

3D打印光学元件

飞秒激光打印分辨率
小于衍射极限的光学元件

飞秒激光高精度3D打印技术，为先进的零部件及产品的工业制造提供了广泛的设计自由度。

文/Benedikt Stender, Fabian Hilbert, Jonas Wiedenmann, Alexander Krupp, Willi Mantei, Ruth Houbertz

作为21世纪的一种赋能技术，3D打印不依赖于复杂且昂贵的传统工具加工，具有一步成型的加工特点，在快速成型与制造领域越来越受欢迎。3D打印不仅能对加工原型实现快速评估，并且在中-低规模的生产中，其生产效率也高于传统制造方式。在多数情况下，与传统的组装件相比，3D打印的部件重量更轻，整体机械稳定性更好。尽管3D打印的零部件已经获得了许多应用，但是由于加工精度低和缺乏合适的材料，打印具有光学功能的元器件仍然无法实现。

然而，飞秒激光诱导的双光子吸收，能够实现亚微米级的打印分辨率，从而可以实现真正的高精度3D打印。^[1]飞秒激光3D打印，是将激光束聚焦到盛有液体胶的特殊玻璃或高分子容器中。由于双光子或多光子吸收，液体胶仅在激光焦点区域被光固化，以此实现高精度3D打印。目前大多数的3D打印使用的是逐层打印技术，与此相比，飞秒激光高精度3D打印技术，在固体材料内部和表面都有一样的打印效果，因此不仅可以实现增材制造，也可以实现减材制造。

高精度3D打印将微纳米制造和传统制造有机地连接起来，其打印的分辨率小于衍射极限，打印的元器件的尺寸可以从亚微米扩展到厘米范围。高精度3D打印技术能够制造高宽比高达43:1的结构，并且通过控制焦点移动实现快速制造，因而能够打印出传统方法无法制造的超高质量的微光学、微流体及其他功能部件。

分辨率和可扩展性

高精度3D打印技术于1997年首次报道。^[2]随着国际上多个学术研究机构进入该领域研究，高精度3D打印技术一直处于稳步推进发展中。目前高精度3D打印技术已经发展到可以适用于工业应用的水平。由于双光子吸收效应仅限于达到光聚合阈值的激光焦点区域，并且双光子吸收的

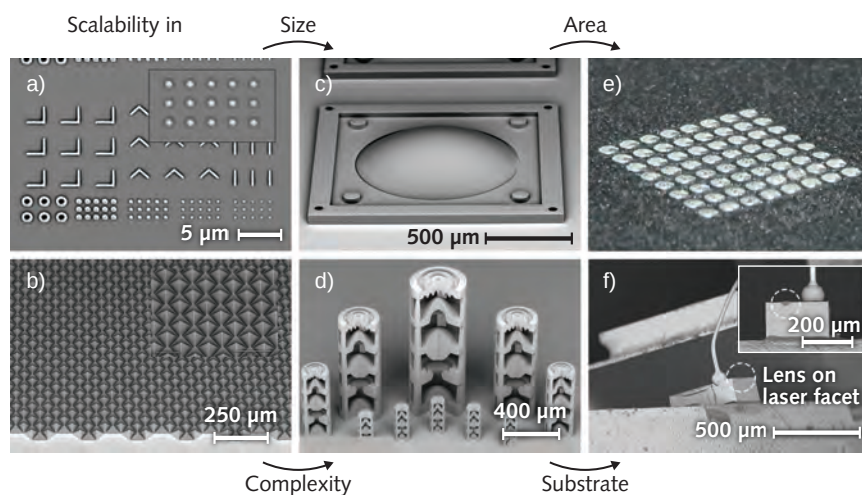


图1：高精度3D打印对构件的尺寸、复杂度、形状及衬底都具备很高的加工自由度。打印的结构如电镜图所示：(a) 任意排列的亚微米结构；(b) 具有确定角度的微米级锥形光导结构；(c) 由1毫米镜头组装而成的宏观结构；(d) 一步成型的微透镜堆叠结构（图中的构件被部分剪切掉，以展示打印构件的不同局部）；(e) 1cm×1cm镜头阵列，用于复制制作的母版；(f) 用于光束整形的圆柱形微透镜，该微透镜直接打印在分布式反馈激光器激光发射端面上（图中的分布式反馈激光器来自nanoplus公司）。

概率正比于激光功率的二次方,因此最小的打印尺寸可低于衍射极限,达到百纳米的精度。^[3]这种打印的最小尺寸又叫做体元,就是这些一个小小的体元,最终构成了宏观的功能部件。通过调节激光功率、光路中的聚焦光学元件、制造方法及加工原料,可以实时调整最小打印尺寸的大小。

用于高精度3D打印的激光直写技术,由于其高效的产出,不依赖掩模的数字化数据预处理,无论对构件的尺寸、复杂度、结构化的区域及衬底都具备很高的加工自由度(见图1)。图1(a)-(c)展示了3D打印结构在尺寸上的可伸缩性,如图1a是任意排列的亚微米结构,图1b是微米级的图形,图1c则是将直径1mm的透镜集成到一个具有校准功能盒体中形成的一个宏观结构。

高精度3D打印是一种真正意义上的3D制造。如图1d这种复杂的堆叠微透镜组,只需要一步成型,而传统的方法是将一个个光学元件相互对齐排列起来搭建透镜组结构。这种堆叠的微透镜组结构在医学上可以用作内窥镜,传统的搭建方法很容易造成内窥镜的透镜组结构在使用中失灵。

大规模生产的前提是能够实现大面积制造。通过实施精密制造方法,^[4]高精度3D打印可以制造出用于紫外纳米光刻的晶圆级光学元件,如透镜阵列(如图1e,为1cm×1cm的透镜组),或者制造用于诸如注塑、热压等其他大规模生产的复制模具。

此外,通过合适的设计,高精度3D打印可以实现直接大规模生产制造。与其他3D打印技术不同,高精度3D打印不是逐层打印,因此不涉及材料的去除步骤,所以也就不受基板的限制。如图1f,用于光束整形的

微透镜直接打印在分布式反馈激光器发射端面上(激光器来自nanoplus公司),用来补偿由于快慢轴传播引起的椭圆光束。

尽管用传统的微距镜头也可以把畸变的光束整形成球面波,但是高精度3D打印可以在诸如波导、光纤、探测器等任何主动或被动元器件的端面打印需要的器件,因而为设计新的小型化器件及产品封装提供了很高的自由度。此外,也可以打印合束器之类的器件,将多个波长的光束合并输出,其在片上实验室(lab-on-chip)上可以得到很好的应用。

大高宽比结构

大高宽比结构特别适用于三维微机电系统。微机电结构一般通过

构件高度越高,需要涂覆的光刻胶就越厚,制造难度就越大。

与LIGA工艺相比,高精度3D打印是将激光束聚焦到液体光刻胶中。液体光刻胶盛在容器中,容器的深度范围在从毫米量级到厘米量级。当激光束由上而下聚焦到光刻胶中时,容器深度由显微镜物镜的工作距离决定;当激光束由下而上聚焦到光刻胶中时,容器深度则由运动轴的行程决定。高精度3D打印的这种工作方式,可以很容易地打印出高度为厘米量级的构件。当打印高度大于100μm的大高宽比构件时,还需要考虑另一个因素——光刻胶的稳定性。高精度3D打印通常使用的是液态光刻胶,如ORMOCERs。ORMOCERs是一种无机-有机混合的聚合物,具

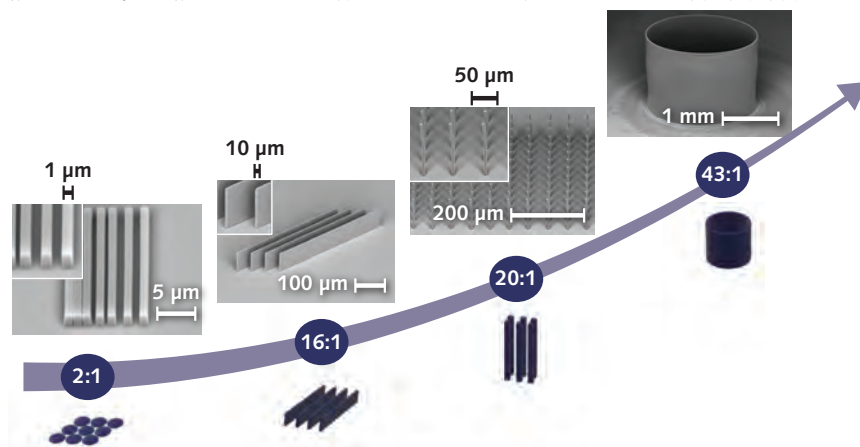


图2: 高精度3D打印成型的高宽比在2:1到43:1范围的结构。高精度3D打印技术可以打印出高度从毫米到厘米范围的结构,能实现更大的高宽比。

LIGA (LIGA是德文Lithographie、Galvanoformung和Abformung三个词,即光刻、电铸和注塑的缩写)工艺实现,主要用到SU-8光刻胶和铬掩膜板。LIGA工艺包括好几个工艺流程,其中最具有挑战性的步骤就是在基板上均匀地涂上几百微米厚的光刻胶。例如,最小打印宽度为1μm时,在基板上涂100μm厚的光刻胶,就可以实现100:1的高宽比结构。然而,

有玻璃般的透光性和硬度。

高精度3D打印可以打印出高宽比为1:1或2:1的波导结构,也可以打印出高宽比为16:1的墙壁结构(见图2)。这种墙壁结构宽5μm,高80μm,是通过无限视场(Infinite Field of View, IFOV)模式加工而成。无限视场是一种智能运动控制技术,它通过控制扫描振镜和位移平台实现激光焦点的同步偏转。无限视场这种

加工模式,使得打印尺寸大于物镜视场范围的元件成为可能。图2给出的高宽比为16:1的例子中,打印的墙壁结构的长度就是物镜视场的4倍。当然,也可以打印高宽比为20:1的结构,如图2所示的针状结构。这种针状结构高100 μm ,底座5 μm ×5 μm ,可以将外部光源导入到活体标本中,用于活体细胞的光激发研究。这种针状结构也可以作为原子力显微镜的悬臂,用于评估特殊的形貌结构。

除了以上几种结构,还可以打印等值曲面结构。等值曲面的打印,先用激光固化光刻胶,形成一个封闭的壳体结构,然后冲洗掉未曝光的光刻胶。显影之后,用紫外灯曝光壳体内部的光刻胶,使壳体与内部形成均匀连接。用这种方法打印微透镜组,每个透镜的加工时间只需1~5s,^[5]其打印效率比传统加工方法提升了95%。

图2中右上方给出的是3D打印的高宽比为43:1的柱面结构,该柱面高1.7mm,直径2mm。该柱面结

构也是通过无限视场模式打印的,柱面的圆周结构由线性位移平台和激光焦点的径向偏转配合形成的圆周运动打印而成,这种打印方法也叫做轨道光束操控。为了展示柱面结构的壁厚为0.04mm,所以没有打印柱面结构上面的盖子。打印这种类似结构的效率为3.6mm³/h,当然也可以通过光束整形工具将光束分束,或者整形成平顶光束来进一步提高打印效率。

值得注意的是,图2中给出的微结构只是用来展示大高宽比结构的几个例证,并不是极限案例。图中显示的高宽比43:1,也不是极限值。通过优化设计,可以打印更大的高宽比结构,宽度尺寸甚至能缩小到亚微米量级。

结论

高精度3D打印由于打印精度高,对打印的尺寸、复杂度、形状及衬底具备良好的加工自由度,将越来越多地用于工业应用中。高精度3D

打印的分辨率小于衍射极限,打印的元器件尺寸可以从亚微米扩展到厘米范围,因此微光学应用中的光学质量表面结构的3D打印,将是主要应用。高精度3D打印技术能够制造出高宽比达43:1的结构,并且能够通过控制焦点移动实现快速制造,因而能够打印出超高质量的微光学、微流体及其他功能部件。这样一种先进的加工方式,其加工能力是传统加工方法所无法企及的。□

参考文献

1. X. Zhou et al., AIP Advances, 5, 3 (2015).
2. S. Maruo et al., Opt. Lett., 22, 2, 132–134 (1997).
3. S. Steenhusen, “Untersuchungen zur sub-100 nm Strukturierung von Hybridpolymeren mittels Zwei-Photonen Absorption und Anwendungen,” Friedrich-Schiller-Universität Jena (2018).
4. B. Stender et al., Adv. Opt. Technol., 8, 3–4, 225–231 (2019).
5. B. Stender et al., Laser Tech. J., 14, 2, 20–23 (2017).

上接第22页

光纤输出辐射的整形和导引几乎带来了无限可能。

另一种常见的光纤尖端类型是带角度的光纤头(侧面出射技术)。这些光纤尖端用于在人体中去除组织。对于这种应用,还可以用控制良好的CO₂激光束,将单独设计的光学元件熔接到光纤端面上。根据特定的医学要求,可以使用CO₂激光熔接技术,来调整光纤尖端的侧面或径向(内辐射)激光发射。

用于光纤到光纤熔接的成熟熔接装置已经在市场上存在很多年了。可以控制加热区位置和大小基于CO₂激光的光纤熔接系统的出现,为“将单根和多根光纤熔接到各种尺寸和形状的光学元件上”开辟了新的可能性。实时控制熔接温度的能力,使精确和可重复的熔接结果达到了新水平。温度控制的熔接还为熔接不同的玻璃类型(例如软玻璃光纤)带来了可能性。□

参考文献

1. H. Fujita, Y. Suzuki, and A. Tachibana, Appl. Opt., 15, 320–321 (1976).
2. J. H. Chong and M. K. Rao, Opt. Express, 11, 1365–1370 (2003).
3. See <http://bit.ly/HeraeusRef>.
4. See <http://bit.ly/SchottRef>.
5. G. Keiser, F. Xiong, Y. Cui, and P. P. Shum, J. Biomed. Opt., 19, 8, 080902 (Aug. 28, 2014); <http://bit.ly/JBiomedOpt>.
6. K. Bescherer, D. Munzke, O. Reich, and H.-P. Looock, Appl. Opt., 52, B40–B45 (2013).