

文章编号 : 0253-2239(2001)08-1008-04

变角度薄膜衰减器的应用研究*

黄 杰 蔡希洁 林尊琪

(高功率激光物理国家实验室, 上海 201800
中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 : 对可应用于神光 II 精密化项目的变角度薄膜衰减器进行了理论分析、数值计算, 在小激光装置上进行了闭环自动衰减控制实验。模拟实验证实了该衰减器具有精密连续可调、大口径、高能量负载、高光束质量的特点, 这是其它光学衰减器难以做到的。

关键词 : 变角度薄膜衰减器; 衰减器; 闭环自动控制; 精密能量控制

中图分类号 : TN209 文献标识码 : A

精密能量平衡是惯性约束核聚变中功率平衡的基础^[1]。在神光 II 精密化项目中, 为了达到 8 路激光功率的平衡, 需要对能量精确地进行控制。该项目对能量衰减器的要求非常严格, 要求能量衰减器具有大口径、高能量负载、高光束质量以及精密连续可调的特点。一般的衰减器通常不能同时满足这些要求。本文参照国外高功率激光装置提及的能量衰减方案^[2,3], 对变角度薄膜衰减器进行了初步的研究, 并且实现了两路闭环自动控制^[4], 达到了 1% (rms) 的能量平衡控制精度。

1 变角度薄膜衰减器的工作原理

变角度薄膜衰减器最初步的设想, 来源于偏振光在通过玻璃基板时, 其能量透射率随入射角的变化而变化。对于普通的玻璃基板, 由菲涅耳公式有

$$\left. \begin{aligned} T_p &= \frac{n_2 \cos i_2 \sin^2(i_2 - i_1)}{n_1 \cos i_1 \sin^2(i_2 + i_1)} = \frac{4 \sin(2i_1) \sin(2i_2)}{(\sin 2i_1 + \sin 2i_2)^2} \\ T_s &= \frac{n_2 \cos i_2 \sin^2 i_2 \cos^2 i_1}{n_1 \cos i_1 \sin^2(i_1 + i_2)} = \frac{\sin(2i_1) \sin(2i_2)}{(\sin 2i_1 + \sin 2i_2)} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

i_1 为入射角, i_2 为折射角。考虑一般的实验条件, 有 $n_1 = 1.0$, $n_2 = 1.51$ (K₉ 玻璃, $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$) 得

到两种偏振光的透射率曲线如图 1 所示。

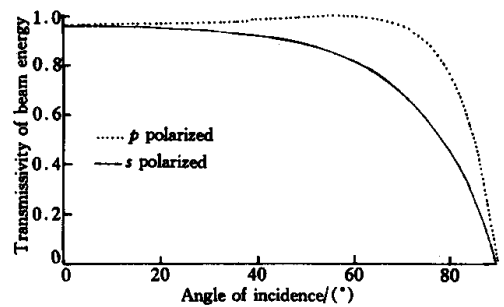


Fig. 1 Transmissivity of polarized beam on glass surface

显然, 由于光束斜入射单块基板玻璃时, 会发生光束位置平移, 这对于神光 II 精密化应用是不允许的。为了让衰减器的插入尽量不影响原有光路的工作, 需要对该平移进行补偿。实验中采用了对称的相同结构进行补偿, 如图 2 所示。通过机械结构设计, 在两块基板玻璃同时相向转动的过程中, $\varphi < 0.2^\circ$, 由下面的(2)式和(3)式, 得到光路的偏移量 $\Delta d(\theta)$ 不超过 0.04 mm。因此这种光束平移的影响可以忽略。

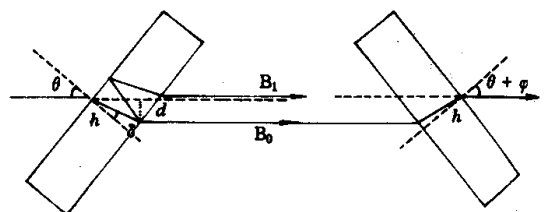


Fig. 2 Symmetry arrangement to compensate beam shift

* 国家科委 863 高科技资助课题。

$$d(\theta) = \frac{h}{\cos\delta} \sin(\theta - \delta) = \frac{h \sin[\theta - \arcsin(\sin\theta/n)]}{\cos[\arcsin(\sin\theta/n)]}, \quad (2)$$

$$\Delta d(\theta) = d(\theta + \varphi) - d(\theta). \quad (3)$$

因此,只要从机械上控制两块基板玻璃同时反向旋转,则可以控制通过该装置的透射率,达到连续调节的目的。

若考虑用未镀膜的玻璃基片直接进行衰减控制,由于仪器的对称设计,垂直入射时(忽略光在玻璃内部次反射和玻璃的吸收)具有最大透射率,仅为

$$T = T_s^4 = \left[\frac{4n_1 n_2}{(n_1 + n_2)^2} \right]^4 = \left[\frac{4 \times 1.0 \times 1.51}{(1.0 + 1.51)^2} \right]^4 = 84.48\%, \quad (4)$$

这对于实际应用来说,会造成较大的能量损耗。这对于神光II精密化以及其它的大多数应用来说,是不允许的。另外,从透射率曲线的形状要求考虑,若采用s偏振光,则必须镀膜减少反射;若采用p偏振光,在全反射角之前,透射率曲线变化平缓,幅度较小,在全反射角之后剧烈下降,也不大适合进行调整使用,除非采用对透射率曲线影响较大的膜层结构。实验中采用了s偏振光的调整方式。

2 膜层结构对衰减曲线的影响

为了满足神光II精密化的高能量负载的要求,选择了几种能承受高功率、高能量的镀膜材料,并将它们进行组合,用干涉薄膜的特征导纳矩阵方法进行数值计算,从中选出了两种增透膜结构进行实验:

膜层结构 1 ($Y_2O_3 | ZrO_2 | Y_2O_3 | ZrO_2 | K_9 | ZrO_2 | Y_2O_3 | ZrO_2 | Y_2O_3$),

膜层结构 2 ($Al_2O_3 | Y_2O_3 | Al_2O_3 | Y_2O_3 | SiO_2 | K_9 | SiO_2 | Y_2O_3 | Al_2O_3 | Y_2O_3 | Al_2O_3$).

除基板玻璃 K_9 外,各层膜厚度皆为 $\lambda_0/(4n)$.

为了减少不必要的能量损耗,衰减器通常要工作在高透射率的位置上。由于该衰减器采用将衰减光反射出去的工作方式,因此,可以通过控制膜层厚度的方法,让衰减器工作于某一角度范围之内,从而使反射光偏离原光路,以避免影响激光器的运作,减少对原光路的影响。当该衰减器工作在神光II精密化项目中主放大器后时,这一点是非常重要的。

下面给出整个膜系的能量透射与反射的总计算公式和步骤。首先,折射角由折射定律确定

$$N_1 \sin\theta_1 = N_2 \sin\theta_2 = \dots = N_j \sin\theta_j,$$

$$j = 1, 2, \dots, K \quad (5)$$

其次,计算每个膜层的相位厚度

$$\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda} N_j d_j \cos\theta_j, \quad j = 1, 2, \dots, K \quad (6)$$

再次,计算每个膜层的导纳

$$\eta_j = \begin{cases} N_j \cos\theta_j, & \text{s 分量} \\ N_j / \cos\theta_j, & \text{p 分量} \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, K \quad (7)$$

计算整个膜系的特征矩阵

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \prod_{j=1}^K \begin{bmatrix} \cos\delta_j & i \sin\delta_j / \eta_j \\ (i \sin\delta_j) \eta_j & \cos\delta_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{K+1} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

能量反射率和透射率分别为

$$\left. \begin{aligned} R &= \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right) \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right)^* \\ T &= \frac{4 \eta_0 \eta_{K+1}}{(\eta_0 B + C) (\eta_0 B + C)^*} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

这就是在后面的理论计算时采用的计算公式。

通过以上的数值计算,图3给出了最大透射率对应的入射角与膜层厚度的关系。 q 指厚度系数,则膜层结构中每层的厚度为 $[\lambda_0/(4n)]_q$ 。通过该关系,可以设计选择出满足工作要求的膜层厚度。

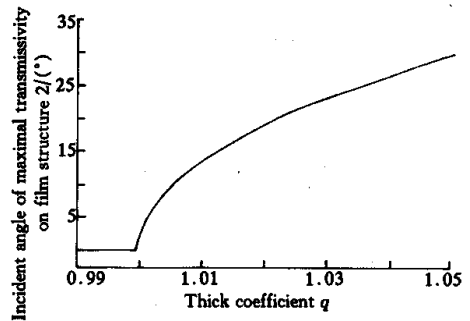


Fig. 3 Relationship of thick coefficient and incident angle of maximal transmissivity

为了验证数值计算的准确与否,用实验测定了该膜层的实际透射率曲线。实验采用的光路示意图如图4所示。

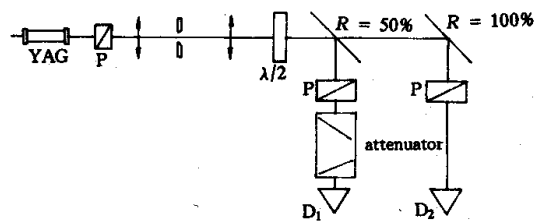


Fig. 4 Setup for measuring transmissivity of film attenuator.

$\lambda/2$: half wave plate; P: polarizer; D: photo detector

由于两路的分光比固定,因此,在插入衰减器之前两路的光能量的比值为

$$R'(\theta) = E(D_1/D_2),$$

D_1 、 D_2 为光电探头读数, $E(\cdot)$ 表示多次测量取平均值, 加入衰减器后, 两路的光能量比值(相对透射率曲线)为

$$R''(\theta) = E(D_1/D_2),$$

于是绝对透射率为

$$T(\theta) = \frac{R'(\theta)}{R''(\theta)}.$$

利用此方法测得了膜层结构 1、2 的总透射率曲线, 并与理论曲线进行了比较, 如图 5 和图 6 所示。

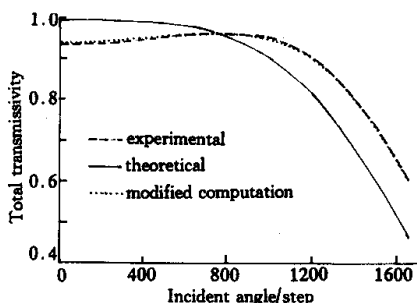


Fig. 5 Transmissivision of film structure 1
(steps of motor 30 steps = 1°)

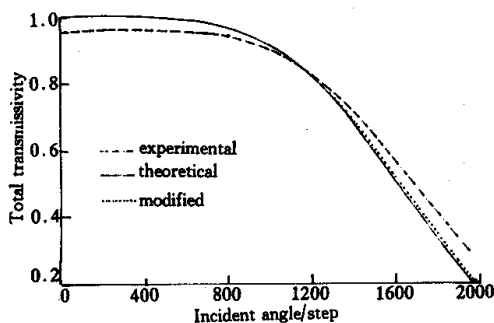


Fig. 6 Transmissivities of film structure 2
(steps of motor, 30 steps = 1°)

由于实验值和理论曲线存在较大的差异, 考虑到镀膜加工时最容易出现的系统误差为波长漂移, 于是加入厚度系数和基板玻璃吸收系数进行修正。在上面的理论修正中, 膜层 1、2 采用的修正参数分别为厚度系数 $q = 1.036$ 和 1.010 , 基板玻璃吸收系数 $\alpha = 0.0011 \text{ mm}^{-1}$ 和 0.0020 mm^{-1} 。参见图 5 和图 6 中的实验和理论修正曲线, 可以看到, 膜层 1 符合得非常好, 而膜层 2 在 $0 \sim 40^\circ$ 范围内符合得较好, 以后则逐渐出现差异。因此可以采用修正后的理论来设计、选择需要的膜层结构。

由于用步进马达控制基板玻璃旋转的机械结构可以达到 $(1/30)^\circ$ 的最小转动角度, 而理论和实验测得的总透射率曲线的最大斜率都不超过 $0.03/1^\circ$ (在

透射率为 $60\% \sim 100\%$ 范围内), 因此该衰减器理论上可达 0.1% 的调节精度。但因光路与探头的测量精度的关系, 实验时只能达到 1% (rms) 的精度。

3 两路能量平衡的闭环自动控制实验

根据实际测得的透射率曲线, 采用计算机控制步进马达, 利用自己编制的控制程序, 进行了两路能量平衡的闭环自动控制实验。控制时采用了将实际测量点进行曲线拟合, 让计算机自动从曲线上寻找合适位置的方法。实验示意图如图 7 所示。从 YAG 激光器出来的激光通过起偏器 P, 再通过透镜、小孔光栏, 分成两路光。最后的检偏器 P 可以保证进入衰减器的激光偏振方向。通过旋转半波片, 可以调节两路的光强比值, 有利于实验中验证变角度薄膜衰减器的能量调节功能。

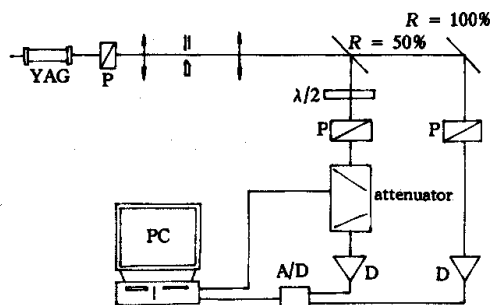


Fig. 7 Setup of automation control close-loop experiment
of energy balance on two laser beams

为了保证神光 II 精密化中对高光束质量的要求, 采用了高平面度、高平行度的 K_9 玻璃基板, 并且在镀膜前后都进行表面检查, 结果符合其要求。

在镀膜完成之后, 也进行了膜层的破坏阈值实验。实验测定两种膜层结构的破坏阈值分别为 $8.5 \text{ J}/(\text{cm}^2 \cdot \text{ns})$ 和 $9.8 \text{ J}/(\text{cm}^2 \cdot \text{ns})$, 均达到了神光 II 精密化对高功率负载的要求。

实验中的玻璃基板大小为 $105 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 11 \text{ mm}$, 只是为了满足模拟实验的通光口径的要求。对于更大的通光口径, 玻璃加工和膜层制备没有大的困难。相对而言, 采用偏振器、半波片组合装置的能量衰减器^[5]则难以达到大的通光口径。

光电探头采用了自己研制的高精度光电探头, 经过多次实验, 与实验光路配合, 能达到 1% (rms) 的测量精度。

实验结果如表 1 所示。所有的调节目标都是一次调节到位, 而且精度都控制在探头测量的高精度范围内 (rms = 1%)。

Table 1. Experimental data of automation control close-loop experiment

automation control close-loop experiment on two lasers				
No.	position of Mirror	energy ratio	target ratio	achieved ratio
1	1500	0.7149	1.00	1.0025
2	969	1.0025	0.90	0.9008
3	600	1.0480	1.00	1.0020
4	963	1.0922	1.00	1.0020
5	1184	1.0200	1.10	1.1006
6	919	1.1006	1.05	1.0508
7	750	0.9407	1.00	out of adjust range
8	750	0.9407	0.95	0.9485
9	583	0.9485	0.90	0.8982
10	600	2.0459	1.40	1.3972
11	1491	1.3972	2.00	1.9990
12	833	1.9990	2.05	2.0469
13	465	2.0469	1.80	1.7980
14	1172	1.7980	1.60	1.5989
15	1348	1.5989	1.35	1.3398
16	450	2.1404	1.50	1.4873
17	1466	1.4873	1.80	1.8078
18	1231	1.8078	2.00	1.9923

Note : 1) Experiment was taken on film structures 2 ; 2) No. 1 , 3 , 7 , 10 , 16 are in the case of that the energy ratio is changed intentionally ; 3) No. 16 is in the case of that the position of the attenuator is reset , and the film plates are reset the zero

小结 通过对实际透射率曲线的测定 , 发现实际的透射率曲线与设计时的理论计算有一定的差异。镀膜加工的工艺、基片玻璃的应力等均会造成差异。但从修正后的理论曲线与实验曲线看 , 还是符合得较好的 , 因此可以作为设计、选择膜层结构的基础。

利用实际测得的透射率曲线 , 进行曲线拟合 , 在此基础上进行了闭环自动控制实验 , 取得了很好的

结果。所有的平衡目标都是一次完成 , 说明实验的可重复性好 , 调节精度高。而且 , 在两路的光强发生变化后 , 只需测定一次新的光能量比值 , 就能进行平衡控制 , 较为方便。

该衰减器要求两路或多路激光的光能量比值稳定 , 这是其局限所在 , 也是被动光能量调节方式(反馈控制方式)的局限。当光源能量稳定 , 偏振方向固定时 , 该衰减器也可用于单光源的输出能量调节。其光束口径大、衰减值连续精密可调、高能量负载、高光束质量的特点 , 是其它的光能量衰减器^[2]难以同时达到的。而且通过控制程序的操作 , 从测量透射率曲线、数学处理 , 到设定调节参数、转动马达、调节平衡 , 只需较少的人工干预 , 大部分工作都由计算机自动完成 , 控制调节极为方便准确。对于神光 II 精密化应用来说 , 也是一种合适的能量调节方式。

参 考 文 献

- [1] Powell H T , Caird J A , Murray E *et al.*. Laser improvements for the precision Nova project. *ICG Quarterly Report* . 1(4) : 169 ~ 177. Lawrence Livermore National Laboratory , Livermore , CA , UCRL-LR-105821-91-4 , 1991
- [2] Status report of New GEKKO System —— Power balance control —— , Masahiro Nakatsuka , Institute of laser Engineering , Osaka University Jan. 22 ~ 23 , 1996 Japan
- [3] Urushihara S , Fujita H. GEKKO XII Power Balance Control S. Urushihara H. Fujita H. Osaka Univ. 1997. 7 Japan-China
- [4] Xu Faming , Cai Xijie , Lin Zunqi *et al.*. Study on intelligent light splitting system. *Chinese J. Lasers* , 1998 , **25**(5) : 419 ~ 422
- [5] 蔡希洁 , 许发明 , 林尊琪 等. 用于精密衰减控制的半波片和偏振片组合装置. *中国激光* , 1999 , **26**(1) : 47 ~ 51

Study on Film Attenuator of Variable Angle

Huang Jie Cai Xijie Lin Zunqi

(National Laboratory on High Power Laser Physics , Shanghai 201800 ,
Institute of Optics and Fine Mechanics , The Chinese Academy of Sciences , Shanghai 201800)

(Received 17 May 2000 ; revised 30 August 2000)

Abstract : Theoretic analysis and numerical computation on film attenuator of variable angle are studied. The attenuator is ready to be used in SHENGUANG II precision project. The characteristics of precisionly continuous adjust , large optical aperture , high energy loading and high beam quality are demonstrated in simulation experiment. Other optical attenuators can not provide with these characteristics solely.

Key words : film attenuator of variable angle ; attenuator ; close-loop automatic control ; precise energy control