



Views & Comments

突破制造极限——超快激光纳米制造技术

林真源^{a,c}, 季凌飞^{a,*}, 洪明辉^{b,c,*}

^a School of Physics and Optoelectronic Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

^b Pen-Tung Sah Institute of Micro-Nano Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, China

^c Department of Electrical and Computer Engineering, National University of Singapore, Singapore 117576, Singapore

1. 引言

近几十年来，对小型化的追求在纳米制造中至关重要，这不仅推动了创新，也使得芯片制造、纳米光子学和量子器件等领域的新应用成为可能[1–2]。对更高元件密度和性能的需求一直驱动着纳米制造技术的进步，其中包括在大气环境中实现高精度的材料加工。传统技术（如电子束光刻[3]和纳米压印光刻[4]）已实现数十纳米尺度的制造分辨率，具有高精度、可扩展性和实现复杂纳米结构的能力。目前，由三星电子（韩国）和台积电（中国）利用极紫外纳米光刻技术开创的3 nm工艺，是半导体行业最先进的大规模生产技术。多家主要芯片制造公司[包括台积电、英特尔和三星（表1）]已加入针对2 nm先进工艺开发的竞争，目标是在约2025年投入生产。

自1960年问世以来，激光一直被认为是实现无掩模纳米光刻和直接三维（3D）写入的可行技术。然而，由

于光学衍射极限的存在，在远场和大气环境中使用激光辐照进行突破衍射极限的纳米图案化依然具有挑战。对比光学近场和远场激光制造，近场方法具有强大的亚波长精度和高空间分辨率的优势，能够实现局部能量沉积和较小热影响区。但是，近场方法需要复杂的设备，且要求样品表面平坦，同时加工面积有限，因此其不适合大规模应用。相反，远场激光加工具有光学设置简单、材料普适性和加工速度快的特点，适用于工业规模生产。然而，衍射极限的限制导致该方法的制造分辨率较低。近几十年来，大量研究都集中在提高远场激光制造的空间分辨率上。受激发射损耗（STED）[5]、多光子吸收[6]和光学远场诱导近场增强（O-FIB）[7]等多种机制已实现小至数十纳米的特征尺寸，推动基于激光的纳米制造向更精细的分辨率发展。本文简要概述了利用光学近场和远场激光辐照进行纳米制造的最新进展（图1），并讨论了该领域的挑战与局限性。

表1 主要芯片公司的先进制造能力与趋势

Company	State-of-the-art capability	Future trend
TSMC	4 nm in production and 3 nm in the ramp-up phase	2 nm volume production is expected in 2025
Intel	7 nm in production	Plans to commence 2 nm chip production in the second half of 2025
Samsung	4 nm in production and 3 nm process in the ramp-up phase	Accelerating 2 nm production, targeting 7000 wafers per month by the first quarter of 2025

* Corresponding authors.

E-mail addresses: ncltji@bjut.edu.cn (L. Ji), elehmf@xmu.edu.cn (M. Hong).

2095-8099/© 2025 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

英文原文: *Engineering* 2025, 49(6): 9–12

引用本文: Zhenyuan Lin, Lingfei Ji, Minghui Hong. Advancing Manufacturing Limits: Ultrafast Laser Nanofabrication Techniques. *Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2025.03.017>

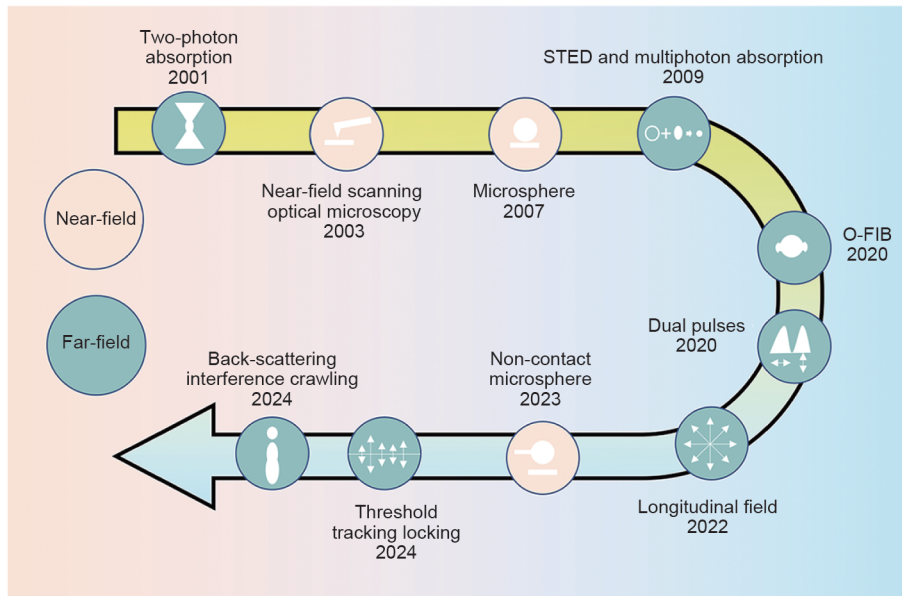


图1. 超快激光纳米制造的发展历程。

2. 光学近场激光纳米制造

近场激光制造的基本机制涉及通过具有纳米级尺寸的不连续界面来操控光场。通常利用远场聚焦光斑照射一个小孔或针尖来实现，以激发沿被照射表面传播的倏逝波。对于特征尺寸远小于入射激光波长的纳米结构，激光入射会生成具有更强横向波矢的电磁场分量，从而导致空间局域化的场分布，进而可突破衍射极限[8]。通过将800 nm飞秒激光与扫描探针相结合，基于近场局域增强的激光加工方法首次得到了验证[9]，这能够在金膜上制造小至约11 nm ($\lambda/72$)的纳米结构。此后，一些研究报道了10~30 nm的加工尺寸[10–11]。近场激光加工的高分辨率是与其倏逝特性为代价的，一旦光学近场远离激发它的不连续边界，光强就会呈指数衰减。因此近场激光加工的工作距离非常短，主要依赖近接触式曝光实现纳米制造。

在光学近场制造中，加工的特征尺寸主要取决于近场探针的物理尺寸，而对远场激发光的波长和脉冲宽度不太敏感。对于不平坦的样品表面，任何外部干扰都可能导致纳米级的变化 (Δd : 近场中探针到基底表面的距离)，从而引起能量指数衰减和扫描速度降低。为了解决动态加工过程中倏逝场工作距离短的问题，精密控制[如光镊、原子力显微镜 (AFM) 和微球]是必不可少的。光镊用于在水环境中操控微球，利用微球的近场聚焦效应来制造任意图案，分辨率约为100 nm ($\lambda/3$) [12]。量子级联激光器结合AFM增强的近场纳米光刻技术，已在有机样品表面实现了约35 nm的最优原位分辨率[13]，该技术被应用于生物分子信息存储。此外，可以将微球提升以在其与基底

表面之间形成间隙，将其工作距离扩展到几微米，从而实现非接触操作。通过精确控制微球并调整相变薄膜的厚度，可以实现约30 nm ($\lambda/26$)的最小特征尺寸[14]。烧蚀宽度与厚度的拟合结果表明，在薄膜厚度低至约10 nm时，烧蚀特征尺寸可能进一步减小到约15 nm。

3. 光学远场激光纳米制造

近场增强主要侧重于控制光场，并未充分探索加工过程中激光-材料相互作用的具体机制。由于工作距离窄，该技术通常需要光滑的样品表面，限制了其适用性。因此，从近场到远场非线性效应的超快激光纳米光刻研究是一个必然趋势。激光加工涉及复杂的物理效应，非线性激光-材料相互作用已被证明可以突破光学衍射极限，实现超分辨率加工。表2 [5–7,15–20]总结了过去五年报道的使用远场激光方法获得特征尺寸突破衍射极限的纳米制造结果。这些方法包括STED、多光子吸收、O-FIB、纵向场叠加和双光束重叠。使用飞秒激光的多光子吸收诱导光化学效应以实现纳米结构。例如，利用STED获得的3D纳米雕刻技术可应用于光学数据存储，通过双激光直接写入和读取最小尺寸约为55 nm的多层数据点，容量达到PB规模[5]。一项研究利用785 nm飞秒激光成功生成了硅酸氢盐的3D纳米结构，实现了26 nm的特征尺寸，对应于 $\lambda/30$ 的加工精度[6]。

为了在激光-物质相互作用过程中确保远场中均匀的纵向能量沉积和近场中横向亚波长光束的限制，研究人员提出了一种称为光学远场诱导近场击穿的新策略用于表面

表2 过去五年报道的特征尺寸超越衍射极限的远场纳米光刻结果

Strategy	Laser processing parameters	Achievable feature size
STED [5]	512 nm, 180 fs	~55 nm
Multiphoton absorption [6]	800 nm, 120 fs	26 nm
O-FIB [15]	800 nm, 150 fs	20 nm
Longitudinal field [16]	800 nm, 100 fs	~10 nm
Ultraviolet dual beams overlapping [17]	405 nm, > 1500 ns	5 nm
Dual beams overlapping of orthogonal polarization [18–19]	800 nm, 50 fs 1064 nm, 1 ns	~12 nm ~30 nm
Back-scattering interference crawling [7]	515 nm, 230 fs	7 nm
Threshold tracking locking method [20]	1030 nm, 230 fs	< 5 nm

纳米制造[7,15]。该方法基于超快激光诱导纳米结构的种子诱导背向散射扩散机制形成了一个正反馈,扩展并均匀化了纵向激光能量沉积。通过动态调制800 nm飞秒激光的偏振,在二氧化钛薄膜表面制造了空间分辨率小于20 nm ($\lambda/40$)的纳米图案[15]。高质量纵向光场的调制也有助于构建特征尺寸超越光学极限的纳米结构。使用纵向场照射在蓝宝石晶体上制造了直径为10~30 nm的纳米孔[16],实现了超过16的纵横比。复合激光辐照方案已被用于精密加工多种材料,以解决远场衍射极限问题。此外,双光束辐照是一种在远场实现更精细纳米制造的方法。双405 nm纳秒激光重叠可以实现5 nm的最小线宽[17]。在使用800 nm飞秒激光正交偏振重叠的实验中,通过将两束正交偏振的光耦合并在高重复频率下优化激光加工参数,在硅表面直接制造了12 nm ($\lambda/66$) [18]的纳米结构。通过调整1064 nm纳秒激光的双脉冲,也实现了在单晶硅表面直接写入约30 nm的结构[19]。这些研究表明,脉冲激光精密工程是产生亚10 nm特征的一种可行方法。

4. 挑战与展望

超快激光制造在精密工程方面取得了显著进展,使得特征尺寸从微米级发展到纳米级。然而,一些挑战仍未解决。

首先,纳米制造快速发展仍然难以实现纳米级的高深径比加工。这一挑战源于光的衍射受限传播,这与高纵横比纳米级加工所需的均匀轴向和亚波长横向能量沉积的要求相矛盾。此外,复杂的光-材料相互作用加剧了纳米创造的不均匀性,包括线性和非线性吸收、散射以及由强烈能量沉积产生的热效应和应力效应。为了解决这些问题,提出了两种主要解决方案。一种涉及轴向拉伸或多焦点光束照射,这可以通过调制入射脉冲的相位和振幅来实现,以平衡焦深与激光光斑尺寸[21]。另一种是基于贝塞

尔-高斯光束的切割技术。研究表明,类贝塞尔光束可以在透明硬质材料中打出直径约35 μm 、纵横比超过1000的孔[22]。然而,使用远场飞秒激光辐照进行纳米制造的深径比大多限制在10,这不能满足工业需求。最近,一种基于背向散射干涉攀爬和化学蚀刻的新方法被证明可以实现空间宽度在数十纳米范围内、纵横比在1000~10 000之间的结构,该结构位于透明功能固体上。这种方法还将切割表面的粗糙度降低到9.4 nm [7],为实现高深径比纳米制造提供了一种有前景的方法。

其次,由于非线性阈值现象的不稳定性,超快激光可实现的加工尺寸被限制在10 nm左右。据报道,阈值追踪和锁定可以将飞秒激光加工的空间分辨率提高到二维材料表面的量子极限[20]。在接近原子损伤阈值的激光能量下,原子移除可能不会精确发生在激光照射区域的中心。在这种情况下,激光能量梯度变得不那么明显,导致无效的击穿区域,而这通常是由激光能量梯度决定的。相反,局域原子移除在烧蚀区域内零星发生,这主要受局部电子位置和能量波动的影响,而不是激光诱导的热梯度。这种效应使得特征尺寸低于5 nm [20]成为可能,超越了光学衍射极限和原子点缺陷复合体之间的次级间隙。这些研究表明,亚10 nm激光纳米制造应考虑材料基本晶格结构和基本电子振动的影响,为超分辨率纳米级和原子级加工提供了新的视角。

超快激光制造系统和激光源对于高效、高质量的激光纳米结构加工至关重要。高重复频率飞秒激光因其高稳定性而最常被用于纳米结构加工。在过去的几十年里,脉冲整形技术已成为实现更好激光材料加工性能的潜在方法。最近,吉赫脉冲串模式飞秒激光器[23]因其能够实现高质量、高效率 and 精确的材料加工而受到广泛关注,这种激光器发射具有几百皮秒极短脉冲间隔的飞秒脉冲串。此外,在激光纳米制造中同时实现高分辨率和高效率是一个重大挑战,特别是对于需要满足多样化工业需求的大规模纳米

制造而言。为了解决这个问题，并行激光束制造技术（包括微透镜阵列[24]和空间光调制器[25]）提供了可扩展的解决方案，平衡了大规模纳米制造中对分辨率和产量的需求。因此，具备纳米制造潜力的飞秒激光加工技术应运而生。然而，由于飞秒激光与材料之间复杂的非线性相互作用，许多新现象仍无法解释，需要进一步研究。

CRediT authorship contribution statement

Zhenyuan Lin: Writing-original draft. **Lingfei Ji:** Writing-original draft. **Minghui Hong:** Writing-original draft, Conceptualization.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

致谢

本研究得到了国家自然科学基金(51975017、52405448)、福建省能源材料科学与技术创新实验室(IKKEM)人才培养项目(HRTP-[2022]-53)的资助。感谢中国博士后科学基金(2024M750149、GZC20240087)的支持。

References

- [1] Tan JW, Wang G, Li YF, Yu Y, Chen QD. Femtosecond laser fabrication of refractive/diffractive micro-optical components on hard brittle materials. *Laser Photon Rev* 2023;17:2200692.
- [2] Xu XY, Wang TX, Chen PC, Zhou C, Ma JN, Wei DZ, et al. Femtosecond laser writing of lithium niobate ferroelectric nanodomains. *Nature* 2022;609:496–501.
- [3] Toyama R, Majima Y. 7.4 nm linewidth Pt nanowires by electron-beam lithography using non-chemically amplified positive-tone resist and post-exposure bake. *Jpn J Appl Phys* 2024;63:040905.
- [4] Staaks D, Hsu Y, Lee KY, Steiner PL, Yu Z, Wu JJ, et al. Nanoimprint lithography guiding templates for advanced magnetic media fabrication. *J Vac Sci Technol B* 2024;42:013801.
- [5] Zhao M, Wen J, Hu Q, Wei XB, Zhong YW, Zhao HR, et al. A 3D nanoscale optical disk memory with petabit capacity. *Nature* 2024;626:772–8.
- [6] Jin F, Liu J, Zhao YY, Dong XZ, Zheng ML, Duan XM. $\lambda/30$ inorganic features achieved by multi-photon 3D lithography. *Nat Commun* 2022;13(1):1357.
- [7] Li ZZ, Fan H, Wang L, Zhang X, Zhao XJ, Yu YH, et al. Super-stealth dicing of transparent solids with nanometric precision. *Nat Photon* 2024;18:799–808.
- [8] Kawata S, Sun HB, Tomokazu T, Takada K. Finer features for functional microdevices. *Nature* 2001;412:697–8.
- [9] Chimmalgi A, Choi TY, Grigoropoulos CP, Komvopoulos K. Femtosecond laser apertureless near-field nanomachining of metals assisted by scanning probe microscopy. *Appl Phys Lett* 2003;82(8):1146–8.
- [10] Lin Y, Hong MH, Wang WJ, Wang ZB, Chen GX, Xie Q, et al. Surface nanostructuring by femtosecond laser irradiation through near-field scanning optical microscopy. *Sens Actuator A Phys* 2007;133(2):311–6.
- [11] Casas IF, Kautek W. Subwavelength nanostructuring of gold films by apertureless scanning probe lithography assisted by a femtosecond fiber laser oscillator. *Nanomaterials* 2018;8(7):536.
- [12] McLeod E, Arnold CB. Subwavelength direct-write nanopatterning using optically trapped microspheres. *Nat Nanotechnol* 2008;3:413–7.
- [13] Lee W, Zhou ZT, Chen XZ, Qin N, Jiang JJ, Liu KY, et al. A rewritable optical storage medium of silk proteins using near-field nano-optics. *Nat Nanotechnol* 2020;15:941–7.
- [14] Lin ZY, Liu K, Cao T, Hong MH. Microsphere femtosecond laser sub-50 nm structuring in far field via non-linear absorption. *Opto-Electron Adv* 2023;6(6):230029.
- [15] Li ZZ, Wang L, Fan H, Yu YH, Chen QD, Juodkazis S, et al. O-FIB: far-field-induced near-field breakdown for direct nanowriting in an atmospheric environment. *Light Sci Appl* 2020;9(1):41.
- [16] Li ZQ, Allegre O, Li L. Realising high aspect ratio 10 nm feature size in laser materials processing in air at 800 nm wavelength in the far-field by creating a high purity longitudinal light field at focus. *Light Sci Appl* 2022;11:339.
- [17] Park K, Jung WB, Kwon K, Lavrentovich OD, Jung HT. Sub-5 nm dendrimer directed self-assembly with large-area uniform alignment by graphoepitaxy. *Adv Funct Mater* 2019;29:1901876.
- [18] Lin Z, Liu H, Ji L, Lin W, Hong MH. Realization of ~ 10 nm features on semiconductor surfaces via femtosecond laser direct patterning in far field and in ambient air. *Nano Lett* 2020;20(7):4947–52.
- [19] Lin Z, Ji L, Hong MH. Approximately 30 nm nanogroove formation on single crystalline silicon surface under pulsed nanosecond laser irradiation. *Nano Lett* 2022;22(17):7005–10.
- [20] Wang XJ, Fang HH, Li ZZ, Wang D, Sun HB. Laser manufacturing of spatial resolution approaching quantum limit. *Light Sci Appl* 2024;13:6.
- [21] Ma R, Ji L, Yan T. Laser multi-focus precision cutting of thick sapphire by spherical aberration rectification. *Opt Laser Eng* 2020;126:105876.
- [22] Lu YM, Duan YZ, Liu XQ, Chen QD, Sun HB. High-quality rapid laser drilling of transparent hard materials. *Opt Letters* 2022;47(4):921–4.
- [23] Obata K, Kawabata S, Hanada Y, Miyaji G, Sugioka K. High performance micromachining of sapphire by laser induced plasma assisted ablation (LIPAA) using GHz burst mode femtosecond pulses. *Opto-Electron Sci* 2024;3:230053.
- [24] Li Y, Hong MH. Parallel laser micro/nano-processing for functional device fabrication. *Laser Photon Rev* 2020;14(3):1900062.
- [25] Zhang L, Wang C, Zhang C, Xue Y, Ye Z, Xu L, et al. High-throughput two-photon 3D printing enabled by holographic multi-foci high-speed scanning. *Nano Lett* 2024;24(8):2671–9.