

不同偏振态飞秒激光在 PMMA 上的成丝现象

翟中生¹, 郭钊¹, 汪于涛¹, 吕清花², 陈列¹, 娄德元¹, 杨奇彪¹, Peter Bennett¹, 刘顿¹

¹湖北工业大学机械工程学院, 湖北 武汉 430068;

²湖北工业大学理学院, 湖北 武汉 430068

摘要 随着飞秒激光技术的不断成熟和聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)的大量应用,对 PMMA 光学性能的研究逐渐成为研究热点。飞秒激光在透明材料加工过程中会出现成丝现象,分析了自聚焦和丝状物的产生原理。偏振态是激光光束的重要特征之一,利用空间光调制器、1/2 波片和 1/4 波片组合可实现对线偏振光、圆偏振光、径向偏振光和角向偏振光的控制。利用产生的 1 μ J 偏振光在 PMMA 上刻线,对比分析不同偏振光的成丝长短和成丝起始位置。实验结果表明:线偏振光和圆偏振光的成丝长度较短,其中线偏振光的成丝位置距离入射面最近;径向偏振光和角向偏振光的成丝长度较长,且成丝位置距离入射面最远。

关键词 超快光学; 聚甲基丙烯酸甲酯; 自聚焦; 偏振态; 飞秒成丝

中图分类号 TN249 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.123201

Filamentation Phenomenon of Different Polarized Femtosecond Laser in PMMA

Zhai Zhongsheng¹, Guo Zhao¹, Wang Yutao¹, Lü Qinghua², Chen Lie¹,
Lou Deyuan¹, Yang Qibiao¹, Peter Bennett¹, Liu Dun¹

¹ School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology,
Wuhan, Hubei 430068;

² School of Science, Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei 430068

Abstract With the development of femtosecond laser technology and wide applications of polymethyl methacrylate (PMMA), the research on optical properties of PMMA has become a hot spot. Filamentation phenomenon appears in the process of transparent materials by femtosecond laser. Generation principles of self-focusing and filamentous are analyzed. One of the most important characteristics of laser beam is polarization state. Linearly polarized light, circularly polarized light, radially polarized light and angularly polarized light can be controlled by the combination of spatial light modulator, 1/2 wave plate and 1/4 wave plate. Generated polarized light with energy of 1 μ J is used in the line processing on PMMA, and then the comparative analysis is conduct on the length and initial position of filamentation under different polarized light. Experimental results show that linearly polarized light and circularly polarized light result in filamentation with short length, and filamentation position of linearly polarized light is close to the incident plane. Radially polarized light and azimuthally polarized light result in long length, and the distance of filamentation position to the incident plane is long.

Key words ultrafast optics; polymethyl methacrylate; self-focusing; polarization state; femtosecond filamentation

OCIS codes 320.2250; 160.2750; 260.5430

1 引言

成丝是飞秒激光在透明介质中进行传播时入射脉冲的功率超过临界阈值时形成的一种现象^[1]。成丝现

收稿日期: 2017-06-07; **收到修改稿日期:** 2017-07-12

基金项目: 国家自然科学基金(51575164, 51405143)、国家科技支撑计划(2015BAF20B03)、湖北省自然科学基金(2014CFB596)、湖北省科技支撑计划(2015BAA066)、光纤光缆制备技术国家重点实验室基金(SKLD103)

作者简介: 翟中生(1978—),男,博士,教授,主要从事激光加工、光电检测方面的研究。E-mail: zs.zhai@hbut.edu.cn

象以其独特的优势,在遥感、激光凝结、脉冲压缩和控制引雷等领域应用广泛^[2]。成丝现象涉及衍射和群速度色散等线性光学过程和克尔效应、电离与等离子体散焦等非线性光学过程,在非线性效应中,克尔效应特别是高阶克尔效应已成为研究热点^[1]。1964年 Hercher^[3]在进行固体光损伤的实验过程中发现了成丝现象。但是,由于实验条件的限制,该研究在一段时间内并未引起很大的反响。1972年 Reintjes 等^[4]在探索皮秒激光脉冲、二硫化碳与玻璃相互作用的特性时,也发现了激光成丝现象,而且还发现了红光光谱展宽等物理现象。

探究成丝原理的研究也有很多。Chiao 等^[5]提出了基于连续波理论的自陷模型。Loy 等^[6]提出了移动焦点模型的理念,认为激光脉冲自聚焦产生的移动焦点会形成条纹光线。在移动焦点模型和自引导模型的基础上,Mlejnek 等^[7]提出了空间动态补偿模型,该研究在一定程度上将空间动态补偿过程总结为脉冲聚焦-散焦-聚焦的循环。上述关于成丝应用的研究较多,而对飞秒激光在聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)中应用的研究相对较少。飞秒激光具有损伤阈值低、热效应小以及加工精度高等优点,在超快领域、高精度加工和材料表面处理等方面有着极为广泛的应用^[8]。纯净的 PMMA 是一种常见的光学热塑性材料,具有机械性能良好、透光率高、成本低、使用方便的特点,非常适合用于制作光子器件,在临床、生物和化学领域得到了大量的应用^[9-10]。激光光束的重要特征参数之一是偏振态,偏振态在成像、编码等方面均有广泛应用^[11-12]。近年来,不同偏振态的光在激光精细加工领域受到的关注度越来越高^[13]。鉴于偏振态的特性以及飞秒成丝的应用,本文简单阐述了飞秒激光在透明材料中成丝的原理;搭建了光路以控制激光的偏振态,在同一能量(1 μJ)下对 PMMA 进行实验,针对实验结果分析不同偏振态的飞秒激光在 PMMA 上成丝的特性。

2 理论分析

2.1 多种偏振态控制

偏振光是按照其光矢量的振动方向来定义和划分的。应用较多的均匀偏振光包括线偏振光、圆偏振光、椭圆偏振光等。常见的线偏振光有横电(TE)光和横磁(TM)光,两者的电矢量相互垂直,利用 1/2 波片和检偏器可实现 TE 光和 TM 光。常见的圆偏振光包括右旋圆偏振(RC)光和左旋圆偏振(LC)光,两者的电矢量也相互垂直,通过调节 1/2 波片和 1/4 波片可实现 RC 光和 LC 光。非均匀偏振光又称矢量偏振光,其高度对称性的偏振方向使其与传统的偏振光束有很多显著不同的特性。最近的研究发现,具有轴对称电矢量的径向偏振(RP)光和角向偏振(AP)光在物理性能及材料加工方面具有不可替代的优势^[14]。因此,对多种偏振光的控制显得尤为重要。

本文设计了激光光束偏振态的控制方法。该方法中,激光发出的线偏振光经过 1/2 波片、空间光调制器(SLM)和 1/4 波片 3 个关键器件,其中 1/2 波片和 1/4 波片的快轴与 x 轴的夹角分别为 α_1 和 α_2 ,SLM 中将加载不同的灰度图像。所提方法能方便、快速地输出 4 种不同偏振态的光束。根据光束的旋转和波片及 SLM 的琼斯矩阵,得到输出光束的琼斯矩阵为^[15]


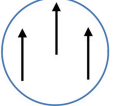

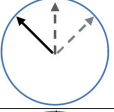
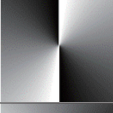
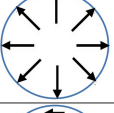

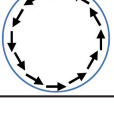
$$\mathbf{J}_{\text{out}} = \mathbf{J}_Q \cdot \mathbf{R}_{\alpha_2} \cdot \mathbf{J}_{\text{SLM}} \cdot \mathbf{R}_{-\alpha_1} \cdot \mathbf{J}_H \cdot \mathbf{R}_{\alpha_1} \cdot \mathbf{J}_{\text{in}}, \quad (1)$$

式中 \mathbf{J}_Q 、 \mathbf{J}_H 和 \mathbf{J}_{SLM} 分别为 1/4 波片、1/2 波片和 SLM 的琼斯矩阵, \mathbf{J}_{in} 为入射光的矩阵, \mathbf{R}_{α_2} 、 $\mathbf{R}_{-\alpha_1}$ 和 \mathbf{R}_{α_1} 分别为 1/2 波片、1/4 波片和 SLM 对应光束的旋转矩阵。从(1)式可以看出,出射光的偏振态主要受 α_1 、 α_2 和 SLM 所加载的灰度图的影响。

由上述分析可以得出:当 α_1 与 α_2 取不同的角度时,利用 SLM 所加载的数字全息图能够输出 4 种不同偏振态的出射光,具体结果如表 1 所示。

实际操作过程中,为了得到质量较好的偏振光、方便后续研究,需要改变 SLM 对加载的灰度图作用的中心点,使其与 CCD 相机中的光斑中心点重合。

表1 4种不同偏振态的输出结果
Table 1 Output results of four different polarization states

| Polarization state | Rotation angle of 1/2 wave plate /($^{\circ}$) | Hologram | Rotation angle of 1/4 wave plate /($^{\circ}$) | Distribution of optical field |
|-----------------------|--|---|--|---|
| Linear polarization | 0 |  | 0 |  |
| Circular polarization | 0 |  | -45 |  |
| Radial polarization | 22.5 |  | -45 |  |
| Angular polarization | 22.5 |  | -45 |  |

2.2 飞秒激光作用透明材料成丝理论

在探究飞秒激光的成丝现象时,其基本物理机制涉及光学克尔效应和等离子体效应,其中折射率的变化是需要研究的首要因素。由克尔效应引起的折射率变化为

$$\Delta n_{kr} = n_2 I, \quad (2)$$

式中 n_2 为材料的非线性折射率, I 为激光光强,二者可分别表示为

$$n_2 = \frac{3\eta}{n_0 \epsilon_0} \chi^{(3)}, \quad (3)$$

$$I = \frac{|A|^2}{2\eta}, \quad (4)$$

式中 A 为脉冲包络的振幅; η 为介质的阻抗, $\eta = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}/n_0$, 其中 n_0 为传播过程中的线性折射率, μ_0 和 ϵ_0 分别为真空中的磁导率和介电常量; $\chi^{(3)}$ 为三阶电磁化率。假设激光传播时光强能量不能均匀地分布在传播的横截面上,则会使得相位速度不相同。若一束高斯激光光束的光强由光束中心向边缘径向衰减,可以得出高斯光束中心的相位速度要比周围小一些。综合而言,相位速度的不同会使激光在介质中传播时在形似凹面的平面上会聚,这就是光束的自聚焦效应^[16-17]。在自聚焦效应中,只有当入射激光功率 P_{in} 超过自聚焦的阈值时,自聚焦才会克服衍射发生^[18]。自聚焦的阈值功率可表示为

$$P_{cr} = \frac{3.72\lambda^2}{8\pi n_0 n_2}, \quad (5)$$

式中 λ 为波长。根据半径经验公式,可得到成丝位置为^[19]

$$L = \frac{0.367L_{df}}{[(\sqrt{P_{in}/P_{cr}} - 0.852)^2 - 0.0219]^{1/2}}, \quad (6)$$

式中 L_{df} 为光束的瑞利长度。

本次实验是对不同偏振态的飞秒激光在 PMMA 中成丝现象的研究,激光脉冲在 PMMA 中的成丝过程比在空气中更为复杂。强激光与材料的相互作用是最基本的电离过程,且飞秒激光的光强能够上升到 $10^{10} \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ 数量级^[20], 因此可认为飞秒激光在与 PMMA 作用时,产生多光子电离和雪崩电离效应。为了更好地分析飞秒激光与 PMMA 材料的相互作用,需要对若干个因素进行约束^[21], 即设激光在介质玻璃内部深入传输时,一定范围的损伤区域之间互不影响而且整体材料的损伤阈值为定值。在玻璃中飞秒激光成丝长度的比较过程中存在的能量消耗可以用介质电离产生的自由电子密度来衡量,由于在玻璃中产生的能量消耗比在空气中高出两个数量级,因此在玻璃中成丝的长度比空气中短很多。

以一束沿 z 轴方向传播的线偏振飞秒激光为例进行分析,其电场包络为

$$E = \epsilon \cos(kz - \gamma_0 t), \quad (7)$$

式中 $k = n_0 \gamma_0 / c$ 为波数, 其中 n_0 为玻璃的线性折射率, γ_0 为脉冲的中心频率, c 为光速; ϵ 为一个随时间和传播距离变化的缓变函数; t 为时间。

标量 ϵ 满足传播方程^[22]

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial z} = \frac{i}{2k} \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \right) \epsilon - i \frac{k^*}{2} \frac{\partial^2 \epsilon}{\partial \tau^2} + ik_0 n_2 |\epsilon|^2 \epsilon - \left(\frac{\sigma}{2} + i \frac{k_0}{2\rho_c} \right) \rho \epsilon - \frac{\beta^{(\Gamma)}}{2} |\epsilon|^{2\Gamma-2} \epsilon, \quad (8)$$

式中等号右边各项分别表示光束的横向衍射、玻璃的群速度色散效应、非线性自聚焦、等离子体散焦及吸收、多光子吸收现象; k^* 为玻璃的色散系数, $k^* = (\partial^2 k / \partial \gamma^2) |_{\gamma_0}$; $\tau = t - z/v_g$, 其中 v_g 为脉冲在玻璃中传播的群速度; σ 为等离子体的吸收截面, $\sigma = k\gamma_0 \tau_c / [n_0^2 \rho_c (1 + \gamma_0^2 \tau_c^2)]$, 其中 ρ_c 为等离子体电子的临界密度, τ_c 为电子的碰撞时间; Γ 为电子在玻璃的导带、价带之间跃迁需吸收的光子数; $\beta^{(\Gamma)} = \Gamma \hbar \gamma_0 \sigma_r \rho_{at}$ 为多光子吸收系数, 其中 σ_r 为多光子电离系数, ρ_{at} 为玻璃的原子密度。

利用激光脉冲在玻璃中的传播方程, 可以近似得到^[23]

$$\frac{dP}{dz} = -\beta^{(\Gamma)} I^{\Gamma-1} P, \quad (9)$$

式中 P 为功率。定义衰减因子为

$$\alpha = \beta^{(\Gamma)} I^{\Gamma-1}. \quad (10)$$

脉冲在传播时, 功率变化遵循比尔定律, 则

$$P = P_0 \exp(-\alpha z), \quad (11)$$

式中 P_0 为脉冲的峰值功率。

利用上述对飞秒激光在 PMMA 中传播的相关理论, 可以推导和估算出飞秒激光在玻璃中光丝的长度和成丝的起始位置, 并且由于控制飞秒激光的偏振态不同, 使得包络电场方程不同, 飞秒激光脉冲在玻璃中的传播方程也不同, 呈现出的光丝长度和成丝起始位置必定会不同。

3 实验设计及实验装置

所设计的实验装置光路原理图如图 1 所示, 采用的飞秒激光器型号为 Clark-MXR CPA-2010, 中心波长为 775 nm, 脉冲宽度为 250 fs, 重复频率为 5 kHz。利用衰减装置使激光器的能量产生衰减, 并利用 1/2 波片、1/4 波片、SLM 以及灰度图相互配合的原理, 结合检偏器分别产生线偏光 TE 光和 TM 光、圆偏光 RC 光和 LC 光、径向偏振光以及角向偏振光, 最后通过焦距 $f = 50$ mm 的聚焦透镜在材料上进行聚焦实验。加工样品材料采用 PMMA, 每次实验加工之前都要对材料的侧面进行研磨和光学抛光处理, 在入射端测得不同偏振态光束的单脉冲能量均为 $1 \mu\text{J}$ 。利用每一种光进行两次加工, 可取得 12 个数据, 利用光学显微镜测量加工完成后样品的光丝长度。

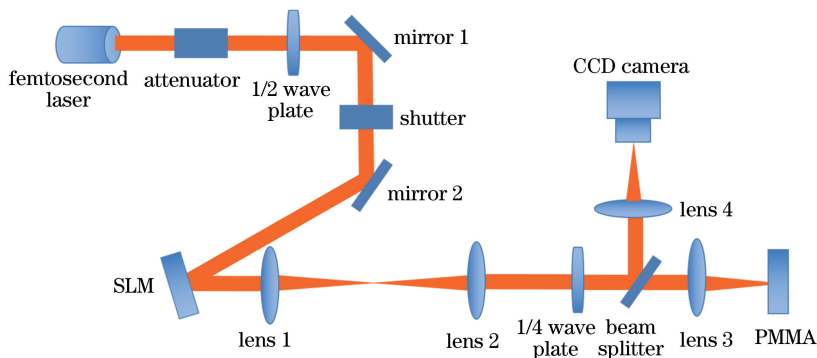


图 1 实验原理图

Fig. 1 Experimental schematic

4 实验结果及分析

利用飞秒激光,结合 4 种偏振态:线偏振(TE 和 TM)态、圆偏振(RC 和 LC)态、径向偏振态和角向偏振态,分别在透明材料 PMMA 中加工时均可发现飞秒成丝现象,并可用显微镜观察得到对应的成丝长度。不同偏振光的飞秒成丝图如图 2 所示。

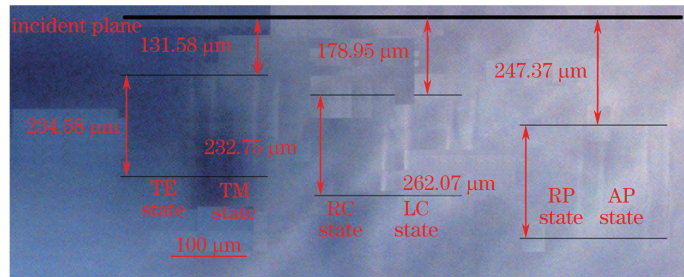


图 2 不同偏振光的飞秒成丝图

Fig. 2 Femtosecond filamentation diagram of different polarization light

由显微镜观测到 4 种偏振态的成丝长度分别为:线偏振(TE 和 TM)态的成丝长度为 $234.58 \mu\text{m}$,圆偏振(RC 和 LC)态的成丝长度为 $232.75 \mu\text{m}$,径向偏振态和角向偏振态的成丝长度均为 $262.07 \mu\text{m}$ 。从图 2 可以看出,线偏振光与圆偏振光在单脉冲能量为 $1 \mu\text{J}$ 的作用下,PMMA 中的飞秒成丝长度差别极小,不超过 1%。而同一情况下,径向偏振光与角向偏振光在 PMMA 中的成丝长度明显比前两种偏振光长。因为径向偏振光和角向偏振光的电矢量具有轴对称特性,这使得光在沿着某一方向的晶体内部传播时,不会产生电场矢量串扰现象^[24]。此外,径向偏振光和角向偏振光分别在径向和轴向有很强的光强,而垂直方向可达到光强极小值^[25],这样会使得飞秒激光脉冲在自聚焦的作用下更好地克服激光脉冲在传输过程中产生的光波线性衍射。4 种偏振光在 PMMA 中的传播过程中,径向偏振光和角向偏振光的色散更小,因此其成丝长度比线偏振光和圆偏振光的更长。

图 2 中上方加粗的黑线表示光束在 PMMA 上的入射面,可以看出距离光束入射面的线偏振光位置最靠前,圆偏振光次之,径向偏振光和角向偏振光靠后。利用软件测定不同偏振态的光在玻璃中的成丝位置与入射面的距离 d ,具体值分别为:对于线偏振(TE 和 TM)光, $d = 131.58 \mu\text{m}$;对于圆偏振(RC 和 LC)光, $d = 178.95 \mu\text{m}$;对于径向偏振光和角向偏振光, d 均为 $247.37 \mu\text{m}$ 。对于线偏振光和圆偏振光而言,圆偏振光自聚焦的临界阈值是线偏振光的 1.5 倍,即圆偏振光自聚焦时需要的能量比线偏振光多^[26],导致二者的成丝起始位置不同。已有研究表明入射光偏振角度对成丝位置是有影响的,成丝位置随着偏振角度呈周期性变化,在偏振角度为 0° 、 90° 、 180° 时距离入射面最近,在偏振角度为 45° 、 135° 时距离入射面最远^[19]。由表 1 可知,在控制 4 种偏振态时,1/2 波片与 1/4 波片转动的夹角是不同的,因此成丝的起始位置呈现出实验结果所显示的变化。

5 结 论

搭建实验光路,利用 SLM、1/2 波片和 1/4 波片的共同作用得到稳定的 4 种偏振态飞秒激光。实验发现飞秒激光在 PMMA 上刻线时会出现成丝现象,而且不同偏振光的加工呈现不同的状态。线偏振光与圆偏振光的成丝长度接近,而电矢量呈轴对称的径向偏振光与角向偏振光的成丝长度基本相同,并明显长于前两种偏振光束,说明光在同一介质中传播时能量损失更少,该结果在实际应用具有一定的指导意义。成丝位置与不同偏振态的飞秒激光入射至 PMMA 上加工面的距离是有差别的,距离从小到大依次为:线偏振光、圆偏振光、径向偏振光和角向偏振光。

参 考 文 献

- [1] Qi X X, Ma C L, Lin W B. Pressure effects on the femtosecond laser filamentation[J]. Optics Communications, 2016, 358: 126-131.

- [2] Sun Xiaodong. Control of multiple filaments during femtosecond laser filamentation[D]. Tianjin: Nankai University, 2012: 1-5.
孙晓东. 飞秒激光成丝现象中多丝控制的研究[D]. 天津: 南开大学, 2012: 1-5.
- [3] Hercher M. Laser-induced damage in transparent media[J]. Journal of the Optical Society of America B, 1964, 54(4): 563-567.
- [4] Reintjes J, Carman R L. Direct observation of the orientational Kerr effect in the self-focusing of picosecond pulses[J]. Physical Review Letters, 1972, 28(26): 1697-1700.
- [5] Chiao R, Garmire E. Self-trapping of optical beams[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1966, 2(4): 126-127.
- [6] Loy M M T, Shen Y R. Small-scale filaments in liquids and tracks of moving foci[J]. Physical Review Letters, 1969, 22(19): 994-997.
- [7] Mlejnek M, Wright E M, Moloney J V. Dynamic spatial replenishment of femtosecond pulses propagating in air[J]. Optics Letters, 1998, 23(5): 382-384.
- [8] Liu Bin, Dai Yutang, Yin Guanglin, *et al.* Exploration on ultrasonic vibration aided femtosecond laser machining process of fiber optic materials[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(3): 0303005.
刘斌, 戴玉堂, 殷广林, 等. 超声波辅助飞秒激光加工光纤材料的工艺探索[J]. 中国激光, 2016, 43(3): 0303005.
- [9] Liu Baoguang, Wang Xiao, Liu Wei, *et al.* Process optimization of laser transmission spot welding using material PMMA for automotive industry[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(5): 0503004.
刘保光, 王霄, 刘伟, 等. 激光透射点焊车用材料 PMMA 的工艺优化[J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0503004.
- [10] Ye L, Perrie W, Allegre O J, *et al.* NUV femtosecond laser inscription of volume Bragg gratings in poly (methy) methacrylate with linear and circular polarizations[J]. Laser Physics, 2013, 23(12): 126004.
- [11] Zhai Zhongsheng, Hu Yongtao, Lü Qinghua, *et al.* Research on controlling the polarization state of laser beam with a spatial light modulator[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(3): 032601.
翟中生, 胡勇涛, 吕清华, 等. 基于空间光调制器的光束偏振态控制方法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(3): 032601.
- [12] Davis J A, Evans G H, Moreno I. Polarization-multiplexed diffractive optical elements with liquid-crystal displays[J]. Applied Optics, 2005, 44(19): 4049-4052.
- [13] Tang Yanfu, Nie Zhenwei. Study on periodic ripples on metallic surfaces induced by polarized lasers[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(7): 0702002.
唐延甫, 聂真威. 偏振激光诱导金属表面周期条纹结构机理的研究[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0702002.
- [14] Zhou Zhehai. Formation, properties and applications of axially symmetric polarized beams [D]. Beijing: Tsinghua University, 2010: 15-46.
周哲海. 轴对称偏振光束的生成、特性及应用[D]. 北京: 清华大学, 2010: 15-46.
- [15] Hu Yongtao, Zhai Zhongsheng, Lü Qinghua, *et al.* Parallel processing with femtosecond laser using spatial light modulator[J]. Journal of Applied Optics, 2016, 37(2): 315-320.
胡勇涛, 翟中生, 吕清华, 等. 基于空间光调制器的飞秒并行加工方法研究[J]. 应用光学, 2016, 37(2): 315-320.
- [16] Shen Y R. The principles of nonlinear optics[M]. New York: Wiley, 1984.
- [17] Boyd R W. Nonlinear Optics[M]. Boston: Academic Press, 2003.
- [18] Hu Y Z, Nie J S, Ye Q, *et al.* Femtosecond laser filamentation with different atmospheric pressure gradients[J]. Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 2016, 127(23): 11529-11533.
- [19] Meng Xianfei. Study on supercontinuum spectrum in fused silica and barium fluoride by femtosecond laser [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014: 29-32.
孟宪飞. 飞秒激光在石英玻璃及氟化钡中产生超连续辐射的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2014: 29-32.
- [20] Liu Zhi, Li Ruxin, Yu Wei, *et al.* Heating of planar metal targets by ultrashort laser pulses[J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(10): 1297-1304.
刘智, 李儒新, 余玮, 等. 飞秒超短脉冲激光加热金属平面靶[J]. 光学学报, 2000, 20(10): 1297-1304.
- [21] Vogel A, Nahen K, Theisen D, *et al.* Plasma formation in water by picosecond and nanosecond Nd:YAG laser pulses. I. Optical breakdown at threshold and super threshold irradiance[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1996, 2(4): 847-860.

- [22] Qi X X, Ma C L, Lin W B. Pressure effects on the femtosecond laser filamentation[J]. Optics Communications, 2016, 358: 126-131.
- [23] Rong Hua. Study on the interaction of femtosecond laser with glass and "light filament" [D]. Tianjin: Nankai University, 2007: 38-39.
荣华. 飞秒激光与玻璃相互作用及"光丝"的研究[D]. 天津: 南开大学, 2007: 38-39.
- [24] Tang Xinchun, Gao Jiancun, Wang Kun, *et al.* Generation of a radially polarized light and its applications[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(3): 030001.
唐新春, 高健存, 王坤, 等. 径向偏振光的产生方法及应用[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(3): 030001.
- [25] Wang Zhenhua, Li Jingsong. The generation of a radially polarized beam and its application in the modern optics[J]. Laser Journal, 2009, 30(1): 8-10.
王振华, 李劲松. 径向偏振光的产生及在现代光学中的应用[J]. 激光杂志, 2009, 30(1): 8-10.
- [26] Couairon A, Mysyrowicz A. Femtosecond filamentation in transparent media[J]. Physics Reports, 2007, 441(2/3/4): 47-189.