

引用格式: CHEN Tianqi, YANG Jian, JIA Tianqing. A Study on Ablation Quality of Silicon by Femtosecond Laser Pulse Trains[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(6):0650112

陈天琦,杨坚,贾天卿. 飞秒激光脉冲序列烧蚀硅的孔型质量研究[J]. 光子学报, 2021, 50(6):0650112

飞秒激光脉冲序列烧蚀硅的孔型质量研究

陈天琦, 杨坚, 贾天卿

(华东师范大学 精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200241)

摘要: 为了改善高能流密度飞秒激光的烧蚀质量, 使用法布里珀罗腔产生子脉冲间隔在 1~3 500 ps 内连续可调的飞秒激光脉冲序列, 系统探究了单个飞秒高斯脉冲与不同脉冲间隔的脉冲序列在硅上烧蚀的孔型质量。实验结果显示, 子脉冲间隔在 50~100 ps 范围内时, 孔边缘的冠状重熔物大大减少, 其厚度仅为单个飞秒高斯脉冲的 40%, 周围基底几乎没有粘连的粉尘或热损伤痕迹, 孔型品质因子数值从单个飞秒脉冲的 0.52 提升至 0.89。本文报道的飞秒激光脉冲序列, 基于后续子脉冲与喷出物的二次烧蚀原理, 子脉冲间隔在 50~100 ps 范围内时, 后续子脉冲能够最大程度的雾化喷出物, 从而减少冠状重熔物与高温粉尘污染损伤, 烧蚀质量得到改善。

关键词: 飞秒激光; 高能流密度; 脉冲序列; 法布里珀罗腔; 硅; 激光烧蚀; 加工质量; 重熔; 粉尘

中图分类号: TN439

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20215006.0650112

A Study on Ablation Quality of Silicon by Femtosecond Laser Pulse Trains

CHEN Tianqi, YANG Jian, JIA Tianqing

(State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: In order to improve the ablation quality of high fluence femtosecond laser, a Fabry-Perot cavity was used to generate femtosecond laser pulse trains whose pulse interval can be tuned continuously from 1 to 3 500 ps, and the ablation quality of silicon by single femtosecond pulses and pulse trains with different pulse intervals were systematically investigated. According to the experiment results, pulse trains with intervals around 50~100 ps achieved the most ideal ablation crater. The coronal redeposition materials at the edge of the crater were greatly reduced and the thickness reduced to 40% of that of single femtosecond pulses. In the meanwhile, there is almost no adhered dust or thermal damage on the surrounding substrate, and the quality factor increased from 0.52 to 0.89. The femtosecond laser pulse trains reported in this paper, on account of the interaction of subsequent pulses and ejected material, when the pulse interval is in the range of 50~100 ps, the subsequent pulses of which can fully atomize the ejected material, thus reduce the coronal redeposition materials and contamination and damage of high-temperature dust and improve the ablation quality.

Key words: Femtosecond laser; High energy density; Pulse train; Fabry-Perot cavity; Silicon; Laser ablation; Ablation quality; Redeposition; Dust

OCIS Codes: 140.7090; 140.3390; 320.5550; 160.6000; 240.6700

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 12074123, 11804227, 91950112), 上海市科学技术委员会(No. 19ZR1414500), 强场激光物理国家重点实验室开放基金(中国科学院上海光学精密机械研究所)

第一作者: 陈天琦(1996—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为飞秒激光微纳加工。Email: chentianqi0575@foxmail.com

通讯作者: 贾天卿(1969—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为飞秒激光与微纳结构相互作用。Email: tqjia@phy.ecnu.edu.cn;

杨坚(1993—), 男, 博士后研究员, 博士, 主要研究方向为激光与微纳结构相互作用。Email: jyang@lps.ecnu.edu.cn

收稿日期: 2021-03-23; 录用日期: 2021-05-04

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

1987年,SRINIVASAN R等^[1]和KUPER S等^[2]首次使用飞秒激光对物质进行烧蚀。飞秒激光作用在物质上的时间尺度小于物质中能量扩散的特征时间,因此它能够非常迅速地完成任务沉积和材料喷发,避免过多热量损伤剩余体材,提高加工的精度和质量。与纳秒和皮秒激光相比,飞秒激光产生的烧蚀孔洞质量更好、表面更干净、孔壁更光滑、边缘更锋利^[3]。因此,飞秒激光被广泛用于各种材料的微加工,如金属^[4-5]、半导体^[6-7]、玻璃^[8-9]、生物医学材料^[10]和复合材料^[11]等,在器件制备、材料合成、表面处理和生物医疗等方面具有重要的应用^[12-14]。

在较低能流密度下,飞秒激光由于非热熔的“冷加工”烧蚀机制,在加工质量上相比于长脉冲激光具有显著优势^[3],但相应的低加工效率无法满足工业要求。而在高能流密度下,虽然能一定程度上提升加工效率,但同时导致烧蚀质量下降^[15]。高能流密度下,飞秒激光出现热熔烧蚀机制,由于注入大量的激光能量,在激光辐照区域残余大量热量,材料烧蚀以高温熔融液滴和汽液混合物的形式喷射^[16]。1996年,MOMMA C等使用高能量飞秒激光在不锈钢上所加工的孔边缘出现类似纳秒激光烧蚀的冠状重熔物,MOMMA C等指出飞秒激光在高能量下并没有明显优势^[15]。根据相关文献报道,飞秒激光在不同材料上随能流密度升高均存在两种烧蚀机制,即较低能流密度下的弱烧蚀以及较高能流密度的强烧蚀^[17-24],在强烧蚀情况下,往往伴随边缘冠状重熔物增多^[18-22]、烧蚀溅射的高温熔渣增多^[17]等破坏烧蚀质量的现象,烧蚀质量无法达到工业应用的要求。

硅由于储量丰富、容易提纯、性质稳定等优点是最重要的半导体材料,硅片是集成电路制造的重要载体,从半导体器件产值来看,全球99%以上的集成电路和90%以上的半导体器件均采用硅作为半导体材料。工业上对硅的加工要求越来越高,然而高能量飞秒激光加工所带来的重熔层、高温熔渣等异物会对器件造成不良影响,如重熔层的物理化学性质发生变化,影响器件性能与寿命,高温熔渣则会掉落并粘连在硅片表面,对硅片造成污染、损伤^[25-28]。如何克服高能量飞秒激光加工质量上的限制,是亟待解决的问题。

随着研究的深入,研究者们发现提高飞秒激光重复频率(或减小脉冲之间的时间间隔)是一种有效的方式^[29-33]。在前一个脉冲还没有作用完全时后续脉冲到达,激光与液相喷出物相互作用,对喷出颗粒进行二次烧蚀达到减小喷出物颗粒尺寸的效果^[34-38]。本文使用法布里珀罗腔产生脉冲间隔在1~3 500 ps内连续可调的飞秒激光脉冲序列,通过改变子脉冲之间的时间间隔控制烧蚀的过程,在硅上的实验结果显示子脉冲间隔在50~100 ps范围内,孔边缘的冠状重熔物大大减少,且周围基底几乎没有热损伤痕迹。在合适的子脉冲间隔下,飞秒激光脉冲序列能够对喷出物进行充分的二次烧蚀与雾化,显著改善高能流密度飞秒激光的孔型缺陷。

1 实验设计

实验装置由三个部分组成,如图1所示。第一部分为光源输入部分,包含激光器、圆形渐变中性滤光片、偏振分束立方和四分之一波片。激光器(PHAROS, Light Conversion)的出射脉冲中心波长为1 030 nm,脉宽为169 fs,重复频率设为1 kHz。圆形渐变中性滤光片可对激光功率进行连续调节。偏振分束立方与四分之一波片构成光隔离器,用于防止反射光返回激光器造成可能的损伤,输出圆偏振光。第二部分为法布里珀罗(Fabry-Perot, FP)腔,由一对平行的零锥度分束片(GCC-4111,大恒光电)组成,激光脉冲的部分能量在FP腔内来回反射,在第二个分束片后输出能量递减的脉冲序列,脉冲序列的子脉冲时间间隔可灵活调节。第三部分为样品加工和同轴监测部分,激光经过十倍物镜(NA=0.25, Nikon)会聚于样品表面。样品固定在三维电控平移台(XYZM148H-150D,上海联谊)上。与此同时,另一同轴白光光源、分束镜和CCD构成实时成像系统,可对加工过程进行同步监测和校正。

与4f飞秒脉冲整形技术^[39]、类迈克尔逊干涉仪^[40]和双折射晶体阵列^[41]等产生脉冲序列的方法相比,FP腔原理简单,最重要的是它能够灵活调节子脉冲间隔。FP腔生成脉冲序列的原理如图2(a)所示。一对互相平行且与光路垂直的零锥度分束片构成FP腔,分束片的镀膜面相对放置。激光脉冲入射到分束片时会以确定的比例分为两个脉冲,其中一个被反射,另一个则发生透射。入射激光照射第一个分束片(反射率 $R_1=94.3\%$)时的透射部分将进入FP腔,遇到第二个分束片(反射率 $R_2=78.5\%$)再次发生分光,其透射部分形成

脉冲序列中的第一个子脉冲 SP-1(Sub-Pulse, SP),反射部分回到第一个分束片再次分光,如此往复不断地输出子脉冲。每发生一次分光,脉冲能量就会衰减一次,最终输出的子脉冲光强序列为依次递减的等比数列,脉冲序列的衰减系数为 $R_1 \times R_2 = 74.0\%$ 。子脉冲的时间间隔即为脉冲在 FP 腔中来回反射一次的时间,可通过控制分束片间距连续调节。使用一维电控平移台(XMF198-500S,上海联谊)控制分束片距离,平移台行程为 530 mm,子脉冲时间间隔可调范围为 $\Delta t = 1 \sim 3\ 500$ ps。本文将以该时间间隔代称不同的脉冲序列,例如 1 ps 指代子脉冲间隔为 1 ps 的脉冲序列,其能量时域分布如图 2(b)所示。

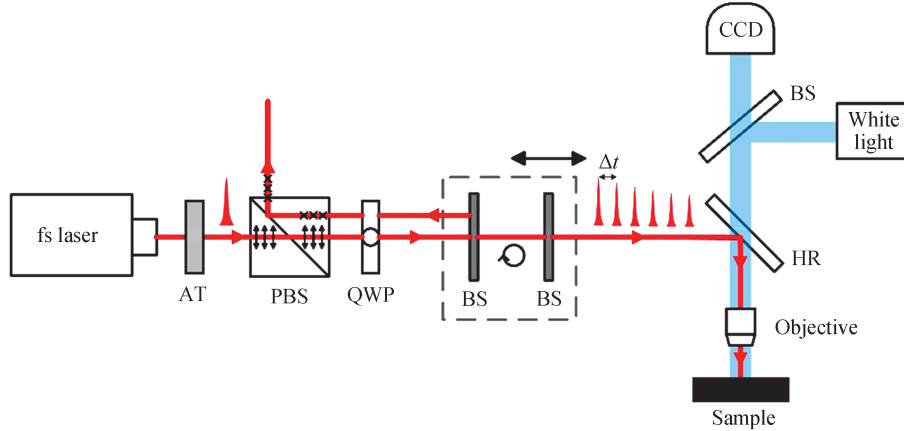


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

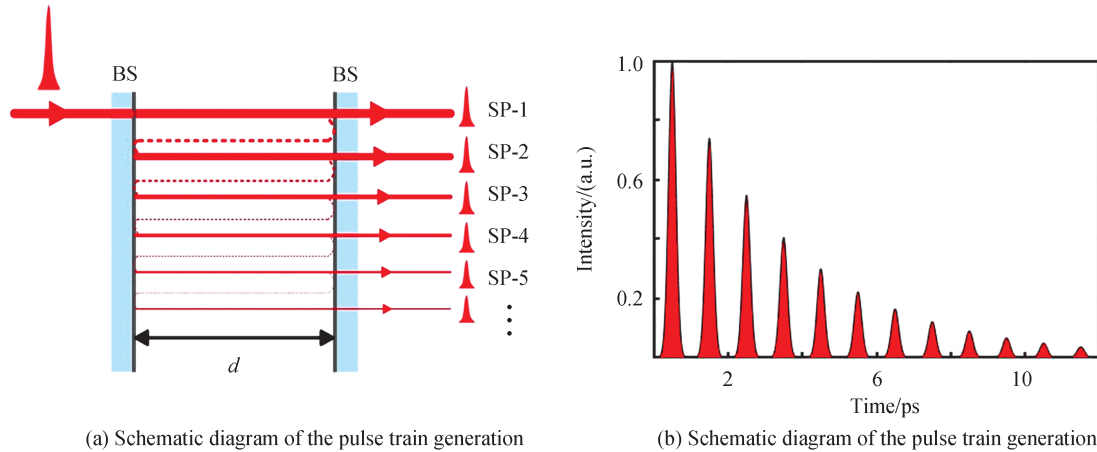


图 2 FP 腔生成脉冲序列

Fig. 2 Generation of the pulse train by the FP cavity

实验样品为厚度 0.5 mm 的单晶硅(表面晶向 $\langle 100 \rangle$,合肥科晶),加工方式为冲击打点。原始激光脉冲的重复频率为 1 kHz,对应于脉冲序列间的时间间隔 1 ms,该时间尺度下硅中物理过程均已弛豫完成,可以确保脉冲序列之间没有任何直接的相互作用。在同一点位作用多个脉冲序列,脉冲序列的个数 N 可由激光器的 pulse pick 功能设置。样品加工完成后,清洗方式为 5% 的氢氟酸水浴超声 1 h,接着用去离子水超声清洗 15 min。高分辨的烧蚀坑表面形貌图像由扫描电子显微镜(S-4800, HITACHI)拍摄,孔周围的重熔物高度由共聚焦扫描显微镜(Smartproof 5, ZEISS)测量。

2 实验结果

实验所使用飞秒激光经过 FP 腔整形成脉冲序列,测得激光经过物镜后的功率为 18.2 mW,换算得到一个脉冲序列的总能量约 18.2 μJ ,即约 18.2 μJ 的激光能量到达样品表面。焦斑半径(1/e)按照外推法^[42]推算得到,约 1.15 μm ,进一步计算得到实验所使用激光能流密度为 435 J/cm^2 。此外,推算得到较低能流密度下

的非热熔烧蚀阈值约为 0.34 J/cm^2 , 热熔烧蚀阈值约为 1.34 J/cm^2 , 与文献报道结果相符^[18,21]。在实验中, 为对比不同激光模式下的烧蚀效果, 控制单飞秒脉冲以及各脉冲序列总能量一致, 为 $18.2 \mu\text{J}$, 参考能流密度为 435 J/cm^2 。

图3是六种激光模式下, 不同脉冲序列个数的烧蚀坑表面SEM图像。图中从左到右依次为单飞秒脉冲和时间间隔 $\Delta t=5, 50, 100, 300$ 和 2000 ps 的脉冲序列, 从上到下脉冲序列个数依次为 $N=5, 10, 15, 20$ 。

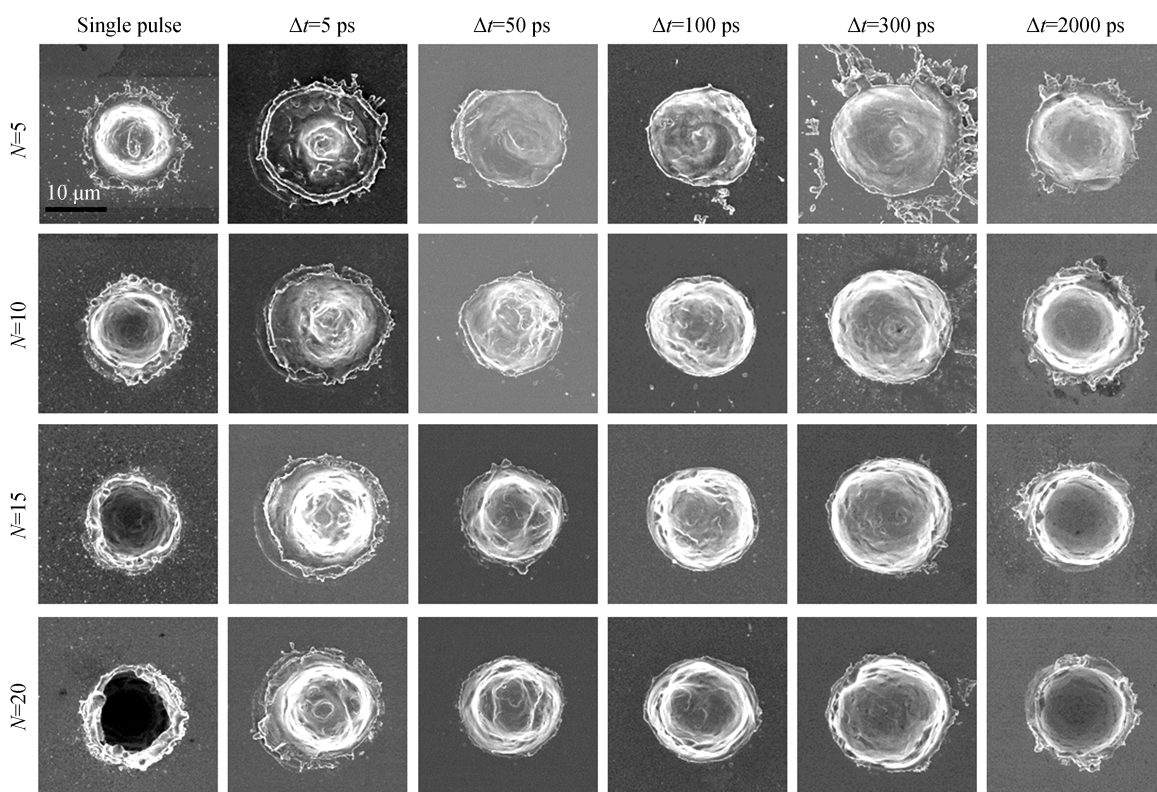


图3 各激光模式下不同脉冲序列个数的烧蚀坑SEM图

Fig. 3 SEM images of the ablation craters under different laser modes and pulse train numbers

可以看到, 单飞秒脉冲激光在烧蚀坑边缘出现明显的喷出物再沉积现象, 烧蚀孔形貌与文献报道相似, 喷出物在边缘沉积并凝固, 形成凸起于基底的冠状重熔物, 孔的圆度和平整度降低, 并且随着脉冲数增多, 沉积材料逐渐变多, 甚至出现堵孔现象。对于时间间隔 $\Delta t=5 \text{ ps}$ 的脉冲序列, 与单脉冲不同, 烧蚀坑出现了环状涟漪。由于脉冲序列中存在多个脉冲, 后续脉冲作用在先前脉冲加热熔化的液态硅上, 导致其产生溅射, 凝固后形成涟漪状重熔物质。此外, 烧蚀坑周围还存在较大的无法清洗去除的热损伤区。对于 $\Delta t=50 \text{ ps}$ 和 100 ps 的脉冲序列, 孔圆度很好, 边缘干净清晰, 周围无热损伤痕迹, 仅出现少量的再沉积物质, 而且沉积量随脉冲序列个数增长始终很少。对于 $\Delta t=300 \text{ ps}$ 的脉冲序列, 其演化过程与 $\Delta t=100 \text{ ps}$ 大致相同, 但在脉冲序列个数 $N=20$ 时, 孔边缘再沉积物质开始变多。而 $\Delta t=2000 \text{ ps}$ 时, 孔边缘再沉积物质进一步增加。

如图3所展示的烧蚀坑表面形貌对于不同激光模式有显著差异。为了进一步探究子脉冲间隔对烧蚀效果的影响, 定量分析了再沉积物质厚度和沉积范围随子脉冲间隔的变化。基于共聚焦扫描显微镜所得到的三维形貌数据, 定义再沉积物的厚度为沉积物凸起于基底面部分的高度, 如图4(a)所示。图4(b)为 $N=20$ 时再沉积物的厚度随子脉冲间隔的变化, 红色虚线表示单个飞秒脉冲激光的相应值。可以看到, 随着子脉冲间隔增大, 再沉积物质的厚度总体呈先减小后增大的趋势, 在 $50\sim 100 \text{ ps}$ 左右达到最小值, 约为单个飞秒脉冲激光的 40% , 表明在 $50\sim 100 \text{ ps}$ 间隔范围内的脉冲序列烧蚀孔的平整性最好。

另一方面, 定义表面品质因子为烧蚀孔面积与包括再沉积或热损伤区域的总面积的比值, 来定量表征喷出物再沉积或热损伤区的范围变化, 如图5(a)所示。再沉积物质或热损失区域范围越大, 品质因子数值越小, 表示烧蚀孔质量越差; 而品质因子的值越接近1表示烧蚀孔质量越好。图5(b)为 $N=20$ 时表面品质因

子随脉冲间隔的变化图,红色虚线表示单个飞秒脉冲激光的对应值,可以看到,随子脉冲间隔增大,品质因子整体趋势是先增大后减小。对于时间间隔 $\Delta t=5$ ps的脉冲序列,由于其边缘存在较大的热损伤区,其品质因子相比较单个飞秒脉冲激光较小;而 $\Delta t=100$ ps的脉冲序列边缘几乎没有热损伤或者再沉积物质,其品质因子的数值非常接近于1;随着子脉冲间隔进一步增大,再沉积物质逐渐增多,孔型质量变差。

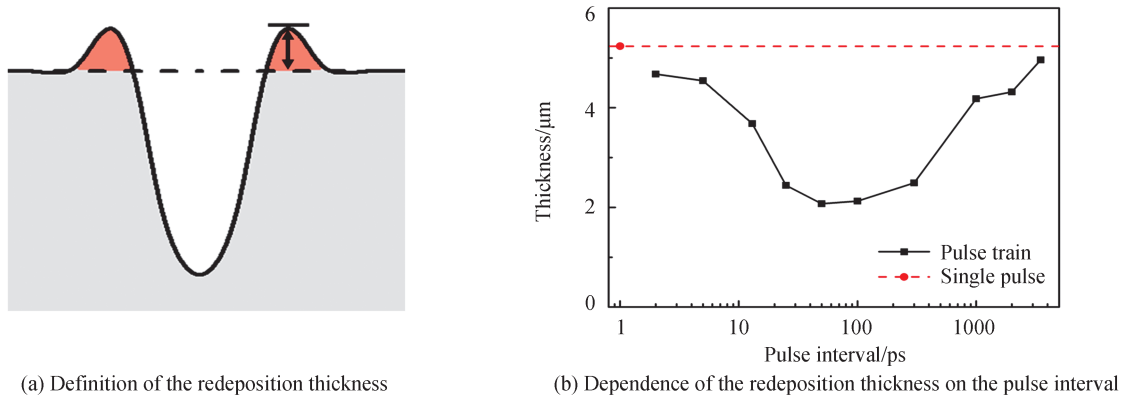


图4 再沉积物厚度随子脉冲间隔的变化($N=20$)
Fig. 4 Dependence of the redeposition thickness on the pulse interval ($N=20$)

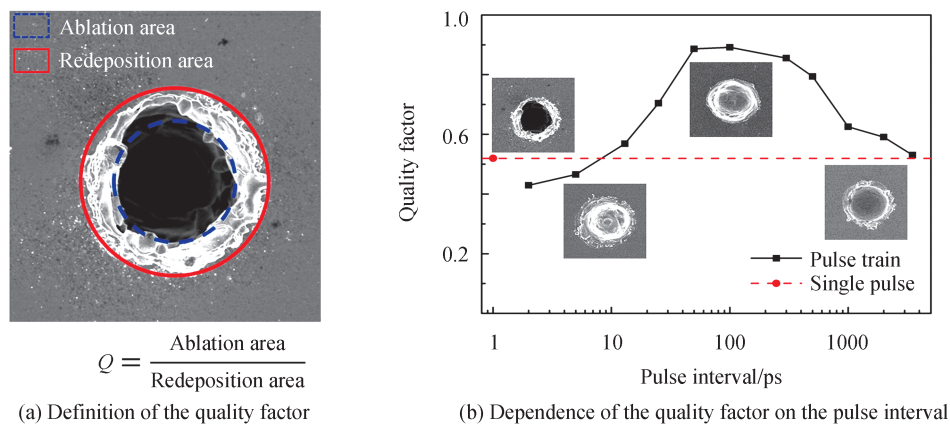
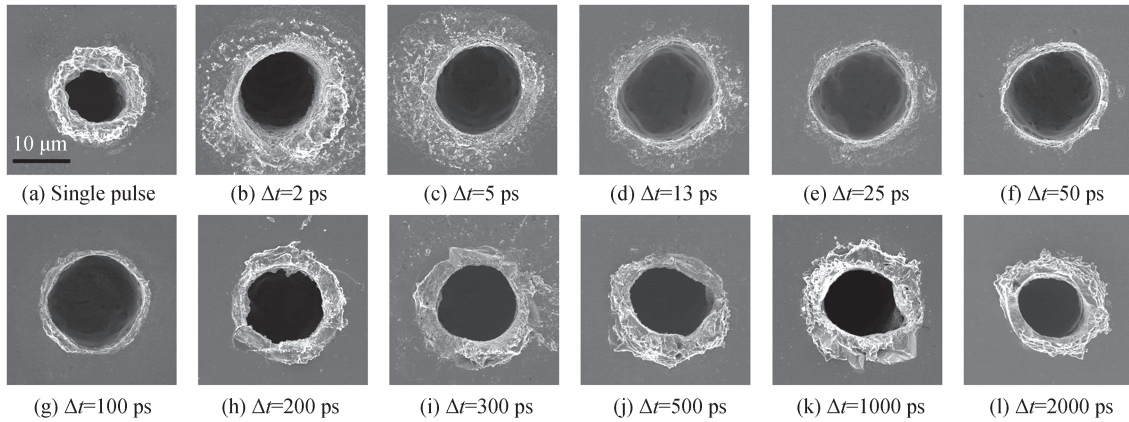
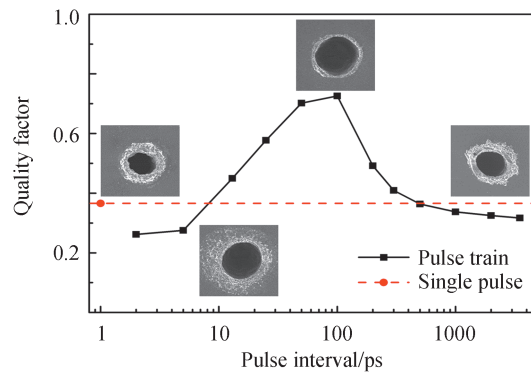


图5 表面品质因子随子脉冲间隔的变化($N=20$)
Fig. 5 Dependence of the surface quality factor on the pulse interval ($N=20$)

随着作用的脉冲序列总个数增多,由于脉冲序列之间的累积效应,相应的边缘再沉积物质或者热损伤痕迹都将放大,为突出不同激光模式下烧蚀孔型质量上的差异,图6展示了脉冲序列个数 $N=200$ 下单飞秒脉冲以及不同脉冲间隔脉冲序列的烧蚀孔表面SEM图。如图6(a)所示,单个飞秒脉冲激光在烧蚀孔边缘堆积了大量的再沉积物,烧蚀孔被堵住,孔径明显缩小。 Δt 在 $2\sim 25$ ps范围内时(图6(b)~(e)),孔周围的再沉积物质比较少,但周围存在较大范围的热损伤区域。 Δt 在 $50\sim 100$ ps范围内时(图6(f),(g)),以上两种情况都得到了缓解,边缘沉积的喷出材料较少,烧蚀孔没有被遮挡覆盖,且边缘几乎没有热损伤痕迹,呈现理想的孔型。而 Δt 从 200 ps开始(图6(h)~(l)),喷出物的再沉积现象又开始出现出现,且随着子脉冲间隔的增加,沉积物质增多。图7为 $N=200$ 时表面品质因子随子脉冲间隔的变化图,红色虚线表示单个飞秒脉冲激光的对应值,总体变化趋势依然是先增大后减小,表明孔型质量先变好再变差,在 $50\sim 100$ ps附近取到最佳值,插图最具代表的四种孔型。

上述分析可得, $50\sim 100$ ps范围内的脉冲序列能够显著减少喷出物的再沉积现象,不仅如此, $50\sim 100$ ps范围内的脉冲序列在减少粉尘污染与基底损伤方面也有着非常不错的表现。在 高能流密度下,传统单飞秒脉冲在烧蚀过程中喷出大量高温熔融液滴或汽液混合物,部分喷出物在边缘沉积凝固形成冠状重熔物,同时也有部分喷出物散落在周围基底上^[17],形成所谓粉尘,高温粉尘粘连在材料表面、对基底材料造成损伤,这在工业上是需要极力避免的^[25-28]。

图6 不同激光模式下烧蚀坑的SEM图像($N=200$)Fig. 6 SEM images of the ablation craters under different laser modes ($N=200$)图7 表面品质因子随子脉冲间隔的变化($N=200$)Fig. 7 Dependence of the surface quality factor on the pulse interval ($N=200$)

本文所展示结果均经过相同的HF溶液水浴超声清洗,经过清洗后,50~100 ps范围内的脉冲序列在周围基底上基本没有残余粉尘或高温粉尘对基底的损伤痕迹。图8为脉冲序列个数200下,单飞秒脉冲以及间隔100 ps的脉冲序列烧蚀孔形貌的放大图,如图8(a),单飞秒脉冲模式下周围基底材料受到严重污染与损伤,如细节放大图中所示,存在大量的无法用HF溶液清洗去除的粘连粉尘,以及高温粉尘热损伤痕迹,相比较之下,图8(b)所示100 ps间隔的脉冲序列则几乎没有残余粉尘或热损伤痕迹。

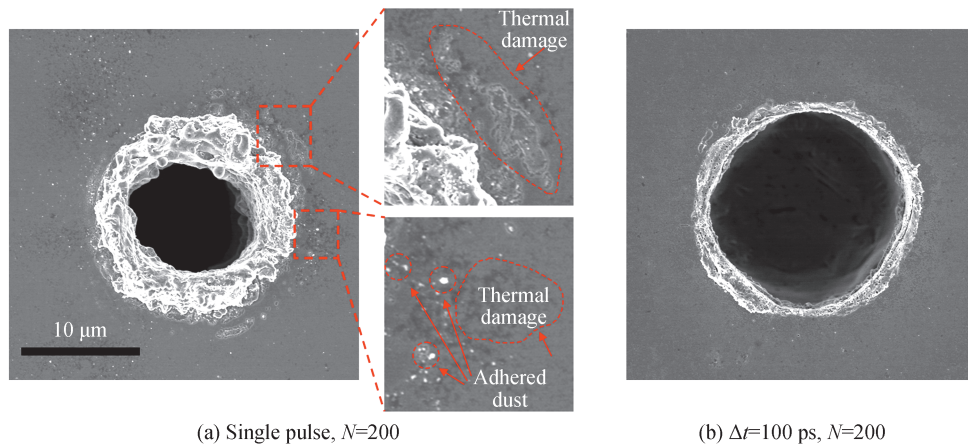
(a) Single pulse, $N=200$ (b) $\Delta t=100$ ps, $N=200$

图8 粉尘污染与热损伤对比

Fig. 8 Comparison of contamination and thermal damage caused by dust

在工业应用中,不仅要保证孔型上的规则、减少所述冠状重熔物,同时也要极力避免高温粉尘的污染与损伤。高能流密度单飞秒脉冲在烧蚀质量上的不足导致工业应用受阻,本文所述飞秒激光脉冲序列,子脉冲间隔在50~100 ps范围内能够同时改善这两个问题,为工业上的应用与改进提供一种参考思路以及参数范围。

3 分析与讨论

在高能流密度下,飞秒激光的烧蚀机制主要为相爆炸,也称为爆炸沸腾或气泡均相成核,烧蚀过程中剧烈喷发的液滴在孔边缘沉积并凝固,从而形成凸起于基底面的冠状重熔物,导致孔型质量下降^[18,21-22],本文中,如图3、6所示的原始单飞秒脉冲的烧蚀形貌,出现类似文献报道的冠状重熔物以及高温粘连粉尘。图9(a)演示了高能流密度单飞秒脉冲激光的烧蚀过程,样品在飞秒激光辐照后,迅速升温熔化,然后在内部形成空隙并逐渐膨胀^[16],在膨胀过程中伴随着液滴或汽液混合物的喷发^[43-44],随后由于飞秒激光的高斯分布,烧蚀区域的熔融层分布不均匀,熔融液体从中心区域向边缘流动并凝固^[45],与此同时喷出物也会在边缘沉积凝固,在以上两种机制作用下,烧蚀孔边缘逐渐形成较厚的冠状重熔物,而随孔深度加深喷出物的再沉积现象逐渐占主导作用。除此之外,图9(a)中深红色小凹坑表示高温粉尘对基底的损伤,灰色小球表示与基底粘连的粉尘。

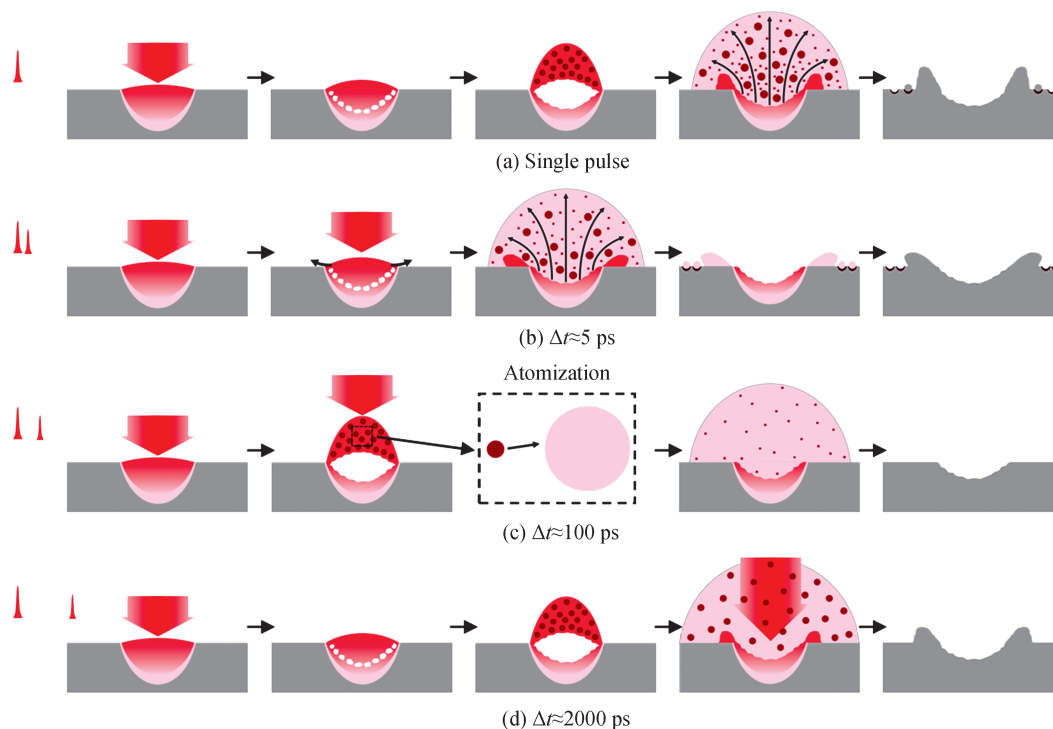


图9 四种激光模式烧蚀机理示意图

Fig. 9 Illustration of ablation mechanism of the four typical laser modes

飞秒激光脉冲序列的烧蚀机制中,后续子脉冲与喷出物的相互作用是必须考虑的。NOËL S以及HERMANN J等在双脉冲飞秒激光的研究中发现,飞秒激光沉积颗粒尺寸与脉冲间隔有着紧密联系,脉冲间隔在几十皮秒到百皮秒时,后续子脉冲能够将喷出的颗粒更充分的雾化,表面沉积物质中原子尺度的物质占比更高^[35-36]。JIANG L等报道的双飞秒脉冲的侧面阴影图像演化中,50 ps间隔的双脉冲序列相比于更小间隔的脉冲序列能够更充分地对喷出物进行雾化^[37]。所述雾化,或者说原子化,即后续子脉冲对喷出颗粒的再次烧蚀,颗粒尺寸大大减小,根据局域表面等离子共振吸收增强原理^[46],喷出的纳米尺寸的颗粒能够显著增强光吸收从而更有利于颗粒充分的雾化,颗粒的光吸收与雾化效率取决于颗粒的尺寸。

本文在不同脉冲间隔下观测到三种烧蚀效果。首先,脉冲间隔较小时(<25 ps),如图9(b)所示,后续子脉冲到达时烧蚀坑内物质已经迅速升温进入高温液态,并且由于极高的压力,在内部逐渐形成真空空隙^[16],虽然已经初步喷发材料,但大部分还未脱离基底,在后续子脉冲作用下,与文献结果类似^[35-36],能一定程度减少喷出颗粒,但雾化程度不高,同时烧蚀坑内高温液体受到扰动,形成浪花状溅射物,高温溅射液体体积大温度高,对基底造成热损伤,热损伤经过多个脉冲序列作用下逐渐累积范围扩大。对于50~100 ps间隔的脉冲序列,如图9(c)所示,参考ZHANG N等的喷出物侧面演化图像^[34],100 ps时由液滴和汽液混合物组成的喷出物已经明显膨胀且与基底分离,喷出物由大量纳米颗粒组成,由于局域表面等离子共振吸收增强原理,纳米颗粒对后续子脉冲的吸收增强,从而实现了充分的雾化,雾化过程如图9(c)虚线框中插图所示,喷出物中的液滴或颗粒大大减少,喷出物的再沉积凝固与粉尘污染损伤都得到了改善。而对于200 ps间隔以及更大间隔的脉冲序列,由于喷出物的持续膨胀,喷出物已经扩散,超出激光辐照范围,后续子脉冲仅能对辐照区域内的纳米颗粒进行二次烧蚀,但无法阻止辐照区域外的纳米颗粒的扩散与沉积,烧蚀过程与单飞秒脉冲类似,略有不同的是能够一定程度减少粉尘污染与损伤。

4 结论

本文报道了一种能够显著改善高能流密度飞秒激光烧蚀孔质量的方法,基于后续子脉冲与喷出物的二次烧蚀的原理,实现喷出物的雾化效果,减少重熔物质沉积和高温粉尘对基底的污染与损伤,改善烧蚀质量。后续子脉冲对喷出物的充分雾化需要满足两个条件:1)烧蚀喷出物脱离基底形成纳米颗粒;2)喷出物在激光辐照范围内,还没进一步扩散。本文通过改变脉冲序列的子脉冲间隔,对飞秒激光脉冲序列的烧蚀动力学过程进行控制与优化,在50~100 ps的子脉冲间隔范围内,能够实现喷出物充分的雾化,避免高温熔渣的沉积凝固以及对基底的损伤,烧蚀孔质量得到显著改善。

参考文献

- [1] SRINIVASAN R, SUTCLIFFE E, BRAREN B. Ablation and etching of polymethylmethacrylate by very short (160 fs) ultraviolet (308 nm) laser pulses[J]. Applied Physics Letters, 1987, 51 (16): 1285-1287.
- [2] KÜPER S, STUKE M. Femtosecond uv excimer laser ablation[J]. Applied Physics B, 1987, 44 (4): 199-204.
- [3] CHICHKOV B N, MOMMA C, NOLTE S, et al. Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids[J]. Applied Physics A: Materials Science & Processing, 1996, 63 (2): 109-115.
- [4] KAMLAGE G, BAUER T, OSTENDORF A, et al. Deep drilling of metals by femtosecond laser pulses[J]. Applied Physics A, 2003, 77 (2): 307-310.
- [5] YANG J, ZHAO Y, ZHANG N, et al. Ablation of metallic targets by high-intensity ultrashort laser pulses[J]. Physical Review B, 2007, 76 (16): 165430.
- [6] BÄRSCH N, KÖRBER K, OSTENDORF A, et al. Ablation and cutting of planar silicon devices using femtosecond laser pulses[J]. Applied Physics A, 2003, 77 (2): 237-242.
- [7] BOROWIEC A, HAUGEN H K. Femtosecond laser micromachining of grooves in indium phosphide[J]. Applied Physics A, 2004, 79 (3): 521-529.
- [8] DAVIS K M, MIURA K, SUGIMOTO N, et al. Writing waveguides in glass with a femtosecond laser[J]. Optics Letters, 1996, 21(21): 1729-1731.
- [9] NIKUMB S, CHEN Q, LI C, et al. Precision glass machining, drilling and profile cutting by short pulse lasers[J]. Thin Solid Films, 2005, 477 (1-2): 216-221.
- [10] CHUNG S H, MAZUR E. Surgical applications of femtosecond lasers[J]. Journal of Biophotonics, 2009, 2 (10): 557-572.
- [11] MORENO P, MÉNDEZ C, GARCÍA A, et al. Femtosecond laser ablation of carbon reinforced polymers[J]. Applied Surface Science, 2005, 252(12): 4110-4119.
- [12] GATTASS R R, MAZUR E. Femtosecond laser micromachining in transparent materials[J]. Nature Photonics, 2008, 2 (4): 219-225.
- [13] VOROBYEV A Y, GUO C. Direct femtosecond laser surface nano/microstructuring and its applications[J]. Laser & Photonics Reviews, 2013, 7(3): 385-407.
- [14] SUGIOKA K, CHENG Y. Ultrafast lasers-reliable tools for advanced materials processing [J]. Light Science & Applications, 2014, 3(4): e149.
- [15] MOMMA C, CHICHKOV B N, NOLTE S, et al. Short-pulse laser ablation of solid targets [J]. Optics Communications, 1996, 129(1-2): 134-142.

- [16] LORAZO P, LEWIS L J, MEUNIER M. Short-pulse laser ablation of solids: from phase explosion to fragmentation[J]. *Physical Review Letters*, 2003, 91(22): 225502.
- [17] VENKATAKRISHNAN K, TAN B, NGOI B K A. Femtosecond pulsed laser ablation of thin gold film[J]. *Optics and Laser Technology*, 2002, 34(3): 199-202.
- [18] HWANG D J, GRIGOROPOULOS C P, CHOI T Y. Efficiency of silicon micromachining by femtosecond laser pulses in ambient air[J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 99(8): 083101.
- [19] MA S, MCDONALD J P, TRYON B, et al. Femtosecond laser ablation regimes in a single-crystal superalloy[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2007, 38(13): 2349-2357.
- [20] PECHOLT B, VENDAN M, DONG Y, et al. Ultrafast laser micromachining of 3C-SiC thin films for MEMS device fabrication[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, 39(3-4): 239-250.
- [21] LEE S, YANG D, NIKUMB S. Femtosecond laser micromilling of Si wafers[J]. *Applied Surface Science*, 2008, 254(10): 2996-3005.
- [22] ZHANG H, OOSTEN D, KROL D M, et al. Saturation effects in femtosecond laser ablation of silicon-on-insulator[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(23): 231108.
- [23] AHN S, HWANG D J, PARK H K, et al. Femtosecond laser drilling of crystalline and multicrystalline silicon for advanced solar cell fabrication[J]. *Applied Physics A*, 2012, 108(1): 113-120.
- [24] ZHANG Wei, ZHANG Xianbing, CAI Min, et al. Effect of femtosecond laser fluence on recast layer and machining time in nickel-based superalloy[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017, 2017(18): 62-65+78.
张伟, 张晓兵, 蔡敏, 等. 飞秒激光能量密度对镍基合金重铸层和加工效率的影响[J]. *航空制造技术*, 2017, 2017(18): 62-65+78.
- [25] HAN Weiwei, ZHANG Xiaoqi. Laser wafer dicing in semiconductor encapsulation field[J]. *Equipment for Electronic Products Manufacturing*, 2010, 39(12): 39-43.
韩微微, 张孝其. 半导体封装领域的晶圆激光划片概述[J]. *电子工业专用设备*, 2010, 39(12): 39-43.
- [26] RONG Yu. The cutting principle of micro water knife laser scribing machine[J]. *Science and Technology*, 2015, 25(7): 157.
荣宇. 微水刀激光划片机的切割原理[J]. *科技展望*, 2015, 25(7): 157.
- [27] CHEN Xuehui, LI Xiang, WU Chao, et al. Influence of water jet assisted laser processing silicon carbide[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(1): 225-231.
陈雪辉, 李翔, 吴超, 等. 水射流辅助激光加工碳化硅的影响研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(1): 225-231.
- [28] JIAO Hui, YANG Linfan, ZHOU Jia, et al. Study on the influence of flow on water jet assisted laser processing[J]. *Applied Laser*, 2020, 40(3): 483-491.
焦辉, 杨林帆, 周嘉, 等. 水辅助激光加工中射流流向对加工的影响研究[J]. *应用激光*, 2020, 40(3): 483-491.
- [29] MARJORIBANKS R S, DILLE C, SCHOENLY J E, et al. Ablation and thermal effects in treatment of hard and soft materials and biotissues using ultrafast-laser pulse-train bursts[J]. *Photonics & Lasers in Medicine*, 2012, 1(3): 155-169.
- [30] KERSE C, KALAYCIOGLU H, ELAHI P, et al. Ablation-cooled material removal with ultrafast bursts of pulses[J]. *Nature*, 2016, 537(7618): 84-88.
- [31] MISHCHIK K, BONAMIS G, QIAO J, et al. High-efficiency femtosecond ablation of silicon with GHz repetition rate laser source[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(9): 2193-2196.
- [32] BONAMIS G, MISHCHICK K, AUDOUARD E, et al. High efficiency femtosecond laser ablation with gigahertz level bursts[J]. *Journal of Laser Applications*, 2019, 31(2): 022205.
- [33] SCHWARZ S, RUNG S, ESEN C, et al. Enhanced ablation efficiency using GHz bursts in micromachining fused silica[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(2): 282-285.
- [34] ZHANG N, ZHU X, YANG J, et al. Time-resolved shadowgraphs of material ejection in intense femtosecond laser ablation of aluminum[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(16): 167602.
- [35] NOËL S, AXENTE E, HERMANN J. Investigation of plumes produced by material ablation with two time-delayed femtosecond laser pulses[J]. *Applied Surface Science*, 2009, 255(24): 9738-9741.
- [36] NOËL S, HERMANN J. Reducing nanoparticles in metal ablation plumes produced by two delayed short laser pulses[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(5): 053120.
- [37] WANG G, SUN J, JI P, et al. Modulation and mechanism of shockwaves induced on metals by femtosecond laser double-pulse[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020, 53(16): 165104.
- [38] KUDRYASHOV S I, SAMOKHVALOV A A, GOLUBEV Y D, et al. Dynamic all-optical control in ultrashort double-pulse laser ablation[J]. *Applied Surface Science*, 2021, 537: 147940.
- [39] WEINER A M. Femtosecond pulse shaping using spatial light modulators[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2000, 71(5): 1929-1960.
- [40] WANG Z, JIANG L, LI X, et al. High-throughput microchannel fabrication in fused silica by temporally shaped

- femtosecond laser Bessel-beam-assisted chemical etching[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(1): 98-101.
- [41] DROMEY B, ZEPF M, LANDREMAN, M, et al. Generation of a train of ultrashort pulses from a compact birefringent crystal array[J]. *Applied optics*, 2007, 46 (22): 5142-5146.
- [42] LIU J M. Simple technique for measurements of pulsed Gaussian-beam spot sizes[J]. *Optics Letters*, 1982, 7 (5) : 196-198.
- [43] SONG K H, XU X. Explosive phase transformation in excimer laser ablation[J]. *Applied Surface Science*, 1998, 127: 111-116.
- [44] LINDE D, SOKOLOWSKI-TINTEN K. The physical mechanisms of short-pulse laser ablation[J]. *Applied Surface Science*, 2000, 154: 1-10.
- [45] GRABOWSKI A, FLORIAN T, WIECZOREK J, et al. Structuring of the Ti6Al4V alloy surface by pulsed laser remelting[J]. *Applied Surface Science*, 2021, 535: 147618.
- [46] HALAS N J, LAL S, CHANG W S, et al. Plasmons in strongly coupled metallic nanostructures[J]. *Chemical Reviews*, 2011, 111(6): 3913-3961.

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (Nos. 12074123, 11804227, 91950112), the Science and Technology Commission of Shanghai Municipality (No. 19ZR1414500), the Open Fund of the State Key Laboratory of High Field Laser Physics (Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics)