

引用格式: ZHENG Yiyin, QIN Fei, LI Xiangping. Advances in the Sub-diffraction Limited Light Modulation by Supercritical Lens (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(5):0551310

郑怡茵,秦飞,李向平. 超临界透镜的超衍射极限光场调控研究进展(特邀)[J]. 光子学报, 2022, 51(5):0551310

超临界透镜的超衍射极限光场调控研究进展 (特邀)

郑怡茵, 秦飞, 李向平

(暨南大学 光子技术研究院, 广东省光纤传感与通信重点实验室, 广州 511443)

摘 要:与传统体材料光学透镜相比,平面衍射透镜具有加工制备容易、体积轻薄、便于集成等显著优势。同时,基于衍射效应的光学聚焦机制也为实现灵活的光场调控提供了便利。近年来,在光学超振荡理论的指引下,基于平面透镜的远场超衍射极限光场调控及其应用得到人们的广泛关注。超临界透镜在实现超衍射极限聚焦的同时能有效控制聚焦旁瓣和焦深,成为平面超衍射透镜的重要研究方向之一。本文总结了平面超临界透镜近年来的研究进展,简要概述了超临界透镜的原理和设计方法,对构建超临界透镜的几种光场调控类型及其应用进行了介绍,最后对该领域的未来发展作了展望。

关键词:衍射光学;光场调控;超临界透镜;超衍射极限聚焦;超分辨成像

中图分类号:TB39

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20225105.0551310

0 引言

透镜是光学系统最核心的元件,光学透镜的聚焦和成像能力对物理学、材料学、生物学、医学、电子学等众多领域的研究和工业生产都具有重要意义。传统透镜存在曲面加工困难、体积大、质量重等问题,且受到光学衍射极限的制约,难以实现远场超分辨聚焦与成像。根据光的波动性本质,由阿贝定律($D=0.5\lambda/\text{NA}$)^[1]及瑞利判据($R=0.61\lambda/\text{NA}$)可知^[2,3],对应可见光波长区域,光学显微镜具有横向最高 200 nm 左右的分辨率限制。减小照明光波长或者增大光学系统的数值孔径可以有效提高系统观测分辨率,但超短波长照明光和超大口径的光学系统的加工制造会带来极高的制造难度和使用成本。在线性光学体系中,突破衍射极限而获得超分辨的聚焦和成像始终是光学研究的热点和难点。1928年SYNGE E H提出的基于近场扫描方式的光学超分辨成像思想是目前常用的超衍射极限光学表征的技术手段^[4]。但是近场扫描的成像方式需要用刚性的探针在被探测样品表面几十纳米的距离上逐点扫描,成像速度受限制并容易对样品造成损伤。2005年,美国加州大学伯克利分校的ZHANG Xiang团队提出基于负折射率材料的超透镜(superlens),通过收集并放大消逝场,在365 nm波长照明下实现了89 nm分辨力的超衍射极限成像^[5-7]。其后,该小组根据美国普林斯顿大学研究小组提出的hyperlens的成像原理,在365 nm照明波长下成功分辨出周期150 nm、线宽35 nm的图形,在实验上验证了超分辨放大成像特性^[8]。但以上技术都存在一个固有的技术特点,就是成像透镜仍然要置于待成像样品的近场区域,从而保证对消逝波的有效收集和放大作用,极大地限制了其实际应用。开发一种纯光学的远场超分辨成像技术具有重要的科学意义和应用价值,其核心是开发一种能实现远场超衍射极限聚焦的光学透镜。平面衍射透镜灵活的光场调控特性为实现该目标提供了可能。

2006年英国布里斯托大学的BERRY M和POPESCU S等在研究量子弱测量理论的过程中提出超振

基金项目:国家自然科学基金(No.62075085),国家重点研发计划(No.2021YFB2802000),广州市基础与应用基础研究(No.202002030258)

第一作者:郑怡茵(1998—),女,硕士研究生,主要研究方向为微纳光子学及器件。Email:yiyinzheng@qq.com

导师(通讯作者):秦飞(1982—),男,副教授,博士,主要研究方向为微纳光子学、激光加工、超分辨成像等。Email:qinfei@jnu.edu.cn

收稿日期:2022-01-22;录用日期:2022-04-06

<http://www.photon.ac.cn>

荡的概念^[9],从理论上证明特殊设计的光栅结构可在远场实现超衍射极限的聚焦,也解释了自20世纪50年代以来利用光瞳滤波函数提高系统空间分辨率的理论机制^[10]。超振荡理论指出,当空间低频率分量的电磁辐射波进行相干叠加时,通过合理调控各空间频率的复振幅分布,在焦平面上一定区域之内可以产生快速的光场振荡,振荡频率可以远大于参与相干的最高空间频率分量,此时会在局部空间产生一个最小特征尺寸小于瑞利判据下的衍射极限光斑尺寸的聚焦光斑^[9, 11-16]。该理论一经提出便引起众多科研人员的广泛关注。基于光学超振荡思想,英国南安普顿大学的ZHELUEV N I团队于2012年提出超振荡透镜(Super-oscillatory Lens, SOL)的概念,利用精密设计的同心环带结构,在相干光源的照射下,实验上在远场获得了小于衍射极限的光学超振荡焦斑。和共聚焦显微成像技术相结合,利用该焦斑扫描待成像样品,获得了1/4.6波长分辨率的无标记远场光学超分辨成像效果^[17, 18]。该成像技术的分辨率只依赖于聚焦焦斑尺寸,与材料的特性无关,具有广泛的普适性^[19-23]。根据光学超振荡理论,超振荡焦斑的尺寸没有物理极限,可以根据需要灵活设计。然而,超振荡焦斑总是伴随着较强的聚焦旁瓣,特征尺寸越小的超振荡焦斑,其旁瓣强度越高,主焦斑的能量利用效率急剧降低。大强度的聚焦旁瓣还给超振荡透镜在光学成像和加工制造中的应用带来了很大的挑战。为解决超振荡透镜焦斑尺寸和旁瓣强度以及能量利用效率之间的相互制约关系,新加坡国立大学的研究团队提出了平面超临界透镜的概念(Supercritical Lens, SCL)^[24-26]。相比于超振荡透镜,超临界透镜的聚焦光斑在突破衍射极限的同时还具有低聚焦旁瓣的明显优势,并且能够根据设计获得超长的的工作距离和焦深,这为平面超衍射透镜的应用带来了便利。同时,微米级别的结构特征尺寸使该透镜可以采用成熟且快速低成本的激光曝光直写技术来加工,为其推向实际应用提供了切实的可行性^[26]。平面超临界超透镜为突破光学超衍射极限提供了一种行之有效的方法,其实现超分辨的聚焦和成像完全是通过对传输光场衍射干涉效应的精密调控来实现的,是一种纯粹的光学效应,不依赖于材料的非线性响应,在显微成像、望远系统、失效检测、精密加工、高密度存储等各个领域有广泛的应用前景^[27-29]。本文将概述平面超临界透镜的研究进展,简要介绍其设计原理、光场调控及相关应用。

1 超临界透镜的设计思想和方法

1.1 超振荡判据与超临界透镜的概念

从数学上来说,超振荡现象是指一个带限函数的局部振荡频率远大于其所包含的最高空间频率的现象。具体到光学衍射领域,通过对入射光波进行精细调制,不同空间频率的光束发生干涉,在焦平面上局部区域之内存在远高于系统最高傅里叶分量的频谱成分,从而在该区域产生远小于艾里斑尺寸的超衍射极限聚焦光斑。然而,在获得超衍射极限聚焦的同时,在聚焦主瓣的周围将不可避免地伴生强度可观的聚焦旁瓣。主焦斑尺寸越小,旁瓣的强度就越高,使得实际使用受到极大的制约。合理的平衡主焦斑尺寸和能量利用效率之间的竞争关系对于平面超衍射极限透镜的设计具有重要意义。2014年,新加坡国立大学的HUANG Kun等在仔细分析超振荡理论和聚焦光场中的光场振荡的空间频率特性后指出,简单的把横向尺寸小于艾里斑的聚焦光斑都称为超振荡焦斑是不严谨的。在BERRY M理论的基础上,他们提出了光学聚焦系统中真实衍射极限的概念,即超振荡判据 $(0.38\lambda/NA)$ ^[24]。如图1所示,针对任意的透镜聚焦焦斑来说,对于给定的数值孔径NA,瑞利判据 $(0.61\lambda/NA)$,黑色曲线)以下的青色和深蓝色区域可以被称为超分辨区域,在这两个区域内都可以实现超越艾里斑尺寸的光场调制;但只有在低于超振荡判据 $(0.38\lambda/NA)$,白色曲线)的深蓝色区域才会发生光学超振荡的现象;这意味着超振荡区域是超分辨区域的一个子集。在超振荡区域内,主光斑的大小没有任何物理限制,原则上可以无限小,但这种超振荡焦斑具有较强的旁瓣,且对入射光的能量利用率极小,不利于实际应用。而在大于瑞利衍射极限的亚分辨区域,即橙色区域,其旁瓣的影响可以忽略不计,但无法实现超衍射极限的光调制效果。因此,他们提出介于瑞利判据和超振荡判据之间的区域是透镜设计的最优选择,可以在实现超衍射极限光场调制的同时有效抑制聚焦旁瓣的影响。在此基础上,新加坡国立大学QIN Fei等提出了一种平面超临界透镜的概念,指代焦斑尺寸趋近于超振荡判据 $(0.38\lambda/NA)$,并具有大于传统透镜的聚焦焦深 $(2\lambda/NA^2)$ 而能够形成光针效应的平面衍射透镜^[26, 30]。满足该设计思想的透镜能最大限度的平衡焦斑尺寸和能量利用效率之间的相互制约关系,有利于实际应用。

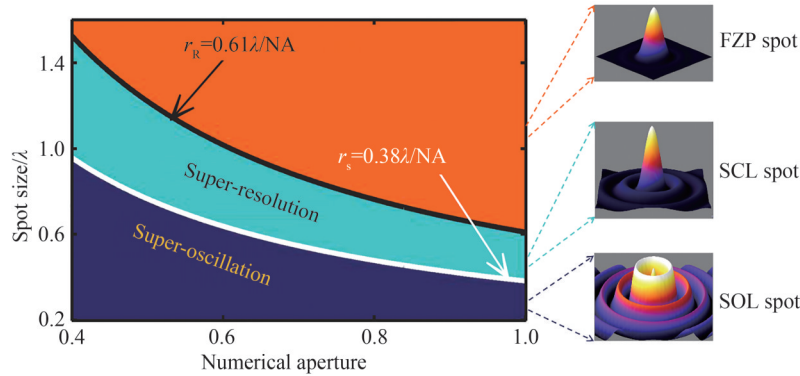


图1 超振荡判据概念示意图,瑞利判据(黑色)和超振荡判据(白色)将聚焦光斑尺寸分为三个区域:亚分辨(橙色)^[28]、超分辨(青色)^[26]和超振荡(深蓝色)^[18];插图为各个区域所对应的典型光斑强度分布^[24]

Fig.1 Schematic shown of the super-oscillation criterion. The focal spot size of planar diffractive lens could be divided into three regions by Rayleigh (black) and super-oscillation (white) criteria, including sub-resolved (orange)^[28], super-resolution (cyan)^[26] and super-oscillation (dark blue)^[18]. The insets are the field distributions of the focal spots for three typical diffractive lenses^[24]

1.2 设计方法

超临界透镜本质上也是一种经过精细设计的衍射光学元件,结构设计通常都基于同心圆环构型的波带片结构。其超衍射极限的聚焦特性完全可以通过各种衍射理论和优化算法对各同心环带的位置和宽度的参数设计优化来实现。其结构设计过程常用的方法主要包括优化算法(optimization algorithms)和免优化算法(optimization-free algorithms)两类。

1.2.1 优化算法

常用的超临界透镜结构优化方法主要有粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization Algorithm, PSO)、遗传算法(Genetic Algorithms, GA)和模拟退火算法(Simulated Annealing Algorithm, SA)等。

粒子群算法是由EBERHART R C博士和KENNEDY J博士于1995年提出的一种进化计算技术,其灵感来自于群居动物的集体行为。在粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization Algorithm, PSO)中,优化问题的候选解集被定义为一个粒子群,该粒子群是通过参数空间来确定轨迹,这些轨迹由粒子自身和相邻粒子的最佳性能驱动^[31]。该算法具有实现容易、精度高、收敛快的优势,已被广泛应用于函数优化、神经网络训练、模糊系统控制以及其他遗传算法等领域。在应用于透镜设计时,首先针对指定的目标场参数,如焦斑横向尺寸、旁瓣特征、视场和景深等,随机生成一组透镜参数;然后计算透镜在目标焦平面上对特定入射波的衍射图样,通过比较衍射场和目标场得出适应度函数;最后,根据适应度函数更新迭代,直到得到最佳值^[32-35]。粒子群算法也具有一定的缺点,如易于陷入局部最优解以及对初始参数具有一定的依赖性等。

遗传算法是由美国的HOLLAND J等于20世纪70年代提出的一种进化算法,该算法是根据大自然中生物体进化规律而设计提出的,主要分三个部分:选择、交叉和变异。选择就是要从群体中选择优胜的个体、淘汰劣质的个体的操作,目的就是要将优化的个体直接遗传到下一代或者通过配对交叉产生新的个体再遗传到下一代^[33],交叉是指把两个父代个体的部分结构加以替换重组而生产新的个体操作,其中的交叉算子在整个遗传算法中起到了核心作用。变异是对群体中的个体串的某些基因座上的基因值做变动,从而产生新的个体,这一步能够有效地避免优化算法陷入到局部最优中,最后通过迭代得到全局最优解。该算法通过数学的方式,利用计算机仿真运算,将问题的求解过程转换成类似生物进化中的染色体基因的交叉、变异等过程。遗传算法提供了一种求解复杂系统问题的通用框架,它不依赖于问题的具体领域,对问题的种类有很强的鲁棒性,不仅常用于光学衍射透镜的设计^[36, 37],还可以实现对超高容量非周期光子筛^[38, 39]、声学超材料透镜等的设计。但它也存在一定的不足,如效率较低、容易过早收敛等。

模拟退火算法(Simulated Annealing, SA)最早是由METROPOLIS N等于1953年提出^[40]。基于对固体退火过程的模拟,用冷却进度表来控制算法的进程,使算法在控制参数(即退火温度)缓慢降低并趋于零时最终求得组合优化问题的相对全局最优解。其物理意义为:当孤立的粒子系统温度以足够慢的速度下降

时,系统近似处于热力学平衡状态,最后系统将达到本身能量最低的状态,即基态。模拟退火算法属于随机类的算法,是一种适合解决大规模组合优化问题的方法,它具有描述简单、使用灵活、应用广泛、运行效率较高和较少受初始条件限制等优点,具有很强的实用性。可应用于设计用于分束的纯相位量化衍射光学元件(Diffractive Optical Elements, DOE)^[41]、设计衍射光束整形器^[42, 43],但是要实现缓慢退火,需要计算量通常很大,往往得不到整体的极小值。因此利用模拟退火算法设计大尺寸的衍射光学元件时,较难得到很满意的结果。

1.2.2 免优化算法

光学超振荡现象来源于不同空间频率的光在透镜焦平面上某些点上的相消干涉效应,可以通过在规定的位置选择合适的光的振幅和空间频率来控制光学超振荡分布。基于以上想法,新加坡国立大学的HUANG Kun等于2014年提出一种免优化(optimization-free)的设计方法,通过数值求解非线性矩阵方程来设计平面衍射透镜,该方程包含每一个环带位置和宽度信息。在解方程之前预先设定聚焦焦斑的位置和强度分布特性,这样,就把超振荡优化设计过程转化成求解符合目标值的非线性解的逆过程。HUANG Kun等探索了环带宽度和半径(r)与聚焦面光强分布的关系。对比相同位置(r)处的0阶贝塞尔函数与单环焦点强度的均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE),得出了单环的宽度、位置(r)与RMSE的关系,设计多个环带(多个空间频率)的透镜的总电场是这些环带电场的叠加。以环的宽度、位置(r)与RMSE的关系为设计依据,透镜的聚焦可以用非线性方程组 $SC=F$ 表示,利用牛顿理论可以得到数值解,无需任何基于搜索的优化算法,其中 S 为所有环的电场相关系数, C 为环的位置, F 为焦点处的期望电场分布。如果将优化振幅型或相位型超临界透镜衍射单元的位置、大小、相位分布等信息从而获得超临界的特殊光场调控效果看成是一个正向求解问题,那么假设知道超临界透镜的光场分布,去求解产生该光场的超临界透镜结构的过程就是一个逆向求解问题。这种无需优化的方法可以有效地设计许多不同焦点图案的二元衍射光学元件,如光学胶囊和光学亚波长针等^[44]。同时,该方法不仅适用于强度掩模,而且适用于相位掩模。此外,使用该方法设计超振荡光斑时,可以实现把衍射旁瓣推离主焦斑以增大成像视场。

2 超临界透镜的构造方式

超临界透镜是一种基于纯光场调控方式来实现远场超衍射极限聚焦的光学透镜。通过调制光场的振幅、相位或偏振态的空间分布,在远场焦平面上获得小于传统透镜的聚焦光斑。其透镜结构和光场调控方式主要包括二元振幅构型、二元相位构型和多级相位构型等。

2.1 二元振幅构型超临界透镜

由于二元强度构型具有加工制备简单的优势,最初的平面超衍射极限透镜常常采用二元强度构型来设计。2015年,新加坡国立大学的QIN Fei等通过构建二元振幅构型超临界透镜,在加载涡旋相位的角向偏振光照射下,实现了 240λ 的超长焦距和长度为 12λ 的光针光场^[25]。如图2所示,该超临界透镜是由不透明衬底上的多个同心透明环带构建而成。理论和实验结果表明,该聚焦光斑的横向尺寸在整个光针区域可以保持 0.42λ 到 0.49λ 的尺度,实现了超衍射极限的光学聚焦。与传统超振荡透镜不同,该超临界透镜的结构设计中,无需引入亚波长特征尺寸的结构参数,参与相干的所有同心环带均具有统一的微米级宽度,使得该超临界透镜的加工制备无需采用低效率的聚焦离子束(Focused Ion Beam, FIB)和电子束光刻(Electron Beam Lithography, EBL)技术。得益于激光直写技术的高效加工特性,该工作中所展示的平面超临界透镜具有接近毫米量级的口径,尺寸远大于只有几十微米的传统超振荡透镜。在同等级数值孔径的条件下,有效提高了焦距和焦斑强度。在该工作中,他们还通过测量焦平面偏振态的斯托克斯参数,验证了该亚波长针的横向偏振特性。

在此基础上,2021年LI Zhangyin等提出并实验证明了一种具有环境鲁棒性的浸没式超临界透镜,可以在多种不同折射率浸没环境下有效工作^[45]。基于矢量瑞利-索莫非衍射理论,以同心圆环式二元振幅型环带为基本构型,结合多目标优化算法设计了该透镜,并利用电子束曝光技术加工制备了直径约为 $300\ \mu\text{m}$ 的平面超临界透镜。在折射率分别为1.0、1.33和1.51的空气、水和油等常用介质中,理论和实验展示了多介质环境超衍射限制的聚焦效应。该透镜在多种介质环境中的有效数值孔径都可保持在一个固定值,在三种实

测介质中焦点的横向尺寸均为 317 ± 7 nm,约为艾里斑的 0.69 倍。这种独特的特性将极大地促进其在生物组织成像、超精密光学制造和高密度光学存储等领域的应用。

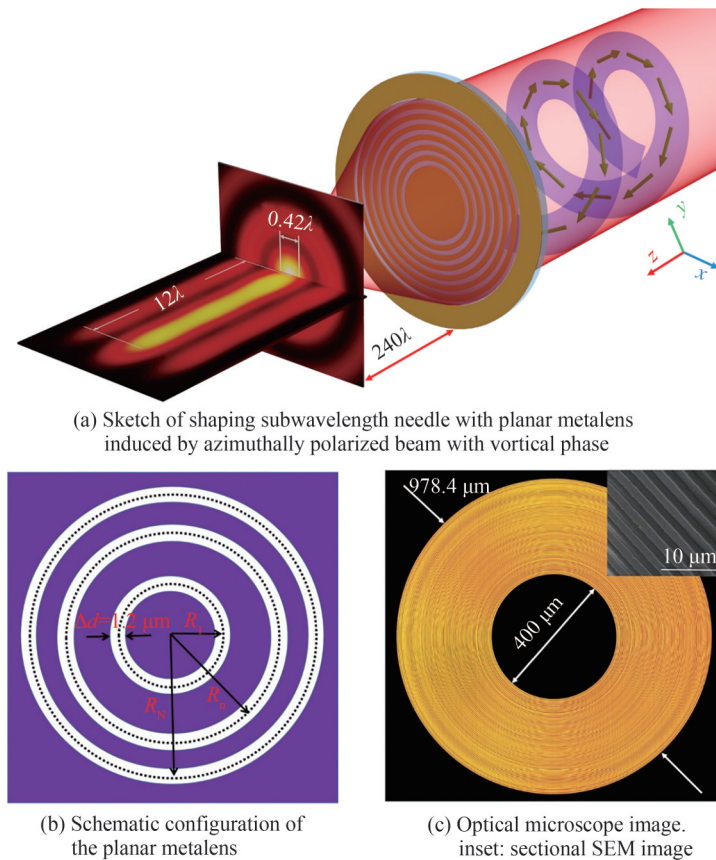


图 2 二元振幅构型超临界透镜产生超衍射极限光针光场^[25]

Fig.2 Shaping sub-diffraction limited optical needle by a binary amplitude type supercritical lens^[25]

2.2 二元相位构型超临界透镜

相比于二元振幅构型超临界透镜,二元相位构型超临界透镜能一定程度地提高能量利用效率。2020年 FANG Wei 等利用协同双模式双光子聚合直写加工技术,基于可见光透明的光刻胶材料制备了二元相位构型超临界透镜^[46]。该加工技术具有独立控制曝光线条的宽度和厚度的优势,并利用该加工技术制作了一系列同心环带式二元相位构型超临界透镜,透镜环带的宽度为 $1.2 \mu\text{m}$ 、高度控制在满足对照明光 π 的特定位相调制深度。理论模拟和实验测量显示,在 $z=63.3 \mu\text{m}$ 的焦平面处,获得了模拟结果为 $0.42\lambda/\text{NA}$ 以及实验结果为 $0.45\lambda/\text{NA}$ 左右的超衍射极限聚焦光斑。焦斑强度比同条件下的二元振幅构型有约 4 倍的提高。

2020年 ZHU Xufeng 等提出并实验证明了一种厘米尺度的二元相位构型 SCL 阵列。在 633 nm 平面波的照射下,在远场成功获得了横向尺寸为 0.75 倍艾里斑尺寸的均匀超衍射极限焦斑点阵,如图 3 所示。平面超临界透镜阵列由一系列全同的直径为 $200 \mu\text{m}$ 的同心环带式超临界透镜基本单元按照正方晶格或者六方晶格周期性排列成。利用超快紫外光刻技术,可以在 10 min 内成功绘制厘米尺度的 SCL 阵列。该研究结果为光学纳米制造、超分辨率成像和超精细光学操作提供了可能^[46]。

2021年, QIN Fei 等通过深入研究损耗辅助的光学相位奇点效应,成功地在单层 MoS_2 上实现了对可见光 π 的相位调制,相位调控能力比材料的物理厚度高 350 倍。基于此独特位相调控机制,利用飞秒激光直写技术,在实验上构建了原子层厚度的二元相位构型平面超临界透镜,从 435 nm 到 585 nm 的 150 nm 带宽内展示了远场超衍射极限的聚焦能力,如图 4 所示。结合单层 MoS_2 二维材料的直接带隙特性,该研究工作为构建超薄全光集成系统提供了可行的方案^[47]。

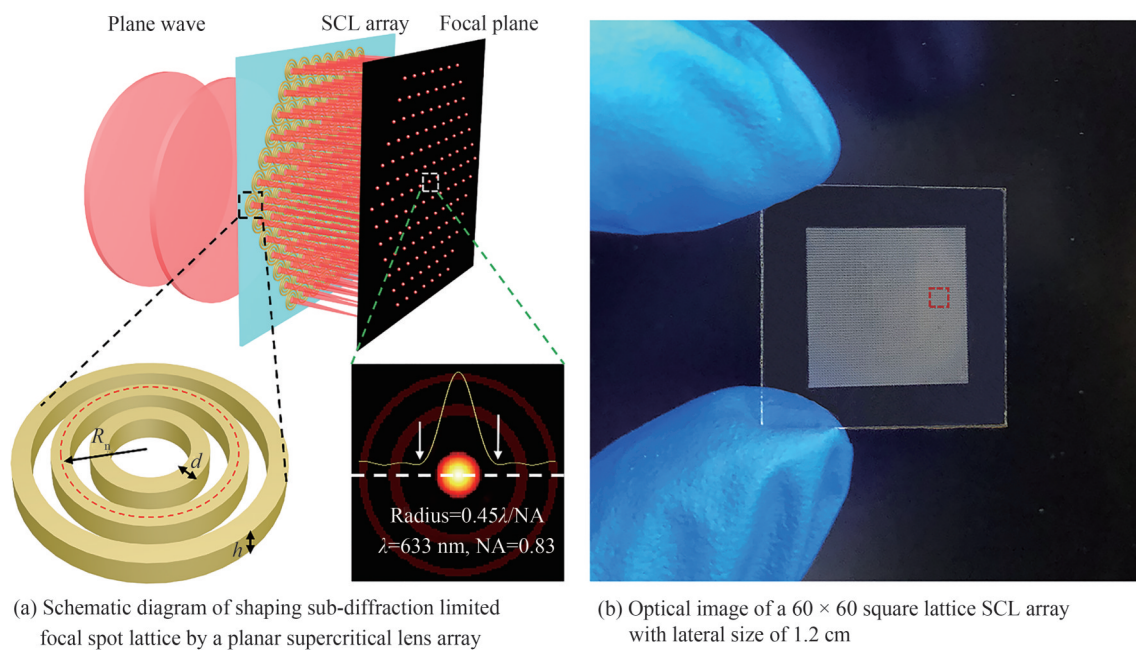


图3 超临界透镜阵列形成远场超衍射极限阵列焦点^[46]
 Fig.3 Shaping sub-diffraction limited focal spot lattice by a planar supercritical lens array^[46]

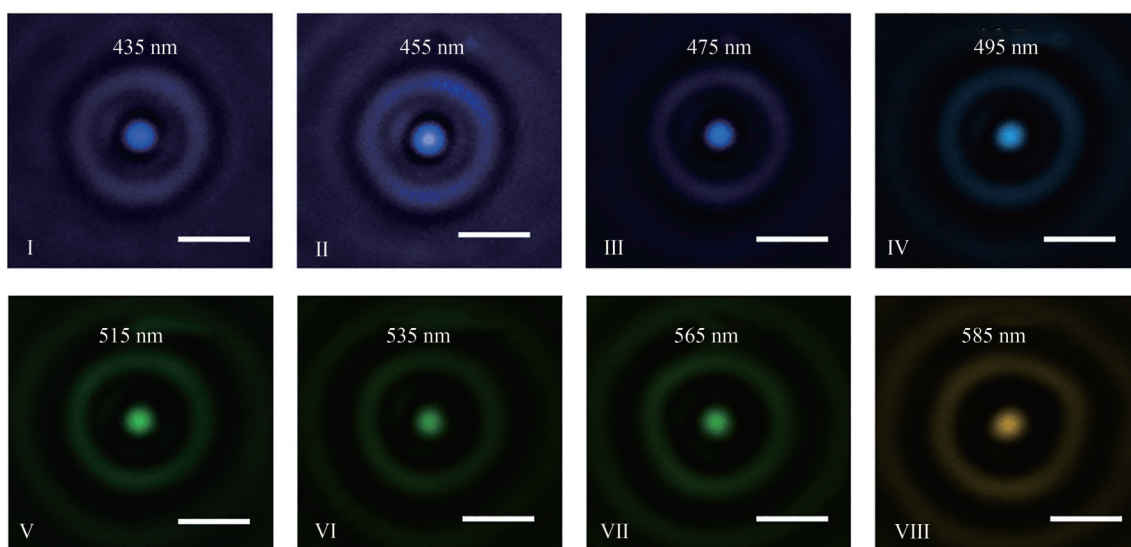
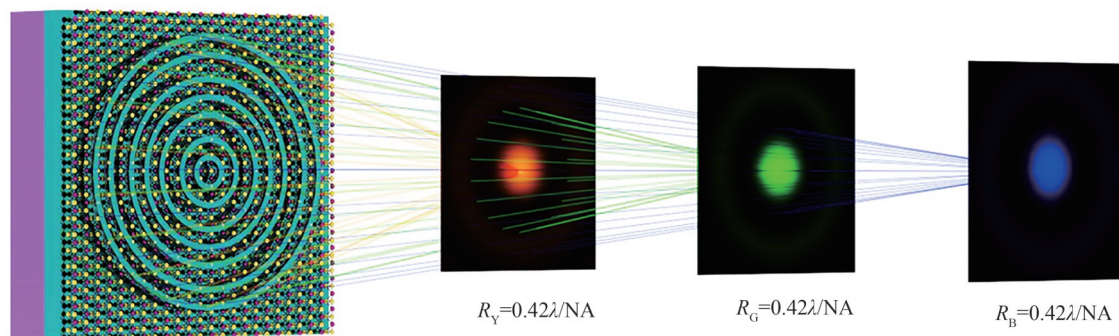


图4 原子层厚度平面超临界透镜的宽带超衍射极限聚焦^[47]
 Fig.4 Atomically thin planar supercritical lens with broadband sub-diffraction limited focusing effect^[47]

2.3 多级相位构型超临界透镜

尽管二元相位构型超临界透镜的能量利用效率在一定程度上有所提高,但与二元强度构型类似,由于高阶衍射效应,在干涉过程中损失了大量光能,导致透镜的聚焦效率依然受限。针对该问题,将二元相位构型离散为多级相位构型抑制高阶衍射效应,能有效提高相位构型平面超临界透镜的聚焦效率。2020年, FANG Wei等利用协同双模式激光直写加工技术,成功的制备出多级相位构型超临界透镜,如图5。理论和实验结果显示,该多级相位 SCL 不仅可以获得横向尺寸为 $0.40\lambda/\text{NA}$ (0.67 倍艾里斑) 的超衍射极限焦斑,而且其焦斑强度是同条件下二元强度构型 SCL 的 7.2 倍^[46]。其较高的聚焦效率将极大地推动平面超构透镜从科学研究到实际应用的发展。此外,光学超表面的发展为在亚波长尺度对光场的振幅、相位及偏振调控提供了有效的手段。应用光学超表面的设计思想和加工手段,将为平面超临界透镜的发展提供便利。

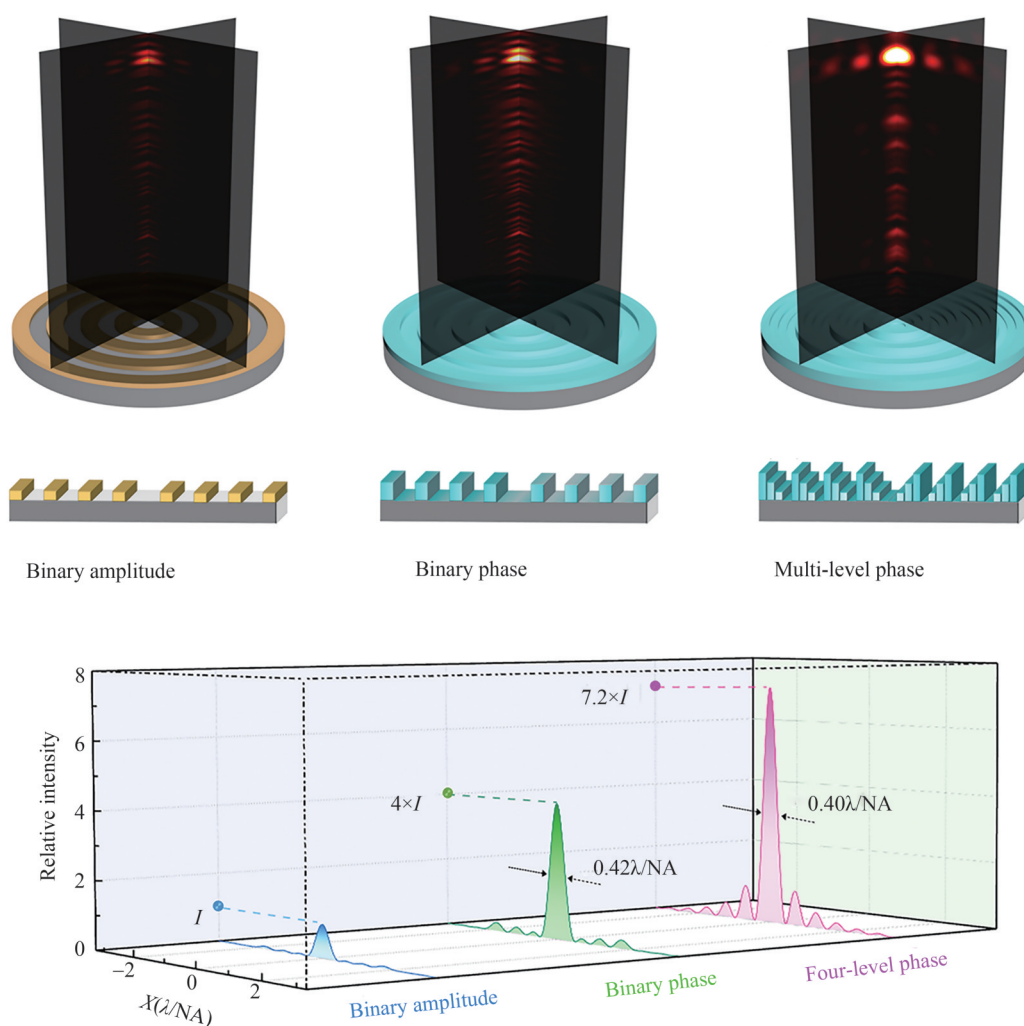


图5 多级相位构型超临界透镜高效超衍射极限聚焦^[46]

Fig.5 Schematic of the sub-diffraction-limited focusing with high efficiency from multilevel phase supercritical lens^[46]

2.4 基于相位型空间光调制器的超临界聚焦效应

实际应用中,除了可以采用特殊设计制备的平面透镜来产生超临界焦斑之外,还可以采用空间光调制器(Spatial Light Modulator, SLM)给照明激光叠加相位图样,然后用传统显微物镜聚焦来获得符合超临界聚焦思想的焦斑。2018年,新加坡国立大学的LI Gong等报道了一种用于高分辨率振动成像的新型超临界聚焦相干反斯托克斯拉曼散射(Supercritical Focusing Coherent Anti-Stokes Raman Scattering, SCF-CARS)显微镜技术,如图6所示。他们利用空间光调制器生成了相位为0和 π 的同心环组合的两种优化相

位图,并将其施加到泵浦光束上,获得超衍射极限的聚焦光斑。通过在显微镜载玻片和玻璃-空气界面以及生物医学样品(例如牙齿)上成像聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)纳米圆柱体,展示了这种高分辨率 SCF-CARS 显微镜技术^[48]。

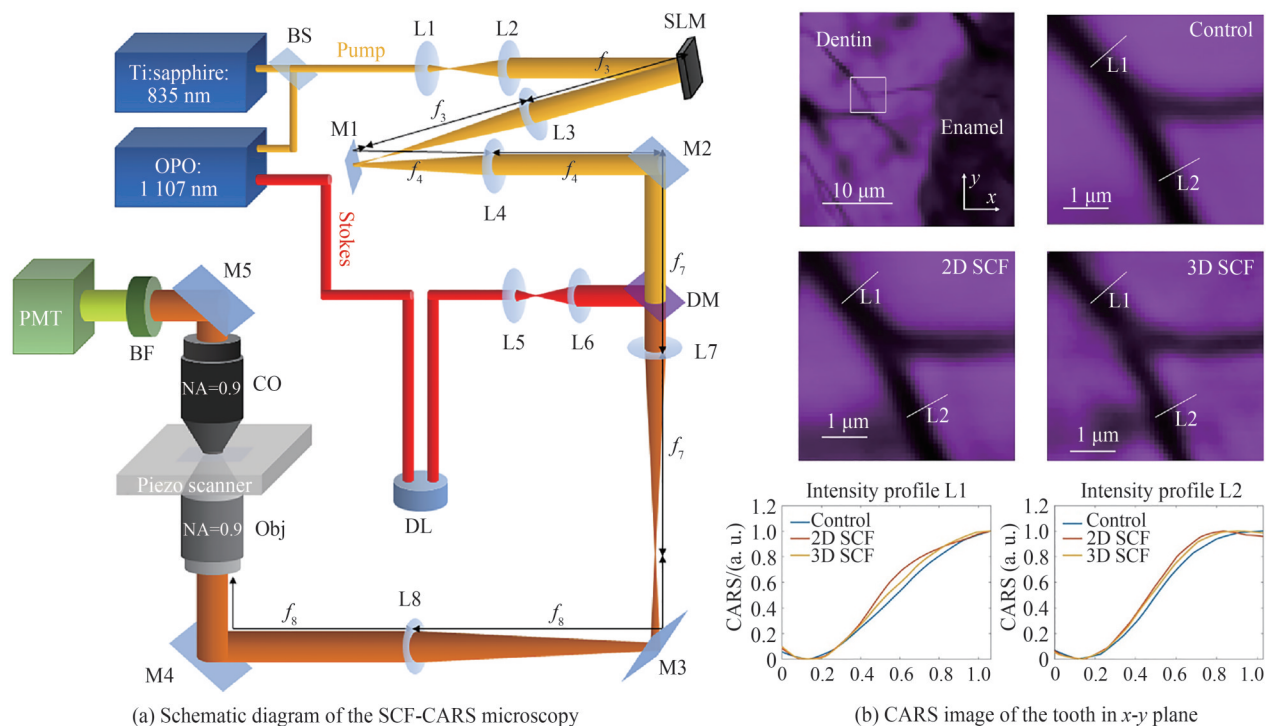


图6 基于超临界透镜的反斯托克斯成像^[48]

Fig.6 Anti-stokes microscopy platform based on SCLs for vibrational imaging^[48]

3 超临界聚焦相关应用

超临界透镜在实现远场超衍射极限光场调制的同时,焦斑可以根据设计在光轴上超长的距离内保持亚波长的聚焦特性而形成超衍射极限的光针光场。与超振荡透镜相比,超临界透镜还具有温和的旁瓣强度和次级衍射焦斑强度,焦斑在整个焦场区域内占主导地位,结合其微米级特征尺寸的结构设计所带来的加工制造优势,使其在光学显微成像、全息光存储技术、精密光学加工、超分辨光学望远镜、光学微操纵以及半导体检测等领域有重要的应用价值^[29, 49, 50]。

3.1 基于超临界透镜的显微成像系统

2016年,新加坡国立大学 QIN Fei 等在验证了超临界透镜的突出光场调控特性之后,进一步把平面超临界透镜应用于超分辨成像领域^[26]。设计制备了工作在蓝紫光波段的二元振幅构型平面超临界透镜,在 405 nm 圆偏振光的照明下,在远场 $z=55 \mu\text{m}$ (135λ) 处获得了横向尺寸为 165 nm (0.407λ) 且没有明显旁瓣的超临界聚焦光斑,并沿光传播方向形成长度约 12λ 的光针光场。在此基础上,他们提出了基于平面超临界透镜的无标记远场超分辨成像技术。基于扫描共聚焦成像原理,利用所获得的超临界聚焦焦斑扫描待成像样品,在空气中获得了最小特征尺寸为 65 nm (0.16λ) 的纯光学远场超分辨成像效果,超过同等条件下的明场和共聚焦显微镜的成像分辨能力,如图 7 所示。该成像过程是纯物理的,实时捕获,不需要对样本进行任何预处理,也不需要对其成像结果进行数学后处理。为了验证该技术的普适性,他们还展示了对大尺寸非周期样品的成像效果。如图 7(b) 所示,对于 $13.5 \mu\text{m} \times 13.5 \mu\text{m}$ 尺寸的复杂结构,成像结果可以清楚地分辨该样品的所有复杂细节,整个图形中的所有结构特征都具有几乎相同的锐度。此外,超临界透镜独特的超衍射极限光针光场所带来的大焦深成像的特性,使其可以通过一次扫描实现对三维立体结构的水平投影成像。

4 总结与展望

超临界透镜是一种利用光场调控方式实现远场超衍射极限聚焦和成像的光学元件,由于其独特的光学聚焦特性,使其成为衍射光学和纳米光子学等相关领域的热点研究方向。本文主要总结了平面超临界透镜近年来的研究进展,简要概述了超临界透镜的原理和设计方法,对超临界透镜的主要几种光场调控类型及其相关应用进行了简单总结。平面超临界透镜为突破光学超衍射极限提供了一种行之有效的方法,在显微成像、望远系统、失效检测、精密加工、高密度存储等各个领域有广泛的应用前景。展望未来,从更有利于实际应用的角度出发,平面超临界透镜在以下几个方面值得进行深入的探索:主要包括提高焦斑光强、消除透镜像差以及拓展应用领域等几个方面。首先,平面超临界透镜的焦斑强度对于任何与能量相关的光与物质相互作用过程都是一个关键的参数。提高聚焦光斑强度可以从提高透镜口径和提高聚焦效率两个方面入手。受限于优化算法和计算机能力的限制,已报道的平面超临界透镜的尺寸一般都在百微米量级。改进设计方法和优化算法,设计制备厘米级乃至更大尺度的平面超临界透镜将极大推进其应用进程。同时,把大尺寸的结构设计和超表面的多级相位调控机制相结合,消除高阶衍射,是获得较强超衍射极限焦斑的有效手段。其次,平面超临界透镜也存在与传统衍射透镜相似的光学像差,主要包括单色像差和色差两大类。开发新的设计方法,有效消除平面超临界透镜的像差对于其实际应用有重要的意义。最后,超临界聚焦机制和超临界透镜已经在超分辨显微成像等领域展现出了显著的优势和巨大的应用潜力,探索超临界透镜在光学微操控和激光精密加工制造等领域的应用是值得推进的研究方向。

参考文献

- [1] FRIPP H. A contribution to the theory of the microscope, and the nature of microscopic vision [J]. Proc Bristol Naturalists' Society I, 1874, 1: 200-261.
- [2] STRUTT J. On the manufacture and theory of diffraction gratings [J]. Philosophical Magazine, 1874, 47: 81-93.
- [3] AIRY G B. On the diffraction of an object-glass with circular aperture [J]. Transactions of the Cambridge Philosophical Society, 1835, 5: 283-291.
- [4] SYNGE E H. A suggested method for extending microscopic resolution into the ultra-microscopic region [J]. Philosophical Magazine, 1928, 6(35): 356-362.
- [5] LIU Zhaowei, DURANT S, LEE H, et al. Far-field optical superlens [J]. Nano Letters, 2007, 7(2): 403-408.
- [6] FANG N, LEE H, CHENG Sun, et al. Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens [J]. Science, 2005, 308(5721): 534-537.
- [7] TAUBNER T, KOROBKIN D, URZHUMOV Y, et al. Near-field microscopy through a SiC superlens [J]. Science, 2006, 313(5793): 1595-1595.
- [8] JACOB Z, ALEKSEYEV L V, NARIMANOV E. Optical hyperlens: far-field imaging beyond the diffraction limit [J]. Optics Express, 2006, 14(18): 8247-8256.
- [9] BERRY M, POPESCU S. Evolution of quantum superoscillations and optical superresolution without evanescent waves [J]. Journal of Physics A: Mathematical and General, 2006, 39(22): 6965-6977.
- [10] FRANCA G T D. Super-gain antennas and optical resolving power [J]. Nuovo Cimento, 1952, 9(3): 426-438.
- [11] HUANG Fumin, ZHELUDEV N I, CHEN Yifang, et al. Focusing of light by a nanohole array [J]. Applied Physics Letters, 2007, 90(9): 091119.
- [12] ZHELUDEV N I. What diffraction limit?[J]. Nature Materials 2008, 7(6): 420-422.
- [13] HUANG Kun, QIN Fei, LIU Hong, et al. Planar diffractive lenses: fundamentals, functionalities, and applications [J]. Advanced Materials, 2018, 30(26): 1704556.
- [14] BERRY M, ZHELUDEV N I, AHARONOV Y, et al. Roadmap on superoscillations [J]. Journal of Optics, 2019, 21(5): 053002.
- [15] WANG Jun, QIN Fei, ZHANG Daohua, et al. Subwavelength superfocusing with a dipole-wave-reciprocal binary zone plate [J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(6): 061103.
- [16] CAO Guiyuan, GAN Xiaosong, LIN Han, et al. An accurate design of graphene oxide ultrathin flat lens based on Rayleigh-Sommerfeld theory [J]. Opto-Electronic Advances, 2018, 1(7): 180012.
- [17] ROGERS E T F, ZHELUDEV N I. Optical super-oscillations: sub-wavelength light focusing and super-resolution imaging [J]. Journal of Optics, 2013, 15(9): 094008.
- [18] ROGERS E T F, LINDBERG J, ROY T, et al. A super-oscillatory lens optical microscope for subwavelength imaging [J]. Nature Materials, 2012, 11(5): 432-435.
- [19] ROY T, ROGERS E T, YUAN G, et al. Point spread function of the optical needle super-oscillatory lens [J]. Applied

- Physics Letters, 2014, 104(23): 231109.
- [20] YUAN Guanghui, ROGERS E T, ZHELUDEV N I. Achromatic super-oscillatory lenses with sub-wavelength focusing [J]. *Light: Science & Applications*, 2017, 6(9): e17036.
- [21] WANG Qian, ROGERS E T, GHOLIPOUR B, et al. Optically reconfigurable metasurfaces and photonic devices based on phase change materials [J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(1): 60-65.
- [22] YE Huapeng, QIU Chengwei, HUANG Kun, et al. Creation of a longitudinally polarized subwavelength hotspot with an ultra-thin planar lens: vectorial Rayleigh-Sommerfeld method [J]. *Laser Physics Letters*, 2013, 10(6): 065004.
- [23] TANG Dongliang, WANG Changtao, ZHAO Zeyu, et al. Ultrabroadband superoscillatory lens composed by plasmonic metasurfaces for subdiffraction light focusing [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2015, 9(6): 713-719.
- [24] HUANG Kun, YE Huapeng, TENG Jinghua, et al. Optimization-free superoscillatory lens using phase and amplitude masks [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, 8(1): 152-157.
- [25] QIN Fei, HUANG Kun, WU Jianfeng, et al. Shaping a subwavelength needle with ultra-long focal length by focusing azimuthally polarized light [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 1-9.
- [26] QIN Fei, HUANG Ken, WU Jianfeng, et al. A supercritical lens optical label-free microscopy: sub-diffraction resolution and ultra-long working distance [J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(8): 1602721.
- [27] QIN Fei, HONG Minghui, CAO Yaoyu, et al. Advances in the far-field sub-diffraction limit focusing and super-resolution imaging by planar metalenses [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(14): 144206.
- [28] LIANG Liangliang, FENG Ziwei, ZHANG Qiming, et al. Continuous-wave near-infrared stimulated-emission depletion microscopy using downshifting lanthanide nanoparticles [J]. *Nature Nanotechnology*, 2021, 16(9): 975-980.
- [29] XU Quyang, XU Yi, XIAN Mincong, et al. Synthetic helical dichroism for six-dimensional optical orbital angular momentum multiplexing [J]. *Nature Photonics*, 2021, 15(12): 901-907.
- [30] ZHU Linwei, CAO Yaoyu, CHEN Qiuqun, et al. Near-perfect fidelity polarization-encoded multilayer optical data storage based on aligned gold nanorods [J]. *Opto-Electronic Advances*, 2021, 4(11): 210002.
- [31] WANG Changtao, TANG Dongliang, WANG Yanqin, et al. Super-resolution optical telescopes with local light diffraction shrinkage [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 1-8.
- [32] QIN Fei, HONG Minghui. Breaking the diffraction limit in far field by planar metalens [J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2017, 60(4): 044231.
- [33] JIN Nanbo, RAHMAT-SAMII Y. Advances in particle swarm optimization for antenna designs: real-number, binary, single-objective and multiobjective implementations [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2007, 55(3): 556-567.
- [34] WHITLEY D. A genetic algorithm tutorial [J]. *Statistics and Computing*, 1994, 4(2): 65-85.
- [35] SHOKOOH-SAREMI M, MAGNUSSON R. Particle swarm optimization and its application to the design of diffraction grating filters [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(8): 894-896.
- [36] YUAN Guanghui, ROGERS E T, ROY T, et al. Flat super-oscillatory lens for heat-assisted magnetic recording with sub-50 nm resolution [J]. *Optics Express*, 2014, 22(6): 6428-6437.
- [37] CHEN Gang, WEN Zhongquan, QIU Chengwei. Superoscillation: from physics to optical applications [J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8(1): 1-23.
- [38] LIU Tao, TAN Jinbin, LIU Jian, et al. Vectorial design of super-oscillatory lens [J]. *Optics Express*, 2013, 21(13): 15090-15101.
- [39] LIU Tao, SHEN Tong, YANG Shuming, et al. Subwavelength focusing by binary multi-annular plates: design theory and experiment [J]. *Journal of Optics*, 2015, 17(3): 035610.
- [40] LIU Tao, WANG Tong, YANG Shuming, et al. Rigorous electromagnetic test of super-oscillatory lens [J]. *Optics Express*, 2015, 23(25): 32139-32148.
- [41] LI Wenli, HE Pei, YUAN Weizheng, et al. Efficiency-enhanced and sidelobe-suppressed super-oscillatory lenses for sub-diffraction-limit fluorescence imaging with ultralong working distance [J]. *Nanoscale*, 2020, 12(13): 7063-7071.
- [42] HUANG Kun, LIU Hong, GARCIA-VIDAL F J, et al. Ultrahigh-capacity non-periodic photon sieves operating in visible light [J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 1-7.
- [43] KIRKPATRICK S, GELATT C D, VECCHI M P. Optimization by simulated annealing [J]. *Science*, 1983, 220(4598): 671-680.
- [44] SHENG Y, PANG H, YIN S, et al. Effective design of diffractive optical elements for beam splitting with SA algorithm [C]. *Holography, Diffractive Optics, and Applications V*, 2012.
- [45] KIM M S, GUEST C C. Simulated annealing algorithm for binary phase only filters in pattern classification [J]. *Applied Optics*, 1990, 29(8): 1203-1208.
- [46] LIN Y, KESSLER T, LAWRENCE G. Design of continuous surface-relief phase plates by surface-based simulated annealing to achieve control of focal-plane irradiance [J]. *Optics Letters*, 1996, 21(20): 1703-1705.

- [47] WAN Chao, HUANG Kun, HAN Tiancheng, et al. Three-dimensional visible-light capsule enclosing perfect supersized darkness via antiresolution [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, 8(5): 743-749.
- [48] ZHANG Zhaoxia, LI Zhangyin, LEI Jian, et al. Environmentally robust immersion supercritical lens with an invariable sub-diffraction-limited focal spot [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(10): 2296-2299.
- [49] FANG Wei, LEI Jian, ZHANG Pengda, et al. Multilevel phase supercritical lens fabricated by synergistic optical lithography [J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(6): 1469-1477.
- [50] ZHU Xufeng, FANG Wei, LEI Jian, et al. Supercritical lens array in a centimeter scale patterned with maskless UV lithography [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(7): 1798-1801.
- [51] QIN Fei, LIU Boqing, ZHU Linwei, et al. pi-phase modulated monolayer supercritical lens [J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 1-9.
- [52] GONG Li, LIN Jian, HAO Chenglong, et al. Supercritical focusing coherent anti-Stokes Raman scattering microscopy for high-resolution vibrational imaging [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(22): 5615-5618.
- [53] ZHU Xiaolong, YAN Wei, LEVY U, et al. Resonant laser printing of structural colors on high-index dielectric metasurfaces [J]. *Science Advances*, 2017, 3(5): e1602487.
- [54] YUE Fuyong, ZHANG Chunmei, ZANG Xiaofei, et al. High-resolution grayscale image hidden in a laser beam [J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7(1): 17129.
- [55] HAO Chenglong, NIE Zhongquan, YE Huapeng, et al. Three-dimensional supercritical resolved light-induced magnetic holography [J]. *Science Advances*, 2017, 3(10): e1701398.

Advances in the Sub-diffraction Limited Light Modulation by Supercritical Lens (Invited)

ZHENG Yiyin, QIN Fei, LI Xiangping

(Key Laboratory of Fiber Optic Sensing and Communication in Guangdong Province, Institute of Photonic Technology, Jinan University, Guangzhou 511443, China)

Abstract: Compare with conventional refractive-type optical lens, planar diffraction lens has shown significant advantages in terms of reduced volume, light weight, facile fabrication, and easy to integration, etc. The traditional planar diffractive lens, for instance Fresnel zone plate, usually focuses light into an Airy spot with the lateral size of $0.61\lambda/\text{NA}$, which is known as Rayleigh Criterion. Squeezing the focal spot beyond Rayleigh criterion will bring more benefits for practical applications. Different from the refractive type optical lens, planar diffraction lens provides a higher degree of freedom for the light field modulation, the lateral size of the focal spot can be customized by optimizing the structural parameters. Optical super-oscillation refers to the phenomenon in which a band limited function can be oscillated much faster than the fastest Fourier components in the focal region through delicately control the interference effect, then a sub-diffraction limited focal spot will be obtained in the focal plane. Under the guidance of the optical super-oscillation theory, planar diffractive lenses with sub-diffraction limited light modulation property in free space attract extensive attention in recent year. As its typical representatives, supercritical lens becomes one of the hot topics in the research field of planar metalenses, owing to its capability of effective balancing the lateral size and focusing efficiency of the sub-diffraction limited focal spot. To date, several different kinds of configurations are usually used to construct the supercritical lens, including photo sieves, metasurfaces, etc. Nevertheless, the zone plates type with concentric phase or amplitude belts is still the favorite configuration for the construction of supercritical lens. The super-oscillation condition in the focal plane could be accomplished through the optimization of the width and radial position of each zone belt. To acquire the insightful meaning in physical level about the constructive and destructive interference process, optimization-free algorithm is another effective technique for the designing of the supercritical lens. By utilizing the optimization-free technique, a customized focusing field with significantly large field of view can be achieved. Supercritical lens with binary amplitude and binary phase schemes is the easiest way to be implemented. However, the focusing efficiency is relatively small for such binary configuration. Discretizing the binary phase into multilevel phase configuration could be significantly improve the focusing efficiency. By using the sub-diffraction limit focal spot, several attractive applications have been

demonstrated, including label-free far-field optical super-resolution imaging and high-density light induced magnetic holography, etc. In this review, we summarized the research advances of the supercritical lens, including the design principle, light modulation schemes, and its practical applications. Finally, a conclusion and short perspective are presented from an application-friendly point of view. The supercritical lens provides an effective method to break the diffraction limit. Its super-resolution focusing and imaging property is purely physical without any material response process. At the same time, its micron-level structure feature size enables the lens to be fabricated by the mature, fast and low-cost technology, which provides feasibility for its massive production. It has a wide application prospect in microscopic imaging, telescopic system, failure detection, precision machining, high density storage and other fields.

Key words: Diffractive optics; Light field modulation; Supercritical lens; Sub-diffractive limited focusing; Super-resolution imaging

OCIS Codes: 050.1965; 050.1970; 160.3918