

# 2019年光学热点回眸

沈卫星, 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** 随着激光的诞生, 光学已渗透到人类生活的方方面面。盘点了未来可能会对人类生存及生活方式产生巨大影响的微纳光学、超强激光、成像技术、量子通信、太赫兹技术、光学通信、生物光子学、人工智能用于光学检测8个光学技术研究领域, 回顾了这些领域在2019年的重大进展。

**关键词** 微纳光学; 超强激光; 成像技术; 太赫兹技术; 量子通信; 光通信技术; 生物光子学; 人工智能; 光学检测

2019年, 谷歌宣称其率先实现量子霸权, 号称200 s的量子计算实现了最先进的经典超级计算机1万年的计算结果, 此消息引起了轰动。量子计算机的前景是, 某些计算任务在量子处理器上执行的速度可能比在经典处理器上快得多。一个基本挑战是建立一个高保真度处理器, 能够在指数级大的计算空间中运行量子算法。谷歌报告使用一个具有可编程超导量子位元的处理器创建53个量子位元的量子态, 这些量子位元对应于 $2^{53}$ 维(约 $10^{16}$ )的计算状态空间(图1<sup>[1]</sup>)。根据重复实验的测量样本得出的概率分布, 与所有已知经典算法相比其速度显著提高。对这一特定计算任务的量子优势的实验性实现, 预示着一个备受期待的计算范式<sup>[1]</sup>面世。

基于超导量子位的量子处理器现在可以在 $2^{53}$ 维 $10^{15}$ 的希尔伯特空间中进行计算, 这超出了目前

最快的经典超级计算机的能力, 标志着首次能在量子处理器上能够实现的计算。量子处理器因此达到了量子至上的境界。为了维持期待的双指数增长率, 并最终提供运行著名量子算法所需要的计算量, 量子误差校正的工程需要成为关注的焦点。

谷歌已经使用一个物理上可实现的量子处理器(具有足够低的错误率)在多项式时间内执行了随机量子电路采样, 但是对于经典计算机来说还没有已知的有效方法。这些发展的结果, 是量子计算正从一个研究课题转变为一种能够开启新的计算能力的技术, 离有价值的短期应用只有一步之遥。

2019年, 光学与光电子进展还有很多方面, 将从微纳光学、超强激光、成像技术、量子通信、太赫兹技术、光学通信生物光子、人工智能用于光学检测等几个方面分别介绍。

收稿日期: 2019-12-29; 修回日期: 2020-01-06

基金项目: 中国科学院国际合作项目(29201631251100101)

作者简介: 沈卫星, 高级工程师, 研究方向为光学检测, 电子信箱: wxshen@mail.shenc.ac.cn; 朱健强(通信作者), 研究员, 研究方向为高功率激光技术, 电子信箱: jqzhu@mail.shenc.ac.cn

引用格式: 沈卫星, 谢兴龙, 朱健强. 2019年光学热点回眸[J]. 科技导报, 2020, 38(1): 19-37; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2020.01.002

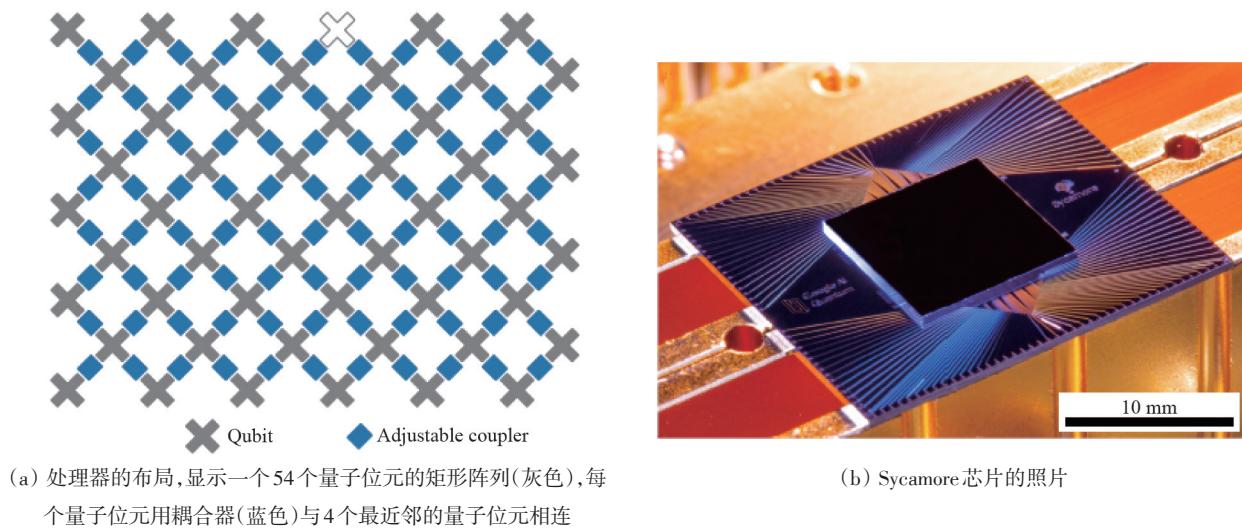


图1 Sycamore处理器

## 1 微纳光学

微纳光学<sup>[2-4]</sup>的发展得益于20世纪80年代纳米技术的诞生,由于在航空、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,微纳光学一经问世就成为科技界的热门研究领域之一。微纳光学所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,其微结构的尺度已下降至纳米量级,从而出现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。

热等离子体是一个跨学科的研究领域,通过合适的、共振的光源和贵金属纳米粒子之间的相互作用导致纳米尺度的加热。近年来,热等离子体已成功地应用于从电子到医学的各种研究领域。科研人员通过实现新一代光控光学元件扩展了热等离子体在光学中的应用。这一光控光学元件是通过连接金纳米颗粒的光热特性和液晶材料的热敏性实现的。使用金纳米棒的热等离子体加热激活或失活由向列液晶(NLC)和可聚合液晶(PLC)组成的反模差分光栅的衍射特性。由于富PLC和富NLC区域之间的初始折射率匹配,使得光栅完全隐藏,在关闭状态下体现为透明的光学窗口。一个合

适的光源( $\lambda=808\text{ nm}$ )激发纳米粒子结构导致热等离子体加热,诱导PLC和NLC之间的折射率不匹配,从而导致高效率衍射的结构(图2<sup>[5]</sup>)。此外,相同的结构可以实现一个可变波板,从而为检测和预测光致温度变化以及控制偏振光光束的相位延迟提供了一种新的方法。所实现的光学元件由于采用了逆模工作原理,在衍射态时不需要光功率。这代表了首次演示可重构热等离子体激活光学元件。这些结果开辟了光可控光子学的一个新领域,它可能被证明对于不允许电场控制的聚合物特别重要。此外,具有三角形、立方体和六边形等奇异形状的纳米粒子可以用于开发片上光热传感器,从而为现有光子器件增加新的灵活性。研究人员正

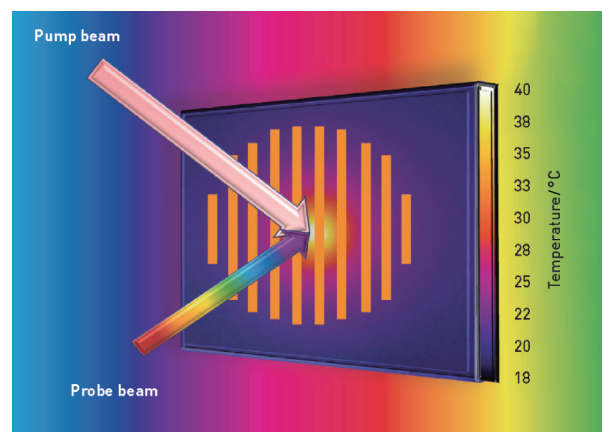


图2 热等离子体激活的反模衍射光栅的原理

在通过利用热等离子体和水基液晶测温技术之间的相互作用实现新一代生物医学热传感器,进一步推动这种通用性<sup>[5]</sup>。

铌酸锂在光电子器件中随处可见,用铌酸锂制成的电光调制器是光通信的主要部件,周期性极化的铌酸锂晶体对有效的非线性波长转换至关重要。然而,众所周知的困难是,干蚀刻要求意味着铌酸锂光学设备仍然不能密集地集成,因此仍然是笨重的、分立的、昂贵的和相当低效的。所以,铌酸锂被认为是一种性能优异的材料,但与现代纳米光子技术完全不相容。

但香港大学实现了铌酸锂纳米化。之前的纳米制造工艺,可以实现光损耗为0.027 dB/cm的纳

米光子铌酸锂波导,在2019年中,基于纳米工艺已经发展成为多种集成的铌酸锂光子器件,其性能优于其他纳米光子平台。在一个演示中,他们将低损耗的铌酸锂光子波导与高速微波传输线相结合,实现了铌酸锂调制器的纳米光子版本。显著增强的电光相互作用强度使得这些纳米光子调制器能够在CMOS兼容的驱动电压下工作,同时以210 Gbit/s的速度传输数据,极大地提高了铌酸锂调制器的性能(图3<sup>[6]</sup>)。这种高速、低压调制方案可以进一步与超高Q微谐振器集成。通过将调制频率与微谐振器的自由光谱范围进行匹配,生成了一个由电信频段内跨越80 nm的900条线(10 GHz间距)组成的宽带频率梳<sup>[7-8]</sup>。

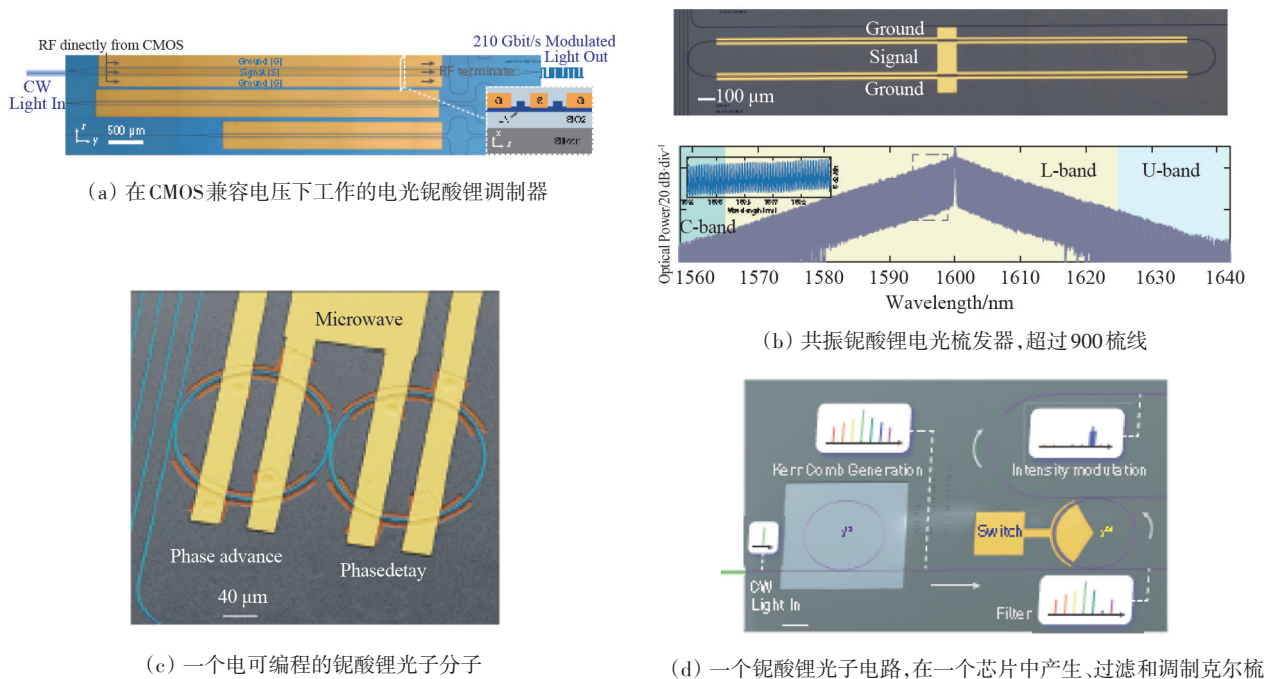


图3 铌酸锂调制器的性能

纳米马达方面,近年研究表明,被困在光场中的不同纳米粒子对的不对称会导致不对称散射,并使粒子对沿垂直于入射光传播方向的方向运动。科研人员最近在实验中观察到这种预测的定向运动,这一发展为光控纳米马达奠定了基础。非对称光束束缚纳米颗粒阵列假定的“非互反”运动表明,通过对光束束缚结构散射场的工程控制,可以在纳米尺度上控制力和力矩(图4)。这些纳米结构可作为

光学控制纳米马达的基础,通过化学或光学工程实现纳米颗粒间的相互作用和粒子间的分离来进一步控制。从生物传感到材料科学,这些纳米马达在许多应用领域都很重要<sup>[9]</sup>。

紧凑型光学元件对于可集成到便携设备中的微型化成像系统至关重要。金属结构正在成为一种平面结构,它可以通过用纳米尺度的单元裁剪光波面聚焦光。由于其特征高度不到1 mm,金属烯

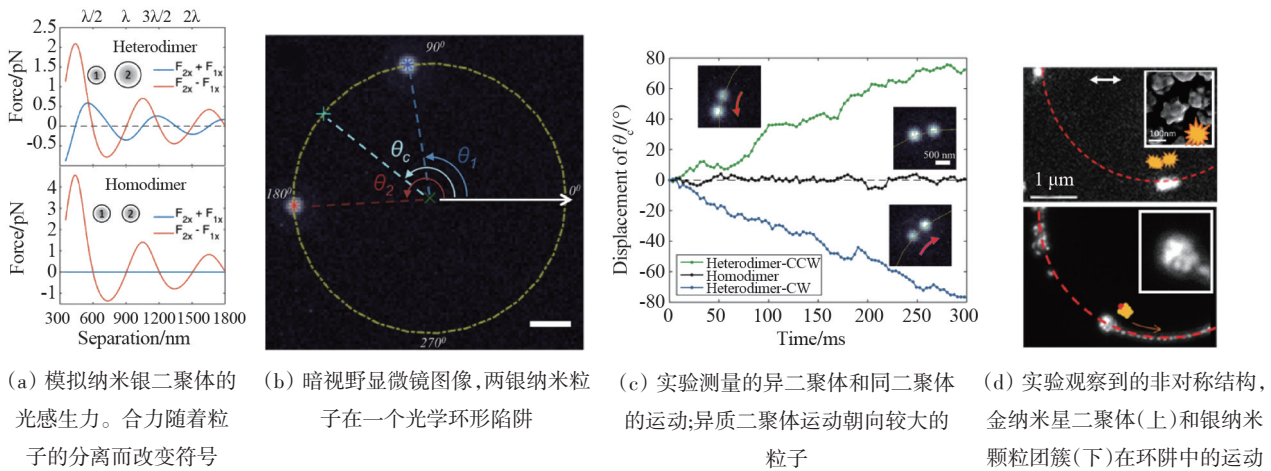
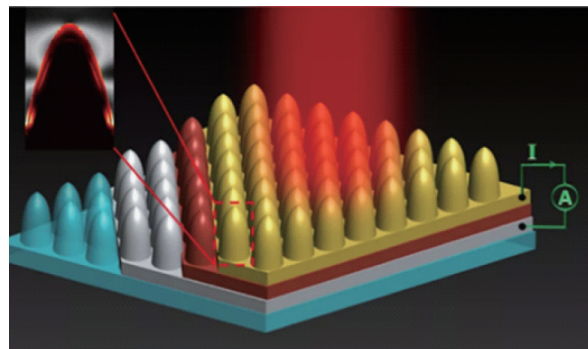


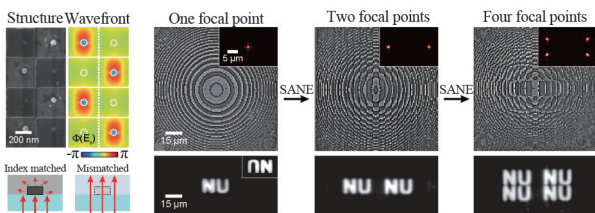
图4 纳米尺度上控制力和力矩

已被用于从小型内窥镜到广角照相机等各种设备。现有的硬材料超表面透镜具有固定的光学响应,不能调整多像面;自适应超表面性能将需要一个可重新信任的材料系统。2019年,美国西北大学用等离子体演示了纳米粒子晶格上可重构金属烯(图5<sup>[6]</sup>)。实验还展示了该平台如何应用自适应透镜化在相同的实验中,从单焦点到多焦点连续演化出点阵超元透镜。可以相信,由此产生的可调谐金属可以实现下一代成像系统,具有前所未有的紧凑性<sup>[10]</sup>。



Au膜内等离子体衰变激发的热电子穿越TiO<sub>2</sub>层到达Al电极,形成光电流

二氧化硅纳米锥模板



(a) 通过在等离子体纳米颗粒阵列上描绘电介质块进行波前的相位调整

(b) 金属通过溶剂辅助纳米级压花从单焦点设计重新配置到多焦点设计,以及由NU图案形成的相应图像

图5 纳米粒子晶格上重构金属烯

中国微纳光学也有长足进展,西北工业大学研究团队采用等离子体刻蚀单层聚苯乙烯纳米球掩膜的二氧化硅形成纳米锥阵列,依次沉积金属-半导体-金属(MSM)薄膜,成功制备MSM型热电子探测器(图6<sup>[11]</sup>)。因此,纳米金属热电子探测器有望实现大规模低成本制造<sup>[12]</sup>。

Huang等发展了一种制备大面积超高线密度光栅的技术方法,实现了国际上已报道的最高线密度(>2万线/mm)的晶圆级大面积光栅器件制备(图7<sup>[13]</sup>)。实验结果表明,研制的Mo/Si多层膜纳米光栅在87.5 eV的X射线能量获得11%的衍射效率;Mo/Si和Cr/C多层膜光栅在90、270 eV附近获得0.21、0.093(°)/eV的超高角色散,比现有技术制备的最高线密度5000线/mm光栅的色散性能提高4.5~6.3倍(图8<sup>[13]</sup>)。同时,该技术在2×25.4 mm晶圆上实现了多层膜纳米光栅的均匀构筑,展现了该方法具有大面积快速制备的独特优势。这项技术不仅为超高分辨率光栅的制备提供了新方法,突破了传统光栅元件色散性能的瓶颈,也为高性能紧凑型X射线光谱仪的发展奠定了基础<sup>[13]</sup>。

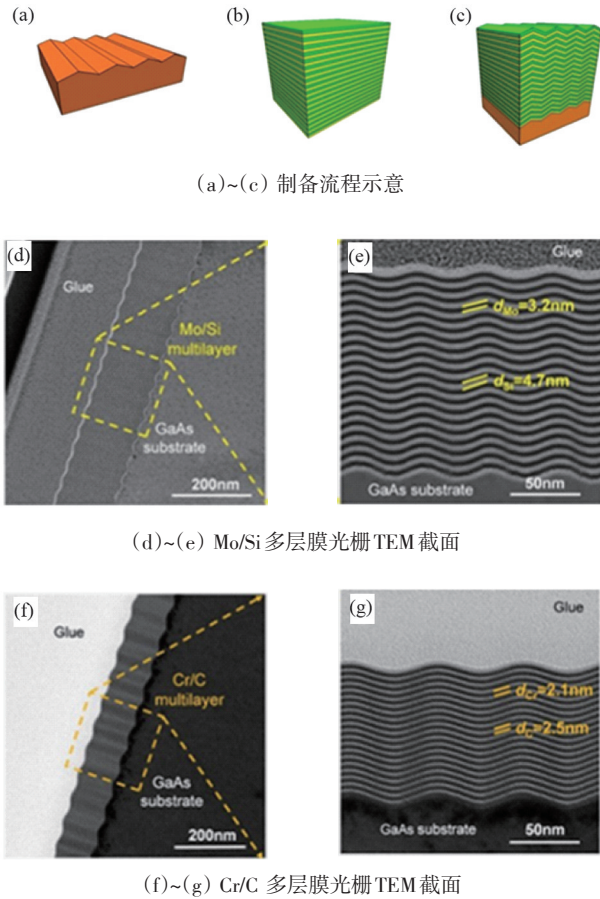


图7 多层膜纳米光栅制备流程及TEM截面

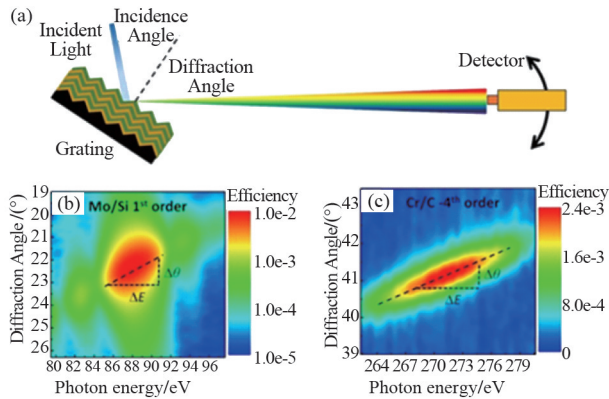


图8 Mo/Si和Cr/C多层膜纳米光栅的色散测试结果

“原子制造”有望突破摩尔定律的瓶颈,将引发电子产业革命,“原子制造”的终极目标是在原子层次上精确制造材料和进行性能调控,这就对制造方法的空间和时间分辨率提出了更高的要求(分别达到埃米和阿秒,即 $10^{-10}$  m和 $10^{-18}$  s量级)。2019年,国家纳米科学中心联合其他团队,在基于碳纳米管

的时空相干电子源研究中取得重要进展,有望为“原子制造”提供新的技术手段。科研人员提出通过碳纳米管替代金属纳米针尖,利用其结构和能带优势实现低能量散度的光场驱动电子脉冲,并取得系列进展。首先,利用特色生长工艺制备特殊单壁碳纳米管,获得数量级提升光场增强因子,突破了之前发射尖端有质动力势不足的瓶颈,利用可见光激光实现了光场电子发射;其次,通过优化碳纳米管结构,获得了能量散度最低为0.25 eV的飞秒电子发射,满足了原子级分辨对电子束能量散度的要求( $<0.7$  eV)<sup>[14]</sup>(图9<sup>[11]</sup>)。

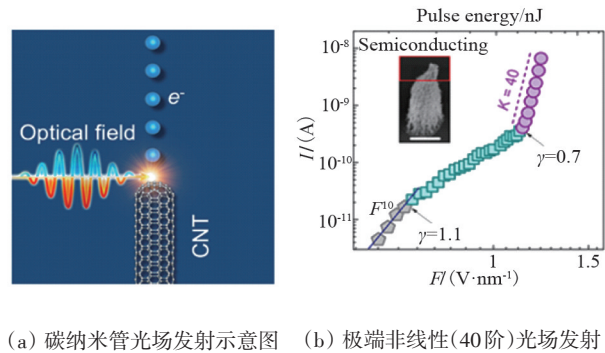


图9 碳纳米管光场电子发射

与金属针尖相比,碳纳米管不仅具有中空结构,可以极大地降低电子背散射效应,其量子化的能带结构(范霍夫奇点)还为光场电子发射调控提供了更多可能。经过深入研究,发现采用半导体性的碳纳米管可以实现40阶的极端非线性光电子发射,且光相位调制性能较金属提升5倍,接近理论极限(相位调制深度达100%)(图10<sup>[11]</sup>)。

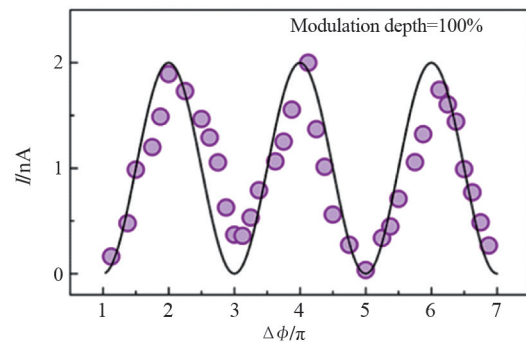


图10 灵敏相位调制效应

## 2 超强激光

随着对物理领域研究的逐步深入,对高功率超短脉冲激光的输出功率要求越来越高。为了获得更高功率密度的输出激光从而实现更加极端的物理条件,世界上许多国家正在致力于峰值功率达到 10 PW ( $1 \text{ PW}=10^{15} \text{ W}$ ) 乃至艾瓦 ( $10^{18} \text{ W}$ ) 级别激光装置的方案设计和建设<sup>[15-16]</sup>。以基础物理学研究为例,高强度激光器可用在实验室中重构出宇宙中最极端的一些物理环境条件,例如在超新星爆炸和黑洞附近发现的一些物理条件。它们还可以产生高能粒子,用于高能密度物理研究(劳伦斯·伯克利国家实验室激光加速器中心——BELLA 中心正在进行这方面的探索),或者产生高强度的 X 射线脉冲,用于探测在超快时间尺度上的微观物质动力学演化过程。在工业上,激光和基于激光的系统可以对材料进行精密切割加工,可以产生强烈的中子束流用以评估飞机部件的老化程度。在医学上,它们有望提供紧密聚焦的放射,用于治疗肿瘤疾病等。

以美国能源部为首,宣布在未来两年内将构建国家强激光网络(LaserNetUS),涉及全美 9 个机构,包括能源部劳伦斯·伯克利国家实验室、得克萨斯大学奥斯汀分校、俄亥俄州立大学、科罗拉多州立大学、密西根大学、内布拉斯加大学林肯分校、美国能源部国家加速器实验室(SLAC)和劳伦斯·利弗莫尔国家实验室。这些设施将一起为美国科学家提供更有效使用高强度超快激光器的途径。该项目由美国能源部科学办公室下属的聚变能源科学办公室提供资金支持。

其中劳伦斯·伯克利国家实验室拥有加速器技术与应用物理部门的 BELLA PW 激光器(图 11<sup>[16]</sup>)。罗彻斯特大学激光热动能学实验室(LLE)也是该机构的合作伙伴之一。LLE 的 Omega 激光设施将为 LaserNetUS 网络带来得天独厚的能量、光强、通用性、可靠性和诊断能力(图 12<sup>[16]</sup>)。

SLAC 的 Linac 相干光源(LCLS),将会为 LaserNetUS 网络的访问科学家提供专属的光学激光器使用时间(图 13<sup>[16]</sup>)。LaserNetUS 合作伙伴的 PW 级

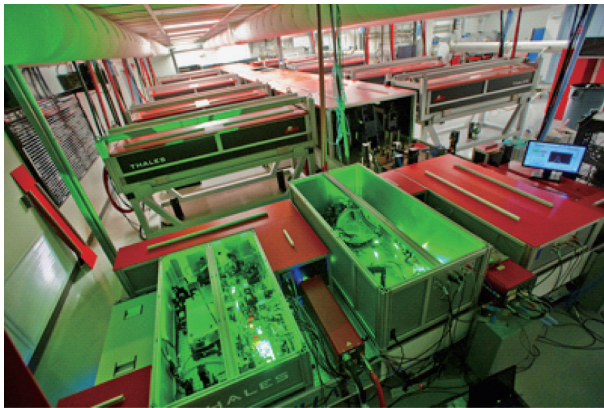


图 11 BELLA PW 激光器



图 12 罗彻斯特大学激光热动能学实验室



图 13 美国能源部 SLAC 国家实验室

高功率激光器使用了啁啾脉冲放大技术,该技术由 2018 年诺贝尔物理学奖的两位获奖者首创,这些激光器发射出的光脉冲,持续时间短于  $10^{-12} \text{ s}$ 。

得克萨斯大学奥斯汀分校拥有美国最高功率的激光器之一——得克萨斯 PW 激光器(图 14<sup>[16]</sup>)。其高能密度科学中心是得克萨斯 PW 激光

器的所在地,该中心主任 Todd Ditmire 表示:“奥斯汀分校已成为基于超强激光研究领域的国际领跑者之一,在过去长达10年的时间里,一直维持着拥有世界最高功率之一的激光器有效运行。凭借在该科学领域中的既有领导地位,我们可以在 Laser-NetUS 中发挥重要作用。”



图14 位于得克萨斯大学奥斯汀分校的得克萨斯PW激光器

类似于美国,欧洲于2018年10月在西班牙萨拉曼卡举行欧洲激光共享实验室(Laserlab-Europe AISBL)成立大会,该组织包括38名正式会员和3名准会员。根据比利时法律,AISBL是一个国际非营利性组织,将赋予激光实验室欧洲法律独立性。Laserlab-Europe 是欧洲激光研究基础设施的综合项目,是欧洲的强激光中心,激光研究的发展以灵活和协调的方式进行,超出了单个国家规模的潜力。该组织目前汇集了来自16个国家33个激光跨学科研究装置,其主要目标是维持可持续发展的欧洲国家实验室跨学科网络;透过联合研究活动,加强欧洲在激光研究方面的领导地位;为来自各个科学领域和任何实验室的研究人员提供最先进的激光研究设施,以便进行世界级的研究<sup>[17]</sup>。

依托该组织,2018—2019年取得了重要的突破进展,其中位于柏林的Max Born研究所(MBI)的科学家们已经研制出第一种聚焦极紫外光束的折射透镜。研究人员展示了一种由原子射流形成的透镜,而不是使用在极紫外区不透明的玻璃透镜(图15<sup>[17]</sup>),研究结果发表在《Nature》上<sup>[18]</sup>。鉴于在最短时间内成像生物样本提供了新的机会。德国

耶拿大学的一个跨学科科学家团队获得了著名的凯撒·弗里德里希研究奖(Kaiser Friedrich Research Prize)。该团队成员包括来自激光实验室-欧洲合作伙伴莱布尼茨光子技术研究所(leibniz-ipht)的研究人员,他们用光学方法在手术过程中快速、温和、可靠地诊断癌组织。这个著名的研究项目叫做CDIS Jena 癌症诊断成像解决方案。欧洲核子研究中心(CERN)报告了第一个关于质子束产生的等离子体波中电子加速的实验。在第一次演示中获得的加速度,已经比目前可用的粒子加速器的传统技术获得的加速度大好几倍(图16<sup>[17]</sup>),研究结果发表在《Nature》上<sup>[19]</sup>。

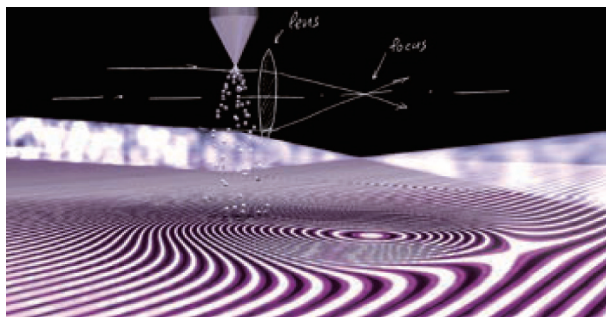


图15 原子气流透镜聚焦紫外光示意

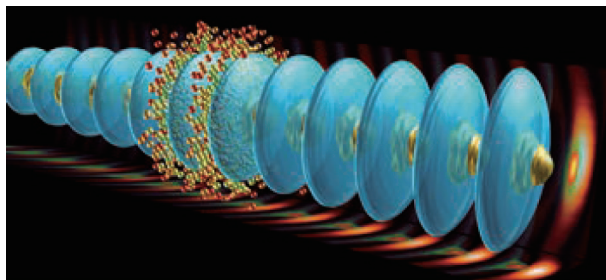


图16 相对论区域等离子体电子尾场加速的数值模拟结果

截至2019年,中国已建成3个标志性的超强激光系统:神光-II 5 PW 激光器是一个全OPCPA激光系统,物理实验指标达到1.76 PW,脉宽21 fs<sup>[20]</sup>;四川CAEP-5PW报道了4.9 PW 峰值功率,2018年以来在PW水平上提供了物理实验;中国科学院上海光学精密机械研究所强光SULF-10PW 演示了啁啾脉冲能量超过190 J、可以支撑5~10 PW 的输出能力<sup>[21]</sup>。

### 3 成像技术

在过去的 20 多年里,光学显微成像技术发展迅猛,不断突破传统极限。而在生命科学的研究中,要求成像系统在不损伤样品(或尽可能减小损伤)的前提下,实现更大视野、更高分辨率、更高速度的三维成像。

传统的宽场荧光显微镜利用同一个物镜聚焦激发光和收集样品的荧光信号。这种聚焦光锥的照明方式会照亮整个样品,同时焦平面以外的信号也会被激发,引起焦外污染,影响图像分辨率和对比度。激光扫描共聚焦采用点扫描的方式,通过在照明端和探测端引入一对共轭针孔,滤除了焦平面以外的杂散光,极大地提高了图像的轴向分辨率,实现了三维成像。但是这种照明方式,还是会照亮焦平面以外的地方,同时点扫描的方式也会极大地限制成像速度。

光片显微镜技术是近十几年来发展起来的一种三维光学显微镜技术。与上述两种显微成像技术不同,光片显微镜采用照明端和采集探测端垂直的结构。照明的片状光与探测物镜焦平面重合,探测时只有焦平面会被照亮激发,而其他位置不受影响。这种独特的照明方式,具有以下几个优点:(1) 只有焦平面被激发,极大地降低了光漂白和光毒性;(2) 避免了焦外污染,提升了图像信噪比和轴向分辨率,可以实现三维成像;(3) 平面照明方式可以结合高量子效率的面阵 CCD 或 sCMOS,实现快速三维成像。

平面照明显微镜(SPIM)是一种常见的片状显微镜,利用柱面镜将一个维度的光压缩,另一个维度不变,形成片状光。照射物镜时,在焦点处形成光片。采集物镜与光片平面垂直,并聚焦在光片照明的平面。利用这种方法产生的光片,其厚度和瑞利范围由照明物镜的数值孔径(numerical aperture, NA)决定。根据高斯光束传播特性,在同样的入射光条件下,照明物镜 NA 越小,瑞利范围越大,能够实现较大范围的均匀照明;但是光片的厚度也越大,导致轴向分辨率较低。而高 NA 的物镜能够产生较薄的光片,具有很高的轴向分辨率,但瑞利

范围成倍减小。这种分辨率和视野的矛盾是不可调和的,通常需做一定的取舍。目前常见的解决方法是图像拼接,然而图像拼接需要很高的机械精度,多次成像也限制了成像速度。并且由于不同的成像时间,对于活体样品成像有一定的限制。这种轴向分辨率和成像视野的矛盾限制了其在生物医学研究中的应用。

最近,科研人员首次将三维超分辨技术和光片显微技术结合,无需经过图像拼接即可获得大视野下( $100 \text{ mm}^3$ )的高分辨率图像,成像通量高达  $10^9$  体素/min。该方法的思想是通过获取具有多帧亚体素位移的低分辨率图像,利用极大似然估计重建算法恢复出高分辨的三维图像<sup>[22]</sup>。

如图 17<sup>[22]</sup>所示,该方法与传统的轴向扫描不同,采用一种斜轴扫描方式。这种独特的扫描方式可以在 X、Y、Z 3 个方向上产生位移分量。通过合理设计斜轴角度和扫描步长,可以在 3 个维度产生亚像素的位移。首先对获得的低分辨率图像堆栈 P 进行分组,得到多组具有亚体素位移的低分辨率三维图像堆栈( $P_1, P_2, \dots, P_n$ )。然后将多组低分辨率三维图像堆栈作为输入,利用极大似然估计迭代重建恢复出高分辨的图像。最后将斜轴扫描引起的倾斜进行校正。利用这种亚体素超分辨(SVR)方法,

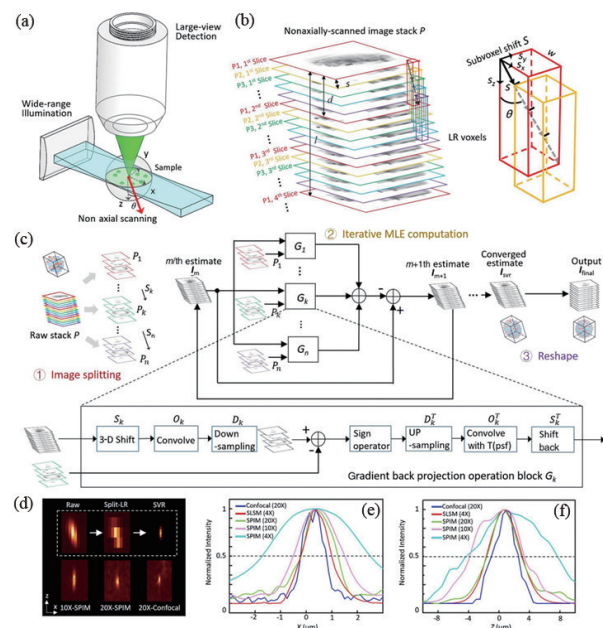


图 17 亚体素光片显微镜(SLSM)原理示意

可以将三维图像的横向分辨率提升3~4倍,轴向提升2~3倍。这种扫描和算法的独特结合称为亚体素光片显微镜(SLSM)。该方法可以用图型处理器(GPU)进行加速计算,进一步提高运算速度。

由于SLSM可以在3个维度上提升原始图像的分辨率,因此可以利用一个相对较厚的光片进行照明,获得大视野的图像,然后通过算法实现大视野下的高分辨成像。实验中(图18<sup>[22]</sup>),研究人员采用0.03 NA照明的光片和4倍探测物镜对人支气管上皮细胞(NHBE)进行三维成像,利用SLSM重建获得的图像分辨率较常规光片显微镜同样视野下拍摄的图像有明显提升。然而研究人员用更薄的光片(0.08 NA)照明,20倍的物镜采集时,SLSM的结果甚至比20倍物镜采集的图像更好,而后的成像视野比SLSM减小了25倍。

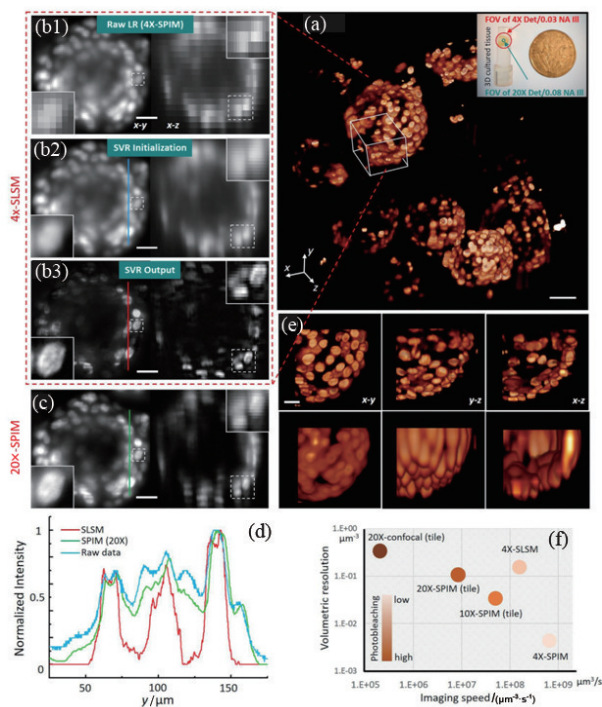


图18 SLSM观测到的培养标准人支气管上皮细胞的三维图像

研究人员利用光纤探针和生物透镜构建了一种微观放大镜,可对细胞内纳米结构同时进行非标记成像和三维空间操控,成功实现了超分辨显微成像和纳米光镊技术的一体化<sup>[23]</sup>。

为了从亚细胞层面甚至单分子水平去了解生

命现象的本质,科学家一直在寻找能够探索微观世界的“眼睛”和“双手”。例如斩获2014年诺贝尔化学奖的超分辨荧光显微镜为人们点亮了观察纳米物体的“眼睛”,而获得2018年诺贝尔物理学奖的光镊技术则提供了操控微小粒子的“双手”。然而,现有的超分辨成像技术和光镊技术独立于两个分离的光学系统,导致“眼睛”和“双手”无法相互配合。此外,由于这两种技术依赖高数值孔径物镜和细胞荧光标记,使其生物不兼容。如何将纳米“眼睛”和“双手”集成在一个生物兼容的器件中,是该领域亟需解决的关键科学问题。

针对这一问题,提出了一种新的近场成像和操控技术,将一个体内自然存在的酵母细胞、造血干细胞或红细胞捕获在一根光纤探针的尖端,以光纤作为手柄、细胞作为透镜构成了一个微观放大镜,光通过微观放大镜后汇聚成一个亚波长的光束,这个光束既能产生一个稳定的纳米光学势阱,又能充当一个纳米照明光源,从而实现了对细胞内结构(例如线粒体、小囊泡和细胞骨架)的非标记成像和三维空间操控,成像分辨率和操控精度可达100 nm(图19<sup>[23]</sup>)。该研究成果不但将“纳米手”和“纳米眼”融合在细胞研究中,而且不需要对细胞进行荧光标记,有望在生物传感和医学成像等研究中发挥作用。

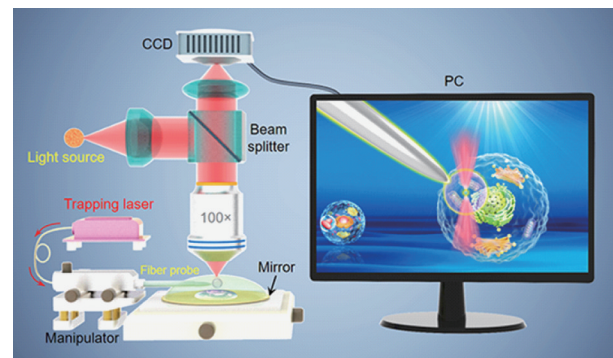


图19 微观放大镜对细胞内结构进行成像和操控实验装置示意

表面波光学显微镜主要用于研究表面或界面处光与物质的相互作用、样品表面或界面处的行为特征。目前,常用的表面波光学显微镜是利用金属(通常为金或银)薄膜负载的表面等离子体波(SPs)

作为照明光源的表面等离子体共振显微镜(SPRM),它广泛应用于细胞、细菌、病毒、DNA、蛋白质等生物体的无标记成像研究。但SPRM存在两个不足之处,限制了其更为广泛应用:第一,由于SPs的传播特性,导致了SPRM在SPs传播方向的空间分辨率通常为几个微米,远大于光波的衍射极限;第二,由于SPs需要特定的激发条件且显微物镜的数值孔径有限,导致了SPRM对入射光的波长、偏振及衬底材料有一定要求,如入射光必须是长波,且必须是p偏振光,样品必须放置在金属材料上等。

针对上述不足,中国科学技术大学提出了一种基于旋转照明的表面波光学显微成像新技术,提高了无标记成像的分辨率,拓展了表面波光学显微镜的应用范畴<sup>[24]</sup>。

如图20<sup>[24]</sup>(a)所示,在自主搭建的光学显微镜上加载了旋转照明模块。利用扫描振镜精确、高速地调节光束入射角度,在保持径向角度( $\theta$ 对应表面波的共振激发角度)不变的情况下,让方位角在 $0^\circ\sim 360^\circ$ 之间高速旋转(图20<sup>[24]</sup>(b)),进而在各个方向激发传播的SPs。无需图像处理,利用探测器采集图像的时间平均效应便可自然提高SPRM成像分辨率。

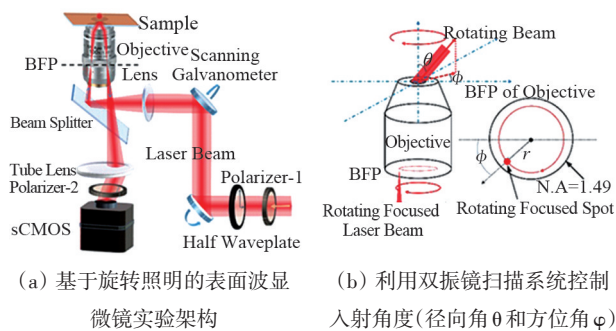
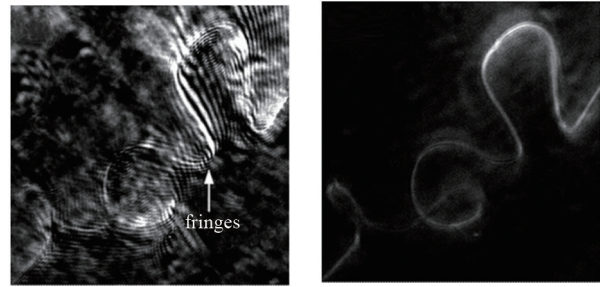


图20 光学显微镜上加载旋转照明波显微镜实验

如图21<sup>[24]</sup>(a)所示,被成像样品是一根弯曲介质纳米线,利用常规的SPRM只能看到模糊的图案,并有很多条纹造成的假象;而利用旋转照明SPRM,可有效分辨出此纳米线的形貌和弯曲度(图21<sup>[24]</sup>(b))。对比实验证明,旋转照明有效地提高了SPRM成像分辨率,解决了目前SPRM存在的第一个不足之处。



(a) 常规SPRM成像 (b) 旋转照明SPRM成像

图21 SPRM成像效果对比,单根弯曲纳米线放置在金属薄膜上

为了解决第二个不足之处,介质多层膜(图22<sup>[24]</sup>(a)负载的布洛赫表面波(BSWs)被提出用来替代金属薄膜(图22<sup>[24]</sup>(b))的SPs,从而研制出一种新型的表面波显微镜BSWM(Bloch surface wave microscopy)。其优势在于:介质薄膜(顶层为玻璃材料)稳定性优于金属薄膜且易于进行生化修饰;BSWM既可以工作于长波也可以工作于短波;BSWs的穿透深度可以调节,可以实现不同深度的表面成像;BSWM可以工作于p偏振和s偏振入射光,有利于偏振敏感样品的测量与表征。基于这些优势,BSWM的应用范围将会更为广泛。

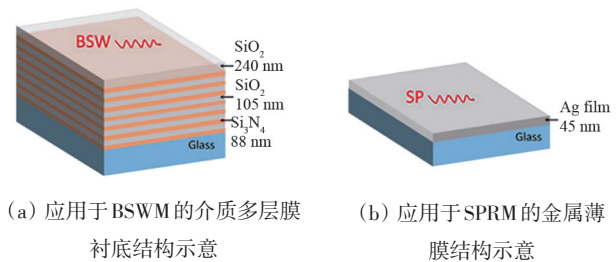
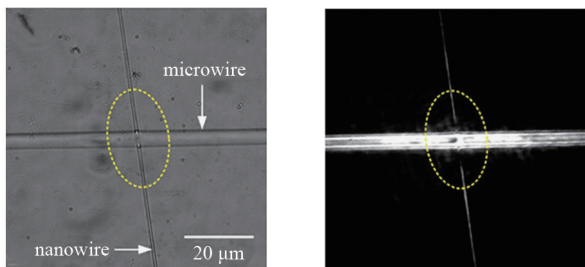


图22 表面波光学显微镜基片结构示意图

图23<sup>[24]</sup>为BSWM成像效果图。在此装置中,BSWM工作于s偏振的入射光。图23(a)所示为一根介质纳米线放置在一根介质微米线上,二者放置在设计好的介质多层膜表面。在纳米线与微米线的交叉区域(虚线椭圆标记区域),纳米线与多层膜表面是悬空的,也就是其不在多层膜表面的近场区域。因此,利用表面波光学显微镜时,这部分不会被成像,如图23(b)所示(椭圆虚线部分),图像上纳米线在交叉区域显示断开的。而对于常规的光学显微镜成像,如图23(a)所示,纳米线是连续的,

这是因为常规光学显微镜无法探测到纳米线与基片表面之间的接触情况,这也正显示出表面波成像的特点,即只对衬底表面近场区域内的物体进行无标记成像。



(a) 常规光学显微镜成像 (b) BSWM 成像

图 23 BSWM 成像效果,被成像样品是一根介质纳米线放置在一根介质微米线上

浙江大学研究组发现了一种基于类钙钛矿半导体结构、具有极高灵敏度的 X 射线探测材料,并成功实现了具有极低剂量检测极限的直接型 X 射线探测器件。其探测灵敏度和最低检测极限要优于目前接近商用化的非晶硒直接型 X 射线探测器 2 个数量级左右,未来有可能应用于 X 光成像系统中,在更少的射线辐照量下获得更清晰的 X 射线成像照片。

该研究组报道了一种具有类似钙钛矿结构的半导体材料 $(\text{NH}_4)_3\text{Bi}_2\text{I}_9$ <sup>[25]</sup>,这种类钙钛矿材料具有很高的 X 光吸收效率和载流子收集效率,其特有的各向异性层状结构,有助于实现载流子在信号收集方向的高效迁移和收集,同时抑制横向扩散,从而使得成像阵列中的横向扩散电流被压制,降低信号间的电学串扰,实现更高分辨率的成像(图 24<sup>[25]</sup>)。

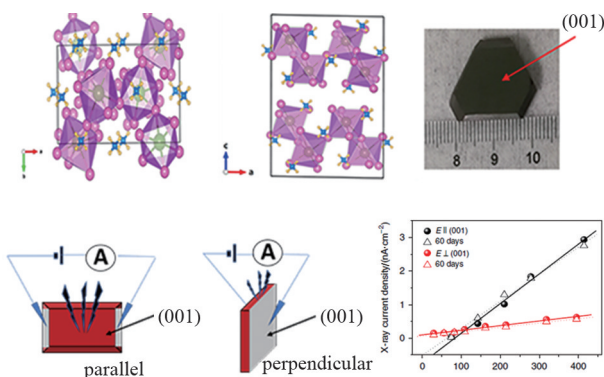


图 24  $(\text{NH}_4)_3\text{Bi}_2\text{I}_9$  单晶材料及其射线探测器

## 4 量子通信

研究人员利用硅纳米光波导中非线性自发四波混频效应,制备出性能优越的硅基片上双光子偏振纠缠量子光源,并在此基础上利用复用技术实现了硅基片上四光子源<sup>[26]</sup>。该硅基片上多光子源具有 CMOS 工艺兼容性,可稳定产生高亮度、可调谐、易于扩展的多光子量子态,作为一个基本单元器件可与目前光纤量子通信系统衔接,为日后量子光学技术在通信、计算和精密测量等领域的应用打下重要基础(图 25<sup>[26]</sup>)。

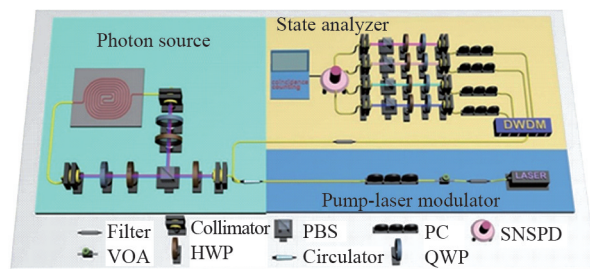


图 25 用于生成和表征硅基片上多光子源的系统示意,主要包括 3 个部分:泵浦激光调制、多光子源产生和量子态分析

另一项量子通信领域取得的重要进展,是利用光学轨道角动量这个自由度,在实验上实现了一种光学轨道角动量模式复用的连续变量量子纠缠体系(图 26<sup>[27]</sup>)。研究人员把复用的概念和光学轨道角动量自由度相结合,并应用于连续变量纠缠体系,从而提出了一种通过复用光学轨道角动量的不同模式大幅度增加量子通信体系纠缠容量的方案,并且最终在实验上得以实现<sup>[27]</sup>。该研究实现了光学轨道角动量模式复用的连续变量量子纠缠系统,大幅度提高了系统的纠缠容量,为连续变量量子通信研究提供了一个新的平台和思路。

远程光纤量子密钥分发方面,研究团队首先在理论上提出了免相位后选择的双场量子密钥分发协议,有效降低双场类协议的执行复杂度。基于这一协议,突破了异地孪生光场制备和长距离信道相位补偿两项核心技术,在 300 km 常规光纤信道中,完成了超越线性界限制的高密钥生成率实验系统(图 27<sup>[28]</sup>),为无中继长距离城际量子密钥分发网络

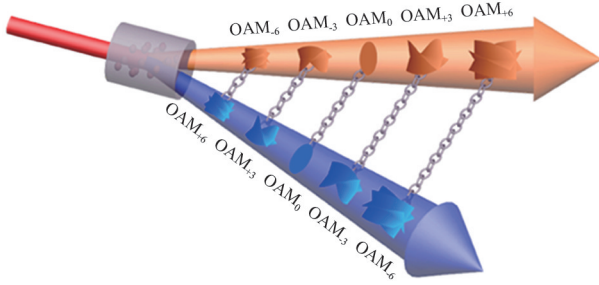


图26 光学轨道角动量模式复用的连续变量纠缠

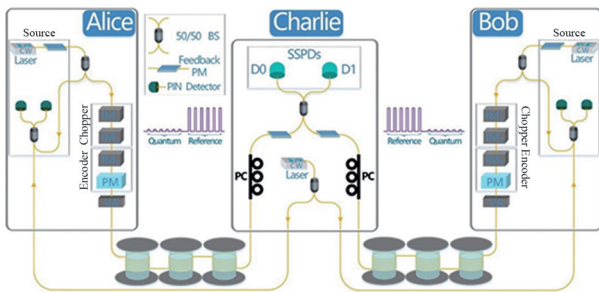


图27 双场量子密钥分发实验系统

迈出了关键的一步<sup>[28]</sup>。

基于该密钥分发协议,实现了两台独立激光器之间的稳定完美一阶干涉,干涉可见度与同一激光器自身干涉可见度基本一样,解决了双场量子密钥分发(Quantum Key Distribution, QKD)协议要求孪生光场远程制备的技术难题。接着,针对长距离光纤信道由于光程(折射率和几何长度)变化导致光场相位快速变化的实际情况,研究团队设计并实现了远程光纤信道快速相位补偿控制技术,在毫秒时间即可实现波长级的快速相位补偿,并且需要的发送端光强在单光子量级,在单臂长度 150 km 的等臂干涉仪中得到干涉可见度接近 97% 的长期稳定干涉(图 28<sup>[28]</sup>)。

量子网络研究也取得了重要进展,实现了全光量子中继器的原理性验证,为构建远距离光子量子网络奠定了基础<sup>[29]</sup>。

在该项工作中,研究团队首先对原始的全光子中继方案进行改进,设计了实验可行的简化方案,使用光子 GHZ 态并选择贝尔测量来实现不同信道间光子对的任意连接,从而有效地提升量子信道中纠缠态的分发成功概率。然后,研究团队利用 6 个独立的参量下转换双光子纠缠源,在实验上成

功地搭建了一个基于 12 光子的全光子量子中继器,测试了该量子中继器的各方面性能,并在实验上验证了其相比于纠缠交换方案的优势(图 29<sup>[29]</sup>)。实验结果显示,全光子量子中继器可以有效提升量子态的传输速率,从而拓展量子通信的传输距离。

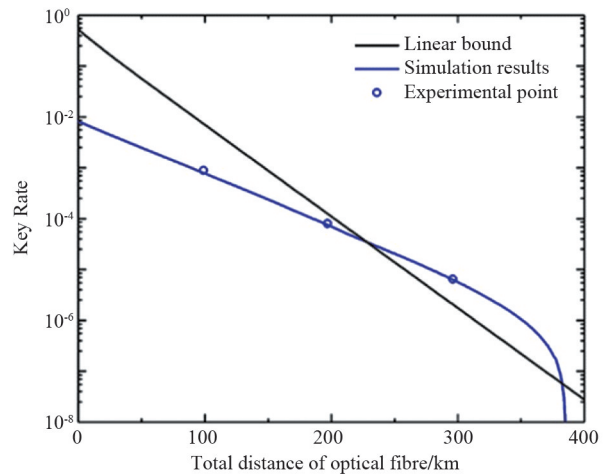


图28 实验系统的安全密钥率

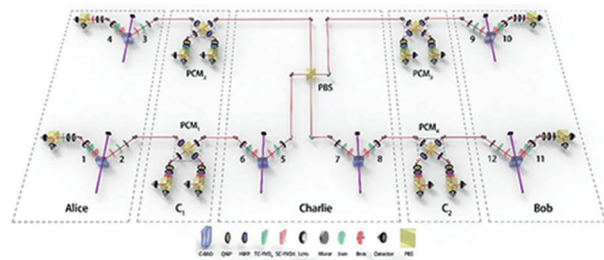


图29 实验装置示意

该项工作成功验证了全光子量子中继器的可行性,在原理上使得量子存储器不再是搭建量子中继器的必要条件,为实用化量子中继器的研究开辟了一条崭新的道路。

## 5 太赫兹技术

太赫兹辐射在无线通信、传感和成像等领域得到了广泛应用,然而用于制造 THz 元件的介电材料的功率吸收损耗随频率呈二次变化,因此通过改变厚度来设计光学元件的传统方法是有问题的。另一种设计策略,梯度折射率(GRIN)光学,可以建立多功能和超薄波束形成组件,但实施梯度折射率光

学使用超材料可能导致高欧姆损耗和窄带操作。

科研人员为太赫兹范围开发了低损耗的平面多孔光学元件<sup>[30]</sup>。其方法是利用固体材料中的低折射率亚波长包体来设计光学元件,这些元件的损耗

比全固体的同类元件要小,但在其他方面具有相同的光学特性,这是可能的。因为电保护层在亚波长孔中增强,导致材料的有效损耗相对于孔隙率增加时材料的有效折射率的变化更快地降低(图30<sup>[30]</sup>)。

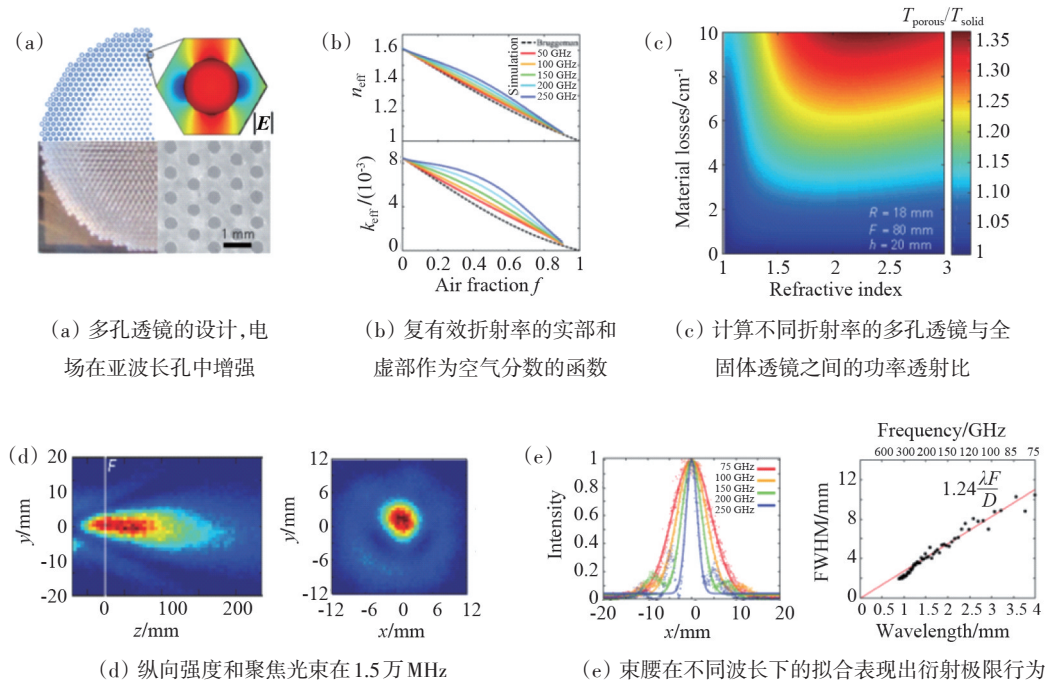


图30 平面多孔透镜

对多孔透镜和全固体平凸透镜的损耗进行了比较分析,发现透过多孔透镜和透过固体透镜的功率传输比大于单位,说明多孔透镜优于全固体透镜。例如,用折射率为 1.6、损耗为  $10 \text{ cm}^{-1}$  的材料制成的多孔透镜,其透射功率比用同样材料制成的全固态透镜增大 25%。

随后,可用激光在有机玻璃基板上雕刻出亚波长孔来制作多孔透镜。孔的大小是径向变化的,引入了折射率的二次相关。用 THz 时域系统对 THz 光束成像时,观察到它正确地聚焦在预测的焦距上。对几个波长的聚焦光束宽度的测量表明,它是有限差分的。

可以相信,这项工作应该会引起光学界的兴趣,因为它提供了一种全面的方法利用多孔介质制造低损耗元件。此外,利用具有有趣性质的高损耗材料(例如高折射率或高群速度色散)构建新型低损耗元件,可能会开辟新的研究方向。

中国研究人员率先实现了大功率 THz 量子级联激光器(QCL)及其增强型被动光频梳,同时研制了 THz 频率上转换成像探测芯片,实现了超高速 THz 成像<sup>[31]</sup>。

在 THz QCL 低峰值功率泵浦条件下,采用 z-scan 技术,成功观察到石墨烯材料的非线性饱和吸收特性。饱和吸收体耦合的 THz QCL 光频梳的射频信号频率线宽低至 700 Hz。另外,基于饱和吸收特性,采用 THz 泵浦探测技术首次直接测量了被动 THz QCL 光频梳光脉冲宽度(16 ps),证明 THz QCL 实现了锁模(图 31<sup>[31]</sup>)。该工作为进一步提高 THz QCL 光频梳频率稳定性和实现 THz 超短脉冲输出奠定了重要基础。

电子科技大学研究组在阵列型空间光太赫兹高速直接调制方法及器件研究方面取得了重要进展。提出了通过控制 InAlN/GaN 高电子迁移率晶体管(HEMT)中二维电子气的输运,从而调控微结

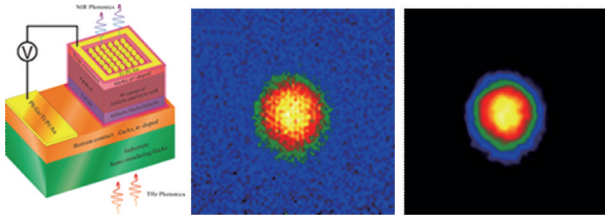


图31 THz QWP-LED器件示意及其高速成像

构阵列谐振态变化的新机制,改变了通过半导体体材料调控微结构单元谐振模式的传统方式,在国际上实现了对空间传输的太赫兹波进行1 Gbit/s以上速率调制的阵列型空间光太赫兹直接调制器件,单音正弦波调制最高速率大于3 GHz、调制深度大于93%,解决了空间太赫兹波长期以来难以高速、高效调制的国际性难题。同时利用InAlN/GaN的高压开启特性,解决了调制器对空间太赫兹波的功率承载容量问题,最高承载功率可达到1 W级<sup>[32]</sup>。

该研究组提出运用网状分布式阵列的新结构(图32<sup>[32]</sup>),以GaN-HEMT二维电子气调控阵列集体谐振态与子单元内部谐振态间的谐振态转换,实现了高速高效调制太赫兹波的新途径。研究团队设计运用网状分布式结构,打破微结构内部独立的谐振单元模式,形成阵列内部整体的电磁振荡,实现了对空间传输的太赫兹波93%的调制,调制速率在国际上首次突破了1.8 Gbit/s。这一新的调制机制为太赫兹空间光调制器件的发展提供了新的研究方法。

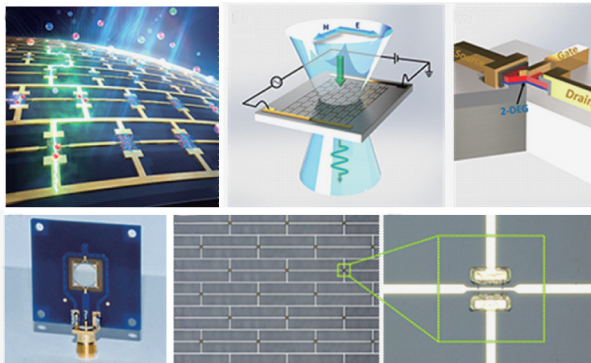
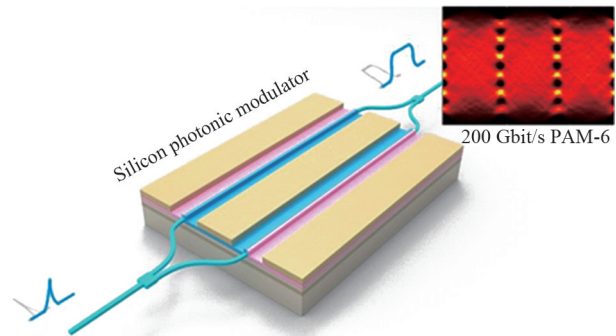


图32 HEMT谐振态转换超表面太赫兹调制器

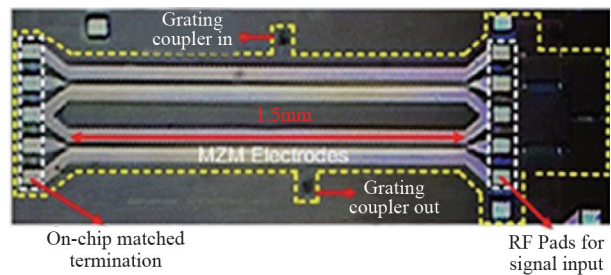
## 6 光学通信

光学通信是一种以光波为传输媒质的通信方

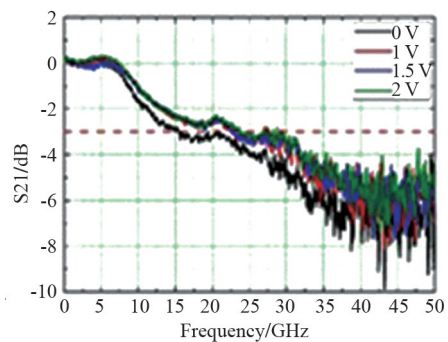
式。2019年,研究人员在硅基调制器光互连领域取得突破性进展。他们基于一款常规的硅基光电强度调制芯片(图33<sup>[33]</sup>),实现了单通道200 Gbit/s传输速率的短距光互连系统——实现了基于纯硅基强度调制器实现单通道200 Gbit/s速率光传输,创造了纯硅基光强度调制芯片最高速率纪录<sup>[33]</sup>。



(a) 硅基光调制示意



(b) 硅基调制器显微图



(c) 硅基调制器带宽测试

图33 硅基光电强度调制芯片

无线通信流量正以惊人的速度增长,而电子技术在处理这种增长时面临着越来越多的困难。微波光子学(MWP)将无线信号处理和传输的挑战从电子领域转移到光子领域,由于其固有的宽带和低损耗特性,可以为解决这一问题提供大量的新机遇。此外,光子集成电路(PICs)将MWP提升到一

一个新的高度,以克服电子中摩尔定律的饱和,并满足吉尔德定律给出的流量增长。

因此,集成的MWP可以代表一种紧凑、可靠和环境有吸引力的替代方案,以跟上指数式的流量增长,并增强关键的微波/无线功能。然而,最先进的MWP集成电路迄今为止功能有限,而且大多数已经在条件良好的环境或离线条件下的实验室测试中,在概念上或功能上得到了证明。

这在实验室和真实世界的应用程序之间留下了一个重要的最后差距,因为这些电路将需要大量部署在室外场景和远程分布在恶劣的环境。最近,研究人员在弥合这一差距,将MWP的概念从实验室应用到日常生活中,取得了一个重要的里程碑式突破。这一进展的核心是为通用微波光子学提出并制作的多功能集成光子芯片。该芯片在InP平台上制作,整体集成了可调激光器、调制器、耦合器、可重配架构和信号流。因此,在微波信号的产生、传输和处理领域实现了多种功能,包括远程信号发生器、模拟强度调制和相位调制MWP链路、可调带通和带阻滤波器、微波频率测量和脉冲重复率测量<sup>[34]</sup>。更重要的是,该通用微波光子芯片具有稳定、鲁棒等优点,可直接用于实际应用。它已经被直接部署在中国西南地区的现役高速铁路沿线,用于探测电磁干扰(EMI),以及蜂窝通信和远程高清视频接入(图34<sup>[6]</sup>)。

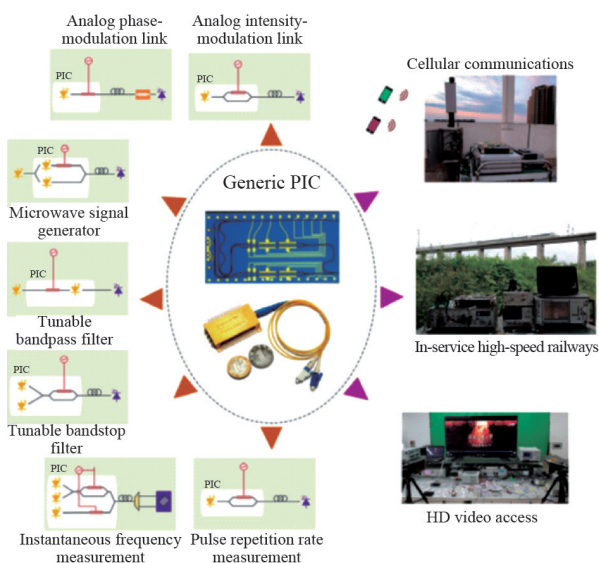


图34 通用微波光子学多功能集成光子芯片的应用

这项工作可以被认为是户外场景中集成MWP的实时、日常应用的第一个范例,也是大规模日常应用的关键一步。它可以给社会许多方面带来综合效益,就像集成电路那样。

通用光子集成电路及其应用,包括7个基本的微波光子功能。其日常生活示范应用涉及到成都、重庆高速铁路(中国西南部)的电磁干扰检测、宽带蜂窝通信和远程高清视频接入。

在光通信、光信息处理等过程中,往往需要光的单向放大来实现噪声的抑制,达到保护光源的目的。但由于光在一般介质中(线性、时间无关)具有双向传输的互易性,即向左传播和向右传播是可逆的,因而对光的放大一般也具有互易性。现有的无磁非互易放大理论方案主要采用约瑟芬森电路、非厄米系统、光力系统等,而现有的实验中实现光波段光场单向放大的两个工作都是采用腔光力系统,方案依赖于高品质光学腔的制备和调控。

研究人员通过巧妙设计,将原子热运动导致的多普勒效应和拉曼增益结合,提出了可在自由空间实现光波段非互易放大的原创性方案,并在实验中进行了验证<sup>[35]</sup>。常温铷原子气体中完成的相关实验,获得了26 dB的前向放大和30 dB的反向隔离,该指标为当前报道的最高实验指标。

当信号光和控制光同向传输时,其感受到的多普勒效应和控制光场相同,此时信号光可以无吸收通过。在泵浦光场的作用下,增益通道打开,信号光被急剧放大。反之,信号光被强烈吸收。这一原创性方案为常温工作、易于调控、小型化可集成的无磁非互易放大器研制,提供了新的途径(图35<sup>[35]</sup>)。

## 7 生物光子学

理解与活细胞的光相互作用对生物成像、生物燃料、生物激光和生物光学微芯片的发展至关重要,并增加对生物光学、光流体和软物质物理的深刻理解。

旧金山州立大学研究组提出了红细胞悬浮液中的光引导。当光通过混浊介质传播时,在达到深穿透和长程透射之前,通常会发生强烈的散射。这

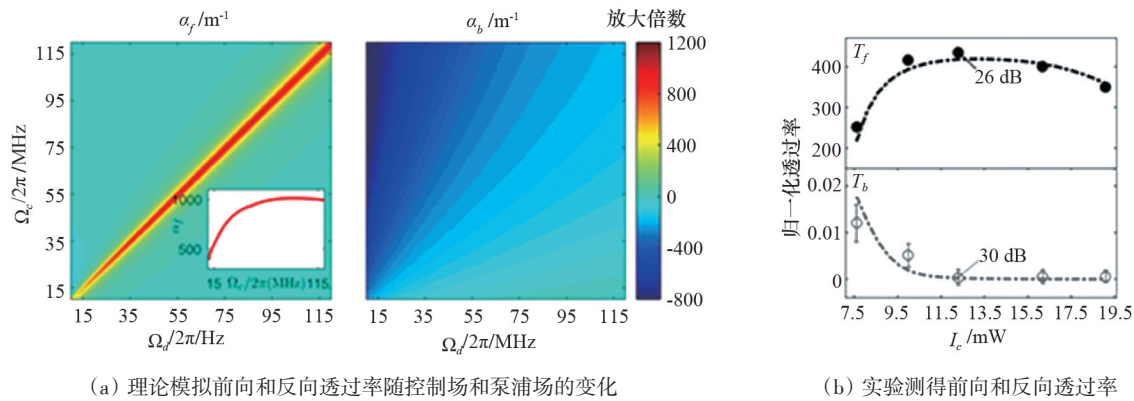


图 35 在自由空间实现光波波段非互易放大

成为许多生物应用的一个巨大障碍,从成像到生物传感,这些应用严重依赖于通过这样的介质传递信息。在过去的 10 年中,非线性光学已经成为一种强大的工具来实现光在各种软物质环境中增强的传输,包括电介质、等离子体,甚至生物悬浮液。

研究团队最近用悬浮在不同渗透溶液中的人红细胞(RBC)演示了非线性光学效应<sup>[36]</sup>,使激光束能够通过红细胞悬浮液进行自捕获、抗散射传播。这种非线性的红细胞反应形成了波导,使光在溶液中穿透几 cm,使散射损失最小化(图 36<sup>[36]</sup>)。

已经证明,通过 RBC 悬浮液照射的激光束可以被困在狭窄的管道中,通过空间重新排列红细胞的光学力形成,允许在没有散射损耗的情况下传播。这项工作表明,与普遍的看法相反,光的自聚焦和自捕获可以通过非局部、非线性的光梯度和前向散射力的相互作用实现。

此外,血液的渗透状态(等渗、低渗或高渗)显

著地影响了在这种导光现象中起作用的光学力;细胞的不同形状和折射率改变了光力诱导的非线性,使非线性强度随细胞渗透压的增大而增大。实验表明,RBCs 的渗透条件可以定量地改变光束自陷的大小,而不会对几百 mW 的激光功率造成严重的光损伤。

通过强散射介质(如血液)对光进行聚焦的能力,可能被证明是在可见光或近红外成像领域向增强的非侵入性成像和传感技术迈出的重要一步。这项技术也可以提供一种诊断工具来识别细胞形态学特征的改变或缺陷,如镰状细胞病或疟疾。

在另一项研究中,科研人员利用等离子纳米天线与生物分子构建了一种生物隧穿结,首次实现了活细胞内部电子隧穿与转移的非侵害光学成像,用光学手段揭示了癌细胞死亡过程的电子转移机制<sup>[37]</sup>,首次从实验上观察到了细胞存活与死亡过程中的电子隧穿与转移的光学成像。电子从等离子

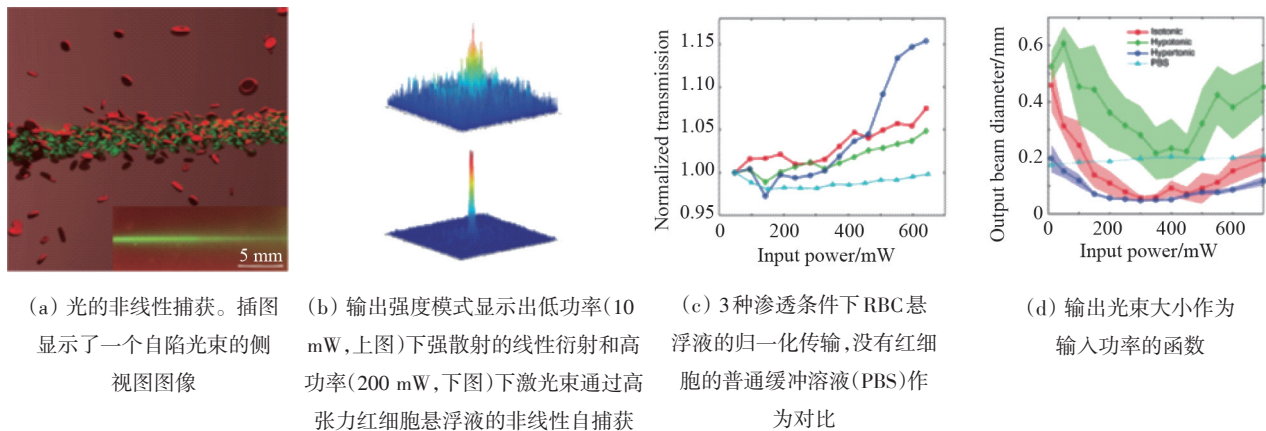


图 36 人红细胞(RBC)的非线性光学效应

(a) 光的非线性捕获。插图显示了一个自陷光束的侧视图图像

(b) 输出强度模式显示出低功率(10 mW, 上图)下强散射的线性衍射和高功率(200 mW, 下图)下激光束通过高张力红细胞悬浮液的非线性自捕获

(c) 3 种渗透条件下 RBC 悬浮液的归一化传输,没有红细胞的普通缓冲溶液(PBS)作为对比

(d) 输出光束大小作为输入功率的函数

元纳米天线表面通过隧穿结隧穿并转移到细胞色素c分子后,在散射光谱上出现指纹式的离散凹陷,从这一凹陷便可直接实现电子隧穿与转移的光谱成像(图37<sup>[37]</sup>)。在癌细胞不同死亡过程中,这一随时产生的分子指纹式凹陷存在明显的不同,从而从分子层面揭示了癌细胞凋亡、坏死等不同过程的机制。这一研究成果为活细胞中电子隧穿与转移的直接观测提供了开创性方法,为深入研究细胞存活与新陈代谢的生物量子机制奠定了新的基础。

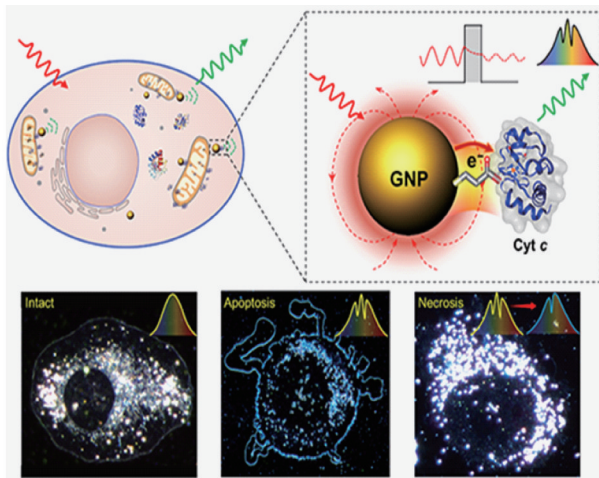


图37 生物隧穿结实现活细胞内部电子隧穿与转移的示意及实验图片

## 8 人工智能用于光学检测

人工智能自诞生以来,应用领域也不断扩大,未来人工智能带来的科技产品,将会是人类智慧的“容器”,在光学上也得到越来越广泛的应用。

粒子跟踪在光学领域内是微观探测的关键技

术。微观粒子的运动常常作为其周围微环境的局部探针,例如测量生物分子力,探索复杂液体的流变学,监测胶体晶体的生长,以及确定组织的微观力学性质。2019年,科研人员引入了一种深入学习的方法跟踪粒子,这可以提高它在这些领域的可靠性和实用性<sup>[38]</sup>。

大约20年前引入的数字粒子跟踪技术今天仍然由算法方法主导,算法方法要求用户提供明确的规则处理粒子图像以获得其位置。一些最常用的算法是计算阈值化后的质点质心,将其转换成黑白图像,或者计算质点的径向对称中心。

这些方法在低信噪比和不稳定或非均匀照明下的性能严重下降。这通常需要用户的大量干预才能达到可接受的性能,这反过来又会引入用户偏见。实际上,在这种情况下,科学家必须手动搜索可用算法和参数的空间,这一过程往往是费力、耗时和依赖用户的。这严重限制了粒子跟踪方法在专业研究实验室之外的应用,也导致了研究活动的不断增加,这些研究致力于比较它们在挑战性条件下的表现。

为了克服这些限制,科研人员最近引入了一种基于卷积神经网络的数据驱动粒子跟踪方法,将其命名为DeepTrack。DeepTrack是一个完全自动化的深度学习网络设计,即使在有噪音和不稳定的照明条件下,它也能实现对多种粒子类型的亚像素分辨率,这大大超过了标准算法。同时还提供了一个免费的Python软件包,可以根据特定用户和应用程序的需要进行个性化和优化(图38<sup>[6]</sup>)。

这项工作代表了单粒子跟踪方式的一个范式

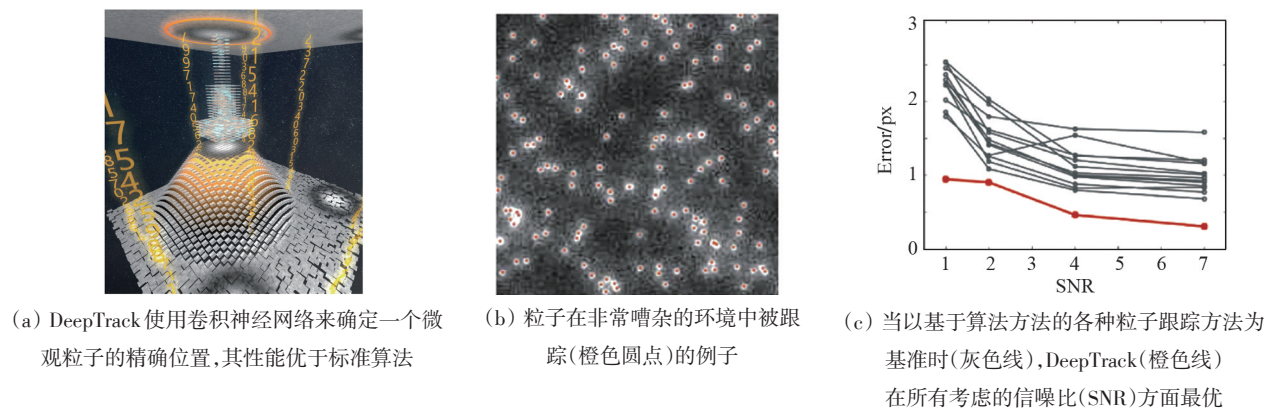


图38 基于卷积神经网络的数据驱动粒子跟踪方法DeepTrack

变化,它可以加速粒子跟踪技术的发展,使其能够在生物医学、生物光子学、物理学、生物学和工程学等领域具有高可靠性的应用。

## 9 结论

美国光学学会《Optics & Photonics News》从91项光学光电子进展中推出了30项热点<sup>[6]</sup>。中国科学院上海光学精密机械研究所中国激光杂志社也推出了2019年中国光学十大进展评选,参选论文有100多篇,涉及到光物理、光学材料与结构、光源、光技术、应用光学、光子学交叉领域6大类<sup>[11]</sup>。本文回顾了2019年光学领域的8个重要研究方向,在过去的一年里,这些方向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] Arute F, Arya K, Babbush R, et al. Quantum supremacy using a programmable superconducting processor[J]. Nature, 2019, 574: 505–511.
- [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. Nordlander, 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] Sio L D, Lloyd P F, Tabiryan N V, et al. Thermoplasmonic activated reverse-mode liquid crystal gratings[J]. ACS Applied Nano Materials, 2019, 2: 3315–3322.
- [6] Optics in 2019[EB/OL]. [2019–12–10]. [https://www.osa-opn.org/home/articles/volume\\_30/december\\_2019/features/optics\\_in\\_2019/](https://www.osa-opn.org/home/articles/volume_30/december_2019/features/optics_in_2019/).
- [7] Zhang M, Wang C, Hu Y W, et al. Electronically programmable photonic molecule[J]. Nature Photonics, 2019, 13: 36–40.
- [8] Wang C, Zhang M, Yu M J, et al. Monolithic lithium niobate photonic circuits for Kerr frequency comb generation and modulation[J]. Nature Communications, 2019, 10: 978–984.
- [9] Yifat Y, Coursault D, Peterson CW, et al. Reactive optical matter: Light-induced motility in electro-dynamically asymmetric nanoscale scatterers[J]. Light: Science & Applications, 2018, 7: 105–112.
- [10] Hu J T, Wang D Q, Bhowmik D, et al. Lattice-resonance metalenses for fully reconfigurable imaging[J]. ACS Nano, 2019, 13(4): 4613–4620.
- [11] 中国光学十大进展[EB/OL]. (2019–12–13)[2019–12–20]. [http://www.opticsjournal.net/Columns/ZGGX?type=ln\\_tj\\_index&year=2019](http://www.opticsjournal.net/Columns/ZGGX?type=ln_tj_index&year=2019).
- [12] Yang Z Q, Kang D, Lu F F, et al. Silica nanocone array as a template for fabricating a plasmon induced hot electron photodetector[J]. Photonics Research, 2019, 7(3): 294–299.
- [13] Huang Q S, Q J, Feng, J T, et al. Realization of wafer-scale nanogratings with sub-50 nm period through vacancy epitaxy[J]. Nature Communications, 2019, 10: 2437–2446.
- [14] Li C, Chen K, Guan M X, et al. Extreme nonlinear strong-field photoemission from carbon nanotubes[J]. Nature Communications, 2019, 10: 4891–4900.
- [15] Danson C, Hillier D, Hopps N, et al. Petawatt class lasers worldwide[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2015, 1: 5–18.
- [16] 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.
- [17] LaserlabEurope. [2019–12–20]. <https://www.laserlab-europe.eu/news-and-press/issue-26>.
- [18] Drescher L, Kornilov O, Witting T, et al. Extreme-ultraviolet refractive optics[J]. Nature, 2018, 564(7734): 91–94.
- [19] Adli E, Ahuja A, Apsimon O, et al. Acceleration of electrons in the plasma wakefield of a proton bunch[J]. Nature, 2018, 561(7723): 363–367.
- [20] Zeng X M, Zhou K N, Zuo Y L, et al. Multi-petawatt laser facility fully based on optical parametric chirped-pulse amplification[J]. Optics Letters, 2017, 42(10): 2014–2017.
- [21] Chu Y X, Gan Z B, Liang X Y, et al. High-energy large-aperture Ti:sapphire amplifier for 5 PW laser pulses[J]. Optics Letters, 2015, 40(21): 5011–5014.
- [22] Fei P, Nie J, Lee J Y, et al. Subvoxel light-sheet micros-

- copy for high-resolution high-throughput volumetric imaging of large biomedical specimens[J]. *Advanced Photonics*, 2019, 1(1): 016002.
- [23] Li Y C, Liu X S, Li B J. Single-cell biomagnifier for optical nanoscopes and nanotweezers[J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8: 61–72.
- [24] Kuai Y, Chen J X, Tang Xi, et al. Label-free surface-sensitive photonic microscopy with high spatial resolution using azimuthal rotation illumination[J]. *Science Advances*, 2019, 5(3): 1–10.
- [25] Zhuang R Z, Wang X J, Ma W B, et al. Highly sensitive X-ray detector made of layered perovskite-like  $(\text{NH}_4)_2\text{Bi}_2\text{I}_8$  single crystal with anisotropic response[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13: 602–608.
- [26] Zhang M, Feng L T, Zhou Z Y, et al. Generation of multiphoton quantum states on silicon[J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8: 41–47.
- [27] Pan X Z, Yu S, Zhou Y F, et al. Orbital-angular-momentum multiplexed continuous-variable entanglement from four-wave mixing in hot atomic vapor[J]. *Physical Review Letters*, 2019, 123(7): 070506.
- [28] Wang S, He D Y, Yin Z Q, et al. Beating the fundamental rate-distance limit in a proof-of-principle quantum key distribution system[J]. *Physical Review X*, 2019, 9: 021046.
- [29] Li Z D, Zhang R, Yin X F, et al. Experimental quantum repeater without quantum memory[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13: 644–648.
- [30] Guerboukha H, Nallappan K, Cao Y, et al. Planar porous components for low-loss terahertz optics[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7: 1900236.
- [31] Li H, Yan M, Wan W J, et al. Graphene-coupled terahertz semiconductor lasers for enhanced passive frequency comb operation[J]. *Advanced Science*, 2019, 6(20): 1900460.
- [32] Zhao Y C, Wang L, Zhang Y X, et al. High-speed efficient terahertz modulation based on tunable collective-individual state conversion within an active 3 nm two-dimensional electron gas metasurface[J]. *Nano Letters*, 2019, 19(11): 7588–7597.
- [33] Zhang F, Zhu Y X, Yang F, et al. Up to single lane 200 G optical interconnects with silicon photonic modulator [C]//2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition. Piscataway, N J: IEEE, 2019.
- [34] Marpaung D, Yao J P, Capmany J. Integrated microwave photonics[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13: 80–90.
- [35] Lin G, Zhang S, Hu Y, et al. Nonreciprocal amplification with four-level hot atoms[J]. *Physical Review Letters*, 2019, 123(3): 033902.
- [36] Gautam R, Xiang Y X, Lamstein J, et al. Optical force-induced nonlinearity and self-guiding of light in human red blood cell suspensions[J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8: 31–39.
- [37] Xin H B, Sim W J, Namgung B, et al. Quantum biological tunnel junction for electron transfer imaging in live cells[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 3245–3255.
- [38] Helgadottir S, Argun A, Volpe G. Digital video microscopy enhanced by deep learning[J]. *Optica*, 2018, 6(4): 506–513.

## Memorable sounds in the optics and photonics in 2019

SHEN Weixing, XIE Xinglong, ZHU Jianqiang\*

National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS., Shanghai 201800, China

**Abstract** Since the birth of laser, optics and photonics have penetrated into all aspects of people's life. This article describes the major progress in the field of optics and photonics in 2019, and draws up eight optical research directions in which the related researches may likely have enormous impact on human existence and way of life in the future.

**Keywords** micronano optics; super high energy laser; imaging technique; terahertz; quantum communication; optical communication; biological photonics; artificial intelligence, optical detection ●



(责任编辑 王志敏)