高功率光束吸收器的设计

李红光,达争尚,孙 策,董晓娜

(中国科学院西安光学精密机械研究所 先进光学仪器研究室,陕西 西安 710119)

摘 要: 为了实现 4%取样后对剩余激光高达 10^9 倍的吸收,给出一种光束吸收器的设计方法,推导了光束从进入吸收器到离开吸收器全过程中所对应的各种角度关系, 包括入射光线与吸收器交点的夹角、光线从入射变为出射的翻转临界角、出射光线与吸收器交点的夹角、光线离开吸收器临界角等角度关系。进而计算出光线在与吸收器的每一个交点处的取样率,得到光束从进入吸收器到离开吸收器全过程的衰减倍率。以此设计一种光束吸收器并在软件中进行光线追迹分析,结果表明该吸收器的吸收倍率高达 10^{11},满足激光吸收倍率要求并且和理论计算结果吻合;据此理论设计的实物吸收器也在激光系统中得到良好应用,得到调制度 $M<1.2$ 和对比度 $C<0.07$ 的近场图像,说明该设计方法是合理的。

关键词: 光束吸收器; 光束取样; 临界角; 光学设计

中图分类号: O435.1;O436.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)07-2209-05

Design of high power light absorber

Li Hongguang, Da Zhengshang, Sun Ce, Dong Xiaona

(Laboratory of Advanced Optical Technique, Xi′an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi′an 710119, China)

Abstract: In order to realize the 10^9 times absorption for residual laser after 4% sampling, a kind of design method of light absorber was given. From light entrance to light exit the absorber, total angle relations were derived, including the angle of entrance light intersection with the absorber, turnover angle from entrance to exit, the angle of exit light intersection with the absorber, and turnover angle of the light departure from the absorber. The calculated angles were taken into polarization formula, and the sampling efficiency from every intersection was gotten, and so the total process attenuation was obtained from light entrance to light exit the absorber. According to the above formulas, a kind of absorber was designed, and it was analyzed in optical software. The results show that the absorption can reach to 10^{11}, which satisfies the absorption requirements and is identical with theory calculation; This kind of absorber has been used in the laser system well, near field image with modulation $M<1.2$ and contrast $C<0.07$ are gotten, so the design method is reasonable.

Key words: light absorber; light sampling; critical angle; optical design

收稿日期: 2013-11-16; **修订日期:** 2013-12-14

基金项目: 国家高技术研究与发展计划(051Z331BOA)

作者简介: 李红光(1982-),男,助理研究员,硕士,主要从事高功率激光及激光参数诊断方面的研究。Email:xiaoguang0539@163.com

0 引 言

在激光测量系统中,由于入射激光的功率很高,能量也很大,而激光测量系统中探测器所需的能量非常小,因此为适应探测器的响应范围,在探测器之前需要将入射激光进行衰减。对衰减后的剩余激光需要进行吸收处理,如果任由剩余激光在测量系统内进行传输,必然会给测量系统带来噪声,对测量系统的信号产生干扰,并且这种剩余激光一旦会聚到系统内部的光学元件或探测器上,往往会产生空气击穿造成破坏。为避免上述问题,需要对剩余激光进行吸收管理。

一般使用的吸收器为平板有色光学玻璃,光束入射到平板有色玻璃上之后,根据有色玻璃厚度不同以及激光波长不同,其对应的激光吸收强度也会不同。为了减少杂散光而在平板有色玻璃上镀高增透膜,其表面仍有 0.5%的剩余反射,这对于高功率、大能量的激光,表面反射量是非常可观的,给测量带来较大的噪声。文中通过计算设计一种光束吸收器,有效的对取样剩余光束进行管理,大大减少了杂散光,降低了噪声对系统测量的影响,提高了系统的精度[1-4]。

文中所述吸收器是由多个三棱柱(三棱柱迎光方向为尖棱,底面两棱带有小台阶以方便排布夹持)依次排列组合而成,根据实际光束口径的大小选择排布所需三棱柱的个数。

1 入射光束与三棱柱反射面法线的夹角计算

如图 1 所示,设三棱柱截面的角度为 θ_1、θ_2,初始入射光线与 X 轴的夹角为 θ_3,根据 θ 角度的不同,入射光与三棱柱反射面会有多个不同的交点,分别记为 O_1、O_2、…、O_m,交点对应的入射光束与三棱柱反射面法线的夹角分别为 α_{10}、α_{20}、…、α_{m0},当交点次数 m 满足临界条件关系式时,入射光线将会向光劈入口 AC 方向反射(即向外出射),假设出射光线与三棱柱反射面会有多个不同的交点,分别即为 P_1、P_2、…、P_n,交点对应的出射光束与三棱柱反射面法线的夹角分别为 β_{10}、β_{20}、…、β_{m0},则根据几何关系以及光线的反射定律可以进行计算分析得到如下的几组公式。

光束与 X 轴夹角 θ_3 入射到光束吸收器,经过各反射面的多次反射后根据几何关系可以得到入射光束与三棱柱反射面法线的夹角[5-6]。

第一个交点:$\alpha_{10}=90°-(\theta_1+\theta_3)$;

第二个交点:$\alpha_{20}=90°-(\theta_1+\theta_3)-(\theta_1+\theta_2)$;

第三个交点:$\alpha_{30}=90°-(\theta_1+\theta_3)-2(\theta_1+\theta_2)$;

…

第 m 个交点:

$$\alpha_{m0}=90°-(\theta_1+\theta_3)-(m-1)(\theta_1+\theta_2) \tag{1}$$

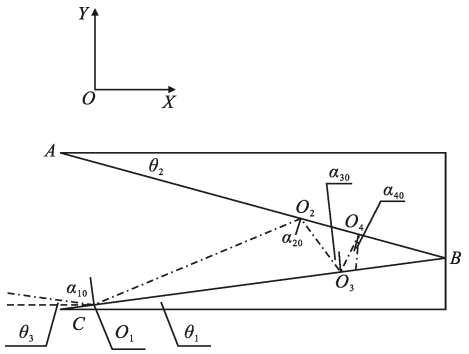

图 1 入射光线图

Fig.1 Figure of incidence ray

如图 2 所示,入射光束从介质的第 m 个点(即 O_m 点)反射后入射到介质的第 $m+1$ 个点上,记为 P 点,当 $O_mP\perp AB$ 时,入射光束会沿着原光路返回,即

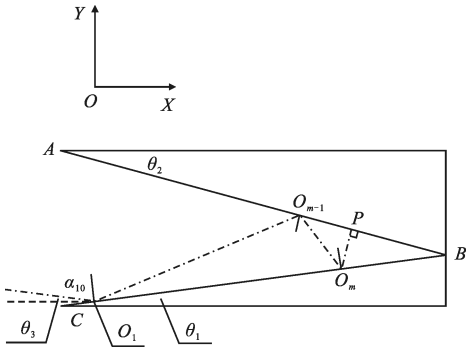

图 2 光束产生翻转的临界角

Fig.2 Critical angle of incidence ray turnover

入射光束会在 P 点变为出射光束(相对于吸收器),P 点即为入射光束变为出射光束的临界点。根据几何关系可得到,在入射方向上:

$$\alpha_{m0}=\theta_1+\theta_2=90°-(\theta_1+\theta_3)-(m-1)(\theta_1+\theta_2)$$

可以得到:

$$(\theta_1+\theta_3)+m(\theta_1+\theta_2)=90° \tag{2}$$

此式即为光线翻转临界条件,当 $\alpha_{m0}\leqslant\theta_1+\theta_2$ 时,光线将产生翻转。在实际设计过程中尽量避开 $\alpha_{m0}=$

$\theta_1+\theta_2$ 的状态，此时从吸收器出射的光束会沿原光路返回造成系统的噪声。当已知临界角 $\theta_1+\theta_2$ 计算入射光束与介质的交点个数 m 时，若 m 为非整数，则 $m=m_0+1$(其中 m_0 为 m 取整数后的值)。

2 出射光束与三棱柱反射面法线的夹角计算

如图 3 所示，当光线由入射进入吸收器到出射离开吸收器这一过程中光线将产生偏转，假设光线翻转后与介质的交点分别记为 P_1、P_2、P_3、…、P_n，则根据几何关系可得到出射光束与三棱柱反射面法线的夹角。

第一个交点：$\beta_{10}=(\theta_1+\theta_2)-\alpha_{m0}=(\theta_1+\theta_3)+m(\theta_1+\theta_2)-90°$；

第二个交点：$\beta_{20}=2(\theta_1+\theta_2)-\alpha_{m0}=(\theta_1+\theta_3)+(m+1)(\theta_1+\theta_2)-90°$；

第三个交点：$\beta_{30}=3(\theta_1+\theta_2)-\alpha_{m0}=(\theta_1+\theta_3)+(m+2)(\theta_1+\theta_2)-90°$；

…

第 n 个交点：

$$\beta_{n0}=n(\theta_1+\theta_2)-\alpha_{m0}=(\theta_1+\theta_3)+(m+n+1)(\theta_1+\theta_2)-90° \quad (3)$$

而当 β_{n0} 满足条件(4)时，从 P_n 点反射的光线将会平行于斜面 BC 出射，从而不会再与介质产生交点。

$$\beta_{n0}\geqslant 90°-(\theta_1+\theta_2) \quad (4)$$

同理，当已知临界角 $\theta_1+\theta_2$、入射光线的交点 m 计算入射光束与介质的交点个数 n 时，若 n 为非整数，则 $n=n_0+1$(其中 n_0 为 n 取整数后的值)。

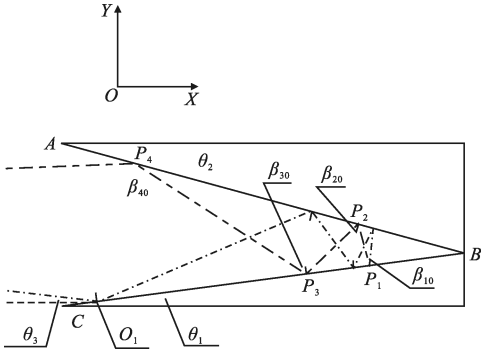

图 3 出射光线图

Fig.3 Figure of exit ray

但是在实际系统中由于介质的尺寸有限，虽然翻转后的出射光线不满足临界条件 $\beta_{n0}\geqslant 90°-(\theta_1+\theta_2)$，但已经不会再与介质产生交点，因此在实际的计算中光线从入射进入吸收器至翻转出射吸收器的整个过程与吸收器的交点个数介于区间$[m,m+n]$之间。

3 全程衰减倍率计算

假设入射光束的偏振态为 P 态，入射过程中光束与吸收器每次相交点的取样率为 R_i，入射全过程的衰减倍率为 R_0；出射过程中光束与吸收器每次相交点的取样率为 R_j，入射全过程的衰减倍率为 R'；则根据菲涅尔公式光束经过吸收器出射后全程的衰减倍率可以表示为：

$$\eta=R_0\times R'=\prod_{i=1}^{m}R_i\times\prod_{j=1}^{n}R_j=\prod_{i=1}^{m}\frac{\tan^2\left(\alpha_i-\arcsin\frac{\sin\alpha_i}{n_0}\right)}{\tan^2\left(\alpha_i+\arcsin\frac{\sin\alpha_i}{n_0}\right)}\times\prod_{j=1}^{n}\frac{\tan^2\left(\beta_j-\arcsin\frac{\sin\beta_j}{n_0}\right)}{\tan^2\left(\beta_j+\arcsin\frac{\sin\beta_j}{n_0}\right)} \quad (5)$$

式中：n_0 为吸收材料的折射率；α_i 即为公式(1)中的角度值；β_j 即为公式(3)中的角度值，公式中折射率 n_0、θ_1、θ_2、θ_3 以及 m、n 为变量；

假设入射光束的偏振态为 S 态，则根据菲涅耳公式光束经过吸收器出射后全程的衰减倍率可以表示为：

$$\eta=R_0\times R'=\prod_{i=1}^{m}R_i\times\prod_{j=1}^{n}R_j=\prod_{i=1}^{m}\frac{\sin^2\left(\alpha_i-\arcsin\frac{\sin\alpha_i}{n_0}\right)}{\sin^2\left(\alpha_i+\arcsin\frac{\sin\alpha_i}{n_0}\right)}\times\prod_{j=1}^{n}\frac{\sin^2\left(\beta_j-\arcsin\frac{\sin\beta_j}{n_0}\right)}{\sin^2\left(\beta_j+\arcsin\frac{\sin\beta_j}{n_0}\right)} \quad (6)$$

式中：n_0 为吸收材料的折射率，α_i 即为公式(1)中的角度值；β_j 即为公式(3)中的角度值，公式中折射率 n_0、θ_1、θ_2、θ_3 以及 m、n 为变量；

在六个变量中给定 n_0、θ_1、θ_2、θ_3 即可求出 m、n 的数值，进而带入公式(5)、(6)中求出吸收器的全程衰减倍率。

4 光束吸收器实例计算

4.1 设计步骤

(1) 给出吸收器设计的初始条件，吸收材料的折

射率 n_0,角度 θ_1、θ_2、θ_3,计算出光束与吸收器介质的交点个数 m、n;

(2) 将 n_0、θ_1、θ_2、θ_3 以及 m、n 带入公式(5)或(6)中求出吸收器的全程衰减倍率，看衰减倍率是否满足要求,否则调整系数重复步骤(1)、(2)。

4.2 设计实例

以上给出一种吸收器设计的普适公式，在设计中往往根据实际情况对其中的一些参数进行简化。给定 $\theta_2=\theta_3=0$,$\theta_1=25°$,直角三棱柱按照图 4 所示的方式进行排布，吸收式平板排布于三棱柱的四周以降低杂散光的影响,入射偏振态为 P 态[7-9]。

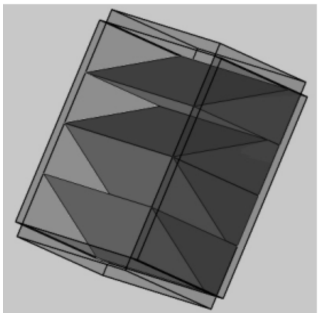

图 4 吸收器立体效果

Fig.4 Absorber of incidence ray three-dimensional effect

根据以上所列公式可得出:当 $\theta_1=25°$时,根据临界角公式可计算得到 $m=3$，即入射光线经过 3 次与介质的交点后光线将产生翻转变为出射光线。光线翻转后与介质的第一个交点对应的出射光束与三棱柱反射面法线的夹角为 $\beta_{10}=10°$，可解得当 $n=4$ 时，光线将不会再与介质产生交点。因此在实际的计算中光线从入射进入吸收器至翻转出射吸收器的整个过程与吸收器的交点个数介于区间[3,7]之间。

由表 1、表 2 中可计算偏振态为 P 态的激光光束从入射进入吸收器至翻转出射吸收器的整个过程的最小取样倍率为($m=3$ 时)$\eta_1=7.68\times10^{-6}$;最大取样倍率为($m+n=7$ 时)$\eta_2=4.88\times10^{-12}$;因此只要激光束经过吸收器后的衰减倍率 $\eta_1\leqslant\eta\leqslant\eta_2$ 即符合设计分析。

表 1 入射阶段取样率

Tab.1 Sampling fraction for incidence

m	α	Sampling efficiency
1	65°	1.2%
2	40°	1.6%
3	15°	4.0%

表 2 出射阶段取样率

Tab.2 Sampling fraction for emergence

m	β	Sampling efficiency
1	10°	4.2%
2	35°	2.2%
3	60°	0.14%
4	85°	49.2%

4.3 模拟验证

在 Tracepro 软件中模拟吸收器在实际光路中的使用姿态,建立光源模拟实际入射激光束,建立探测器以探测从吸收器出射的激光束，三维模型如图 5 所示。由光源发出的激光束经过吸收器后,剩余激光入射到探测器上，在探测器上得到剩余激光的能量分布图以及探测器接收能量的数值，通过剩余激光和入射激光的比对即可得到吸收器的衰减倍率。

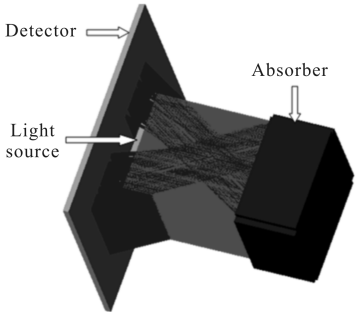

图 5 吸收器光线分析

Fig.5 Ray analysis of absorber

设置光源输出光通量为1×10^5 W,光源出射的光束垂直入射到吸收器上，从吸收器出射后到达探测器上的光通量为 $\varphi_0=8.58\times10^{-7}$;激光束从入射到出射总的衰减倍率为 8.58×10^{-12}。图 6 给出探测器上剩余激光束的辐射度分布图。

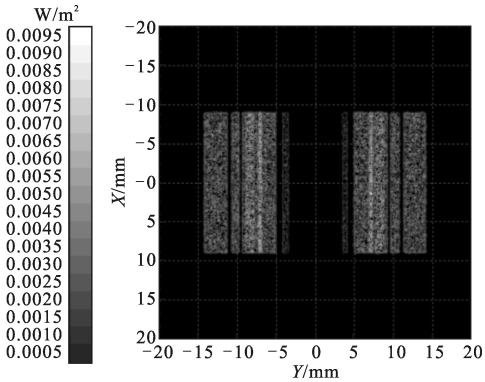

图 6 垂直入射光线辐照度分析图

Fig.6 Irradiance maps of perpendicular ray

考虑到吸收器的安装精度，设光源所在的面为 YZ 平面，若光源出射的光束绕 Z 轴倾斜 1°入射到吸收器上，从吸收器出射后到达探测器上的光通量为 $\varphi_1=2.72\times10^{-6}$；激光束从入射到出射总的衰减倍率为 2.72×10^{-11}。

若光源出射的光束绕 Y 轴倾斜 1°入射到吸收器上，从吸收器出射后到达探测器上的光通量为 $\varphi_2=8.62\times10^{-7}$；激光束从入射到出射总的衰减倍率为 8.62×10^{-12}。

以上三种情况的衰减倍率都在吸收器的设计值范围之内，并且满足激光束的高倍率衰减要求。假设入射到吸收器的能量为 1×10^4 J，则从吸收器出射的能量最大值为 0.272 μJ，杂光量不会对系统的测量造成干扰，并且激光束的出射光束与入射光束有很大的夹角，出射光束已远远偏离入射光束。此类高功率激光吸收器已经在激光测试系统中得到了应用，如图 7 所示，吸收器有效的完成了剩余杂散光的吸收，得到了调制度 $M<1.2$ 和对比度 $C<0.07$ 的近场图像，如图 8 所示。

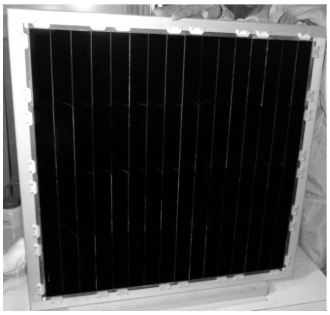

图 7 吸收器实物照片

Fig.7 Picture of absorber

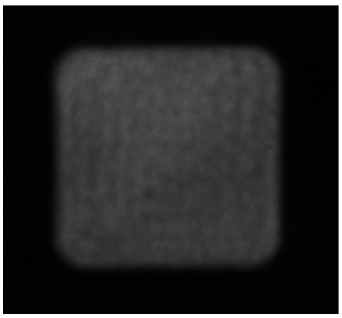

图 8 激光测试系统近场图像

Fig.8 Near field image of laser testing system

5 结　论

为了能够对取样后剩余的激光能量进行有效的管理吸收，文中给出一种吸收器的设计思路，通过实例计算和光线追迹模拟对比分析表明，此种吸收器能够实现对激光束的高达 10^{11} 倍的高倍率吸收，对剩余激光束进行了有效的管理，大大降低了杂散能量对系统的影响，实物吸收器也在系统中得到了良好应用，也说明该吸收器的设计方法是可行的。

参考文献：

[1] Tang Ling, Li Xiaoqun, Dang Zhao, et al. Study on the absorber in the measurement of large aperture high peak power laser [J]. ***Electronic Measurement Technology***, 2010, 33(3): 5-8. (in Chinese)

[2] Laumann C W, Caird J A, Smith J R, et al. Development of third harmonic output beam diagnostics on Nova [C]//SPIE, 1991, 1414: 151-160.

[3] Wegher P J, Barker C E, Caird J A, et al. Third-harmonic performance of the beamlet prototype laser [C]//SPIE, 1997, 3047: 370-380.

[4] Lawson J K, Renard P A, Henesian M A, et al. Focal spot characterization[C]//SPIE, 1997, 3047: 800-808.

[5] Yao Qijun. Optics Tutorial [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002: 78-82. (in Chinese)

[6] Li Lin. The Modern Optical Design Methods [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2009: 210-211. (in Chinese)

[7] Yuan Liyin, Lin Ying, He Zhiping, et al. Design and realization of an long-wave infrared hyperspectral imaging system [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2011, 40(2): 181-185. (in Chinese)

[8] Zhang Xiao, Yang Jianfeng, Ma Xiaolong, et al. Thermalization design of wide temperatre range for hybrid reflective/diffractive infrared objective[J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2011, 40(1): 79-82. (in Chinese)

[9] Yan Peipei, Fan Xuewu, He Jianwei. Design of hybrid refractive-diffractive star sensor optical system with small *F*-number [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2011, 40(12): 2459-2464. (in Chinese)