高能激光衰减器——圆孔光栅

邹海兴 冯大任

（中国科学院上海光机所）

提要：本文从相干光物象关系式出发，证明一束激光通过均匀分布的圆孔光栅后，当 $\pi\xi/N$、$\pi\eta/N \ll 1$ 时，则原光束远场分布将重现。因而圆孔光栅可以作为激光束测量的衰减器。实验证明圆孔光栅作衰减器时，其误差小于1.7%。

High energy laser attenuator——circular aperture grating

Zou Haixen *Feng Daren*

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

Abstract: It has been proved on the basis of the formula for coherent object images that when $\pi\xi/N$, $\pi\eta/N \ll 1$, the far field distribution of the original optical beam will be reconstructed when the laser beam passes through a homogeneously distributed circular aperture grating. Thus the circular aperture grating can be used as the attenuator in laser beam measurement. Experiments showed that when circular aperture grating was used as the attenuator, its error was less than 1.7%

近年来，发展了一种圆孔光栅衰减器[1,2]，因可制成金属基底的器件，表面抛光，可以耐极高的连续功率(如铜基底，抛光，破坏阈值达 10^7 瓦/厘米^2)，特别适用于红外激光衰减之用。但是对其原理及设计参数讨论尚少见。本文对这种衰减器作了理论分析和实验研究。研究表明，在满足一定条件下，圆孔光栅可以对高能激光束进行有效衰减。而且分束比大，衰减后光束仍保持原光束的场分布、偏振态等主要特征。并得出使用这种激光衰减器应满足的条件。

一、主要原理

1. 激光束通过圆孔光栅后的光强分布

设激光束在平面 P 上的复数振幅分布为 $B(\xi_0', \eta_0')$，光强分布为 $I_0(\xi_0', \eta_0')$。经圆孔光栅后，由透镜 L 成象于 Π 平面上。见图1。一般情况下，激光束可以近似地看作为平面波。象平面 Π 上光强 $I(\xi, \eta)$，对完全相干照明物体而言，可写成[3]

$$I(\xi, \eta) = |B(\xi, \eta) * A(\xi, \eta)|^2 \qquad (1)$$

其中，$A(\xi, \eta)$ 是点扩散函数，由光阑函

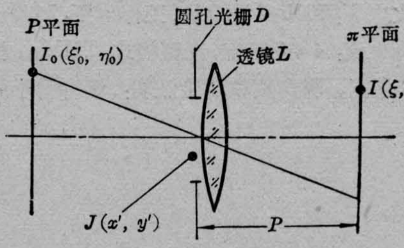


图1 物象关系示意图

收稿日期：1980年1月22日。

数 $T(x', y')$ 来确定。在夫琅和费衍射情况下略去常数因子为：

$$A(\xi', \eta')=\int_{-x'_m}^{x'_m}\int_{-y'_m}^{y'_m} T(x', y')\exp \cdot\left(-2\pi j\,\frac{x'\xi'+y'\eta'}{p\lambda}\right)dx'\,dy' \quad (2)$$

其中 x'_m、y'_m 是光阑最大半径处的座标，λ 是光波长，p 是光阑到象面之距，ξ'、η' 是象面座标。引进一组无量纲数：

$$\xi=\xi'\cdot\frac{2x'_m}{\lambda p}=\frac{\xi'}{e_0}$$

$$\eta=\eta'\cdot\frac{2y'_m}{\lambda p}=\frac{\eta'}{d_0} \quad (3)$$

e_0、d_0 表示均匀照明矩形方孔（宽 $2x'_m$，长 $2y'_m$）在 II 平面上衍射花样级次间隔值。

对光阑面考察点 $M(x', y')$，引进另一组无量纲数：

$$x=\frac{x'}{2x'_m}$$

$$y=\frac{y'}{2y'_m} \quad (4)$$

则，

$$A(\xi, \eta)=\int_{-\frac{1}{2}}^{+\frac{1}{2}}\int_{-\frac{1}{2}}^{+\frac{1}{2}} T(x, y)\cdot\exp[-2\pi j(x\xi+y\eta)]\cdot dx\,dy \quad (5)$$

为运算方便明了，这里仅考虑一个矩形孔，而圆孔亦可得到类似结论。

设矩形方孔光阑函数

$$T(x, y)=1 \quad |x|\leqslant\frac{1}{2},\ |y|\leqslant\frac{1}{2}$$

$$=0 \quad |x|>\frac{1}{2},\ |y|>\frac{1}{2}$$

$$A_{矩形}(\xi, \eta)=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} T(x, y)\cdot\exp[-2\pi j(x\xi+y\eta)]dx\,dy$$

$$=\int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}}\int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}}\exp[-2\pi j(x\xi+y\eta)]\cdot dx\,dy=\sin C\xi\cdot\sin C\eta \quad (6)$$

考虑一个圆孔光栅，有 $N\times N$ 个圆孔方阵。圆孔直径为 d，间距为 l，中心座标为 (x_1, y_1)，(x_2, y_2)，…，(x_n, y_n)。其中

$$x_n=nl/2x'_m,\ y_n=nl/2y'_m,$$

且令 $$x'_m=y'_m。$$

圆孔光栅光阑函数可写成：

$$T(x, y)=1 \quad (x_n, y_n)\pm r\leqslant\frac{1}{2}$$

$$=0 \quad (x_n, y_n)\pm r>\frac{1}{2}$$

则 $$A_{光栅}(\xi, \eta)=\sum_n\iint\exp\cdot\{-2\pi j[(x_n+x'')\xi+(y_n+y'')\eta]\}dx''\,dy''$$

$$=\sum_n\exp[-2\pi j(x_n\xi+y_n\eta)]\cdot\iint_A\exp\cdot[-2\pi j(x''\xi+y''\eta)]\cdot dx''\,dy''$$

其中

$$\iint_A\exp[-2\pi j(x''\xi+y''\eta)]dx''\,dy''=A_0(\rho),$$

定义为圆孔光栅小圆孔的点扩散函数，经座标变换可改写为：

$$A_0(\rho)=\int_0^{1/2}T(r)J_0(2\pi r\rho)2\pi r\,dr \quad (8)$$

其中 $$\rho=\frac{\rho'}{e'_0},\ r=\frac{r'}{d},$$

$$\rho'=\sqrt{\xi'^2+\eta'^2}。$$

$r'=\sqrt{x'^2+y'^2}$，e_0 为边长为 d 的矩形孔衍射条纹间距。

当光阑函数 $$T(r)=1 \quad r\leqslant\frac{1}{2}$$

$$=0 \quad r>\frac{1}{2}$$

则

$$A_0(\rho)=\frac{\pi}{4}\,\frac{2J_1(\pi\rho)}{\pi\rho}=\frac{\pi}{4}\Lambda_0 \quad (9)$$

其中，

$$\Lambda_0=\frac{2J_1(\pi\rho)}{\pi\rho} \quad (9')$$

由(7)、(9)式可得：

$$A_{光栅}(\xi,\eta)=\frac{\pi}{4}A_0\sum_{n=-\frac{N}{2}}^{n=\frac{N}{2}}\exp[-2\pi j(nl\xi/2x'_m)]\sum_{n=-\frac{N}{2}}^{n=\frac{N}{2}}\exp[-2\pi j(nl\eta/2x'_m)]$$

$$=\frac{\pi}{4}A_0\Big[1+2\cos(2\pi l\xi/2x'_m)+2\cos(2\pi 2l\xi/2x'_m)+\cdots$$

$$+2\cos\Big(2\pi\frac{N}{2}l\xi/2x'_m\Big)\Big]\cdot\Big[1+2\cos(2\pi l\eta/2x'_m)$$

$$+2\cos(2\pi 2l\eta/2x'_m)+\cdots+2\cos\Big(2\pi\frac{N}{2}l\eta/2x'_m\Big)\Big]$$

$$=\frac{\pi}{4}A_0\left[1+\frac{2\sin\Big(\pi\frac{N}{2}l\xi/2x'_m\Big)\cos\Big[\pi\Big(\frac{N}{2}+1\Big)l\xi/2x'_m\Big]}{\sin(\pi l\xi/2x'_m)}\right]$$

$$\cdot\left[1+\frac{2\sin\Big(\pi\frac{N}{2}l\eta/2x'_m\Big)\cos\Big[\pi\Big(\frac{N}{2}+1\Big)l\eta/2x'_m\Big]}{\sin(\pi l\eta/2x'_m)}\right]$$

当 $N\gg1$ 时，令

$$\frac{N}{2}l\approx\Big(\frac{N}{2}+1\Big)l=x'_m$$

则，
$$A_{光栅}(\xi,\eta)=\frac{\pi}{4}A_0\frac{2\sin\Big[\frac{1}{2}(\pi\xi+\pi\xi/N)\Big]\cos\Big[\frac{1}{2}(\pi\xi-\pi\xi/N)\Big]}{\sin(\pi\xi/N)}$$

$$\cdot\frac{2\sin\Big[\frac{1}{2}(\pi\eta+\pi\eta/N)\Big]\cos\Big[\frac{1}{2}(\pi\eta-\pi\eta/N)\Big]}{\sin(\pi\eta/N)}$$

当 $\pi\xi/N$ 和 $\pi\eta/N\ll1$ 时（N 为圆孔数），相当于衍射列阵中心斑。

$$A_{光栅}(\xi,\eta)=\frac{\pi}{4}N^2A_0\sin C\xi\sin C\eta \quad (10)$$

由于小圆孔直径 d 远小于通光半直径 x'_m，所以，A_0 与 $\sin C\xi$（或 $\sin C\eta$）相比是一个慢变函数。故可以把 $N^2\frac{\pi}{4}A_0$ 视为常数。故(10)式可改写为：

$$A_{光栅}(\xi,\eta)=\mathrm{con\ st}\sin C\xi\sin C\eta \quad (11)$$

比较(6)式和(11)式，除常数项（衰减系数有关项）外，$A_{矩形}(\xi,\eta)$ 与 $A_{光栅}(\xi,\eta)$ 相同。联系(1)式，当物函数 $B(\xi,\eta)$ 一旦确定，则 $I_{矩形}(\xi,\eta)\approx I_{光栅}(\xi,\eta)$。因而，圆孔光栅中圆孔数 N 足够多，圆孔与通光孔相比足够小，激光束衰减后的光强分布与原光束光强分布在远场是相同的。到此，证明了圆孔光栅可以如实地衰减激光束。

2．衰减系数

前面讨论中，点扩散函数忽略了能量因子，归一化为1。在(6)式中略去了 $\frac{1}{\lambda}\sqrt{ED}$ 项，其中，E 为入射在面积为 D 的光阑上的光能量，(10)式中略去了 $\frac{1}{\lambda}\sqrt{E_1D_1}$ 项，E_1 为进入小圆孔之光能，D_1 为小圆孔的面积。边长为 $2x'_m$ 的方形孔，远场中央主极大光强为

$$I_{OD}=\frac{ED}{\lambda^2}=\frac{E(2x'_m)^2}{\lambda^2}=\frac{4Ex'^2_m}{\lambda^2}$$

小圆孔直径为 d，其中央主极大光强为

$$I_{od}=\frac{E_1\frac{\pi}{4}d^2}{\lambda^2}=\frac{\pi E_1d^2}{4\lambda^2}$$

因而，相同孔径的圆孔光栅对主极大强度衰减系数为：

$$\frac{N^4\left(\frac{\pi}{4}\right)^2\frac{\pi E_1 d^2}{4\lambda^2}}{\frac{4Ex_m'^2}{\lambda^2}}=\left(\frac{\pi}{4}\right)^2\alpha^2 \tag{13}$$

其中，

$$\alpha=\frac{N^2E_1}{E}=\frac{N^2\frac{\pi}{4}d^2}{4x_m'^2} \tag{14}$$

α 定义为光能衰减系数或面积衰减系数。

3．高能激光衰减器设计考虑

一个光衰减器应考虑光能衰减系数、衍射级次间隔等，以便正确衰减和定量测出所需的光束之参数。

图2为一个典型的圆孔光栅照片，d 为小圆孔直径，l 为圆孔间距。光能衰减系数或透过系数为

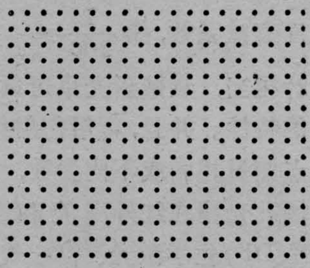


图2　圆孔光栅

直径 $d=0.02$ 毫米，孔间距 $l=0.1$ 毫米，光能衰减系数为 3.14×10^{-2}，光强衰减系数为 6.1×10^{-4}

$$\alpha=\frac{\pi}{4}d^2/l^2=\frac{\pi}{4}\frac{d^2}{l^2} \tag{15}$$

孔间距 l 是一个重要参数，其数值取决于所测光束之方向性而定，即两相邻衍射级光束不重迭，应满足：

$$\frac{\lambda}{l}>2\theta \tag{16}$$

其中，2θ——光束方向性全角。

选取小圆孔直径 d 时，不但需满足衰减系数要求，而且要满足 $d\ll x_m'$。N 数要达到一定数量等。

对高能激光衰减器，选取合适的基底材料也很重要。如表面抛光的黄铜基底可耐极高功率，高达 10^7 瓦/厘米^2。制造也较方便，对远红外，小圆孔直径 d 较大，故可直接打孔，而对较小 d，可采用照相复制腐蚀办法来制造。由于对远红外激光无特别理想的透过材料，因此圆孔光栅衰减器更适合这种场合使用。

二、实验研究

实验布置见图3，由单横模输出氦-氖激光器作模拟光源，光阑采用两种方式：一是单孔（直径为1毫米、3毫米两种），二是双孔（直径0.3毫米，孔间距0.36毫米）。前者模拟模式较好的激光束分布，后者模拟激光束斑内光强分布有细节结构的情况。圆孔光栅衰减器由光学缩微术制成。小圆孔直径0.02毫米，孔间距0.1毫米（见图2）。聚焦透镜焦距长2米，焦面上的象，由照相机（$f'=75$ 毫米）拍摄。

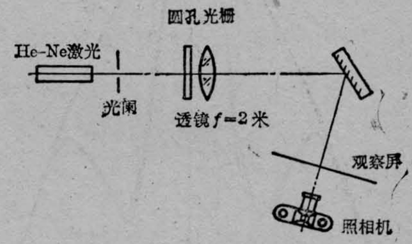
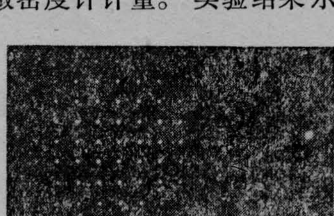


图3　实验装置示意图

实验结果：

1．单孔作模拟光源，拍摄结果见图4。右边是未通过圆孔光栅的小孔象，左边是通过圆孔光栅衰减器后的小孔象，用读数显微镜和显微密度计计量。实验结果示于表1。



加圆孔光栅　　无圆孔光栅

图　4

表1　激光束衰减后衍射象点变化情况

(光阑直径 $\phi 1$ 毫米，未经衰减器，在象面上，光斑直径实测尺寸为 3.45 毫米)

光斑序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
光斑直径(毫米)	2.82	3.29	3.49	3.51	3.56	3.51	3.47	3.38	3.0
间　距(毫米)	13.2	13.2	13.4	12.4	12.5	12.7	12.8	12.9	

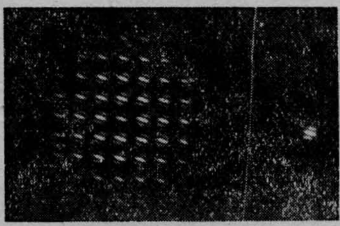


图　5

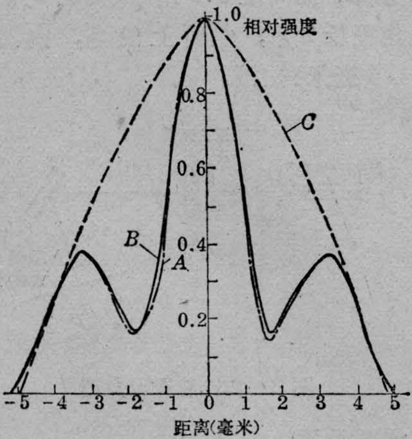


图6　双孔衍射场分布经圆孔光栅衰减器后的场分布(显微密度计测量)

双孔($\phi 0.3$ 毫米)孔距 0.36 毫米，聚焦透镜 $f=2$ 米
A—双孔衍射场分布；B—双孔+圆孔光栅场分布；
C—$\phi 0.3$ 毫米圆孔衍射场分布(理论值)

由表1可见，取衰减后光束中若干个象点，均可测量其光束参数，各象点测量相对误差不大于1.7%

2．用双孔模拟光强有起伏的光束分布。拍摄结果见图5。右边是双孔衍射远场分布。很明显，中心主斑内有一中央主斑及两个弱旁斑。左边是经衰减器后的远场分布。各点上均可见到三个斑的场分布。我们测量其中一个斑和不经过衰减器的斑，结果示于图6。图示可见，衰减后光束场分布与原光束分布基本相同，误差较小。

三、结　　论

用圆孔光栅作高能激光衰减器，可以耐极高的功率如10^7 瓦/厘米^2，并且有很大的能量和强度衰减系数，如$\frac{1}{100}\sim\frac{1}{1000}$。只要衰减器设计得当，衰减后光束可以确切地反映原光束的特性。并且，可用衍射级次较多，可同时多点测量相同或不同参数，提高了测量精度。圆孔光栅在红外高能和高功率激光，如HF(DF)化学激光、CO_2气动激光和CO电气动激光等测量中，有着广泛的使用前景。

作者对陈钰明、陈兰英等同志的帮助表示谢意。

参　考　文　献

[1] R. W. O'neil *et al.*; *Appl. Opt.*, 1974, **13**, 314.
[2] T. G. Miller *et al.*; AD A023756.
[3] E. Wolf; Progress in Optics, Vol. III, p. 37 (1964).