

强激光的时间整形和空间整形*

——利用双折射透镜组实现激光束的空间整形

叶一东 吕百达 蔡邦维

(四川大学激光物理与激光化学研究所, 成都, 610064)

隋展

(西南核物理与核化学研究所, 成都, 610003)

摘要: 本文使用琼斯矩阵方法对双折射透镜组空间整形系统的光强透射率分布和工作特性进行了分析, 并讨论了工程设计中参数的选择以及加工误差带来的影响等有关问题。

关键词: 琼斯矩阵 双折射元件 空间整形

Temporal and spatial pulse shaping of high-power lasers

——Spatial pulse shaping using a combination of birefringent lenses

Ye Yidong, L Baida, Cai Bangwei

(Institute of Laser Physics and Laser Chemistry, Sichuan University)

Sui Zhan

(Southwest Institute of Nuclear Physics and Chemistry)

Abstract: In this paper, by means of Jones matrix calculus a system of four birefringence lenses and a polarizer used for spatial pulse shaping has been studied, including the intensity transmittance distribution and performance properties of the system. The parameter selection in practical design and the effect induced by fabrication error are discussed. The results show that the use of birefringence lenses is easy to change the transmittance function and suitable to get the spatial shaping of the line polarized Gaussian beam.

Key words: Jones matrix birefringent element spatial shaping.

一、引言

在激光的实际应用中, 光束的空间整形包括广泛的意义和内容, 把高斯光束整形为平顶光束和超高斯光束为一典型例。在惯性约束核聚变(ICF)驱动器中, 显著地降低系统费效比的一个有效手段是提高各级放大器的填充因子从而提高能量提取效率, 因此需要把高斯分布的入射光束整形为平顶光束。在高功率固体激光放大器中, 为了避免输入光束的不均匀性而带来的B积分等非线性效应影响光束质量甚至造成激光介质的损伤, 也需要把高斯光束整形为平顶光束。此外, 在激光材料加工、光学数据处理、信息的光学存储和记录、探测器阵列激光雷达等实际应用中光束的空间整形都有重要的意义。

* 本工作得到国家高技术惯性约束核聚变主题支持(No. 863-416-2-A25-2)。

迄今,已发展了多种空间整形技术。Chang-Yuan Han 使用计算全息的方法设计制造了全息滤波器用于把 He-Ne 激光器的基模高斯光束整形为光斑均匀的准直光束^[1], W. B. Veldkamp 使用二元相位和振幅调制光栅对 CO₂ 激光的高斯光束进行调制在目标平面上得到均匀化的光斑^[2], Patrick W. Rhodes 设计了非球面透镜系统用于高斯光束的均匀准直^[3], D. Shafer 利用球面镜系统的象差实现了光束的均匀准直^[4]。近年来,随着离子交换技术的发展,研制出变折射率透镜的光束整形系统^[5,6]。上述方法各有所长,但都有一个共同的缺点:每个器件是针对特定的光束参数而设计的,造好的器件不能随光束参数的变化灵活地调节其透射率函数。最近,劳伦兹·利弗莫尔国家实验室(LLNL)在其束元(Beamlet)前端使用了一种新型的空间光束整形系统。该系统利用两对石英双折射透镜巧妙而方便地实现了激光束的空间整形,值得我们借鉴。本文对该系统进行了工作特性的理论研究和数值模拟,并分析了工程设计中应考虑的一些实际问题。

二、系统结构和工作方式

如图1所示,LLNL的空间整形系统由两对双折射晶体透镜 L₁, L₂, L₃, L₄ 和一个检偏器 P 组成,晶体的主轴方向垂直于系统的光轴方向,透镜 L₁, L₄ 是两个完全相同的平凸透镜,对于偏振光透镜中心相当于 $\lambda/2$ 波片,距透镜中心 r_0 的边缘处相当于 $\lambda/4$ 波片,两镜对称排列, L₂, L₃ 是两个完全相同的平凹透镜,透镜中心相当于 $\lambda/4$ 波片,距透镜中心 r_0 的边缘处相当于 $\lambda/2$ 波片,两镜对称放置,让透镜 L₁, L₄ 的主轴平行并保持不动,透镜 L₂, L₃ 的主轴平行并作为一个整体可以绕系统的光轴旋转至任意角度。从前级激光放大器或振荡器中输出的线偏振光入射到该系统,经该系统后,光束的偏振态发生了变化,调节透镜对 L₂, L₃ 的主轴与透镜对 L₁, L₄ 主轴的夹角,入射到检偏器上的光束在不同的位置有不同的偏振态,经检偏器后的出射光可以被整形为中心部分平顶的光强较均匀的线偏振光。

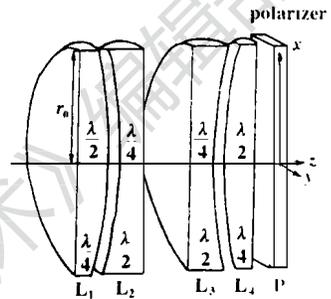


Fig. 1 A schematic diagram of the spatial pulse shaping system

三、系统透射率函数分布

取坐标系如图1所示,透镜 L₁, L₂, L₃, L₄ 的主轴与 x 轴的夹角分别为 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$, 检偏器的透振方向与 x 轴的夹角为 θ_5 , 使用琼斯矩阵方法^[7]可以对该系统的透射率进行分析和计算,对于单个平凹或平凸透镜,其琼斯矩阵 $M_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 为^[8]

$$M_i = \begin{pmatrix} \cos[a_i(r)] + i \sin[a_i(r)] \cos(2\theta_i) & i \sin[a_i(r)] \sin(2\theta_i) \\ i \sin[a_i(r)] \sin(2\theta_i) & \cos[a_i(r)] - i \sin[a_i(r)] \cos(2\theta_i) \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中, r 是考察点到系统光轴的径向距离, $2a_i(r)$ 是透镜对 o 光和 e 光的位相延迟, 对于平凸或平凹透镜:

$$2a_i(r) = (2\pi\Delta n/\lambda) d_i(r) \quad (2)$$

式中, Δn 是双折射晶体对 o 光和 e 光的折射率差, λ 是入射光的波长, $d_i(r)$ 是透镜上距透镜中心 r 处的晶体厚度, 由简单的几何关系可以得到

$$d(r) = d_0 - \rho \left[1 - \sqrt{1 - (r^2/\rho^2)} \right] \quad (3)$$

式中, ρ 是透镜的曲率半径, 对凹透镜 $\rho < 0$, 凸透镜 $\rho > 0$ 。

当 $\theta_5 = 0$ 时, 检偏器 5 的琼斯矩阵为^[9] $M_5 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ (4)

于是, 整个系统的琼斯矩阵为: $M = M_5 \cdot M_4 \cdot M_3 \cdot M_2 \cdot M_1 = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ (5)

式中, m_{11}, m_{12} 为矩阵元。在 ICF 驱动器前级振荡器中输出光一般都是线偏振的, 设其偏振方向为 x 方向, 则入射于整形器光束的琼斯列矢量为: $E_{in} = \begin{pmatrix} E_x(r) \\ 0 \end{pmatrix}$ (6)

输入光强分布: $I_{in} = |E'_x(r)|^2$ (7)

经过该空间整形系统的调制后, 输出光束的琼斯列矢量为:

晶体 $E_{out} = \begin{pmatrix} E'_x(r) \\ E'_y(r) \end{pmatrix} = M \cdot E_{in} = \begin{pmatrix} m_{11} E_x(r) \\ 0 \end{pmatrix}$ (8)

相应系统的输出光强为: $I_{out}(r) = |m_{11}|^2 \cdot |E_x(r)|^2$ (9)

于是, 系统的光强透射率分布: $T(r) = I_{out}(r)/I_{in}(r) = |m_{11}|^2$ (10)

由(1), (4), (5), (10) 等式可得在系统的光轴上(透镜中心)入射的光线, 经过整形系统后的光强透射率随 θ_1, θ_2 的变化: $T_0(\theta_1, \theta_2) = \cos^2[2(2\theta_1 - \theta_2)]$ (11)

同样可得经过透镜上 r_0 (边缘) 处的光强透射率变化: $T_{r_0}(\theta_1) = \cos^2(2\theta_1)$ (12)

可见, 在透镜上 r_0 处, 系统的透射率与 θ_2 无关, 只与 θ_1 有关, 当 θ_1 为 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 时, r_0 处的透射率最大(等于 1)。

如果令 $\theta_1 = \theta_4 = \theta_5 = 0$, 据(1), (4), (5) 式易得:

$m_{11} = [\cos\alpha_1(r) + i\sin\alpha_1(r)]^2 [\cos 2\alpha_2(r) + i\sin 2\alpha_2(r) \cos 2\theta_2]$ (13)

则透射率 $T(r) = |m_{11}|^2 = \cos^2 2\alpha_2(r) + \sin^2 2\alpha_2(r) \cos^2(2\theta_2)$ (14)

可见, 此时透射率与 α_1 无关。因此, 在实际应用中, 如果让透镜 L_1, L_4 的主轴与 x 轴一致并固定不动, 则透镜 L_1, L_4 的中心厚度可取任意值, 只需严格控制 L_2, L_3 的中心厚度。

根据方程

(2), (3), (14) 我们对该系统的透射率 $T(r)$ 进行了数值计算。取 $\theta_1 = \theta_4 = 0$,

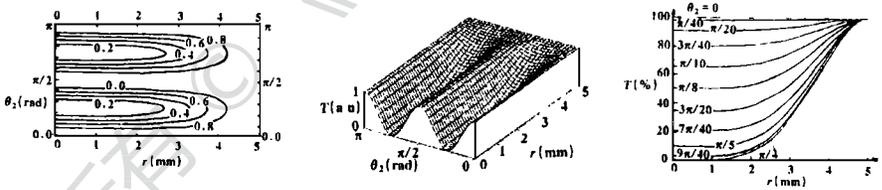


Fig. 2 a- Contour lines of the equal transmittance b- The intensity transmittance T as a function of the radial coordinate r and rotating angle θ_2 c- T vs r , parameter is θ_2

$\rho = -\rho' = 436.3\text{mm}$, $\lambda = 1\mu\text{m}$, $\Delta n = 0.008725$ (石英)。所得结果如图 2 所示。图 2a 是等透射率线图, 图 2b 是透射率随 θ_2 和 r 的变化图。图 2c 是以 θ_2 为参数透射率随 r 的变化。

四、工程设计中系统参数的选取

在工程中应根据实际需要来设计空间整形系统透镜的中心厚度 d_0, d_0' , 有效半径 r_0 和透镜凹面或凸面的曲率半径 ρ 。

透镜 L_1, L_4 中心相当于 $\lambda/2$ 波片, 边缘相当于 $\lambda/4$ 波片, 故其中心厚度 d_0 和边缘厚度

$$d_{r_0} \text{ 分别为: } \quad d_0 = (2m - 1) \cdot [\mathcal{N}(2\Delta n)] \quad (m = 1, 2, 3, \dots, \text{下同}) \quad (15)$$

$$d_{r_0} = d_0 - [\mathcal{N}(4\Delta n)] \quad (16)$$

(17), (18) 式适合于 $\theta_1 (= \theta_4)$ 在使用过程中需要旋转的情况。若在实际使用中, 让 L_1, L_4 的主轴与 x 轴一致并固定不动, 则可不考虑其厚度, 只需控制其曲率半径即可。

透镜 L_2, L_3 中心相当于 $\mathcal{N}4$ 波片, 边缘相当于 $\mathcal{N}2$ 波片。其中心厚度 d_0' 和边缘厚度 d_{r_0}' 分别为:

$$d_0' = (2m - 1) \cdot [\mathcal{N}(4\Delta n)] \quad (17)$$

$$d_{r_0}' = d_0 + [\mathcal{N}(4\Delta n)] \quad (18)$$

由简单的几何关系可得:

$$\Delta n \cdot (d_0 - d_{r_0}) = \Delta n \cdot (\rho - \sqrt{\rho^2 - r_0^2}) = \mathcal{N}4 \quad (19)$$

由此求出 ρ 的表达式得:

$$\rho = (2\Delta n r_0^2 / \lambda) + [\mathcal{N}(8\Delta n)] \quad (20)$$

对于凹透镜 L_2, L_3 , 同理可得其曲率半径

$$\rho = -\rho = (-2\Delta n r_0^2 / \lambda) - [\mathcal{N}(8\Delta n)] \quad (21)$$

设入射基模高斯光束的归一化光强分布为:

$$I(r) = \exp[-2(r^2 / \omega^2)] \quad (22)$$

式中, ω 是高斯光束的光斑半径。为了使该系统整形出的光束有最高的效率, 输出最大的功率, 设整形所得平顶光斑半径为 \bar{r}_0 。通过简单的推导可得:

$$\omega = \sqrt{2} \cdot \bar{r}_0 \quad (23)$$

在工程设计上, 在考虑能量利用率的同时, 尚需考虑整形效果, 故(23)式仅供设计透镜半径时参考。为了得到足够均匀的平顶光束且保证较高的能量利用效率, 一般可取 ω 在 $1.5 \cdot \bar{r}_0$ 附近。

从后面的数值计算可知, 输出的光斑平顶半径 \bar{r}_0 接近于(等于或略小于)双折射透镜的有效半径 r_0 , 工程设计中一般可取透镜有效半径 r_0 等于或略大于输出光斑平顶半径 \bar{r}_0 。

(15), (16), (17), (18), (20), (21), (23) 就是工程中用于设计双折射透镜组几何参数的基本公式。

五、数值模拟

设需要整形得到一个平顶半径为 5mm 的均匀平顶光束, 其波长为 $\lambda = 1(\mu\text{m})$, 使用石英双折射材料, $\Delta n = 0.008725$, 取透镜的有效半径 r_0 等于输出光斑平顶半径 \bar{r}_0 。由(20), (21)式, 需要透镜 L_1, L_4 的曲率半径为 $\rho = 436.3\text{mm}$ 。透镜 L_2, L_3 的曲率半径为 $\rho = -\rho = -436.3\text{mm}$ 。为了得到最高的能量转换效率, 由(23)式, 需要的输入高斯光束的光斑半径为 $\omega = \sqrt{2} \times 5 = 7.1(\text{mm})$ 。让入射光的偏振方向、透镜 L_1, L_4 的主轴方向、检偏器的透振方向都与 x 轴一致, 由(9)式和(13)式可以对该系统的输出光强进行数值模拟。计算的结果如图 3 所示, 曲线分别表示转动过程中 $\theta_2 = 0, \pi/40, \pi/20, 3\pi/40, \pi/10, \pi/8, 3\pi/20, 7\pi/40, \pi/5, 9\pi/40, \pi/4$ 时的输出光强随 r 的变化, 图中可以看出当 θ_2 在 $\pi/8(\text{rad})$ 附近时能得到较好的平顶光束。

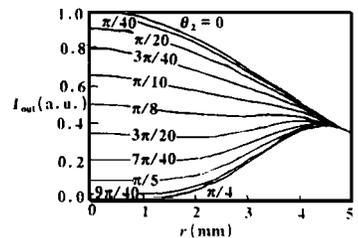


Fig. 3 The output intensity I_{out} is plotted against the radial coordinate r , parameter is the rotating angle θ_2

六、加工误差的影响

前面的计算都假设透镜 L_1, L_4 和透镜 L_2, L_3 的中心厚度分别是准确的 $M/2$ 和 $M/4$ 波片,但在实际加工中,透镜的厚度难以准确控制。在 $\theta_1 = \theta_4 = 0$ 的情况下,由(14)式知透镜 L_1, L_4 的中心厚度加工误差对输出光强没有影响。而透镜 L_2, L_3 的中心厚度加工误差对输出光强影响较大。设加工给透镜 L_2, L_3 带来的中心厚度误差为 σ , 则

$$d_0' = (2m - 1 + \xi) [M(4\Delta n)] = (2m - 1) [M(4\Delta n)] + \sigma \quad (24)$$

式中, $\sigma = \xi [M(4\Delta n)] \quad (25)$

令 $\theta_2 = 0.42(\text{rad}), r_0 = 5\text{mm}, \rho = -\rho = -436.3\text{mm}$, 代入(12)式进行计算, 其结果见图4。 ξ 取 $0 \sim 1$ 之间的数值时 (σ 取 $0 \sim 28.7\mu\text{m}$) (图4a), 输出光束的中心部分仍为均匀的平顶分布, 但其平顶半径 r_0 随着 ξ 的增加而减小。有趣的是, 当 $\xi = 0.15$ 时 ($\sigma = 4.3\mu\text{m}$), 所得到的输出光束的均匀性比 $\xi = 0$ 时更好。原因在于这种情况下的系统透射率分布更接近于高斯函数分布的翻转。当 ξ 在 $1 \sim 2$ 之间变化时 (σ 取 $28.7 \sim 57.3\mu\text{m}$) (图4b), 不能得到较好的平顶光束输出。上述公式中 m 可根据工程需要取任意正整数, 它的取值不影响系统的输出透射率。本文给出的图中, m 的值都取 50。

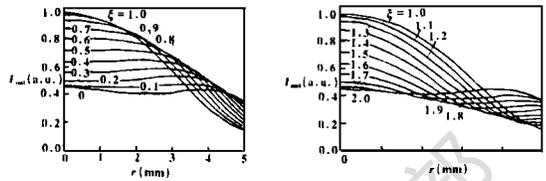


Fig. 4 a- ξ varies from 0 to 1 b- ξ varies from 1 to 2

七、结 论

使用双折射元件组进行光束的空间整形的方法灵活方便, 易于改变其透射率函数, 尤其适合于线偏振的高斯光束的整形。对于非偏振光, 可在 L_1 前置一起偏器即可。对 ICF 驱动器等高功率激光器件光束的空间整形是一个可供选择的方案。实验研究工作正在进行之中, 有关结果将另文报道。

参 考 文 献

- 1 Han C Y, Lshii Y, Murata K. Appl Opt, 1983; 22(22): 3644~ 3647.
- 2 Veldkamp W B. Appl Opt, 1982; 21(17): 3209~ 3212.
- 3 Rhodes P W, Shealy D L. Appl Opt, 1980; 19(20): 3545~ 3553.
- 4 Shafer D. Opt & Laser Technol, 1982; 14(1): 159~ 160.
- 5 Wang C, Shealy D L. Appl Opt, 1993; 32(25): 4763~ 4769.
- 6 Kindred D S, Moore D T. Appl Opt, 1988; 27(3): 492~ 495.
- 7 Jones R C. J O S A, 1942; 32: 486~ 493.
- 8 Eggleston J M, Giuliani G, Byer R L. J O S A, 1981; 71(10): 1264~ 1272.
- 9 卢亚雄, 吕百达. 矩阵光学. 大连: 大连理工大学出版社, 1989

作者简介: 叶一东, 男, 1969年12月出生。硕士。主要研究方向为激光光束的传输变换和固体激光器件。

收稿日期: 1995-04-13