

文章编号 : 0253-2239( 2001 )09-1107-05

# 采用液晶空间光调制器进行激光光束的空间整形\*

陈怀新<sup>1)</sup> 隋展<sup>2)</sup> 陈祯培<sup>1)</sup> 安波<sup>1)</sup> 李明中<sup>2)</sup>

( 1 ), 四川大学光电科学技术系, 成都 610064  
( 2 ), 中国工程物理研究院核物理化学研究所, 绵阳 621900)

摘要: 提出采用液晶空间光调制器进行激光束的实时、可调控光束空间整形的新方法, 研究了液晶空间光调制器的光学调制特性, 用液晶空间光调制器实时产生的软边切趾光阑与空间滤波器结合, 有效地对任意光束进行空间整形, 获得光束填充因子高、近“平顶”光强的光束近场分布。

关键词: 激光光束整形; 液晶空间光调制器; 软边光阑

中图分类号: TN241 文献标识码: A

## 1 引 言

在高功率激光系统中, 激光光束的传输与放大, 需要对输出的激光光束整形(几何形状与光强分布)与放大介质口径匹配, 并抑制光阑切趾光束带来的衍射调制和小尺度的高频空间噪声, 改善光场的近场分布, 获得填充因子高的近“平顶”光强分布的超高斯型光束, 才能有效地控制光束质量, 提升激光系统的输出功率。

目前, 通常的光束空间整形方法是采用针对特定输入光束(如均匀或高斯光束)的切趾光阑(如锯齿、波纹光阑)或结合空间滤波进行光束空间整形<sup>[1~4]</sup>, 而实际输入的光束并非是这样的理想型光束, 所以上述方法在光束的空间整形中存在一定局限性。因此, 研究实时、可调的光束空间整形尤为重要。对此, 本文提出了采用液晶空间光调制器(LC-SLM)进行激光束的实时、可调控光束空间整形的新方法, 即根据液晶空间光调制器的光学调制特性, 实时产生与入射光束相关的软边切趾光阑, 结合空间滤波, 获得所需形状的近“平顶”光强分布的近场光束。

## 2 光束空间整形的理论分析

### 2.1 光波的自由空间传播的衍射光场

根据光波标量衍射的惠更斯-菲涅耳理论, 入射光场  $u(x_0, y_0, 0)$  通过切趾孔径  $A$  后的衍射场为

$$u(x, y, z) = C \iint_A u(x_0, y_0, 0) \times \exp\left\{-i \frac{2P}{\lambda z} [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2]\right\} dx_0 dy_0, \quad (1)$$

其中

$$C = \exp[i kz + (k/2z)(x^2 + y^2)] i \lambda z. \quad (2)$$

所以, 入射光场通过软边光阑对  $A$  的衍射场表示为

$$u(x, y, z) = C \iint_A f(x_0, y_0) T(x_0, y_0) \times \exp\left\{-i \frac{2P}{\lambda z} [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2]\right\} dx_0 dy_0, \quad (3)$$

其中,  $f(x_0, y_0)$  为入射平面波的复振幅分布,  $T(x_0, y_0)$  为边缘透射率为缓变的软边光阑大小。如光阑从中心到边缘, 振幅透射率逐渐减小, 呈高斯或超高斯分布变化:

$$T(r, \theta) = T_0 \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{r}{r_0}\right)^n\right], \quad (4)$$

其中  $r_0$  为高斯或超高斯分布的半宽度, 那么根据(3)式, 可计算出入射光束通过此光阑切趾整形的衍射光场。

### 2.2 基于空间滤波像传递的成像衍射

高功率激光系统, 光束的传输与放大都是采用空间滤波进行分级传输与放大。空间滤波系统不仅采用像传递方式缩短光束的有效衍射距离, 而且通过滤波抑制高频衍射调制, 对光束进行平滑。采用软边光阑切趾结合空间滤波的光路如图 1 所示。

对于光阑切趾与空间滤波光学系统的光束传输, 若定义  $L$  为出射场离光阑像面的距离, 根据平面波角谱理论, 则可得到光束传输到  $L$  处的光强分

\* 中国工程物理研究院院外基金(98020206)资助课题。

收稿日期: 2000-04-17; 收到修改稿日期: 2000-08-14

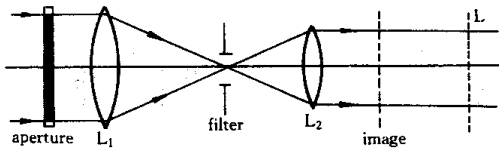


Fig. 1 Soft-edge serrated aperture and filter-image-relaying system

布为：

$$U(f_x, f_y, L) = U_0(f_x, f_y, 0) \otimes T(f_x, f_y) \times \exp\{j2\pi L(f_x^2 + f_y^2)\}, \quad (5)$$

$$U(x, y, L) = \iint U(f_x, f_y, L) \times \exp\{j2\pi(xf_x + yf_y)\} df_x df_y, \quad (6)$$

其中,  $U_0(f_x, f_y, 0)$  和  $T(f_x, f_y)$  分别是入射光场  $U_0(x_0, y_0, 0)$  和光阑透射率  $T(x_0, y_0)$  的傅里叶变换  $\otimes$  代表卷积运算。滤波小孔函数为

$$t(x, y) = \begin{cases} 1 & |x|, |y| \leq d/2, \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (7)$$

空间滤波器相对孔径  $d$  [截止频率  $\xi = d(2\lambda f)$ ] 大小的选取是为了隔离高频分量, 以尽量滤掉下一级的光学器件最敏感的空间频率分量和入射面的阵列网格结构。

根据(5)式~(7)式, 借助于快速傅里叶算法, 可计算光阑切趾与空间滤波的成像衍射光场。在研究光波的近场衍射时, 衍射区域由菲涅耳数  $FN = a^2/\lambda z$  来表征, 其中  $a$  为光束的宽度,  $z$  为传播距离。根据数值模拟, 在研究感兴趣的区域(菲涅耳数  $FN = 10 \sim 40$ ), 12 阶超高斯光束衍射调制较小, 所以, 首先采用光阑切趾法获得需要形状、近似为 12 阶超高斯光束, 再借助滤波来提高整形光束的均匀性。

### 3 基于液晶空间光调制器的激光光束空间整形系统与实验研究

#### 3.1 基于液晶电视的激光光束空间整形系统

以电写入液晶空间光调制器为核心, 结合滤波、CCD 采集、监视器及计算机组成的实时、可调控的激光光束空间整形系统如图 2 所示。其中, 电写入液晶空间光调制器采用  $26.88 \text{ mm} \times 20.16 \text{ mm}$  (1.3 英寸)  $600 \text{ 像素} \times 800 \text{ 像素}$  的 Sony LCX016ALD7 型电寻址的液晶电视, 并由计算机控制来实时产生所需的软边光阑, 输出光场光强分布由面阵 CCD (大恒 MTV-1501CB 型) 采集。在液晶电视后加偏振棱镜 P 来提高显示的软边光阑的对比度。

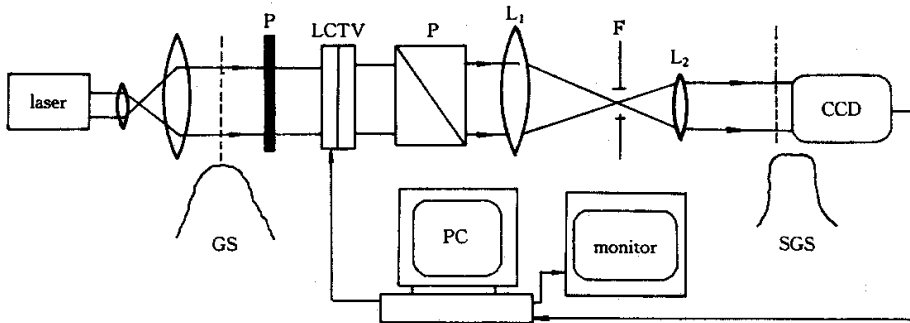


Fig. 2 Laser beam shaping system using electrical address LCTV

#### 3.2 液晶空间光调制器的调制特性

液晶空间光调制器的一般结构如图 3 所示, 它

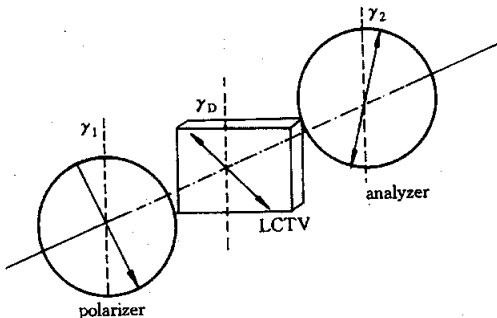


Fig. 3 Diagram of the SLM model used in the experiment

由两偏振片夹一液晶显示层构成。现在最通行的电寻址液晶空间光调制器是薄膜晶体管透射阵列式液晶电视, 这种电寻址液晶空间光调制器能方便地与计算机接口, 在设定的光学调制模式下, 实现相应的单元像素的振幅或相位的调制。

液晶空间光调制器主要是通过液晶分子的旋光偏振性和双折射性来实现对入射光束的波面振幅和相位的调制, 即其光学调制特性主要是旋光偏振性和双折射性。

根据琼斯矩阵分析方法和液晶分子的构造特性, 导出的液晶分子的 Lu-Saleh 模型为: 由扭曲向

列(TN)液晶分子构造的薄膜晶体管型液晶电视,其光透射率为<sup>[5]</sup>

$$T = \left\{ \frac{\alpha}{\gamma} \sin \gamma \sin [\alpha + (\psi_1 - \psi_2)] + \cos \gamma \cos [\alpha + (\psi_1 - \psi_2)] \right\}^2 + \left\{ \frac{\beta}{\gamma} \sin \gamma \cos [\alpha - (\psi_1 + \psi_2) + 2\psi_D] \right\}^2. \quad (8)$$

出射的光为线偏振光,其相移为

$$\delta = \beta + \arctan \left\{ \frac{(\beta/\gamma) \sin \gamma \cos [\alpha - (\psi_1 + \psi_2) + 2\psi_D]}{[(\alpha/\gamma) \sin \gamma \sin [\alpha + (\psi_1 - \psi_2)] + \cos \gamma \cos [\alpha + (\psi_1 - \psi_2)]]} \right\}, \quad (9)$$

其中

$$\beta = \frac{\pi d}{\lambda} [n_e(V) - n_o], \quad \gamma = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}, \quad (10)$$

这里  $\psi_1$ 、 $\psi_2$  和  $\psi_D$  分别是前后偏振片偏振方向和液晶电视的前表面取向与竖直方向的夹角,  $\alpha$  为液晶分子的扭曲角(约为  $\pi/2$ ),  $d$  为液晶分子层的厚度,  $n_e$  和  $n_o$  为双折射 e 光和 o 光的折射率。通过设置不同的偏振片的相对偏振方位  $\psi_1$  与  $\psi_2$ , 改变加在液晶像素上的电压  $V$  (实际是改变相应输入图像的灰度值, 因图像的灰度值与  $n_e$  或  $\beta$  值有单值对应性), 可获得相应液晶空间光调制器的调制模式与调制特性曲线。如选择适当的结构参数(如  $\psi_1 = \psi_D$ ,  $\psi_2 = \psi_D + \alpha - 88^\circ$  时)根据(8)式、(9)式, 采用计算机数字计算可得到如图 4 所示的液晶电视振幅透射率  $T$  和相位  $\delta$  随双折射参数  $\beta$  变化的调制特性曲线。

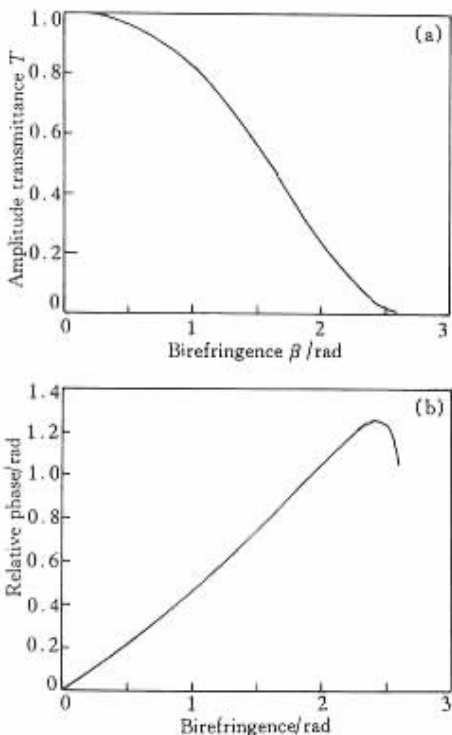


Fig.4 In amplitude modulation mode. (a) Amplitude transmittance  $T$ ; (b) Relative phase

从图 4 可看出,液晶电视的振幅透射率变化范围大(0~1),而其相位调制小(最大相位调制小于  $0.398\pi$ ),故近似为液晶电视处于振幅调制模式。因此可在振幅模式下,实时显示软边砌趾光阑,而不会对波前带来大的畸变影响。

### 3.3 实验研究与结果分析

用图 2 所示的光学系统进行了激光光束的空间整形实验研究,包括对入射光进行扩束、准直,液晶电视显示的软边光阑进行光束切趾,再采用像传递滤波将光束进行缩束、平滑。实验采用波长为  $0.6328 \mu\text{m}$ 、功率为 10 mW 的 He-Ne 激光器产生输入光束。

确定软边切趾光阑透射率函数的方法是:首先在无光阑情况下,由 CCD 采集入射光束的光强分布,如图 5 所示。

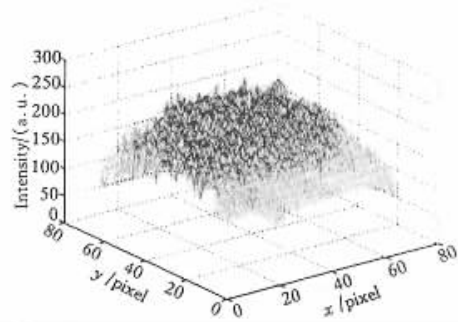


Fig.5 Intensity distribution of illuminating light

其次,设定对入射光束切趾后获得(方形的)超 高斯光束,采用数值图像处理技术,可确定切趾软边光阑的透射率函数分布,如图 6 所示(规一化分布)。

由计算机存储的软边光阑数据,根据液晶电视的调制特性曲线,便可将切趾软边光阑实时显示于液晶电视上,选择适当孔径大小的滤波小孔( $d$  约为 2 mm)滤掉高频调制的空间频率分量和入射面的阵列网格结构,在输出面上采集到整形光束的光强分布。

图 7 为获得的近“平顶”的衍射输出光束的光强分布(对应 FN 为 27)。

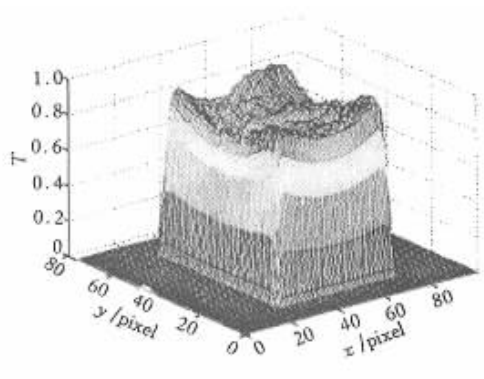


Fig.6 Transmission function of soft-edge apodized aperture

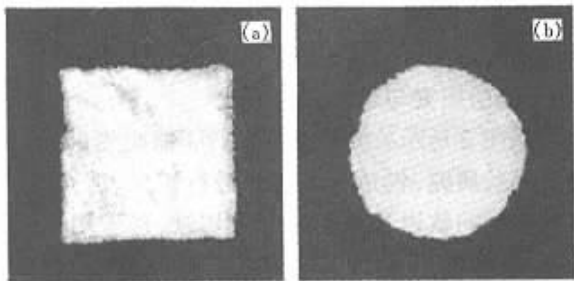


Fig.7 Intensity of laser beam shaping photographed by CCD. (a) Square ;(b) Circular

图 8 为图 7(a) 的三维与截面显示图。图 9 为图 7(b) 的三维与截面显示图。

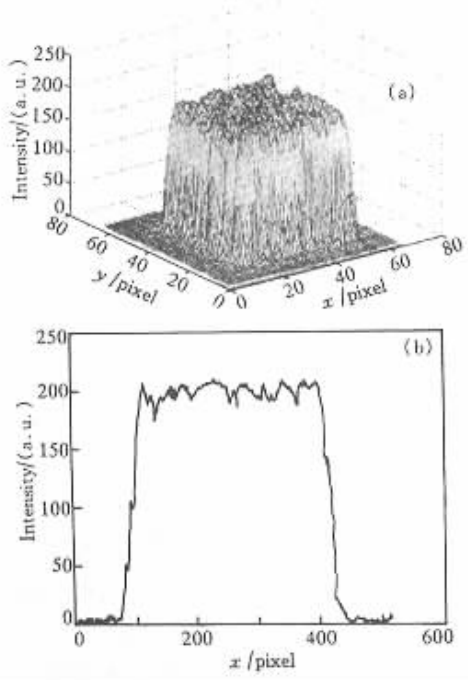


Fig.8 Intensity distribution of shaped square beam for Fig.7(a):(a) 3 dimension ;(b) Cross-section

由图 5~图 9 可看出,对激光光束的空间整形效果明显,获得了边缘陡度高,强度起伏小的近“平

顶”衍射光束。

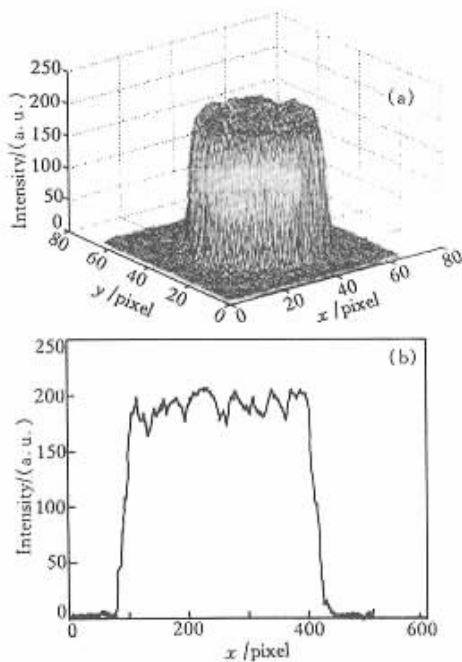


Fig.9 Intensity distribution of shaped circular beam for Fig.7(b):(a) Dimension ;(b) Cross-section

对光束均匀性的定量描述,一般采用光束填充因子  $f_{FF}$  与强度调制度  $f_{MD}$  值来衡量,其一般表示为:

$$f_{FF} = \frac{\iint K(x,y) ds}{I_{max} S}, \quad (11)$$

$$f_{MD} = \frac{I_{max} - I_{mean}}{I_{mean}}, \quad (12)$$

式中,  $S$  为光束边缘截止不产生严重衍射的光束的面积,即光束截面。根据测量数据,计算出图 7(a) 的矩形衍射光束的填充因子  $f_{FF} = 0.8741$ , 强度调制度  $f_{MD} = 0.1141$ , 其光束光强与其周围的背景光强之比为 156:1。图 7(b) 的圆形衍射光束的填充因子  $f_{FF} = 0.9001$ , 强度调制度  $f_{MD} = 0.1104$ , 光束光强与其周围的背景光强之比为 161:1。实验结果说明,采用电写入液晶空间光调制器为核心的光束整形系统,可实时地获得填充因子与信噪比高的“平顶”光束。

为了研究本文提出的光束整形系统对脉冲激光进行光束的空间整形,在激光器与扩束镜间加一斩波器(频率可调,南京大学造的 ND-1 型),获得的间断激光来模拟脉冲光束。采用的斩波器频率设置为 500 Hz 时,所获取的脉冲整形光束的光强分布与图 7~图 9 具有十分相似的结果。所得结果说明,该系统对脉冲光束也具有好的空间整形效果。

从整形实验的结果(图 8、图 9)可看出,衍射光

束还存在一些高频调制,这主要是激光光源的相干噪声。要减少这种相干噪声,一是减小滤波小孔孔径,但此方法会更多地减弱光束光强和光束的边缘陡度;二是改变光源的相干性。

结论 理论分析与实验研究表明,采用液晶空间光调制器进行激光束的实时、可调控光束空间整形的新方法,可方便地获得所需形状(如方形、圆形等几何形状)的“平顶”光强分布的近场光束,在高功率激光系统(如惯性约束聚变的激光驱动系统)前级的光束空间整形中具有重要的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] Kim Y, Grebel H, Jaggard D L. Diffraction by fractally serrated apertures. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1991, **8** (1):20~26
- [2] 文国军,钱列加,丘悦等.利用波纹光阑和空间滤波器改善光束近场分布.中国激光,1995, **A22**(6):435~438
- [3] 姚裕贵,徐世祥,孟绍贤等.利用锯齿光阑获得超高斯光束.光学学报,1995, **15**(7):931~934
- [4] Haas R A. Theory of laser beam apodization with graded random phase window. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(13):2708~2718
- [5] Skorucak A, Soutar C. Selection criteria spatial light modulator operating curves. *Proc. SPIE*, 1996, **2752**:120~131

## Laser Beam Shaping Using Liquid Crystal Spatial Light Modulator

Chen Huaixin<sup>1)</sup> Sui Zhan<sup>2)</sup> Chen Zhenpei<sup>1)</sup> An Bo<sup>1)</sup> Li Mingzhong<sup>2)</sup>

(<sup>1)</sup>, Department of Optoelectronics, Sichuan University, Chengdu 610064  
 (<sup>2)</sup>, Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 629012)

(Received 17 April 2000; revised 14 August 2000)

**Abstract:** A new method for real-time and controllable laser beam shaping using liquid crystal spatial light modulator (LC-SLM) is presented. The optical modulation characteristics of LC-SLM are studied. An optical system that consists of a soft-edge serrated aperture formed by LC-SLM and a filter could effectively convert an arbitrary profiles beam into a flattop intensity beam with a high fill factor in the near field.

**Key words:** laser beam shaping; liquid crystal spatial light modulator; soft-edge serrated aperture