

金刚石复合折射透镜的设计及加工初探

孟立民 何煦 马云灿 李军 杜亮亮 钱伟新 叶雁

Preliminary study on design and processing of diamond compound refractive lens

MENG Limin, HE Xu, MA Yuncan, LI Jun, DU Liangliang, QIAN Weixin, YE Yan

引用本文:

孟立民, 何煦, 马云灿, 等. 金刚石复合折射透镜的设计及加工初探[J]. 应用光学, 2023, 44(6): 1273–1279. DOI: 10.5768/JAO202344.0610015

MENG Limin, HE Xu, MA Yuncan, et al. Preliminary study on design and processing of diamond compound refractive lens[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(6): 1273–1279. DOI: 10.5768/JAO202344.0610015

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0610015>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

飞秒激光光斑灰度与几何特征的相关性分析

Correlation analysis of gray scale and geometric features of femtosecond laser spot

应用光学. 2020, 41(5): 1108–1116 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0507002>

飞秒激光直写PMMA制备微流道的工艺技术研究

Research on technology with femtosecond laser direct-writing on PMMA microchannels

应用光学. 2018, 39(3): 442–446 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0307003>

单脉冲飞秒激光时域参数测量技术研究

Research on time domain parameters measurement of single pulse femtosecond laser

应用光学. 2020, 41(4): 690–696 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0407001>

利用光斑图像特征确定飞秒激光有效烧蚀焦距

Effective ablation focus determination of femtosecond laser by using spot image feature

应用光学. 2017, 38(5): 831–836 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0507002>

PMMA材料在线偏振和圆偏振光下的超连续光谱特性分析

Analysis of supercontinuum spectra characteristics of PMMA materials in linear polarization and circularly polarized light

应用光学. 2018, 39(1): 146–150 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0107005>

衍射透镜补偿声光偏转器扫描飞秒激光的色散

Dispersion compensation of 2D acousto-optic deflector scanning femtosecond laser based on diffractive lens

应用光学. 2017, 38(2): 321–326 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0207003>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 06-1273-07

金刚石复合折射透镜的设计及加工初探

孟立民, 何 煦, 马云灿, 李 军, 杜亮亮, 钱伟新, 叶 雁

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 复合折射透镜 (compound refractive lens, CRL) 因具有结构紧凑、焦距可调、准直方便等优点, 被用作硬 X 射线自由电子激光 (X-ray free electron laser, XFEL) 装置的光束聚焦器件。面向 XFEL 光束高精度聚焦对高性能 CRL 的实际需求, 从 CRL 的几何结构设计原理出发, 分析了不同材料 CRL 的性能参数, 证明了单晶金刚石材料是适用于 XFEL 光束聚焦的 CRL 优选材料。同时, 考虑超硬金刚石材料的难加工特性以及低重频钛宝石飞秒激光不能实现大厚度材料高效加工的实际问题, 探索了高重频光纤飞秒激光对大厚度单晶金刚石材料进行高效加工的可行性。研究结果表明, 高重频飞秒激光精密加工技术是实现金刚石 CRL 制备的有效手段。

关键词: X 射线聚焦; 复合折射透镜; 单晶金刚石; 飞秒激光; 精密加工

中图分类号: TN206

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0610015

Preliminary study on design and processing of diamond compound refractive lens

MENG Limin, HE Xu, MA Yuncan, LI Jun, DU Liangliang, QIAN Weixin, YE Yan

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: Compound refractive lens (CRL) is used as the X-ray beam focusing device of hard X-ray free electron laser (XFEL) because of its compact structure, tunable focal length and convenient collimation. In order to meet the requirements of XFEL beam focusing with high precision, the performance parameters of CRL made of different materials were analyzed based on the geometric structure design principle of CRL, and it was proved that single crystal diamond material was the preferred material for XFEL beam focusing devices. At the same time, considering the difficulty of the machining characteristics of superhard diamond materials, and the practical problem that low repetition rate and low power titanium sapphire femtosecond laser could not realize efficient machining of large thickness materials, the feasibility of efficient machining of large thickness single crystal diamond materials by high repetition rate and high power fiber femtosecond laser was explored. The research results show that the femtosecond laser precision machining technology with high repetition rate is an effective method to fabricate diamond CRL devices.

Key words: X-ray focusing; compound refractive lens; single crystal diamond; femtosecond laser; precision machining

引言

X 射线自由电子激光 (X-ray free electron laser, XFEL) 是高品质相对论电子束在周期性磁场作用下自放大自激辐射而产生的强相干脉冲 X 射线^[1-4]。与常见 X 射线光源 (如 X 射线管光源、激光驱动

的 X 射线光源、同步辐射光源等) 相比, XFEL 光束具有超短脉冲宽度、超高峰值亮度、超强相干性等优点^[5], 是人们实现材料动态演化高时空分辨诊断的理想光源。为获得高分辨诊断数据, XFEL 光束的高精度聚焦是基本前提。

收稿日期: 2023-09-18; 修回日期: 2023-10-17

基金项目: 中国工程物理研究院统筹发展项目 (TCGH0610); 冲击波物理与爆炸物理重点实验室基金 (2021JCJQLB05707)

作者简介: 孟立民 (1982—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事 X 射线光学研究。E-mail: menglimin82@126.com

通信作者: 马云灿 (1987—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事飞秒激光加工技术及应用研究。E-mail: mayuncan@caep.cn

X 射线聚焦器件可分为 3 类^[6]: 1) 反射型, 如 Kirkpatrick-Baez (K-B) 镜、毛细管聚焦镜等; 2) 衍射型, 如多层膜劳厄透镜、菲涅尔波带片等; 3) 折射型, 如复合折射透镜 (compound refractive lens, CRL) 等。其中, CRL 因具有结构紧凑、焦距可调、准直方便等优点而被认为是 XFEL 光束聚焦的关键器件^[7]。CRL 研制需在原材料选择方面关注 3 个基本问题: 1) 高亮度强相干 XFEL 光束聚焦时会产生较强热效应, 故原材料需具备较强抗热载能力^[8]; 2) CRL 属于折射型聚焦器件, 高原子序数材料会对 X 射线造成较强衰减, 故需选择低原子序数材料^[9]; 3) CRL 材料晶粒尺寸不一致会对相干 X 射线造成散射, 故单晶材料是更好的选择^[10]。因此, 选择具有较强抗热载性能的低原子序数单晶材料研制 CRL, 对利用 XFEL 装置开展高分辨诊断实验具有重要意义。

单晶金刚石是一种低原子序数材料, 它具有热稳定性好、折射/吸收比高、机械强度高、化学性质稳定等优点, 被认为是研制 CRL 的优选材料^[11]。然而, 由于金刚石材料的超硬难加工特性, 国内外关于金刚石 CRL 的研究报道相对较少: 1) 国外仅有 CRL 方案的提出者 SNIGIREV A^[12] 及其研究组较早利用飞秒激光加工技术开展了金刚石 CRL 研制, 由于激光功率较高且加工速率较低, 使得单位面积累积激光能量较高, 导致加工面石墨化现象较严重^[13], 故加工路径及加工参数尚需优化; 2) 国内部分课题组开展了飞秒激光加工金刚石材料的实验研究^[14-16], 但尚未涉及 CRL。同时, 部分课题组还开展了 CRL 设计及加工研究^[17-19], 但其原材料并非金刚石。因此, 基于飞秒激光可对任意固体材料实施近乎无“热”的微区精准去除特性^[20], 结合加工路径的精准优化和加工参数的精细调控, 预期可实现满足 XFEL 光束聚焦的金刚石 CRL 高效精密加工。

本文面向我国 XFEL 装置对高性能单晶金刚石 CRL 的应用需求, 开展 3 个方面的工作: 首先, 基于 X 射线光学理论, 结合紧凑型诊断实验光路布局需求 (焦距 $f < 1$ m), 给出金刚石 CRL 尺寸及指标; 其次, 比较相同条件下 4 种典型低原子序数材料 CRL 焦距, 验证单晶金刚石是适用于 XFEL 光束聚焦的 CRL 优选材料; 最后, 以厚度为 500 μm 的单晶金刚石为基底, 探索利用高重频光纤飞秒激光实现金刚石 CRL 高效高精度加工的可行性。

1 单个 X 射线聚焦透镜及复合折射透镜的结构设计

X 射线是一种波长较短的电磁波, 它在介质中的折射特性与可见光类似。X 射线折射率表示为 $n=1-\delta+i\beta$, 实部 $1-\delta$ 和虚部 β 分别代表折射和吸收。其中, δ 取值为 10^{-6} 量级, 故 X 射线在材料中的折射率小于 1。因此, 与可见光使用凸透镜聚焦相反, 能够实现 X 射线聚焦的面型为凹面, 如图 1 所示。

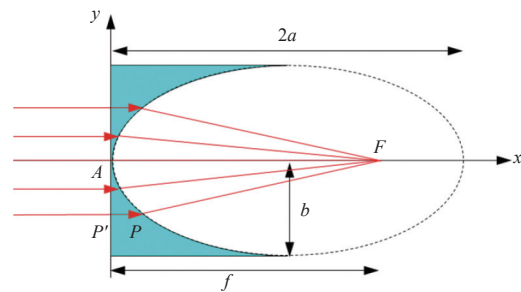


图 1 X 射线聚焦透镜示意图

Fig. 1 Schematic diagram of optimal surface shape of X-ray focusing lens

假设 X 射线从左到右照射在透镜表面并聚焦在 F 点, 入射面为垂直于光束传播方向的平面, AF 所在虚线为光轴, P' 为入射面上光轴外一点。以入射面中心为原点、光束传播方向为 x 轴正方向建立坐标系。则根据费马定理, 光程 AF 与 P'PF 相等, 即:

$$AF = nP'P + PF \quad (1)$$

根据几何关系易证明, 实现 X 射线聚焦的理想面型为椭圆形^[21], 其方程为

$$\frac{(x-a)^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (2)$$

式中: a 和 b 分别为椭圆长半轴和短半轴。根据式 (1) 和式 (2) 可推导出:

$$\begin{cases} a = \frac{f}{2-\delta} \approx \frac{f}{2} \\ b = f \sqrt{\frac{\delta}{2-\delta}} \approx f \sqrt{\frac{\delta}{2}} \end{cases} \quad (3)$$

由于 $\delta \ll 1$, 单透镜折射效果微弱, 其焦距 f 近似等于椭圆长轴 $2a$ 。椭圆顶点 A 处的曲率半径为 $R = b^2/a$, 式 (3) 可进一步简化为

$$R = \frac{b^2}{a} = f\delta \quad (4)$$

在 X 射线聚焦透镜的设计中, 一般用具有相同顶点曲率半径的抛物线形曲面来近似代替椭圆

曲面, 在相同坐标系中抛物线方程为

$$y^2 = 2Rx \quad (5)$$

式中: R 为抛物线顶点曲率半径。当 $x=a(a>0)$ 时, 椭圆开口直径 $2b=2\sqrt{aR}$ 小于抛物线开口直径 $2\sqrt{2aR}$, 如图 2 所示。聚焦透镜开口直径决定 X 射线光子通量, 即开口直径越大, 透镜可接收的 X 射线光子通量越高。同时, X 射线在抛物柱孔型透镜中经过的材料长度小于椭圆柱孔型透镜, X 射线的衰减相对较小。因此, 抛物柱孔型透镜在透过率方面优于椭圆柱孔型透镜, 本研究将 X 射线聚焦器件的孔型定为抛物柱孔型。

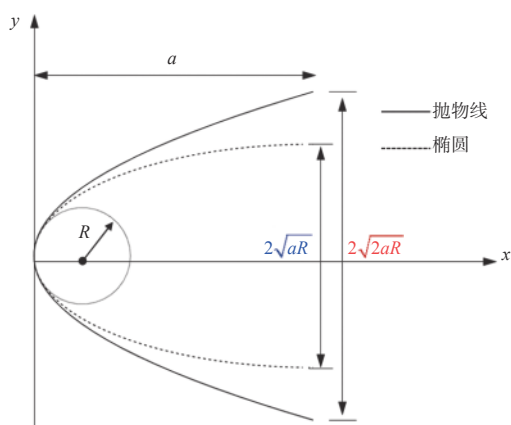


图 2 相同曲率半径下椭圆和抛物线口径大小对比示意图

Fig. 2 Schematic diagram of comparison between elliptical and parabolic aperture size under same curvature radius

根据式(4)可知, 单个透镜焦距 $f=R/\delta$ 。当 R 取 $100\ \mu\text{m}$ 且 $\delta=10^{-6}$ 时, 焦距 $f=100\ \text{m}$, 不满足紧凑型实验布局对 CRL 焦距的实际要求。因此, 将多个透镜串联以缩小焦距, 此时即可将其称为复合折射透镜(CRL), 其焦距表示为

$$f_N = \frac{R}{2N\delta} \quad (6)$$

式中: N 表示透镜单元个数, 抛物柱孔型 CRL 的几何结构如图 3 所示。

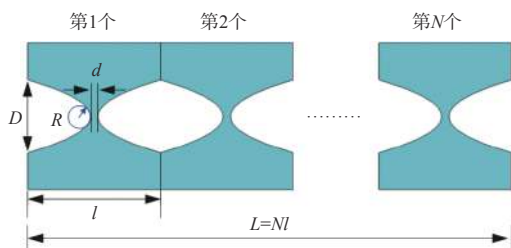


图 3 抛物柱孔型 CRL 示意图

Fig. 3 Schematic diagram of parabolic column hole-type CRL

图 3 中, D 、 R 、 d 和 l 分别表示开口直径、顶点曲率半径、相邻曲面顶点间距和透镜单元长度。

根据抛物线方程式(5), 可导出抛物柱孔型 CRL 特征参数满足以下关系式:

$$R = \frac{D^2}{4(l-d)} \quad (7)$$

在具体参数设置过程中, 考虑到 CRL 加工及装配时可能会因顶点间隔较小而导致器件损坏, 于是将 d 取值 $50\ \mu\text{m}$ 。同时, 考虑到光路对准、X 射线光子通量、材料厚度等因素, 将开口直径 D 取值 $500\ \mu\text{m}$ 。另外, 从原材料长度方面考虑, 将透镜单元长度 l 设置为 $900\ \mu\text{m}$ 。将前述取值代入式(7), 可得出抛物柱孔型 CRL 顶点曲率半径 $R=73.5\ \mu\text{m}$ 。

2 复合折射透镜的材料选择

CRL 的典型原材料主要有 PMMA、Be、SiC、金刚石晶体等。计算并比较了 4 种材料的 CRL 在光子能量 $E \leq 60\ \text{keV}$ 能段范围内的焦距 f , 获得焦距随光子能量变化的曲线如图 4 所示。其中, 顶点曲率半径 $R=73.5\ \mu\text{m}$, 透镜组数 $N=9$, 顶点间隔 $d=50\ \mu\text{m}$ 。由于金刚石具有较大 δ 值, 所以相同光子能量下的焦距相对较小。特别地, 当光子能量 $E=40\ \text{keV}$ 时, 其余 3 种材料的 CRL 焦距均超过 $10\ \text{m}$, 而金刚石 CRL 焦距仍可保持在 $10\ \text{m}$ 以内。因此, 在 XFEL 光束线或者实验室光路中, 若要求实现特定焦距, 则所需金刚石透镜数量更少, 故选择单晶金刚石作为 CRL 原材料。

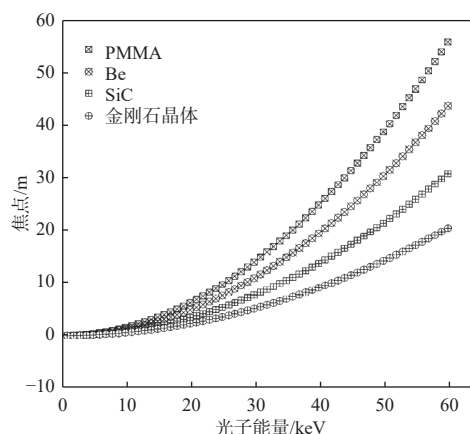


图 4 不同材料 CRL 的焦距随光子能量的变化曲线

Fig. 4 Variation curves of focal length of CRL of different materials with photon energy

根据前述 CRL 结构设计及材料选择分析, 针对紧凑型实验光路(光子能量 $E=12\ \text{keV}$)布局对焦

距的实际要求($f<1\text{ m}$), 利用式(6)和式(7)确定抛物柱孔型金刚石 CRL 的几何特征参数如表 1 所示。

表 1 抛物柱孔型金刚石 CRL 的几何特征参数
Table 1 Geometric characteristic parameters of parabolic column hole-type diamond CRL

参数名称	计算结果
开口直径 $D/\mu\text{m}$	500
顶点间隔 $d/\mu\text{m}$	50
透镜单元长度 $l/\mu\text{m}$	900
顶点曲率半径 $R/\mu\text{m}$	73.5
透镜单元数 N	9
焦距 f/m	0.807

3 金刚石复合折射透镜的高效精密加工

3.1 飞秒激光精密加工技术平台简介

图 5 是飞秒激光精密加工技术平台示意图。该平台主要由高重频光纤飞秒激光器、机械快门、激光束传输系统、光学显微镜、高精度三维位移台和同轴吹气-除尘系统等 6 个部分组成。

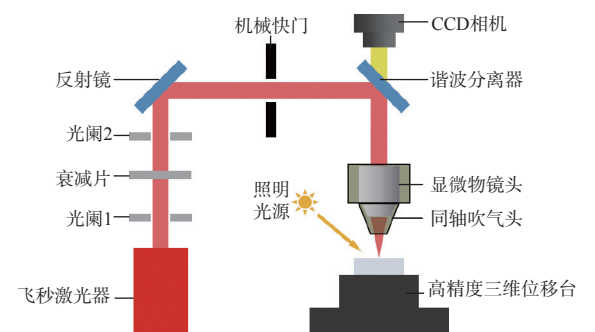


图 5 飞秒激光精密加工技术平台示意图
Fig. 5 Schematic diagram of femtosecond laser precision machining technology platform

各部分功能及主要参数为: 1) 高重频光纤飞秒激光器是开展加工实验的能量源, 其中心波长 $1\,030\text{ nm}\pm 5\text{ nm}$, 脉冲宽度 300 fs , 重复频率 $25\text{ kHz}\sim 1\text{ MHz}$ 可调, 最大平均功率 15 W ; 2) 机械快门是控制激光束通与断的器件, 最快响应时间 20 ms ; 3) 激光束传输系统是实现激光束定向传输、光束直径调节、功率调控等功能的模块, 由反射镜、光阑、衰减片等元器件组成; 4) 光学显微镜具备激光束聚焦和加工过程在线监测的双重功能, 镜头可根据聚焦及监测需求实现 5° 、 10° 、 20° 、 50° 、 100° 等不同放大倍率切换; 5) 高精度三维位移台是实现样品精密运动的核心部件, 行程 $X\times Y\times Z=100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 50\text{ mm}$, 绝对定位精度 $\pm 0.3\text{ }\mu\text{m}$, 重复定位精度 $\pm 0.03\text{ }\mu\text{m}$; 6) 同轴吹气-除尘系统具备闭环过滤回收功能, 当材料去除量较大时需对加工点进行实时吹扫, 以保证粉尘被及时吹离, 从而不对激光束造成散射。

一般情况下, 相同类型的飞秒激光精密加工技术平台涉及的光学显微镜和高精度三维位移台分别利用不同的软件控制, 实验时需打开至少 2 个操作界面, 导致飞秒激光加工实验的效率较低。为解决该问题, 研究小组自主开发如图 6 所示的飞秒激光精密加工控制软件, 在 1 个软件界面上即可实现光学显微镜和高精度三维位移台的高效协同控制, 一定程度上提高了飞秒激光加工实验的效率。该软件不仅具备常用的加工功能模块, 如直线(或阵列)加工、点(或阵列)加工、圆或圆孔(或阵列)加工、方形或方形孔(或阵列)加工等, 而且可以根据目标结构的实际加工需求实现个性化定制。



图 6 飞秒激光精密加工控制软件界面
Fig. 6 Interface of femtosecond laser precision machining control software

3.2 金刚石复合折射透镜飞秒激光加工路径和加工流程设计

飞秒激光精密加工技术主要利用高斯分布的极小焦斑,对任意固体材料实施微小区域精准去除。当材料去除量(前述金刚石 CRL 原材料去除量约为 1.30 mm^3)较大时,加工路径和加工流程的优化设计是实现高精度和高效率的前提。

在加工路径方面,抛物柱孔是 CRL 对 XFEL 光束进行有效聚焦的核心结构,它由一系列闭合抛物线依次经横向扩展和纵向深入构成。由于飞秒激光加工控制软件尚不具备抛物线路径加工功能,故需对抛物线加工路径进行建模以生成三维位移台可识别的加工路径代码。在路径建模过程中,首先以微小圆弧拟合抛物线加工路径,然后以单次扫描去除以线宽 Δx 及深度 Δz 为参考分别设置的抛物线加工路径横向扩展增量 Δx (Δx 取 $\Delta X/2$) 和纵向进给量 Δz (Δz 取 $\Delta Z/2$),如图 7 所示为抛物柱孔加工路径示意图。

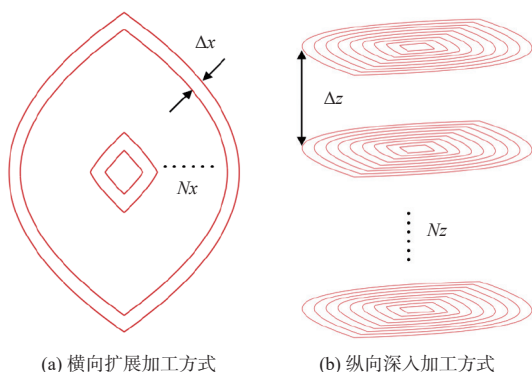


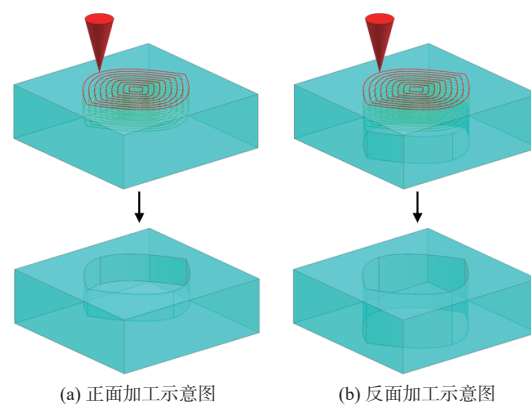
图 7 抛物柱孔的加工路径示意图

Fig. 7 Schematic diagram of machining path for parabolic column holes

在加工流程方面,考虑到单晶金刚石材料厚度远大于飞秒激光束焦深,若仅从正面实施逐层加工,抛物柱孔必然存在垂直度不高的问题。为避免前述问题,在保证对准精度前提下,采用如图 8 所示的正-反面复合加工方式,以确保大厚度情况下可获得垂直度较高的抛物柱孔。需要注意的是,前述加工路径和加工流程仅是针对 CRL 单元设计,在实际加工试验中需充分利用飞秒激光加工控制软件的阵列加工功能以提高效率。

3.3 金刚石复合折射透镜飞秒激光加工结果与讨论

根据图 3 及表 1 所述的抛物柱孔型金刚石 CRL 结构及参数,选择化学气相沉积法制备的单晶金刚石(尺寸 $10 \text{ mm} \times 8 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$,晶向 100)作为原



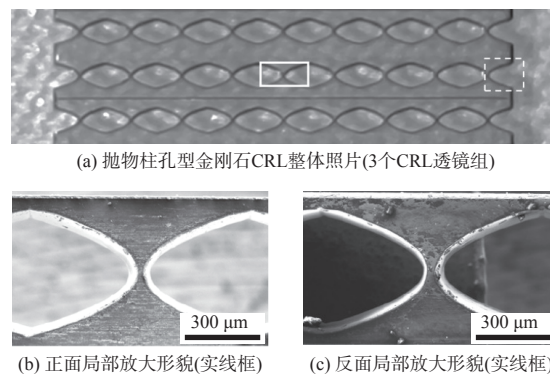
(a) 正面加工示意图 (b) 反面加工示意图

图 8 正面-反面复合加工方式示意图

Fig. 8 Schematic diagram of front-back composite machining mode

材料。基于前述加工路径和加工流程,利用高重复飞秒激光精密加工技术平台开展试验。参数设置分为两部分:1)激光参数方面,激光功率 $P=500 \text{ mW}$,重复频率 $R_p=25 \text{ kHz}$,聚焦物镜数值孔径 $NA=0.25$ (放大倍率为 $10\times$),加工速率 $u=5\,000 \text{ } \mu\text{m/s}$; 2)路径参数方面,抛物线横向扩展增量 $\Delta x=5 \text{ } \mu\text{m}$,扩展次数 $N_x=10$;抛物线纵向进给量 $\Delta z=3 \text{ } \mu\text{m}$,进给次数 $N_z=85$,对应深度 $Z=255 \text{ } \mu\text{m}$ 。正面加工完成后,将样品翻转 180° 并对准,然后在相同参数下实施反面加工。待 CRL 样品加工完毕后,首先用酒精和去离子水在超声环境中清洗 10 min ,然后利用扫描电子显微镜分别表征正面、反面和横截面形貌,最后利用拉曼光谱测试系统测量抛物柱孔壁面的拉曼光谱。

图 9 是高重复飞秒激光加工的抛物柱孔型金刚石 CRL 形貌。抛物柱孔型金刚石 CRL 样品的正面及反面轮廓均接近抛物线,轮廓几何尺寸误差小于 $5 \text{ } \mu\text{m}$,基本满足设计要求。



(a) 抛物柱孔型金刚石 CRL 整体照片(3个 CRL 透镜组)

(b) 正面局部放大形貌(实线框)

(c) 反面局部放大形貌(实线框)

图 9 高重复飞秒激光加工的抛物柱孔型金刚石 CRL 形貌图

Fig. 9 Morphology of parabolic column hole diamond CRL processed by high repetition rate femtosecond laser

根据飞秒激光加工软件时间统计, CRL 单元的单层去除耗时 Δt 约为 10 s, 正-反面加工耗时 t_1 均为 2 h 22 min, 正-反面加工切换及对准耗时 t_2 约为 15 min, 故由 9 个透镜单元(抛物柱孔数量为 10 个)组成的 CRL 加工总耗时 T 约为 $2t_1+t_2=5$ h。从文献报道来看^[13], 本试验使用的加工速率是文献中加工速率的 5 倍, 故加工速率相对较高。

图 10 是 CRL 的横截面形貌(与图 9(a)虚线框对应)及 A 点的拉曼光谱测试(激发波长 532 nm, 波数分辨率 3 cm^{-1})结果。从横截面形貌可以看出, 抛物柱孔垂直度接近 90° , 说明正-反面复合加工方式对大厚度样件加工的有效性, 但其局部粗糙度尚需根据聚焦性能测试结果进一步优化。同时, 拉曼光谱测试结果表明, 高重频飞秒激光加工的单晶金刚石抛物柱孔, 其壁面 A 点的拉曼光谱主要是单晶金刚石特征峰($1\,332\text{ cm}^{-1}$), 没有出现石墨特征峰($1\,580\text{ cm}^{-1}$)。与文献报道的拉曼测试结果相比^[13, 15, 22], 高重频飞秒激光在高速加工条件下获得的 CRL 壁面, 由于单位面积上累积的激光能量相对较低, 使得金刚石材料石墨化现象相对微弱。

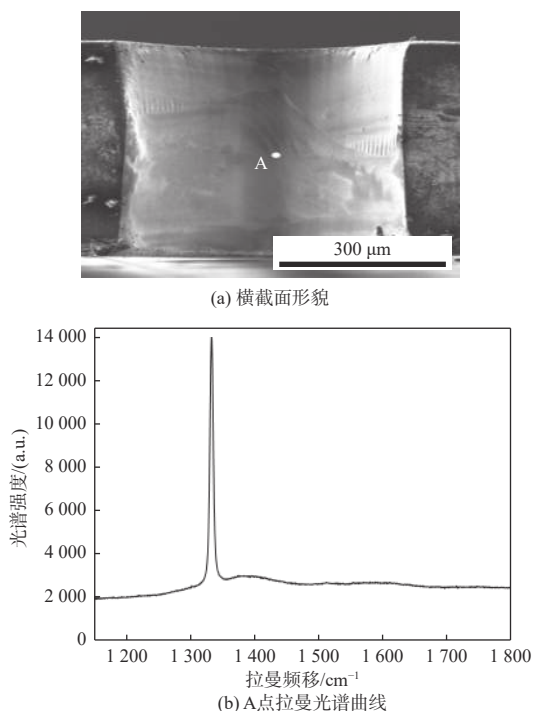


图 10 高重频飞秒激光加工的 CRL 横截面形貌及拉曼光谱测试结果

Fig. 10 Cross section morphology of CRL processed by high repetition rate femtosecond laser and Raman spectrum test results

需要注意的是, 本研究仅是在 1 种加工路径设计及 1 个加工参数组合下开展的大去除量金刚石 CRL 加工探索试验, 验证了高重频飞秒激光高效加工金刚石 CRL 的可行性, 但尚未对加工面的石墨化及缺陷问题进行系统研究。因此, 后续需进一步结合聚焦性能测试结果, 深入开展两方面的工作: 1) 高重频飞秒激光加工的聚焦面, 其石墨化及缺陷对聚焦性能的影响是否在可接受范围内; 2) 系统优化激光加工策略及参数, 以期更高效地获得高品质的金刚石 CRL。

4 结论

面向 XFEL 光束高精度聚焦对紧凑型高性能金刚石 CRL 的实际应用需求, 开展了金刚石 CRL 的结构设计、原材料选择、高效精密加工等 3 个方面的工作, 给出了 CRL 结构设计基本公式和原材料选择基本依据。针对超硬金刚石材料的难加工特性, 提出利用高重频飞秒激光开展高效精密加工。研究结果表明: 在结构设计方面, 相同曲率半径条件下的抛物柱孔型 CRL 比椭圆柱孔型 CRL 具备更大开口直径, 有利于器件的聚焦增益; 在原材料选择方面, 单晶金刚石因焦距较小而更适用于高能段 XFEL 光束实验对紧凑型光路的实际要求; 在高效精密加工方面, 高重频飞秒激光是实现金刚石 CRL 高效精密加工的可选手段, 正-反面复合加工是实现大厚度样件加工的有效方式。因此, 本文实现了 CRL 器件结构设计和高效精密加工的有效贯通, 可为 CRL 研制提供借鉴和参考。

参考文献:

- [1] WHITE W E, ROBERT A, DUNNE M. The linac coherent light source[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2015, 22(3): 472-476.
- [2] ZHAO Z T, WANG D, GU Q, et al. Status of the SXFEL facility[J]. *Applied Sciences*, 2017, 7(6): 607.
- [3] 贾豪彦, 黄森林, 焦毅, 等. 超快X射线自由电子激光研究进展[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34(5): 133-148.
JIA Haoyan, HUANG Senlin, JIAO Yi, et al. Research advances in ultrafast X-ray free-electron lasers[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34(5): 133-148.
- [4] DECKING W, ABEGHYAN S, ABRAMIAN P, et al. A MHz-repetition-rate hard X-ray free-electron laser driven

- by a superconducting linear accelerator[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(6): 391-397.
- [5] SCHOENLEIN R, ELSAESSER T, HOLLDACK K, et al. Recent advances in ultrafast X-ray sources[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A:Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2019, 377(2145): 1-37.
- [6] MINO L, BORFECCHIA E, SEGURA-RUIZ J, et al. Materials characterization by synchrotron X-ray microprobes and nanoprobe[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2018, 90(2): 025007.
- [7] NARIKOVICH A, POLIKARPOV M, BARANNIKOV A, et al. CRL-based ultra-compact transfocator for X-ray focusing and microscopy[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2019, 26(4): 1208-1212.
- [8] ANTIPOV S, BARYSHEV S, BATURIN S, et al. Thermal analysis of the diamond compound refractive lens [C]//Proceedings of the Advances in X-Ray/EUV Optics and Components XI. San Diego: SPIE, 2016: 105-109.
- [9] ROTH T, ALIANELLI L, LENGELER D, et al. Materials for X-ray refractive lenses minimizing wavefront distortions[J]. *MRS Bulletin*, 2017, 42(6): 430-436.
- [10] LYUBOMIRSKIY M, SCHROER C G. Refractive lenses for microscopy and nanoanalysis[J]. *Synchrotron Radiation News*, 2016, 29(4): 21-26.
- [11] LYUBOMIRSKIY M, BOYE P, FELDKAMP J M, et al. Diamond nanofocusing refractive X-ray lenses made by planar etching technology[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2019, 26(5): 1554-1557.
- [12] SNIGIREV A, KOHN V, SNIGIREVA I, et al. A compound refractive lens for focusing high-energy X-rays[J]. *Nature*, 1996, 384(6604): 49-51.
- [13] KONONENKO T V, RALCHENKO V G, ASHKINAZI E E, et al. Fabrication of polycrystalline diamond refractive X-ray lens by femtosecond laser processing[J]. *Applied Physics A*, 2016, 122(3): 1-6.
- [14] 陈根余, 朱智超, 殷赳, 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): 26-33.
- CHEN Genyu, ZHU Zhichao, YIN Jiu, et al. Experiment on ablation threshold of single crystal diamond produced by femtosecond laser processing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(4): 26-33.
- [15] 王华丰, 孙轲, 孙盛芝, 等. 飞秒激光诱导金刚石微纳结构及其应用[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(12): 264-274.
- WANG Huafeng, SUN Ke, SUN Shengzhi, et al. Femtosecond laser induced microstructures in diamond and applications (Invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(12): 264-274.
- [16] 陈俊云, 刘德辉, 张圣康, 等. 单晶金刚石微铣刀的飞秒激光制造研究[J]. *燕山大学学报*, 2022, 46(3): 200-207.
- CHEN Junyun, LIU Dehui, ZHANG Shengkang, et al. Research on micro-milling tools of single crystal diamond by femtosecond laser technique[J]. *Journal of Yan-shan University*, 2022, 46(3): 200-207.
- [17] WANG Y Z, DONG X H, HU J. Feasibility analysis of sapphire compound refractive lenses for advanced X-ray light sources[J]. *Frontiers in Physics*, 2022, 10: 908380.
- [18] FU M L, ZHOU H Q, LE Z C. Planar PMMA X-ray compound refractive lenses with cascaded parabolic microstructures[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A:Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2017, 868: 129-132.
- [19] HUANG C C, MU B Z, WANG Z S. Hard X-ray imaging by a spherical compound refractive lens[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A:Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2009, 602(2): 446-449.
- [20] JIANG L, WANG A D, LI B, et al. Electrons dynamics control by shaping femtosecond laser pulses in micro/nanofabrication: modeling, method, measurement and application[J]. *Light, Science & Applications*, 2018, 7: 17134.
- [21] ALS-NIELSEN J, MCMORROW D. Elements of modern X-ray physics[M]. New York: Wiley, 2001: 102-106.
- [22] SHEN T L, CHEN T, SI J H, et al. Structural changes during femtosecond laser percussion drilling of high-aspect-ratio diamond microholes[J]. *Optical Engineering*, 2022, 61(1): 016103.