

2017年光学热点回眸

谢兴龙, 沈卫星, 朱健强

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

摘要 随着激光的诞生, 光学已渗透到人类生活的方方面面。盘点了微纳光学、超强激光、超分辨技术、太赫兹技术、量子计算、激光3D打印、计算光学成像技术、光通信、生物光子学、X射线成像等10个未来可能会对人类生存及生活方式产生巨大影响的光学技术研究领域在2017年的重大进展。

关键词 光学热点; 光学前沿; 微纳光学; 超强激光; 太赫兹

光学是物理学的一个重要分支, 它的研究对象是光的行为和性质。随着激光器的诞生, 产生现代光学; 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。

众所周知, 2017年的诺贝尔奖物理学奖颁给了从事引力波直接测量的3位物理学家, 而他们的测量工作即使用了位于美国华盛顿州和路易斯安那州的两台叫做“LIGO”的激光干涉仪(图1)^[1], 这是一个现代光学和激光技术直接应用的典范。2017年《Nature Photonics》在10周年纪念的特辑中提到了现代光学的10个研究热点^[2], 美国光学学会报道了世界范围内的11个研究热点和31个研究成果^[3], 这些成果与人类的日常生活息息相关、密不可分。这里选取光学领域中的微纳光学、超

强激光、超分辨技术、太赫兹技术、量子计算、激光3D打印、计算光学成像技术、光通信、生物光子学和X射线成像10方面进行简单介绍, 并回顾其近1年来的研究进展。



图1 坐落于Hanford和Livingston的LIGO激光干涉仪

1 微纳光学

微纳光学^[4-6]指利用微结构材料作为光学元件的光学分支。微纳光学的发展得益于20世纪80年代纳米技术的诞生, 由于在航空、航天、军事、生命科学和医疗保健、汽车工业、仿生机器人、家用电器等领域具有巨大应用前景, 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、

收稿日期: 2017-12-26; 修回日期: 2018-01-02

基金项目: 中国科学院国际合作项目(29201631251100101)

作者简介: 谢兴龙, 研究员, 研究方向为超短脉冲激光技术, 电子信箱: xiexl329@mail.shcnc.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.shcnc.ac.cn

引用格式: 谢兴龙, 沈卫星, 朱健强. 2017年光学热点回眸[J]. 科技导报, 2018, 36(1): 18-30; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2018.01.003

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。

2017年,微纳光学一个热门研究方向是表面等离子体光子学^[7-11]研究。表面等离子体是沿导体表面传播的波,当改变金属表面结构时,表面等离子体激元(SPPs)的性质、色散关系、激发模式、耦合效应等都将产生重大变化(图2)^[7]。通过SPPs与光场之间的相互作用,能够实现对光传播的主动操控。随着纳米技术的发展,表面等离子体被广泛研究用于光子学,对它的原理、新颖效应及机制的探究,都极大地吸引研究者的兴趣。除了表面等离子体激元之外,包括光学超晶格、集成光学、近场光学等进展,使得微纳光学在纳米尺度上有了更多的方向和应用;另外负折射材料、突破衍射极限光学、光镊等也都属于微纳光学。

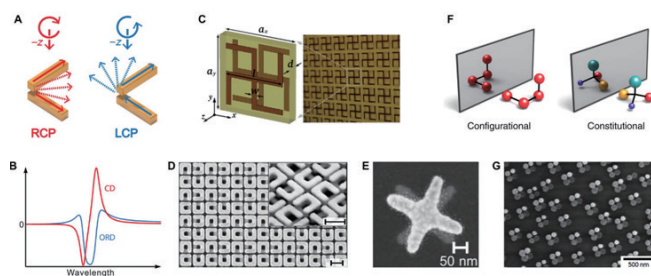


图2 旋转表面等离子激波中由正反两方向旋转的激波所形成的隔离墙

2017年7月报道了在光波导上嵌入光学纳米天线(图3)^[12],其中金纳米棒充当馈电元件的角色,相当于无线电波中的天线;光波导则相当于无线电波中的电缆,可以接收由天线检测到的电磁波。

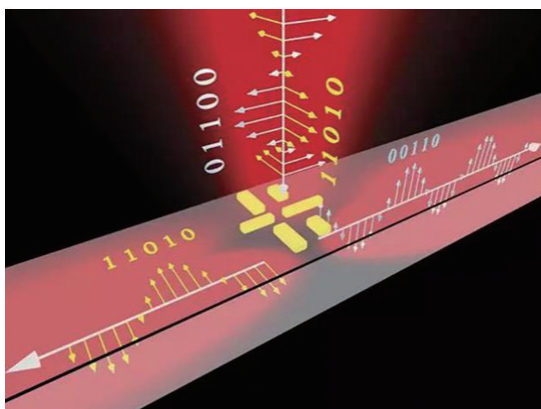


图3 纳米光学天线

与传统天线相比,光学纳米天线首先在维度上是最小尺度,可以达到亚微米级。这样的纳米天线有助于在硅芯片上实现光子元件的高密度集成。事实上,纳米光学天线是基于表面等离子共振的光子器件。由于等离子共振波长要远小于最短的光波,从而使得器件的尺寸要比本身依赖光波的器件要小。

另外,在光子芯片研究中,报道了一种硅光子集成网^[13-14],可以自动配置任意混合的光学光束,而不需要对散射系统有任何预先的了解(图4)^[14]。这种结构集成了6种受热控制的马赫-曾德尔干涉仪,它们是连续的,并且自动地调整,不需要计算,可以同时重构、分离(带有一个小于20 dB的剩余串扰),并将4束光在多模波导中完全混合在一起。通过用不同的导波来控制每个信号,内置的透明探测器监视网络上每一种模式的演变,允许用一个简单的、渐进的算法对每个干涉仪进行调优和自适应的反馈控制。整个网络由定制设计的电子线路控制,在模式混合被严重干扰后自动重新设置,可以在几秒的时间范围内完全重新配置,并可以追踪在几百毫秒的时间尺度上进行的时变混合模式。

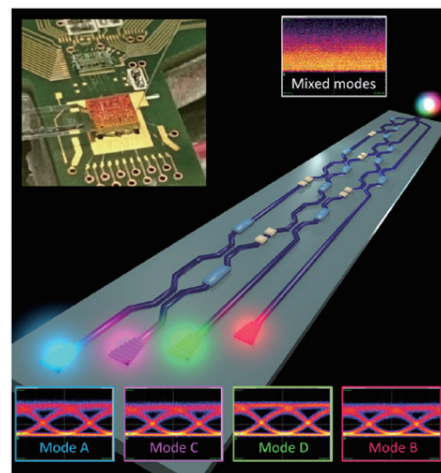
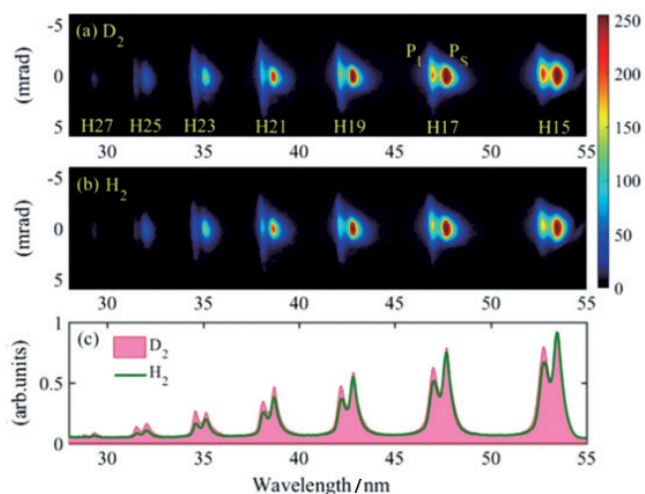


图4 光子芯片

2 超快光学与强激光

超快光学利用超短脉冲激光研究一系列超快现象,其研究的最短尺度已推进到阿秒量级^[15]。阿秒脉冲的研究已从单纯的激光技术研究扩展到激光与物质相互作用领域,首先利用飞秒激光脉冲与物质的非线性过程,产生光谱相干的一系列级次的高次谐波,然后通过物理过程实现脉冲的压缩从而获得阿秒量级的脉冲序列。

2017年7月,《Physics Review Letters》报道了阿秒(10^{-18} s)时间尺度探测分子核动力学的最新研究成果(图5)^[16]。通常高次谐波辐射过程中每半个激光周期内有2条费曼量子路径对谐波辐射产生贡献,根据每条费曼路径的特性,高次谐波的光子频率和辐射时间一一对应,这一特征可用于阿秒时间分辨的测量。基于瞬时相位匹配原理,研究团队成功地在空间和频域上分辨出不同的费曼路径,并建立了不同费曼路径高次谐波的光子频率和时间的一对一映射,从而获得更完整的信息和时间测量范围。超快光学方面的研究还包括超快成像技术,时域宽度是成像的“快门”,飞秒级别的快门可对超快速移动的物体成像(飞秒脉冲的快门时间内,光子的移动距离为微米量级)。



图中为D₂和H₂高次谐波光谱测量结果,对产生的光谱序列进行色散补偿,可以获得阿秒量级的超短脉冲

图5 光谱相干的高次谐波

强激光技术是超快光学研究的另一个方面,目前世界范围内实验室及相关研究机构大大小小的超短脉冲激光系统已达数百台,通常把聚焦峰值功率输出达到 $10^{22}\sim 10^{24}$ W/cm²的系统称之为超强激光系统,这类系统可以为强场物理实验研究及实验室内模拟极端环境下的天体物理条件提供实验手段。这类大型系统也是目前光学领域的一个重要热点。2008年,法国科学家G. Mourou提出建造EW(总功率达到 10^{18} W)激光^[17]之后,国际上先后涌现一些国家实验室,提出和实施了超短超强激光脉冲系统研制计划(图6),这其中具有代表性的有欧洲的Extreme Light Infrastructure (ELI)计

划、法国的APLLION计划、俄罗斯珍珠计划和英国火神的VULCAN2020计划^[18]。



图6 在建的捷克ELI-Beamlines超短脉冲激光系统

(图片来源:2017 ELI summer school, Jaroslav Nejd, ELI-Beamlines Institute of Physics of the ASCR Prague, Czech Republic)

在中国,中国科学院上海光学精密机械研究所(上海光机所)最早开始了设计和建造数拍瓦(10^{15} W, PW)超短脉冲激光系统的计划,经过多年研究,目前在激光技术和系统集成方面已走在世界前列。上海光机所高功率激光物理联合实验室最初为中国科学院和中国工程院联合创建的专门从事高功率固体激光技术研究的实验室,实验室拥有国际上知名的神光-II激光装置(图7)。2014年实验室研制的波长为1053 nm的皮秒拍瓦激光,是国内唯一全方位支撑快点火、质子加速、强辐射源、实验室天体物理和前沿基础等研究的实验平台,突破了大型激光系统中大能量、高峰值功率和高信噪比输出的核心瓶颈问题,综合性能指标达到国际同类装置先进水平。2017年,在激光质子加速物理实验中,研究人员采用400 J/1ps的激光轰击10 μ m厚的靶,获

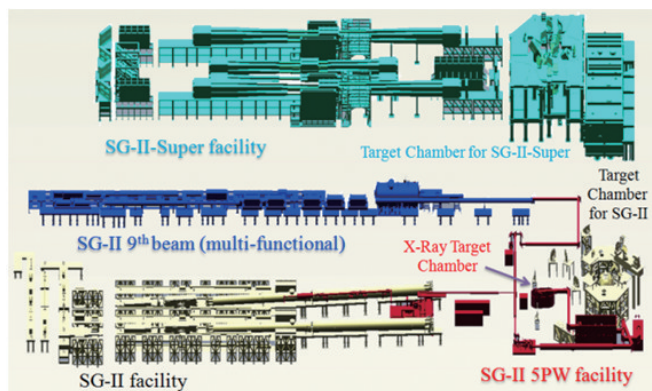


图7 上海光机所神光-II系列装置

(图片来源:上海光机所高功率激光物理联合实验室)

得了超过 50 MeV 的质子能量,靶前超热电子温度达到 5.15 MeV,是目前国际同类激光装置物理实验的最高水平,也进一步表明了神光-II 皮秒拍瓦激光装置的综合性能达到了国际先进水平。同年,实验室的 5 PW 飞秒激光系统在 1.7 PW 输出基础上成功开展了第 1 轮物理实验^[19]。

世界范围内,如果单纯从激光系统的参数方面,已经输出接近 5 PW^[20],但是这些系统离实用还有很多工作要做,包括系统的光束质量控制、信噪比控制、脉冲压缩优化、聚焦特性和元器件的高损伤阈值研究等。

3 超分辨技术

超分辨技术^[21-27]在医学和生命科学领域具有无法替代的作用,它利用低能量的长波长探测光实现分子尺度的高精度探测,与常规的短波长探测相比,可以尽可能地减少对观测对象的破坏,实现活体细胞的实时观测。随着新型荧光分子探针的出现和成像方法的改进,在成像的分辨率方面得到极大改进,达到可以与电子显微镜相媲美的精度,并可以在活细胞上看到纳米尺度的蛋白质。这些技术上的进步势必极大地推动生命科学的发展,增强生物学家对于超分辨率荧光显微成像机理的理解。

为了获得更好成像效果,科学家曾经尝试了许多方法,如使用越来越短的光波,扩大成像系统口径及增加成像系统数值孔径等,发展了一种全新的受激辐射损耗成像技术(STED),成功突破了衍射极限的限制。超分辨的另一项技术是扫描近场光学显微镜技术,在显微镜系统中传统设计损失了很多高频成分的物光波,因此无法突破衍射极限。随着近场光学的发展,科学家逐渐认识到,实际上还有很多高频物光波以“倏逝波”的形式束缚于物体表面,无法进入成像系统。如果有方法可以将这种近场“倏逝波”利用起来,则可实现超分辨成像,扫描近场光学显微镜(SNOM)应运而生。除了上述几类技术之外,超分辨成像领域还有光激活定位显微镜技术(PALM)、随机光学重建显微技术(STORM)、结构光照明技术(SIM)等。

可见光显微镜可以在高的空间分辨率下获得令人惊叹的图像,使用近乎完美的透镜,将光聚焦在比波长小的范围内,到大约 $\lambda/2$ NA 的阿贝极限(NA 是数值孔径)。软 X 射线(SXR)光的波长为可见光波长的 1/100~

1/10,利用软 X 射线可以设计出一种强大的显微镜,可以看到结构足够小或并不透明的结构,而在可见光下看不到。尽管有这些优点,但是,研究深紫外(EUV)和 SXR 显微镜长达 60 年的历史中一直受到两大挑战:缺乏明亮的 EUV/SXR 范围相干源,以及衍射(波带片)X 射线光学形成的图像是受损的、不完美的和极其有限的空间分辨率(约 10λ)。因此,在 2010 年之前,在 SXR 中实现得最好的空间分辨率是大约 12 nm(使用 2 nm 同步加速器),而在实际样品测试时,空间分辨率通常是 25~30 nm。

幸运的是,这些挑战近年来得到解决。现在,可以使用高次谐波(HHG)产生的桌面相干 EUV/SXR 光束。此外,新一代强大的相干-差分成像(CDI)技术正突破传统 X 射线显微镜所施加的分辨率限制,用强大的迭代相位检索算法取代有损的 X 射线和不完美的 X 射线光学方法。特别是一种叫做叠层成像的 CDI 技术近年来取得非凡成果。在叠层成像技术中,收集邻域和重叠区域的散射图样,并得到衍射数据的冗余,使图像重建具有精细的相位对比度。最近研究工作已经扩展了叠层成像技术,演示了在短波长下的第 1 个亚波长分辨率成像。研究人员获得了 1 个扩展样本的高质量成像,空间分辨率为 0.9 λ ,同时也展示了对近周期物体的高保真、全场、定量成像(图 8)^[28]。在这项工作中使用的 13.5 nm 波长和能够可靠地对近周期物体成像的能力在技术上与下一代的 EUV 光刻、纳米电子学、数据存储和自我组装的纳米结构及纳米增强设备的功能性成像技术都有很大关系。此外,由于 HHG 产生时间极短的光(约为 10^{-15} s),它也可以用来制作频闪观影的电影,以观察纳米世界的运作方式。

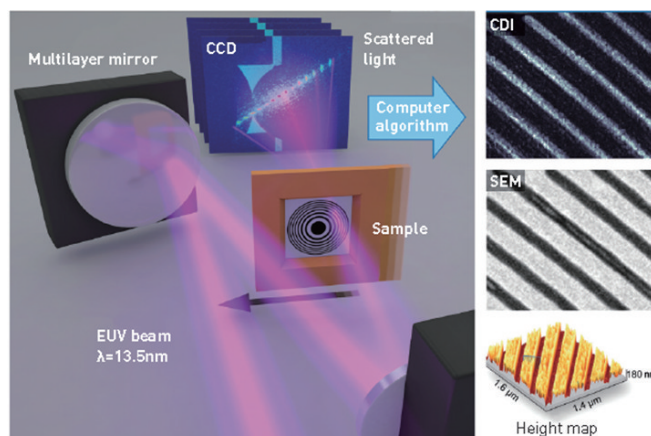


图8 扫描电子(SEM)显微镜图像、相干无透镜衍射软 X 射线图像(CDI)及样品的高度示意

光学显微镜,也许是生物医学研究中最重要工具,由于光散射,目前只能在几百微米的组织内成像。所有能超越这些深度的技术都将受到低分辨率的影响。在这些方面,深度组织光学成像的主要方法是光声成像,在这种成像中,由于光吸收而产生的超声波被用来形成深层结构的图像。然而,在超过1 mm的深度,声衍射限制了光声成像的分辨率,至多是比光衍射极限的数量级要差。

最近一项研究证明了传统的声衍射极限可以通过将动态光斑照明与基于压缩传感的先进计算重建算法相结合。超分辨率解决方案基于2个来源:第1个是由动态散光照明引起的不相关的光声信号波动,这类类似于荧光显微镜下超分辨率光学波动成像(SOFI)的荧光波动^[29];第2个来自于一个压缩传感重建框架。已证明在(未知的)斑点照明模式和非负性结构上的光斑的基础上,利用固有的先验性,使其在成像保真度和捕获时间的大幅减少中获得可观的增长,而光斑的波动是不可能的。这项研究成果可能为以前不可能实现的对深埋结构的光学研究开辟了道路。

图9中脉冲激光随时间变化产生未知的随机散斑模式照亮目标^[28],对于每个散斑模式,从样品吸收部分的光声产生的超声波均由1个线性换能器阵列记录下来。图9下方分别列示了目标对象(左)、传统的光声学(中)获得的图像以及使用上述超分辨率方法获得的图像(右),其中下面的背景是数值分析结果,前景是实验测得图像。

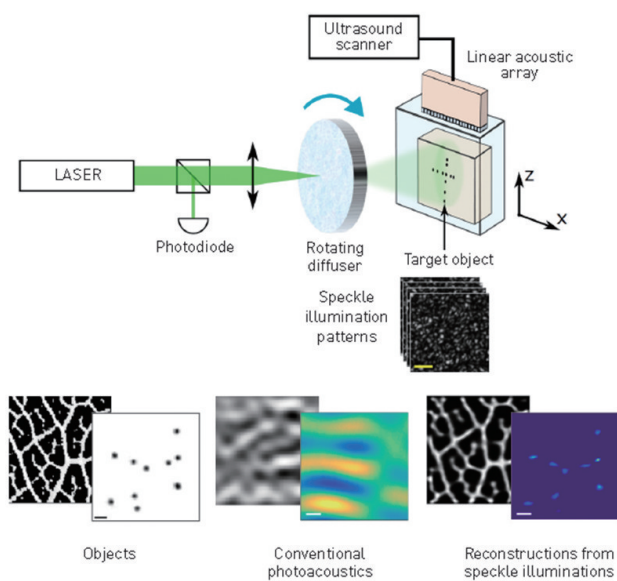


图9 超分辨率光声光谱技术实验设置与数据

4 量子计算

量子计算^[30-33]中的光子计算机是一个重要方向。利用光子是玻色子而电子是费米子、光子不带电荷而电子带电荷等特性,有望打破电子计算机的电子速度瓶颈,并可实现高密通道以及超高集成度(量子点激光器甚至可以小到0.1 μm)。2017年的新进展是玻色子采样量子计算机(Boson sampling on a photonic chip)^[31]。量子计算机比传统计算机对外部干扰要敏感得多,因此,创造稳定的量子门,即量子计算机的基本切换系统,成为科学家的主要目标。

利用单个硅电子的电子自旋作为量子位(即基本的信息存储单元),研究人员创造了稳定的量子门,可以精确控制和读取2个量子位的相互作用(图10)^[31]。量子门作为量子计算机的基本元素,能够执行量子计算机所有必要的基本操作。这项研究成果被称为通向量子计算机的里程碑^[30-31]。

该研究的第1个成就是从硅片的数十亿个原子中提取单个电子,利用电磁吸引力和斥力的组合,将单个电子分离出来,然后精确地排列,让每个电子嵌入1个“槽”中,使其处于一种稳定状态。接下来的挑战是开发1个可以控制每个电子自旋脉冲的系统。一种方法是:每个电子都置于1个纳米电极上,通过所谓的磁场梯度,创建1个定位磁场,用其控制电子的旋转脉冲,由此创造稳定的1个量子位系统,以电子自旋形式存储和读出信息。

但仅有1个量子位还不足以构成量子计算机的基本切换系统,必须要有2个量子位。这项研究的决定性一步是康斯坦茨大学研究人员将2个电子的状态耦合在一起,形成双量子位系统。通过这种结合,可以构建基本的切换系统,利用它可以执行量子计算机的所有基本操作,例如,可以对系统进行编程,使得电子只有当其相邻电子在预定方向上具有自旋时才旋转。下一步,康斯坦茨大学的科学家还将建立一个稳定的系统来控制2个单电子的旋转。

谷歌、IBM等世界级公司和全球大型科研中心加入了量子计算的竞赛,其目标是制造性能为普通计算机百万倍的量子计算机。量子计算机是有必要的,因为当代计算机的潜力几乎已经耗尽。人类进入物联网时代,所有一切都将接入全球网络,而控制这些设备需要新一代计算机。10万个量子比特的系统将会通过搭建

准确的分子模型,从而颠覆材料、化学和制药行业。谷歌公司宣称,它研制的D-Wave量子计算机运算速度是普通计算机的1亿倍。虽然这种机器还不能用于日常生活,但这将成为一个转折点。

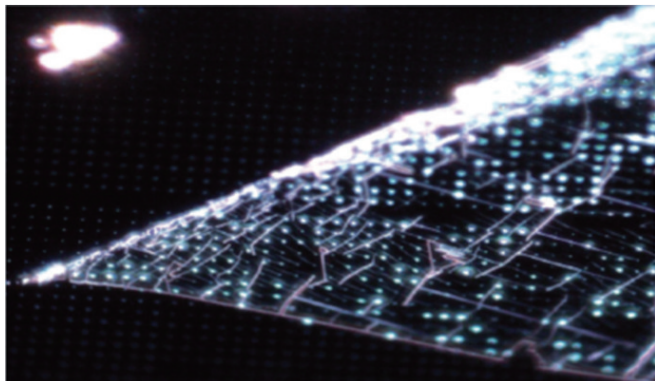


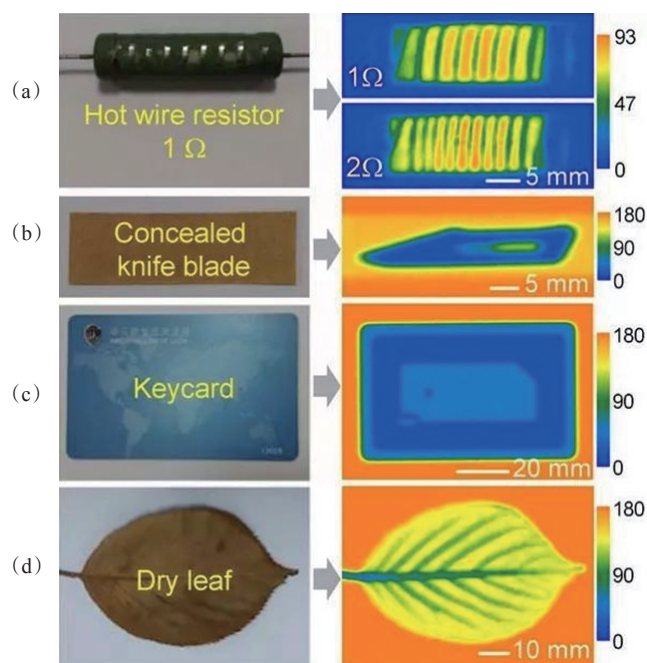
图10 量子计算机的基本单位——量子门

5 太赫兹技术

太赫兹(电磁波谱在0.1~10 THz的远红外区域)光学^[34]是补全光谱的最后一块短板。稳定高能的太赫兹光源的实现,填补了微波和红外光之间的光谱窗口。太赫兹频带有巨大发展前景的原因为:1)许多分子在此频带处具有结构吸收共振,使得太赫兹光谱成为研究物质的独特工具。2)太赫兹范围是高频电子产品运行的极限频率。3)太赫兹波的振荡周期对应于元素化学反应的时间尺度、固体中的弱集体激发、声子的弛豫时间和自由载流子的碰撞时间,因此太赫兹科学有机会实现直接影响我们生活的技术,如工业质量控制、国家安全和环境研究及医学诊断和治疗。太赫兹技术是21世纪重大的新兴科学技术领域之一。

2017年4月,中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所、中国科学院纳米器件与应用重点实验室公布了能够在液氮温度下灵敏探测太赫兹波黑体辐射的氮化镓基高电子迁移率晶体管探测器研究结果,首次直接验证了天线耦合的场效应晶体管可用于非相干太赫兹波的灵敏探测^[35]。对非相干太赫兹波的灵敏探测的实现表明,场效应晶体管太赫兹探测器将能够在太赫兹波人体安检、无损检测和大气环境检测等主、被动成像与探测等应用中发挥作用(图11)^[35]。研究人员公布了3个频段的高灵敏度太赫兹探测器,探测器采用Al-GaN/GaN异质结二维电子气材料和偶极天线设计,中心响应频率分别在0.34、0.65和0.90 THz,室温下的噪声等效功率约为 $30 \times 10^{-12} \text{ W/Hz}^{1/2}$ 。在液氮温度(-

196℃)下的噪声等效功率下降至 $1 \times 10^{-12} \text{ W/Hz}^{1/2}$,使黑体太赫兹波的探测成为可能。场效应晶体管对非相干太赫兹波的响应能力表明,其探测机制属于一种电子学的棘轮效应(Ratchet effect),揭示了在场效应结构中由无规热涨落产生定向太赫兹光电流响应的丰富物理内涵,为建立更加准确的探测模型和高灵敏度探测器的开发指明了方向。



(a)为发热电阻的直接扫描成像;(b)~(d)分别为在发热电阻产生的非相干太赫兹波辐照下对手术刀片、门禁卡和树叶的扫描透视成像
图11 中心响应频率为900 GHz的AlGaN/GaN高电子迁移率晶体管太赫兹探测器的成像演示效果

2017年10月,瑞典研究人员开发出首个具有机械柔性的石墨烯基太赫兹探测器^[36]。这项研究为柔性太赫兹电子设备铺平了道路,有助于将太赫兹技术拓展用于无线传感器网络和可穿戴技术。该探测器具有独一无二的特征。在室温条件下,它可检测的频率范围为330~500 GHz。它是半透明且柔性的(图12)^[36],可用于太赫兹领域的成像(太赫兹摄像头)、分辨不同的物质(传感器);可惠及卫生保健,如使用太赫兹波检查癌症;还可用于车辆使用的图像传感器或无线通信系统。

太赫兹辐射微波在可见光和微波频谱带之间,在医学和工业成像和化学检测等领域有着广阔的应用前景。美国和加拿大的研究人员在实验室中研究了一种新的设计,使基于芯片的太赫兹激光器输出功率提高80%。研究人员的设计是一种新的变形,称为量子级联



图12 新型石墨烯基柔性太赫兹探测器

激光器,具有分布式反馈,使它具有最佳的太赫兹性能(图13)^[37]。

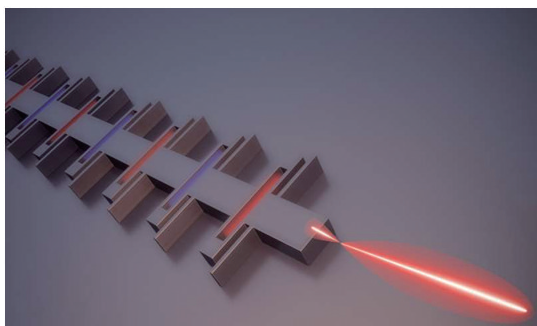


图13 可用于成像或化学检测的微型太赫兹激光器

作为表现最好的基于芯片的太赫兹源,这个报道尚属首次。研究人员发明的这种设备已被选定为美国国家航空航天局的银河系/外太赫兹辐射源。美国国家航空航天局的此任务目的是确定星际介质组成,或者探寻填充恒星间空间的物质,使用太赫兹射线因为它们非常适合于氧浓度的光谱测量。由于该任务将把装有仪器的气球部署到地球高层大气中,所以太赫兹发射器需要轻量化。

哈佛大学工程与应用科学学院(SEAS)的研究人员正在探索使用红外频率梳来产生难以捉摸的太赫兹频率的可能性。这些频率——位于无线电波和红外线之间的电磁波谱中——长期以来一直承诺改变通信和传感,通过利用最近发现的激光状态,SEAS研究人员在量子级联激光器中发现了一种红外频率梳,为产生太赫兹频率提供了一种新的方法^[38]。

为了实现高分辨率的太赫兹成像,研究人员使用了一种数字微型镜面设备,在硅晶片上利用激光驱动形成一个特定的模式。当太赫兹光束通过晶片时,计

算机可以根据所探测到的太赫兹光的图案重建物体的图像。图14为即测试目标的光学图像(黄金图样)在6 mm厚的硅晶片上的成像^[39]。研究人员阐述了太赫兹成像近场的方法,这种技术的空间分辨率可以达到约9 μm ,并可与压缩感知和自适应成像算法相结合,可比传统技术兼容的图像采集技术快3倍。使新的方法变得可能的主要创新是数字微镜器件(DMD),一种微型镜子阵列,并且每个都被计算机控制。研究人员使用数字微镜器件驱动800 nm的光在硅晶片上,使晶片在800 nm光撞击下让硅对太赫兹光不透明。这意味着,当太赫兹光束通过晶片时,它在晶片的另一侧产生1个图案化的太赫兹光束,然后可以与被成像的物体相互作用。由于数字微镜器件所创建的图案是已知的,计算机可以基于所检测到的太赫兹光重建对象的图像。由于近场太赫兹成像方法通常受到缓慢的捕获速度的困扰,研究人员设计的方法与压缩感知和自适应采样算法兼容,从而提高了成像速度。

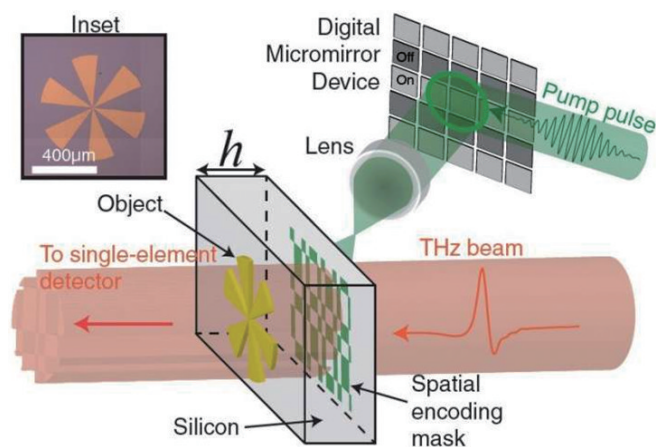


图14 太赫兹成像

6 X射线成像

由于X射线的波长比可见光短得多,利用它成像可以达到的理论分辨率要比可见光高几个量级;另外,X射线具有很强的穿透性,可以对非透明的厚样品内部结构进行无损成像,这在医疗诊断等无损检测领域有很好应用。X射线医疗影像技术及其他相关X射线成像技术^[40-43]迅速地发展起来,已成为医学、生物学及材料科学中不可或缺的诊断工具。

随着第3代同步辐射(SR)光源的广泛使用,X射线光源的特性得到极大改善,这不仅使传统的成像方

法得到显著改善,而且为新的 X 射线成像方法的诞生创造了条件。SR 丰富了 X 射线成像的衬度机制,除传统的吸收衬度外,还有相位衬度、化学衬度、元素衬度、磁二色衬度等,大幅拓展了 X 射线成像的应用领域,如生物医学、考古、地球物理、纳米科学和电子工业等。基于相位衬度的相衬成像方法主要有干涉法、衍射增强法、光栅微分法和同轴法,他们测定的信息分别为相位、相位一阶微分、相位一阶微分和相位二阶微分(拉普拉斯变化)。对于弱吸收样品,相衬成像方法能获得比传统吸收成像高很多的衬度,而且基于相衬成像方法的定量信息提取技术也得到广泛的研究。第3代同步辐射的高亮度和高相干性,使得动态研究成为可能。

另一个重要成像手段显微断层成像(μ CT)也得到飞速的发展,三维空间分辨率可达微米乃至纳米量级。SR- μ CT 由于同步辐射光源具有高单色性,能消除普通 X 光管 CT 的射线硬化效应,更精确地定量重建出样品的线性吸收系数;同时能在高分辨率下实现高速数据采集等。第3代同步辐射的插入件辐射是目前 SR- μ CT 的理想光源,单色 X 射线的使用还有助于消除赝像,同时减小样品的辐射剂量,这对生物医学样品研究显得尤为重要。SR- μ CT 现已成为中能或高能第3代同步辐射装置上的重点发展技术,近年来高时间分辨的 SR- μ CT 也得到广泛关注。X 射线成像已成为同步辐射领域的一项主流技术,国际上目前建成了近 50 座同步辐射源,如美国的 ALS、APS,日本 Spring8,欧洲的 ESRF、SLS 和国内北京光源、合肥同步辐射和上海光源等(图 15),它们都建有专门的用于 X 射线成像的线站。



图 15 上海同步辐射装置

(图片来源:中国科学院上海应用物理研究所)

未来一个很重要的目标是发展“桌面”紧凑型 X 射线自由电子激光器,以满足学术和工业领域对 X 射线自由电子激光器的巨大使用需求。这些方案的主要挑战之一是开发先进的高功率激光器。这些激光器还可用于现有的 X 射线自由电子激光器和同步辐射光源,以改善纵向相干性或增强输出功率。另一个挑战是设计极窄带宽的、在毫电子伏特范围内的、非常高重复频率的 X 射线自由电子激光器光源。这种类型的 X 射线自由电子激光器光源方案,作为后衍射极限同步辐射源,可能成为一个有前途的研究方向。

7 光学通信

光纤是全球互联网通信的支柱^[44]。目前,每天有超过 300 万兆字节的互联网流量通过光纤传输,到 2021 年,由于人类基本的交流意愿,总数据需求可能会增加 3 倍。要实现这一增长,就需要新技术来提高非晶态光纤的容量。其中一种技术是空间分割多路复用,在光纤的横截面中使用不同的数据通道来增加容量。这可能涉及多核纤维、少模纤维,或两者的结合。然而,要解决这种纤维的个别模式,直到最近还不可能采用紧凑的集成技术。

2017 年报道了先进的集成多路复用器,可用于空间分割多路复用,以选择性地解决不同的核心和模式(图 16)^[45]。在使用的制造技术中,超快激光刻写,激光脉冲在玻璃芯片内产生永久的折射指数变化。通过激光光束的聚焦将玻璃芯片转化为三维波导。

接近制造的第三维,对于多路复用光纤的模式和核心是非常重要的。在硼铝硅玻璃芯片中制造的设备包括一种紧凑模式多路复用器,它能处理 12 种模式的三模、四芯光纤,有 20 dB 的衰减率和 1.8 dB 的插入损耗,平均而言,超过了 S+C+L 波段(1460~1625 nm)。这些紧凑的集成设备代替了笨重的自由空间光学系统,通常用于激励这种光纤密集核心的个别模式。

通过扩展到更多的核心和更多的模式,多模、多核纤维有潜力使光纤的容量增加 2 个数量级。之前已经实现的其他设备包括多路复用器,可以在掺铒光纤放大器泵浦带上运行。这些设备可以在长途网络中进行模式放大。在追求实用的空间分复用技术以提高互联网数据速度的过程中,诸如此类的小型超快激光写入技术提供了一项潜在的重要技术手段。

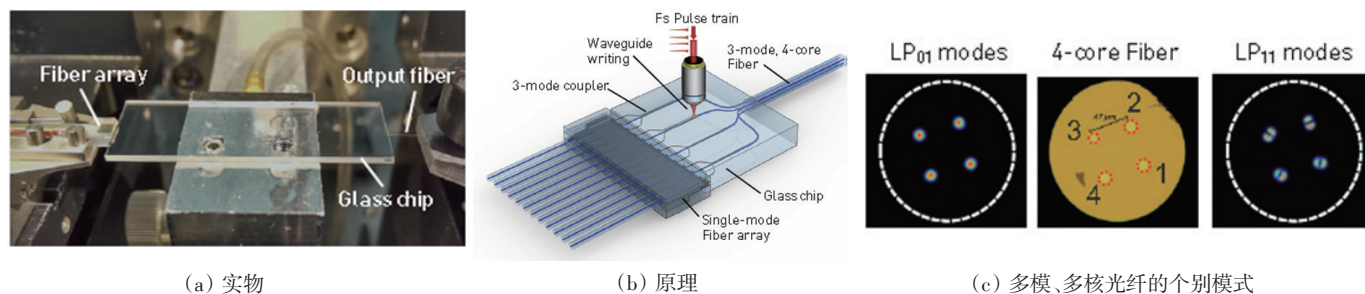


图 16 超快激光多路复用器

8 生物光子学

理解与活细胞与光的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,并有助于生物光学、光流体和软物质物理的深刻理解。然而迄今为止,还没有真正研究过生物介质的非线性响应。事实上,人们普遍认为光不能深入到生物环境中,因为这些环境的强散射和吸收损耗以及弱的光学非线性^[46-47]。

最新的研究发现在微生物中存在一种显著的非线性反应,包括强健的自我捕获和通过一种生物悬于海洋细菌的生物悬架上的光束的传输(图 17)^[47]。在同样的研究中,也观察到类似的非线性效应,包括其他类型的活细胞和人类的红细胞。通过故意改变蓝细菌的宿主环境,发现了一个与光传播相关的非线性动力学的变化的戏剧性结果,值得注意的是,微生物在这一过程中仍然存活。

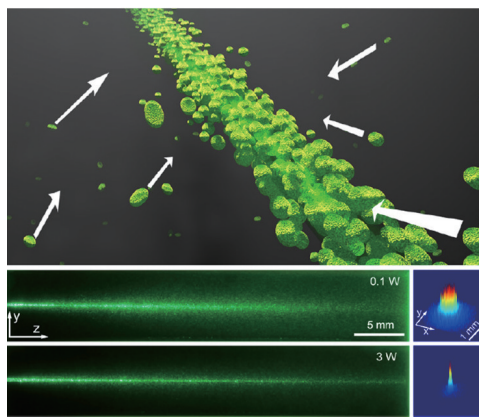


图 17 由光束所吸引的细菌,形成了一种有效的波导管

研究发现,细胞能够在高功率水平下存活,并能生成波导,这在医学和生物学上都是很有趣的应用。具有可调光非线性的生物软质系统、生物悬架的光通道及通过生物流体进行非线性成像的可能性只有少数几个例子。

9 激光微纳 3D 打印

3D 打印(three dimensional printing, 3DP)是一种快速成型技术^[48-52],它是以数字模型文件为基础,运用可粘合材料,通过逐层打印的方式来构造物体的技术。学术上也称为添加制造、增材制造或增量制造(additive manufacturing, AM)。

近年国内外研究人员已开发出多种类型微纳尺度 3D 打印工艺、打印材料(聚合物、金属、陶瓷、生物材料、复合材料等)和装备,并应用于多个领域和行业。其中激光微纳 3D 打印技术的发展引人注目,比较有代表性的技术有立体光固化成型(stereolithography)、选择性激光烧结(selective laser sintering)和双光子聚合(two-photon polymerization)。立体光固化成型和选择性激光烧结皆为 20 世纪 80 年代发明的 3D 打印技术,经过不断改进,加工精度皆达到微米尺度,已经接近光束的衍射极限。随着激光器功率的增加,使得双光子吸收这一三阶非线性过程容易发生,双光子聚合应运而生。得益于双光子吸收的特点,双光子聚合可以突破衍射极限,直接制备 3D 结构。目前的特征尺寸优于 25 nm,小于激光波长的 1/50,是唯一达到纳米精度的激光 3D 打印技术。

目前 3D 打印主流材料主要为金属、树脂、塑料和陶瓷等。玻璃材料仍处于研究阶段。日渐壮大的产品线是时下 3D 打印行业最好的标志:其产品涵盖了从人体器官到超级跑车等诸多“大件”。2017 年 7 月一项研究表明^[47],科学家将目光投向了另一个方向——“小”。研究人员利用 3D 打印技术,在一枚芯片上打印了许多不同的镜头,这些镜头的尺寸还赶不上人类头发的直径。研究人员认为,这样的微型摄像机将可以完美地应用于微型及小型无人机上(图 18)^[50]。

如何在几秒钟内创建复杂的 3D 打印物体,而不是几小时或几天? 研究人员开发出一种使用全息图激光

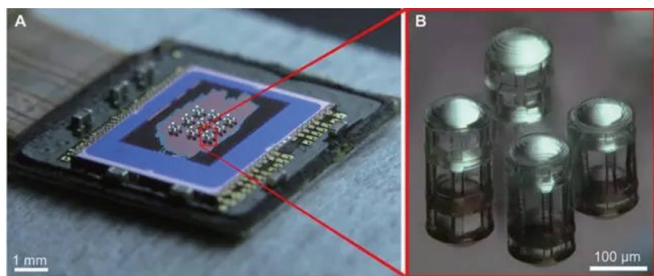


图18 3D打印微透镜

器在液体树脂罐内几秒钟内制造完整物体的技术,称为立体3D打印,该工艺克服了传统增材制造的许多限制,可以在几秒钟内创建出3D打印物体^[52]。

10 计算光学成像技术

计算光学成像^[53-54](computational photography)是利用光学技术和图像信号数字处理技术来实现更高性能的光学成像质量的新学科,近年来该学科发展迅速,是公认的新一代光学成像技术。当前最有应用前景的技术包括景深延拓(extension of depth of field, EDoF)技术、光圈景深联合延拓(extension of iris and depth of field, EIDOF)技术、色彩高保真(Accucolor)技术、Magixoom技术和TyIQ:像质提升技术。

EDoF技术是利用计算光学原理实现景深延拓的一种数字光学成像技术。EDoF简单说来就是用数字技术模拟光学的对焦系统,用特制的镜头通过特殊的相位掩模板对图像进行编码产生编码中间像,再通过解码对中间像进行解码,最终得到清晰的大景深图像。EDoF技术不同于传统的光学成像,在光学镜头中应用对称波前编码技术,通过信息处理的方法实现解码,获得大景深图像。EIDOF技术是利用计算光学成像的原理实现光圈景深联合延拓的光学成像技术。EIDOF以光学和信息技术相结合,通过对光信息进行编码,再用计算机技术解码,使得光学系统的光圈和景深都得到扩展,从而在增大光圈、提高光通量的前提下使景深得到扩展,解决了大光圈和大景深同时实现的矛盾;Accucolor技术是一种光学成像颜色复原技术,具有颜色保真度高、颜色复原不依赖于场景、高亮颜色真实的优势,是替代自动白平衡(AWB)的新一代颜色复原技术。Accucolor提供全新一代白平衡处理算法,具有更好的数码成像颜色复原效果。Accucolor、Accushape(形状保真)及Acculuma(亮度保真)在高品质成像和显示

应用中可以有广泛的应用;Magixoom技术是利用现代计算光学技术的原理,来实现具有超强的光学图像信息获取能力的、具有复眼结构的新概念光学成像技术。Magixoom技术具有实现看得宽、远、清的特点,即具备广角和特写兼备、动态细节长时间跟拍的新体验。和传统单眼成像技术相比,Magixoom技术具有领先一代的原理、性能、性价比,是高性能光电成像技术的发展方向。TyIQ:像质提升技术是基于对光学成像机理的理解和新的成像规律发现和利用以提升成像信噪比,并结合已有的技术成果和技术手段开发出的图像像质提升技术。其本质是用软件提升镜头分辨率的技术,使图像更清晰通透。

2017年研究人员开发了一种基于Freund的强度-相关性技术的替代成像系统,它允许在散射介质中使用记忆效应的物体成像^[55]。具体来说,提出了一种新的成像设备“散光板显微镜”,在这种设备中,传统的物镜透镜被一个简单的散射板所取代。实验表明,这种方法可以将一个本质上没有成本的散射表面变成一个高分辨率的显微镜物镜。散光板显微镜有几个独特的特征,它非常薄和轻便,适合低成本的生产 and 可扩展的设备尺寸;它还具有可变焦距和放大率,并且对任何共轭图像平面都是自适应的。它具有可变的数值孔径(NA)和视野(FOV)以及灵活的可扩展的工作距离。它与反射和传输模式的成像兼容,并且可避免相位干扰和畸变。相对较宽的FOV和可变DOF是该技术的专有特性,基于交叉修正的方法,加上一个参考点源,能够对复杂的物体成像,很容易就能得到 $2.19\ \mu\text{m}$ 的分辨率。可以认为,在可见光波段的工作为X射线和紫外线波长的散射板成像提供了可能。

随着信息处理能力的增强,能够创造出体验更好、性能更高、成本更低的计算光学技术和产品会越来越多,计算光学成像技术未来会成为新一代的光学成像技术,并进一步促进光电成像行业的发展。

11 结论

光学领域的热点还有很多,篇幅所限不能一一回顾。可以预见的是:在不远的将来,现代光学将会渗透到人们生活的方方面面,微纳光学将会产生芯片级的功能完备元器件,这将会促进精细加工技术和人类穿戴设备的更新换代;超快光学成像技术、超分辨技术、

生物光子学、X射线成像等在生物医学领域的进展,将极大促进医疗诊断能力的飞速提升;超强激光所创造的得天独厚的极强光场,也为未来医治威胁人类生命的肿瘤疾病提供了可能的手段;量子计算机将超越目前最快的计算机的运算速度;太赫兹技术将在军事以及安全探测领域时时刻刻显示出自己的魅力;3D打印将颠覆性的改变人类的加工和制造方式;新型光通信技术和器件的发展,将使人类直接沟通变得更加快捷和便利。

参考文献(References)

- [1] Courtesy Caltech/MIT/LIGO Laboratory. Virgo detector[EB/OL]. [2017-12-10]. <https://www.ligo.caltech.edu/>.
- [2] Nature photonics[EB/OL]. (2017-01-03)[2017-12-10]. <https://www.nature.com/nphoton/volumes/11/issues/1>.
- [3] Optics in 2017[EB/OL]. (2017-12-01)[2017-12-10]. https://www.osa-opn.org/home/articles/volume_28/december_2017/features/optics_in_2017/.
- [4] Stockman M I. Nanoplasmonics: Past, present, and glimpse into future[J]. Optics Express, 2011, 19(22): 22029-22106.
- [5] Halas N J, Lal S, Chang W S, et al. Plasmons in strongly coupled metallic nanostructures[J]. Chemical Reviews, 2011, 111(6): 3913-3961.
- [6] Valev V K, Baumberg J J, Sibilica C, et al. Chirality and chiroptical effects in plasmonic nanostructures: Fundamentals, recent progress, and outlook[J]. Advanced Materials, 2013, 25(18): 2517-2534.
- [7] Hentschel M, Schäferling M, Duan X, et al. Chiral plasmonics [J]. Science Advances, 2017, 3(5): e1602735.
- [8] Bai F, Deng J, Yang M, et al. Two chiroptical modes of silver-nanospirals[J]. Nanotechnology 2016, 27(11): 115703.
- [9] Gorkunov M V, Ezhov A A, Artemov V V, et al. Extreme optical activity and circular dichroism of chiral metal hole arrays[J]. Applied Physics Letters, 2014, 104(22): 221102.
- [10] Höflich K, Yang R B, Berger A, et al. The direct writing of plasmonic gold nanostructures by electron-beam-induced deposition[J]. Advanced Materials, 2011, 23(22/23): 2657-2661.
- [11] Esposito M, Tasco V, Cuscunà M, et al. Nanoscale 3D chiral plasmonic helices with circular dichroism at visible frequencies[J]. ACS Photonics, 2015, 2(1): 105-114.
- [12] Johnson D. For first time, on-chip nanoantennas enable high-bit-rate transmission[EB/OL]. [2017-07-19]. <https://spectrum.ieee.org/nanoclast/semiconductors/devices/for-first-time-on-chip-nanoantennas-enable-highbit-rate-transmission>.
- [13] Annoni A, Guglielmi E, Carminati M, et al. Unscrambling light—automatically undoing strong mixing between modes[J]. Light: Science & Applications, 2017(6): 1-10.
- [14] Morichetti F, Grillanda S, Melloni A. Breakthroughs in photonics 2013: Toward feedback-controlled integrated photonics[J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(2): 0701306.
- [15] Drescher M, Hentschel M, Kienberger R, et al. X-ray pulses approaching the attosecond frontier[J]. Science, 2001, 291(5510): 1923-1927.
- [16] Lan P F, Ruhmann M, He L X, et al. Attosecond probing of nuclear dynamics with trajectory-resolved high-harmonic spectroscopy[J]. Physical Review Letters, 2017, 119(3): 033201.
- [17] Labaune C, Hulin D, Galvanauskas A, et al. On the feasibility of a fiber-based inertial fusion laser driver[J]. Optics Communications, 2008, 281(15/16): 4075-4080.
- [18] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Opportunities in intense ultrafast lasers: Reaching for the brightest light[M]. Washington D C: The National Academies Press, 2017: E17-E20.
- [19] Zhu J Q, Xie X L, Yang Q W, et al. Introduction to SG-II 5 PW laser facility[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics. Piscataway, NJ: IEEE, 2016: 1-2.
- [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] 吕志坚, 陆敬泽, 吴雅琼, 等. 几种超分辨率荧光显微技术的原理和近期进展[J]. 生物化学与生物物理进展, 2009, 36(12): 1626-1634.
Lü Zhijian, Lu Jingze, Wu Yaqiong, et al. Introduction to theories of several super-resolution fluorescence microscopy methods and recent advance in the field[J]. Progress in Biochemistry & Biophysics, 2009, 36(12): 1626-1634.
- [22] Fang N, Lee H, Sun C, et al. Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens[J]. Science, 2005, 308(5721): 534-537.
- [23] Gao H, Pu M, Li X, et al. Super-resolution imaging with a Bessel lens realized by a geometric metasurface[J]. Optics Express, 2017, 25(12): 13933-13943.
- [24] Luo X, Ishihara T. Surface plasmon resonant interference nanolithography technique[J]. Applied Physics Letters, 2004, 84(23): 4780-4782.
- [25] Hojman E, Chaigne T, Solomon O, et al. Photoacoustic imaging beyond the acoustic diffraction-limit with dynamic speck-

- le illumination and sparse joint support recovery[J]. *Optics Express*, 2017, 25(5): 4875–4886.
- [26] Chaigne T, Gateau J, Allain M, et al. Super-resolution photoacoustic fluctuation imaging with multiple speckle illumination [J]. *Optica*, 2016, 3(1): 54–57.
- [27] Dertinger T, Colyer R, Iyer G, et al. Fast, background-free, 3D super-resolution optical fluctuation imaging(SOFI)[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(52): 22287–22292.
- [28] Gardner D F, Tanksalvala M, Shanblatt E R, et al. Subwavelength coherent imaging of periodic samples using a 13.5 nm tabletop high-harmonic light source[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(4): 259–263.
- [29] Hojman E, Chaigne T, Solomon O, et al. Photoacoustic imaging beyond the acoustic diffraction-limit with dynamic speckle illumination and sparse joint support recovery[J]. *Optics Express*, 2017, 25(5): 4875–4886.
- [30] Palacios-Berraquero C, Barbone M, Kara D M, et al. Atomically thin quantum light-emitting diodes[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 12978.
- [31] Palacios-Berraquero C, Kara D M, Montblanch A R, et al. Large-scale quantum-emitter arrays in atomically thin semiconductors[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 15093.
- [32] Wang H, He Y, Li Y H, et al. High-efficiency multiphoton boson sampling[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(6): 361–365.
- [33] Hamilton C S, Kruse R, Sansoni L, et al. Gaussian Boson Sampling[C]//*Conference on Lasers and Electro-Optics*. Washington D C: Optical Society of America, 2017: FTu1F.2.
- [34] Zhang X C, Shkurinov A, Zhang Y. Extreme terahertz science [J]. *Nature Photonics*, 2017: 16–18.
- [35] Qin H, Li X, Sun J, et al. Detection of incoherent broadband terahertz light using antenna-coupled high-electron-mobility field-effect transistors[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(17): R161.
- [36] Stake J. Graphene enables high-speed electronics on flexible materials[EB/OL]. (2017-10-31)[2017-12-10]. http://www.mynewsdesk.com/uk/chalmers/pressreleases/graphene-enables-high-speed-electronics-on-flexible-materials-2241525?utm_source=rss&utm_medium=rss&utm_campaign=Subscription&utm_content=pressrelease.
- [37] Hardesty L. Tiny terahertz laser could be used for imaging, chemical detection[EB/OL]. (2017-8-8)[2017-12-10]. <https://phys.org/news/2017-08-tiny-terahertz-laser-imaging-chemical.html>.
- [38] Kazakov D, Piccardo M, Wang Y R, et al. Self-starting harmonic frequency comb generation in a quantum cascade laser [J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(12): 789–792.
- [39] New terahertz imaging approach could speed up skin cancer detection[EB/OL]. (2017-8-17)[2017-12-10]. <https://phys.org/news/2017-08-terahertz-imaging-approach-skin-cancer.html>.
- [40] Yabashi M, Tanaka H. The next ten years of X-ray science [J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(1): 12–14.
- [41] Holler M, Guizarscairos M, Tsai E H, et al. High-resolution non-destructive three-dimensional imaging of integrated circuits[J]. *Nature*, 2017, 543(7645): 402–406.
- [42] 3-D X-ray imaging makes the finest details of a computer chip visible[EB/OL]. (2017-03-16)[2017-12-10]. <https://www.psi.ch/media/3-d-x-ray-imaging-makes-the-finest-details-of-a-computer-chip-visible>.
- [43] Courtland R. X-rays map the 3D interior of integrated circuits [EB/OL]. (2017-05-17) [2017-12-10]. <http://spectrum.ieee.org/nanoclast/semiconductors/processors/xray-ic-imaging>.
- [44] CISCO visual networking index: Forecast and methodology, 2016–2021[EB/OL]. (2017-09-15)[2017-12-10]. <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/complete-white-paper-c11-4813-60.html>.
- [45] Riesen N, Gross S, Love J D, et al. Monolithic mode-selective few-mode multicore fiber multiplexers[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 6971.
- [46] Bezryadina A, Hansson T, Gautam R, et al. Nonlinear self-action of light through biological suspensions[J]. *Physical Review Letters*, 2017, 119(5): 058101.
- [47] Bacterial waveguides of light[EB/OL]. (2017-12-01)[2017-12-10]. https://www.osa-opn.org/home/articles/volume_28/december_2017/extras/bacterial_waveguides_of_light/.
- [48] 杨栋, 刘力谱, 杨宏, 等. 激光微纳3D打印[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(1): 011416.
- Yang Dong, Liu Lipu, Yang Hong, et al. Laser micro-nano 3D printing[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(1): 011416.
- [49] 杨玥, 钱滨, 刘畅, 等. 激光3D打印玻璃研究现状及进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(1): 011406.
- Yang Yue, Qian Bin, Liu Chang, et al. 3D Laser Printing of glass—Present situation and research progress[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(1): 011406.
- [50] Thiele S, Arzenbacher K, Gissibl T, et al. 3D-printed eagle eye: Compound microlens system for foveated imaging. [J]. *Science Advances*, 2017, 3(2): e1602655.
- [51] Engineers 3-D print a "living tattoo": New technique 3-D

- prints programmed cells into living devices for first time[EB/OL]. (2017-12-05) [2017-12-10]. <http://news.mit.edu/2017/engineers-3-d-print-living-tattoo-1205>.
- [52] Shusteff M, Browar A E M, Kelly B E, et al. One-step volumetric additive manufacturing of complex polymer structures [J]. *Science Advances*, 2017, 3(12): eaao5496.
- [53] Zhang Y, Shin Y, Sung K, et al. 3D imaging of optically cleared tissue using a simplified CLARITY method and on-chip microscopy[J]. *Science Advances*, 2017, 3(8): e1700553.
- [54] Singh A K, Naik D N, Pedrini G, et al. Exploiting scattering media for exploring 3D objects[J]. *Light Science & Applications*, 2017, 6(2): e16219.
- [55] Singh A K, Pedrini G, Takeda M, et al. Scatter-plate microscope for lensless microscopy with diffraction limited resolution[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 10687.

Memorable sounds in optics and photonics in 2017

XIE Xinglong, SHEN Weixing, ZHU Jianqiang

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

Abstract Since the birth of laser, optics and photonics have penetrated into all aspects of people's life. This article summarizes the 2017 major progresses in this field and draws up an inventory of ten optical research directions that are likely to have enormous impact on human existence and way of life in the future. The related research work and progress are briefly reviewed as well.

Keywords spotlight of optics; frontier of optics; micronano optics; super high energy laser; terahertz ●



(责任编辑 王志敏)