

面向金刚石材料高质量激光加工方法和研究进展

张晓宇^{1,2}, 王子昂^{1,2}, 胡秀飞^{1,2}, 葛磊^{1,2}, 王英楠^{1,2}, 韩赛斌^{1,2}, 彭燕^{1,2}, 徐明升^{1,2}, 徐现刚^{1,2}

(1. 山东大学新一代半导体材料研究院, 济南 250100; 2. 山东大学晶体材料国家重点实验室, 济南 250100)

摘 要: 随着金刚石生长工艺的提升, 金刚石加工面临更高要求, 传统机械加工难以满足部分高精度需求。激光加工以其高精度、高效率、广泛适用性和可控性, 已成为金刚石加工的主流技术。当前, 激光在金刚石加工中的主要应用包括激光抛光、微通道、微孔加工、激光切割和激光剥离。本文系统阐述了激光与金刚石的加工机理, 分析了不同类型激光的作用特点与优势, 总结了近年来激光技术的发展现状, 探讨了当前技术瓶颈与挑战, 并展望了其未来发展方向。

关键词: 金刚石; 激光加工; 激光抛光; 激光切割; 激光剥离

中图分类号: TQ163 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2025)08-2388-22

网络出版时间: 2025-05-30



金刚石材料作为超宽禁带半导体的代表, 因其具有极高的硬度、优异的热导率、宽禁带、高电子迁移率和良好的化学惰性^[1-3], 在高端电子器件、光学元件、量子信息、微纳机电系统(MEMS/NEMS)、生物医学和航空航天等领域有着广泛的应用前景^[4-6]。然而, 这些应用对金刚石的加工提出了极高的要求^[7], 如微纳结构的高精度制备、复杂几何形状的高效加工、表面粗糙度的超精密控制、以及避免因加工引起的微裂纹和材料性能退化。传统的机械加工方式由于受到工具磨损、加工应力和材料脆性导致的开裂等限制, 已难以满足这些高精度、高效率、低损伤的加工需求^[8-10]。

激光加工技术因其高能量密度、非接触性、可控性强等特点, 正逐渐取代传统机械加工, 成为金刚石材料加工的核心技术^[11]。与传统方法相比, 激光加工不仅能够微纳尺度上实现高效、精准的材料去除, 还能通过优化参数以适应不同的加工要求, 从而显著提高加工质量和效率。此外, 激光加工具有较高的稳定性和环保性, 在制造过程中无污染、低能耗, 为实现绿色加工提供了可能。然而,

尽管激光加工技术在金刚石材料领域表现出显著优势^[12], 但目前仍面临若干技术瓶颈, 如激光诱导损伤控制、热效应优化、复杂结构的高效加工, 以及多物理场耦合效应下的加工机理研究。深入探讨这些问题, 不仅有助于推动激光加工技术的进一步发展, 也为实现金刚石在更广泛领域的高效应用提供理论支持和技术保障。

本文以金刚石激光加工技术为主要研究对象, 系统阐述了激光加工金刚石的基本机理, 梳理了激光加工在微通道、激光抛光、激光切割和激光剥离等方面的典型应用, 分析了当前技术的研究现状和存在的不足, 并展望了未来激光加工技术在金刚石领域的潜在发展方向。

1 激光加工金刚石机理

激光加工金刚石的过程通常分为 2 个主要步骤: 首先, 通过激光诱导将金刚石转变为石墨相, 然后通过气化和化学刻蚀去除石墨相以完成材料加工^[12-14]。金刚石的 C—C 键是由碳原子通过 sp^3 杂化与周围原子形成的强键, 当金刚石晶格中的原子受

收稿日期: 2025-02-08。 修订日期: 2025-03-07。

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2023ZD04, ZR2022QF129); 国家自然科学基金(U23A20569, 62305189); 山东省重点研发(2022ZLGX02); 山东省高等学校青创科技支持计划(2022KJ032)。

第一作者: 张晓宇(2000), 男, 硕士研究生。

通信作者: 葛磊(1994), 男, 博士;

胡秀飞(1997), 女, 博士。

Received date: 2025-02-08. Revised date: 2025-03-07.

First author: ZHANG Xiaoyu (2000-), male, Master Candidate.

E-mail: 202334111@mail.sdu.edu.cn

Correspondent author: GE Lei (1994-), male, Ph.D.

HU Xiufei (1997-), female, Ph.D.

E-mail: leige@sdu.edu.cn; huxf@sdu.edu.cn

到激光等外部能量源的作用并获得足够能量时,原子间的结合状态会变得不稳定。这种能量的累积使得晶格结构发生变化,从而导致 sp^3 杂化状态向 sp^2 状态的转化,发生石墨化。石墨化过程是激光加工金刚石的核心机制,因为碳相的转变直接决定了材料的去除方式和加工效果。这一过程的控制和优化在实现高效、高精度金刚石加工中至关重要^[15-16]。

1.1 表面石墨化

激光诱导金刚石表面石墨化的核心机制是光子能量激发碳原子间的 sp^3 键转变为 sp^2 键。在此过程

中,电子通过多光子吸收或隧穿效应获得能量,形成自由电子云,杂质和缺陷会加速这一过程。激光功率和脉冲时间对加热机制有重要影响:在低功率长脉冲条件下,电子与晶格达到热平衡,导致缓慢加热;而在高功率条件下,可能会触发电子雪崩效应,使电子温度大幅超出晶格温度,进而引起碳原子的电离(见图 1)。这些激光参数的变化影响了石墨化过程,从局部形成 sp^2 键区域到最终完全转化为石墨相。在外部加热的情况下,石墨化通常需要约 950 K 的温度^[17-21]。

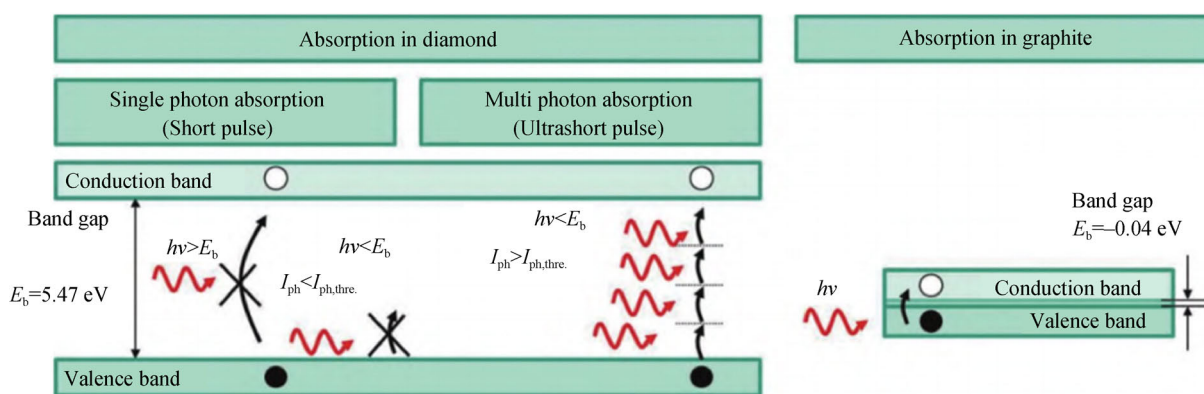


图 1 金刚石和石墨的光电子吸收行为^[21]

Fig. 1 Photoelectron absorption behavior of diamond and graphite^[21]

需要特别指出的是,金刚石的石墨化方向并不受其晶体取向等性质的影响,而主要由激光照射区域所形成的热梯度主导。激光加热过程可用一维热传导方程描述:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \alpha I_0 e^{-\alpha z} \quad (1)$$

式中: ρ 为材料密度, kg/m^3 ; C_p 为比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; k 为热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; α 为吸收系数, m^{-1} ; I_0 为激光功率密度, W/m^2 ; T 为温度, K ; t 为时间, s ; z 为垂直于材料表面的深度, m 。

该模型可量化激光能量在金刚石中的热扩散行为^[22]。在石墨化过程中,金刚石的缺陷和表面通常是发生石墨化的主要区域^[20]。Konov^[23]研究提出,金刚石与石墨在空间结构的排布差异可解释这一现象:金刚石的结构较为紧凑,而石墨化过程中相邻碳原子之间的平均距离增大,因此石墨的密度小于金刚石的密度。由于密度差异,石墨化更倾向于在空间较为开阔的区域发生,这也是金刚石表面和缺陷区域更容易发生石墨化的原因。

自 20 世纪 90 年代以来,许多学者开展了关于

激光作用金刚石的实验研究,以更好地理解其作用机理。例如,Odake 等^[24]采用波长为 355 nm、脉宽为 100 ns 的激光对单晶金刚石(SCD)和超硬纳米聚晶金刚石(NPD)进行了加工,并利用扫描电子显微镜(SEM)、透射电子显微镜(TEM)及拉曼光谱等技术对加工后的表面进行了比较分析(见图 2)。通过 SEM 观察,发现 NPD 的激光切割深度大于 SCD,并结合 NPD 导热系数较低的特点,推测金刚石的导热系数对激光加工效果有显著影响。此外,Zhang 等^[25]利用纳秒脉冲激光,深入探讨了激光加工 SCD 表面微槽的形成机理,研究了热效应引起的金刚石微凹槽的纳米表面特征,并通过热弹性弯曲模型分析了裂纹的产生和扩展过程。研究团队还进一步分析了烧蚀槽附近诱导变质层(IML)和沉积变质层(DML)的组成相及其形成机制(见图 3)。

为探讨激光烧蚀对不同类型金刚石的差异性影响,Ohfujii 等^[26]选择了单晶 I b 型、单晶 II a 型和多晶金刚石 3 种类型的人造金刚石进行激光烧蚀实验,详细揭示了单晶与多晶金刚石在激光切割后表面微纳米结构的变化(见图 4)。实验结果表明,激光

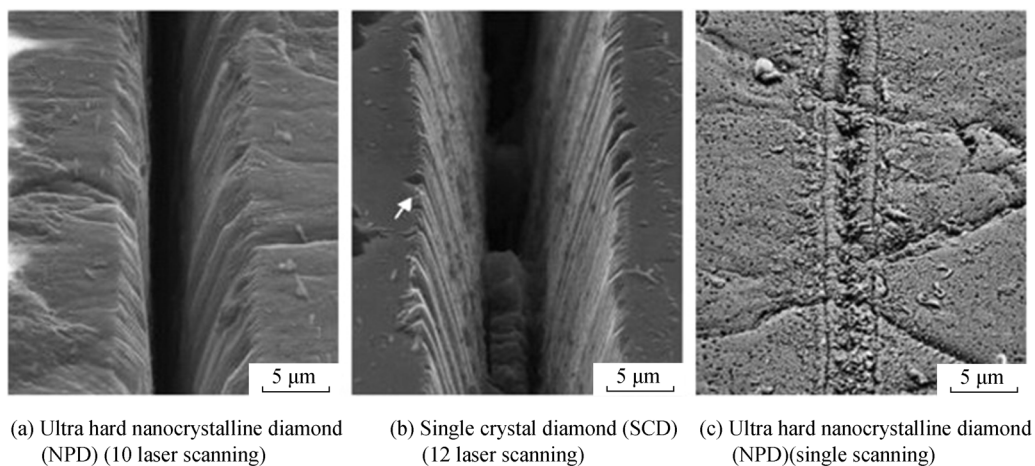


图 2 激光切割槽的放大图像^[24]
Fig. 2 Enlarged images of laser cutting groove^[24]

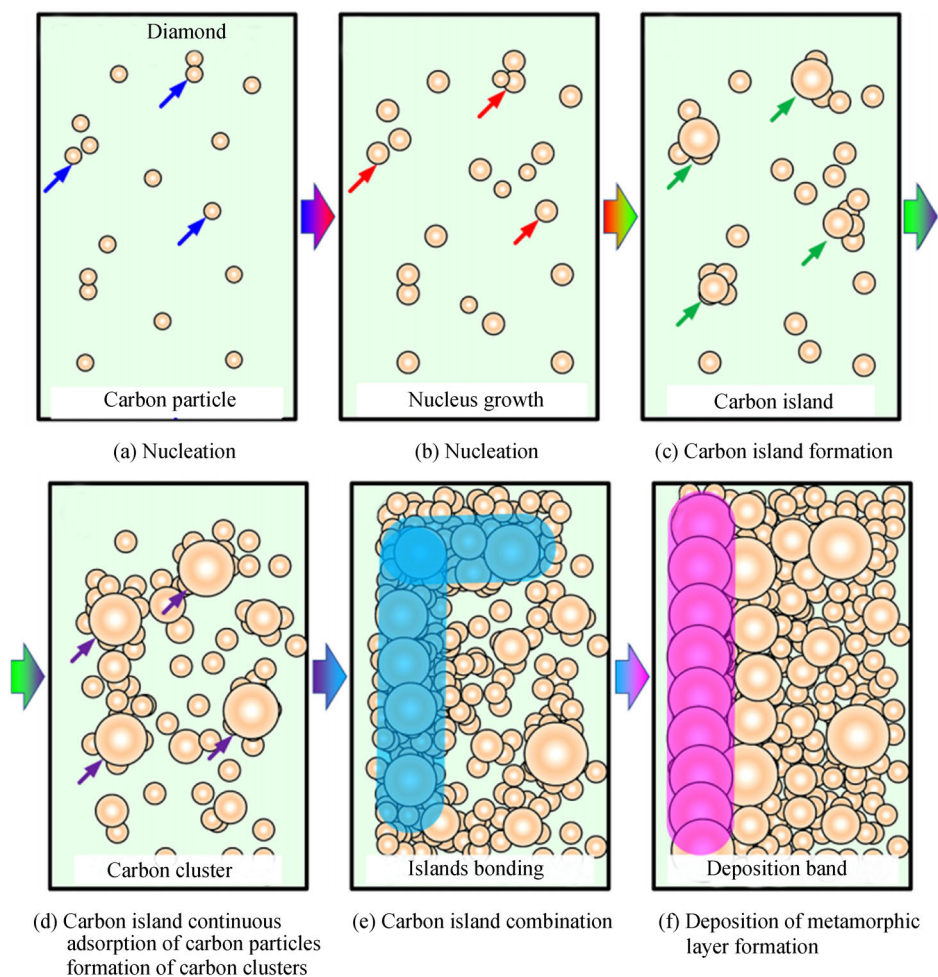


图 3 金刚石沉积变质层形成示意图^[25]
Fig. 3 Schematic diagram of the formation of the diamond sedimentary metamorphic layer (DML)^[25]

作用金刚石的过程可以分为 2 个步骤：第 1 步是激光扫描路径的广泛石墨化，第 2 步是随后的预成型

石墨升华。这些研究为激光切割金刚石的加工机理提供了更为深入的理解，并为优化加工工艺参数提

供了理论依据。

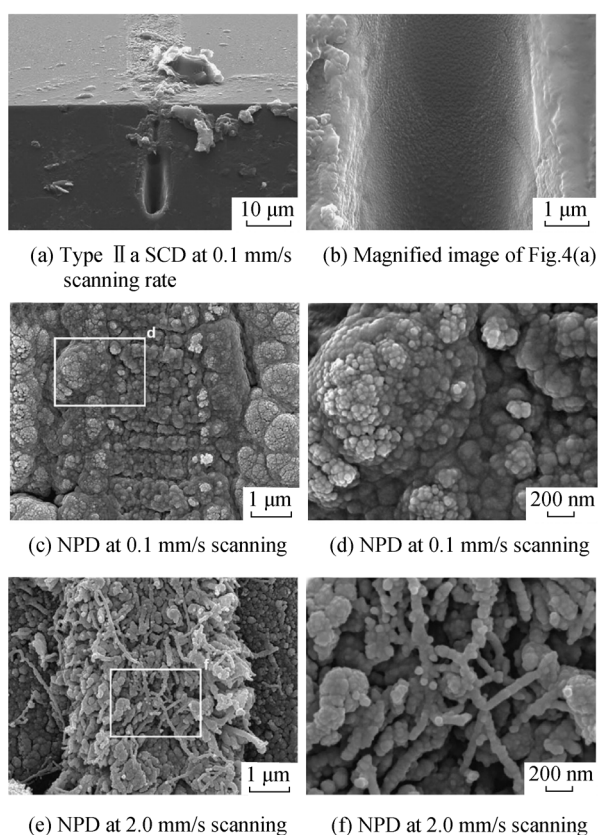


图 4 激光切割的沟槽和碎片材料的 SEM 照片^[26]

Fig. 4 SEM images of laser-cut grooves and fragmented materials^[26]

金刚石石墨化是激光加工金刚石的关键步骤, 受到多种因素的影响。石墨化过程的速度、取向以及石墨层厚度等特征, 与激光照射区域的温度分布、加工晶面的选择、脉冲宽度以及激光能量通量等参数密切相关^[27-30]。深入研究石墨化机理有助于更有效地控制石墨化过程, 从而实现能量的高效吸收, 为后续导电结构以及更复杂结构的加工提供理论支持。

1.2 激光作用去除石墨

1.2.1 激光去除石墨机理 早期的激光加工研究探索了多种激光源, 涵盖了从连续激光到极短飞秒脉冲的脉宽范围, 以及从红外到紫外的波长范围^[31]。当激光功率密度超过材料的烧蚀阈值时, 材料的去除现象便会发生。烧蚀阈值是材料的固有特性, 同时受激光束的峰值功率和波长影响。金刚石吸收激光能量后, 石墨的去除机制主要分为 2 种: 一种是低激光通量和低温度条件下, 通过转化的石墨相与空气发生氧化反应实现去除的化学烧蚀; 另一种是在高激光通量和高温度条件下, 通过石墨温度达到烧蚀阈值而发生汽化去除的物理烧蚀^[32-33]。

烧蚀阈值不仅与激光脉冲数量密切相关, 还随着脉冲宽度的变化而显著波动。Komlenok 等^[34]的研究表明, 随着脉冲数的增加, 多脉冲累积效应使材料的光吸收系数逐渐提高, 从而导致烧蚀阈值降低 (见图 5); 此外, 短脉宽激光通常具有更低的烧蚀阈值, 即短脉冲更易使材料达到烧蚀临界点。Strekalov 等^[21]则是聚焦于石墨化速率与温度的关系, 总结了石墨化速率与温度的关系:

$$R = \Omega \exp\left(-\frac{\varepsilon_a - \Delta\varepsilon}{T}\right) \quad (2)$$

其中: ε_a 为石墨化活化能; Ω 为尝试频率; $\Delta\varepsilon$ 为激光提供的额外能量。该公式为后续研究激光加工金刚石热学方面提供了重要理论依据。另有一些学者从激光脉宽角度进行研究, Okuchi 等^[35]分别采用纳秒近红外、纳秒近紫外和飞秒近红外激光对超硬纳米多晶金刚石进行加工研究, 结果显示, 纳秒近红外激光在粗加工方面效果最佳, 而纳秒近紫外和飞秒近红外激光则在精密表面加工中表现更为优异。具体而言, 纳秒级红外激光加工效率高, 适用于快速成形, 但会引起约 10 μm 级的表面畸变; 纳秒级紫外激光适合切割厚度小于 200 μm 的样品; 而飞秒激光则最适用于精密微加工和表面精加工。在该研究中, 作者进一步指出, 不同脉宽激光对金刚石的作用机理存在显著差异, 因此后续针对激光作用金刚石的研究大多根据激光脉宽的不同而分别展开。

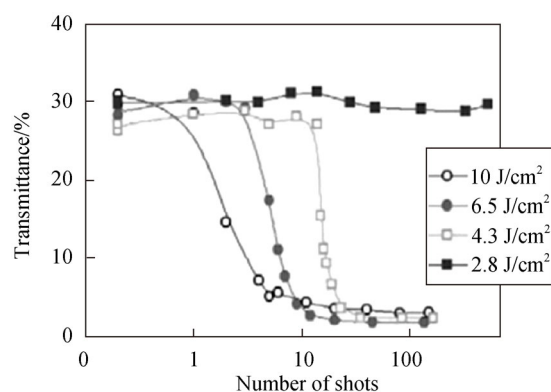


图 5 脉冲持续时间对金刚石烧蚀阈值的影响^[34]

Fig. 5 Effect of pulse duration on diamond ablation threshold^[34]

1.2.2 不同脉宽激光去除石墨机理 随着对激光作用金刚石机理的深入研究, 短脉冲和超短脉冲激光因其高加工精度、低损伤和良好可控性, 逐渐成为激光加工的首选^[36-38]。常用的脉冲激光可分为 3 类: 纳秒脉冲激光 (简称纳秒激光)、皮秒脉冲激光 (简称皮秒激光) 和飞秒脉冲激光 (简称飞秒激光)。

其中, 纳秒激光属于短脉冲激光, 皮秒和飞秒激光则归类为超短脉冲激光^[39]。纳秒激光具有较高的脉冲能量、平均功率和峰值功率, 因此加工效率更高; 而皮秒和飞秒激光因加工过程中热效应较小, 被定义为“冷加工”^[40–41]。

理论与实验研究表明, 脉冲宽度超过皮秒的激光脉冲能够同时加热晶格和电子, 而宽度小于 1 ps 的脉冲激光则主要通过非线性电离激发电子^[42]。纳

秒级或更长脉冲的激光通常引发晶格加热, 诱导固体-固体相变、非晶化、熔化或蒸发; 相比之下, 飞秒激光通过膨胀等离子体去除材料, 减少对剩余表面的损伤^[43–44]。因此, 纳秒激光因较高的平均功率, 常导致粗糙或扰动的加工表面, 而飞秒激光因较低的平均功率, 更适用于生成光滑且干净的表面。不同脉宽激光的加工机理见图 6。基于这些差异, 各类激光在具体应用中各具优势和局限性。

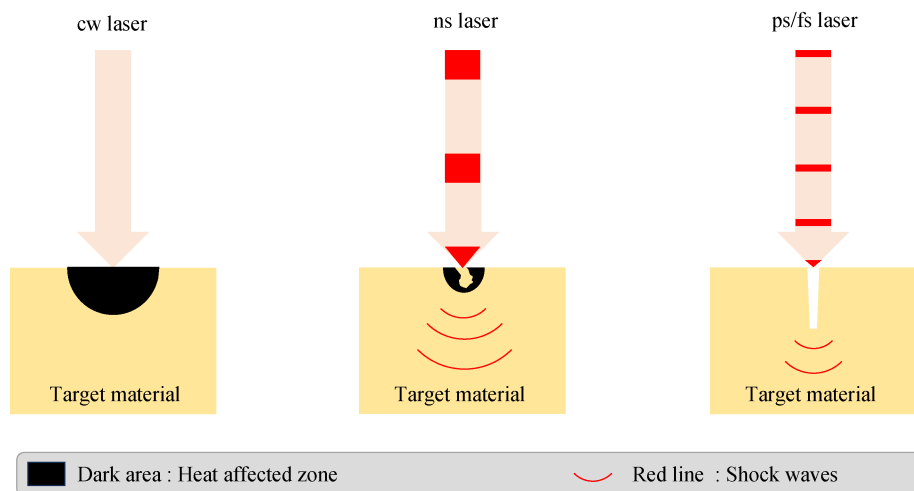


图 6 不同类型激光加工示意图

Fig. 6 Schematic diagram of different types of laser processing

在金刚石激光加工领域, 纳秒激光凭借其高加工效率和广泛适用性, 已成为最常用的技术。Mouhamadali 等^[45]针对化学气相沉积(CVD)金刚石的研究表明, 纳秒激光在不同通量条件下的切削性能和残余石墨化层厚度能够通过模拟模型精确预测, 并验证了其理论模型的合理性(见图 7)。进一步研究还揭示了开裂行为的成因与通量的相关性, 指出裂纹主要集中在无序石墨区域, 且与微观结构的低断裂韧性及缺陷引发的应力集中密切相关。

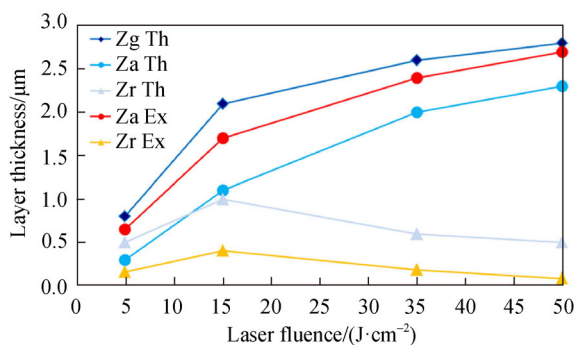
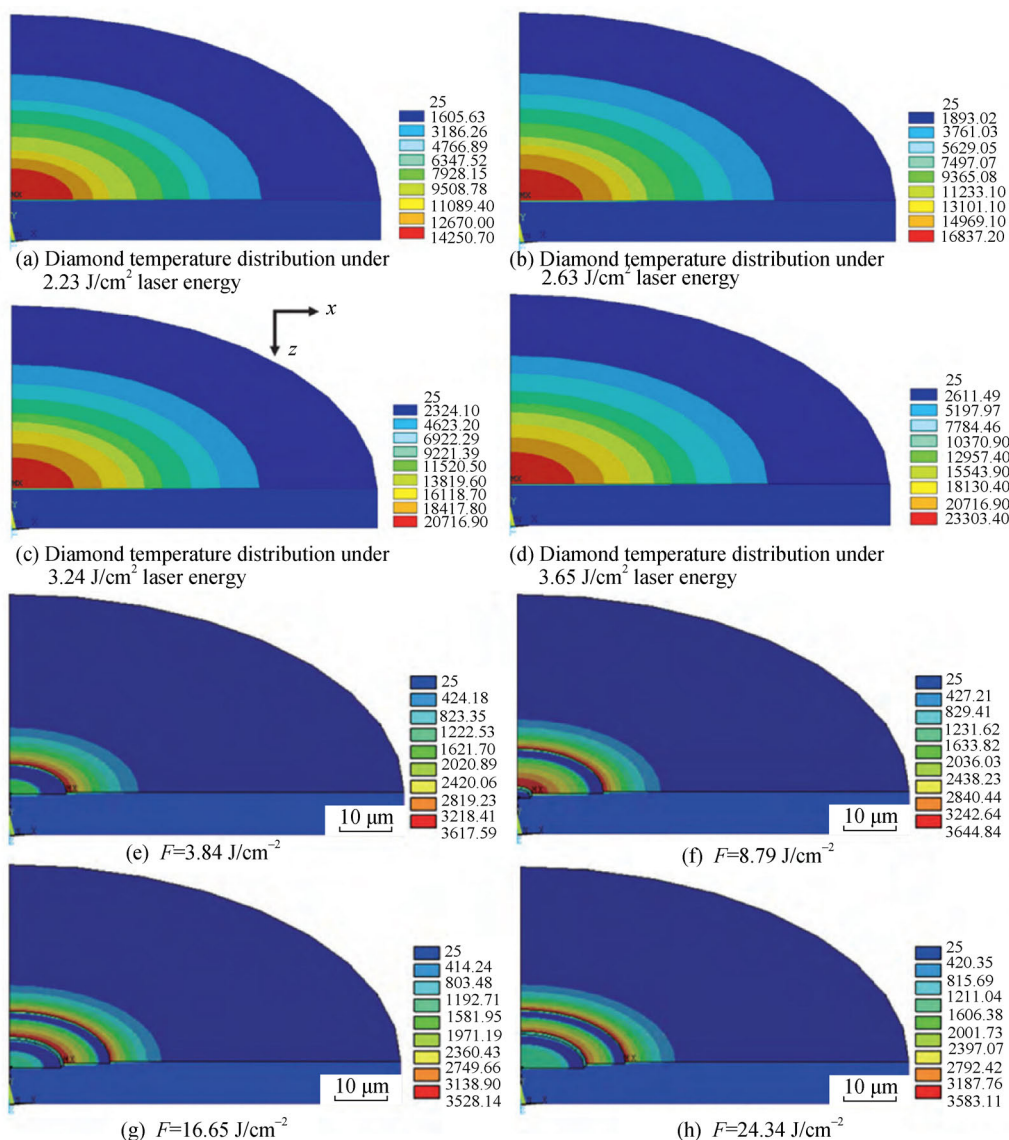


图 7 石墨层厚与激光通量的关系图^[45]

Fig. 7 Relationship between graphite layer thickness and laser flux^[45]

与纳秒激光加工相比, 皮秒和飞秒激光在金刚石加工中表现出更低的烧蚀阈值和独特的加工特征。皮秒激光的材料去除机制既不同于纳秒激光的热平衡加工方式, 也与飞秒激光的冷加工方式存在差异^[46]。温秋玲等^[47]使用波长为 1064 nm、脉宽为 15 ps 的皮秒激光对 CVD 单晶金刚石进行了实验研究, 并通过模拟仿真分析了烧蚀过程中的温度场分布(见图 8)。研究表明, 在皮秒激光的作用下, 能量主要集中于材料表面, 向内部的传递极少, 导致石墨化与材料去除以分层形式进行。这种加工方式相较于纳秒激光更加精细。然而, 由于金刚石材料与周围区域在激光加工中形成较大的温度梯度, 热应力随之增大, 容易在微槽边缘引发微小裂纹和崩边。

飞秒激光加工金刚石主要通过光诱导的光学击穿效应实现。在激光作用下, 大量电子发生电离, 引发材料结构与相组成的变化, 从而导致金刚石由 sp^3 相转变为 sp^2 相, 随后材料被烧蚀^[48–49]。陈根余等^[50]对飞秒激光作用下单晶金刚石的烧蚀阈值进行了系统研究, 发现随着激光有效脉冲数的增加, 烧蚀阈值逐步降低。在此基础上, 他们提出了“弱烧蚀”和“强烧蚀”的概念, 分别对应雪崩电离和光子



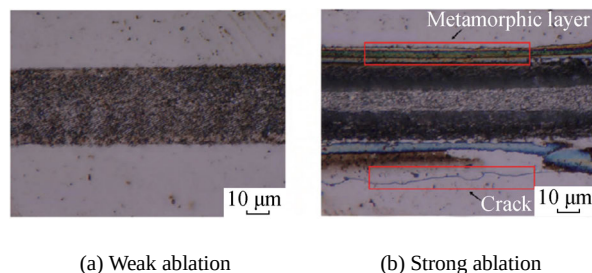
Picosecond on the Fig. 8(a)–Fig. 8 (d). Femtosecond on the Fig. 8(e)–Fig. 8(h).

图 8 不同激光能量下单脉冲皮秒与飞秒激光烧蚀金刚石的温度分布^[47, 51]

Fig. 8 Temperature distribution of single pulse picosecond and femtosecond laser ablation of diamond with different laser energies^[47, 51]

电离为主的去除机制, 其作用效果见图 9。这为飞秒激光加工的理论研究提供了重要参考。此外, 汪晖等^[51]利用波长为 1030 nm、脉宽为 228 fs 的飞秒激光对 CVD 单晶金刚石进行了加工研究, 并模拟分析了烧蚀过程中金刚石的温度场分布(见图 8)。结果表明, 飞秒激光能量主要集中在材料表层, 极少通过热传导扩散至内部。随着激光能量密度增加, 辐照区域温度显著上升, 大部分材料升华, 使加工区域周围几乎没有碎屑, 加工表面极为干净。Nolasco 等^[48]进一步采用理论模型分析了在不同波长(1030、515、343 nm)和 216 fs 脉冲作用下的培养效应(损伤阈值随脉冲数变化的关系), 对单次脉冲产生的电子密度进行了研究。Ogawa 等^[52]则对比了

红外纳秒激光和飞秒激光加工金刚石的表面形貌与材料去除速率(见图 10)。结果显示, 飞秒激光加工的表面质量优于纳秒激光, 但材料去除速率方面纳秒激光显著更高。



(a) Weak ablation

(b) Strong ablation

图 9 金刚石在不同烧蚀阶段的烧蚀效果^[50]

Fig. 9 Ablation effect of diamond in different ablation stages^[50]

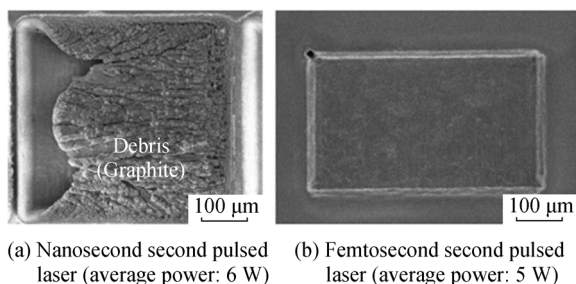


图 10 通过纳秒激光和飞秒激光正常辐照获得加工表面^[52]
Fig. 10 Machined surfaces normally irradiated by nanosecond second pulsed laser and femtosecond second pulsed laser^[52]

相比于金刚石向石墨相的转化过程, 激光烧蚀对加工效率和加工后表面质量的影响更加显著。烧蚀阈值与激光的通量、脉冲数以及脉宽密切相关, 且去除机制可分为化学去除和物理去除, 两者在加工过程中通常并存。具体而言, 相同脉宽下, 脉冲数的变化可能导致主导去除机制的不同, 而不同脉宽的激光则会引发完全不同的去除过程。这些多样化的去除机理为进一步优化加工效率和提高表面质量提供了重要的理论依据。

2 激光加工金刚石研究进展

近年来, 随着金刚石 CVD 技术的逐步成熟, 金刚石材料在许多领域的应用潜力逐渐显现。然而, 金刚石的大规模应用仍然面临着加工技术的制约, 传统加工方式在满足金刚石日益多样化和高质量加工需求方面逐渐显得力不从心。随着对金刚石加工技术要求的提升, 激光加工凭借其独特的优异性能, 逐渐成为金刚石加工的主流技术。根据不同的应用需求, 激光技术在金刚石加工中主要集中在几个关键领域, 包括激光抛光、微通道加工、微结构制造、激光切割以及激光剥离等。这些技术为金刚石的高精度加工提供了多种解决方案, 不仅能够提高加工效率, 降低材料损耗, 还能有效地加工金刚石的复杂形状和结构, 为金刚石在电子、光学、机械等高端领域的应用提供了坚实的技术支持^[53–55]。

2.1 激光切割金刚石

在金刚石切割加工中, 高准直度、低锥度以及高纵横比的凹槽一直是高质量切割的基本要求。目前, 金刚石的切割方式主要包括水刀切割、电火花切割和激光切割。与其他切割方式相比, 激光切割具备无接触、高效、切缝小和热影响区小等独特优势, 成为加工金刚石的理想方法。激光的高能量和单向性使其成为切割金刚石的创新工具^[56]。

吴煜等^[57]对比了近红外 Nd:YAG 激光和电火花

线切割方法在聚晶金刚石(PCD)切割中的效果, 发现尽管电火花切割表面质量优于激光切割, 但切割速度较慢且金刚石界面处存在材料过量去除现象。为提高切割质量与效率, 采用脉宽更短的 Nd:YAG 激光或紫外激光会是更好的选择。

为探究激光切割对单晶和多晶金刚石的不同影响, Ohfuji 等^[26]利用纳秒脉冲紫外激光对单晶和多晶金刚石进行了切割实验。研究发现, 在激光切割槽内, 加工后的金刚石表面覆盖着由高取向石墨、波纹石墨和纳米晶体石墨组成的复杂层状石墨单元。这些单元从金刚石衬底表面向凹槽中心逐渐分布(见图 11)。基于实验结果, 作者提出了激光切割金刚石的基本步骤: 1) 激光扫描路径的广泛石墨化; 2) 预成型石墨的升华。这一过程在 3 种类型的金刚石(单晶 Ib 型、单晶 IIa 型和纳米多晶集合体)中表现出相似性。

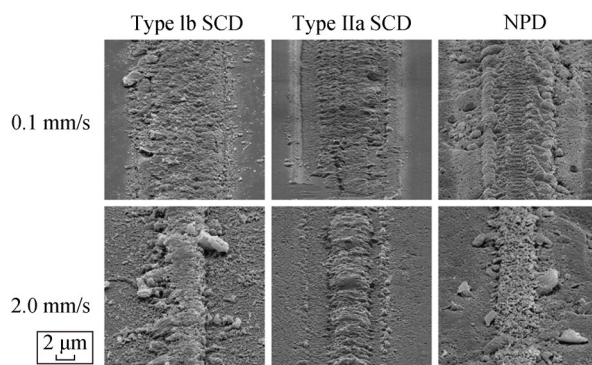
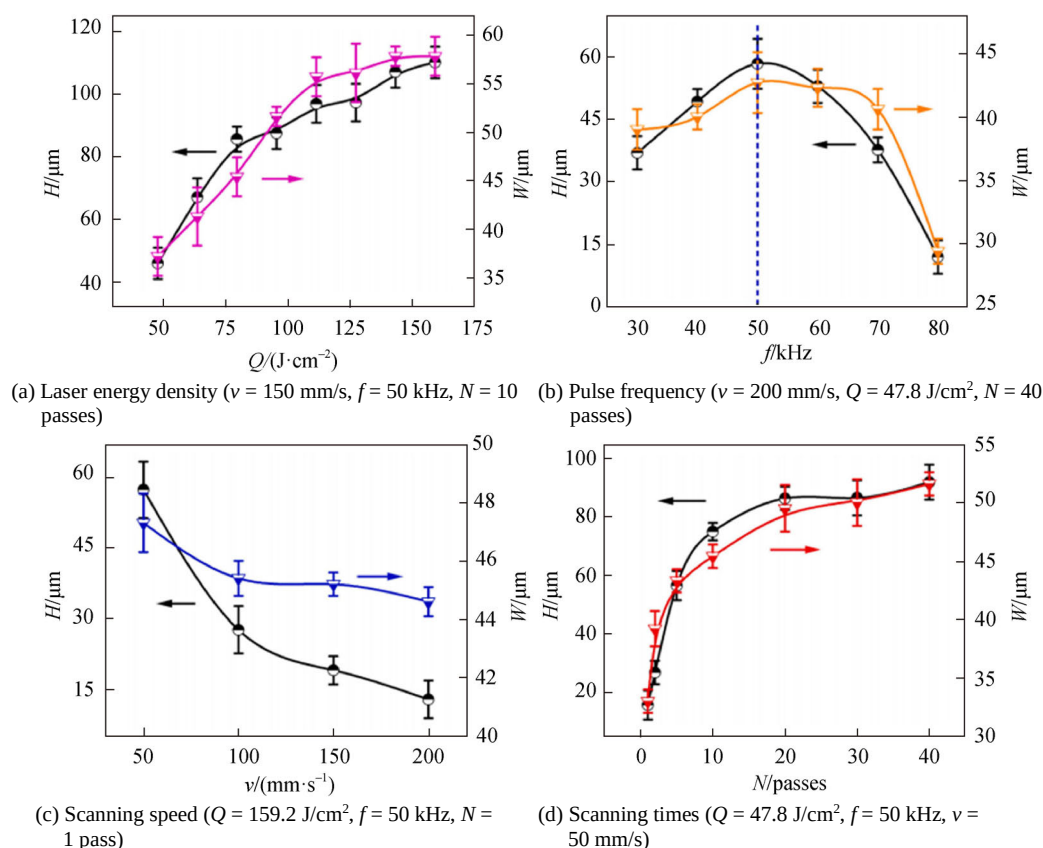


图 11 单晶 Ib 型、IIa 型和纳米多晶金刚石激光切割槽的 SEM 照片^[26]

Fig. 11 SEM images of single crystal type Ib, type IIa and nano-polycrystalline diamond laser cutting groove^[26]

激光参数对切割效果具有显著影响。Zhang 等^[58]使用红外纳秒激光对单晶金刚石进行表面加工切割, 研究了激光能量密度、脉冲频率、激光扫描速度和扫描次数等参数对加工结果的影响(见图 12)。实验表明, 通过优化这些参数, 能够有效提高加工质量, 减少裂纹的产生。然而, 由于激光加工具有热传递特性, 随着切割深度增加, 激光聚焦在同一纵轴上的难度也相应加大, 导致切割深度难以进一步延伸。为了增加切割深度, 需要在纵轴位置进行开槽, 这种操作容易形成“V”形凹槽并引发倾斜。“V”形槽的形成是激光深切加工中常见的问题, 其机制主要涉及热传递特性、激光聚焦特性以及材料去除的非均匀性。随着切割深度的增加, 激光焦点在同一纵轴的聚焦精度逐渐下降, 这是由于材料折射率的变化、表面粗糙度的影响以及深度增加引发

图 12 激光的影响参数对槽的深度和宽度^[58]Fig. 12 Influence of the laser parameters on the depth and the width of the groove^[58]

的光学焦点扩散效应所致。同时, 激光焦点的漂移使能量密度在深度方向分布不均, 导致槽底材料去除能力减弱, 为了继续加工, 焦点直径被迫增大或焦点位置调整(见图 13), 这种操作容易导致槽口扩展, 最终形成“V”形凹槽^[59-60]。

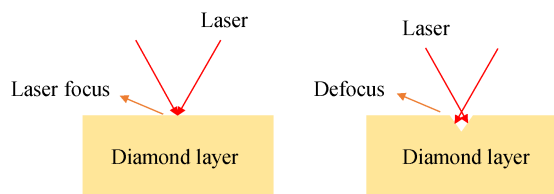


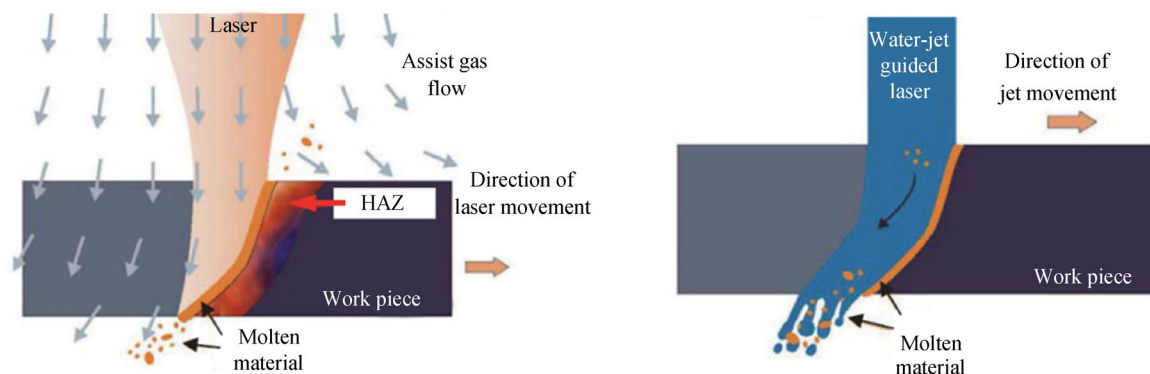
图 13 激光失焦示意图

Fig. 13 Schematic diagram of laser defocusing

针对“V”形槽问题, 王吉等^[61]采用声光调制高频率激光器对 CVD 单晶金刚石进行切割工艺研究, 系统分析了激光脉冲能量、重复频率、聚焦位置、激光速度和横膜模式等参数对切割效果的影响。研究表明, 切深和切缝上表面宽度随激光功率的增大而增大; 焦点位置的调整能够获得最大切深; 重复频率会影响切深和切缝宽度; 表面粗糙度随切割线速度的增大呈现先减小后显著增大的趋势; 切缝上表面宽度随模式数增加而增大。通过对这些参数的优化, 最终实现了 7.2 mm 的切割深度、

$0.804 \mu\text{m}$ 的表面粗糙度以及 $350 \mu\text{m}$ 的切缝宽度。

近年来, 水导激光切割技术在不同材料和工艺上的研究取得了显著进展。从最初的钢、硅等材料逐步拓展到镁、钛合金、蓝宝石, 以及金刚石和聚晶立方氮化硼(PCBN)等难加工材料, 研究成果愈加丰富。水导激光切割利用高能激光束通过水射流导引进行加工。激光束通过光学系统聚焦后, 经专用喷嘴与细小水射流结合, 形成“激光水刀”。水射流通过全内反射效应束缚激光, 使其能量集中并稳定传输至加工区域。高能激光对材料进行局部熔化、汽化或烧蚀, 同时水射流迅速冷却加工区域并清除熔渣, 显著降低热影响区和微裂纹, 最终实现高精度、低损伤的切割(见图 14)。Richmann 等^[62]成功实现了对厚度达 3 mm 的蓝宝石的高质量加工, 其切割工艺能够达到平行壁粗糙度小于 $0.5 \mu\text{m}$ 、切口宽度小于 $100 \mu\text{m}$ 的水平。Shi 等^[63]通过对比激光与水导激光在天然金刚石加工中的表现发现, 尽管两者都会在加工表面形成一层碳同素异构体, 但水导激光加工表面仅存在一层薄石墨结构, 且残余应力更小, 微裂纹更少。这些研究与应用成果充分体现了水导激光技术在硬脆材料高精度加工中的广泛潜力和卓越性能。

图 14 水导激光原理示意图^[64]Fig. 14 Schematic diagram of water guided laser principle^[64]

激光切割金刚石技术在现代先进制造中发挥着重要作用,尤其在实现高精度加工和复杂形状制造方面展现出独特优势。然而,由于金刚石具有极高的硬度和导热性,其激光加工过程涉及复杂的热-力学与材料相变行为,影响加工质量的关键因素主要包括激光参数、材料特性及其相互作用机制。通过采用短脉宽激光、动态焦点控制、分层加工策略以及新型水导激光切割技术在一定程度上缓解“V”形槽、热影响区(HAZ)扩大等问题。总的来说,激光切割技术在金刚石精密加工中的发展潜力巨大,但仍需在深入理解材料特性与加工机制的基础上,不断改进工艺和优化设备,进一步提升切割效率和加工质量,满足未来高端制造对超硬材料加工的严格要求。

2.2 金刚石激光抛光

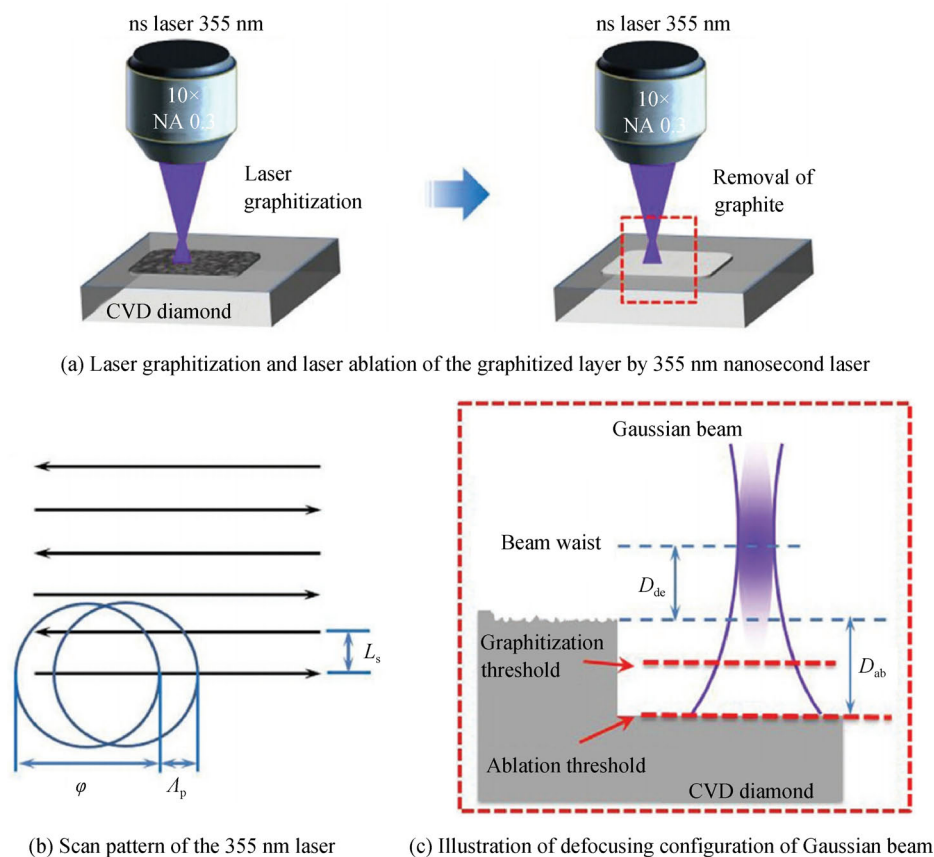
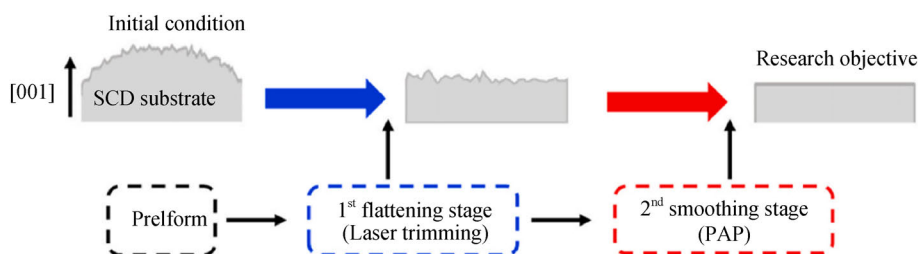
随着金刚石在功率器件、散热器、声表面波等功能元件中的广泛应用,对金刚石表面质量的要求日益提高。传统的机械抛光加工方式,由于耗时长、效率低、损耗高,且难以实现对复杂微观结构及曲面等高端应用需求的加工,已无法满足现代高精度制造的需求^[65–67]。相比之下,激光加工作为一种非接触式技术,能够在纳米尺度上进行精准加工,且其材料损耗远低于机械加工^[68–69]。激光与材料相互作用的独特性质,使其能够有效克服金刚石的高硬度这一挑战,同时弥补机械抛光的不足,成为制造金刚石微结构和进行金刚石抛光的更佳选择^[70–71]。

激光抛光金刚石是一个基于烧蚀过程的技术,主要通过激光石墨化和随后对石墨化层的激光烧蚀来实现(见图 15)^[72],与连续激光器相比,脉冲激光器在目标表面产生较小的热损伤,因此更加适合精密加工^[73–74]。近年来,随着脉冲激光加工金刚石的不

断研究,金刚石表面加工方面已经取得了显著进展。该技术不仅能够提高金刚石表面的平整度和光滑度,还能够实现复杂微结构的精确制造,为金刚石在高端应用中的进一步发展提供了强有力的技术支持。

激光抛光效果还尚未达到传统机械抛光的水准,传统机械抛光可实现算术平均粗糙度(R_a) $< 1 \text{ nm}$ [如化学机械抛光(CMP)],而激光抛光目前最优结果为 $R_a \approx 8 \text{ nm}$ 。其主要原因为激光热损伤导致表面石墨化层残留及局部熔融,而传统 CMP 方法通过化学腐蚀(如铁基催化剂)与机械摩擦协同作用,仅产生小于 5 nm 的非晶碳层,无石墨化相变因此表面更加平整。随着激光技术的不断进步和研究,激光抛光的效果逐渐得到了改善。Komlenok 等^[75]使用纳秒激光(248 nm , 20 ns)和飞秒激光(1030 nm , 350 fs)对 Si 基 PCD 进行抛光,系统研究了入射角、道次、扫描速度以及激光辐照度对表面粗糙度的影响。通过这些研究,金刚石片的初始表面粗糙度从 $5 \mu\text{m}$ 降低至 $1 \mu\text{m}$,实现了表面粗糙度的 5 倍改善。

随着激光抛光工艺的不断优化和创新,激光作为一种新型辅助手段,展现了更加显著的加工效果。例如, Liu 等^[76]提出了一种结合纳秒脉冲激光(1064 nm , 100 ns)修整的新型混合工艺(见图 16)。该工艺首先通过激光切边作为粗加工,选择性地去除马赛克 SCD 衬底上的波浪状结构,从而提高了整个表面的均匀性。接着,采用高效且无损伤的 SCD 基材化学机械抛光(PAP)精加工技术,进一步降低了表面粗糙度并去除了损伤层。该工艺成功地应用于 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的镀金 SCD 衬底加工,最终获得了均方根高度(S_q)为 0.53 nm 的表面粗糙度和小于 $1 \mu\text{m}$ 的平面度,显著提升了金刚石表面的质量。

图 15 激光抛光原理图^[72]Fig. 15 Schematic of the laser polishing principle^[72]图 16 加工过程示意图^[76]Fig. 16 Schematic diagram of machining process^[76]

在激光抛光过程中, 单一激光源往往无法兼顾不同表面处理的需求, 因此, 多个激光源的分步加工策略成为了提升加工效果的重要途径。通过合理组合不同激光源的优势, 能够更加高效地优化抛光过程。Scalbert 等^[77]使用高功率飞秒激光器(80 W, 1030 nm, 350 fs)对 3 种不同等级的 PCD 进行抛光。他们提出了一种新型脉冲爆发加工模式, 在初始粗糙度 S_a 为 $0.41 \mu\text{m}$ 的情况下, 经过飞秒激光处理后, 小晶粒 PCD 的粗糙度降低了 50%。然而, 在大晶粒 PCD 上的效果并不明显, 这表明大尺寸晶粒的激光

抛光仍面临一定挑战。此研究揭示了在飞秒激光器作用下, 大尺寸晶粒金刚石的抛光更具挑战性, 采用更高功率或更长脉宽的激光器可能是应对这一问题的有效方案。此外, Liu 等^[72]采用了纳秒激光和飞秒激光结合烧蚀效应及激光离焦效应, 成功实现了对厚度为 1 mm 的 CVD 单晶金刚石的高质量表面处理(见图 17)。该抛光策略有效降低了粗糙表面的峰谷高度差, 并使激光能量维持在接近烧蚀阈值的低水平。在这一临界能量下进行激光抛光, 能够有效避免高能量带来的有害影响, 同时保证光学表面

质量，并实现材料的精密去除。其卓越的光学性能使得该激光抛光方法在金刚石衬底上直接制造微光学元件成为可能。这些研究表明，激光源的灵活组合和合理应用能够显著提升金刚石抛光效果，不仅

能满足精密加工的需求，还为高光学性能金刚石元件的制造提供了新的可能性。

表 1 总结了激光抛光金刚石的抛光效果，总结了抛光所使用的激光类型、工作亮点和抛光效果。

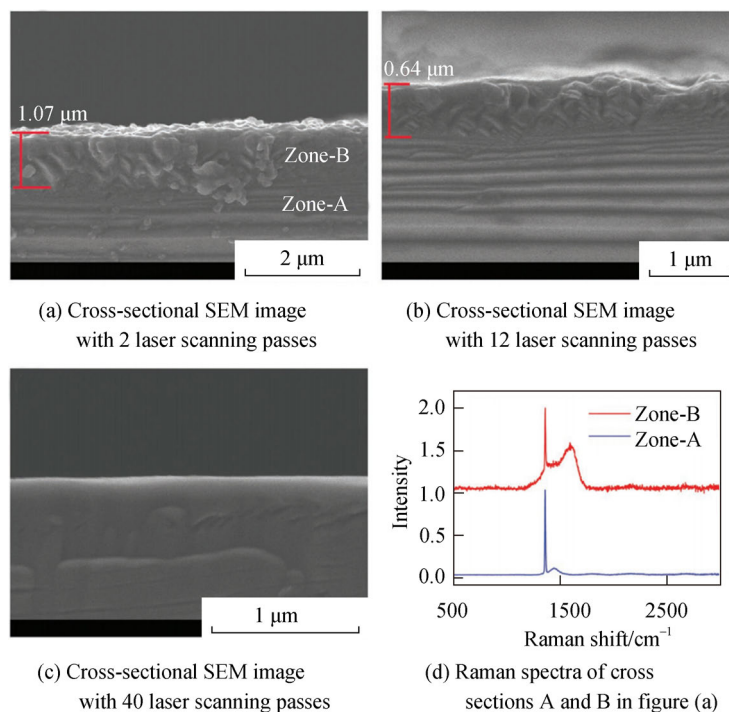


图 17 激光抛光 CVD 金刚石截面的 SEM 和拉曼光谱分析^[72]

Fig. 17 SEM and Raman spectra of laser polished CVD diamond cross section^[72]

表 1 激光抛光金刚石综合研究进展

Table 1 Progress in comprehensive research on laser polishing diamond

Laser type	Highlights	Polishing effect	References
248 nm, 20 ns 1030 nm, 350 fs	Multiple laser sources stage-by-stage polishing	Surface roughness was reduced from 5 μm to 1 μm	[75]
1064 nm, 100 ns	Laser-assisted plasma-assisted polishing	Root-mean-square roughness (S_q) of 0.53 nm and flatness $< 1 \mu\text{m}$ were achieved	[76]
1030 nm, 350 fs	Novel pulse burst machining mode	3D arithmetic mean roughness (S_a) decreased from 0.41 μm to 0.2 μm	[77]
355 nm, 25 ns 800 nm, 50 fs	Multiple laser sources and laser defocusing effect	Arithmetic mean roughness (R_a) reached as low as 8.02 nm	[72]
355 nm, 10 ns 515 nm, 260 fs	Hybrid polishing technology combining laser polishing and ion beam etching	Surface roughness was reduced from 4 μm to 0.47 μm (R_a)	[78]
130 fs	Optimal parameters obtained via orthogonal experiments with parameter variation	Surface roughness of PCD compacts was 33.95 nm (R_a)	[79]
515 nm, ps	It was confirmed that no graphite formation occurred during picosecond laser polishing of diamond when the pulse width was less than 10 ps	Surface roughness was reduced from 1.85 μm to 0.51 μm	[80]

尽管激光抛光已经展示出了其极大潜力，具有高效率、高质量的优势，但是目前其所能达到的粗糙度不如传统抛光手段。单一激光源在激光加工过程中表现并不如人意，而多激光源或者将激光作为辅助手段进行加工获得了更好的加工效果。因而要获得更好的加工效果，突破更低的粗糙度，不同

激光源分步加工和激光抛光辅助或许是未来激光抛光的发展方向。

2.3 激光剥离金刚石

激光切割在大尺寸金刚石切片加工中受限于切割深度增加导致的焦点偏移与能量损失，需扩大狭缝以继续加工，但这会降低精度和平面度。这些因

在块体金刚石中生成了厚度为 15~20 μm 的平面修饰层。随后,他们利用纳秒激光从(211)面对第一层修饰层进行再加热,将其转化为可分离层,最终成功获得尺寸为 1 mm×1 mm 的单晶金刚石片,具体流程示意图见图 21。这种方法有效结合了飞秒激光的

高精度和纳秒激光的高能量,既保证了切片的质量,也为金刚石的高效剥离提供了一种全新的技术手段。这一成果表明,多激光源的协同应用能够显著优化加工效果,为未来金刚石加工技术的发展开辟了新的方向。

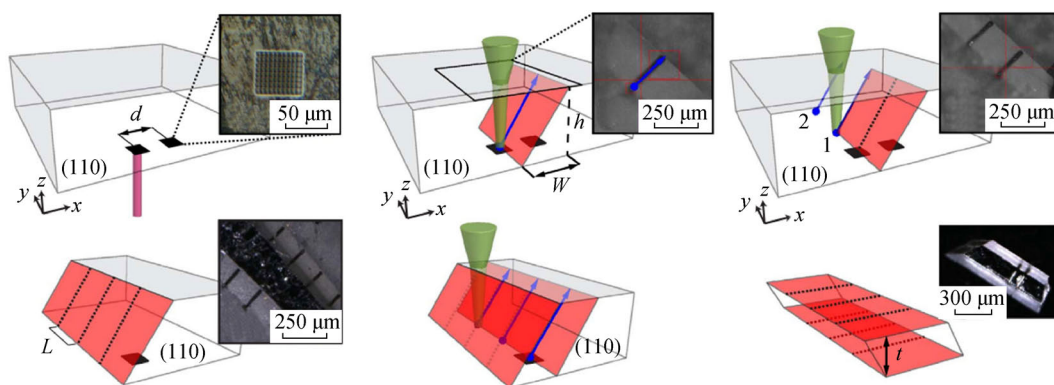


图 20 LNC(laser-nucleated cleaving)流程示意图^[86]

Fig. 20 Schematic diagram of LNC (laser-nucleated cleaving) process^[86]

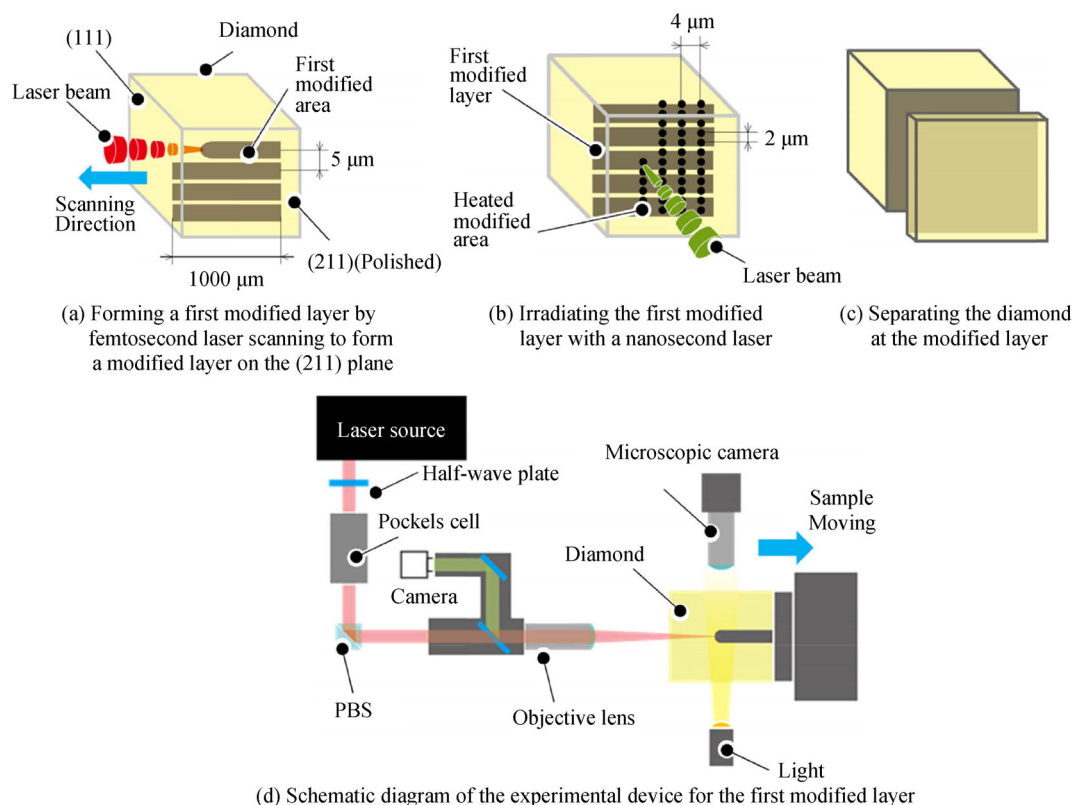


图 21 激光诱导石墨化金刚石切片工艺^[87]

Fig. 21 Laser induced graphitization diamond slice process^[87]

激光剥离技术作为金刚石加工领域的重要创新,不仅突破了传统切割方法的局限,也为金刚石器件的制造提供了新的思路。通过优化激光辐照序

列、结合不同类型的激光脉冲以及灵活使用多激光源,研究者们成功提高了金刚石切片的精度和效率。在未来的研究中,如何进一步提升激光剥离的深度

控制、减少热影响区、提高材料利用率以及拓展适用于不同晶面的激光切割技术, 仍将是金刚石加工领域的重点方向。随着激光技术的不断发展, 激光剥离金刚石有望在电子、光学以及其他高科技领域中得到更广泛的应用。

2.4 激光加工金刚石微通道

金刚石微通道结构因其卓越的散热性能, 广泛应用于航空航天和电子器件领域, 满足了当前对高效散热的迫切需求。微通道结构的加工对精度、可控性、一致性和表面质量提出了较高要求。近年来, 激光加工技术已被证明能够有效满足这些需求, 并成为金刚石微通道结构加工的理想选择。

在微通道加工中, 选择适当的激光脉宽是关键因素之一。Wang 等^[88]对比了紫外纳秒激光与红外皮秒激光在单晶金刚石表面切割微沟槽的效果。研究发现, 使用纳秒激光加工时, 微沟槽两侧会产生大量的再沉积颗粒, 而皮秒激光加工的微沟槽周围几乎没有再沉积颗粒。此外, 皮秒激光加工的微槽边缘通常会出现裂纹和切屑, 而纳秒激光加工的微槽边缘则未观察到类似现象。更为显著的是, 皮秒激光烧蚀的微沟槽表面会形成周期性纳米波纹结构, 而在纳秒激光加工的微沟槽中则没有观察到这种纳米波纹(2 种激光加工效果分别见图 22 与图 23)。

为进一步揭示不同脉宽激光的热效应, 研究者还通过温场模拟分析了纳秒激光与皮秒激光烧蚀金刚石时金刚石沿 z 轴的温度分布。模拟结果表明, 皮秒激光因脉宽较短, 其局部热效应较小, 能够实现更精确的加工控制。通过式(3)进行计算。

$$d_g = \ln(T_s / T_g)(\chi_g \tau)^{1/2} \quad (3)$$

式中: $T_s = 3973 \text{ K}$, $T_g = 973 \text{ K}$, $\chi_g = 2.8 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 进一步的推算表明, 在相同的激光处理条件下, 纳秒激光的石墨化层厚度约为 $2.6 \sim 3.2 \text{ } \mu\text{m}$, 而皮秒激光的石墨厚度约为 $109 \sim 124 \text{ nm}$ 。这表明, 纳秒激光更适合用于高纵横比的切槽加工, 而皮秒激光以及更短脉冲的激光则更适用于要求更高精度和表面质量的微结构加工。纳秒激光因其较长的脉冲持续时间, 适用于较大尺寸、高纵横比的微槽加工, 皮秒激光则以其更精确的热控制优势, 适合用于高精度、要求更高表面质量的微结构加工。

飞秒激光由于其极短的脉冲持续时间和精确的热控制能力, 能够加工出更为精细的微结构。熊彪等^[89]采用飞秒激光(波长 1030 nm , 脉宽 250 fs), 通过激光平均功率为 11.1 W , 光斑重叠率为 61.9% , 以及 100 次的循环扫描, 在单晶金刚石表面成功获得了大小、突出高度和排布方式可精确控制的

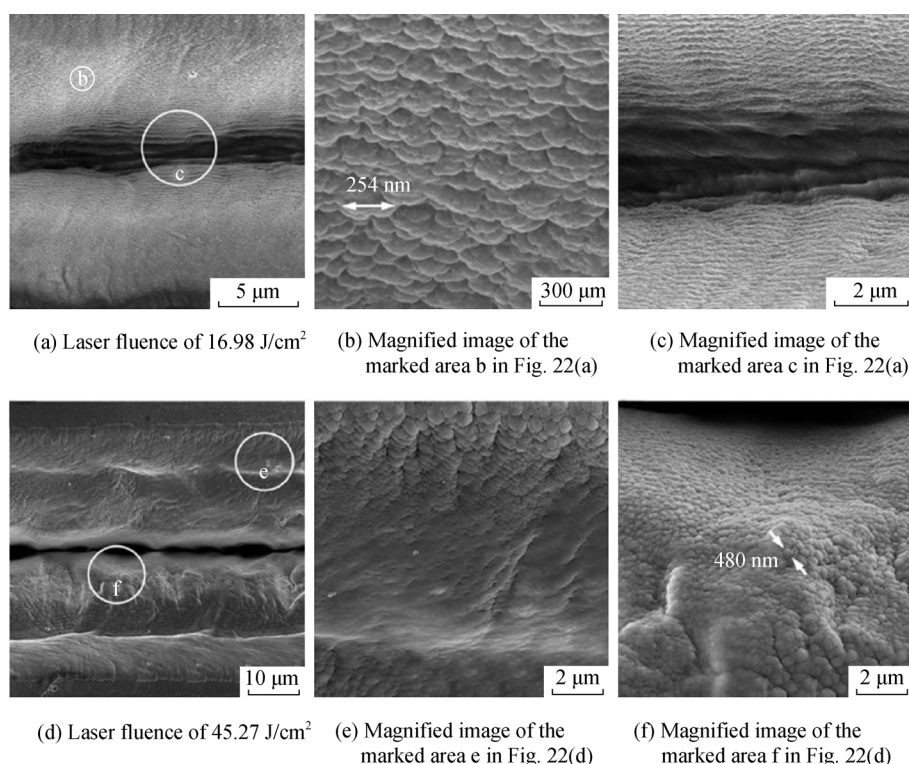
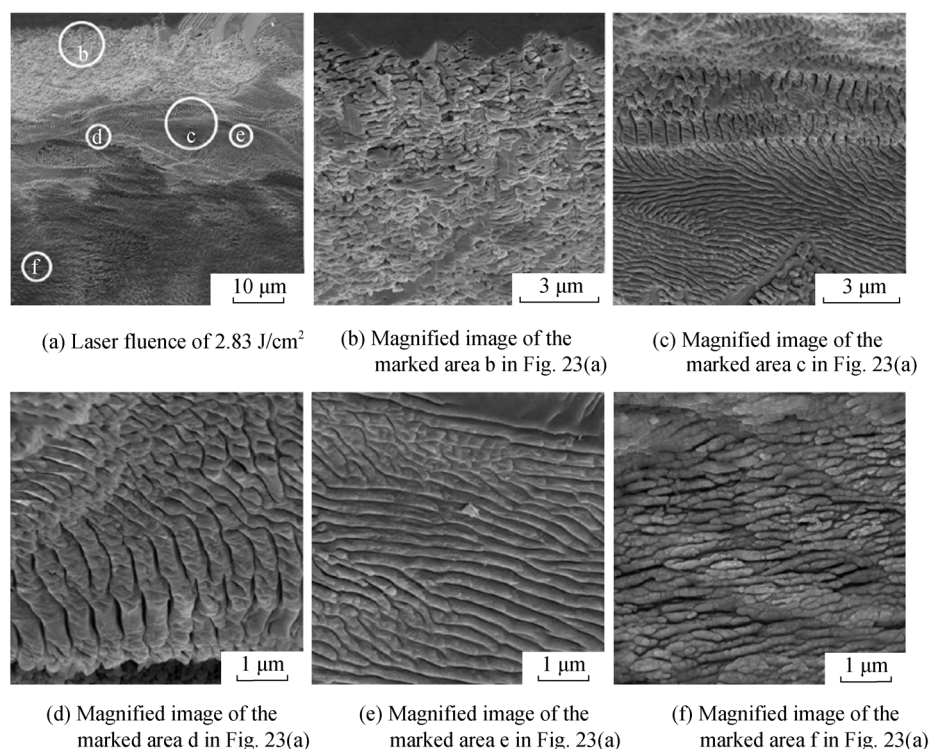
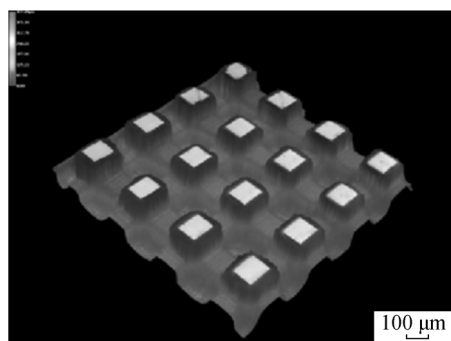


图 22 不同纳秒激光通量辐照下微沟槽的内部形貌^[88]

Fig. 22 Internal morphology of microgroove under different nanosecond laser fluences^[88]

图 23 皮秒激光通量辐照下微沟槽的内部形貌^[88]Fig. 23 Internal morphology of microgroove under picosecond laser fluence^[88]

锥形阵列。具体来说, 所得到的锥形磨粒尺寸约为 $150\ \mu\text{m} \times 150\ \mu\text{m}$, 磨粒的突出高度约为 $100\ \mu\text{m}$, 且磨粒之间的沟槽宽度约为 $150\ \mu\text{m}$ (见图 24)。这一研究进一步表明, 飞秒激光不仅能够实现高精度的微结构加工, 而且能够在保持优良表面质量的同时, 提供高度可控的微结构尺寸和形态, 拓展了飞秒激光在金刚石微结构加工中的应用潜力。

图 24 锥形磨粒阵列结构微观形貌图^[89]Fig. 24 Microscopic morphology diagram of conical abrasive particle array structure^[89]

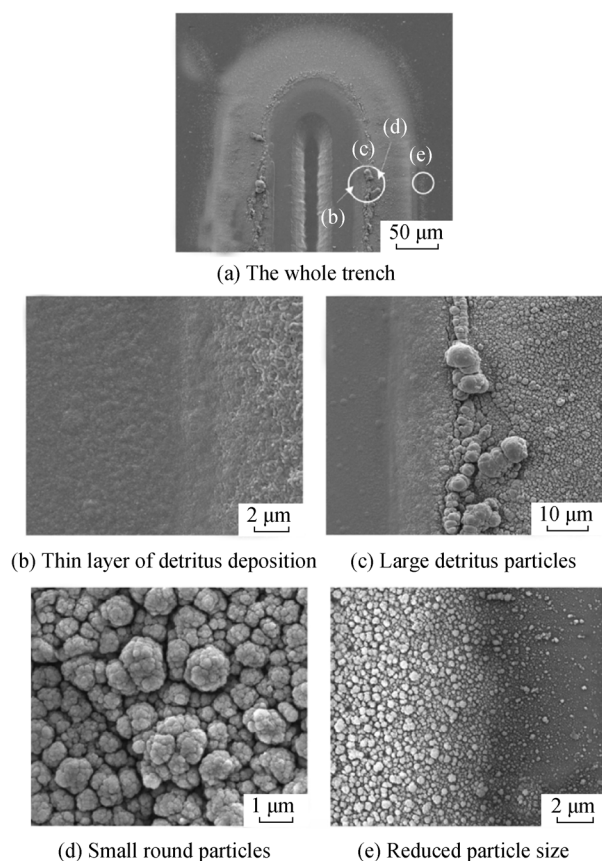
在激光加工金刚石微通道的研究中, 除了如何提高加工效果和加工质量, 激光加工过程中产生的热损伤也是一个备受关注的研究方向。热损伤是影响加工质量和精度的关键问题。金刚石具有极高的热导率, 能够迅速将热量扩散, 但在激光加工

过程中, 局部高能量密度的激光仍可能导致局部区域温度过高, 形成 HAZ, 并引发表面熔融、微裂纹或气化等热损伤现象。Takayama 等^[90]日本学者通过采用纳秒激光对单晶金刚石表面进行微沟槽加工, 深入研究了激光加工过程中所产生的热损伤及其形成机制。研究表明, 在纳秒激光脉冲的作用下, 金刚石表面会形成 4 种主要的损伤类型: 裂纹、波纹、沟槽形状变形以及碎屑沉积(见图 25)。每种损伤的产生机制与激光加工过程中的热效应密切相关:

1) 裂纹: 裂纹通常是由激光照射引起的温度快速变化所产生的热应力导致的。当金刚石表面温度急剧变化时, 材料内部的热应力会超过其抗拉强度, 进而引发裂纹的形成。

2) 波纹: 波纹的产生与激光在金刚石表面反射所形成的干涉效应密切相关。激光脉冲照射金刚石表面时, 反射光与入射光之间可能会相互干涉, 形成表面波纹, 特别是在高功率和较长脉冲的激光加工条件下, 这一现象更加显著。

3) 沟槽形状变形: 沟槽形状变形通常是由于激光诱导的等离子体增强吸收效应所致。激光脉冲产生的等离子体会增强局部区域的吸热效应, 导致材料的过热和烧蚀, 从而引发沟槽的形状变形, 特别是在较高能量密度的条件下。

图 25 激光加工产生的碎屑 SEM 照片^[90]Fig. 25 SEM images of detritus produced by laser processing include^[90]

4) 碎屑沉积: 激烈的烧蚀过程可能会导致金刚石表面产生碎屑。这些碎屑会重新沉积在沟槽表面, 影响表面质量和加工精度。

金刚石材料热膨胀系数虽低, 但短时间内温度剧烈变化会产生巨大热应力, 而在 HAI 内, 金刚石可能因局部高温发生石墨化相变(sp^3 键向 sp^2 键转化)。石墨化过程伴随体积膨胀(约 20%), 产生相变应力。该应力与热应力叠加, 进一步增加材料内部应力集中程度从而造成上述缺陷。通过优化脉冲间隔与脉冲模式使 HAI 热量充分扩散, 降低热积累效应; 引入辅助冷却技术如水基冷却或气体辅助冷却来加速热量散失, 降低温度以及通过调控加工工艺参数来控制临界能量密度阈值, 减少过度热输入等。这些都是可以减少甚至避免热缺陷形成的方法。

尽管激光加工金刚石微通道的研究取得了显著进展, 但目前的研究仍主要集中于激光切割金刚石和金刚石石墨化过程的控制, 针对金刚石微通道加工中缺陷形成与微观结构的控制研究相对较少。金刚石在激光加工过程中, 尤其是高能量密度下, 容

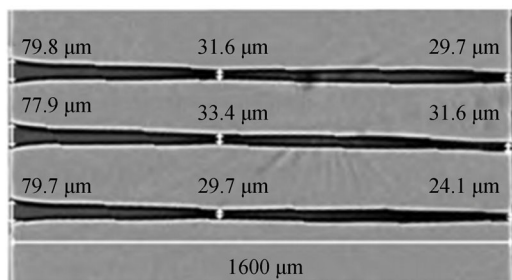
易受到热损伤, 产生裂纹、波纹、沟槽形变等缺陷, 这些缺陷不仅影响加工质量, 还对微通道的几何形状和表面质量产生负面影响。虽然激光脉宽、功率密度、离焦量等参数对加工效果有显著影响, 但如何优化这些参数以最大程度减少热损伤、提高加工精度和微结构质量, 仍是未来研究的主要挑战。此外, 晶体取向和辅助材料的选择同样对加工结果产生影响。因此, 如何在减少加工缺陷的同时提高金刚石微通道的加工质量和可控性, 将是未来金刚石激光加工研究的重要方向。

2.5 激光加工金刚石微孔

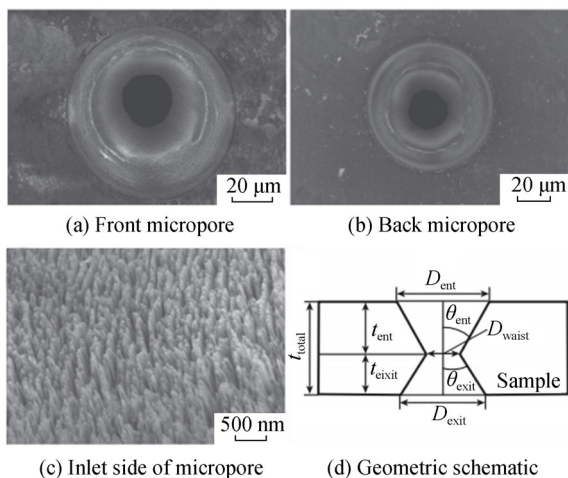
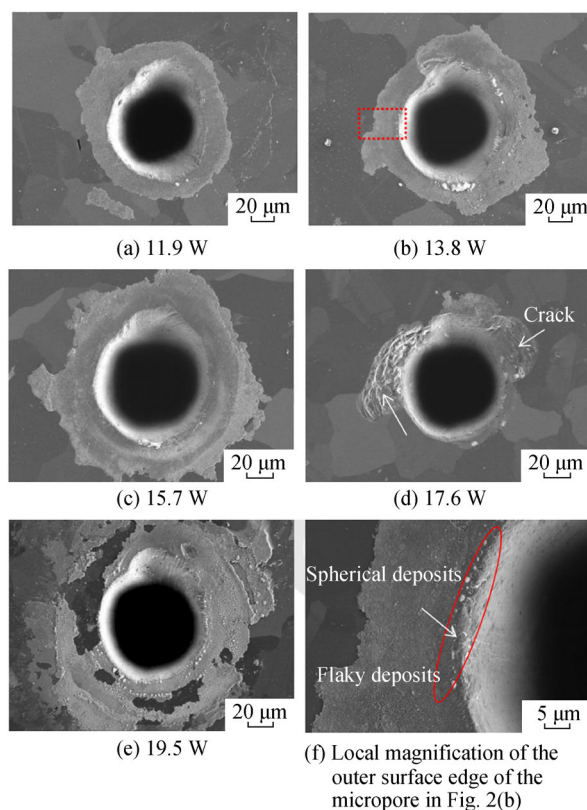
金刚石微孔在许多领域具有重要的应用价值。具有微孔结构的金刚石可用于集成电路的引线连接; 在单片微波集成电路(MMIC)器件中, 金刚石微孔结构能够有效降低源端的寄生电感, 并实现金属化处理。此外, 经过特定设计的金刚石微孔结构在微流体、微机电系统等领域也展现了良好的潜力^[91]。因此, 许多学者已开展了一系列关于激光加工金刚石微孔的实验研究。

首先, 关于激光加工金刚石微孔的研究, Li 等^[92]和 Chen 等^[93]研究了使用纳秒激光器对化学气相沉积金刚石(CVDD)的加工, 初步验证了纳秒激光器能够通过热效应将 CVDD 转化为一层石墨, 且石墨层可较为容易地去除。然而, 石墨化过程的控制仍然存在困难。针对这一问题, Kononenko 等^[49]使用波长为 120 nm 的 800 fs 激光脉冲, 在金刚石表面成功制备了长度为 150 μm、直径为 1.5 μm 的石墨线, 并发现通过多脉冲辐照, 可以使石墨沿激光束方向延伸并生长。此外, Dudek 等^[94]使用波长为 355 nm 的纳秒脉冲激光器, 成功制备了具有优异几何形状的金金刚石微观结构。该微结构具有精确的几何形状、良好的垂直度、深通道以及光滑的表面, 表明激光微加工可广泛应用于金刚石器件的制造。另外, Golota 等^[95]使用波长为 532 nm, 脉冲宽度为 20 ns 的纳秒激光, 在约 3 mm 长度范围内对金刚石进行打孔, 并通过不断增加累计脉冲数, 实现了最大深宽比为 40:1(见图 26), 证明了激光加工金刚石微孔的巨大潜力。

然而, 激光参数的选择在微孔加工中具有重要影响, 尤其是对于微孔的几何形状和质量。不同的激光参数不仅会影响微孔的形成, 还可能引发石墨化等副作用, 这些需要在加工过程中加以控制。因此, 许多研究者开始探索如何优化激光参数, 以提高金刚石微孔加工的质量和效果。

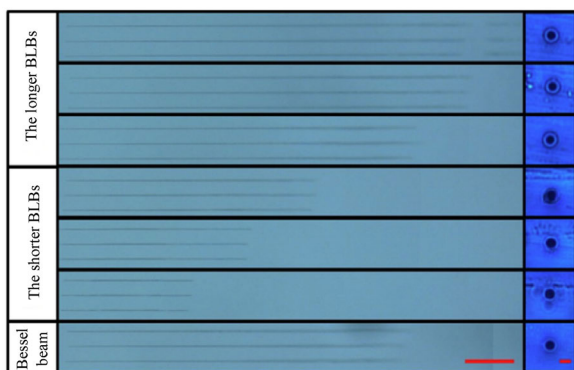
图 26 金刚石中得到的平均深宽比 40 : 1 微孔^[95]Fig. 26 The average depth to width ratio obtained in diamond is 40 : 1 microholes^[95]

激光参数可能会导致微孔的几何形状和质量的变化。Jeong 等^[96]用自制激光器在金刚石上进行了沙漏型微孔钻取, 评估了脉冲能量和脉冲数对微孔几何结构(孔径、圆度、锥角和钻孔质量)的影响。通过优化激光参数, 采用脉冲持续时间为 230 fs, 脉冲重复率为 500 kHz, 脉冲能量为 1.25~12.50 mJ, 波长为 1030 nm 的加工条件, 得到了无碎片、无热损伤的微孔(见图 27)。董春燕等^[97]则专注于激光功率(11.9~19.5 W)对微孔加工的影响, 通过对不同功率加工后的微孔进行拉曼和 X 射线光电子能谱等表征, 得出结论: 微孔外表面及内表面的石墨化程度随着激光功率的增加而增加; 微孔孔型锥度随着激光功率的增加而减小, 微孔的垂直度得到了改善(见图 28); 激光加工过程中, 微孔内表面的应力影响大于微孔边缘的应力。综上所述, 激光参数的选择对金刚石微孔的几何形状、加工质量以及材料的表面特性具有重要影响。通过优化激光脉冲持续时间、重复率、能量及激光功率等参数, 可以有效改善微孔的孔径、圆度、锥角等几何特性, 并显著减少热损伤和碎片生成。

图 27 金刚石微孔 SEM 图像和沙漏形孔几何图像^[96]Fig. 27 SEM images of diamond micropores and hourglass-shaped pore geometry^[96]图 28 不同激光功率下的金刚石微孔外表面形貌^[97]Fig. 28 Surface morphology of diamond micropores under different laser powers^[97]

随着激光技术的发展, 新型激光加工技术也在逐步发展。贝塞尔光束整形便是其中之一, 其在激光加工金刚石中展现出显著优势。其长焦深和非衍射特性能够在更大范围内保持极小光斑尺寸, 有效提高加工分辨率和深层加工能力。这种光束分布使得能量高度集中, 减少了热扩散和材料损伤, 从而减少 HAI, 显著提升加工表面质量^[98]。此外, 贝塞尔光束的高穿透能力特别适用于金刚石等透明和高硬度材料的深层微孔、微槽及复杂微结构的高精度加工。利用贝塞尔光束整形, Yao 等^[99]通过空间光调制器优化设计相位分布, 实现激光光场长度、直径的精确控制。同时, 通过改变激光光场分布有效抑制了旁瓣, 提高了加工质量。利用这种方式产生的贝塞尔光束可在聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA) 上加工出深径比高达 560 : 1 的微孔(见图 29), 应用于金刚石时可实现深径比大于 200 : 1, 表面粗糙度 $R_a < 50$ nm。这为金刚石微孔后续加工提供了参考。

激光加工金刚石技术因其高效、非接触的特点, 在切割、抛光、微孔及微通道等复杂结构加工中展现出独特优势, 已成为解决金刚石材料高硬度与脆性难题的重要手段。当前技术在提升加工精度、减

图 29 贝塞尔光束加工微孔结果^[99]Fig. 29 Results of micro hole processing with Bessel beam^[99]

少 HAI、优化表面质量方面取得显著进展,但仍存在一些亟待解决的问题,如热损伤控制不足、加工效率较低、设备成本较高以及参数优化机制研究不完善。通过激光参数(功率、脉宽、波长等)的精准控制、引入水射流冷却和气体辅助等技术,可有效减少 HAI 并提升表面质量。同时,新型激光技术如飞秒激光、贝塞尔光束等为复杂结构的高精度加工提供了全新可能。总体而言,激光加工金刚石技术的持续发展将进一步拓宽其在光电子、量子器件和高端制造领域的应用,为解决尖端科学与工程问题提供关键支持。

3 总结与展望

金刚石材料因其优异的性能,在半导体、精密切削工具、微电子器件和光学器件等领域得到了广泛应用。随着金刚石合成技术的不断进步,金刚石基材料在尺寸和成本方面的不断增加,对金刚石加工技术提出了更高的要求。激光加工技术在金刚石抛光、微通道、切割及剥离等方面表现出卓越的性能,展现了其在金刚石加工中的巨大潜力。然而,当前激光加工金刚石技术仍面临若干挑战:

1) 目前,激光抛光金刚石的表面粗糙度尚未能达到传统抛光方式的水平,尽管加工效率相较于传统抛光大幅提升,但仍需进一步降低表面粗糙度,以满足广泛应用的需求。为解决这一问题,采用不同激光源的分步加工或与其他抛光方法相结合,形成复合工艺,是一种可行的解决方案。

2) 不同脉冲特性的激光加工各有其优缺点。短脉冲激光具有较高的加工精度和较好的加工质量,但效率较低;而长脉冲激光则在提高加工效率和处理大尺寸材料方面具有优势,但由于脉冲时间较长、能量较大,可能会导致出现不可避免的热损伤。因

此,未来的研究应通过工艺设计或激光源选择,结合短脉冲和长脉冲激光的优点,实现高精度、高质量、高效率且低缺陷的加工。

3) 激光剥离技术已展示出在金刚石加工中的巨大潜力,但仍面临一系列挑战。例如,如何在剥离过程中保证样品的均匀性,减少衬底或剥离层的损耗,以及提高加工效率等问题,仍是激光剥离技术亟待解决的关键。为此,优化激光参数,如脉冲宽度和能量密度等,并探索新型剥离工艺,如双脉冲激光诱导剥离、激光-化学辅助剥离等,均为激光剥离技术未来发展的可行方向。

4) 传统激光加工技术(如激光切割、激光剥离等)在金刚石加工领域取得了重要进展,但在高精度和复杂结构的加工中仍面临诸如 HAI 较大、表面微裂纹等问题。针对这些局限性,新型激光加工技术逐步发展,通过光束形状优化、脉冲能量精确控制及辅助介质的引入,显著提升了加工精度和应用灵活性。近年来,如贝塞尔光束整形、飞秒激光直写、激光微射流等创新技术进一步突破了传统工艺的限制,为量子器件、光学元件和高精密微结构的制造提供了全新的解决方案。但对新型技术掌握不足仍是限制其广泛应用的主要障碍,这些新型技术在不同材料上的适用性和加工机理仍需进一步研究。

综上所述,尽管激光加工金刚石技术仍面临一系列问题与挑战,但随着技术的不断进步和优化,这些问题有望得到逐步解决。未来,激光加工金刚石技术将持续发展,满足金刚石在各领域日益增长的应用需求,推动高精度、高质量、高效率且低损伤的加工工艺的实现,有望进一步推动金刚石材料在多个领域的广泛应用。

参考文献:

- [1] GUO J, ZHANG J G, PAN Y N, et al. A critical review on the chemical wear and wear suppression of diamond tools in diamond cutting of ferrous metals[J]. *Int J Extrem Manuf*, 2020, 2(1): 012001.
- [2] HUANG Q, YU D L, XU B, et al. Nanotwinned diamond with unprecedented hardness and stability[J]. *Nature*, 2014, 510(7504): 250–253.
- [3] 吴超, 马志斌, 严垒, 等. CVD 单晶金刚石的研究进展[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2014, 34(1): 57–63.
WU Chao, MA Zhibin, YAN Lei, et al. *Diam Abras Eng*, 2014, 34(1): 57–63.
- [4] KISS M, MI S C, HUSZKA G, et al. Diamond diffractive optics: Recent progress and perspectives[J]. *Adv Opt Technol*, 2021, 10(1): 19–30.
- [5] 郝生财, 曹康, 王海滨, 等. 基于超快激光的 PCD 超硬材料加工研究[J]. *电加工与模具*, 2023(5): 44–48.
HAO Shengcai, CAO Kang, WANG Haibin, et al. *Electromachining*

- Mould, 2023(5): 44–48.
- [6] 叶盛, 赵上熈, 邢忠福, 等. 激光技术在金刚石加工中的研究及应用进展[J]. 红外与激光工程, 2024, 53(2): 44–65.
- YE Sheng, ZHAO Shangman, XING Zhongfu, et al. Infrared Laser Eng, 2024, 53(2): 44–65.
- [7] 袁明文. 金刚石电子器件的研究进展[J]. 微纳电子技术, 2012, 49(10): 643–649.
- YUAN Mingwen. Micronanoelectronic Technol, 2012, 49(10): 643–649.
- [8] KARLSSON M, NIKOLAJEFF F. Diamond micro-optics: Microlenses and antireflection structured surfaces for the infrared spectral region[J]. Opt Express, 2003, 11(5): 502–507.
- [9] FORSBERG P, KARLSSON M. High aspect ratio optical gratings in diamond[J]. Diam Relat Mater, 2013, 34: 19–24.
- [10] KAWASEGI N, NIWATA T, MORITA N, et al. Improving machining performance of single-crystal diamond tools irradiated by a focused ion beam[J]. Precis Eng, 2014, 38(1): 174–182.
- [11] 夏珉. 激光原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 2.
- [12] 张端明, 李智华, 郁伯铭, 等. 脉冲激光制备薄膜材料的机理[J]. 中国科学(A 辑), 2001, 31(8): 743–753.
- ZHANG Duanming, LI Zhihua, YU (BaiBo)(Ming), et al. Sci China Ser A, 2001, 31(8): 743–753.
- [13] BOERNER P, HAJRI M, ACKERL N, et al. Experimental and theoretical investigation of ultrashort pulsed laser ablation of diamond[J]. J Laser Appl, 2019, 31(2): 022202.
- [14] 王海航, 马玉平, 武晓龙, 等. 金刚石涂层激光抛光机理及加工工艺研究进展[J]. 材料保护, 2021, 54(6): 136–146.
- WANG Haihang, MA Yuping, WU Xiaolong, et al. Mater Prot, 2021, 54(6): 136–146.
- [15] ZHANG Y F, XU S, CUI E N, et al. Research and application progress of laser-processing technology in diamond micro-fabrication[J]. Micromachines, 2024, 15(4): 547.
- [16] 陈梦, 张凤林, 欧阳承达, 等. 脉冲激光微细加工金刚石机理的研究进展[J]. 超硬材料工程, 2014, 26(1): 15–20.
- CHEN Meng, ZHANG Fenglin, OUYANG Chengda, et al. Superhard Mater Eng, 2014, 26(1): 15–20.
- [17] GEIS M W, ROTHSCILD M, KUNZ R R, et al. Electrical, crystallographic, and optical properties of ArF laser modified diamond surfaces[J]. Appl Phys Lett, 1989, 55(22): 2295–2297.
- [18] ROTHSCILD M, ARNONE C, EHRLICH D J. Excimer-laser etching of diamond and hard carbon films by direct writing and optical projection[J]. J Vac Sci Technol B Microelectron Process Phenom, 1986, 4(1): 310–314.
- [19] STREKALOV V N, KONO V I, KONONENKO V V, et al. Early stages of laser graphitization of diamond[J]. Appl Phys A, 2003, 76(4): 603–607.
- [20] STREKALOV V N. Graphitization of diamond stimulated by electron-hole recombination[J]. Appl Phys A, 2005, 80(5): 1061–1066.
- [21] Hermani J, Emonts M, Brecher M. Nanosecond laser processing of diamond materials [C]. Proceedings of the Lasers in Manufacturing Conference, June 23, 2015, Munich, Germany.
- [22] CADOT G J, BILLINGHAM J, AXINTE D A. A study of surface swelling caused by graphitisation during pulsed laser ablation of carbon allotrope with high content of sp^3 bounds[J]. J Phys D: Appl Phys, 2017, 50(24): 245301.
- [23] KONO V I. Laser in micro and nanoprocessing of diamond materials[J]. Laser Photonics Rev, 2012, 6(6): 739–766.
- [24] ODAKE S, OHFUJI H, OKUCHI T, et al. Pulsed laser processing of nano-polycrystalline diamond: A comparative study with single crystal diamond[J]. Diam Relat Mater, 2009, 18(5–8): 877–880.
- [25] ZHANG Z, ZHANG Q L, XU J H. The crack propagation and surface formation mechanism of single crystalline diamond by a nanosecond pulsed laser[J]. 2021, 130(11): 113105.
- [26] OHFUJI H, OKUCHI T, ODAKE S, et al. Micro-/nanostructural investigation of laser-cut surfaces of single- and polycrystalline diamonds[J]. Diam Relat Mater, 2010, 19(7–9): 1040–1051.
- [27] PICCARDO M, BOSIA F, OLIVERO P, et al. An analytical model for the mechanical deformation of locally graphitized diamond[J]. Diam Relat Mater, 2014, 48: 73–81.
- [28] WANG C Z, HO K M, SHIRK M D, et al. Laser-induced graphitization on a diamond (111) surface[J]. Phys Rev Lett, 2000, 85(19): 4092–4095.
- [29] JESCHKE H O, GARCIA M E, BENNEMANN K H. Microscopic analysis of the laser-induced femtosecond graphitization of diamond[J]. Phys Rev B, 1999, 60(6): R3701–R3704.
- [30] PREUSS S, STUKE M. Subpicosecond ultraviolet laser ablation of diamond: Nonlinear properties at 248 nm and time-resolved characterization of ablation dynamics[J]. Appl Phys Lett, 1995, 67(3): 338–340.
- [31] DUBEY A K, YADAVA V. Laser beam machining: A review[J]. Int J Mach Tools Manuf, 2008, 48(6): 609–628.
- [32] CADOT G B J, AXINTE D A, BILLINGHAM J. Continuous trench, pulsed laser ablation for micro-machining applications[J]. Int J Mach Tools Manuf, 2016, 107: 8–20.
- [33] CADOT G B J, THOMAS K, BEST J P, et al. Investigation of the microstructure change due to phase transition in nanosecond pulsed laser processing of diamond[J]. Carbon, 2018, 127: 349–365.
- [34] KOMLENOK M S, KONONENKO V V, RALCHENKO V G, et al. Laser induced nanoablation of diamond materials[J]. Phys Procedia, 2011, 12: 37–45.
- [35] OKUCHI T, OHFUJI H, ODAKE S, et al. Micromachining and surface processing of the super-hard nano-polycrystalline diamond by three types of pulsed lasers[J]. Appl Phys A, 2009, 96(4): 833–842.
- [36] ACKERL N, WARHANEK M, GYSEL J, et al. Ultra-short pulsed laser conditioning of metallic-bonded diamond grinding tools[J]. Mater Des, 2020, 189: 108530.
- [37] GHADIRI ZAHIRANI E, KOPP D, AZARHOUSHANG B. Comparison of material removal efficiency in laser ablation of polycrystalline diamond for different pulse durations[J]. Mater Lett, 2024, 377: 137474.
- [38] GHADIRI ZAHIRANI E, AZARHOUSHANG B. Experimental investigation of nanosecond pulsed laser ablation of polycrystalline diamond composite[J]. Opt Laser Technol, 2025, 181: 111634.
- [39] DHUPAL D, DOLOI B, BHATTACHARYYA B. Modeling and optimization on Nd: YAG laser turned micro-grooving of cylindrical ceramic material[J]. Opt Lasers Eng, 2009, 47(9): 917–925.
- [40] KROKHIN O N. Modern physical principles of laser ablation[C]//Proceedings of SPIE. Santa Fe, NM, USA. SPIE, 2000.
- [41] SVELTO O, HANNA D C. Principles of lasers[M]. 5th ed. New York: Springer, 2010: 7.
- [42] MOMMA C, CHICHKOV B N, NOLTE S, et al. Short-pulse laser ablation of solid targets[J]. Opt Commun, 1996, 129(1–2): 134–142.
- [43] CHICHKOV B N, MOMMA C, NOLTE S, et al. Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids[J]. Appl Phys A Mater Sci Process, 1996, 63(2): 109–115.
- [44] PRONKO P P, DUTTA S K, DU D, et al. Thermophysical effects in

- laser processing of materials with picosecond and femtosecond pulses[J]. *J Appl Phys*, 1995, 78(10): 6233–6240.
- [45] MOUHAMEDALI F, EQUI S, SAEIDI F, et al. Nanosecond pulsed laser-processing of CVD diamond[J]. *Opt Lasers Eng*, 2020, 126: 105917.
- [46] TAKABAYASHI K, TAKAHASHI T, TSUCHIYA E, et al. Morphology and structure of diamond-like carbon film induced by picosecond laser ablation[J]. *Appl Phys A*, 2022, 128(9): 850.
- [47] 温秋玲, 韦新宇, 王华禄, 等. 皮秒激光加工 CVD 单晶金刚石的特征和机理研究[J]. *光子学报*, 2021, 50(6): 126–136.
- WEN Qiuling, WEI Xinyu, WANG Hualu, et al. *Acta Photonica Sin*, 2021, 50(6): 126–136.
- [48] NOLASCO L K, COUTO F A, ANDRADE M B, et al. Femtosecond laser micromachining study with multiple wavelengths in CVD diamond[J]. *Diam Relat Mater*, 2023, 131: 109589.
- [49] KONONENKO T V, MEIER M, KOMLENOK M S, et al. Microstructuring of diamond bulk by IR femtosecond laser pulses[J]. *Appl Phys A*, 2008, 90(4): 645–651.
- [50] 陈根余, 朱智超, 殷超, 等. 单晶金刚石飞秒激光加工的烧蚀阈值实验[J]. *中国激光*, 2019, 46(4): 0402001.
- CHEN Genyu, ZHU Zhichao, YIN Jiu, et al. *Chin J Lasers*, 2019, 46(4): 0402001.
- [51] 汪晖, 温秋玲, 黄辉, 等. 飞秒激光加工 CVD 单晶金刚石的烧蚀特征和机理研究[J]. *光子学报*, 2023, 52(12): 51–65.
- WANG Hui, WEN Qiuling, HUANG Hui, et al. *Acta Photonica Sin*, 2023, 52(12): 51–65.
- [52] OGAWA Y, OTA M, NAKAMOTO K, et al. A study on machining of binder-less polycrystalline diamond by femtosecond pulsed laser for fabrication of micro milling tools[J]. *CIRP Ann*, 2016, 65(1): 245–248.
- [53] CHEN G Y, CHEN C, BU C, et al. Research on carbonized layer for truing and dressing of bronze-bonded diamond grinding wheels with laser[J]. *Chin J Laser*, 2012, 39(3): 0303006.
- [54] CHAO C L, CHOU W C, LIN W C, et al. Fabricating microstructures on CVD diamond film[J]. *Int J Surf Sci Eng*, 2012, 6(1/2): 59.
- [55] BUTLER-SMITH P W, AXINTE D A, PACELLA M, et al. Micro/nanometric investigations of the effects of laser ablation in the generation of micro-tools from solid CVD diamond structures[J]. *J Mater Process Technol*, 2013, 213(2): 194–200.
- [56] 边硕. CVD 单晶金刚石的高准直激光切割与优化[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- BIAN Shuo. Highly collimated laser cutting and optimization of cvd single crystal diamond [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [57] 吴煜, 张高峰. 聚晶金刚石的 Nd: YAG 激光切割与电火花线切割损伤分析[J]. *中国机械工程*, 2010, 21(9): 1034–1039.
- WU Yu, ZHANG Gaofeng. *China Mech Eng*, 2010, 21(9): 1034–1039.
- [58] ZHANG Z, ZHANG Q L, WANG Q W, et al. Surface microstructuring of single crystalline diamond based on the accumulated energy homogenization in the nanosecond pulsed laser ablation[J]. *Opt Laser Technol*, 2021, 138: 106839.
- [59] CUI X B, GUO Y H, GUO J X, et al. Performance analysis of laser-induced biomimetic ceramic tools in interrupted cutting[J]. *Int J Mech Sci*, 2020, 177: 105589.
- [60] BÜTTNER H, MICHAEL K, GYSEL J, et al. Innovative micro-tool manufacturing using ultra-short pulse laser ablation[J]. *J Mater Process Technol*, 2020, 285: 116766.
- [61] 王吉, 章鹏, 张天润, 等. 高频激光对化学气相沉积金刚石的大切深实验[J]. *光学 精密工程*, 2022, 30(1): 89.
- WANG Ji, ZHANG Peng, ZHANG Tianrun, et al. *Opt Precis Eng*, 2022, 30(1): 89.
- [62] RICHMANN A, KUZMINYKH Y, RICHERZHAGEN B, et al. Laser microjet© cutting of up to 3 mm thick sapphire[C]//International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics. San Diego, California, USA. Laser Institute of America, 2014: 1139–1143.
- [63] SHI G F, HAN D D, WANG S K, et al. Analysis and evaluation of natural diamond cut by water jet - guided laser[C]//Proceedings of the 4th Annual International Conference on Material Engineering and Application (ICMEA 2017). Wuhan, China. Atlantis Press, 2018: 195–198.
- [64] 李灵. 水导激光微细加工技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- LI Ling. Study On Water-Jet Guided Laser Micromachining Technology [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [65] KUBOTA A, NAGAE S, MOTOYAMA S, et al. Two-step polishing technique for single crystal diamond (100) substrate utilizing a chemical reaction with iron plate[J]. *Diam Relat Mater*, 2015, 60: 75–80.
- [66] THOMAS E L H, MANDAL S, BROUSSEAU E B, et al. Silica based polishing of {100} and {111} single crystal diamond[J]. *Sci Technol Adv Mater*, 2014, 15(3): 035013.
- [67] KUBOTA A, FUKUYAMA S, ICHIMORI Y, et al. Surface smoothing of single-crystal diamond (100) substrate by polishing technique[J]. *Diam Relat Mater*, 2012, 24: 59–62.
- [68] PHILLIPS K C, GANDHI H H, MAZUR E, et al. Ultrafast laser processing of materials: A review[J]. *Adv Opt Photon*, 2015, 7(4): 684–712.
- [69] MISHRA S, YADAVA V. Laser beam MicroMachining (LBMM)—A review[J]. *Opt Lasers Eng*, 2015, 73: 89–122.
- [70] KONONENKO T V, SOVYK D N, PIVOVAROV P A, et al. Fabrication of diamond diffractive optics for powerful CO₂ lasers via replication of laser microstructures on silicon template[J]. *Diam Relat Mater*, 2020, 101: 107656.
- [71] ZHAO Y, LIU H G, YU T B, et al. Fabrication of high hardness microarray diamond tools by femtosecond laser ablation[J]. *Opt Laser Technol*, 2021, 140: 107014.
- [72] LIU H G, XIE L R, LIN W X, et al. Optical quality laser polishing of CVD diamond by UV pulsed laser irradiation[J]. *Adv Optical Mater*, 2021, 9(21): 2100537.
- [73] YAN B, CHEN N, HE N, et al. Surface modeling and component analysis of picosecond laser ablation of CVD diamond[J]. *Diam Relat Mater*, 2021, 111: 108191.
- [74] OKAMOTO Y, OKADA A, KAJITANI A, et al. High surface quality micro machining of monocrystalline diamond by picosecond pulsed laser[J]. *CIRP Ann*, 2019, 68(1): 197–200.
- [75] KOMLENOK M, PASHININ V, SEDOV V, et al. Femtosecond and nanosecond laser polishing of rough polycrystalline diamond[J]. *Laser Phys*, 2022, 32(8): 084003.
- [76] LIU N, SUGIMOTO K, YOSHITAKA N, et al. Highly efficient finishing of large-sized single crystal diamond substrates by combining nanosecond pulsed laser trimming and plasma-assisted polishing[J]. *Ceram Int*, 2023, 49(11): 19109–19123.
- [77] SCALBERT W, TANNER D, HOLTZ R. Development of high-power laser ablation process for polycrystalline diamond polishing, Part 2:

- Upscaling of PCD ultra-short pulsed laser ablation to high power[C]//High-Power Laser Materials Processing: Applications, Diagnostics, and Systems IX. San Francisco, USA. SPIE, 2020: 2544963.
- [78] 赵智炎, 冯昱森, 罗子艺, 等. 基于激光复合技术的金刚石抛光研究[J]. 中国激光, 2024, 51(16): 1602210.
- ZHAO Zhiyan, FENG Yusen, LUO Ziyi, et al. Chin J Lasers, 2024, 51(16): 1602210.
- [79] 王建武, 陈学兵, 黄金刚, 等. 聚晶金刚石复合片激光抛光工艺研究[J]. 制造技术与机床, 2022(4): 43–49.
- WANG Jianwu, CHEN Xuebing, HUANG Jingang, et al. Manuf Technol Mach Tool, 2022(4): 43–49.
- [80] PRIESKE M, VOLLERTSEN F. Picosecond-laser polishing of CVD-diamond coatings without graphite formation[J]. Mater Today Proc, 2021, 40: 1–4.
- [81] KUMAGAI M, UCHIYAMA N, OHMURA E, et al. Advanced dicing technology for semiconductor wafer: Stealth dicing[J]. IEEE Trans Semicond Manuf, 2007, 20(3): 259–265.
- [82] TOKUNAGA D, SATO M, ITOH S, et al. Focus movement distance per pulse dependence of electrical conductivity and diameter of diamond internal modification induced by picosecond laser[J]. Sci Rep, 2022, 12(1): 17371.
- [83] ASHIKKALIEVA K K, KONONENKO T V, OBRAZTSOVA E A, et al. Direct observation of graphenic nanostructures inside femtosecond-laser modified diamond[J]. Carbon, 2016, 102: 383–389.
- [84] SOTILLO B, BHARADWAJ V, HADDEN J P, et al. Diamond photonics platform enabled by femtosecond laser writing[J]. Sci Rep, 2016, 6: 35566.
- [85] SAKAMOTO K, TOKUNAGA D, ITOH S, et al. Laser slicing of a diamond at the{100}plane using an irradiation sequence that restricts crack propagation along the{111}plane[J]. Diam Relat Mater, 2023, 136: 110045.
- [86] PARKS S M, GROTE R R, HOPPER D A, et al. Fabrication of (111)-faced single-crystal diamond plates by laser nucleated cleaving[J]. Diam Relat Mater, 2018, 84: 20–25.
- [87] HIRAI H, HIDAI H, MATSUSAKA S, et al. Diamond slicing using ultrashort laser-induced graphitization and additional nanosecond laser illumination[J]. Diam Relat Mater, 2019, 96: 126–133.
- [88] WANG H L, WEN Q L, XU X P, et al. Ablation characteristics and material removal mechanisms of a single-crystal diamond processed by nanosecond or picosecond lasers[J]. Opt Express, 2021, 29(14): 22714–22731.
- [89] 熊彪, 陈根余, 殷超, 等. 飞秒激光加工单晶金刚石锥形阵列的试验研究[J]. 应用激光, 2018, 38(2): 270.
- XIONG Biao, CHEN Genyu, YIN Jiu, et al. Appl Laser, 2018, 38(2): 270.
- [90] TAKAYAMA N, YAN J W. Mechanisms of micro-groove formation on single-crystal diamond by a nanosecond pulsed laser[J]. J Mater Process Technol, 2017, 243: 299–311.
- [91] White Y V, Parrish M, Li X, et al. Proceedings of the SPIE Nanoscience Engineering [C]. Nanoengineering: Fabrication, Properties, Optics, and Devices V, San Diego, CA, USA, 10–14 August 2008; Dobisz, E.A, Ed.; SPIE: Paris, France, 2008, 7039: 70390J1–10.
- [92] LI Z J, CHEN N, LI L, et al. Influence of the grain size of CVD diamond on the thermal conductivity, material removal depth and surface roughness in nanosecond laser machining[J]. Ceram Int, 2020, 46(12): 20510–20520.
- [93] CHEN N, LI Z J, WU Y, et al. Investigating the ablation depth and surface roughness of laser-induced nano-ablation of CVD diamond material[J]. Precis Eng, 2019, 57: 220–228.
- [94] DUDEK M, ROSOWSKI A, KOZANECKI M, et al. Microstructures manufactured in diamond by use of laser micromachining[J]. Materials, 2020, 13(5): 1199.
- [95] GOLOTA N C, PREISS D, FREDIN Z P, et al. High aspect ratio diamond nanosecond laser machining[J]. Appl Phys A Mater Sci Process, 2023, 129(7): 490.
- [96] JEONG B, LEE B, KIM J H, et al. Drilling of sub-100 μm hourglass-shaped holes in diamond with femtosecond laser pulses[J]. Quantum Electron, 2020, 50(2): 201–204.
- [97] 董春燕, 张晓宇, 顾德华等. 不同激光功率下金刚石微孔成形及缺陷特征[J]. 中国激光, 2023, 50(24): 2402404.
- DONG Chunyan, ZHANG Xiaoyu, GU Dehua, et al. Chin J Lasers, 2023, 50(24): 2402404.
- [98] WANG Z, JIANG L, LI X W, et al. High-throughput microchannel fabrication in fused silica by temporally shaped femtosecond laser Bessel-beam-assisted chemical etching[J]. Opt Lett, 2018, 43(1): 98–101.
- [99] YAO Z L, JIANG L, LI X W, et al. Non-diffraction-length, tunable, Bessel-like beams generation by spatially shaping a femtosecond laser beam for high-aspect-ratio micro-hole drilling[J]. Opt Express, 2018, 26(17): 21960–21968.

Methods and Research Progress for High-Quality Laser Processing of Diamond Materials

ZHANG Xiaoyu^{1,2}, WANG Ziang^{1,2}, HU Xiufei^{1,2}, GE Lei^{1,2}, WANG Yingnan^{1,2}, HAN Saibin^{1,2}, PENG Yan^{1,2},
XU Mingsheng^{1,2}, XU Xiangang^{1,2}

(1. Institute of Novel Semiconductors, Shandong University, Jinan 250100, China;

2. State Key Laboratory of Crystal Materials, Shandong University, Jinan 250100, China)

Extended Abstract

As an ultra-wide bandgap semiconductor, diamond stands out with its exceptional properties: Mohs hardness up to 10, thermal conductivity exceeding 2000 W/(m·K), a 5.47 eV bandgap, and chemical inertness. These attributes make diamond indispensable in high-power electronics, optoelectronics, quantum computing, and aerospace engineering. With the rapid growth of diamond synthesis technology, traditional mechanical machining faces insurmountable limitations in achieving sub-micron precision and fabricating complex micro-nano structures. Laser processing, leveraging non-contact ablation, localized energy deposition, and precise parameter control, has emerged as a transformative solution for diamond machining.

The mechanism of laser interaction with diamond involves two primary steps. Initially, diamond is transformed into the graphite phase through laser induction. After that, the graphitized layer is removed *via* vaporization and chemical etching to complete the material processing. Surface graphitization occurs as a result of photon energy exciting the transition of sp^3 bonds between carbon atoms to sp^2 bonds. This process is influenced and directed to a certain extent by laser parameters and the thermal gradients in the laser - irradiated area. Regarding the mechanism of laser - induced graphite removal, lasers with different pulse widths, ranging from continuous lasers to extremely short femtosecond pulses, behave differently. Laser pulses having pulse width exceeding one picosecond can heat both the lattice and electrons simultaneously. In contrast, laser pulses with a width less than 1 ps mainly excite electrons through nonlinear ionization. Nanosecond or longer - pulse lasers typically cause lattice heating, which can induce solid - solid phase transitions, amorphization, melting, or evaporation. On the other hand, femtosecond lasers remove material through expanding plasma, which helps reduce damage to the remaining surface. Based on these differences, each type of laser has its own set of advantages and limitations in specific applications.

Regarding surface treatment and polishing, while laser processing outperforms mechanical methods in efficiency and material loss, its final surface roughness traditionally lagged behind mechanical polishing. Recent advancements in multi-laser source polishing, laser-assisted polishing, and pulse burst mode have demonstrated transformative potential. High-power lasers with pulse burst mode (energy density $<5 \text{ J/cm}^2$) reduced surface roughness by 50% while maintaining minimal HAZ ($<3 \text{ }\mu\text{m}$). Furthermore, a hybrid process combining laser trimming and plasma-assisted polishing (PAP) achieved atomic-scale flatness ($R_a < 10 \text{ nm}$). This method uses laser pretreatment to remove macroscopic defects followed by plasma etching for nanoscale smoothing.

In surface treatment and polishing, while laser processing outperforms mechanical methods in efficiency and material loss, its final surface roughness traditionally lags behind conventional mechanical polishing. Recent advancements in multi-laser source polishing, laser-assisted polishing, and pulse burst mode have demonstrated transformative potential. Sequential polishing with hybrid laser sources (*e.g.*, nanosecond + femtosecond lasers) combines ablation effects and defocused beam strategies to reduce peak-valley height differences while maintaining laser energy near the ablation threshold ($<5 \text{ J/cm}^2$). This approach minimizes thermal damage, ensures optical surface quality, and enables precision material removal. High-power lasers with pulse burst mode achieve 50% roughness reduction (*e.g.*, from $0.41 \text{ }\mu\text{m}$ to $0.2 \text{ }\mu\text{m}$ S_a) through energy density optimization ($<5 \text{ J/cm}^2$), resulting in minimal heat-affected zones ($<3 \text{ }\mu\text{m}$). Additionally, a hybrid process integrating laser trimming and plasma-assisted polishing (PAP) achieves atomic-scale flatness ($R_a < 10 \text{ nm}$). This method uses laser pretreatment to eliminate macroscopic defects followed by plasma etching for nanoscale smoothing.

Summary and prospects Laser processing has demonstrated transformative potential in diamond machining. However, current technologies face several challenges. Laser polishing of diamond requires further roughness reduction, with sequential multi-laser polishing, pulse burst mode processing, and laser-assisted polishing representing viable next steps. Mitigating thermal damage from long-pulse lasers and improving efficiency of short-pulse lasers are critical for widespread adoption. Future research should integrate short- and long-pulse laser advantages through process design or source selection to achieve high-precision, high-quality, and low-defect machining. In recent years, innovative technologies such as Bessel beam shaping, femtosecond laser direct writing, and laser microjet have further broken through the limitations of traditional processes, providing brand new solutions for the manufacturing of quantum devices, optical components, and high-precision microstructures. In conclusion, while challenges persist, continuous advancements in laser technology promise to address these bottlenecks, enabling scalable diamond machining for next-generation applications.

Keywords diamond; laser processing; laser polishing; laser cutting; laser peeling