

## 高重频飞秒激光高效加工太赫兹滤波器核心结构

何煦 杨昊 马云灿 李军 蒋均 孟立民 叶雁

### Core structure of terahertz filter fabricated by femtosecond laser with high repetition rate

HE Xu, YANG Hao, MA Yuncan, LI Jun, JIANG Jun, MENG Limin, YE Yan

引用本文:

何煦, 杨昊, 马云灿, 等. 高重频飞秒激光高效加工太赫兹滤波器核心结构[J]. 应用光学, 2024, 45(3): 514–521. DOI: 10.5768/JAO202445.0310004

HE Xu, YANG Hao, MA Yuncan, et al. Core structure of terahertz filter fabricated by femtosecond laser with high repetition rate[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(3): 514–521. DOI: 10.5768/JAO202445.0310004

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0310004>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 星载激光雷达滤波器组件热分析及参数优化

Thermal analysis and parameter optimization of spaceborne lidar filter

应用光学. 2017, 38(4): 660–664 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0407001>

#### KDP光学零件超精密车削加工误差的频谱特性与控制

Spectral characteristics and control of machining errors of KDP optical elements in ultra-precision turning

应用光学. 2017, 38(2): 159–164 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0201002>

#### 基于FFP-TF2滤波器的可调谐激光器

Tunable laser based on FFP-TF2 filter

应用光学. 2020, 41(1): 186–193 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0107001>

#### 基于可拉伸材料的动态调谐彩色滤波器

Dynamic tuning color filters based on stretchable materials

应用光学. 2019, 40(6): 1174–1180 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0605006>

#### 高精度太赫兹探测器响应度定标系统

High-precision responsivity calibration system for terahertz detector

应用光学. 2018, 39(5): 691–696 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0503003>

#### 高重复频率锁模光纤激光器及其超连续谱产生

High repetition-rate mode-locked fiber laser and generation of supercontinuum

应用光学. 2018, 39(6): 916–920 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0607001>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 03-0514-08

# 高重频飞秒激光高效加工太赫兹滤波器核心结构

何煦<sup>1</sup>, 杨昊<sup>2,3</sup>, 马云灿<sup>1</sup>, 李军<sup>1</sup>, 蒋均<sup>2,3</sup>, 孟立民<sup>1</sup>, 叶雁<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900; 2. 中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621900;  
3. 中国工程物理研究院 微系统与太赫兹中心, 四川 成都 610299)

**摘要:** 高频太赫兹滤波器的核心结构具备跨尺度、大去除量、高精度等特点, 为实现核心结构高效精密加工, 加工技术的选择尤为重要。与常见的机械加工、光刻工艺、MEMS 等技术相比, 飞秒激光加工技术具有材料普适性强、流程简单、可实现薄壁结构精密加工等优点。以中心频率 850 GHz 的太赫兹滤波器核心结构设计为输入, 利用飞秒激光加工技术开展太赫兹滤波器核心结构的加工实验研究。考虑到低重频飞秒激光不满足高效加工的实际要求, 选择高重频飞秒激光作为加工光源, 在加工策略精准设计和加工参数精准优化的条件下, 实现了高频太赫兹滤波器核心结构的高效精密加工。研究表明, 高重频飞秒激光加工的太赫兹滤波器, 其中心频率测试值与设计值接近。因此, 高重频飞秒激光加工技术成为太赫兹滤波器核心结构加工的可选手段。

**关键词:** 太赫兹滤波器; 核心结构; 飞秒激光; 精密加工; 加工策略

中图分类号: TN206

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0310004

## Core structure of terahertz filter fabricated by femtosecond laser with high repetition rate

HE Xu<sup>1</sup>, YANG Hao<sup>2,3</sup>, MA Yuncan<sup>1</sup>, LI Jun<sup>1</sup>, JIANG Jun<sup>2,3</sup>, MENG Limin<sup>1</sup>, YE Yan<sup>1</sup>

(1. Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China; 2. Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China; 3. Microsystem and Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Chengdu 610200, China)

**Abstract:** The core structure of high-frequency terahertz (THz) filter has the characteristics of cross-scale, large removal and high precision. In order to realize efficient and precise machining of core structure, the choice of machining technology is particularly important. Compared with common machining, lithography and MEMS technology, the femtosecond laser machining technology has the advantages of strong universality of materials, simple machining flow and precision machining of thin-walled structures. The core structure of THz filter with center frequency of 850 GHz was designed as input, and the machining experiment of the core structure of THz filter was carried out by femtosecond laser machining technology. Considering that the femtosecond laser with low repetition rate could not meet the actual requirements of high-efficiency machining, the high-repetition-rate femtosecond laser was selected as the machining light source, and the high-efficiency and precise machining of the core structure of high-frequency THz filter was realized under the conditions of precise design of machining strategy and precise optimization of machining parameters. The results show that the measured center frequency of the THz filter fabricated by high-repetition-rate femtosecond laser is close to the designed value. Therefore, the high-repetition-rate femtosecond laser

收稿日期: 2023-09-25; 修回日期: 2023-11-24

基金项目: 中国工程物理研究院流体物理研究所横向项目 (20-163-02-ZT-004-005-01); 冲击波物理与爆轰物理重点实验室基金 (2021JCJQLB05707)

作者简介: 何煦 (1990—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事飞秒激光加工技术及应用方面的研究。E-mail: hexu0320@163.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方面的研究。E-mail: mayuncan@caep.cn

processing technology can be used as a flexible stage in the processing of the core structure of THz filter.

**Key words:** terahertz filter; core structure; femtosecond laser; precision machining; machining strategy

## 引言

众所周知,太赫兹波(Terahertz, THz)是一种频率介于 0.1 THz~10 THz(对应波长 3 mm~30  $\mu\text{m}$ )的电磁波,因其兼具微波和光波的优点,在通信、成像、探测等方面具有广阔的应用前景<sup>[1-3]</sup>。对于太赫兹波应用而言,高性能太赫兹器件(例如:天线<sup>[4]</sup>、滤波器<sup>[5]</sup>、耦合器<sup>[6]</sup>、混频器<sup>[7]</sup>等)是实现太赫兹信号接收、传输和调制的关键器件。因此,高性能太赫兹器件的研发逐渐成为 THz 技术领域的研究热点<sup>[8]</sup>。随着太赫兹技术的发展,太赫兹源频率不断增加且波长不断减小,太赫兹器件呈现出材料种类多样化和核心结构微尺度化的趋势<sup>[9-11]</sup>,这对加工技术提出了高精度、高效率的要求。因此,选择材料适应性强且工艺流程简单的高精度高效加工技术,对太赫兹器件研发具有重要意义。

飞秒激光具有极短脉冲宽度和极小焦斑尺寸的特点,其峰值功率密度超过自然界任意固体材料的光学损伤阈值,可对任意固体材料进行微区精准去除或改性<sup>[12]</sup>。根据文献报道,飞秒激光加工技术已在厚度为 10  $\mu\text{m}$  的箔片式太赫兹器件(如:滤波器<sup>[13]</sup>、偏振器<sup>[14-15]</sup>等)的研制方面发挥作用。然而,由于加工光源是低重频(kHz)、小功率(几十 mW)钛宝石飞秒激光器,高速扫描时(大于 10 mm/s)会出现加工区域不连续的现象,导致加工质量及效率不能满足实际使用需求,故它仅适用于前述厚度小且去除量小的太赫兹器件加工。近年来,飞秒激光器正朝着高重频、高稳定性的方向发展<sup>[16-17]</sup>,这为大去除量的功能结构的高精度、高效加工提供了可靠的能量源。研究人员已利用高重频飞秒激光实现航空发动机叶片气膜孔<sup>[18]</sup>、印刷电路板通孔<sup>[19]</sup>、微流控芯片<sup>[20]</sup>等去除量较大的功能结构的高效加工。因此,面向高频太赫兹应用场景对大去除量加工的实际需求,在加工策略精准设计和加工参数精细调控的前提下,高重频飞秒激光成为太赫兹器件核心结构的高精度、高效加工的可选技术手段。

本文针对 850 GHz 波导型带通滤波器核心结构的高精度、高效加工需求,开展 4 个方面的工作:首先,根据太赫兹滤波器核心结构设计,分析其他加工技术优缺点,提出使用高重频飞秒激光加工技术实施加工;其次,基于激光加工全参数化

设计思路开展滤波器核心结构加工策略设计及分析;然后,基于高重频飞秒激光加工技术平台,开展滤波器核心结构的加工实验研究;最后,使用矢量网络分析仪测量高重频飞秒激光加工的太赫兹滤波器性能。

## 1 850 GHz 滤波器结构设计

图 1 是中心频率 850 GHz 的波导型太赫兹滤波器结构设计图。该滤波器原材料是金属铝(Al),整体尺寸为 16 mm×20 mm×12 mm,核心结构由 3 个工作在 TE<sub>101</sub> 模式的腔体谐振器组成,其中 R1、R2、R3 分别代表谐振器 1、2、3。具体来说, R1 和 R3 均由 2 个小台阶和 2 个大台阶组成, R2 由 4 个大台阶组成,且核心结构上下及前后对称,如图 1(a)所示。考虑到前述对称结构装配时对准难度较大,故在不影响器件综合性能的前提下将其改进为非对称加盖式设计,如图 1(b)所示。优化后的滤波器核心结构由 1 个沟槽、2 个大台阶、2 个小台阶组成,其中,沟槽尺寸为 16 000  $\mu\text{m}$ ×254  $\mu\text{m}$ ×127  $\mu\text{m}$ ,中心区域对称分布的 2 个大台阶和 2 个小台阶尺寸分别为 30  $\mu\text{m}$ ×123.8  $\mu\text{m}$ ×127  $\mu\text{m}$  和 30  $\mu\text{m}$ ×89.7  $\mu\text{m}$ ×127  $\mu\text{m}$ ,相邻大台阶间距为 215.3  $\mu\text{m}$ ,且相邻大、小台阶间距为 191.5  $\mu\text{m}$ ,如图 1(c)所示。

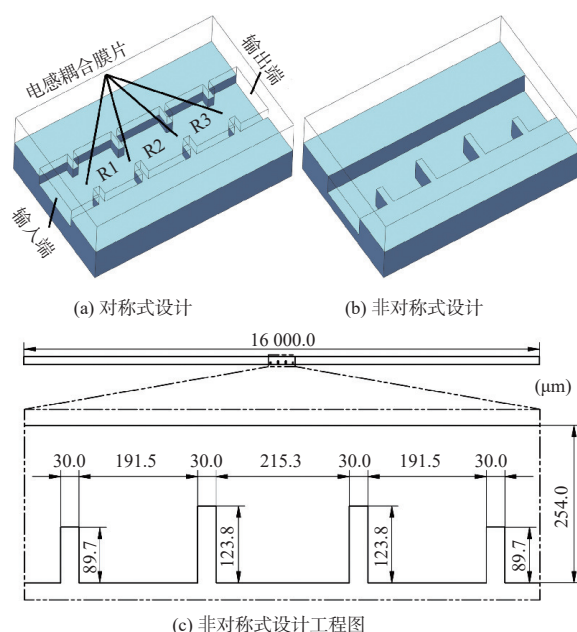


图 1 850 GHz 带通滤波器的结构设计

Fig. 1 Structure design of 850 GHz band-pass filter



根据图 1 可知,太赫兹滤波器核心结构具有跨尺度(特征尺寸  $30\ \mu\text{m}\sim 16\ \text{mm}$ )、去除量大(约  $0.52\ \text{mm}^3$ )、壁厚较薄(沿太赫兹波方向台阶厚度仅为  $30\ \mu\text{m}$ )等特点。从加工技术选择的角度看,机械加工技术属于接触式加工,它适用于滤波器外围结构加工,而不适用于大小台阶这类薄壁结构加工;光刻技术涉及掩模板制备、气相成膜、旋转涂胶、前烘等多个步骤,时间和经济成本较高;MEMS 工艺主要用于硅材料加工,亦不适用于金属 Al 材料。因此,本文研究选择机械加工技术实现太赫兹滤波器外围结构加工,然后利用高重频飞秒激光实现太赫兹滤波器核心结构的高精度、高效加工。

## 2 850 GHz 滤波器的飞秒激光加工方法

### 2.1 飞秒激光精密加工技术平台

图 2 是飞秒激光精密加工技术平台的光路示意图、加工控制软件界面及吹气-除尘模块实物图。加工平台主要由飞秒激光器、电控快门、显微聚焦及成像系统、高精度三维位移台、光束传输元件及光机附件等 5 个部分组成<sup>[21]</sup>,如图 2(a) 所示。飞秒激光器主要参数为:中心波长  $1\ 030\ \text{nm}$ ,脉冲宽度  $400\ \text{fs}$ ,最大单脉冲能量为  $200\ \mu\text{J}$ ,重复频率为  $200\ \text{kHz}$ ,光束直径约为  $5\ \text{mm}$ ;电控快门用于控制飞秒激光束的通与断,最快响应时间为  $20\ \text{ms}$ ;显微聚焦成像系统兼具光束聚焦和加工过程实时监测的双重功能;高精度三维位移台主要参数为:行程  $X\times Y\times Z=100\ \text{mm}\times 100\ \text{mm}\times 50\ \text{mm}$ 、绝对定位精度  $\pm 0.3\ \mu\text{m}$ 、重复定位精度  $\pm 0.03\ \mu\text{m}$ 。为解决飞秒激光加工平台的运动控制和在线监测分属不同软件界面控制而影响效率的共性问题,自主研发了如图 2(b) 所示的集成化飞秒激光精密加工控制软件,实现了电控快门、高精度三维位移台、加工过程监测 CCD 相机等模块的高效协同。该软件不仅具备点(阵列)、直线(阵列)、圆(阵列)、矩形(阵列)等基本功能,而且可根据实际应用需求进行激光扫描路径建模,并编写代码,实现目标形状定制。同时,平台配备如图 2(c) 所示的闭环同轴吹气-除尘功能模块(最大吹气压力  $0.30\ \text{MPa}$ ),可有效缓解材料去除量较大时加工粉尘对激光束形成散射而造成激光能量利用率不高和加工质量较差的问题。

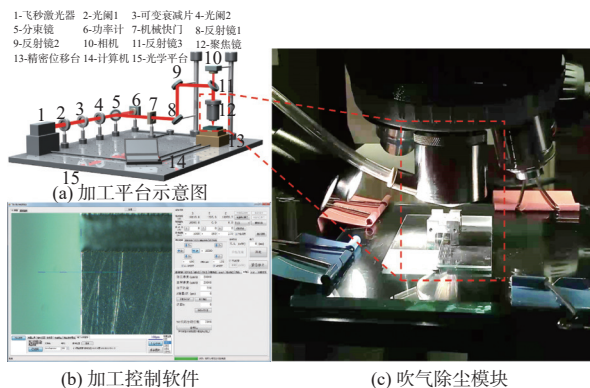


图 2 飞秒激光加工技术平台及吹气-除尘模块

Fig. 2 Femtosecond laser processing technology platform and blowing-dust removal module

### 2.2 太赫兹滤波器核心结构加工策略设计及分析

高重频飞秒激光束对金属 Al 材料进行加工时,由于激光焦斑直径约为  $10\ \mu\text{m}$ ,为获得质量较好的加工底面,扫描路径间距应接近  $5\ \mu\text{m}$  且尽量均匀。加工策略设计过程中,主要使用全参数化设计方法,通过几何约束、尺寸约束、参数化阵列、偏置等方法绘制扫描路径。当需要改变路径数量及间距时,仅需修改对应参数即可实现路径自动更新,进而提高设计效率。基于该方法,分别设计了沿台阶轮廓偏置扫描和沿竖直方向扫描两种加工策略,并在相同的激光加工工艺参数条件下对两种策略的加工效果进行分析比较。

图 3 是沿台阶轮廓偏置的加工策略示意图及加工效果。该策略的设计思路是:首先,沿台阶轮廓逐步向外扩展,直到覆盖大、小台阶之间的间隙,如图 3(a) 红色路径(参见网站图);其次,继续沿红色路径已覆盖区域的轮廓逐步向外扩展,直至覆盖大台阶之间的间隙,如图 3(a) 蓝色路径;然后,对两侧未去除的区域实施加工,如图 3(a) 绿色路径;最后,加工剩余的长方形区域,如图 3(a) 紫色路径。具体来说,对于图 3(a) 所示红色路径,根据大小台阶间隙  $191.5\ \mu\text{m}$ ,两端各减去激光焦斑半径  $5\ \mu\text{m}$ ,则必须在  $181.5\ \mu\text{m}$  宽度内均匀分布偶数条路径方可保持连贯。经过优化,使图 3(a) 中各区域扫描间距(Gap1-1~Gap1-5)接近  $5\ \mu\text{m}$  且尽可能均匀,分别为  $4.91\ \mu\text{m}$ 、 $4.10\ \mu\text{m}$ 、 $4.98\ \mu\text{m}$ 、 $4.87\ \mu\text{m}$ 、 $4.92\ \mu\text{m}$ 。设置激光功率  $P=300\ \text{mW}$ 、扫描速度  $u=5\ \text{mm/s}$ 、Z 方向扫描层数  $N_z=50$ 、Z 轴增量  $\Delta z=2\ \mu\text{m}$  等组合条件,开展飞秒激光加工验证,加工效果如图 3(b) 所示。从图 3(b) 可以看出,由于扫描路径转折较多,纹理走向复杂,且不同区域路径间距差

异相对较大, 导致激光能量累积不均匀, 故加工底面的平整性及均匀性较差。

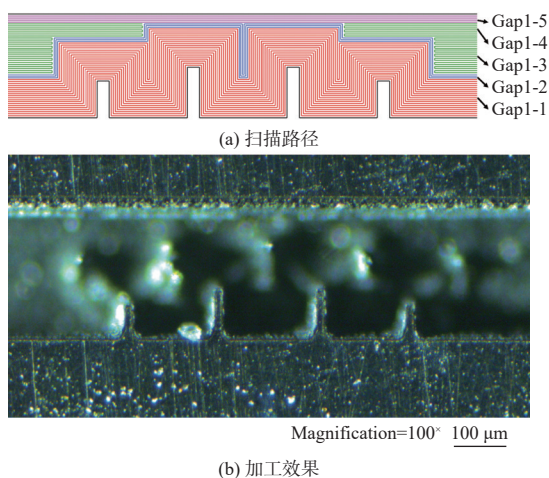


图3 沿台阶轮廓偏置的扫描路径及加工效果

Fig. 3 Machining path and machining effect along step profile scanning

图4是沿竖直方向扫描的加工策略示意图及加工效果。该策略的设计思路是: 扫描路径沿竖直方向以一定间距排列并首尾相接, 最终填满整个待加工区域。实际加工过程中, 由于滤波器核心结构的竖直方向尺寸较小, 位移台沿竖直方向运动时难以达到较高速度。为提高加工效率, 调整为在中心4个台阶区域和远离中心的区域分别使用竖直和水平方向的扫描路径。具体来说, 图4(a)中 Gap2-3、Gap2-4、Gap2-5 对应区域应分别排列偶数条路径, 才能使相邻路径首尾相接并保持连贯。经过优化, 使图4(a)中各区域扫描路径

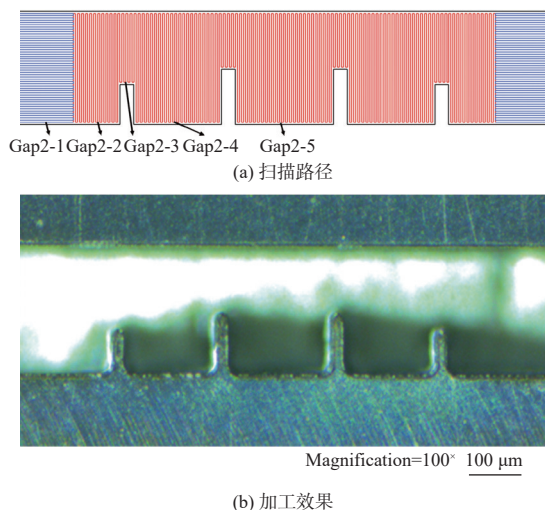


图4 沿竖直方向的扫描路径及加工效果

Fig. 4 Machining path and machining effect along vertical scanning direction

间距 (Gap2-1~Gap2-5) 接近  $5\text{ }\mu\text{m}$  且尽可能均匀, 分别为  $4.36\text{ }\mu\text{m}$ 、 $4.41\text{ }\mu\text{m}$ 、 $4.44\text{ }\mu\text{m}$ 、 $4.43\text{ }\mu\text{m}$ 、 $4.37\text{ }\mu\text{m}$ 。设置激光功率  $P=300\text{ mW}$ 、扫描速度  $u=5\text{ mm/s}$ 、Z方向扫描层数  $N_z=50$ 、Z轴增量  $\Delta z=2\text{ }\mu\text{m}$  等组合条件, 开展飞秒激光加工验证, 加工效果如图4(b)所示。从图4(b)可以看出, 由于扫描路径转折集中在边缘区域, 纹理走向统一, 且不同区域的路径间距差异相对较小, 激光能量累积相对均匀, 故加工底面的平整性及均匀性相对较好。

### 3 实验结果与分析

选择沿竖直方向扫描的加工策略, 在相同吹气压力下研究飞秒激光加工工艺参数 (如: 吹气压力、激光功率、扫描速度、扫描层数、Z轴增量等) 对核心结构深度及形貌的影响规律。为确保每组加工工艺参数组合条件下初始加工点Z轴位置的一致性, 实验中将加工/扫描起始面都选择为聚焦物镜像平面, 即  $Z_0=0$ 。太赫兹滤波器样件加工完毕后, 首先, 我们用酒精和去离子水分别超声清洗 10 mins, 然后利用显微镜及高精度位移台测量核心结构深度并拍摄显微形貌。其中, 深度测量方法是: 调节位移台Z轴, 分别记录表面及底面清晰时对应的Z轴坐标值  $Z_1$  和  $Z_2$ , 二者之差即为核心结构深度  $D$ 。

#### 3.1 吹气压力对核心结构形貌的影响规律

图5是不同吹气压力下的核心结构典型形貌图。飞秒激光加工工艺参数为: 聚焦镜头参数  $N_A=0.25$  (放大倍率为  $10\times$ ), 激光功率  $P=100\text{ mW}$ , 扫描速度  $u=20\text{ mm/s}$ , Z方向扫描层数  $N_z=20$ , Z轴增量  $\Delta z=0$ , 吹气压力  $P_{\text{air}}$  分别为  $0.10\text{ MPa}$ 、 $0.20\text{ MPa}$ 、 $0.30\text{ MPa}$ 。从图5可以看出, 在前述激光工艺参数组合条件下, 当吹气压力增加时, 加工粉尘累积效应明显减弱。飞秒激光加工大去除量核心结构时, 会产生大量加工粉尘, 如不采取有效措施对样品表面进行及时吹扫, 加工粉尘必然对入射激光造成不可控的散射, 一方面使飞秒激光能量不能被有效利用, 另一方面不利于获得较好加工效果。一般情况下, 吹气压力越大, 加工粉尘累积效应越弱, 越容易获得质量较好的加工底面。

#### 3.2 激光功率对核心结构深度及形貌的影响规律

图6是不同激光功率下的核心结构深度变化趋势及典型形貌图。飞秒激光加工工艺参数为: 聚焦镜头参数  $N_A=0.25$  (放大倍率为  $10\times$ ), 吹气压



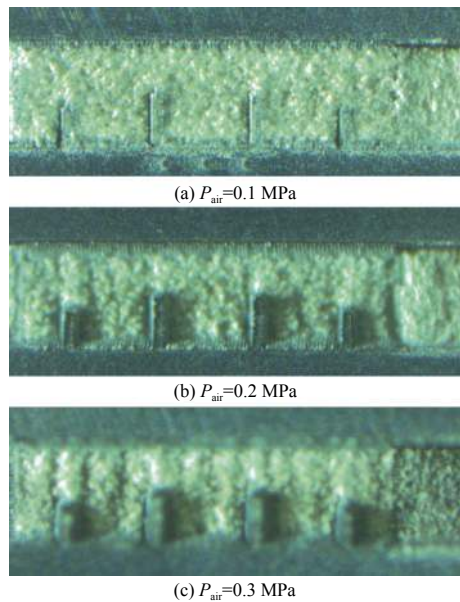


图5 不同吹气压力下的核心结构形貌

Fig. 5 Morphology of core structure under different blowing pressures

力  $P_{\text{air}}=0.30$  MPa, 扫描速度  $u=20$  mm/s, Z 方向扫描层数  $N_z=20$ , Z 轴增量  $\Delta z=0$ , 激光功率  $P$  分别为 100 mW、200 mW、300 mW、400 mW。从图 6 可以看出, 在前述激光工艺参数组合条件下, 核心结构深度随着激光功率增加呈现出逐渐减小趋势, 其原因是: 当激光功率增加时, 金属 Al 材料单位面积上累积的激光能量增加, 加工过程中金属粉尘逐渐增加且有可能产生热重铸现象, 在平台可调节的最大安全吹气压力下亦不能将其及时吹离加工区域, 导致激光能量不能有效沉积材料表面, 进而不利于提高加工效率和增加去除深度。因此, 基于提高加工效率和增加去除深度 2 个方面的考虑, 应选择小功率实施加工。

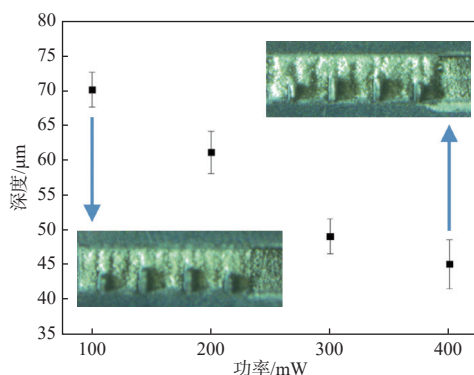


图6 不同激光功率下的核心结构深度及形貌

Fig. 6 Depth and morphology of core structure under different laser powers

### 3.3 扫描速度对核心结构深度及形貌的影响规律

图 7 是不同扫描速度下的核心结构深度变化趋势及典型形貌图。飞秒激光加工工艺参数为: 聚焦镜头参数  $N_A=0.25$  (放大倍率为  $10\times$ ), 吹气压力  $P_{\text{air}}=0.30$  MPa, 激光功率  $P=100$  mW, Z 方向扫描层数  $N_z=20$ , Z 轴增量  $\Delta z=0$ , 扫描速度  $u$  分别为 5 mm/s、10 mm/s、15 mm/s、20 mm/s。从图 7 可以看出, 在前述激光工艺参数组合条件下, 核心结构深度随着扫描速度增加呈现出逐渐增加的趋势, 其原因是: 当扫描速度增加时, 单位面积上累积的激光能量减小, 加工过程中金属粉尘可被及时吹离加工区域, 激光能量可有效沉积至材料表面且热重铸现象减弱, 故核心结构深度增加。因此, 应选择较高的扫描速度, 这不仅能够保证加工效率, 而且可获得质量相对较好的加工底面。

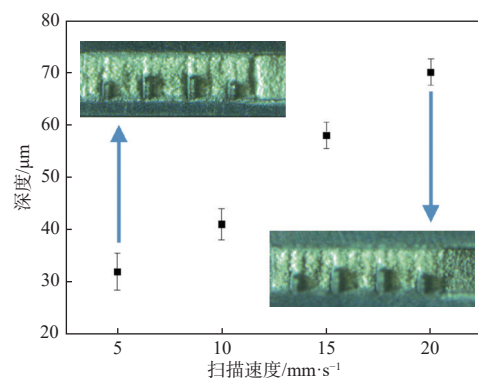


图7 不同扫描速度下的核心结构深度及形貌

Fig. 7 Depth and morphology of core structure at different scanning rates

### 3.4 扫描层数对核心结构深度及形貌的影响规律

图 8 是不同扫描层数下的核心结构深度变化趋势及典型形貌图。飞秒激光加工工艺参数为: 聚焦镜头参数  $N_A=0.25$  (放大倍率为  $10\times$ ), 吹气压力  $P_{\text{air}}=0.30$  MPa, 激光功率  $P=100$  mW, 扫描速度  $u=20$  mm/s, Z 轴增量  $\Delta z=0$ , Z 方向扫描层数  $N_z$  分别为 20、40、60、80。从图 8 可以看出, 在前述激光工艺参数组合条件下, 核心结构深度随着扫描层数的增加呈现出以下趋势: 1) 扫描层数  $N_z < 60$  时, 深度逐渐增加; 2) 当  $N_z=60$  时, 深度约为 125 μm, 接近目标结构深度; 3) 扫描层数  $N_z > 60$  时, 核心结构深度趋于饱和且沟槽底面逐渐呈现出平坦化效果。因此, 基于提高加工效率、达到目标深度、优化底面质量等 3 个方面的考虑, 应选择扫描层数  $N_z > 60$  进行加工。

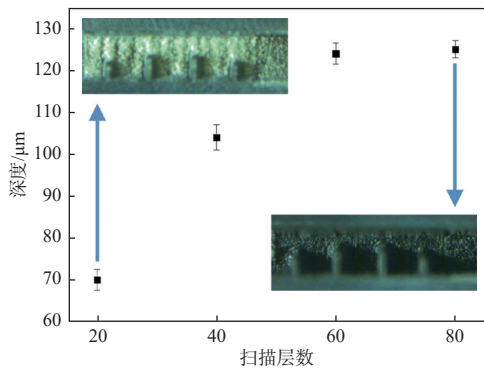


图 8 不同扫描层数下的核心结构深度及形貌  
Fig. 8 Depth and morphology of core structure under different scanning layers

3.5 Z轴增量对核心结构深度及形貌的影响规律

图 9 是不同 Z 轴增量下的核心结构深度变化趋势及典型形貌图。飞秒激光加工工艺参数为：聚焦镜头参数  $N_A=0.25$  (放大倍率为  $10\times$ )，吹气压力  $P_{\text{air}}=0.30\text{ MPa}$ ，激光功率  $P=100\text{ mW}$ ，扫描速度  $u=20\text{ mm/s}$ ，Z 方向扫描层数  $N_z=20$ ，Z 轴增量  $\Delta z$  分别为  $0, 2\text{ }\mu\text{m}, 4\text{ }\mu\text{m}, 6\text{ }\mu\text{m}$ 。从图 9 可以看出，在所述激光工艺参数组合条件下，核心结构深度和形貌随着 Z 轴增量的增加呈现出以下趋势：1) 加工深度增加不明显，仅由  $70\text{ }\mu\text{m}$  增加至  $90\text{ }\mu\text{m}$ ；2) Z 轴不同增量均有加工粉尘累积，由于离焦量随着 Z 轴增量及扫描层数的增加而增加，离焦量较大时单位面积累积的激光能量不足以将加工粉尘剥离样品表面，同时又存在较为严重的散射现象，导致沟槽底面的加工质量下降。因此，应选择较小的 Z 轴增量进行加工。

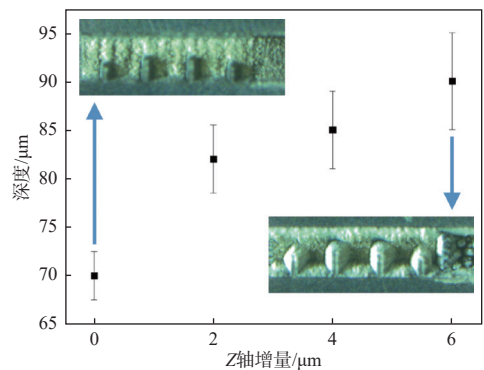


图 9 不同 Z 轴增量下的核心结构深度及形貌  
Fig. 9 Depth and morphology of core structure under different Z-axis increments

3.6 参数优化后太赫兹滤波器核心结构加工效果

根据前述各参数对核心结构深度及形貌的影响规律，确定聚焦物镜参数  $N_A=0.25$  (放大倍率为

$10\times$ )、吹气压力  $P_{\text{air}}=0.30\text{ MPa}$ ，激光功率  $P=100\text{ mW}$ 、扫描速度  $u=20\text{ mm/s}$ 、Z 方向扫描层数  $N_z=200$ 、Z 轴增量  $\Delta z=0$  等组合条件下实施工艺，利用光学显微镜和光谱共聚焦位移传感器分别测量了核心结构光学显微形貌及轮廓，结果如图 10 所示。从图 10 可以看出：1) 高重频飞秒激光加工的太赫兹滤波器核心结构尺寸满足设计要求，具体统计结果如表 1 所示；2) 图 10(b) 中标记的两条线 line1 (大小台阶) 和 line2 (沟槽) 的深度及轮廓，分别如图 10(c) 和图 10(d) 所示，据此计算得出沟槽和大小台阶的锥度分别约为  $10^\circ$  和  $7^\circ$ 。另外，根据加工控制软件的时间统计结果可知，整个核心结构的加工时间约为  $3\text{ h}$ 。

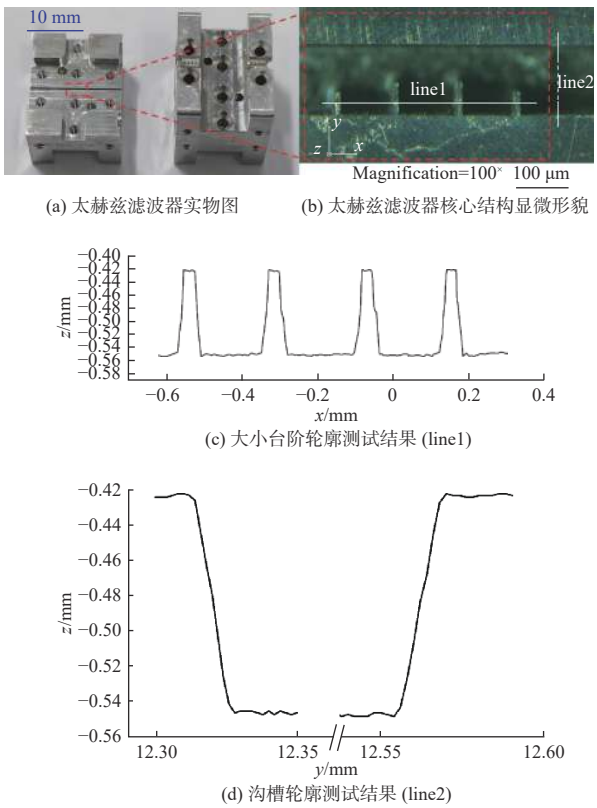


图 10 飞秒激光加工的太赫兹滤波器核心结构  
Fig. 10 Core structure of terahertz filter processed by femtosecond laser

表 1 太赫兹滤波器核心结构设计值与测量值对比  
Table 1 Comparison of design values and measured values of THz filter core structure

结构名称	尺寸名称	设计值	测量值
沟槽	长/宽/深	16 000/254/127	16 000/255/125
大台阶	长/宽/深	123.8/30/127	125/31/125
小台阶	长/宽/深	89.7/30/127	90/31/125
间隙	大台阶	215.3	216
	大小台阶	191.5	192

### 3.7 太赫兹滤波器的性能测试

太赫兹滤波器的性能主要由插入损耗( $S_{21}$ )表征,基于设计尺寸建模的滤波器性能仿真结果如图 11 中虚线所示。根据有限元仿真结果,太赫兹滤波器的设计带宽为 40 GHz(中心频率 850 GHz),通带损耗为 2.2 dB,带外抑制优于 15 dB。基于中国思仪矢量网络分析仪与 750-1100 GHz 扩展件,测量了高重频飞秒激光加工的太赫兹滤波器在 WR-1 频段内的传输性能,测试结果如图 11 中实线所示。实际测试中,高重频飞秒激光加工的太赫兹滤波器,其中心频率为 860 GHz,工作带宽大于 40 GHz,通带损耗约为 6 dB,带外抑制(中心频率 1 倍带宽外回波损耗)优于 15 dB。实测结果与仿真结果相比,带宽的差距可能主要来自于设计尺寸与实际加工尺寸的误差(如:沟槽深度、台阶锥度等),额外的 3.8 dB 插入损耗则可能主要来自于滤波器结构件粗糙的表面工艺导致的分型面的间隙,以及测试端口与波导端口的间隙。

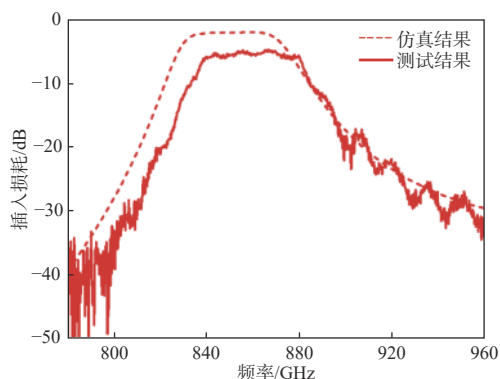


图 11 太赫兹滤波器性能测试结果与仿真结果对比

Fig. 11 Comparison of measured results and simulated results of THz filter performance

## 4 结论

针对 850 GHz 滤波器核心结构的高精度、高效加工需求,设计了沿竖直方向扫描的加工策略,利用高重频飞秒激光开展了不同条件下的加工实验,分析了激光加工工艺参数对核心结构深度及形貌的影响规律,最终确定了最优加工参数组合。研究结果表明:1) 高重频飞秒激光加工金属 Al 材料时,加工粉尘能否被及时吹离加工区域,对加工质量的影响不可忽略,故应选择“小功率+高速度+多次扫描”的组合条件;2) 高重频飞秒激光加工的太赫兹滤波器,其性能曲线与理论计算曲

线的变化趋势和中心频率接近,且加工总用时相对较短。因此,高重频飞秒激光加工技术是太赫兹滤波器核心结构高精度、高效率加工的有效方法,但在底面粗糙度和侧面锥度方面尚存在不足,后续研究中应针对该问题进行优化,以提升太赫兹滤波器件的性能指标。

### 参考文献:

- [1] 刘盛纲, 钟任斌. 太赫兹科学技术及其应用的新发展[J]. 电子科技大学学报, 2009, 38(5): 481-486.  
LIU Shenggang, ZHONG Renbin. Recent development of terahertz science and technology and its applications[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2009, 38(5): 481-486.
- [2] 郑新, 刘超. 太赫兹技术的发展及在雷达和通讯系统中的应用(I), (II)[J]. 微波学报, 2010, 26(6): 1-6; 2011, 27(1): 1-5.  
ZHENG Xin, LIU Chao. Recent development of Thz technology and its application in radar and communication system (I), (II)[J]. Journal of Microwaves, 2010, 26(6): 1-6; 2011, 27(1): 1-5.
- [3] DENG X, YANG H, WU Q, et al. Phase noise effects on the performance of high-order digital modulation terahertz communication system[J]. Chinese Journal of Electronics, 2022, 31(3): 589-594.
- [4] 郝万明, 尤晓蓓, 孙钢灿, 等. 超宽带太赫兹通信中天线结构设计及其波束色散影响分析[J]. 电子与信息学报, 2023, 45(1): 200-207.  
HAO Wanming, YOU Xiaobei, SUN Gangcan, et al. Design of antenna structure and analysis of beam split effect in ultra-band width terahertz communications[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2023, 45(1): 200-207.
- [5] YANG H, DHAYALAN Y, SHANG X, et al. WR-3 waveguide bandpass filters fabricated using high precision CNC machining and SU-8 photoresist technology[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2017, 8(1): 100-107.
- [6] 孙玉洁, 段俊萍, 王雄师, 等. 多孔耦合型太赫兹波定向耦合器的设计[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(1): 263-269.  
SUN Yujie, DUAN Junping, WANG Xiongshi, et al. Design of multi-hole terahertz waveguide directional couplers[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017,



- 46(1): 263-269.
- [7] 周健, 尤立星, 彭伟, 等. 太赫兹混频器技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(18): 139-155.  
ZHOU Jian, YOU Lixing, PENG Wei, et al. Research progress of terahertz mixer technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(18): 139-155.
- [8] 常少杰, 吴振华, 黄杰, 等. 真空电子太赫兹器件研究进展[J]. 红外与毫米波学报, 2022, 41(1): 85-102.  
CHANG Shaojie, WU Zhenhua, HUANG Jie, et al. The research progress of vacuum electron device in terahertz band[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2022, 41(1): 85-102.
- [9] SHI Z, ZHANG H, KHAN K, et al. Two-dimensional materials toward terahertz optoelectronic device applications[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews, 2022, 51: 100473.
- [10] KUMAR A, GUPTA M, PITCHAPPA P, et al. Active ultrahigh-Q ( $0.2 \times 10^6$ ) THz topological cavities on a chip[J]. Advanced Materials, 2022, 34(27): 2202370.
- [11] ZHOU Q, QIU Q, HUANG Z. Graphene-based terahertz optoelectronics[J]. Optics & Laser Technology, 2023, 157: 108558.
- [12] JIANG L, WANG A D, LI B, et al. Electrons dynamics control by shaping femtosecond laser pulses in micro/nano fabrication: modeling, method, measurement and application[J]. Light: Science & Applications, 2018, 7(2): 17134.
- [13] 高炳攀, 林炎章, 陈盈, 等. 飞秒激光微加工制备无衬底太赫兹带通滤波器[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(2): 360-365.  
GAO Bingpan, LIN Yanzhang, CHEN Ying, et al. Substrateless terahertz band-pass filters fabricated by femtosecond laser micro-machining[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(2): 360-365.
- [14] 陈燕青, 高炳攀, 林炎章, 等. 飞秒激光微加工制备金属线栅太赫兹偏振片[J]. 中国激光, 2018, 45(8): 93-98.  
CHEN Yanqing, GAO Bingpan, LIN Yanzhang, et al. Metal wire grid terahertz polarizer fabricated by femtosecond laser micro-machining[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(8): 93-98.
- [15] 陈盈, 王杰, 高焘, 等. 飞秒激光微加工制备大尺寸无衬底太赫兹线栅偏振器[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(11): 300-304.  
CHEN Ying, WANG Jie, GAO Tao, et al. Fabrication of large-scale free-standing terahertz wire grid polarizer by femtosecond laser micro-machining[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(11): 300-304.
- [16] “我国激光技术与应用2035发展战略研究”项目综合组. 我国激光技术与应用2035发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2020, 22(3): 1-6.  
Research group of strategic research on China's laser technology and its application by 2035. Strategic research on china's laser technology and its application by 2035[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(3): 1-6.
- [17] 刘军, 曾志男, 梁晓燕, 等. 超快超强激光及其科学应用发展趋势研究[J]. 中国工程科学, 2020, 22(3): 42-48.  
LIU Jun, ZENG Zhinan, LIANG Xiaoyan, et al. Development trend of ultrafast and ultraintense lasers and their scientific application[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(3): 42-48.
- [18] 杨泽南, 许俊杰, 赵婉蓉, 等. 基于锥束CT的飞秒激光加工气膜孔几何特征测量及表征[J]. 航空动力学报, 2023, 38(5): 1198-1209.  
YANG Zenan, XU Junjie, ZHAO Wanrong, et al. Measurement and characterization of geometric features of femtosecond laser of filmhole based on cone beam CT[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(5): 1198-1209.
- [19] 郭敏超, 王明娣, 张胜江, 等. FR-4覆铜板飞秒激光微孔加工工艺研究[J]. 中国激光, 2020, 47(12): 135-143.  
GUO Minchao, WANG Mingdi, ZHANG Shengjiang, et al. Techniques for femtosecond laser processing of micro-holes in FR-4 copper clad laminate[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(12): 135-143.
- [20] 刘方祥, 孙树峰, 王德祥, 等. 飞秒激光直写PMMA制备微流道的工艺技术研究[J]. 应用光学, 2018, 39(3): 442-446.  
LIU Fangxiang, SUN Shufeng, WANG Dexiang, et al. Research on technology with femtosecond laser direct-writing on PMMA microchannels[J]. Journal of Applied Optics, 2018, 39(3): 442-446.
- [21] 何煦, 马云灿, 李军, 等. 非平整表面飞秒激光加工方法及应用[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(17): 301-310.  
HE Xu, MA Yuncan, LI Jun, et al. Method and application of femtosecond laser processing on non-flat surfaces[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(17): 301-310.