

飞秒激光微纳3D打印新进展*

——首次实现微尺度光波段3D Luneburg透镜

赵圆圆^{1,2} 郑美玲^{1,†} 段宣明^{2,††}

(1 中国科学院理化技术研究所 仿生智能界面科学中心有机纳米光子学实验室 北京 100190)

(2 中国科学院重庆绿色智能技术研究院 机器人与3D打印技术创新中心 重庆 400714)

2016-09-14收到

† email: zhengmeiling@mail.ipc.ac.cn

†† email: xmduan@cigit.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20161106

梯度折射率光学(gradient-index optics)是光学领域近年来蓬勃发展的研究分支之一,其研究的对象是非均匀折射率介质中的光学现象^[1]。发生于非均匀介质中的光学现象在自然界是一种普遍存在的客观物理现象。早在公元100年,人们就已观察到“海市蜃楼”、“沙漠神泉”等奇景,都是由于大气层折射率的局部不均匀变化对地面景色产生折射而出现的一种奇观。通过对这些自然现象的观察、研究,人们逐渐领悟到材料折射率的非均匀性可以导致一些均匀介质所不具有的特异光学性能,比如隐身斗篷^[2,3]、光学“黑洞”^[4]、平板聚焦透镜^[5]等。

利用材料折射率的梯度变化特性,可设计和制作出物理表面看上去为平面的透镜,或者制作出不同于传统球面透镜的消像差透镜系统。这种在成像方面消像差的解决方案大大地促进了梯度折射率光学从材料制造、相差理论、光学设计、应用开发等方面的快速发展。早在1854年,J.C. Maxwell就描述了光在梯度折射率(GRIN)介质中传播的表征方程,并提出了现在人们所知道的Maxwell鱼眼透镜^[6],但是这种透镜并不具有现实使用意义。1944年,R.K.Luneburg提出了一种现实可用的球对称折射率渐变分布的球透镜模型^[7],
$$n(r) = \sqrt{2 - (r/R)^2}$$
(R 为Luneburg透镜的半径, r 为径向坐标, $n(r)$ 为 r 处对应的折射率),其折射率从中心位置($r=0, n=\sqrt{2}$)沿径向逐渐减小($r=R, n=1$),入射到Luneburg透镜上的平行光线可以无像差地聚焦到球面上的一点,因此Luneburg透镜可实现无像差的理想成像或者理想聚焦。而

传统的球面透镜由于像差的存在,无法实现光线的理想聚焦(图1)。

国内外关于GRIN材料Luneburg透镜的研究成果虽然已被大量报道,但依然存在许多亟待解决的问题。传统的离子交换技术无法实现大折射率差 Δn 的GRIN材料,通过微纳超材料(metamaterials)结构实现GRIN光学材料主要源于2006年变换光学诞生所引发的研究热潮。当微纳超材料的结构周期尺寸远小于波长,其结构可以视为具有一定折射率的等效介质^[8]。调节微纳结构的占空比,可以得到复杂GRIN介质。目前已报道的基于微纳结构渐变折射率光学的Luneburg透镜研究及实验验证主要集中在二维(2D)结构^[9,10],其应用潜力远远没有被开发。由于点光源发出的是球面波,为了实现真正的理想成像并能真正利用Luneburg透镜的广视场功能,设计、制备光波段3D Luneburg透镜并研究其理想成像功能非常必要。但是,迄今为止,所有已报道的GRIN材料的制备技术主要是基于标准的电子束光刻及离子束刻蚀等平面器件加工技术,只能制备2D形式的Luneburg透镜器件^[9,10],难以在光波段实现3D

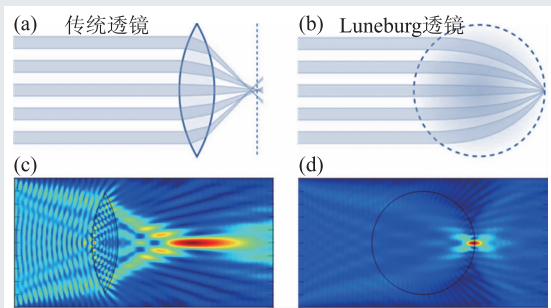


图1 (a)传统透镜和(b)Luneburg透镜的光线轨迹对比;(c)传统透镜和(d)Luneburg透镜的模场分布对比(入射波长相等),传统透镜有像差聚焦光斑大于Luneburg透镜无像差聚焦光斑

* 国家重点研发计划纳米科技重点专项(批准号:2016YFA0200500)、国家重点基础研究发展计划(批准号:2010CB934100)、国家自然科学基金(批准号:91323301,61275171,61475164)资助项目

Luneburg 器件的制备。

超衍射多光子激光直写加工，是一种低成本、快速、高精度的微纳尺度3D打印技术，它可以突破光学衍射极限的限制，将反应区域局限于光斑焦点中心极小的三维空间内，实现任意复杂三维微纳结构的加工^[11, 12]。2010年Wegner小组利用激光直写技术在变周期的聚合物木堆光子晶体结构中，实现了1.5—2.6 μm波长范围的准三维隐身地毯结构^[13]；基于此工作的灵感，我们研究团队利用自主搭建的超精细飞秒激光直写设备，制备了基于渐变简单立方光子晶体结构的3D Luneburg 透镜器件，在国际上首次制备了工作在光波段的3D Luneburg 透镜，使光学领域3D Luneburg 透镜从理论走向现实。

面对光波段3D Luneburg 透镜器件在设计、加工、表征方面的挑战，我们首先完善了利用周期性的聚合物微纳超材料结构实现等效折射率调控的精确物理模型，详细阐述了通过改变占空比 f （由周期性微结构排布情况，周期性晶格常数 a ，

聚合物纳米线的线宽 W 等参数决定)调控出来 Luneburg 透镜所需要的等效折射率分布。如图2中蓝色实线所示，我们利用十层离散的阶梯状折射率分布来近似连续渐变的折射率分布，每一层结构所需要的局域等效折射率如图2中红色的梯度折线所示，不同的等效折射率值 n_{eff} 和微结构参数占空比 f 是一一对应的，可通过微结构的空色散关系进行推导： $\omega(k) = (c/n_{\text{eff}}) \cdot k$ （其中 $\omega(k)$ 为波矢 k 处的光的频率， c 为光速， k 为波矢）。其设计的3D Luneburg 透镜结构最外层结构线宽 $W = 0.18a$ ，占空比 $f = 10\%$ ，等效折射率 $n_{\text{eff}} = 1.05$ ；最内层结构线宽 $W = 0.52a$ ，占空比 $f = 82\%$ ，等效折射率 $n_{\text{eff}} = 1.41$ 。在这一调控的过程中考虑了有效介质理论，当入射电磁波波长 λ 远远大于周期 a 单元尺寸时($a/\lambda \rightarrow 0$)，周期微结构可以等效为均匀的介质^[8]。我们重点阐述了这种有效介质理论适用的条件，仿真结果表明：对于简单立方超材料结构，当光波长大于三倍的结构尺度($\lambda \geq 3a$)时，周期微结构可被看作折射率均匀的等效介质，设

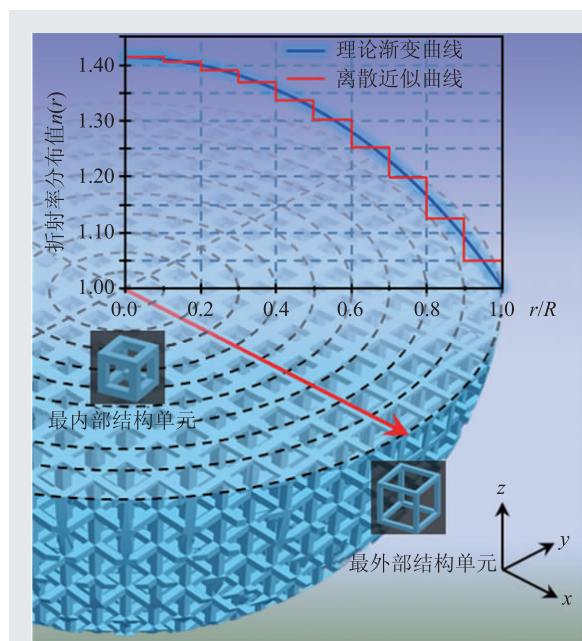


图2 十层渐变简单立方超材料结构的3D Luneburg 透镜的剖面模型图，上部的坐标图为设计的和理想的3D Luneburg 透镜的折射率分布曲线对比，设计的3D Luneburg 透镜的折射率分布为十层阶梯渐变的离散数值(图中 R 为 Luneburg 透镜的半径， r 为径向坐标， $n(r)$ 为 r 处对应的折射率)

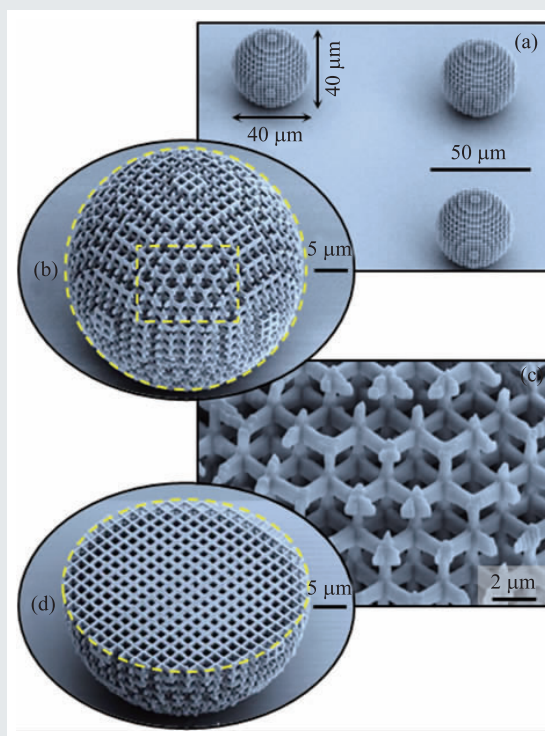


图3 (a)3D Luneburg 透镜阵列；(b)俯视全貌；(c)局部放大图；(d)横截面图

计的 Luneburg 透镜能够展示出全方向的理想聚焦性能。

其次, 我们利用飞秒激光多光子直写加工技术, 成功制备了微米尺度的 3D Luneburg 透镜, 由于受到加工精度的影响(最小不变形线条的线宽为 120 nm)^[11], 为了得到高保真度的器件, 我们将结构周期设定为 $a=2\ \mu\text{m}$, 因此制备的 3D Luneburg 透镜器件工作波长位于中红外波段 ($>6\ \mu\text{m}$)。利用扫描电子显微镜(SEM)表征了 3D Luneburg 透镜表面和内部形貌, 整个球形透镜的直径为 $40\ \mu\text{m}$ (图 3(a)和(b)), 从图 3(c)可以看出结构基本单元为

简单立方结构, 从图 3(d)可以看出器件横截面从内向外结构线宽逐渐减小, 其实际结构参数与理论上设计值相一致。

最后, 利用德国 Neaspec 公司的近场光学显微镜(SNOM)表征了 3D Luneburg 透镜在平面波入射下的聚焦性质。通过 SNOM 所配置的原子力显微镜(AFM)探针扫描球顶端的光场, 会聚光场受到探针的散射被探测器收集, 利用层层扫描的方法来还原球透镜顶端的三维光场分布, 其分布特性与 COMSOL 仿真结果基本一致, 如图 4 所示。测量的聚焦光斑的光场强度的半高全宽(FWHM)为 $0.52\ \lambda$, 等价于半个波长(阿贝衍射极限)^[14], 验

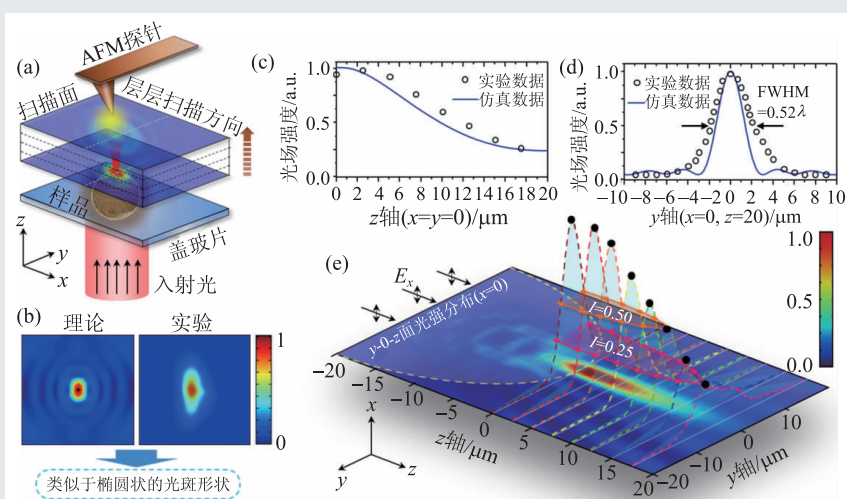


图 4 (a)利用近场光学显微镜探测 3D Luneburg 透镜表面的光场信息示意图; (b)理论仿真与实验测得的聚焦光斑横截面内光强分布对比, 根据矢量衍射理论, 其类似于椭圆状的光斑形貌, 是由于入射光的偏振引起的^[15]; (c)实验测得和理论计算的纵向光场强度($|E_z|^2$)分布; (d)实验测得和理论计算的横向光场强度($|E_z|^2$)分布; (e)背景图为 $x=0, y=0-z$ 面电场强度仿真结果, 位于其上的线条沿着 y 轴方向电场强度的测量结果, E_x 表示沿 x 方向的偏振光电场

证了 Luneburg 透镜具有理想三维聚焦的性能。

这项研究成果最近在 *Laser & Photonics Reviews* 上发表^[16], 被当选为 2016 年第 10 卷第 4 期的封面论文(Front Cover)。文章利用飞秒激光 3D 直写技术制备的聚合物 3D Luneburg 透镜器件, 其大小仅相当于人类头发直径的一半, 第一次将 3D Luneburg 透镜的工作波段从微波推广至光波段, 使对 3D Luneburg 透镜的研究从宏观的微波领域转向光学领域迈进了坚实的一步, 该研究成果将进一步促进微小光学和变换光学的发展, 并可望拓展纳米级 3D 打印技术在微纳米器件领域中的全新应用。

参考文献

- [1] 乔亚夫. 梯度折射率光学. 北京: 科学出版社, 1991
- [2] Schurig D *et al.* Science, 2006, 314: 977
- [3] Liu R *et al.* Science, 2009, 323: 366
- [4] Genov D A *et al.* Nature Physics, 2009, 5: 687
- [5] Pendry J B *et al.* Phys.Rev.Lett., 2000, 85: 3966
- [6] Maxwell J C. Cambridge and Dublin Math. J., 1854, 8: 188
- [7] Luneberg R K. Mathematical Theory of Optics. University of California Press, 1944
- [8] Cai W *et al.* Optical Metamaterials. New York: Springer, 2010
- [9] Gabrielli L H *et al.* Opt. Express, 2011, 19: 20122
- [10] Falco A D *et al.* Opt. Express, 2011, 19: 5156
- [11] Kawata S *et al.* Nature, 2001, 412: 697
- [12] Sun Z B *et al.* Adv. Mater., 2008, 20: 914
- [13] Ergin T *et al.* Science, 2010, 328: 337
- [14] Dyachenko P N *et al.* Opt. Lett., 2012, 37: 2178
- [15] Quabis S *et al.* Opt. Commun., 2000, 179: 1
- [16] Zhao Y *et al.* Laser Photonics Rev., 2016, 10: 665