

二元光学波面变形器件的研究*

包红春 邬敏贤 金国藩 严瑛白

(清华大学精密仪器与机械学系, 北京 100084)

摘 要 基于计算全息原理设计了二元光学波面变形器件, 一块二元光学器件的衍射效率比计算全息可提高 4 倍, 高斯波面整形需要二块整形光学器件, 二元光学器件的激光利用率比计算全息提高 16 倍, 而且制做工艺简单.

关键词 二元光学, 计算全息, 衍射效率.

1 引 言

由于真空波导作用使得激光发射出来的光束能量成高斯分布, 然而在光学信息处理, 远距离准直技术, 精密测量等许多领域中需要利用能量分布均匀的平面波, 且不降低其相干性. 这就需要对高斯光束加以整形. 目前采用的办法主要有非球面透镜法和计算全息法, 用非球面透镜法理论上可以做到整形误差很低且能充分利用激光光能, 但加工十分困难. 计算全息法是目前最易实现的方法, 但衍射效率很低, 理论计算衍射效率为 10%, 难以实用^[1~4]. 本文提出了用二元光学器件实现高斯光束的波面变形, 讨论了二种设计方案, 其中利用计算全息和二元光学有机结合的方法, 能使波面整形误差大大降低, 且达到较高的衍射效率, 理论值为 40%.

2 原 理

高斯光束波面变形器件是由二片组成^[4], 如图 1 所示, 第一片器件 H_1 将能量不均匀的高斯光束重新分布, 传播 L 距离到 H_2 之前的能量分布均匀. 第二片器件 H_2 将使出射光束互相平行.

第一片 H_1 放在激光束腰位置, 束腰部分光束的电场强度:

$$E(r) = \exp(-r^2/W_0^2) \quad (1)$$

式中 W_0 为束腰半径. 任一光线经过 H_1 的位置为 r , 到达 H_2 的位置为 R , 两者之间的关系满足:

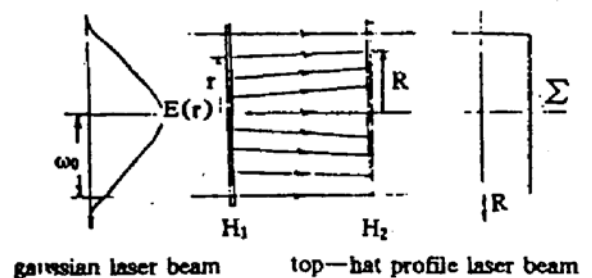


Fig. 1 The principle of shaping the profile of the beam profile from a Gaussian to a top-hat

* 国家自然科学基金资助项目.
收稿日期: 1993年10月6日

$$\pi R^2 \Sigma = 2\pi \int_0^r E(r) r dr \quad (2)$$

式中 Σ 为光在 H_2 处均匀分布电场强度, 将(1)式代入(2)式解得:

$$r = W_0 \left\{ -\frac{1}{2} \ln [1 - (2\Sigma R^2/W_0^2)] \right\}. \quad (3)$$

H_1, H_2 面上的空间频率满足:

$$F_1(r) = F_2(R) = \frac{dW_1(r)}{\lambda dr} = \frac{dW_2(R)}{\lambda dR} = -\frac{R-r}{l} \quad (4)$$

式中 $W_1(r), W_2(R)$ 分别为光经过 H_1, H_2 的光程. 将(3)式代入(4)式得:

$$\frac{dW_1}{dr} = \frac{r}{l} - \frac{W_0}{l} \left[\frac{1 - \exp[-2(r/W_0)^2]}{2\Sigma} \right]^{1/2} \quad (5)$$

$$\frac{dW_2}{dR} = -\frac{R}{l} + \frac{W_0}{l} \left\{ -\frac{1}{2} \ln [1 - (2\Sigma R^2/W_0^2)] \right\}^{1/2} \quad (6)$$

式中 $W_1(0) = W_2(0) = 0$. 由(3)、(5)、(6)和(7)式可以解出 $W_1(r), W_2(R)$ 的数值解.

$$\phi_1(r) = 2\pi/\lambda W_1(r), \quad \phi_2(R) = 2\pi/\lambda W_2(R) \quad (8)$$

$\phi_1(r), \phi_2(R)$ 为整形器件和所要记录的波面函数.

3 二元光学器件的设计

二元光学是基于衍射理论与微电子技术相结合发展起来的新兴器件. 其特点是利用计算机技术进行优化设计, 然后采用大规模集成电路工艺中的高分辨率光刻与离子刻蚀技术把二元的或多元位相的表面浮雕图形做在器件的基片上, 形成具有波面变换成象特性的功能器件. 根据衍射理论, 其衍射效率 η 为:

$$\eta = |\sin(\pi/M)/(\pi/M)|^2 \quad (9)$$

式中 M 为位相台阶数, $M = 2^N$, N 为刻蚀次数, 每一次刻蚀可得到双倍的台阶数. 例如, 刻蚀次数 $N = 4$, 可得到 $M = 2^4 = 16$ 个台阶数, 这时的衍射效率可达 99%. 最简单的工艺方法是刻蚀一次, 得到二值的位相, 其衍射效率为 40.5%, 是普通振幅型的计算全息元件(理论值为 10%)的 4 倍. 这种二值位相元件虽然制作工艺简单, 但在使用时将在光轴上产生多个衍射级次的焦点, 使所设计的理论波面将受到其它衍射级次的干扰. 为解决这一难题, 本文采用了计算全息的原理. 用一离轴的平面光波做为载波, 将波面函数信息加在载波上, 虽然制作时空间带宽积增加, 但在光路使用中各级衍射光沿不同的方向传播, 一级衍射光(即理论计算波面)不受其它级次影响, 再现误差减小.

根据计算全息原理, 所要记录的物波函数即前一节求出的 $\phi_1(r)$ 或 $\phi_2(R)$, 与一沿 x 轴 α 角传播的平面光波干涉, 其全息图的透过率为:

$$\begin{aligned} h(x, y) &= |\exp[i2\pi x(\sin \alpha/\lambda)] + \exp[i\phi(x, y)]|^2 \\ &= 2\{1 + \cos[2\pi x(\sin \alpha/\lambda) \phi(x, y)]\} \end{aligned} \quad (10)$$

由(10)式可求出透过率最大与最小值的位置分别为

$$2\pi x(\sin \alpha/\lambda) - \phi(x, y) = 2\pi n \quad (11)$$

$$2\pi x(\sin \alpha/\lambda) - \phi(x, y) = 2\pi[n + (1/2)] \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (12)$$

载频为:

$$1/T = \sin \alpha / \lambda = 1.5B_r \tag{13}$$

$$B_r = 2v_r \tag{14}$$

$$v_r = - \frac{1}{2\pi} \left| \frac{d\phi(x,y)}{dx} \right|_{\max} \tag{15}$$

$v_{r\max}$ 为波面的最大空间频率, B_r 为空间频宽, $1/T$ 为载波频率, α 为衍射角. 根据物波 $\phi_1(x,y)$ 、 $\phi_2(x,y)$ 的最大带宽即可求出载波频率, 然后根据(11)和(12)式计算出计算全息图黑白条纹位置. 计算全息图一般记录成二值(0,1)的振幅型全息图, 故其衍射效率很低(理论值为 10%), 难以实用. 现采用二元光学的工艺制作成二值位相(0, π)型的元件, 其衍射效率可提高到 10%. 本文中讨论的高斯波面变形器件, 由二片二元光学器件组成, 衍射效率是计算全息型的 16 倍. 而利用了计算全息特点, 克服了级次混叠现象, 提高了信噪比, 减小了波面变换误差.

4 实验结果

针对 20 mW 的 He-Ne 激光器制作一对波形整形器件, 激光器腔长 1 m, 两块反射镜为平凹面镜, 凹面镜曲率半径为 3 m, 计算得到激光束腰半径 $W_0 = 0.534$ mm. 束腰位于平面镜

处. 如图 2 所示, H_1, H_2 为二元光学整形器件. H_1 与 H_2 相距 30 mm, 设计时要求激光束经 H_1, H_2 后, 其“0”和“1”级衍射光分离为 $2W_0$. 通过 CCD 接收整形后的激光束其光斑如图 3(a)所示, 经计算机 A/D 变换后接收整形后的光强分布如图 3(b)所示, 相应未整形高斯光斑与计算光

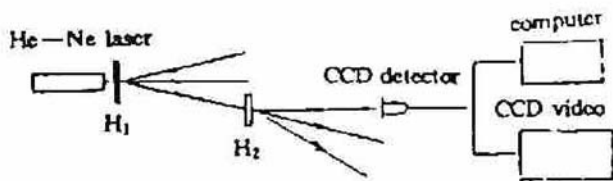


Fig. 2 The device for shaping Gaussian beam profile

强分布分别如图 4(a), (b)所示. 从图中可见整形效果很好. 实验中测得一块二元光学波面变形器件的衍射效率为 32.5%, 而计算全息元件的衍射效率仅为 7.94%, 在现有工艺制做误差范围内, 与理论值一致. 二块激光整形器件激光利用率提高了约 16.7 倍, 大大地提高了激光利用率.

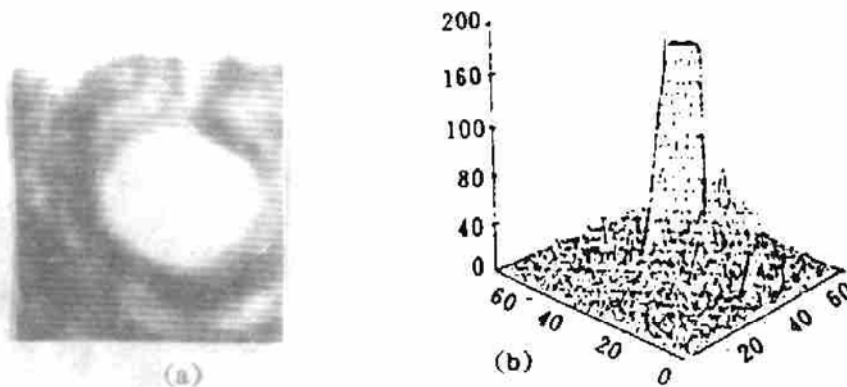


Fig. 3 The distribution of the spot and profile after shaping

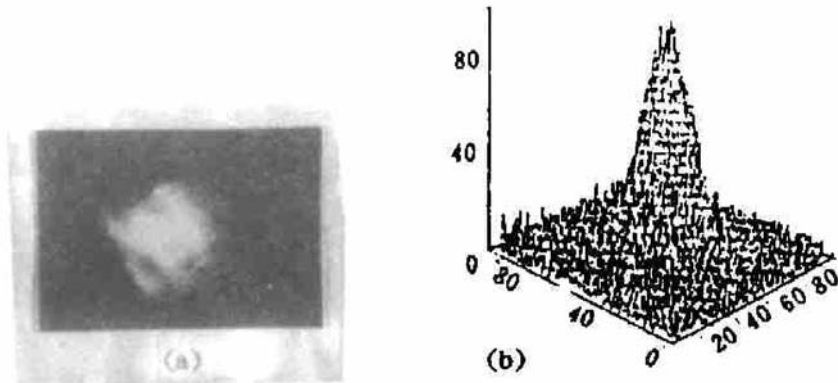


Fig. 1 The distribution of the spot and profile of Gaussian beam

结 论 利用二元光学结合计算全息法制做的高斯光波整形器克服了纯二元光学多级次相互干扰而再现误差大的问题，同时解决了纯计算全息一级光衍射效率低浪费激光光能的问题，而且制做工艺简单。因此，二元光学整形器件是较理想的高斯光束整形器件。

参 考 文 献

- [1] Carl C. Aleksoff, Kenneth K. Ellis, Bradley D. Neagle, Holographic conversion beam to a near-field uniform beam. *Opt. Engng.*, 1991, 30(5): 537
- [2] Nicholasc C. Roberts, Beam shaping by holographic filters. *Appl. Opt.*, 1989, 28(1): 31
- [3] E. Soubar, M. Torzynski, P. Meyrneis, Laser beam shaping with computer generated holograms on dichromated geletin. *Proc. SPIE*, 1989, 1138: 220
- [4] Michael T. Eismann, A. M. Tai, J. N. Cederquist, Iterative design of a holographic beamformer. *Appl. Opt.*, 1989, 28(13): 2641

Binary Optical Element for Laser Beam Shaping

Bao Hongchun Wu Minxian Jing Guofan Yan Yingbai

(Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084)

(Received 16 October 1993)

Abstract A binary optical element is designed based on computer generated hologram for shaping the profile of laser beam from Gaussian to top-hat. As it is a binary optics, so the diffraction efficiency is four times than the holographic one's. The approach is easy in fabrication. The design and experimental results are presented.

Key words binary optics, computer-generated hologram, diffraction efficiency.