

用于实现激光高效率加工的光束整形技术

夏国才^{1,2} 孙小燕^{1,2} 段吉安^{1,2}

(¹ 中南大学机电工程学院, 湖南 长沙 410083
² 中南大学高性能复杂制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410083)

摘要 激光凭借其穿透性和高强度的独特优势,已在加工领域得到广泛应用,但为了实现激光加工的高效率、高精度指标,需要对激光进行空域整形和时域整形。空域整形技术主要是基于折射原理、衍射原理或偏振原理的整形技术,时域整形技术主要包括脉冲压缩技术和脉冲序列控制技术。

关键词 激光技术;高效率加工;高斯光束;空域整形;时域整形

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.100002

Beam Shaping Technologies for High Efficiency Laser Fabrication

Xia Guocai^{1,2} Sun Xiaoyan^{1,2} Duan Ji'an^{1,2}

(¹ College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University,
Changsha, Hunan 410083, China
² State Key Laboratory of High Performance Complex Manufacturing, Central South University,
Changsha, Hunan 410083, China)

Abstract Laser has been widely used in the fabrication field due to its special features of high penetrability and intensity. However, certain modifications in space and time domain should be made to meet the high standards in the efficiency and precision of fabrication with laser. Spatial shaping technology is based on the dipodic principle, the diffraction principle and the polarization principle of light. Temporal shaping technology includes the pulse compression technique and the pulse train control technique.

Key words laser technique; high efficiency fabrication; Gaussian beam; spatial shaping; temporal shaping

OCIS codes 140.3300; 140.3295; 050.1590; 050.1970

1 引言

自20世纪60年代激光技术问世以来,激光由于其穿透性和高强度等独特优势而被广泛用于工业加工领域,主要涉及激光切割、激光打孔及激光焊接等方面的应用。激光技术在军事上有巨大的潜在价值,由此催生了大功率激光技术的发展,大功率激光器的产生使激光加工在机械加工领域的应用更加广泛。我国的大功率激光加工设备主要从20世纪80年代开始起步并得到迅速的发展,到2007年我国仅用于切割的大功率激光设备需求就已达500台(2000年为60台),同时激光的功率也不断提高,现在的输出功率已经可达到兆瓦级。光纤激光器作为第三代激光技术的代表,具有制造成本低、设备体积小、散热效果好等优势,同时光纤激光器的激光由光纤导出使其可以轻易胜任各种多维任意空间加工形状。在结构上,光纤激光器的谐振腔内没有光学镜片,具有免调节、免维护、高稳定性等优点,有利于工业连续加工的应用。超短脉冲激光的出现,使激光加工技术已不仅仅局限于传统的工业加工领域。超短激光脉冲具有极短的脉冲宽度和极高的峰值功率,极短的脉冲宽度使超短脉冲在加工过程中的热效应很小(几乎可以忽略),因而能极大提高加工的

收稿日期: 2012-05-16; **收到修改稿日期**: 2012-05-28; **网络出版日期**: 2012-07-12

基金项目: 国家973计划(2011CB013000)、国家自然科学基金重大研究计划重点项目(91123035)、国家自然科学基金重大研究计划培育项目(90923030)和国家自然科学基金青年项目(51005250)资助课题。

作者简介: 夏国才(1988—),男,硕士研究生,主要从事激光微纳加工方面的研究。E-mail: xia_guocai@163.com

导师简介: 孙小燕(1981—),女,副教授,主要从事激光微纳加工方面的研究。E-mail: sunxy@csu.edu.cn(通信联系人)

精度,同时极高的峰值功率使得超短激光脉冲能够比较高效地加工一些利用传统方法难以加工的材料。目前,超短脉冲激光加工在集成光学、双光子聚合、微流体器件加工和纳米颗粒制备等领域都有重要的应用,毋庸置疑,超短脉冲激光加工也已经成为精密微加工领域的一个重要分支^[1]。在实际加工应用中,为了提高加工的效率,通常需要对光束进行合理的整形。随着激光加工的不断发展和完善,与激光加工效率息息相关的光束整形技术也得到了不断的发展和完善。

激光光束整形主要包括空域整形和时域整形两方面。空域整形是指根据需要改变入射激光的强度分布,激光器输出的光束一般是呈高斯分布的,即离光束中心越近激光的强度愈大,而远离中心的强度愈小。在激光加工中高斯光束边缘的能量太小,无法加工材料,为了提高加工的效率,通常需要将高斯光束整形为强度分布较为均匀的平顶光束,以提高激光加工的加工半径。

为了达到提高加工效率而进行的时域整形一般分为两大类,一类是脉冲压缩,另一类是产生脉冲序列。在加工过程中也会遇到一些加工阈值很高的材料,激光器直接输出的激光能量密度不够高,使其加工效率很低,这就可以通过压缩脉宽以提高激光脉冲的能量密度,实现其高效加工;当激光器输出的激光强度较大时,激光可加工的半径已经大于需要加工的半径,通常需要对激光束进行衰减,其被衰减部分的激光能量就无法用于加工过程了,如果激光光束通过脉冲整形系统产生脉冲序列,就可以将一个激光脉冲的能量分为几个脉冲序列的能量之和,从而充分利用激光的能量,实现高效率加工。

2 激光的空域整形

自从 20 世纪 60 年代激光出现以来,激光的空域整形技术也逐渐开始发展,至今空域整形技术已经比较成熟。空域整形是指改变入射激光的强度分布为所需的强度分布^[2],利用空域整形技术可以将强度为高斯分布的光束整形为平顶分布、三角形分布等常用的激光光束,同时还可以将光斑整形为我们需要的形状(如矩形、圆形灯几何形状)。在这里主要介绍整形为用于提高激光加工效率的平顶光束的整形技术。

目前所使用的激光空域整形技术按整形原理的不同,通常可以归纳为折射整形、衍射整形和偏振整形三类。

2.1 折射整形

折射整形的基本思想是激光光束经过折射元件时运用互补填平的思想使激光光束中间的高密度能量分散到光束边缘,对光束起到补偿作用,实现光束强度的均匀。折射整形通常运用光线追迹方法,利用等光程条件设计折射元件的外形轮廓,其具体实现方法是确保从光源发出的每一条光线经过折射元件后到达特定平面所经过的光程相等。

目前,利用折射整形原理实现光束整形的具体方法按折射元件的外形轮廓类型的不同而多种多样,在实际中应用比较普遍的是使用非球面面型作为折射单元实现整形,这里主要介绍非球面面型透镜和带孔柱透镜这两种方法。

非球面面型透镜又可以分为双片分离型非球面透镜组和单片非球面透镜两种。Frieden^[3]于 1965 年提出对于能量分布具有轴对称性的激光光束可以采用双片分离型非球面透镜组改变其能量分布,该透镜组如图 1 所示。之后,Kreuzer^[4]在 1969 年设计了将高斯光束转换成平顶光束的光束整形系统。在双片分离型透镜组中第一片透镜 L1 对输入高斯光束的能量进行重新分配实现均匀,第二片透镜 L2 对经过匀化的光束进行准直。在实际加工生产中,非球面镜的非球面度会直接影响加工的难度,因此在设计中需要在满足使用要求的前提下尽可能降低非球面镜的非球面度。目前常用的做法是在理论分析高斯光束整形为平顶光束的基础上,分析光束整形中各个特性参数对非球面截面曲线的影响,同时按照实际要求尽可能降低非球面镜的非球面度,同时还可以结合 Zemax 等光学设计软件对非球面镜按输入参数的要求进行拟合得到尽可能优化的非球面系统,这样就可以在很大程度上降低非球面镜的加工难度^[5]。

虽然非球面面型透镜能较好地实现激光光束整形,但非球面器件的加工难度较大。武汉大学周洋等^[6]提出了利用带孔的柱面透镜实现光束整形的方法,其设计原理如图 2 所示。在整形用的柱面透镜中心开孔,利用中心孔对光束能量的发散作用将激光光束中心较高能量分散到光束边缘,以实现匀化。可以通过对柱透镜内孔的大小、形状及孔内介质折射率等参数的调节实现不同要求的光束整形。该方法与非球面面型透镜整形相比,其元件的加工简单,同时在整形过程中操作灵活。

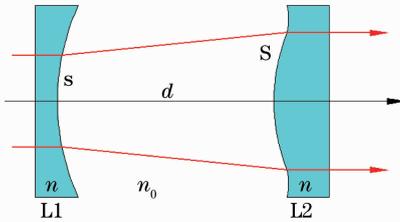


图1 非球面透镜整形示意图

Fig. 1 Diagram of aspheric lens scheme for beam shaping

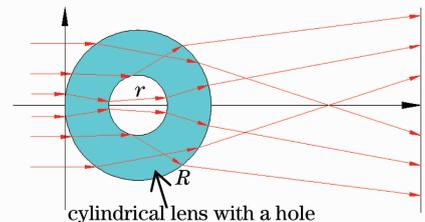


图2 光线通过带孔透镜光路图

Fig. 2 Optical path through lens with a hole

2.2 衍射整形

在光学研究发展初期,由于衍射限制了光学系统的分辨率,因而人们一直视衍射为光学系统的不利因素而尽力避免。自世界上第一个光学衍射元件——菲涅耳波带片制作成功,人们才逐渐开始认识到可以利用衍射元件来调整光束的强度分布。光学衍射元件基于光波的衍射原理,利用计算机辅助技术设计衍射图,通过微电加工技术在光学材料只做表面浮雕的元件^[7]。

衍射整形通常只对光束的相位进行调整,如图3所示,图中P1、P2分别为激光光束的输入和输出平面。因此,该方法对光束整体能量的衰减较小,以二元光学元件为例,当其相位阶数达到8阶时,衍射效率可以达到95%,因而衍射整形总体来说是一种效率比较高的整形方法。在衍射整形中,通常知道输入和输出平面上的光场振幅分布,首先根据输入和输出平面上的光场分布计算出输入面需要补偿的相位结构,然后对计算出的相位结构进行台阶化,这样就能制作出相应的衍射元件^[8]。

常用衍射元件有二元光学元件、全息相位片、连续分布相位片和纯相位片等,这些衍射元件也都可以用于光束整形^[9~14]。利用液晶光空间调制器调节激光光束强度的空间分布是衍射整形中较为灵活的一种整形方式^[15~18]。液晶空间光调制器对激光光束整形的实质是利用液晶分子的双折射特性,在外加电场的作用下,液晶分子的指向会随电压的变化而改变,同时液晶分子的指向会影响液晶材料的折射率,这样就可以使通过液晶空间光调制器不同位置的光线具有不同的光程,实现对光波的调制。在实际应用中,通过计算机实时控制液晶空间光调制器不同像素的电压大小,就可以改变不同位置液晶材料的折射率,动态地对输出光强度分布实现实时调制。

中国科学院光电技术研究所王小发等^[19]提出的衍射 $4f$ 光束系统是基于高斯光束传播衍射理论而构造出的一种新型的整形系统。该系统利用光阑对高斯光束进行衍射获得相应的衍射光斑图样,再利用 $4f$ 像传递系统对光斑图进行提取和传递。衍射 $4f$ 光束整形系统可实现较好的整形效果,整形后的光束顶部的能量波动小于5%,能量提取率达到80%。

2.3 偏振整形

偏振整形方法利用激光的偏振特性来实现对光束的整形,其基本原理是光束通过起偏器后为线偏振光,再经过偏振单元,使不同位置的光线有不同的偏振状态,经过检偏后光束被整形成均匀光。根据偏振整形的原理设计的偏振整形系统通常由起偏器、偏振单元、检偏器三部分组成。对于线偏振光而言,在该系统中可以不必使用起偏器。

目前,最常用的偏振整形系统是由美国劳伦兹·利弗莫尔国家实验室提出的双折射透镜组整形系统^[20],它能随光束灵活地调节其透射率函数,巧妙而方便地实现了激光光束空间整形,如图4所示。双折射透镜组整形系统由两对双折射透镜和起偏器、检偏器组成,其中L1、L4、L2、L3分别构成两组平凸平凹透镜对,P1为起偏器,P2为检偏器,透镜晶体的主轴方向(竖直方向)以及起偏器、检偏器的透振方向均垂直于系统的光轴方向。L1、L4是两个完全相同的平凸透镜,对偏振光而言,中心相当于 $\lambda/2$ 波片,有效通光孔径边缘处相当于 $\lambda/4$ 波片,两镜对称排列;L2、L3是两个完全相同的平凹透镜,中心相当于 $\lambda/4$ 波片,有效通光孔径边

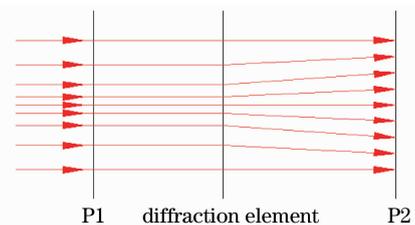


图3 衍射整形原理图

Fig. 3 Diagram of diffraction beam shaping

缘处相当于 $\lambda/2$ 波片,两镜对称放置;L1 和 L4 的主轴与 x 轴同向且固定不动,L2 和 L3 的主轴平行且可以作为一个整体绕光轴旋转任意角度。在光束整形的过程中调节 L2 和 L3 的主轴和垂直方向的夹角,使从透镜组中输出的线偏振光在不同的位置具有不同的偏振态,经检偏后出射光束就被整形为均匀的平顶光束^[21]。

折射整形和衍射整形的整形元件基本上都是针对特定参数的光束进行设计的,制作好的器件就不能用于其他光束的整形,这极大地限制了这些方法的通用性。使用双折射透镜组整形系统进行光束整形的方法灵活方便,易于改变其透射率函数,适用范围广,尤其适用于线偏振高斯光束的整形。

在激光加工领域很多激光加工过程中材料的加工阈值效应比较明显,即当激光的强度达到加工阈值 F_{th} 就能对材料实现加工,而激光强度低于加工阈值 F_{th} 就无法对材料实现加工。因此,通过激光光束的空域整形使光强达到均匀分布可以弥补强度低于加工阈值处光束的强度的不足,从而提高激光加工的半径。如图 5 所示,用激光加工一加工阈值为 F_{th} 的材料时,经过光束整形后平顶光束的加工半径 r_2 要比高斯光束的加工半径 r_1 大很多,因此在实际生产中可以通过激光光束的空域整形实现激光加工效率的提高。

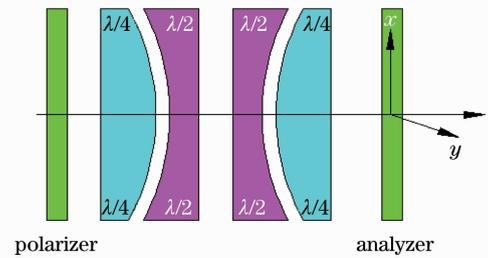


图 4 双折射透镜组整形系统

Fig. 4 System of double refractors for beam shaping

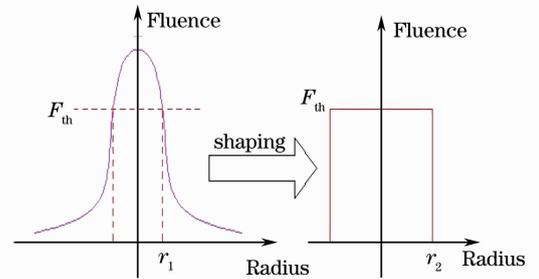


图 5 高斯光束整形前后加工半径比较

Fig. 5 Comparison of fabrication radius between Gaussian beam and shaped beam

3 激光的时域整形

激光时域整形技术的发展晚于空域整形技术。基于对激光能量密度需求的提高,人们开始寻求对激光脉冲进行压缩的整形技术。到目前为止,在实际应用中已经可以获得飞秒量级的脉冲进行激光加工。脉冲压缩的主要原理基本是利用激光在介质中的负色散作用^[22];而脉冲序列的实现主要从两方面来满足激光的高效率加工的要求,一方面是从能量上提高其在加工过程的利用率,另一方面是从加工机理上提高激光的吸收系数^[23,24]。

3.1 脉冲压缩

激光脉冲在色散介质中传播时,色散介质中的群延迟色散可以导致脉冲变宽或变窄。当激光脉冲通过正色散介质时,激光脉冲会变宽;反之,当激光脉冲通过负色散介质时,激光脉冲会变窄。根据这个原理,我们可以利用负色散器件来实现激光脉冲的压缩。通常使用的可以实现负色散的器件主要有啁啾反射镜、Gires-Tournois(G-T)反射镜^[25]、光栅对(脉冲压缩器)、棱镜对^[26]、变形镜^[27]等。

啁啾反射镜实际上是多层膜反射镜的延伸,简单地讲,就是连续改变膜层的共振波长,使啁啾反射镜在保持高反射率的同时能够给予不同波长以不同的延迟,这样就可以实现对激光脉冲的压缩^[28,29]。啁啾反射镜还具有体积小优点,从而能够更好地实现光学系统的小型化。

负色散光栅对也可以实现对激光脉冲的压缩^[30,31]。如图 6 就是一个光栅对的示意图,假定其入射角为 γ ,衍射角为 $\gamma - \theta$,两光栅平行放置,其垂直距离为 G ,那么出射光仍然是平行光,但其光谱是空间分布的。例如,图 6 所示的衍射光,因为短波长分量 λ_s 的衍射角度小,在经过第二个光栅后超前于长波长的分量 λ_L ,形成下啁啾,这样就实现了脉冲的压缩。同时通过计算也可以得到激光脉冲在光栅对中的群延迟 τ 、二阶色散 $\frac{d^2\varphi}{d\omega^2}$ 和三阶色散 $\frac{d^3\varphi}{d\omega^3}$:

$$\tau = \frac{d\varphi}{d\omega} = \frac{-\lambda^3 b}{c}, \quad (1)$$

$$\frac{d^2\varphi}{d\omega^2} = \frac{-\lambda^3 b}{2\pi c^2 d^2 \cos^3(\gamma - \theta)}, \quad (2)$$

$$\frac{d^3\varphi}{d\omega^3} = \frac{3\lambda^4 b}{4\pi^2 c^3 \cos^2(\gamma - \theta)} \left[1 + \frac{\lambda}{d} \frac{\sin(\gamma - \theta)}{\cos^2(\gamma - \theta)} \right]. \quad (3)$$

从(1)~(3)式可以看出这个光栅对提供负的群延迟色散,从而可以实现脉冲压缩。因此,这种光栅对也被称为脉冲压缩器。

棱镜对是最重要的色散补偿元件之一,它具有结构简单、使用灵活、损耗小、色散可调节等优点,获得了广泛的应用。如图7所示,两棱镜 I、II 对应面平行放置,平行入射的光经过棱镜对后仍然是平行光。在设计中考虑到损耗,一般设计成布儒斯特角入射和出射,这样就可以最大限度地减小棱镜的插入损耗。影响色散的光路长度 $l = 2L \sin \theta$,由文献[32]可知群色散是光路长度相对于波长的二阶导数:

$$\beta'' = \frac{d^2 l}{d\lambda^2} = 4L \left\{ \left[\frac{d^2 n}{d\lambda^2} + \left(2n - \frac{1}{n^3} \right) \frac{dn}{d\lambda} \right] \sin \theta - 2 \left(\frac{dn}{d\lambda} \right)^2 \cos \theta \right\}. \quad (4)$$

(4)式的第二部分表示负色散,如果要实现较好的脉冲压缩,那么就要求第一部分尽可能小。在实际应用中,通常调整光束使入射光束落在第一个棱镜的顶点上,影响色散的光路长度可以表示为 $l = 4\omega$ (ω 为光束半径)且 $\cos \theta \approx 1, 2n \gg 1/n^3$, 这样(4)式可表示为

$$\beta'' = \frac{d^2 l}{d\lambda^2} = 16\omega \left(\frac{d^2 n}{d\lambda^2} 2n \frac{dn}{d\lambda} \right) \sin \theta - 8L \left(\frac{dn}{d\lambda} \right)^2. \quad (5)$$

由(5)式可以看出,随着两个棱镜间隔的延长,群延迟色散可以从正到负、从小到大变化,这样就可以实现脉冲的压缩和展宽。

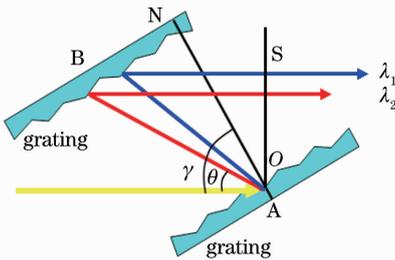


图6 光栅对脉冲压缩示意图

Fig. 6 Diagram of grating pair for pulse compression

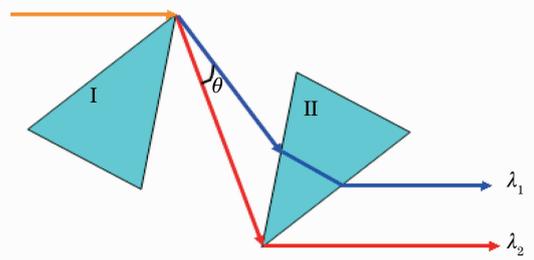


图7 棱镜对脉冲压缩系统

Fig. 7 Diagram of prism pair for pulse compression

随着光电子领域的不断发展,脉冲压缩除了上面介绍的一些方法外,利用光子晶体光纤(PCF)^[33]及光纤光栅^[34]进行脉冲压缩也逐渐开始得到应用。

激光脉冲压缩技术在激光加工中不仅能够提高加工的效率,而且在很多应用中还能提高激光加工的质量。以激光加工在航天发动机的应用为例,目前的航天发动机普遍采用气膜孔结构进行冷却,一台航天发动机中所需加工的气膜孔数量相当庞大,如现役的 Z9 直升机的涡轴发动机燃烧室的一件混合器就需要加工近 4000 个气膜孔,同时由于气膜孔的激光加工质量直接影响到航天发动机的使用寿命。因此,研究一种能提高激光加工效率和加工质量的光束整形技术就显得十分重要。传统的激光加工气膜孔方法主要采用毫秒脉冲宽度的 YAG 激光器产生的激光,在加工气膜孔时小孔的孔壁一般存在 30 μm 左右的再铸层,而且再铸层容易产生裂纹等缺陷。通过对激光加工机理的研究,可知将激光脉冲进行压缩可以减少激光与材料的作用时间,以产生更小的热影响,同时还能相应地提高激光的功率密度,使材料产生更高的气化率,因而有利于减薄孔壁再铸层的厚度和提高加工的效率。德国柏林一家科研机构利用平均功率为 400 W 的大功率声光调 Q YAG 激光器(纳秒激光器)加工航空发动机具有 0.5 μm 厚陶瓷隔热涂层的燃烧室部件上小孔,再铸层厚度小于 20 μm,同时加工效率与传统的毫秒脉冲激光相比提高了 4~10 倍。同时,加工结果表明,对毫秒激光脉冲进行压缩后更适于加工镍铝金属间化合物、金属基、陶瓷基复合材料等脆性材料。

3.2 脉冲序列实现

激光通过时域整形产生的脉冲序列一方面能充分利用激光器产生的能量,提高加工效率;另一方面,脉冲序列在加工中也有其特有的优势。在脉冲序列作用下,时序靠前的脉冲作用在材料表面,使材料表面熔

化,由于熔化的表面对光子的吸收系数较大,因此后续脉冲作用在材料表面时被表层的液体大量吸收,导致这部分的能量密度很大,急剧发生单光子和多光子电离,进而产生大量的等离子体,提高烧蚀效率,实现高效率加工。

1983年,Froehly等^[35]提出的4f脉冲整形系统是目前最常用的产生脉冲序列的方法,该系统由一对光栅、一对透镜和中间的相位、振幅调节面具(mask)构成,如图8所示。4f脉冲整形系统可分为透射式和反射式两种结构,图8所示的为透射式4f脉冲整形系统。简单说来,利用4f脉冲整形系统产生脉冲序列的过程就是一次傅里叶变换(FT)和一次反傅里叶变换(IFT)的过程,如图9所示。当输入的光束经过第一个光栅时,不同的波长按不同的角度衍射开来,展开光满足光栅公式

$$k\lambda = d(\sin\theta_1 + \sin\theta_2), \quad (6)$$

式中 θ_1 为入射角, θ_2 为与之对应的衍射角, k 为光谱级数, d 为光栅常量。经过第一个透镜聚焦在mask所在平面上,实现第一次傅里叶变换,输入光由时域转换到频域。经过第二个透镜和光栅时,实现反傅里叶变换,输出光从频域转换到时域,在不加mask的情况下,系统输出脉冲不会发生任何变化,分离的频率成分与输入脉冲应该完全相同^[36]。

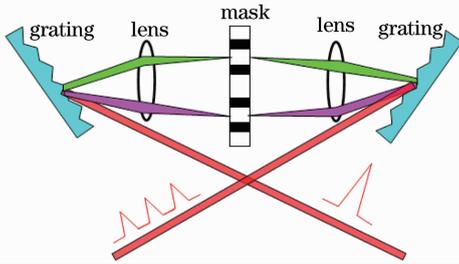


图8 透射式4f脉冲整形系统结构

Fig. 8 4f pulse shaping system in transmission mode

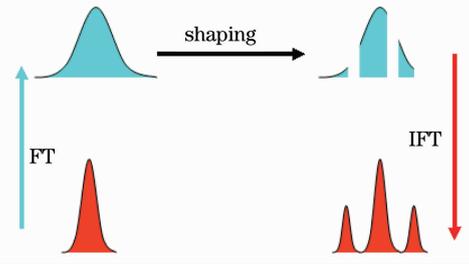


图9 光束的傅里叶变换和反傅里叶变换

Fig. 9 Fourier transform and inverse Fourier transform of beam

在4f脉冲整形系统中应用的mask一般分为相位调制器和振幅调制器两种^[37]。对于几何特性简单的相位调制器,通常可以在透明基底上采用离子刻蚀的方法,刻制出多条深度相同或不同的凹槽,由于mask厚度的改变,不同频率成分的光经过凹凸后出现相位上的差值,这样就实现了相位的调制。简单的振幅调制器一般可以采用向石英基底上蒸镀金属线的方法,使金属线在石英基底上形成间隔相同或不同的分布,这样通过金属线的频率成分就被遮挡掉,其他的频率成分透射过去,从而完成对光的振幅调制。但这两种mask都需要针对特定的要求进行专门的设计,要求不同时就需要重新设计,并且mask的制作过程也比较繁琐。因此,我们在实际应用中需要寻找一种通用的mask,可以根据不同的要求进行实时的调节。液晶空间光调制器满足了人们在实际应用中对脉冲输出实时调节的要求^[38]。液晶空间光调制器的工作原理是在外加电压的作用下改变液晶分子的指向,以达到改变液晶材料折射率的目的,最终实现对入射光的调制。液晶空间光调制器的另一大优点在于它可以同时实现相位和振幅的调制,因此它在光束整形中的应用也越来越普遍。

此外,还可利用分光-合成原理实现脉冲序列控制。基本原理是通过分光元件将入射光束分成多束子光束,调节各个子光束的光程差,然后将各子光束合成,这样就产生了所需的脉冲序列。图10所示的就是典型的双脉冲序列整形系统,从激光器输出的激光光束通过分光镜被分成两个子光束,通过调整光学延时线使两个子光束有一定的光程差,以达到控制两个子光束到达样品的时间间隔,这样就可以产生所需的脉冲序列。该方法可以使用不同的分光元件将光束分成不同数量的子光束,不过由于各个子光束不是完全重合,各个子光束之间的夹角虽然很小,但是对加工质量还是存在一定的影响。

与分光-合成脉冲整形方法比较相似的另一种脉冲整形方法是脉冲堆积法。脉冲堆积法可分为两种,一种是利用双折射晶体的方法^[39],另一种是利用偏振分光棱镜加光学延时线的方法。本文主要介绍后一种方法。其整形的基本原理是垂直偏振的线偏振光通过45°旋光片后,偏振光的偏振方向旋转了45°,通过偏振光分离器把原来的脉冲分成两个子脉冲,利用同样的原理两个子脉冲又可以分成四个子脉冲...最后将这些子脉冲堆积在一起。只需要控制好各个子脉冲间的光学延时就可以得到所需的脉冲序列,如图11所示^[40]。

这种方法的优点在于利用光学延时线来调节子脉冲之间的时间间距,使整形后的脉冲在时域上的分布状态可调,实现过程比较灵活,但同时由于光路较多,调节过程比较繁琐。

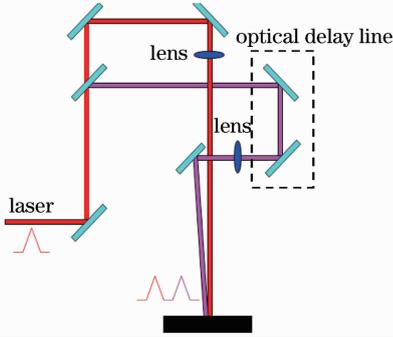


图 10 双脉冲整形系统结构简图

Fig. 10 Diagram of two-pulse shaping

在激光强度较大时,采用脉冲序列技术能很好地提高激光加工的效率。吉林大学张春风^[41]就进行了利用4f整形系统产生的脉冲序列烧蚀Si的实验,在实验中采用了烧蚀荧光强度作为衡量烧蚀效率的度量,同时取烧蚀一列10点所产生的荧光强度的平均值作为其对应的荧光值强度,因而实验中测得的荧光强度能很好地反映激光加工的效率。实验结果如图12所示,从图中可以看出荧光强度随着子脉冲个数的增加而不断增强,这直接反映了激光的加工效率随着子脉冲个数的增加而提高。值得注意的是子脉冲个数的增加会直接导致单个子脉冲能量的减少,所以子脉冲数量过多反而会导致激光加工效率的降低。因此,只有在合适的激光强度的条件下实现脉冲序列加工,才能提高激光加工的效率。

4 激光的时空整形

随着超短脉冲激光加工技术的不断发展,激光光束整形技术已经不再局限于单一的时域整形或空域整形,激光的时空整形技术已经得到了一定的发展。激光光束的时空整形是指通过一个光束整形系统同时实现光束的时域整形和空域整形。超短脉冲激光加工时,材料的加工阈值不仅与激光脉冲的能量和峰值强度有关,同时与激光脉冲的持续时间也有很密切的关系^[42],因此激光光束的时空整形技术对于提高超短激光脉冲的加工效率具有很重要的意义。

时域聚焦技术不仅可以按加工的需求改善激光光束的强度分布和光束光斑的形状,还可以调整单个脉冲的持续时间。时域聚焦技术的原理如图13所示,调整光阑和中性密度滤光片(NDF)可以将输出的激光光束调整到加工中所需的光束尺寸和脉冲能量。经过调整后的光束通过一对光栅使激光脉冲光谱中的不同成分被分离,最后使用物镜将光束聚焦。该光束整形技术的核心部分是激光脉冲的光谱分量分离,经过分离的不同频率的激光成分会在物镜焦点附近叠加聚焦,这使得在物镜焦点处的脉冲持续时间最短,脉冲能量的峰值最大,同时在焦点附近处随着与焦点距离的增大能量峰值会迅速降低,而脉宽会很快地展宽。

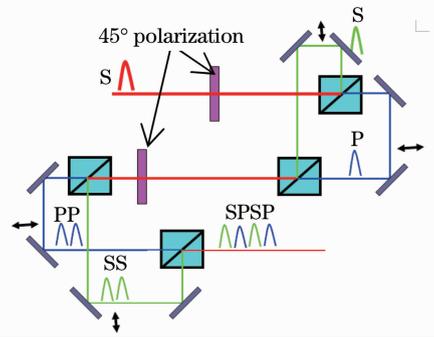


图 11 脉冲堆积法系统简图

Fig. 11 Diagram of pulse stacking

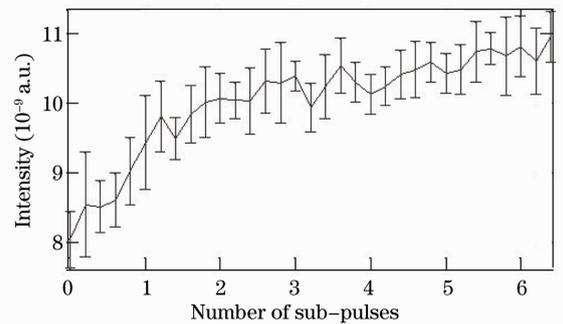


图 12 子脉冲个数和荧光强度的关系

Fig. 12 Relation between number of sub-pulses and fluorescence intensity

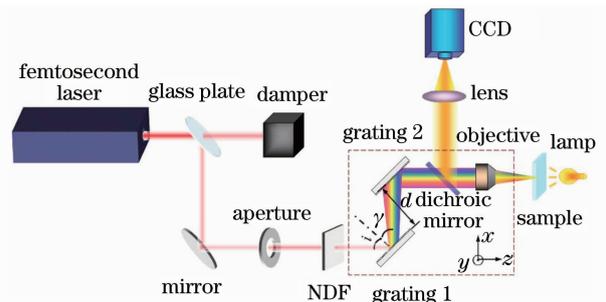


图 13 时域聚焦技术原理图

Fig. 13 Schematic of temporal focusing technology

由于时域聚焦技术的优点,该技术在三维(3D)微加工中具有十分重要的意义。传统的3D微加工通常采用逐点加工的方式进行,速度太慢,无法适用于工业生产;多焦点加工法、多光束干涉法等一些新兴的3D微加工方法虽然在速度上有了很大的提高但是难以加工任意的3D微结构,因此这些方法在进行3D微加工时存在很大的局限性。时域聚焦技术结合掩模方法可以加工任意的3D结构,在结合掩模技术时需要在图13的聚焦物镜前放置两片聚焦透镜且两透镜需要共同焦点,并将在加工中使用的掩模放置在两透镜的共同焦点处。经过时域聚焦整形后光束只在聚焦点附近有很高的能量峰值,而随着离焦点距离的增加能量峰值迅速减小,因而只会在材料上加工出很薄的一层图案,这就能实现3D微结构的逐层加工,在加工中可以不断更换掩模实现各种复杂3D微结构的快速与灵活的加工。图14为美国麻省理工学院利用该技术制作出的“MIT”字样的3D微结构^[43]。与传统的逐点加工方法相比,该技术实现了逐层加工,可以大大提高加工的效率,同时克服了许多新兴技术中难以加工任意3D微结构的弊端。

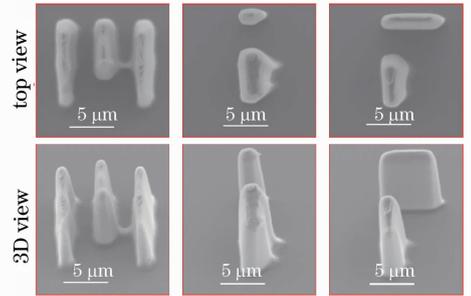


图14 “MIT”标志的3D微加工

Fig. 14 Images of 3D microfabrication of MIT logo

5 结束语

本文从空域整形和时域整形两方面介绍了多种用于实现激光高效率加工的激光光束整形技术。这些激光光束整形技术各有特点,在实际应用中应该根据加工的实际情况来选择合适的方案。空域整形的主要特点是增大每个激光光束的加工范围。时域整形范畴中脉冲序列的主要目标是根据加工要求充分利用激光的能量,同时在机理上增强激光加工的效率;脉冲压缩则是实现激光脉冲能量密度的提高,高效地加工一些高加工阈值的材料。最后还介绍了用于超短脉冲加工的时空光束整形技术。

参 考 文 献

- 1 He Fei, Cheng Ya. Femtosecond laser micromachining frontier in laser precision micromachining[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(5): 595~622
何 飞, 程 亚. 飞秒激光微加工:激光精密加工领域的新前沿[J]. *中国激光*, 2007, **34**(5): 595~622
- 2 David L. Shealy, John A. Hoffnagle. Laser beam shaping profiles and propagation[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(21): 5118~5131
- 3 B. R. Frieden. Lossless conversion of a plane laser wave to a plane wave of uniform irradiance[J]. *Appl. Opt.*, 1965, **4**(11): 1400~1403
- 4 J. L. Kreuzer. Coherent Light Optical System Yielding an Out Beam of Desired Intensity Distribution at a Desired Equiphase Surface[P]. US Patent, 3,476,463, November 4, 1969
- 5 Chen Kai, Li Pingxue, Chen Meng *et al.*. Design and analysis of surface parameters of aspheric lenses system converting Gaussian beam to flattop beam[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(3): 032201
陈 凯, 李平雪, 陈 檬 等. 高斯光束整形为平顶光束的非球面镜系统设计和面形参数分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(3): 032201
- 6 Zhou Yang, He Ping'an, Jiang Qiannian *et al.*. Research of laser beam shaping system[J]. *Optical & Optoelectronic Technology*, 2006, **4**(2): 26~28
周 洋, 何平安, 蒋千年 等. 激光束整形光学系统的设计与研究[J]. *光学与光电技术*, 2006, **4**(2): 26~28
- 7 Lin Yong. Design of Diffractive Optical Elements for Laser Beam Shaping[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009
林 勇. 用于激光光束整形的衍射光学元件设计[D]. 大连:大连理工大学, 2009
- 8 Duan Pu, Li Song, Ye Jianxin. Lidar beam shaping with binary optical elements[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(2): 58~62
段 璞, 李 松, 叶建新. 用于激光雷达光束整形的二元光学元件的设计和研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, **43**(2): 58~62

- 9 Xin Tan, Benyuan Gu, Guozhen Yang *et al.*. Diffractive phase elements for beam shaping: a new design method [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(8): 1314~1320
- 10 Ni Ming, Jiang Zhiping, Lu Qisheng. Using slices of phase for beam shaping[J]. *J. Applied Optics*, 1996, **17**(4): 21~24
倪明, 蒋志平, 陆启生. 利用多相位片实现光束整形[J]. *应用光学*, 1996, **17**(4): 21~24
- 11 Wang Jingcong, Zhang Jingjuan, Huo Junling *et al.*. Design of a phase-only diffractive optical element for control of wavefront propagation[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(12): 1735~1740
王京从, 张静娟, 霍俊岭等. 实现控制波前传播的纯相位衍射光学元件的设计[J]. *光学学报*, 1998, **18**(12): 1735~1740
- 12 B. R. Brown, A. W. Lohman. Computer-generated binary holograms[J]. *IBM J. Res. Develop.*, 1969, **13**(2): 160~168
- 13 M. E. Motamedi, W. H. Southwell, W. J. Gunning. Antireflection surfaces in using silicon binary optics technology[J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(22): 4371~4376
- 14 Wang Wei. Spatial beam shaping realized by annular phase pupil filter[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(7): 070501
王伟. 用于光束整形的环带相位型光瞳滤波器 [J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(7): 070501
- 15 Chen Huaixin, Sui Zhan, Chen Zhenpei *et al.*. Laser beam shaping using liquid crystal light modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(9): 1107~1111
陈怀新, 隋展, 陈祯培等. 采用液晶空间光调制器进行激光光束的空间整形[J]. *光学学报*, 2001, **21**(9): 1107~1111
- 16 Chen Xiaoxi, Huang Ziqiang, Yang Wenjun. Controllable system and design algorithm for laser beam shaping using optical addressing liquid crystal spatial light modulator[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, **39**(1): 47~50
陈晓西, 黄子强, 杨文君. 光寻址液晶空间光调制器用于激光光束整形的可控系统和设计算法[J]. *红外与激光工程*, 2010, **39**(1): 47~50
- 17 Yu Zhan, Ma Haotong, Du Shaojun. Adaptive near-field beam shaping based on simulated annealing algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0314003
余湛, 马浩统, 杜少军. 基于模拟退火算法的自适应近场光束整形[J]. *光学学报*, 2011, **31**(3): 0314003
- 18 Ma Haotong, Zhou Pu, Wang Xiaolin *et al.*. Near-field beam shaping based on crystal spatial light modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2032~2036
马浩统, 周朴, 王小林等. 基于液晶空间光调制器的激光束近场整形[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 2032~2036
- 19 Wang Xiaofa, Kang Zhijun, Fan Zhongwei *et al.*. Beam shaping of TEM₀₀ Gaussian beam by using diffraction theory[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 0402006
王小发, 康治军, 樊仲维等. 利用衍射理论对基模高斯光束进行整形[J]. *中国激光*, 2011, **38**(4): 0402006
- 20 B. M. Van Wonterghem, J. T. Salmon, R. W. Wilcox. Beamlet Pluse-Generation and Wavefront-Control System[R]. UCRL-LR-105821-95-1, 1995
- 21 Yang Xiangtong, Fan Wei. Spatial laser beam shaping using birefringent lenses[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11): 1698~1704
杨向通, 范薇. 利用双折射透镜组实现激光束空间整形[J]. *光学学报*, 2006, **26**(11): 1698~1704
- 22 Zhang Zhigang. Femtosecond Laser Technique[M]. Beijing: Science Press, 2011
张志刚. 飞秒激光技术[M]. 北京: 科学出版社, 2011
- 23 Z. Hu, S. Singha, Y. M. Liu *et al.*. Mechanism for the ablation of Si(111) with pairs of ultrashort laser pulses[J]. *J. Appl. Phys.*, 2007, **90**(13): 131910
- 24 Sima Singha, Zhan Hu, Robert J. Gordon. Ablation and plasma emission produced by dual femtosecond laser pulses[J]. *J. Appl. Phys.*, 2008, **104**(11): 113520
- 25 B. Golubovic, R. Austin, M. K. Steinerer-Shepard *et al.*. Double Gires-Tournois interferometer negative-dispersion mirrors for use in tunable mode-locked lasers[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(4): 275~277
- 26 Qiao Jinyuan, Wang Xinglong, Hu Guojiang *et al.*. Negative group-velocity dispersion using prism pair[J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 1995, **12**(4): 361~364
乔金元, 王兴龙, 胡国锋等. 棱镜对引入负群速度色散[J]. *量子电子学报*, 1995, **12**(4): 361~364
- 27 Mikio Yamashita, Shiro Kaga, Kenji Torizuka. Chirp-compensation cavity-mirrors with minimal third-order dispersion for use in a femtosecond pulse laser[J]. *Opt. Commun.*, 1990, **76**(5-6): 363~368
- 28 G. Tempea, F. Krausz, C. H. Spielman *et al.*. Dispersion control over 150 THz with chirped dielectric mirrors[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1998, **4**(2): 213~218

- 29 Wang Xi, Chen Lingling, Yang Weijian *et al.*. New design of chirped mirrors for femtosecond pulse compression [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s1): 89~91
王 希, 陈玲玲, 杨晔健 等. 飞秒激光脉冲压缩用啁啾镜新设计方法[J]. 光学学报, 2008, **28**(s1): 89~91
- 30 E. Treay. Optical pulse compression with diffraction gratings[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1969, **QE-5**(9): 454~458
- 31 Wang Zhongyang, Xu Zhizhan. Study of grating pulse compression in the case of finite beam size[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(2): 151~158
王中阳, 徐至展. 有限束宽下光栅对压缩的理论研究[J]. 光学学报, 2000, **20**(2): 151~158
- 32 R. L. Fork, O. E. Martinez, J. P. Gordon. Negative dispersion using pairs of prisms[J]. *Opt. Lett.*, 1984, **9**(2): 150~152
- 33 Su Hongxin, Cui Jianhua, Wang Kun *et al.*. Applications of PCF in femtosecond laser technologies [J]. *Optical Communication Technology*, 2007, **31**(5): 61~64
苏红新, 崔建华, 王 坤 等. 光子晶体光纤在飞秒激光技术中的应用[J]. 光通信技术, 2007, **31**(5): 61~64
- 34 Zhao Yucheng, Jian Shuisheng, Wang Wei *et al.*. Characteristic study on optical fibre gratings[J]. *Journal of the China Railway Society*, 1996, **18**(6): 29~32
赵玉成, 简水生, 王 圩 等. 啁啾光纤光栅特性研究[J]. 铁道学报, 1996, **18**(6): 29~32
- 35 C. Froehly, B. Colombeau, M. Vampouille. Shaping and Analysis of Picosecond Light Pulses. in E. Wolf, (ed.) *Progress in Optics Vol. 20* [M]. New York: Elsevier, 1983. 63~153
- 36 O. Martinez. 3000 times grating compressor with positive group velocity dispersion: application to fiber compensation in 1.3~1.6 μm region[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1987, **QE-23**(1): 59~64
- 37 J. Heritage, A. Weiner, W. Tomlinson. Analysis of picosecond shape synthesis by spectral masking in a grating pulse compressor[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1986, **QE-22**(5): 682~696
- 38 C. Dorrer, F. Salin, J. P. Huignard. Programmable phase control of femtosecond pulses by use of a nonpixelated spatial light modulator[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(9): 709~711
- 39 A. K. Sharma, T. Tsang, T. Rao. Theoretical and experimental study of passive spatiotemporal shaping of picosecond laser pulses[J]. *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, 2009, **12**(3): 033501
- 40 He Zhigang, Wang Jigang, Jia Qika. Temporal shaping of laser pulse and its improvement to beam emittance[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(7): 1894~1898
何志刚, 王季刚, 贾启卡. 激光脉冲时域整形及其发射度的改善效果[J]. 强激光与粒子束, 2011, **23**(7): 1894~1898
- 41 Zhang Chunfeng. The Setup of the Femtosecond Pulse Shaping System and Its Application in Controlling of the Ablation Process[D]. Changchun: Jilin University, 2009
张春风. 飞秒脉冲整形系统的建立及其用于烧蚀过程的控制[D]. 长春: 吉林大学, 2009
- 42 He Fei, Han Xu, Cheng Ya *et al.*. Fabrication of microfluidic channels with a circular cross section using spatiotemporally focused femtosecond laser pulses[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(7): 1106~1108
- 43 Daekeun Kim, Peter T. C. So. High-throughput three-dimensional lithographic microfabrication[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(10): 1602~1604