

乳胶型超高斯软边光阑

郑玉霞 林尊琪 余文炎
(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

本文报道了乳胶型超高斯软边光阑的研究结果,给出光阑的设计,制作方法及实际使用效果。

一、引 言

工作介质在强光作用下的非线性效应引起激光束的小尺寸自聚焦,限制了高功率激光器亮度的提高。如何消除或减弱衍射效应,成为改善高功率激光系统性能的关键问题。

为了使激光束有效地充满传输介质孔径,而又不产生明显的衍射,我们在激光系统的光路中采用了“软边光阑”。

对软边光阑有几项基本要求:(1)光束通过软边光阑以后,光束强度的空间分布应具有特定的形状。软边光阑的截止透过率应满足如下条件,即经软边光阑整形后的光束,如果以半径等于或大于其截止半径的任何硬边光阑拦截在“安全传输距离”内,都不会引起明显的衍射起伏。(2)有一定的功率负载强度。(3)有较高的有效传输能量利用率。这就要求在特定的截止孔径内,尽可能多地传输归一化的激光能量,提高激光器的输出功率。

如果归一化的激光能量在截止半径为 J 的孔径内均匀分布,那么,最大的传输能量为 πJ^2 ,实际上,这是硬边光阑的情况,它对消衍射的要求是最不利的。如果只考虑消衍射的

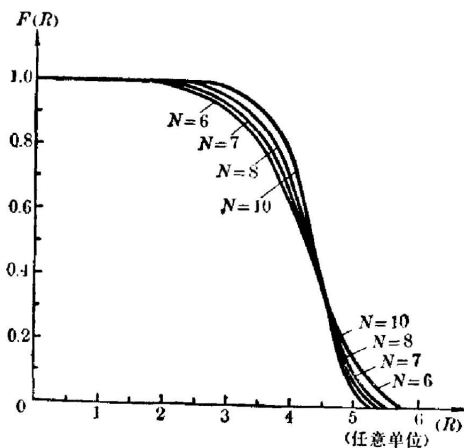


图1 超高斯型函数的透过率曲线
Fig. 1 Transmission curves with super-Gaussian function

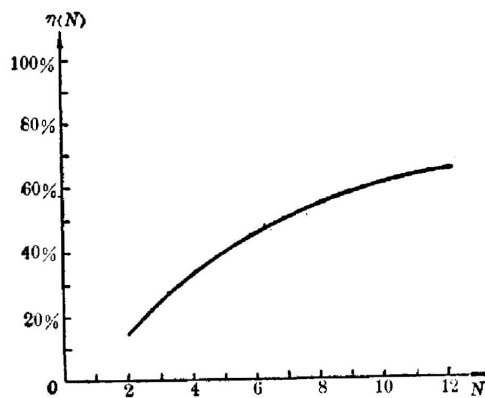


图2 激光能量的利用率
Fig. 2 The availability of laser energy

要求,那么,采用高斯型空间分布的光束,在传输过程中可以不产生空间分布起伏,但是,在截止孔径内所能传输的归一化能量与最大的传输能量之比仅为

$$\eta = \int_0^J 2\pi R \exp(-R^2) dR / \pi J^2 = 14.46\%, \quad (1)$$

其中 J 应满足 $\exp(-J^2) = 0.001$ 。显然,这样低的能量传输利用率是很不经济的。因此,既要考虑到消衍射的要求,同时又要考虑到能量有效利用率,我们制作的软边光阑选用了超高斯型函数,它的透过率函数是

$$F(R) = \exp[-(R/R_0)^N], \quad (2)$$

式中 N 称为软边级数, R_0 为软边光阑的有效半径。

图 1 给出不同级数超高斯函数的分布曲线。以 η 表示从均匀光束中截取的能量百分比,则:

$$\eta(N) = \int_0^J 2\pi R \exp[-(R/R_0)^N] dR / \pi J^2. \quad (3)$$

从图 2 可以看出,随着 N 的增加,能量有效利用率也增加,即填充因子增加^[1]。

二、乳胶型超高斯软边光阑的设计与制作

1. 光阑的设计

在大功率激光引波放大器系列中使用软边光阑,国外早有报导^[2],我们的工作在于结合乳胶的特性曲线来设计乳胶型超高斯软边光阑。

根据选定的乳胶特性,我们设计了一种对称的心形挡板,当心形挡板以中心轴为圆心旋转时,在乳胶底片上所承受的曝光量 $E \cdot t$ 为:

$$E \cdot t = E_{\max} \cdot t \cdot \theta / \pi, \quad (4)$$

式中 E_{\max} 是最大照度(无挡板挡光时的照度), t 为曝光时间, θ 为对中心孔的转角。

我们选用的 75-WM-3-03 型乳胶具有足够大的反差, $H-D$ 特性曲线中线性范围较大。对乳胶特性曲线的初始非线性的“欠露”部分(即 $D < 0.5$ 部分),我们采用抛物线近似。在 $D > 0.5$ 到 $D \approx 3.5$ 的部分, $H-D$ 成线性关系。这样,我们采用了两个近似表达式来逼近真实的乳胶特性曲线。

$$\nabla(\log Et - \log B) = D \quad (\text{当 } D > 0.5 \text{ 时}), \quad (5)$$

$$k(\log Et)^2 = D - D_0 \quad (\text{当 } D \leq 0.5 \text{ 时}), \quad (6)$$

其中 D 为黑度, ∇ 为乳胶反差, $\log B$ 为感光惰性常数, D_0 为灵敏度, k 为抛物线常数。设 $H = \log E \cdot t$, $D = \log I_0/I$, 其中 I_0 是入射光强, I 是透射光强,透过率 $T = I/I_0$ 。把黑度 D 与超高斯型函数的透过率曲线联系起来有:

$$D = \log I_0/I = \log \exp[(R/R_0)^N] = (R/R_0)^N / \ln 10, \quad (7)$$

而 $D = 0.5$ 的点是一个特殊点,表达式(5)、(6)必须在这一点上重合,由(6)式得

$$\log(E \cdot t)|_{0.5} = \sqrt{(0.5 - D_0)/k},$$

将此式代入(5)式得

$$\sqrt{(0.5 - D_0)/k} - 0.5/\nabla = \log B. \quad (8)$$

将(4)、(7)、(8)式代入(5)、(6)两式得到:

$$R(\theta) = R_0^N \sqrt{[(\ln E_{\max} \cdot t \cdot \theta / \pi) / \ln 10 - \sqrt{(0.5 - D_0) / k} + 0.5 / \nabla] \cdot \nabla \cdot \ln 10}, \quad (D > 0.5), \quad (9)$$

$$R(\theta) = R_0^N \sqrt{\ln 10 [D_0 + k(\ln E_{\max} \cdot t \cdot \theta / \pi)^2 / (\ln 10)^2]}, \quad (D \leq 0.5). \quad (10)$$

代入乳胶的各种特征值, 就算出了把乳胶的黑度曲线与超高斯型函数透过率曲线要求联系起来的曝光量的极坐标 $R \sim \theta$ 的关系, 这里 $k=2.7$, $D_0=0.1$, $\nabla=4.8$, 选择 $E_{\max} \cdot t=13$ 是保证最大曝光量部分的黑度大于 3, 即透过率小于 1/1000。用程序控制切割机床, 加工了取不同 N 值的心形挡板。考虑到对准中心的需要, 亦给出中心程序, 加工了直径为 0.4 mm 的中心孔, 加工好的挡板照片如图 3 所示。

2. 软边光阑的制作

用一束均匀的发散角接近衍射极限的平行光作光源, 使用稳定而同心性好的电动机直接带动乳胶底片旋转, 把不透明的具有随中心距离变化的角向开口的心形挡板, 放在光源和旋转的乳胶底片之间, 这时在旋转的乳胶底片上就直接接收到不同的依赖于心形挡板开放量的曝光量, 经过一定处理就制成了我们所需的软边光阑。

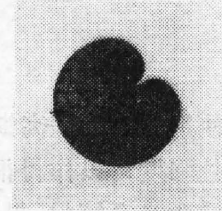


图 3 制做软边光阑的挡板
Fig. 3 Opaque mask for making apodizing aperture

三、实验结果

1. 模拟结果

用单横模的 6328 Å 的氦氖激光束经自然扩孔后作光源, 在氦氖激光束的有效孔径大于 $\phi 15$ mm 的位置上, 放一口径为 $\phi 9$ mm 的硬边光阑, 激光在传输 12 m 以后, 产生的菲涅耳衍射如图 4 所示。而在同一位置上, 放置有效孔径为 $\phi 10$ mm 的 $N=9$ 的乳胶型超高斯软边光阑, 在光束传输相同的距离上, 却看不到菲涅耳衍射, 其照片示于图 5。

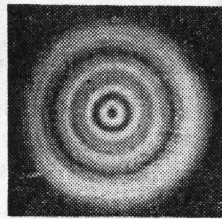


图 4 激光通过硬边光阑后的近场图
Fig. 4 The near-field photograph of the laser beam pass through a hard aperture

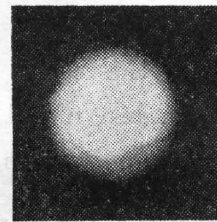


图 5 激光通过软边光阑后的近场图
Fig. 5 The near-field photograph of the laser beam pass through apodizing aperture

2. 实际结果

在中国科学院上海光学精密机械研究所 1975 年建造的 10^{11} W 高功率 Nd 玻璃激光系统中^[3], 实际使用 $N=9$ 的乳胶型超高斯软边光阑。实验表明: (1) 负载强度在每平方米十几毫焦耳激光脉冲 (2 ns) 作用下, 经过近百次实验, 没有遭到激光破坏。(2) 经软边光阑后的光束质量较之经硬边光阑后的光束质量有明显的改善。这可通过激光的近场图看出

(图 5), 即没有菲涅耳衍射, 光强分布比较均匀。

总之, 通过模拟实验和实际实验的结果都表明, 这种光阑能有效地减小或消除普通硬边光阑的衍射。

四、结 论

使用乳胶型超高斯软边光阑对光束进行空间整形, 比较接近于理论上要求的形状, 截止半径处强度可以作得很低, 这对消衍射的要求是很有利的。因此, 超高斯型软边光阑在大功率行波激光系统中, 得到了较广泛的应用。特别是在激光系统中采用了像传递技术以后, 一般都采用较高的软边级数的超高斯型软边光阑, 增加了填充因子, 从而提高了输出功率。

上海光学精密机械研究所工厂的窦玉林同志为我们制作了超高斯型软边光阑的心形挡板, 上海市印刷八厂为我们提供了 75-WM-3-03 型乳胶, 在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] W. W. Simmons, D. R. Speck, J. T. Hunt; *Appl. Optics*, 1978, **17**, No. 7(1 Apr), 999.
 [2] J. Weaver; *UCRL-50021-73-1*, 1973, 48.
 [3] Deng Ximing, Yu Wenyan; *IEEE J. Q. E.*, 1981, **QE-17**, No. 9(Sep), 1650.

Super-Gaussian photographic-plate apodizing aperture

ZHENG YUXIA LIN ZUNQI AND YU WENYAN

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 23 July 1981, revised 2 March 1982)

Abstract

In this paper, the results of super-Gaussian photographic plate aperture research are presented. The design and fabrication of this kind of apodizing aperture and its results of practical application are reported.

(continued from the back)

People in Optics

One of the pioneers for optical cause in China—famous scientist Professor Wang Daheng
 Wang Xinxiang (419)

Meetings Reports

The Sixth National Symposium on Laser Science held in Tongxi, Anhui province Li Feng (430)
 Joint meeting of permanent Directors (enlarged) of Optical Society of China, Optics and applied
 Optics group of State Science and Technology commission Guang Neng (444)
 The Second Meeting of Acta Optica Sinica Editorial Committee, Jiading, Shanghai, April 22, 1982
 (insideback)