, Guo R X, Zhang S J, et al. Mid-infrared polarization-insensitive grating coupler[J]. Optics Letters, 2022, 47(20): 5381-5384.
- [11] Shu H W, Chang L, Tao Y S, et al. Microcomb-driven silicon photonic systems[J]. Nature, 2022, 605: 457-463.
- [12] Wu D, Jiang Y F, Gu X M, et al. Experimental refutation of real-valued quantum mechanics under strict locality conditions[J]. Physical Review Letters, 2022, 129: 140401.
- [13] Zhang X, Liu Y, Han J, et al. Chiral emission from resonant metasurfaces[J]. Science, 2022, 377(6611): 1215-1218.
- [14] Weng X, Miao Y, Wang G, et al. Propagable optical vortices with natural noninteger orbital angular momentum in free space[J]. Advanced Photonics Research, 2022: 2200094.
- [15] Wang S, Yin Z Q, He D Y, et al. Twin-field quantum key distribution over 830-km fiber[J]. Nature Photonics, 2022, 16: 154-161.
- [16] Tu H T, Liao K Y, Zhang Z X, et al. High-efficiency coherent microwave-to-optics conversion via off-resonant scattering[J]. Nature Photonics, 2022, 16: 291-296.
- [17] Singh M R, Parihar S, Yastrebov S, et al. Photocurrent in plasmonic nanofibers[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2022, 39: 248-257.
- [18] Wang X H, Jia K P, Chen M W, et al. 2 μm optical frequency comb generation via optical parametric oscillation from a lithium niobate optical superlattice box resonator[J]. Photonics Research, 2022, 10: 509-515.

- [19] Kawaguchi Y, Alù A, Khanikaev A B, et al. Non-reciprocal parity-time symmetry breaking based on magneto-optical and gain/loss double ring resonators[J]. *Optical Materials Express*, 2022, 12(4): 1453–1460.
- [20] Jiang N B, Grib S W, Hsu P S, et al. High-repetition-rate krypton tagging velocimetry in Mach-6 hypersonic flows[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(9): 2192–2197.
- [21] Zhang J D, Li C, Wang S. Nonlinear phase estimation via nonlinear-linear hybrid interferometers[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2022, 39(5): 1323–1328.
- [22] Gao F, Zhang Z, Xu Y F, et al. Deep-learning-assisted designing chiral terahertz metamaterials with asymmetric transmission properties[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2022, 39: 1511–1519.
- [23] Zhang C L, Liu Z W, Cai C, et al. Surface plasmon resonance gas sensor with a nanoporous gold film[J]. *Optics Letters*, 2022, 47: 4155–4158.
- [24] Shameli M A, Salami P, Yousefi L. Thermal insulator film with transparency to visible light using metallic nano-spheres[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2022, 39: 2760–2768.
- [25] Zhou Y, Xu X H, Zhang Y N, et al. Observation of high-order imaginary Poynting momentum optomechanics in structured light[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2022, 119(44): e2209721119.
- [26] Lin S, He Y, Feng D, et al. Optical fingerprint of flat substrate surface and marker-free lateral displacement detection with Angstrom-level precision[J]. *Physical Review Letters*, 2022, 129(21): 213201.
- [27] Sun S H, He M B, Xu M Y, et al. Bias-drift-free Mach-Zehnder modulators based on a heterogeneous silicon and lithium niobate platform[J]. *Photonics Research*, 2022, 8: 1958–1963.
- [28] Jin F, Liu J, Zhao Y Y, et al. $\lambda/30$ inorganic features achieved by multi-photon 3D lithography[J]. *Nature Communication*, 2022, 13: 1357.
- [29] Sun K, Tan D Z, Fang X Y, et al. Three-dimensional direct lithography of stable perovskite nanocrystals in glass [J]. *Science*, 2022, 375(6578): 307–310.
- [30] Yue S, Tian F, Sun X Y, et al. High ambipolar mobility in cubic boron arsenide revealed by transient reflectivity microscopy[J]. *Science*, 2022, 377(6604): 433–436.
- [31] Liu S F, Hou Z W, Lin L H, et al. 3D nanoprinting of semiconductor quantum dots by photoexcitation-induced chemical bonding[J]. *Science*, 2022, 377(6610): 1112–1116.
- [32] Zheng Z G, Hu H L, Zhang Z P, et al. Digital photo programming of liquid-crystal superstructures featuring intrinsic chiral photoswitches[J]. *Nature Photonics*, 2022, 16: 226–234.
- [33] Zhang S F, Huang L L, Geng G Z, et al. Full-Stokes polarization transformations and time sequence metasurface holographic display[J]. *Photonics Research*, 2022, 10(4):1031–1038.
- [34] Wang X G, Zhang Y Q, Wang X Z. Spatial shifts of reflected beams from surface polaritons in antiferromagnets [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2022, 39(4) :1010–1020
- [35] Yessenov M, Chen Z Z, Lavery M P J, et al. Vector space-time wave packets[J]. *Optics Letters*, 2022, 47: 4131–4134.
- [36] Kornienko V, Andersson D, Stiti M, et al. Simultaneous multiple time scale imaging for kHz-MHz high-speed accelerometry[J]. *Photonics Research*, 2022, 10: 1712–1722.
- [37] Shi J Y, Xu Z Y, Niu W Q, et al. Si-substrate vertical-structure InGaN/GaN micro-LED-based photodetector for beyond 10 Gbps visible light communication[J]. *Photonics Research*, 2022, 10: 2394–2404.
- [38] Kulkarni P P, Bao Y J, Gaylord T K. Annular illumination in 2D quantitative phase imaging: A systematic evaluation[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(12): 3409–3418
- [39] Messinis C, Adhikary M, Cromwijk T, et al. Pupil apodization in digital holographic microscopy for reduction of coherent imaging effects[J]. *Optics Continuum*, 2022, 1(5): 1202–1217.
- [40] Gao F Y, Zhang Z Q, Liu Z J, et al. High-speed two-dimensional terahertz spectroscopy with echelon-based shot-to-shot balanced detection[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(14): 3479–3482.
- [41] Zhang Y F, Ren Y Y, Chen J A, et al. Fast testing of partial camera lenses based on a liquid crystal spatial light modulator[J]. *Applied Optics*, 2022, 61: 6420–6429.
- [42] Upadhyay A, Lengden M, Enemali G, et al, Tomographic imaging of carbon dioxide in the exhaust plume of large commercial aero-engines[J]. *Applied Optics*, 2022, 61: 8540–8552.
- [43] Lee J, Cho M. Enhancement of three-dimensional image visualization under photon-starved conditions[J]. *Applied Optics*, 2022, 61: 6374–6382.

- [44] Huang L, Yao J P. Optical processor for a binarized neural network[J]. *Optics Letters*, 2022, 47: 3892–3895.
- [45] Wu J M, Guo Y D, Deng C, et al. An integrated imaging sensor for aberration-corrected 3D photography[J]. *Nature*, 612: 62–71.
- [46] Wang N C, Zhang K, Shen X, et al. Dual-field-of-view high-spectral-resolution lidar: Simultaneous profiling of aerosol and water cloud to study aerosol-cloud interaction[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2022, 119(10): e2110756119.
- [47] Zhao Y X, Zhang M, Zhang W T, et al. Isotropic super-resolution light-sheet microscopy of dynamic intracellular structures at subsecond timescales[J]. *Nature Methods*, 2022, 19: 359–369.
- [48] Chen Z, Li J F, Li T Z, et al. A CRISPR/Cas12a-empowered surface plasmon resonance platform for rapid and specific diagnosis of the Omicron variant of SARS-CoV-2[J]. *National Science Review*, 2022, 9: nwac104.
- [49] Liu X S, Gao Q, Wu S, et al. Optically manipulated neutrophils as native microcrafts in vivo[J]. *ACS Central Science*, 2022, 8(7): 1017–1027.
- [50] Ma W L, Hu G W, Hu D B, et al. Ghost hyperbolic surface polaritons in bulk anisotropic crystals[J]. *Nature*, 2021, 596: 362–366.
- [51] Zhu B, Li W, Zhang Q, et al. Subambient daytime radiative cooling textile based on nanoprocessed silk[J]. *Nature Nanotechnology*, 2021, 16: 1342–1348.
- [52] Zhou T K, Lin X, Wu J M, et al. Large-scale neuromorphic optoelectronic computing with a reconfigurable diffractive processing unit[J]. *Nature Photonics*, 2021, 15: 367–373.
- [53] Wan C H, Cao Q, Chen J, et al. Toroidal vortices of light[J]. *Nature Photonics*, 2022, 16: 519–522.
- [54] Zhang X L, Yu F, Chen Z G, et al. Non-Abelian braiding on photonic chips[J]. *Nature Photonics*, 2022, 16: 390–395.
- [55] Xu X Y, Wang T X, Chen P C, et al. Femtosecond laser writing of lithium niobate ferroelectric nanodomains[J]. *Nature*, 2022, 609: 496–501.
- [56] Zhang D D, Zeng Y S, Bai Y F, et al. Coherent surface plasmon polariton amplification via free-electron umping[J]. *Nature*, 2022, 611: 55–60.
- [57] Zhou Z Y, Wang Z F, Huang W, et al. Towards high-power mid-IR light source tunable from 3.8 to 4.5 μm by HBr-filled hollow-core silica fibres[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11: 15.
- [58] Guo B B, Lai R C, Jiang S J, et al. Ultrastable near-infrared perovskite light-emitting diodes[J]. *Nature Photonics*, 2022, 16: 637–643.
- [59] Feng C, Liu T, Chen S, et al. Coherent and ultrashort soft X-ray pulses from echo-enabled harmonic cascade free-electron lasers[J]. *Optica*, 2022, 9(7): 785–791.
- [60] Yang R A, Zhao M H, Jin X G, et al. Attosecond timing jitter from high repetition rate femtosecond "solid-state fiber lasers"[J]. *Optica*, 2022, 9(8): 874–877.
- [61] Yang L C, Li G R, Gao X M, et al. Topological-cavity surface-emitting laser[J]. *Nature Photonics*, 2022, 16(4): 279–283.
- [62] Dai D X, Ao Y T, Bao J M, et al. Topologically protected quantum entanglement emitters[J]. *Nature Photonics*, 2022, 16: 248–257.
- [63] Meng T T, Zheng Y T, Zhao D L, et al. Ultrahigh-resolution quantum-dot light-emitting diodes[J]. *Nature Photonics*, 2022, 16: 297–303.
- [64] An M H, Ding R, Zhang X L, et al. Highly polarized emission from organic single-crystal light-emitting devices with a polarization ratio of 176[J]. *Optica*, 2022, 9(1): 121–129.
- [65] Li A X, Qin C Y, Zhang H, et al. Acceleration of 60 MeV proton beams in the commissioning experiment of the SULF-10 PW laser[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2022, 10(4): 04000e26.
- [66] Zhang X D, Liu Y L, Han J C, et al. Chiral emission from resonant metasurfaces[J]. *Science*, 2022, 377(6611): 1215–1218.
- [67] Chen H, Jiang Z H, Hu H T, et al. Sub-50-ns ultrafast upconversion luminescence of a rare-earth-doped nanoparticle[J]. *Nature Photonics*, 2022, 16: 651–657.
- [68] Liang F, He C, Lu D Z, et al. Multiphonon-assisted lasing beyond the fluorescence spectrum[J]. *Nature Physics*, 18: 1312–1316.
- [69] Qian S H, Meng J, Liu W J, et al. Identification of endoplasmic reticulum formation mechanism by multi-parametric, quantitative super-resolution imaging[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(2): 357–360.
- [70] Sacher W D, Chen F, Moradi-Chameh H, et al. Optical phased array neural probes for beam-steering in brain tissue[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(5): 1073–1076.
- [71] Cua M, Blochet B, Yang C H. Speckle-resolved optical coherence tomography for mesoscopic imaging within scattering media[J]. *Biomedical Optics Express*, 2022, 13(4): 2068–2081.

- [72] Kozawa Y, Nakamura T, Uesugi Y, et al. Wavefront engineered light needle microscopy for axially resolved rapid volumetric imaging[J]. *Biomedical Optics Express*, 2022, 13(3): 1702–1717.
- [73] Hammer M, Simon R, Meller D, et al. Combining fluorescence lifetime with spectral information in fluorescence lifetime imaging ophthalmoscopy (FLIO)[J]. *Biomedical Optics Express*, 2022, 13: 5483–5494.
- [74] Yu X C, Tang S J, Liu W J, et al. Single-molecule optofluidic microsensor with interface whispering gallery modes[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2022, 119(6): e2108678119.
- [75] Mizushima S, Mizokami Y. Diffuseness of illumination suitable for reproducing a faithful and ideal appearance of an object[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2022, 39(3): 401–410.
- [76] Martínez-Domingo M Á, Galdón A, Gómez-Robledo L, et al. Color vision deficiencies and camouflage: A comparative study between normal and CVD observers[J]. *Optics Express*, 30(8): 13699–13713.
- [77] Bozorgian A, Pedersen M, Thomas J B. Modification and evaluation of the peripheral contrast sensitivity function models[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2022, 39: 1650–1658.
- [78] Spotlight on optics highlighted articles from optica publishing group journals[EB/OL]. (2022-12-25)[2022-12-30]. <https://opg.optica.org/spotlight/default.cfm?month=1&year=2022>.
- [79] 中国光学十大进展 2022 年候选成果推荐[EB/OL]. (2022-12-28) [2022-21-31]. https://www.opticsjournal.net/TenAdvances/ZGGX?type=Intj_index.
- [80] 爱光学-前研进展[EB/OL]. (2022-12-23)[2022-12-28]. https://mp.weixin.qq.com/mp/appmsgalbum?__biz=MzU2NTgyNzkyMg==&action=getalbum&album_id=179-6296620448202752&scene=173&from_msgid=2247557-214&from_itemidx=1&count=3&nolastread=1#wechat_redirect.

Memorable sounds of optics and photonics in 2022

ZHU Haidong*, XUE hao, 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 Optics and photonics has penetrated into all aspects of people's life since the birth of laser. This article starts with the 2022 major progress in the field of optics and photonics and draws up an inventory in the future in ten optical research directions. The related research may likely have enormous impact on human existence and way of life in the future.

Keywords optics; hotspot of 2022; development of optics ●



(责任编辑 王志敏)