施普林格·自然图书章节。

第8章

这是以下章节的预印本：C. Florian、X. Du、C. B. Arnold，《物质探测光：复杂照明对超快纳米结构化的影响》，发表于《超快激光纳米结构化–极限尺度的探索》，R. Stoian 和 J. Bonse 编，2023年，施普林格·自然瑞士股份公司；经施普林格·自然瑞士股份公司许可转载。最终认证版本可在线获取：https://doi.org/10.1007/978-3-031-14752-4_8

物质探测光：复杂照明对超快纳米结构化的影响

Camilo Florian[1, a]、Xiaohan Du[1, 2, b]、Craig B. Arnold 教授[1, 2, c][1] 普林斯顿材料研究与技术研究所（PRISM），普林斯顿大学，美国新泽西州普林斯顿市 Prospect Av 70号，邮编08540。[2] 机械与航空航天工程系（MAE），普林斯顿大学，美国新泽西州普林斯顿市 Olden Street 50号，邮编08540

[a] camilo.florian@princeton.edu，[b] xiaohand@princeton.edu，[c] cbarnold@princeton.edu

摘要：

要突破超快激光纳米结构化在精度和可重复性方面的极限，就必须对照明特性进行细致控制。大多数传统激光制造方法依赖高斯光束的简便性，因为其传播行为易于理解且易于生成。然而，超越高斯光束，采用单束或多束定制光束，可在优化光束轮廓的空间和时间控制方面带来诸多益处。本章重点探讨生成和操控复杂光束的方法，以及以这些非传统光源进行辐照时所产生的材料相互作用。我们首先讨论高斯光分布与更复杂光分布之间的主要差异，介绍相位和空间控制的机制，随后聚焦于与超短激光脉冲材料加工相关的空间结构化方法。这种结构化既可发生于远场传播型架构中，其中机械或光学方式生成快速变化的空间分布；也可发生于近场，即与等离激元和介电系统相关的非传播光束。本章从基础角度强调复杂光束在纳米尺度塑造材料方面的一些独特能力，同时也提及此类方法的潜在应用。

关键词：高斯光束、平顶光束、环形光束、涡旋光束、贝塞尔光束、艾里光束、等离激元聚焦、介电微透镜、时变结构化光场、双激光束

加工、双激光增材制造、直接激光干涉图案化、激光诱导正向转移、共振焦点扫描、TAG透镜。

超快激光纳米结构化第一部分：基
本过程

目录

1. 引言：传统照明与空间结构光 2. 远场方法

2.1. 平顶光束 2.2. 环形光束与涡旋光束
2.3. 非衍射贝塞尔光束与艾里光束 2.4.
全息方法

3. 近场方法

3.1. 基于等离激元的方法：扫描近场光学显微镜探针3.2. 基于
介电材料的方法：光阱辅助纳米图案化

4. 时变结构化光场

4.1. 双激光束加工“DLBP”和双激光增材制造“DLAM” 4.2. 直接激光干涉图案化“
DLIP”和激光诱导正向转移“LIFT” 4.3. 共振焦点扫描

5. 结论与展望 参考文献

1 引言：传统照明与空间结构光

高斯光束

许多微加工应用中最常用的激光束光束形状是高斯分布。这并不令人意外，因为绝大多数激光腔都设计为在或接近基横向电磁模（TEM00）下运行，而该模式对应于高斯分布。从数学角度来看，一个明显的优势是其傅里叶变换同样为高斯分布，这意味着即使光束通过透镜和物镜等聚焦元件后，仍有可能保持高斯分布。因此，在激光加工系统中的实现通常无需使用光束整形技术[Duocastella, 2012]。对于材料加工应用，有三个一般参数因其对激光辐射最终在材料上形成的特征具有影响而被认为十分重要。第一个参数称为共焦参数，是沿传播轴能量得以受限的距离范围。第二个参数是光束发散角，它取决于光束沿传播轴的变化方式。最后，了解能量能够局域化的最小光斑尺寸也十分重要。显然，当需要进行微机械加工或纳米机械加工时，这些光束尺寸会对受辐照材料最终能够实现的改性起到重要作用。这些参数可以从描述沿Z轴传播的线偏振高斯光束分布的电场数学表达式中推导出来，即Z方向上的电场（E(r,z)），如公式1-1 [Silfvast, 2004]所示：

$$E(r,z) = E_0 \frac{w_0}{w(z)} \exp\left(\frac{-r^2}{w(z)^2}\right) \exp\left[-i\left(kz + k\frac{r^2}{2R(z)} - \varphi(z)\right)\right], \quad \text{Eq. 1-1}$$

其中，z 是传播 Z 轴上的位置，w_0 是束腰半径，i 是虚数单位，r 是距中心的径向距离（公式 1-2），k 是波数（公式 1-3）。

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad \text{Eq. 1-2}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}. \quad \text{Eq. 1-3}$$

光束半径沿传播轴的变化 w(z) 可表示为瑞利长度这一参数的函数：

$$w(z) = w_0\sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_r}\right)^2}. \quad \text{Eq. 1-4}$$

瑞利长度是指从光束腰最小的位置 w_0, 沿传播轴到光束横截面面积扩大一倍，或光束半径增加至$\sqrt{2}$倍的位置之间的距离：

$$z_R = \frac{\pi {w_0}^2}{\lambda}. \quad \text{Eq. 1-5}$$

共焦参数定义为瑞利长度 $2z_R$ 的两倍，通常用于表示沿传播轴方向能量能够被限制在其中的空间范围。

对于距离大于瑞利长度的情形（远场区域），波前的曲率半径定义为：

$$R(z) = z\left[1 + \left(\frac{z_R}{z}\right)^2\right]. \quad \text{Eq. 1-6}$$

最后，高斯光束聚焦时产生的额外相移称为古依相位，可表示为：

$$\varphi(z) = \tan^{-1}\left(\frac{z}{z_R}\right). \quad \text{Eq. 1-7}$$

当光束从焦平面继续传播超过瑞利长度（式 1-5），即进入远场时，非理想高斯光束会在远离束腰的位置横向扩展。从最小束腰位置测得的角度差 w_0, 称为光束发散角 θ。对于高斯光束，光束质量因子 M^2 可用于描述真实激光束传播至无穷远时偏离理想高斯分布的程度。对于理想衍射极限高斯光束，$M^2 = 1$；而对于真实光束，$M^2 > 1$。

$$M^2 = \frac{\pi w_0 \theta}{\lambda}, \quad \text{Eq. 1-8}$$

$$\theta = \frac{M^2 \lambda}{\pi w_0}. \quad \text{Eq. 1-9}$$

高斯光束的特点是发散角较小，因此能够将这些光束的能量聚焦在非常小的体积内。对于通过数值孔径为 NA 的聚焦透镜进行聚焦的高斯光束，其能够达到的最小光斑尺寸 d_f 可用以下公式进行近似表示：

$$d_f \approx 2\frac{\lambda M^2}{\pi NA}. \quad \text{Eq. 1-10}$$

传统上，高斯光束对应的强度分布$I(r, z)$ 由式1-11给出，即电磁场（式1-1）的模平方乘以场传播所在介质的阻抗 η （在真空中传播时为 $\eta = \eta_0 \approx 377\ \Omega$）。本第2节末尾的表1中列出了高斯光束对应的强度分布图。

$$I(r,z) = \frac{|E(r,z)|^2}{2\eta}. \qquad \text{Eq. 1-11}$$

对材料加工的影响

要以高空间分辨率改性材料，通常需要高有效数值孔径系统，将高斯光束限制在尽可能小的体素内。例如，波长为1027 nm、呈高斯分布且光束质量因子 M^2 = 1.1 的红外激光，经 NA = 0.55 的透镜系统（常见于 50×显微镜物镜）聚焦后，轴向限制范围约为 6 μm（式1-5），横向限制范围为 1.43 μm（式1-10）。当在静态样品表面进行辐照时，产生的材料改性会呈现类陨坑形貌。对于体内改性，例如透明材料的特殊情况，实际上可以形成几何形状与体素尺寸 [1]高度相符的改性结构。图1展示了飞秒激光单脉冲在聚甲基丙烯酸甲酯（PMMA）样品表面和体内改性所形成的不同烧蚀形貌。当聚焦光束的体素位于表面附近时，只会产生浅表的火山口状改性。然而，当体素位于表面下方稍深处时，辐照会在材料体内形成改性结构，其尺寸和形状与聚焦光束体素相符。

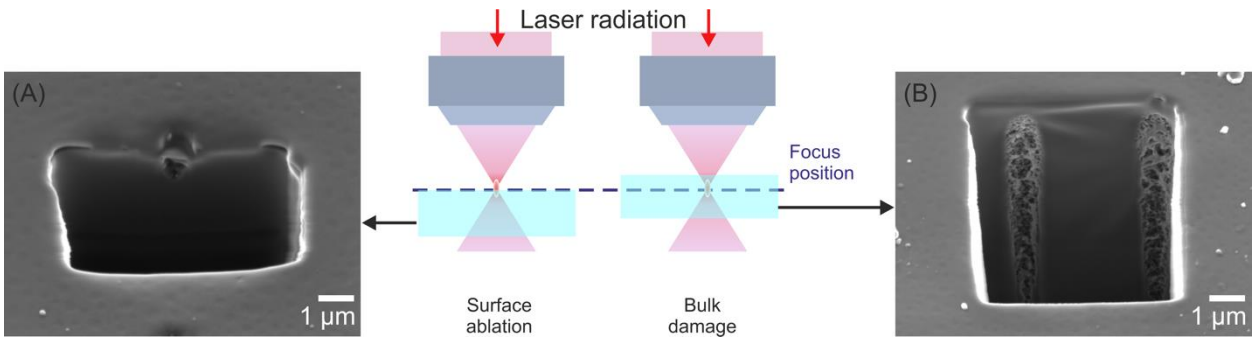


图1. 单个飞秒激光脉冲（1027 nm，450 fs）经数值孔径为 = 0.55 的显微物镜聚焦后，在聚甲基丙烯酸甲酯（PMMA）样品表面（A）和表面稍下方（B）产生的激光辐照扫描电子显微镜图像。使用聚焦离子束选择性地烧蚀材料，以显示光束改性区域沿轴向的延伸范围。图像以 45o 的入射角采集，以观察聚焦离子束烧蚀区域的壁面 [Florian, 2015]。经爱思唯尔许可转载，版权所有 (2015)。

[1] 最终改性区域的尺寸和形状将受到光与物质相互作用的显著影响。

从应用角度来看，只要材料表面位于聚焦体素的位置范围内，且该处的光强足以对材料进行改性，就可以使用聚焦高斯光束对材料进行改性。然而，情况并非总是如此，尤其是在许多材料加工工业应用中常见的高粗糙度非平坦表面上。这里的挑战在于，如何保持待处理材料与聚焦体素位置之间的精确对准。虽然可以通过使用高精度定位平台来解决这一问题，但这可能会大幅增加总体生产成本并延长加工时间。因此，改变激光束的光强和传播特性，是拓展传统高斯光源优势的可靠替代方案。

结构光：超越高斯光束

在可用于提升光束在材料微纳加工方面效率的各种变化方式中，应用最广泛的方法可分为两类：(i) 仅依赖空间强度分布变化的技术（包括远场和近场配置）；(ii) 时变结构化光场，可改变光束的强度分布、传播特性和/或其与物质的相互作用。

第一类的目标是对强度分布的形状进行空间调制，以满足最终加工要求。材料加工应用中广泛使用的一个典型例子是平顶光束 [Rung, 2013]。这种光束由高斯光束经过简单调制而形成，其最终空间分布在中心形成均匀的强度平台。该平台能够改性材料，产生边界清晰的改性区域尺寸、形状和深度，同时基本不受所用激光能量的影响。当需要加工不同厚度的材料，同时保持相同的改性尺寸时，这种光束尤其方便。我们将在第 2 节讨论远场中的不同空间光束形状，并在第 3 节讨论近场配置；与高斯光束相比，这些方案在实现更高空间分辨率的特征或更长的加工轴向范围方面具有优势。

在第二组中，时变结构化光场包含对光束强度分布、传播或其与物质相互作用动力学的快速调制。作为此类光场的一个例子，在常规直写激光系统中使用可调声学梯度折射率（TAG）透镜，可在较大的轴向范围内产生快速变化的强度分布；与传统聚焦高斯光束相比，在超过 ~140 KHz [Du, 2021] 的工作振荡频率下，它能提供更长的轴向工作距离。快速变化的特性 of

在时间上控制光束，使得这类复杂光束能够应用于先进材料加工领域；我们将在第4节中进一步展开讨论。最后，本章将概述所介绍的光束整形技术及其在追求极小尺度的材料机械加工中的作用。

2 远场方法

2.1 平顶光束

生成平顶光强分布的一种方法，是在高斯光束的传播路径中放置衍射掩模，以形成艾里图样，随后通过透镜进行聚焦 [Rung, 2013]。焦平面上的分布对应于具有均匀光强区域并形成平台的圆形光束。与高斯光束分布不同，这种强度分布的边缘清晰，形成如图 2 所示的特征性帽形。与高斯光束相比，其质量因子 M^2 通常大于 10，因此无法实现紧聚焦或轴向约束（公式 1-5 和公式 1-10）。尽管如此，在材料加工应用中，均匀光强平台所带来的优势仍可用于激光切割 [Rung, 2013], 激光退火[Miyasaka, 1999], 和脉冲激光沉积 [Chrisey, 1994], 等应用。此外，这种光束分布也适用于多种成像应用，因为可以利用其均匀光强区域对特定感兴趣区域进行均匀照明 [Rowlands, 2018]。关于使用此类光束对材料进行最终改性，图 2 给出了对比结果，展示了高斯光束通常形成的火山口状改性，以及平顶分布形成的方形阱状改性。

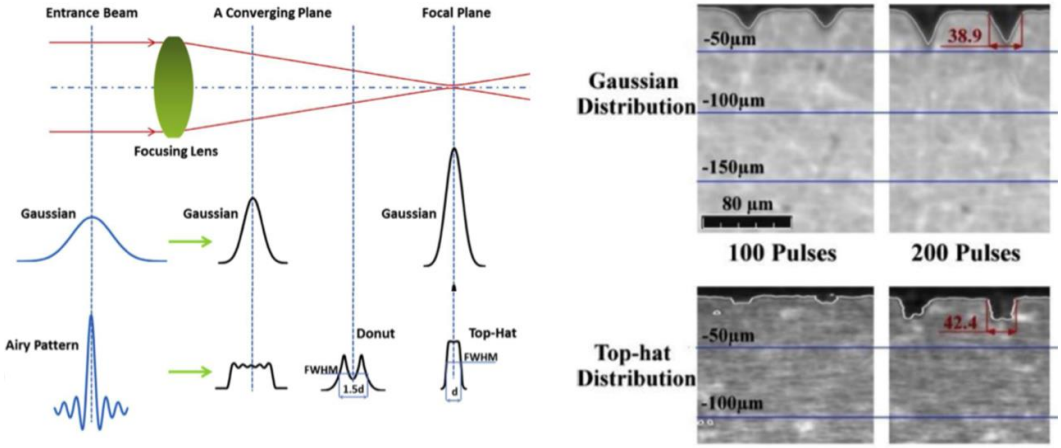


图 2. 高斯图样和艾里图样经过普通透镜聚焦后，分别在焦平面形成高斯强度分布和平顶强度分布。右侧为光学图像的侧视图

展示了在经过 100 个和 200 个脉冲辐照后，氮化硅样品上相应的材料烧蚀情况。可以看出，对于平顶分布，烧蚀形状遵循方形光束形状，这与高斯光束的情况形成对比。经 [Nasrollahi,2020] 许可转载。版权所有（2020），爱思唯尔。

2.2 环形光束与涡旋光束

高斯光束也可以进行调制，形成环形光束分布，对应于甜甜圈形强度分布，其中强度峰值呈环状分布，而中心处强度达到最小值。与平顶光束的生成类似，当艾里图样经过聚焦透镜聚焦时，在焦平面之前的位置可以形成环形强度分布，如图 2 [Nasrollahi, 2020] 所示。环形光束通常可用于照明系统，因为它能够在保持中心区域不受影响的同时，对环形区域施加变化。这种效应被超分辨率显微技术 STED [Hell, 1994]所利用。对于材料加工，机械加工应用可能需要制备如图 3 所示的环状改性结构。在气泡辅助激光诱导正向转移（BA-LIFT）[Suhara, 2020]过程中诱导材料推进的案例中，可以找到一个实例。在该案例中，在聚合物层与透明基底之间的界面处生成环状改性结构，从而产生一个凸起，使液体能够向前推进更远的距离，同时不会损害转移材料的空间分辨率。

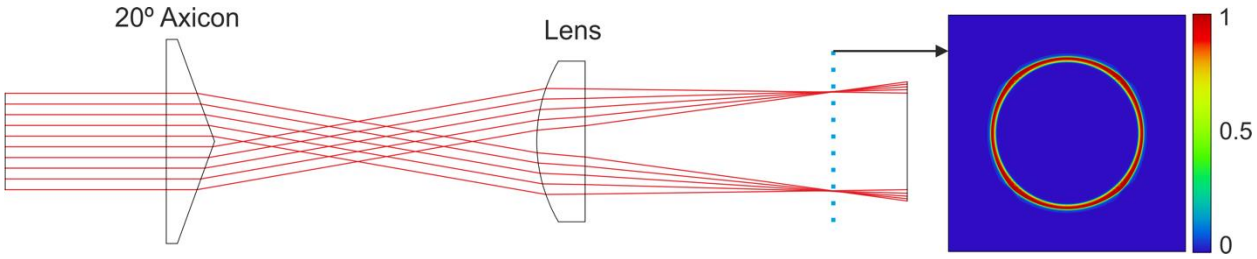


图 3. 结合锥透镜和聚焦透镜的系统的光线追迹。透镜焦平面处形成环形光束。该位置的归一化强度分布以右侧的伪彩色图显示。图片来源：Camilo Florian。

类似地，涡旋光束也能产生相同的甜甜圈形强度分布。不过，其形成原因不只是常规的强度分布变化。在这种情况下，经过定制的光相位会沿着光束传播方向发生变化，形成扭曲相位轨迹，进而导致某些光波相互抵消，从而产生一个强度为零的区域

，如图 4 [Spinello, 2016]所示。实验中，可让高斯光束通过能够改变其相位的光学器件，从而改变其有效强度分布 [Wang, 2018]。可采用不同方法来产生此类光束，有些方法需要额外的光学元件，例如相位板 [Guo, 2020],、q板 [Anoop, 2014] [Nivas, 2017], 、空间光调制器 [Allegre, 2012], 、变形镜[Gong, 2014], 、双折射液晶 [Ge, 2017] 和 s板 [Tang, 2021], ；也可以利用激光谐振腔内产生的不同振荡模式。

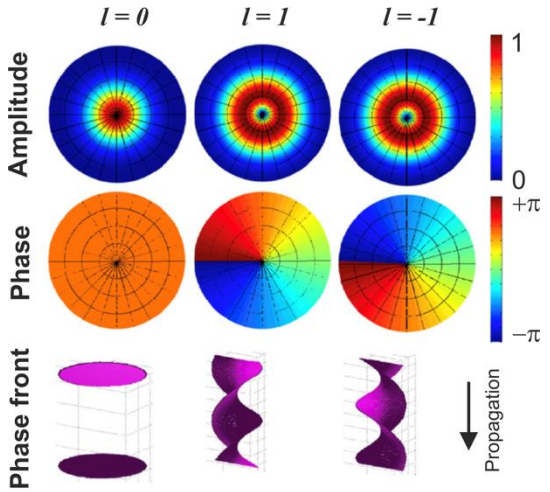


图4. 拉盖尔-高斯模式及相反符号模式‘l’叠加的示例。第一行：电场的振幅分布。第二行：相位分布。第三行：传播过程中的相位前沿形状。转载自[Spinello，2016], 版权（2016），经爱思唯尔许可。

从空间强度分布的角度来看，环形光束与这些具有甜甜圈形状的特殊涡旋光束可以等效。改变涡旋光束的偏振后，情况便会发生根本性变化，此时这种光束称为矢量涡旋光束。当涡旋光束的某种偏振触发材料相互作用时，环形光束与偏振涡旋光束所产生的相互作用会有显著差异，如图5所示的两个辐照示例所示。图中，常规环形光束产生了环形改性，而强度极小值所在的中心区域未发生改性。相比之下，矢量涡旋光束能够诱导辐照区域内形成表面结构，其取向取决于光束的局部偏振。在这个特定案例中，矢量涡旋光束具有方位角偏振，从而产生了与偏振方向垂直的同心微米级环状

结构。涡旋光束已广泛应用于各种领域[Shen，2019], 包括光学陷阱的生成[Gao，2017][Gong，2018] 以及用于仿生应用的材料激光加工[Skoulas，2017]。

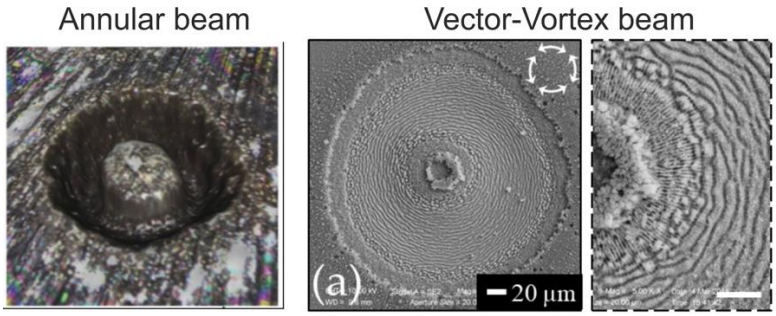


图5。左侧为光学图像，显示了在光学系统焦平面前方某一位置，用环形光束分布辐照氮化硅样品的结果；该光学系统聚焦艾里图样，如图2所示。经[Nasrollahi许可转载，版权归爱思唯尔所有（2020）。右侧的扫描电子显微镜显微图显示了使用方位角偏振的矢量涡旋光束对硅样品进行改性后的结果，白色箭头标示了其偏振方向。制成的微结构由偏振方向决定。经[Nivas许可改编，遵循2021] CC BY 4.0 版权许可。

2.3 非衍射贝塞尔光束和艾里光束

已知某些复杂光束具有非衍射或准非衍射特性，因此能够绕过障碍物后重构，并在较长的轴向距离内保持聚焦的强度分布。然而，实际上，非衍射光束仍会因光学元件尺寸和光束能量有限而受到一定程度的衍射，但其实际实验对应物仍具有特征性优势，即共焦参数范围较长。

在非衍射光束中，贝塞尔光束的强度分布表现为一个高强度中心峰，周围环绕着强度较低的同心环。根据这些光束的生成方式，强度分布近似保持恒定的轴向区域长度可从微米级延伸至数毫米，具体取决于光学配置。这类光束产生的改性主要应用于激光切割和激光打标，可仅用一个激光脉冲加工毫米厚的基底 [Duocastella, 2013a]。

对于这种特定的光束分布，电场遵循第一类零阶贝塞尔函数 J_0。这种描述对应于一个高强度中心峰，它是以下内容的产物

一组平面波的叠加，其波矢围绕传播轴形成一个圆锥，可用于在较大的轴向距离内进行材料加工 [Courvoisier， 2013]。在实验中，描述此类光束的方程为：其中，$r^2 = x^2 + y^2$ 表示距中心的径向距离，$k^2 = {k_z}^2 + {k_r}^2$ 表示波矢，方程如下：

$$E(r,t) = A_0 \exp(ik_z z) J_0(k_r r). \quad \text{Eq. 2.3-1}$$

使用高斯光束结合孔径 [Durnin、1987], 锥透镜 [Nguyen、2020][Stsepuro、2020],数字控制折射器件 [Chattrapiban、2003], 可调声梯度（TAG）透镜 [McLeod、2006] 或其他方法 [Duocastella，2012]可以在实验中生成贝塞尔光束分布的近似形式。或许，生成贝塞尔光束分布最具成本效益的方法是使用锥透镜。然而，为避免失真，需要精细地进行对准。表1展示了使用楔形锥透镜角 α = 2o 得到的贝塞尔分布图，该角度同时对应于波矢 k 的 z 分量与 r 分量之间的夹角 [Fontaine，2019]。

同样，对于贝塞尔光束分布的材料加工应用，有用的参数包括瑞利长度 z_R 和中央主瓣的直径 d_f [McGloin, 2005]:

$$z_R \approx \frac{D}{2(n-1)\tan(\alpha)}, \quad \text{Eq. 2.3-2}$$

$$d_f \approx \frac{2.405\alpha}{k(n-1)\tan(\alpha)}. \quad \text{Eq. 2.3-3}$$

n 是锥透镜材料的折射率，D 是入射到锥透镜上的光束直径。需要注意的是，对于使用锥透镜生成的贝塞尔光束，瑞利长度和中央主瓣的最小尺寸都强烈依赖于锥透镜的楔角。此外，与高斯光束所能达到的数值相比，这种情况下的瑞利长度要长几个数量级，同时中央主瓣直径仍相当恒定且较小。这一特性被应用于材料加工中：这类应用需要沿轴向延伸的能量区域，以便在光学捕获系统中控制粒子 [McLeod、2008][Gong、2018] ，或用单个激光脉冲烧蚀厚基底 [Courvoisier、 2013][He、 2017]。图6展示了受照射硅样品横截面的扫描电子显微镜图像，其中使用了传统贝塞尔光束。可以看到，主贝塞尔光束瓣以及其周围最初的三个环形光环向下垂直传播所产生的改性。表1列出了贝塞尔光束的强度分布和传播情况，以便与常规高斯光束进行比较。

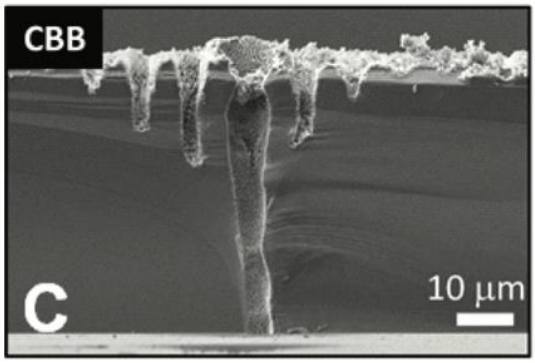


图 6. 使用传统贝塞尔光束“CBB”对硅基底进行材料改性。图片经许可改编自 [He，2017]，遵循 CC BY 版权许可。

另一个非衍射光束的例子是艾里光束分布。在这里，光束似乎沿着传播轴遵循一条弯曲的路径。在这种情况下，强度极大值在传播过程中沿横向“加速”，从而形成弯曲的轨迹。艾里光束的强度分布由一个包含强度峰值的主瓣构成，其前方排列着一系列相邻且强度逐渐减弱的峰值，这些峰值能够在不发生衍射的情况下传播。通常，如果传播介质的折射率没有发生变化，光束的强度质心应沿直线移动 [Efremidis, 2019]。艾里光束的这一特殊性质使其能够绕过物理障碍物，并在后续轴向位置重建强度分布。因此，艾里光束通常被称为自愈光束。这一特性可用于湍流介质中的光传播，同时不会影响最终的光束强度分布。

采用高斯光束（w_0 = 3 mm）通过三次相位掩模生成的艾里光束示例如表1所示，其中包括XY平面上的强度分布及其沿Z轴的传播情况。值得注意的是，强度极大值呈现出弯曲的轨迹，其长度显著大于高斯光束或贝塞尔光束的对应长度。在本例中，光束传播距离绘制为10 cm。在材料加工的特定应用中，需要注意的是，存在显著的能量损失，尤其是与入射高斯激光束相比时更为明显，这限制了此类光束在材料加工中的应用范围，例如玻璃改性 [Gecevičius,2014] 以及金刚石改性 [Mathis, 2012] 等。图7展示了硅样品在经过艾里光束照射1、2和5次后的横截面视图。最终形成的材料改性区域遵循光束强度极大值的分布，该分布沿传播轴呈弯曲状，因此材料也沿曲线发生改性。

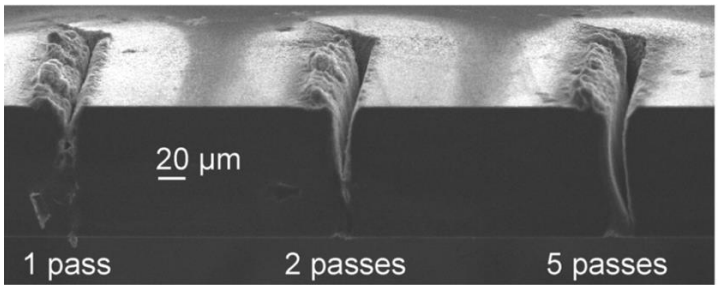


图 7. 使用加速艾里光束在硅中进行曲线沟槽机械加工的加工结果随扫描次数的演变。经 Mathis 授权转载 [，并获得 AIP Publishing 的许可 2012], 。

此类光束的其他应用包括电信[Zhu、2018], 光学捕获系统[Zheng，以及成像技术[Guo 2021], 等。关于使用贝塞尔光束和艾里光束进行材料微加工的完整应用汇总，请参见第 15 章“用于纳米结构化的非标准光”。

2.4 全息方法

所有先前提到的强度分布都可以通过全息方法实现。在这里，初始光束通常具有高斯分布，它与掩模或更常见的数字光学器件（例如空间光调制器或数字微镜阵列）相互作用[Forbes, 2019] ，以按照用户定义改变其振幅和/或相位。其基本思想是生成额外的波前，使它们最终在传播轴上的某个平面处发生干涉，从而生成包含所需光束分布的干涉图样。计算机控制的数字器件的实现为强度分布的创建提供了灵活性，使复杂形状的创建成为可能，如图 8 所示，其中使用空间光调制器生成了适用于标记材料表面的空间结构化光束 [Zupancic, 2016][Liu, 2018]。简而言之，这种灵活性使全息方法能够创建几乎任意的光束分布。然而，就光束整形过程后可获得的最大能量而言，以及全息生成器件的损伤阈值方面，仍存在一些限制。尽管如此，有时仍希望将全息方法用于材料加工，因为利用这些方法可以创建多个激光束，用于并行化加工，从而提高整体加工速度 [Cugat, 2013][Martinez, 2015]。

超快激光纳米结构化第一部分：基
本过程

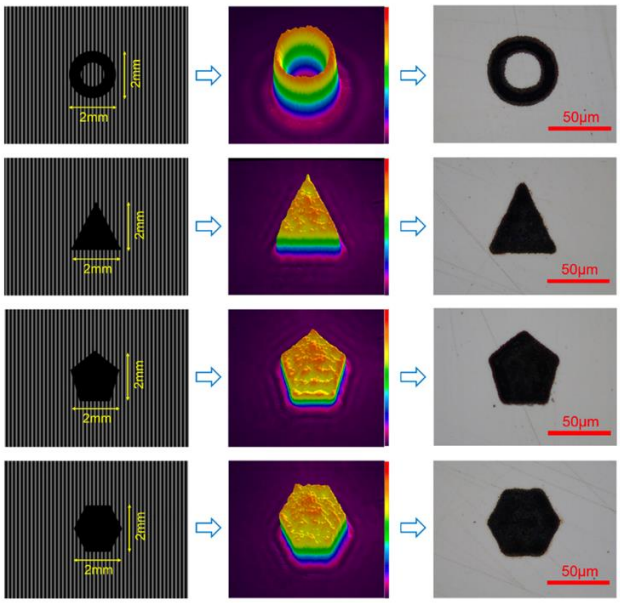
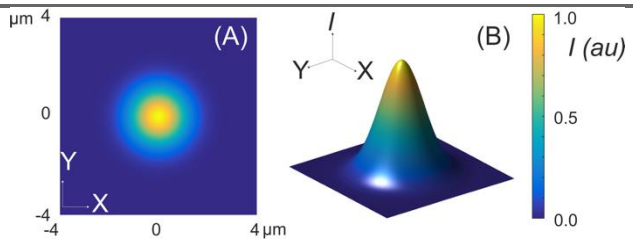
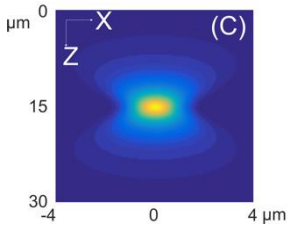
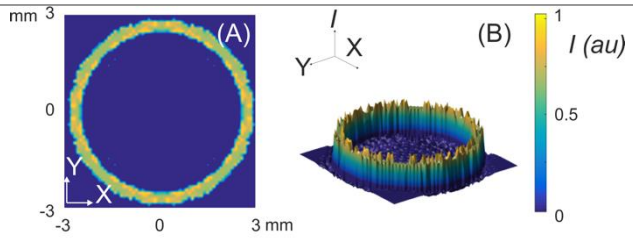
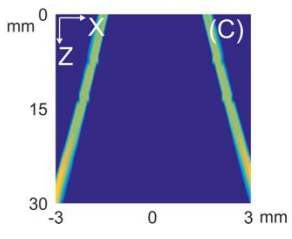


图 8. 高斯光束入射到空间光调制器（左侧），通过不同的掩模空间分布形成空间结构化光束；图中还展示了 CCD 相机拍摄的相应光束图像（中间），以及不锈钢抛光样品表面上相应的改性效果。转载自 [Liu，2018], 版权所有（2018），经爱思唯尔许可。

描述	强度分布	传播
高斯：强度 峰值位于 中心，从该处 强度向外 呈径向递减。		
	只有当光束的高强度 位置与感兴趣位置重合时，才能在横向和轴向实现最小改性特征。通常，定位颇具挑战，尤其是在高 NA 光学。	
环形涡旋： 高强度区域 其后跟随一个甜甜圈 形状，带有一个 强度极小值位于 几何中心。 它可能是由 强度 分布变化 光相位 调制产生的。		
	材料中的改性呈环状。与高斯光束不同，材料 在辐照区域的中心不会出现改性。在这种情况下，光束的传播 取决于其生成方式。在这个具体案例中，光束生成采用了光学 系统，如图 3 所示。	

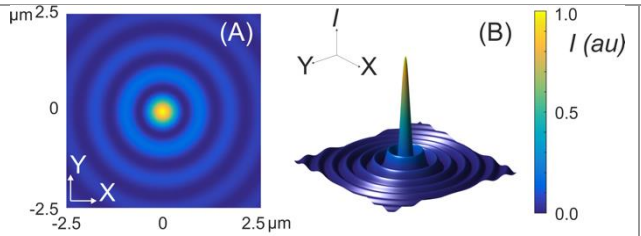
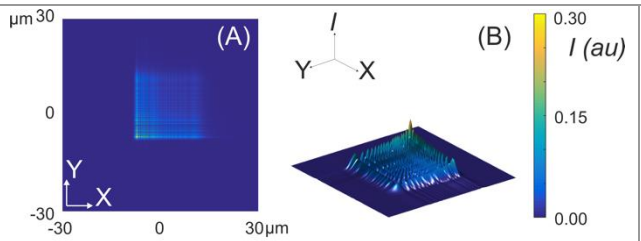
<table>
<tr><td>贝塞尔：高强度
中央主瓣
被……环绕的
带有同心环的
强度较低。
传播距离可达
数微米
同时保持相当
恒定的强度
分布。</td><td> 
</td></tr>
<tr><td colspan="2">与使用高斯光束的传统加工相比，改性可在更长的轴向范围内发生
光束。根据所用能量和材料带隙，可以实现……
仅对中央主瓣进行修改。</td></tr>
<tr><td>艾里：强度峰值
沿着曲线的
沿着这条轨迹的
传播轴。
同样，与
贝塞尔光束一样，
传播距离可
达到数
毫米。</td><td> 
</td></tr>
<tr><td colspan="2">与贝塞尔光束不同，采用这种分布改性的材料会呈现弯曲的改性痕迹
沿传播方向。与常规方法相比，它可提供更长的处理轴向范围。
高斯光束。</td></tr>
</table>

表1：第2节中不同光束分布沿Z轴的强度分布及传播。每种光束强度分布的图像均为模拟结果，包括：（A）XY平面的俯视图；（B）三维表示图；（C）XZ投影图，展示沿Z轴的传播。图片来源：Camilo Florian。

3 近场方法

近场光学描述并利用纳米尺度上的光与物质相互作用，此时光场呈倏逝态而非传播态。因此，它不受经典衍射极限的约束，可实现卓越的空间分辨率和增强的强度，适用于等离激元学、显微术、纳米光子学和纳米制造。一般而言，任何单色光都可以表示为电场 E(r)，其矢量分量的振幅 A(r) 和相位 $\phi(r)$ 随空间变化，如式 3-1 所示：

$$E(r) = A(r)\mathrm{e}^{i\phi(r)} = \int_{-\infty}^{\infty} E_k \mathrm{e}^{ik.r}\,\mathrm{d}k, \qquad \text{Eq. 3-1}$$

其中，r 表示空间位置，E_k 是波矢 k 的复振幅：

$$k = \frac{2\pi n}{\lambda} = \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2}. \qquad \text{Eq. 3-2}$$

折射率的实部用 n 表示，光的波长用 λ 表示。当 $k_x^2 + k_y^2 > k_0$ 时，波矢的 Z 分量具有非零虚部，因此，公式 3-1 中的任何虚部都将呈指数衰减

随着距离增加，振幅也随之衰减。局限在距目标表面不到一个波长范围内的近场，会逐渐演变为传播的远场辐射，其中包含来自表面材料的信息，其分辨率低于远场的衍射极限最大分辨率 [Bazylewski, 2017]。

在本小节中，我们简要回顾两种成熟的纳米尺度近场调控技术，包括等离激元方法，例如扫描近场光学显微镜探针（SNOM探针）；以及介电材料方法，例如使用光学捕获的介电微球。

3.1 基于等离激元的方法：扫描近场光学显微镜探针

在扫描近场光学显微镜（SNOM）中，可通过两类不同的方法产生近场光。第一类通用方法是孔径型方法，即使用带有孔径的探针，孔径尺寸小于用于照射样品的激光波长。在这种情况下，近场辐射会被散射回去，并按照图 9(A) 所示的配置，以远场辐射的形式进行检测。第二类通用方法是无孔径方法，即近场光由表面发出；外部照明经尖锐探针散射后，同样以远场形式进行检测 [Bazylewski, 2017]。将用于纳米分辨率结构成像的同一原理用于材料改性，已在多种光敏材料中得到验证，例如聚合物、金属和半导体等 [Roszkiewicz,2019]。当近场增强超过特定材料所需的烧蚀通量时，便可实现具有纳米分辨率和高可重复性的永久改性。图 9(A) 展示了一套系统，其中采用扫描近场光学显微镜孔径型探针，在光敏聚合物材料上产生近场辐射。产生的改性如图 9(B) 所示，其中一组凹坑通过原子力显微镜进行了表征。根据形貌数据，沿凹坑排列线提取了显示改性深度的剖面，结果显示改性的直径为 ~500 nm，深度为 ~75 nm。

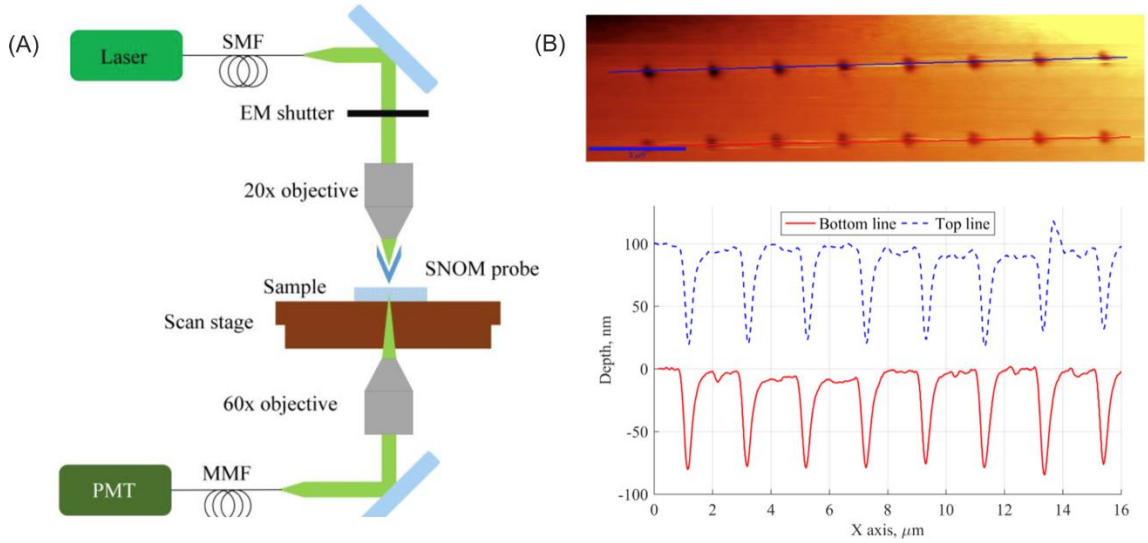


图 9. (A) SNOM 实验装置示意图。(B) 在沉积于石英上的光刻胶上进行的辐照实验所得的 AFM 形貌数据，包括沿标记的蓝色和红色线条的横截面轮廓。经 Roszkiewicz [、2019] 授权改编，依据 CC BY 4.0 版权许可。

在近场中塑造光的其他方法可以利用基于不同天线几何结构的等离激元相互作用，与圆形几何探针所达到的数值相比，这些结构具有更大的近场增强。在这些配置中，有几种基于等离激元透镜结构的方法，这些结构最初是为成像应用而设计的，由具有特定折射率的同心环光栅组成，用于检测感兴趣结构附近的近场，从而提供纳米级分辨率 [Chaturvedi, 2010][Fang, 2012]。对于材料加工而言，由于等离激元透镜的腔体尺寸极小，其强度增强最高可达到入射到结构上的激光辐射强度的100倍。当使用适当的系统时，能量可以聚焦在近场中，形成小于100 nm的光斑 [Sriturawanich, 2008]。

或者，蝴蝶结天线广泛应用于等离激元结构中的材料加工。与飞秒激光脉冲结合时，它们会产生高度受限的强度峰值分布，适用于纳米图案化应用。其优势源于天线脊部之间间隙中的场增强。图10包含扫描电子显微镜显微图，展示了制作在原子力显微镜悬臂梁尖端上的蝴蝶结天线。该系统用于对Shipley（S1805）正性光刻胶进行基于飞秒激光的纳米图案化，形成的特征宽度小至24 nm，同时沿曲线轨迹移动（图10(B)）。这种增强最终由

基频电磁场TEM10模的传播产生。最终，强度变化取决于SNOM探针的几何形状 [Murphy-dubay，2008][Guo，2010][Kinzel，2010][Kumar，2011]。

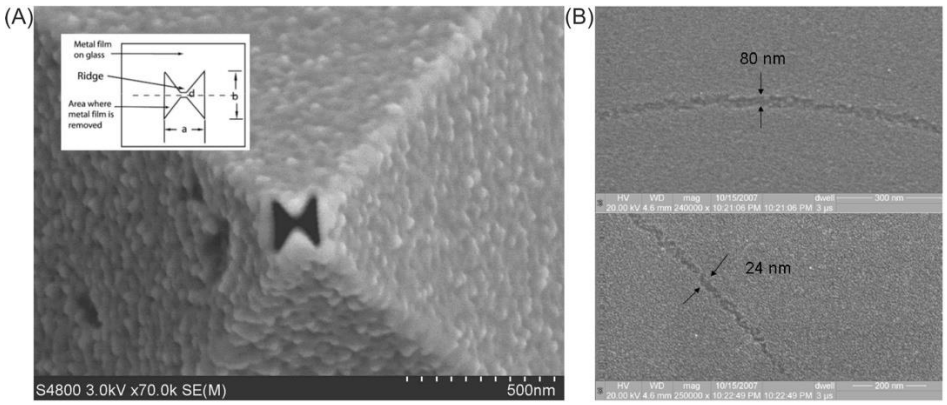


图10。（A）原子力显微镜探针上蝶形孔径的扫描电子显微镜图像，插图为理想化几何结构。（B）圆形图案的扫描电子显微镜图像，显示圆形的顶部和侧面。转载自开放获取论文 [Murphy-dubay，2008] ©2008 美国光学学会。

3.2 基于介电材料的方法：光阱辅助纳米图案化

在利用激光清洁半导体表面的技术开发过程中，首次实验演示了某些粒子产生的近场增强效应。其思路是利用弱聚焦激光束产生弹射效应，使粒子脱离昂贵基底的表面 [Imen，1991]。遗憾的是，在最初的应用中，这种弹射效应导致基底发生了非预期的永久性纳米尺度改性。后来，人们将利用场增强的这一思路发展为粒子辅助和探针辅助纳米加工技术，众多不同的研究团队为理解极小尺度下物质与光的相互作用作出了贡献 [Leiderer，2000][Luk'Yanchuk，2003][Kühler，2009][Wang，2010][Surdo，2021]。

作为这些技术的一个具体实例，将介电微球放置在基底附近的适当位置，可产生近场辐射增强，从而实现纳米尺度材料加工。在这里，来自激光光源的辐射穿过微球后，可以聚焦到非常小的焦域体积上，从而增强微球与目标基底之间的近场。如果达到的光强足够高，材料就可能发生永久性改变，并实现亚波长空间分辨率。在这一具体案例中，介电微透镜表现为一个孔径，使光能够在后续过程中进一步聚焦，如图11所示。在该图中，使用了一个被光学捕获于水中的介电微球来

增强聚酰亚胺薄膜和硅基底附近的近场辐射。通过压电驱动平台实现微球相对于受辐照样品的横向定位。微球的轴向距离通过微球与基底之间的双电层排斥势，以及推动微球朝向基底的光力共同作用而保持恒定。吸引力与排斥力之间持续的平衡使微球与基底之间的距离始终保持不变，无需反馈控制机制。这得益于贝塞尔光束光学捕获的特性，其能够提供较大的轴向捕获区域，在该区域内作用于微透镜的光力实际上保持恒定。根据不同的辐照条件，可以通过烧蚀材料在选定位置形成凹坑（图11(D)），也可以诱导材料膨胀以形成纳米锥（图11(E)）。

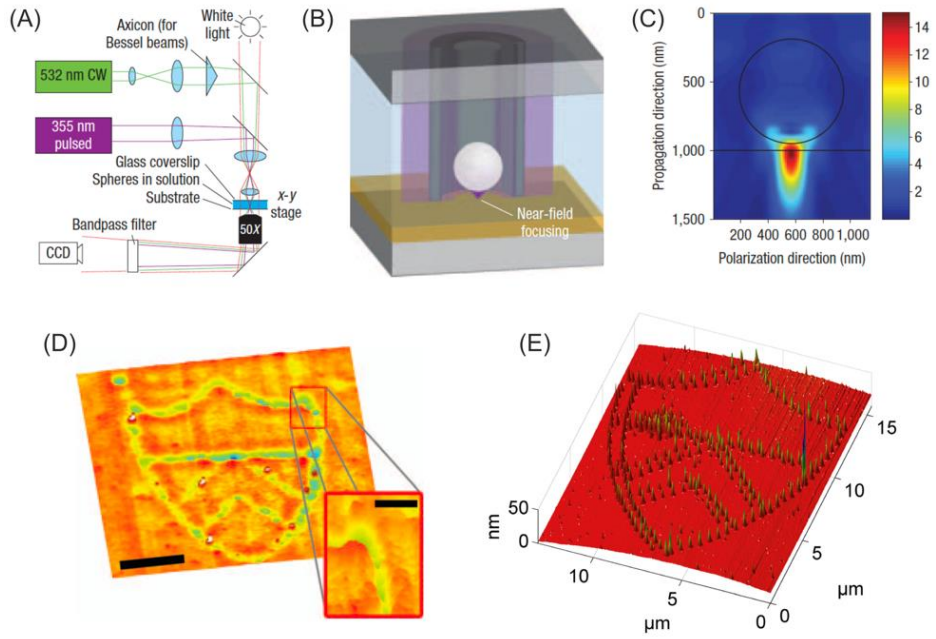
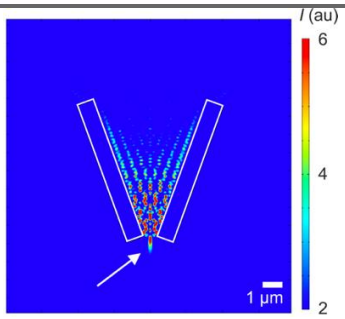
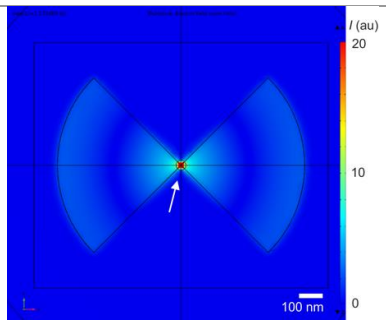


图11。（A）实验装置示意图，包括捕获激光（绿色）和加工激光（紫色）。白光用于通过50×物镜和 CCD 相机进行实时视频采集。（B）示意图显示了在捕获激光（绿色）中、聚酰亚胺表面（橙色）附近被光学捕获的微球的辐照过程。加工光束（紫色）覆盖的区域大于微球，但只有微球正下方的位置达到高于改性阈值的能量密度。（C）在聚酰亚胺基底上方的水中，穿过直径为 0.76 μm 的微球的光强时域有限差分仿真。所示平面平行于传播方向和电场偏振方向。（D）在聚酰亚胺层上纳米图案化的普林斯顿大学标志的原子力显微镜图像。在此情况下，能量密度

采用 3mJ/cm^2 的能量密度，通过连续激光脉冲的重叠形成沟槽。主图比例尺为 2 mm；插图比例尺为 1 mm。(A-D) 经许可转载自 [McLeod，2008], 版权所有 2008，施普林格·自然。(E) 原子力显微镜图像：在能量密度为 7.3 mJ/cm^2 的条件下，使用聚苯乙烯微球在硅样品上制备的纳米锥组成的普林斯顿大学徽标。经许可转载自 [Chen，2017], 版权所有 2017，美国激光学会。

上述近场方法中使用的强度分布汇总见表2。由此，出现了多种基于介电物体的不同方法，可应用于材料加工和成像 [Chen，2020]。第11章“光学近场结构化”将全面介绍现有技术，以及利用近场辐射改性材料的应用发展历程。

描述	强度分布
扫描近场光学显微镜探针：此处， 场增强 产生于……之间 材料和 the 距离探针 比激光器更《小型》 所使用的波长。该 强度形成一个 其中的狭窄细丝 近场的 that 在远处色散- 场】【。	 材料加工所利用的场增强是通过使扫描近场光学显微镜靠近来产生的 探针靠近目标材料的表面。通过这种方式，实现了分辨率增强。 结合强度增加，从而能够对空间分辨率高的材料进行机械加工】【。 分辨率。其尺寸远小于高斯对应物。
蝴蝶结天线： 该领域 增强是 在紧密的条件下制备 间距 三角形 结构的产物 等离激元 共振 结构表面。	 蝴蝶结天线配置中的场增强可用于纳米图案化应用。 当天线安装在兼容扫描的器件中时，可在较大范围内进行扫描，如图所示。 10.

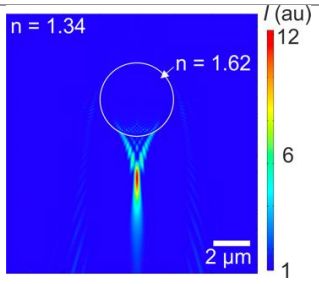
介电 微球：用于 强度分布 材料 加工所形成 在介电层之后 微球。 体素被称为一个 光子纳米喷流，由于 至其《小型》 尺寸。	 用于材料加工的最终强度分布尺寸取决于所用波长 、光传播介质与微球之间的折射率比，以及 微透镜表面与目标样品之间的距离。

表2. 第3节中三种不同光束分布的强度分布及其沿Z轴的传播。图片来源：Camilo Florian。

4 时变结构化光场

除了上一节讨论的静态结构光方法外，还有一些超快光束整形方法，利用随时间演变的系统或材料特性。根据具体应用，可以诱发以下现象：(i) 两束在时间或空间上充分分离的光束作用所导致的瞬态吸收状态；(ii) 两束或多束激光束之间的干涉；或 (iii) 超快变焦透镜产生的焦点快速变化。这些方法的目的都是形成具有高空间分辨率特征的结构。接下来的小节将讨论如何在不同的基于激光的加工技术中应用这些时变结构化光场。

4.1 双激光束加工‘DLBP’和双激光增材制造‘DLAM’

多束光使我们能够实现常规单光束加工无法实现的材料改性。多束光之间产生的相互作用拓展了其在不同材料加工应用中的优势，使减材或增材工艺都能达到更高的空间分辨率。

材料的双激光束加工（DLBP）采用减材方法，其原理与超分辨率荧光显微镜技术 STED [Hell, 1994]相同。在 DLBP 中，两束不同的激光束在同一位置照射样品：其中一束具有高斯空间和时间分布，且脉冲能量高于材料的带隙，以促使电子从价带跃迁至导带；另一束则具有环形

空间轮廓和高斯时间轮廓，且脉冲能量低于材料的带隙，以促使先前激发的电子耗尽并返回价带，如图12所示。由于环形空间分布，在耗尽过程发生后，位于中央、未受到第二束光照射区域内的激发电子会集中在一个显著更小的区域中。如果第三个高斯脉冲在该瞬态状态存在时到达样品，导带中的激发电子便可轻易被烧蚀，而所使用的波长在其他情况下会被样品透射，从而减小最终特征尺寸。这种诱导的瞬态状态会在激光脉冲持续期间出现，并可通过受控地调整脉冲延迟来控制 [Wenisch, 2021]。研究确定，实现最小特征尺寸的最佳脉冲间延迟对应于 +5 ns（图12(C)），因为热与激发载流子的共同作用会提高所采用激光波长下的吸收率。

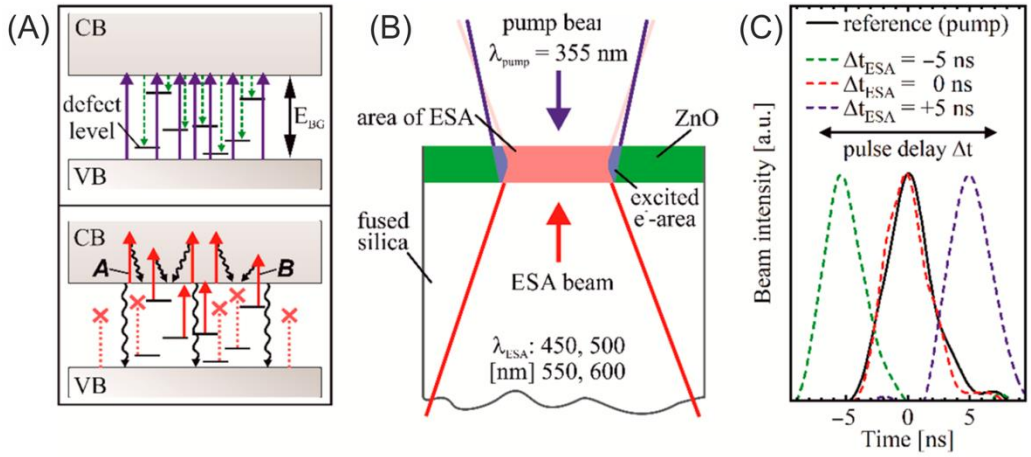


图12。（A）基于激发态吸收（ESA）的烧蚀过程示意图。上半部分显示从价带（VB）到导带（CB）的激发，下半部分用实线箭头表示激发态吸收。（B）1 mm 厚样品横截面（白色）的示意图，其表面覆盖一层薄薄的氧化锌（绿色）。如箭头所示，泵浦光束从上方照射样品，ESA 光束从下方照射。（C）脉冲延迟（虚线）及其相对于泵浦脉冲（黑色实线）的时间重叠。经许可改编自 [Wenisch，2021] 依据 CC BY 4.0 版权许可。

增材制造技术还可以利用多束激光来改变和控制材料加工。例如，在激光粉末床熔融中，金属三维物体的制造是通过按照逐层方法，在自下而上的配置中选择性地熔化辐照区域来实现的。为了提高这类增材制造技术的制造速度，通常优先采用双激光增材制造进行并行化

（DLAM）方法 [Yap， 2015]。不过，若要正确应用该方法，应考虑不同变量，包括激光束相对于最终加工特征的几何分布，以及不同激光束作为热源相互作用时相关的热过程。通过控制这些参数，可以利用已熔融材料的区域，改变熔池的冷却和凝固方式。采用这种方法，可以改变和控制熔合过程的热演化，并制造出使用传统单光束粉末床熔融方法难以加工的形貌和结构 [Zhang，2020]。图13(A)展示了用于制造两条平行金属线的几何布局示意图。当两条线之间的道间距减小时，两条线会合并为一种可重复的中间状态，即由熔融材料构成的周期性结构，如图13(B)所示。

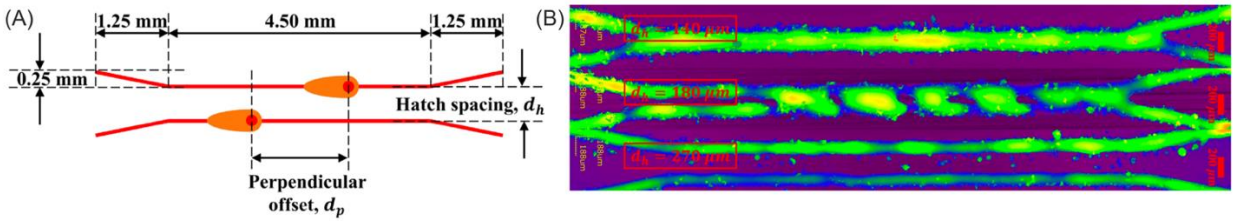


图13。（A）示意图，定义了实验中的道间距和垂直偏移量。红线表示熔化金属粉末床后从表面凸出的线条。（B）制备了道间距各异的线条，并通过激光扫描共聚焦显微镜进行表征。转载自[Zhang，2020] 版权所有（2020），经爱思唯尔许可。

有趣的是，对于两束相同的光束，垂直偏移量不同，可能会观察到两种材料合并方式；当垂直偏移量为零时，合并呈现首尾相接的方式，每个独立的熔池相互作用，形成具有一定周期性但无优先取向的材料凸起。第二种情况下，随着垂直偏移量增大，相互作用呈现头尾相接的方式，使熔池的周期性结构呈现出明显的取向[Zhang，2020]。

4.2 直接激光干涉图案化“DLIP”和激光诱导正向转移“LIFT”

当多个光束在短时间内于特定空间区域发生相互作用时，可能会使这些光束之间产生干涉。

同样，与双激光束加工方法一样，这种干涉可用于以减材模式和增材模式加工材料。

直接激光干涉图案化（DLIP）的基础原理建立在一种称为激光干涉光刻（LIL）的技术之上[Seo，2014], 该技术最初被用作无掩模大面积光刻技术，用于形成周期性纳米尺度图案。与 LIL 相比，DLIP 使用强度更高的激光器；它同样是一种无掩模加工技术，利用光相干性产生空间可控强度图案，以制造微米和纳米尺度周期性结构。该过程包括两束或更多相干激光束在目标材料表面上的干涉。在这种情况下，强度图样的周期性取决于所使用的波长以及入射激光束的入射角。通过改变入射光束之间的相对相位，可以定义所得图案的形状；而通过调节各参与光束的偏振，可以对其强度进行调制。

对于具有平顶强度分布的两束相等光束，表面处的强度图案 I(x,y) 可表示为式 4.2-1 [Daniel，2003], [Peter，2020]：

$$I(x,y) = 2I_0\left[1+\cos\left(\frac{4\pi\sin\theta}{\lambda}x\right)\right], \qquad \text{Eq. 4.2-1}$$

其中，I_0 是两束入射激光束各自的峰值强度，λ 是激光波长，θ 是光束相对于表面的入射角。对于高斯空间分布，强度图案如下：

$$I(x,y) = 4I_0\exp\left[\left[-2\left(\frac{4x^2}{d_x^2}+\frac{4y^2}{d_y^2}\right)\right].\left[1+\cos\left(\frac{4\pi\sin\theta}{\lambda}x\right)\right]\right]. \qquad \text{Eq. 4.2-2}$$

对于干涉　系统，还可以用式 4.2-3 计算预期周期 Λ：

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}. \qquad \text{Eq. 4.2-3}$$

图14展示了计算和测量所得强度图样的示例，其中还可以看到使用两种不同脉冲能量在不锈钢上进行的烧蚀。

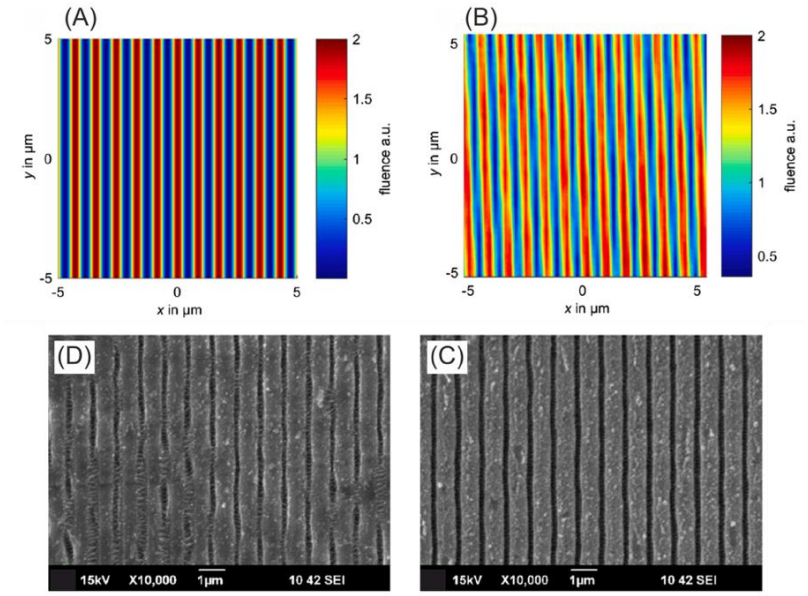


图14. 样品表面的计算强度图案（A）和测量强度图案（B）。不锈钢中的相应辐照结果以扫描电子显微镜显微图呈现：脉冲能量为 E_p = 7.2µJ 的结果见（C），脉冲能量为 E_p = 9 µJ 的结果见（D）。图像经许可改编自 [Peter，依据 2020] CC BY 4.0 版权许可。

参与干涉的光束数量增加，会产生更复杂的强度图样；例如，在平面构型中，三束光可以产生二维点阵图样，而四束光则可形成线状图样，其峰值更窄、更高，低强度区域也比双光束图样更宽 [Lasagni、 2005],[Rebollar、 2020]。图15(A)展示了非平面光束的一个示例，产生的强度图案对应于多个沿纵向以一定周期分隔的光斑 Λ。图15(B)的扫描电子显微镜显微图展示了钛经此强度分布辐照后的效果，其中多个光斑经过辐照，覆盖了整个区域。采用超短脉冲激光器进行辐照时，还可诱导形成低空间频率和高空间频率的激光诱导周期性表面结构（低空间频率激光诱导周期性表面结构和高空间频率激光诱导周期性表面结构），如图15(C)所示。第23章“表面纳米结构的超快速工业化大面积加工”将详细讨论这些层级结构的具体应用。

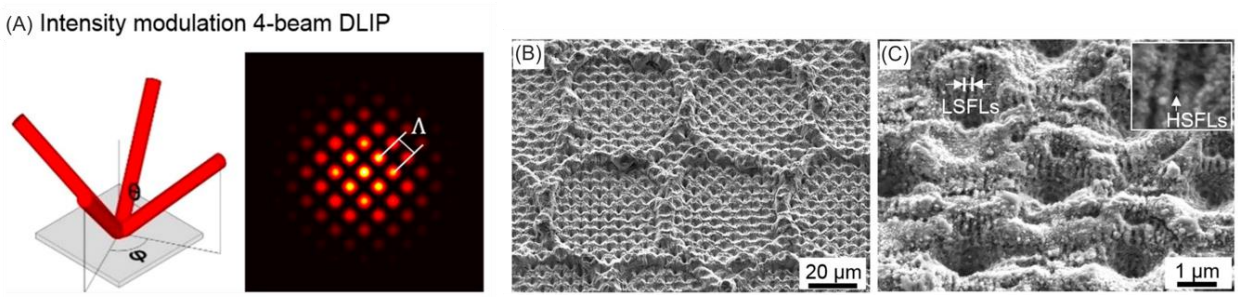


图15。（A）示意图显示光束从不同角度同时入射到样品上，以及由黑色（无强度）到黄色（高强度）表示的计算所得强度图案。（B）使用（A）所示强度图案在钛上制备的分级表面结构。（C）高倍图像，同时显示激光诱导周期性表面结构特征（图中为低空间频率激光诱导周期性表面结构，插图中为高空间频率激光诱导周期性表面结构）。经许可改编自[Zwahr，依据2019] CC BY 4.0 版权许可。

在常规激光诱导正向转移（LIFT）过程中打印材料时，通常将待处理材料以薄层（固体、液体或中等黏度的膏体）形式铺置，再用聚焦激光束对其进行辐照 [Arnold, 2007][Serra, 2019]。辐照会引发微爆炸，将少量材料推动至附近放置的接收基底上。由此形成的特征在每个激光脉冲下生成一个打印像素，分辨率可达微米级 [Florian, 2016][Turkoz, 2018][Turkoz, 2019]。近期，研究人员采用直接激光干涉图案化（DLIP），生成强度分布图案，对应于由一系列脉冲组成的矩阵，如图16所示。每个强度点都能将材料推向受体基底；即使考虑到环境空气条件下的阻力，材料仍能保持相同的空间分布，正如 [Nakata, 2021] 所述。在这一特定案例中，推动的材料以贵金属薄膜的形式铺置，其中包括铂和金。对于金供体基底，最终打印出的像素呈亚微米尺寸的点状，其空间分布与所用强度分布轮廓相同，如图16所示。

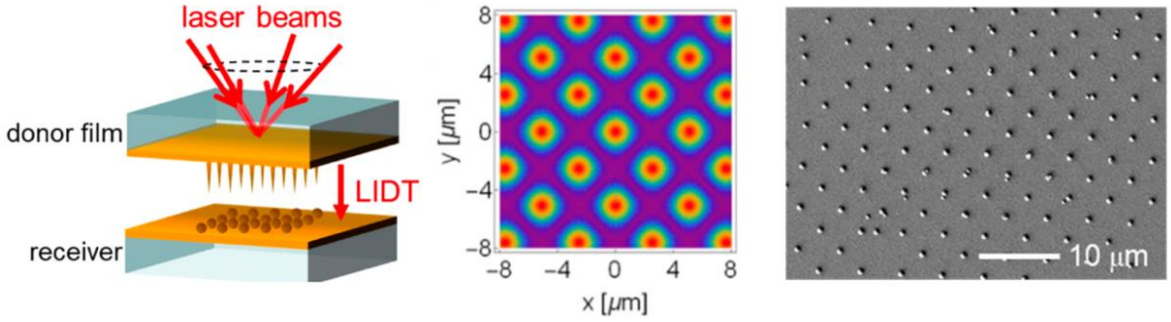


图16. 供体基底与目标材料薄膜界面处四束光干涉的示意图。强度分布对应于相同位置处模拟得到的强度。左侧的扫描电子显微镜显微图显示，在接收基底上对称间隔打印的金像素。经许可改编自 [Nakata， 2021]，采用 CC BY 4.0 版权许可。

4.3 共振焦点扫描

另一种用于优化激光加工的重要光束控制方法，是通过超高速扫描焦点来形成准线焦点或其他复杂的光束形状。目前，能够以足够高的速度进行扫描的技术为数不多 [Kang, 2020]。一种超快变焦光学器件是称为可调谐声学梯度折射率（TAG）透镜的共振扫描器件。这类透镜利用液体中的声波调制局部密度，从而产生随空间和时间变化的折射率变化，并可利用这些变化实现透镜效应 [McLeod, 2006][Kang, 2020] （图17A）。振荡频率由外部电压源驱动，其振幅会影响透镜的聚焦和散焦能力。由于局部折射率发生变化，液体会改变光的传播路径，如图17B所示。TAG透镜的工作频率范围为数百千赫兹，具体工作频率取决于压电元件本身的几何形状。

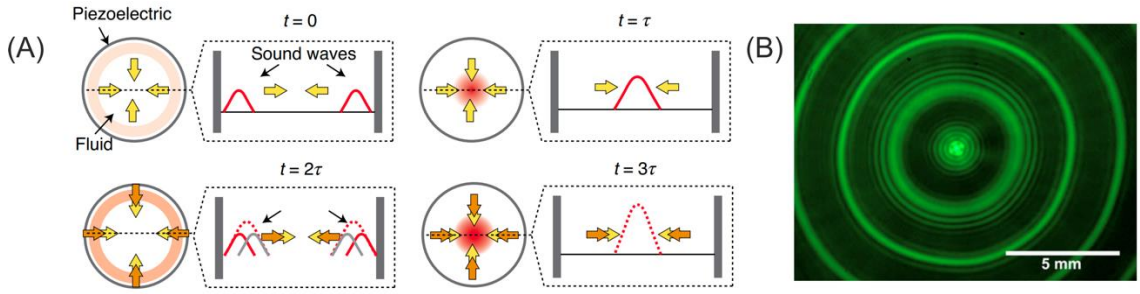


图17。（A）基于将 TAG 视为谐振腔的模型示意图。柱面波在 TAG 透镜中来回传播，相互干涉，使透镜光焦度每隔 2 τ 周期性变化。经许可转载自 [Duocastella, 2013a]；许可由 Copyright Clearance Center, Inc. 授予。（B）以高斯准直光束为输入光束，在距 TAG 透镜 80 cm 处测得的光束分布。压电频率为 299.7 kHz。经 AIP Publishing 许可转载自 [McLeod, 2007]。

与常规直写系统相比，这类透镜在材料加工方面具有优势，因为它能够沿光束轴在更长的距离范围内动态移动强度分布

。因此，无需重新定位样品即可对样品进行改性 [Duocastella, 2013b][Du, 2021]。图18展示了采用常规打标系统和配备TAG透镜的打标系统的纳秒激光打标系统的强度分布。对于启用TAG透镜的系统，沿光束轴方向上强度足以在样品中造成损伤的位置范围更大。因此，借助TAG透镜实施的轴向扫描，无需重新定位样品即可对阶梯样品表面进行打标，如图18(C)所示。

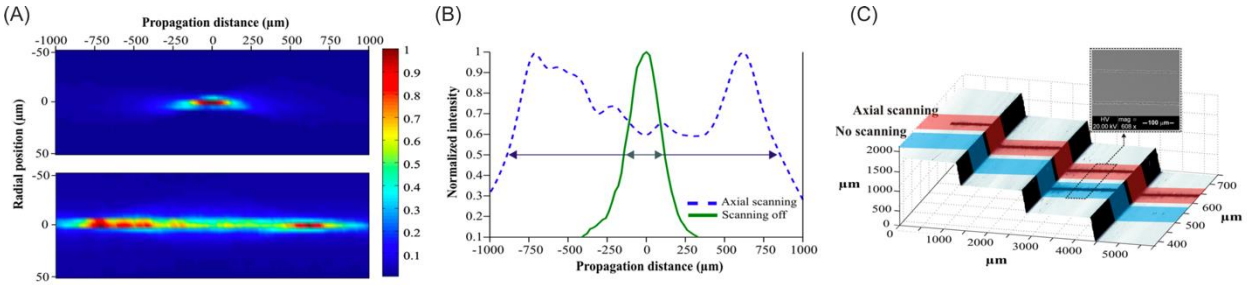


图18. (A) TAG透镜振幅为10 Mpp，扫描显微物镜（插，NA = 0.13）后。(B) 沿轴向在中心位置（径向位置 = 0 μm）处的强度分布。(C) 在硅阶梯表面上使用和不使用TAG透镜进行机械加工。没有轴向扫描时，系统只能一步标记表面；而借助工作中的TAG透镜进行轴向扫描，则可在2 mm的较大轴向范围内标记所有表面，无需重新定位样品。插图为扫描电子显微镜显微图，显示了所示阶梯处两处改性区域的宽度。经许可转载自[Duocastella, 2013b], ，版权归AIP Publishing所有。

使用谐振扫描系统的另一项优势是，焦点位置快速扫描可提高烧蚀效率。用于材料烧蚀的传统直写激光系统通常依靠采用较高的数值孔径，以实现高空间分辨率的改性。采用较高的数值孔径意味着能量聚焦的轴向区域更小。当需要在深度超过 >瑞利长度的范围内对样品进行机械加工时，应仔细维持样品的位置，以充分利用较小的焦体积；随着材料被去除，持续调整激光焦点的位置以跟随工件形貌的变化十分重要 [Chen, 2018]。然而，快速的共振焦点扫描无需对样品表面位置进行如此精细的反馈与控制。图19(A)对比了在硅样品上使用纳秒激光烧蚀一个边长为 $200 \times 200\ \mu m^2$ 的正方形，在连续三次之后，使用与不使用TAG透镜的效果。

扫描。特别是，垂直剖面显示，在不使用TAG透镜的常规标记系统中，存在材料烧蚀不足的情况；而在TAG透镜正常工作的情况下，则能够在整个区域内实现均匀烧蚀。这种效应的产生是因为扫描透镜在每个周期内，按照振荡幅度所确定的变化规律，以不同的有效数值孔径（或不同的焦距）对材料进行辐照。因此，辐照过程中会形成不同尺寸的光斑，当能量密度足够高时，这些光斑会增加材料烧蚀量 [Chen, 2018]。通过适当选择标记激光频率与扫描元件工作频率之间的比值，可以优化谐振式扫描机械加工系统。如果这两个参数之间的比值为整数，则受辐照脉冲的焦点位置将保持不变，因而不会产生轴向扫描。在其他所有情况下，频率失配都将确保每个脉冲在与表面相互作用时，能够到达样品上的不同位置。图19(B)展示了使用相同激光重复频率（1000 Hz）和不同TAG透镜工作频率，在硼硅酸盐玻璃立方体中进行的辐照实验 [Du, 2021]。在此实验中，样品以相同的横向速度进行扫描，图像则从侧面视角采集。根据机械加工应用的不同需求，可以通过适当选择TAG透镜的工作频率，定制每个周期内的脉冲数量，从而增加每个TAG透镜周期内实际到达样品的脉冲数量。

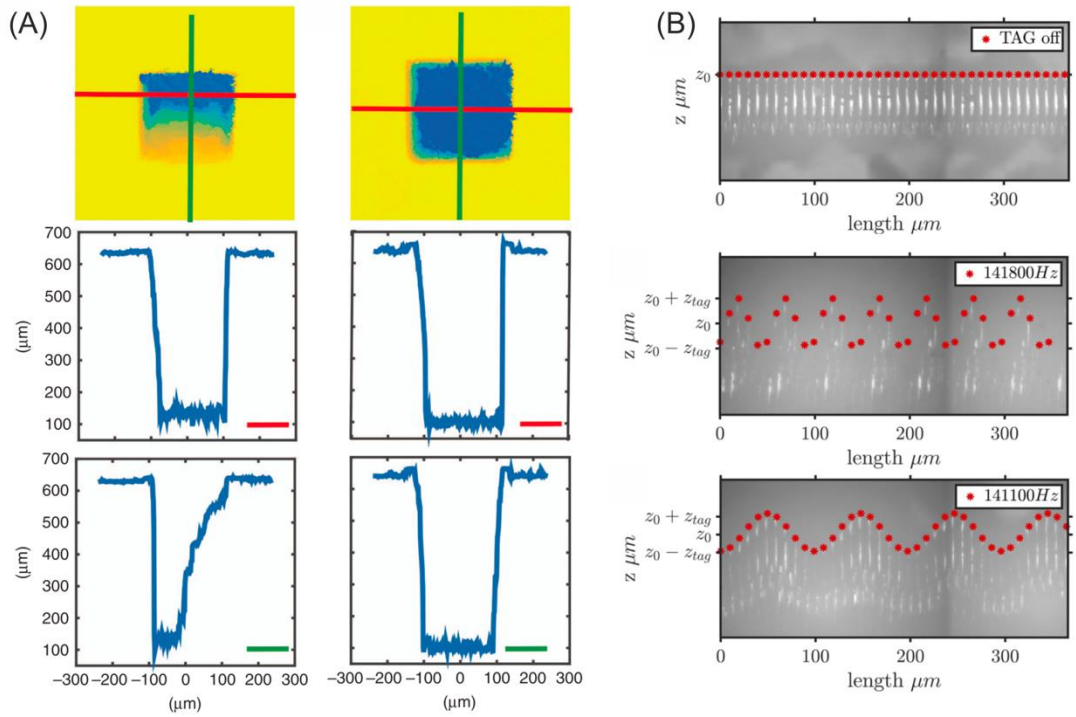


图19. (A) 在厚度为500 μm的硅样品上进行三次连续扫描后，未使用TAG透镜（左）和使用TAG透镜（右）时，对200 × 200 μm² 正方形区域进行烧蚀的结果。第二行显示红线所标示的水平横截面轮廓。第三行以相同方式显示垂直轮廓。

由绿色线条表示。经许可改编自 [Chen，依据 2018] CC BY 4.0 版权许可。（B）从侧面观察硼硅酸盐玻璃立方体中飞秒激光改性区域的光学显微图像：未进行轴向扫描（上），以及轴向扫描频率为 141,800 Hz、每周期 5 个脉冲（中）和轴向扫描频率为 141,100 Hz、每周期 10 个脉冲（下）。经许可转载自 [Du，版权归爱思唯尔所有（2021 年）。

5 结论与展望

本章从基础角度回顾了空间结构化光束的生成与应用技术，以及由此产生的材料相互作用。一般而言，影响激光材料加工最终特征的三个关键参数是共焦参数、光束发散角和最小光斑尺寸。这些参数描述了传统高斯光束如何将能量聚焦到一个小体素中，并对材料表面或体内进行改性，其改性范围与体素尺寸密切相关。然而，我们将探讨如何控制和调整这些参数，从而生成更复杂的光束架构，使其在激光加工应用中表现更佳。这类具有时空结构的光束轮廓可分为远场空间强度分布变化、近场空间强度分布变化，以及随时间变化的轮廓。我们将展示若干示例，说明如何在减材和增材加工技术中利用这些时变轮廓。当前及未来基于激光的微纳制造技术的发展与进步，取决于我们准确控制和调整入射光束光学特性的能力。通过本章所述的技术等方法，材料加工领域仍在不断取得重大进展。

致谢

C.F.感谢欧盟委员会通过玛丽·居里个人奖学金——全球项目（资助编号：844977）提供的支持。同时，也感谢G. Mao给予的支持和有益的交流。

参考文献

[Allegre，2012] Allegre, O. J., Perrie, W., Edwardson, S. P., Dearden, G., & Watkins, K. G. (2012). 使用径向和方位偏振飞秒涡旋脉冲对钢材进行激光微加工。《光学杂志》，14(8), 085601。https://doi.org/10.1088/2040-8978/14/8/085601

[Anoop, 2014] Anoop, K. K., Rubano, A., Fittipaldi, R., Wang, X., Paparo, D., Vecchione, A., Marrucci, L., Bruzzese, R., & Amoruso, S. (2014). 使用 q 波片产生的涡旋光束对硅进行飞秒激光表面结构化。《应用物理快报》，104(24)，241604。https://doi.org/10.1063/1.4884116

[Arnold, 2007] Arnold，C. B.、Serra、P. 和 Piqué。（2007）。用于打印复杂材料的激光直接写入技术。《MRS Bulletin》，32(1)，23–31。https://doi.org/10.1557/mrs2007.11

[Bazylewski, 2017] Bazylewski、P.、Ezugwu、S. 和 Fanchini、G.（2017）。三维扫描近场光学显微镜（3D-SNOM）及其在纳米尺度光管理中的应用综述。《应用科学》（瑞士），7（10）。https://doi.org/10.3390/app7100973

[Chattrapiban, 2003] Chattrapiban，N.、Rogers，E. A.、Cofield，D.、Hill，III，W. T. 和 Roy，R.（2003）。利用空间光调制器生成无衍射贝塞尔光束。《光学快报》，28（22），2183。https://doi.org/10.1364/OL.28.002183

[Chaturvedi, 2010] Chaturvedi，P.、Wu，W.、Logeeswaran，V. J.、Yu，Z.、Islam，M. S.、Wang，S. Y.、Williams，R. S.、Fang，N. X.、Chaturvedi，P.、Wu，W.、Logeeswaran，V. J.、Yu，Z. 和 Islam，M. S.（2014）。平滑光学超透镜。《应用物理快报》，96（4），043102（2010），35–38。https://doi.org/10.1063/1.3293448

[Chen, 2017] Chen, T.-H., Tsai, Y.-C., Fardel, R., & Arnold, C. B.（2017）。通过光学陷阱辅助纳米图案化，在硅上生成纳米尺度防伪图案。《Journal of Laser Applications》，29(1)，012006。https://doi.org/10.2351/1.4966590

[Chen, 2018] Chen, T.-H., Fardel, R., & Arnold, C. B.（2018）。用于高效率激光微机械加工的超快 z扫描。《Light: Science and Applications》，7(4)，17181。https://doi.org/10.1038/lsa.2017.181

[Chen, 2020] Chen，L.、Zhou，Y.、Zhou，R. 和 Hong，M.（2020）。微球——迈向光学显微镜的未来。《IScience》，23(6)，101211。https://doi.org/10.1016/j.isci.2020.101211

[Chrisey, 1994] Chrisey, D. B. 和 Hubler, G. K.（1994）。《薄膜的脉冲激光沉积》。John Wiley & Sons, Ltd.

[Courvoisier, 2013] Courvoisier, F.、Zhang, J.、Bhuyan, M. K.、Jacquot, M. 和 Dudley, J. M.（2013）。飞秒贝塞尔光束在激光烧蚀中的应用。《应用物理 A：材料科学与加工》，112(1)，29–34。https://doi.org/10.1007/s00339-012-7201-2

[Cugat, 2013] Cugat, J., de la Cruz, A. R., Sole, R., Ferrer, A., Carvajal, J. J., Mateos, X., Massons, J., Solis, J., Lifante, G., Diaz, F., 和 Aguilgo, M.（2013）。活性（Yb,Nb）：RTP/RTP平面波导中脊结构的飞秒激光微结构加工。《光波技术杂志》，31(3)，385–390。https://doi.org/10.1109/JLT.2012.2230615

[Daniel, 2003] Daniel, C.、Mücklich, F. 和 Liu, Z.（2003）。利用干涉激光束对金属表面进行周期性微纳结构加工。《应用表面科学》，208–209(1)，317–321。https://doi.org/10.1016/S0169-4332(02)01381-8

[Du, 2021] Du, X.、Kang, S. Y. 和 Arnold, C. B.（2021）。高效脉冲激光微加工的超快轴向扫描参数优化。《材料加工技术杂志》，288，116850。https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116850

[Duocastella, 2012] Duocastella, M. 和 Arnold, C. B.（2012）。用于材料加工的贝塞尔光束和环形光束。《激光与光子学评论》，6(5)，607–621。https://doi.org/10.1002/lpor.201100031

[Duocastella, 2013a] Duocastella, M. 和 Arnold, C. B.（2013）。超高速液体透镜的瞬态响应。《物理学杂志D：应用物理》，46(7)，075102。https://doi.org/10.1088/0022-3727/46/7/075102

[Duocastella, 2013b] Duocastella, M., & Arnold, C. B. (2013). 利用超高速轴向扫描器增强景深的激光加工。《应用物理快报》，102(6)，061113。https://doi.org/10.1063/1.4791593

[Durnin, 1987] Durnin, J. (1987)。无衍射光束的精确解 I：标量理论。美国光学学会杂志A，4(4)，651。https://doi.org/10.1364/josaa.4.000651

[Efremidis, 2019] Efremidis, N. K.、Chen、Z.、Segev、M. 和 Christodoulides、D. N.（2019）。艾里光束与加速波：近期进展综述。Optica，6(5)，686。https://doi.org/10.1364/OPTICA.6.000686

[Fang, 2012] Fang, N., & Zhang, X. (2012). 超材料超透镜的成像特性。《应用物理快报》，82(2)，161–163。https://doi.org/10.1063/1.1536712

[Florian, 2015] Florian, C., Caballero-Lucas, F., Fernández-Pradas, J. M., Bosch, S., Morenza, J. L., & Serra, P.（2015）。通过 z扫描进行位置控制的聚甲基丙烯酸甲酯飞秒激光表面烧蚀。《物理学杂志D：应用物理》，48(33), 335302。https://doi.org/10.1088/0022-3727/48/33/335302

[Florian, 2016] Florian, C., Piazza, S., Diaspro, A., Serra, P., & Duocastella, M.（2016）。定制聚合物微透镜的直接激光打印。《ACS应用材料与界面》，8(27), 17028–17032。https://doi.org/10.1021/acsami.6b05385

[Fontaine, 2019] Fontaine, Q., Hu, H., Pigeon, S., Bienaimé, T., Wu, E., Giacobino, E., Bramati, A., & Glorieux, Q.（2019）。无衰减无衍射贝塞尔光束。《光学快报》，27(21), 30067。https://doi.org/10.1364/oe.27.030067

[Forbes, 2019] Forbes, A.（2019）。激光器产生的结构光。《激光与光子学评论》，13(11)，1900140。https://doi.org/10.1002/lpor.201900140

[Gao, 2017] Gao, D., Ding, W., Nieto-Vesperinas, M., Ding, X., Rahman, M., Zhang, T., Lim, C., & Qiu, C.-W.（2017）。从微米尺度到纳米尺度的光学操控：基础、进展与展望。《Light: Science & Applications》，6(9)，e17039–e17039。https://doi.org/10.1038/lsa.2017.39

[Ge，2017] Ge, S., Chen, P., Shen, Z., Sun, W., Wang, X., Hu, W., Zhang, Y., & Lu, Y.（2017）。基于光刻图案化大双折射液晶的太赫兹涡旋光束发生器。《光学快报》，25(11)，12349。https://doi.org/10.1364/OE.25.012349

[Gecevičius，2014] Gecevičius, M.、Beresna, M.、Drevinskas, R. 和 Kazansky, P. G.（2014）。由超快激光直写空间变化纳米结构在玻璃中生成的艾里光束。《光学快报》，39(24)，6791。https://doi.org/10.1364/OL.39.006791

[Gong，2014] Gong，L.、Ren，Y.、Liu，W.、Wang，M.、Zhong，M.、Wang，Z. 和Li，Y.（2014）。使用数字微镜器件生成柱矢量涡旋光束。Journal of Applied Physics，116（18），183105。https://doi.org/10.1063/1.4901574

[Gong，2018] Gong, Z., Pan, Y. Le, Videen, G., & Wang, C.（2018）。空气中单颗粒的光学捕获与操控：原理、技术细节及应用。《定量光谱学与辐射传输杂志》，214，94–119。https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2018.04.027

[Guo，2010] Guo, R., Kinzel, E. C., Li, Y., Uppuluri, S. M., Raman, A., & Xu, X.（2010）。纳米级蝴蝶结天线光学近场的三维映射。《光学快报》，18(5)，483–489。https://doi.org/10.1364/OE.18.004961

[Guo，2020] Guo, Z., Liu, H., Xiang, L., Chen, L., Yang, J., Wen, J., Shang, Y., Wang, T., & Pang, F.（2020）。利用聚合物基相位板生成完美涡旋光束。IEEE Photonics Technology Letters，32(10)，565–568。https://doi.org/10.1109/LPT.2020.2985745

[Guo，2021] Guo，Y.、Huang，Y.、Li，J.、Wang，L.、Yang，Z.、Liu，J.、Peng，X.、Yan，W. 和 Qu，J.（2021）。利用无衍射艾里光束进行深层穿透显微成像。Membranes，11(6)，391。https://doi.org/10.3390/membranes11060391

[He，2017] He、F.、Yu、J.、Tan、Y.、Chu、W.、Zhou、C.、Cheng、Y. 和 Sugioka、K.（2017）。用于制造高μ纵横比硅通孔的飞秒 1.5-m 贝塞尔光束。《科学报告》，7(1)，40785。https://doi.org/10.1038/srep40785

[Hell, 1994] Hell, S. W., & Wichmann, J. (1994). 通过受激发射突破衍射分辨率极限：受激发射损耗荧光显微镜。《光学快报》，19(11)，780。https://doi.org/10.1364/OL.19.000780

[Imen, 1991] Imen, K., Lee, S. J., & Allen, S. D. (1991). 激光辅助微米尺度颗粒去除 激光辅助微米尺度颗粒去除。《应用物理快报》，2(14)，203–205。https://doi.org/10.1063/1.104923

[Kang, 2020] Kang, S. Y., Duocastella, M., & Arnold, C. B. (2020). 用于快速焦点控制的可变光学元件。《自然·光子学》，14(9)，533–542。https://doi.org/10.1038/s41566-020-0684-z

[Kinzel, 2010] Kinzel, E. C., & Xu, X. (2010). 蝴蝶结形孔径阵列的超常红外透射。《光学快报》，35(7)，992–994。https://doi.org/10.1364/OL.35.000992

[Kumar, 2011] Kumar, A.、Hsu, K. H.、Jacobs, K. E.、Ferreira, P. M. 和 Fang, N. X.（2011）。使用压印固体电解质印章进行直接金属纳米压印。《纳米技术》，22(15)，155302。https://doi.org/10.1088/0957-4484/22/15/155302

[Kühler, 2009] Kühler, P.、García de Abajo, F. J.、Solis, J.、Mosbacher, M.、Leiderer, P.、Alfonso, C. N. 和 Siegel, J.（2009）。以纳米分辨率印刻微结构的光学近场。《小型》，5(16)，1825–1829。https://doi.org/10.1002/smll.200900393

[Lasagni, 2005] Lasagni, A., Holzapfel, C., & Mücklich, F. (2005). 通过激光干涉冶金实现具有长程有序结构的金属间相的周期性图案形成。《先进工程材料》，7(6)，487–492。https://doi.org/10.1002/adem.200400206

[Leiderer, 2000] Leiderer, P., Boneberg, J., Dobler, V., Mosbacher, M., Muenzer, H.-J., Chaoui, N., Siegel, J., Solis, J., Alfonso, C. N., Fourrier, T., Schrems, G. and Baeuerle, D. 从硅晶圆上激光诱导颗粒去除。SPIE会议论文集，第4065卷，249–259。https://doi.org/10.1117/12.407353

[Liu, 2018] Liu, D., Wang, Y., Zhai, Z., Fang, Z., Tao, Q., Perrie, W., Edwarson, S. P., & Dearden, G. (2018). 使用混合全息图进行材料加工的动态激光束整形。《光学与激光技术》，102，68–73。 https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.12.022

[Luk'Yanchuk, 2003] Luk'Yanchuk, B. S., Arnold, N., Wang, Z., & Hong, M. H. (2003). 干式激光清洗中的三维效应。《应用物理 A》，77，209–215。
https://doi.org/10.1007/s00339-003-2139-z

[Martinez, 2015] Martínez de Mendívil, J., Hoyo, J., Solís, J., Pujol, M. C., Aguiló, M., Díaz, F., & Lifante, G. (2015). 结合液相外延与光束复用飞秒激光直写制备 KY(WO4)2 通道波导。《光学材料》，47，304–309。https://doi.org/10.1016/j.optmat.2015.05.046

[Mathis, 2012] Mathis, A., Courvoisier, F., Froehly, L., Furfaro, L., Jacquot, M., Lacourt, P. A., & Dudley, J. M. (2012). 沿曲线进行微加工：利用加速光束对金刚石和硅的曲面轮廓进行飞秒激光微加工。《应用物理快报》，101(7)，071110。
https://doi.org/10.1063/1.4745925

[McGloin, 2005] McGloin, D., & Dholakia, K. (2005). 贝塞尔光束：以全新视角看衍射。《当代物理学》，46(1)，15–28。 https://doi.org/10.1080/0010751042000275259

[McLeod, 2006] McLeod, E., Hopkins, A. B., & Arnold, C. B. (2006). 由可调声学梯度折射率透镜生成的多尺度贝塞尔光束。《光学快报》，31(21)，3155。
https://doi.org/10.1364/ol.31.003155

[McLeod, 2007] McLeod, E., & Arnold, C. B. (2007). 可调声学梯度透镜的力学特性与屈光力优化. Journal of Applied Physics, 102(3), 1–9.https://doi.org/10.1063/1.2763947

[McLeod, 2008] McLeod, E., & Arnold, C. B. (2008). 使用光学捕获微球进行亚波长直写纳米图案化。《自然·纳米技术》，3(7)，413–417。
https://doi.org/10.1038/nnano.2008.150

[Miyasaka，1999] Miyasaka, M., & Stoemenos, J. (1999). 非晶硅薄膜和固相结晶硅薄膜的准分子激光退火。Journal of Applied Physics, 86(10), 5556–5565。https://doi.org/10.1063/1.371560

[Murphy-dubay，2008] Murphy-dubay, N., Wang, L., Kinzel, E. C., Uppuluri, S. M. V, & Xu, X. (2008). 使用集成高透射率纳米尺度蝴蝶结孔径的 NSOM 探针进行纳米图案化。《光学快报》, 16(4), 39–44。https://doi.org/10.1364/OE.16.002584

[Nakata，2021] Nakata, Y., Tsubakimoto, K., Miyanaga, N., Narazaki, A., Shoji, T., & Tsuboi, Y. (2021). 飞秒激光干涉加工诱导的贵金属纳米点转移。《纳米材料》, 11(2), 1–10。https://doi.org/10.3390/nano11020305

[Nasrollahi，2020] Nasrollahi, V., Penchev, P., Batal, A., Le, H., Dimov, S., & Kim, K. (2020). 使用平顶光束在氮化硅中钻削微尺度高深径比孔。《材料加工技术杂志》, 281(2019), 116636。https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116636

[Nivas，2017] Nivas, JJJ., He, S., Song, Z., Rubano, A., Vecchione, A., Paparo, D., Marrucci, L., Bruzzese, R., & Amoruso, S. (2017). 使用高斯光束和光学涡旋光束对硅进行飞秒激光表面结构化。《应用表面科学》，418, 565–571。https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.10.162

[尼瓦斯，2021] 尼瓦斯，J. J. J., & 阿莫鲁索，S.（2021）。飞秒激光器对硅进行表面结构加工时超波长沟槽的生成。《纳米材料》，11，174。https://doi.org/10.3390/nano11010174

[阮，2020] 阮，H. D.、Sedao, X.、Mauclair, C.、Bidron, G.、Faure, N.、Moreno, E.、Colombier, J.-P. 和 Stoian, R.（2020）。用于超快激光扫描平台的无衍射贝塞尔光束及增材制造零件侧壁抛光的概念验证。《微型机械》，11(11)，974。https://doi.org/10.3390/mi11110974

[Peter, 2020] Peter, A., Lutey, A. H. A., Faas, S., Romoli, L., Onuseit, V., & Graf, T.（2020）。利用超短脉冲对不锈钢进行直接激光干涉图案化，以制备抗菌表面。《光学与激光技术》，123，105954。https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.105954

[Rebollar, 2020] Rebollar, E., & Castillejo, M.（2020）。激光与有机/聚合物材料的相互作用。载于《激光微纳加工手册》。https://doi.org/10.1007/978-3-319-69537-2_13-1

[Roszkiewicz, 2019] Roszkiewicz, A., Jain, A., Teodorczyk, M., & Nasalski, W.（2019）。利用扫描近场光学显微镜在光刻胶层上形成并表征孔纳米图案。《纳米材料》，9(10)，1452。https://doi.org/10.3390/nano9101452

[Rowlands, 2018] Rowlands, C. J., Ströhl, F., Ramirez, P. P. V., Scherer, K. M., & Kaminski, C. F.（2018）。利用低成本折射式光束整形元件进行平场超分辨定位显微术。《科学报告》，8(1)，5630。https://doi.org/10.1038/s41598-018-24052-4

[Rung, 2013] Rung, S., Rexhepi, M., Bischoff, C., & Hellmann, R.（2013）。使用平顶激光光束轮廓进行薄膜激光刻写。《激光微纳工程杂志》，8(3)，309–314。https://doi.org/10.2961/jlmn.2013.03.0021

[Seo, 2014] Seo, J. H., Park, J. H., Kim, S. Il, Park, B. J., Ma, Z., Choi, J., & Ju, B. K.(2014). 激光干涉光刻纳米图案化：在光学器件中的应用. 《纳米科学与纳米技术杂志》，14(2), 1521–1532. https://doi.org/10.1166/jnn.2014.9199

[Serra, 2019] Serra, P., & Piqué, A. (2019). 激光诱导正向转移：基础与应用。《先进材料技术》，4(1), 1800099。https://doi.org/10.1002/admt.201800099

[Shen, 2019] Shen, Y.、Wang, X.、Xie, Z.、Min, C.、Fu, X.、Liu, Q.、Gong, M. 和 Yuan, X.（2019）。光学涡旋三十年：从拓扑荷到多个奇点的轨道角动量操控。《Light: Science & Applications》，8(1)，90。https://doi.org/10.1038/s41377-019-0194-2

[Silfvast, 2004] Silfvast, W. T. (2004). 激光基础。剑桥大学出版社。
https://doi.org/10.1017/CBO9780511616426

[Skoulas, 2017] Skoulas, E., Manousaki, A., Fotakis, C., & Stratakis, E. (2017). 使用柱矢量飞秒激光束进行仿生表面结构化。《科学报告》，7, 45114。
https://doi.org/10.1038/srep45114

[Spinello, 2016] Spinello, F., Someda, C. G., Ravanelli, R. A., Mari, E., Parisi, G., Tamburini, F., Romanato, F., Coassini, P., & Oldoni, M. (2016). 采用相反符号的轨道角动量模式叠加进行无线电信道复用。AEU—国际电子与通信期刊，70(8), 990–997.
https://doi.org/10.1016/j.aeue.2016.03.017

[Sriturawanich, 2008] Srituravanich, W., Pan, L., Wang, Y., Sun, C., Bogy, D. B., & Zhang, X.（2008）。用于高速纳米光刻的近场飞行等离激元透镜。《自然·纳米技术》，3(12)，733–737。 https://doi.org/10.1038/nnano.2008.303

[Stsepuro, 2020] Stsepuro, N., Nosov, P., Galkin, M., Krasin, G., Kovalev, M., & Kudryashov, S.（2020）。生成具有受控轴向强度分布的贝塞尔-高斯光束。《应用科学》（瑞士），10(21)，1–9。 https://doi.org/10.3390/app10217911

[Suhara, 2020] Suhara, H., Aoto, J., & Iwata, M.（2020）。通过激光诱导正向转移实现长飞行距离的打印方法。《激光微纳工程杂志》，15(2)，143–149。
https://doi.org/10.2961/jlmn.2020.02.2012

[Surdo, 2021] Surdo, S., Duocastella, M., & Diaspro, A. (2021). 使用光子纳米喷流进行纳米图案化：生物医学研究中的综述与展望。《微型机械》，12(3)，1–20。
https://doi.org/10.3390/mi12030256

[Tang, 2021] Tang, Y., Perrie, W., Rico Sierra, D., Li, Q., Liu, D., Edwardson, S. P., & Dearden, G. (2021). 激光–高质量超短脉冲矢量涡旋光束的材料相互作用。《微型机械》，12(4), 376. https://doi.org/10.3390/mi12040376

[Turkoz, 2018] Turkoz, E., Perazzo, A., Kim, H., Stone, H. A., & Arnold, C. B. (2018). 用于高分辨率打印的黏弹性薄膜脉冲诱导喷射。《物理评论快报》，120(7), 074501。https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.074501

[Turkoz, 2019] Turkoz, E., Kang, S., Du, X., Deike, L., & Arnold, C. B. (2019). 利用法拉第波降低激光诱导液体喷射的转移阈值能量。《物理评论应用》，11(5), 1–8。https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.11.054022

[Wenisch, 2021] Wenisch, C., Engel, S., Gräf, S., & Müller, F. A. (2021). 通过激发态吸收对半导体薄膜进行双激光束加工。材料，14(5), 1256。https://doi.org/10.3390/ma14051256

[Yap, 2015] Yap, C. Y., Chua, C. K., Dong, Z. L., Liu, Z. H., Zhang, D. Q., Loh, L. E., & Sing, S. L. (2015). 选择性激光熔化综述：材料与应用。《应用物理评论》，2(4), 041101。https://doi.org/10.1063/1.4935926

[Wang, 2010] Wang, Z. B.、Joseph, N.、Li, L. 和 Luk'Yanchuk, B. S.（2010）。颗粒/尖端辅助激光纳米加工中的光学近场综述。《机械工程科学杂志》，224，1113–1127。https://doi.org/10.1243/09544062JMES1766

[Wang, 2018] Wang, X.、Nie, Z.、Liang, Y.、Wang, J.、Li, T. 和 Jia, B.（2018）。光学涡旋生成的最新进展。《纳米光子学》，7(9)，1533–1556。https://doi.org/10.1515/nanoph-2018-0072

[Zhang, 2020] Zhang, W., Hou, W., Deike, L., & Arnold, C. B. (2020). 使用双激光系统在激光粉末床熔融中实现周期性聚并。《材料学报》, 201, 14–22。https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.09.071

[Zheng, 2011] Zheng, Z., Zhang, B. F., Chen, H., Ding, J. 和 Wang, H. T.（2011）。利用聚焦艾里光束进行光学捕获。《应用光学》，50(1)，43–49。https://doi.org/10.1364/AO.50.000043

[Zhu, 2018] Zhu, G., Wen, Y., Wu, X., Chen, Y., Liu, J., & Yu, S.（2018）。利用艾里光束实现自由空间光通信中的障碍规避。《光学快报》，43(6)，1203。https://doi.org/10.1364/ol.43.001203

[Zupancic, 2016] Zupancic, P., Preiss, P. M., Ma, R., Lukin, A., Eric Tai, M., Rispoli, M., Islam, R., & Greiner, M.（2016）。用于微观量子控制的超高精度全息光束整形。《光学快报》，24(13)，13881。https://doi.org/10.1364/OE.24.013881

[Zwahr, 2019] Zwahr, C., Helbig, R., Werner, C., & Lasagni, A. F.（2019）。通过采用激光烧蚀方法制备分级表面图案，制造多功能钛表面。《科学报告》，9(1)，1–13。https://doi.org/10.1038/s41598-019-43055-3