第28卷 第5期
2001年5月

中 国 激 光
CHINESE JOURNAL OF LASERS

Vol.A28,No.5
May,2001

文章编号:0258-7025(2001)05-0447-04

消减旁瓣的衍射计算

李良钰[1,3] 李常春[2] 李银柱[1] 戴亚平[1] 谢 虎[1] 朱健强[1]

([1] 中国科学院上海光机所高功率激光物理国家实验室 上海 201800;
[2] 重庆通信学院 重庆 400035;[3] 电子科技大学应用物理系 成都 610054)

提要 由于光的衍射作用,使通过聚焦系统的激光束入射到特定靶面成一光斑(主光斑),而在主光斑以外还有次级光斑圈(旁瓣)。为了消减旁瓣,结合理论分析和神光装置聚焦系统的设计,提出了一种新的系统孔径遮挡分割法,从光的衍射理论和实验证明这种方法是有效的,使旁瓣缩减。

关键词 衍射,光斑,光学系统,旁瓣,傅里叶变换

中图分类号 TL 263;O 436.1 **文献标识码** A

Calculation of Eliminating the Sidelobe in Diffraction Theory

LI Liang-yu[1,3] LI Chang-chun[2] LI Yin-zhu[1] DAI Ya-ping[1] XIE Hu[1] ZHU Jian-qiang[1]

([1] *National Laboratory on High Power Laser and Physics*, *Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics*, *The Chinese Academy of Sciences*, *Shanghai* 201800; [2] *Chongqing Communications Institute*, *Chongqing* 400000; [3] *Department of Applied Physics*, *UESTC*, *Chengdu* 610054)

Abstract The laser beam passing through the focusing systems gets an facula, which consists of main spot and sidelobe on the focus plane. In order to eliminate the sidelobe, a method of obstructing aperture of the focusing optical system is advanced. The experiment and the theory show that the sidelobe is reduced.

Key words diffraction, facula, optical system, sidelobe, Fourierism transform

1 引 言

在惯性约束核聚变(ICF)实验研究中,需要将高功率激光束聚焦入射到特定的靶面。无论是ICF直接驱动,还是间接驱动,衍射旁瓣都是非常有害的,因此,在ICF中,消旁瓣非常重要[1]。在ICF直接和间接驱动中,将高功率强激光聚焦,由于旁瓣(绝对能量很大)的作用,靶面或小孔周围会出现大量等离子体,从而影响聚焦激光能量的有效接收。人们做过消减旁瓣方面的工作[2],但效果不理想,而且不同的应用,对消旁瓣的要求不一样[1,3]。为了消减旁瓣,在实际研究工作中发现,将一个聚焦系统的孔径进行小部分遮挡分割,能使旁瓣有效消减。

2 系统孔径遮挡分割的实现

在光衍射的标量理论中,一平行光通过一圆孔(可以是一聚焦透镜)后,在观察屏上形成夫琅和费衍射花样,其花样的中央爱里(Airy)亮斑就是聚焦系统中打到目标的光斑,爱里光斑集中了入射能量的约84%,其余16%的能量分布在各级旁瓣,但一级旁瓣就占了7.22%的能量。在圆孔衍射中,各级旁瓣在聚焦平面上的位置跟圆孔大小有关,由衍射的互补效应即巴比涅(Babinet)原理,我们想到,在非球面聚焦透镜孔径上用一小宽度不透明物圆圈遮挡,形成如图1的情况,其中将系统孔径半径归一化,遮挡不透明圈的内外相对半径分别为 b 和 a($0 < b < 1, 0 < a < 1$)。

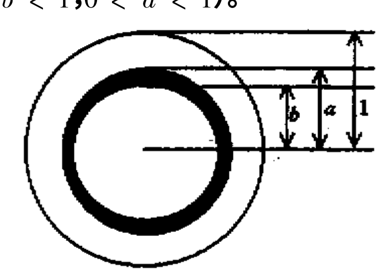

图1 系统孔径遮挡示意

Fig.1 Obstruction of aperture

收稿日期:2000-05-09;收到修改稿日期:2000-06-26

3 强度计算和分析

3.1 强度计算

建立如图2的坐标系统,设一单位振幅的单色平行光从左向右照射,根据巴比涅原理,在右边观察屏(焦平面)上某点衍射光的振幅为[4]

$$U(x,y)=U_0(x,y)-U_1(x,y)+U_2(x,y) \tag{1}$$

其中 $U_0(x,y)$ 是只有相对半径为 l 圆孔时的振幅,$U_1(x,y)$ 是只有相对半径为 a 圆孔时的振幅,$U_2(x,y)$ 是只有相对半径为 b 圆孔时的振幅。则:

只有相对半径为 l 圆孔时的透过率函数为:

$$t_0=\mathrm{circ}\left(\sqrt{x_1^2+y_1^2}\right)$$

只有相对半径为 a 圆孔时的透过率函数为:

$$t_1=\mathrm{circ}\left(\sqrt{x_1^2+y_1^2}\Big/a\right)$$

只有相对半径为 b 圆孔时的透过率函数为:

$$t_2=\mathrm{circ}\left(\sqrt{x_1^2+y_1^2}\Big/b\right)$$

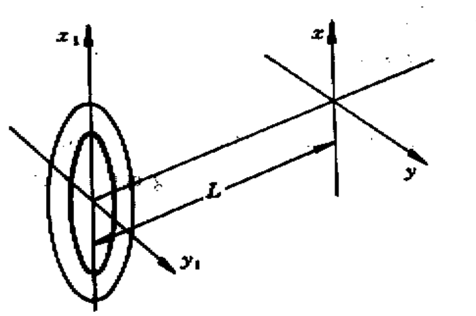

图2 坐标系统

其中,x_1-y_1 是衍射面,x-y 是焦平面,

L 是衍射面和焦平面之间的距离

Fig.2 Coordinate system

x_1-y_1 plane:diffraction plane,x-y plane:focusing plane,

L:distance between x_1-y_1 plane and x-y plane

于是,x-y 面上任一点 $U_0(x,y)$,$U_1(x,y)$,$U_2(x,y)$ 分别表示为

$$U_0=\frac{1}{i\lambda L}\exp\left(\frac{i2\pi L}{\lambda}\right)\exp\left[\frac{i\pi(x^2+y^2)}{\lambda L}\right]F\{t_0\}=\frac{1}{i\lambda L}\exp\left(\frac{i2\pi L}{\lambda}\right)\exp\left[\frac{i\pi(x^2+y^2)}{\lambda L}\right]\pi\cdot\frac{2J_1(2\pi\sqrt{x^2+y^2}/\lambda L)}{2\pi\sqrt{x^2+y^2}/\lambda L}$$

$$U_1=\frac{1}{i\lambda L}\exp\left(\frac{i2\pi L}{\lambda}\right)\exp\left[\frac{i\pi(x^2+y^2)}{\lambda L}\right]F\{t_1\}=\frac{1}{i\lambda L}\exp\left(\frac{i2\pi L}{\lambda}\right)\exp\left[\frac{i\pi(x^2+y^2)}{\lambda L}\right]\pi a^2\cdot\frac{2J_1(2\pi a\sqrt{x^2+y^2}/\lambda L)}{2\pi a\sqrt{x^2+y^2}/\lambda L}$$

$$U_2=\frac{1}{i\lambda L}\exp\left(\frac{i2\pi L}{\lambda}\right)\exp\left[\frac{i\pi(x^2+y^2)}{\lambda L}\right]F\{t_2\}=\frac{1}{i\lambda L}\exp\left(\frac{i2\pi L}{\lambda}\right)\exp\left[\frac{i\pi(x^2+y^2)}{\lambda L}\right]\pi b^2\cdot\frac{2J_1(2\pi b\sqrt{x^2+y^2}/\lambda L)}{2\pi b\sqrt{x^2+y^2}/\lambda L}$$

U_0,U_1 和 U_2 中的 F 为傅里叶变换。将 U_0,U_1 和 U_2 代入(1)式得

$$U(x,y)=U_0(x,y)-U_1(x,y)+U_2(x,y)=\frac{1}{i\lambda L}\exp\left(\frac{i2\pi L}{\lambda}\right)\exp\left[\frac{i\pi(x^2+y^2)}{\lambda L}\right]\pi\cdot\left[\frac{2J_1(2\pi\sqrt{x^2+y^2}/\lambda L)}{2\pi\sqrt{x^2+y^2}/\lambda L}-a^2\frac{2J_1(2\pi a\sqrt{x^2+y^2}/\lambda L)}{2\pi a\sqrt{x^2+y^2}/\lambda L}+b^2\frac{2J_1(2\pi b\sqrt{x^2+y^2}/\lambda L)}{2\pi b\sqrt{x^2+y^2}/\lambda L}\right] \tag{2}$$

于是,在观察屏上任一点的光强为

$$I(x,y)=U(x,y)U(x,y)^*=|U(x,y)|^2=\frac{\pi^2}{\lambda^2L^2}\left[\frac{2J_1(2\pi\sqrt{x^2+y^2}/\lambda L)}{2\pi\sqrt{x^2+y^2}/\lambda L}-a^2\frac{2J_1(2\pi a\sqrt{x^2+y^2}/\lambda L)}{2\pi a\sqrt{x^2+y^2}/\lambda L}+b^2\frac{2J_1(2\pi b\sqrt{x^2+y^2}/\lambda L)}{2\pi b\sqrt{x^2+y^2}/\lambda L}\right]^2$$

将 $I(x,y)$ 的中央最大值归一化,得

$$I(x,y)=\frac{1}{(1-a^2+b^2)^2}\cdot\left[\frac{2J_1(2\pi\sqrt{x^2+y^2}/\lambda L)}{2\pi\sqrt{x^2+y^2}/\lambda L}-a^2\frac{2J_1(2\pi a\sqrt{x^2+y^2}/\lambda L)}{2\pi a\sqrt{x^2+y^2}/\lambda L}+b^2\frac{2J_1(2\pi b\sqrt{x^2+y^2}/\lambda L)}{2\pi b\sqrt{x^2+y^2}/\lambda L}\right]^2 \tag{3}$$

由于 $I(x,y)$ 是以(0,0)为中心对称,只研究它在 x 方向的变化即可,并用 r 代替 $2x/\lambda L$,式(2)变为

$$I(r,0)=\frac{1}{(1-a^2+b^2)^2}\cdot\left[\frac{2J_1(\pi r)}{\pi r}-a^2\frac{2J_1(\pi ar)}{\pi ar}+b^2\frac{2J_1(\pi br)}{\pi br}\right]^2$$

令 $V_0(r)=\dfrac{2J_1(\pi r)}{\pi r}$，$V_1(r)=a^2\dfrac{2J_1(\pi ar)}{\pi ar}$，$V_2(r)=b^2\dfrac{2J_1(\pi br)}{\pi br}$，于是

$$I(r,0)=[V_0(r)-V_1(r)+V_2(r)]^2/(1-a^2+b^2)^2=[V_0(r)-(V_1(r)-V_2(r))]^2/(1-a^2+b^2)^2 \quad (4)$$

未加不透明圆圈遮挡时，在聚焦观测屏上任一点的光强为：$I_0(x,y)=U_0(x,y)U_0(x,y)^*$，并将其中央最大值归一化，得

$$I_0(x,y)=\left[\frac{2J_1(2\pi\sqrt{x^2+y^2}/\lambda L)}{2\pi\sqrt{x^2+y^2}/\lambda L}\right]^2 \quad (5)$$

将式(5)作同样的变化，得

$$I_0(r,0)=\left[\frac{2J_1(\pi r)}{\pi r}\right]^2=[V_1(r)]^2 \quad (6)$$

在前面的计算中，$U_0(x,y)^*$，$U(x,y)^*$ 分别是 $U_0(x,y)$，$U(x,y)$ 的共轭复数。

3.2　分析讨论

式(4)中 $I(r,0)$ 随 a，b 和 r 而变，情况非常复杂。首先看 $V_0(r)$ 和 $V_1(r)-V_2(r)$ 的变化情况，它们随 r 的变化如图 3 所示。

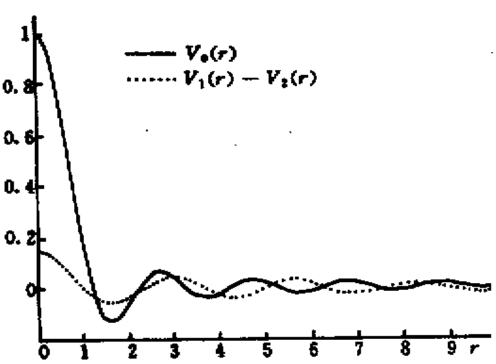

图 3　$V_0(r)$ 和 $V_1(r)-V_2(r)$ 随 r 的变化关系

Fig.3　Relation of $V_0(r)$ and $V_1(r)-V_2(r)$ with r

从图 3 可以看到，希望 $V_1(r)-V_2(r)$ 的各极值位置与 $V_0(r)$ 的各对应极值位置重合，这要求 a 与 l 很接近才行。另外，就是 $V_1(r)-V_2(r)$ 各极值点(除 $r=0$ 外)的值与 $V_0(r)$ 各极值点对应值相近，这要求 $a-b$ 不能太小(与遮挡少量入射能量相矛盾)。由于 $J_1(x)/x$ 的衰减很快，即能量主要分布在中央光斑(圆孔衍射时占 83.78%)和一级次极大(一级旁瓣(圆孔衍射时占 7.22%))。因此，只消减一、二级旁瓣即可，也就是要求 $V_1(r)-V_2(r)$ 的极值位置与 $V_0(r)$ 的一、二级值位置重合(或相近)。

综合上述各因素的影响，当 a，b 变化，经过优化(方法见附录)，得到两种结果：一种结果是 $a=0.8$，$b=0.7$；另一种结果是 $a=0.8$，$b=0.6$。这两种结果 $I(x,0)$ 随 x 的变化如图 4 所示。从图 4(a) 可以看到，一级旁瓣峰值变为原旁瓣峰值的一半；从图 4(b) 可以看到一、二级旁瓣几乎消失，最大的第三级旁瓣峰值也减小约 22%。

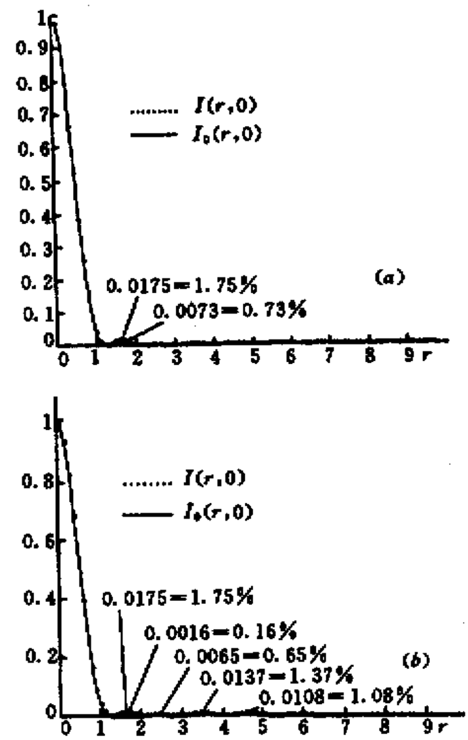

图 4　$I(r,0)$ 和 $I_0(r,0)$ 随 r 的变化关系

Fig.4　Relation of $I(r,0)$ and $I_0(r,0)$ with r

(a) $a=0.8$，$b=0.7$；(b) $a=0.8$，$b=0.6$

根据文献[5]中的方法，可算出各级衍射条纹的能量占总输入能量(包括遮挡掉的部分)的比例为：

圆孔($a=b=0$)时，中央光斑 83.78%，一级旁瓣 7.22%，二级旁瓣 2.77%，其余 6.23%；

($a=0.8$，$b=0.7$)时，中央光斑 63.14%，一级旁瓣 1.87%，二级旁瓣 0.68%，其余 19.00%；

($a=0.8$，$b=0.6$)时，中央光斑 44.95%，一级旁瓣 0.58%，二级旁瓣 1.61%，其余 24.56%。

从这两个结果可以看出，它们都是将原来的一、二级旁瓣往外赶。由于主光斑能量损失的不同，可以根据不同应用，选择两种不同结果。我们根据理论优化的 a，b 做了实验验证，用 CCD 接收衍射光斑，衍射光斑的一维轮廓如图 5 所示。为了使实验结果清晰可见，使用的光强较强，因此中央光斑的强度使 CCD 达到饱和，中央光斑轮廓变平，但整个轮廓与理

论计算一致。

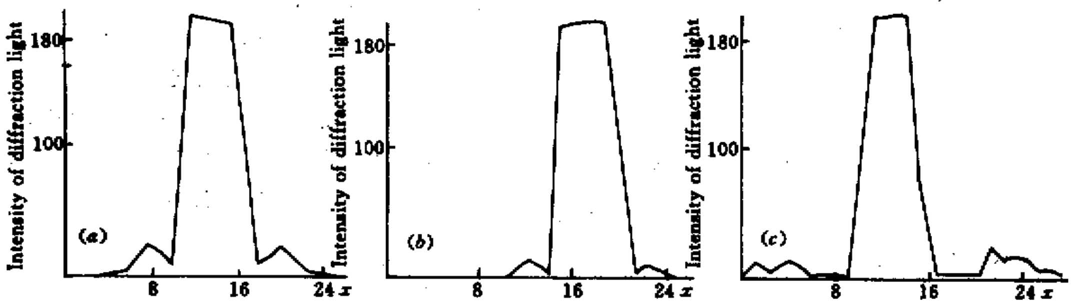

图 5 CCD 采集的衍射图样轮廓

Fig.5 Plot of diffracting image collected by CCD

(*a*) $a = b = 0$;(*b*) $a = 0.8$, $b = 0.7$;(*c*) $a = 0.8$, $b = 0.6$

4 结 论

通过前面的系统孔径遮挡分割法,使系统在焦平面上的衍射旁瓣明显减小。这种方法不但效果好于其他文献中的相移结果,而且做起来也非常简单,为 ICF 实验的聚焦系统消旁瓣提供了一种有效途径。这种方法也可以用于其他方面,如激光加工,可以使边缘更光滑;用在信息存取,可以减少边缘杂散光的影响等。

参 考 文 献

1 Experts of 863-416-5 special topic, Idea design report of SHENGGUANG-Ⅲ antetype equipment (TIL) 1999. 18 ~ 19 (in Chinese)

2 Hideo Ando. Phase-shifting apodizer of three or more portions. *J. Appl. Phys.*, 1992, **31**:557 ~ 567

3 Yutaka Yamanaka, Yutaka Hirose, Hiroaki Fujii *et al*.. High density recording by superresolution in an optical disk memory system. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(20):3046 ~ 3051

4 Zhu Ziqiang, Wang Shifan, Su Xianyu. Modern Optics. Chengdu: The Publishing House of Sichuan University, 1990. 33 ~ 58 (in Chinese)

5 M. Born, E. Wolf. The Principle of Optics. Beijing: Science Press, 1978. 517 ~ 520 (in Chinese)

附 录

一阶贝塞尔函数可以表示为

$$J_1(x) = \frac{x}{2}\left(1 - \frac{x^2}{8} + \frac{x^4}{192} - \cdots\right)$$

于是

$$\begin{aligned} V(r) &= V_0(r) - V_1(r) + V_2(r) = \\ & J_1(\pi r)/(\pi r) - aj_1(\pi ar)/(\pi r) + \\ & bj_1(\pi br)/(\pi r) = \\ & \frac{r}{2\pi r}\Big[\left(1 - \frac{\pi^2 r^2}{8} + \frac{\pi^4 r^4}{192} - \cdots\right) - \\ & \left(1 - \frac{\pi^2 a^2 r^2}{8} + \frac{\pi^4 a^4 r^4}{192} - \cdots\right) a + \\ & \left(1 - \frac{\pi^2 b^2 r^2}{8} + \frac{\pi^4 b^4 r^4}{192} - \cdots\right) b\Big] = \\ & \frac{r}{2\pi r}\Big[(1 + a - b) - \frac{\pi^2}{8}(1 - a^2 + b^2) r^2 + \\ & \frac{\pi^4}{192}(1 - a^4 + b^4) r^4 + \cdots\Big] \end{aligned} \tag{7}$$

显然 $r = 0$ 是式(7)的一个极值点,即为 $I(r,0)$ 的中央主最大值点。为了求其他极值点,必须求解以下方程组

$$\begin{cases} \dfrac{\partial U}{\partial r} = 0 \\ \dfrac{\partial U}{\partial a} = 0 \\ \dfrac{\partial U}{\partial b} = 0 \end{cases} \tag{8}$$

将式(7)(略去高次项)代入式(8)。因为主要消一、二级旁瓣,分别将圆孔衍射时一、二级旁瓣峰值点对应的 r 值代入式(8),使式(8)更简化,然后用迭代法即可。