

用于精密衰减控制的半波片和偏振片组合装置

蔡希洁 许发明 林尊琪 杨镜新
(中国科学院上海光机所 上海 201800)

提要 用 Jones 算法讨论了半波片和偏振片组合衰减装置的一般特性, 得出了衰减量控制精度的表达式。最后给出了 $\phi 45$ mm 石英晶体半波片和偏振片组合衰减装置的实验结果。

关键词 衰减器, 半波片, 偏振光系统

为了实现大型激光系统多路能量平衡, 国外采用大口径半波片和偏振片组合装置(简称半波片组合衰减器)作为各路精密衰减控制的主要措施^[1]之一。我们也有必要根据大型激光系统的具体要求对其进行全面深入的研究, 首先是对组合装置衰减机制^[2]的定量研究。

1 半波片组合衰减器的工作原理

半波片和偏振片组合装置的基本构成为两个平行放置的偏振片对 (P_1, P_2) 以及在它们之间插入的一个半波片(HWP)所组成, 如图 1 所示。入射到半波片的激光振动方向由偏振片 P_1 决定。半波片是平行光轴切割的石英平板, 它使出射光的振动方向发生转动, 于是光束不能全部通过第二个平行放置的偏振片 P_2 , 也就是说发生了光束的衰减。只要让半波片围绕法线旋转就可以改变组合装置的透过率, 其变化范围可从 1 降低到 0。因为衰减量的控制精度由半波片旋转角精度来决定, 所以半波片和偏振片组合有可能做成高精度连续可调衰减装置。

为了一般地讨论全偏振光问题, 我们采用 Jones 算法。假设晶体波片的光轴 c 放置在坐标系的 x 方向上。入射光束的振动方向 U_1 与 x 轴成 θ 角。偏振片的通光方向 P 与入射光束振动方向相同, 如图 2 所示。

入射线偏振光用 Jones 矢量 E_1 来表示

$$E_1 = A \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

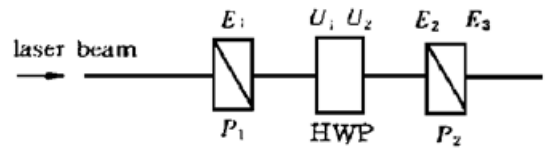


图 1 半波片和偏振片组合衰减装置

Fig. 1 Setup of a half-wave plate attenuator assemble

P_1 : polarizer 1; P_2 : polarizer 2;

HWP: half-wave plate

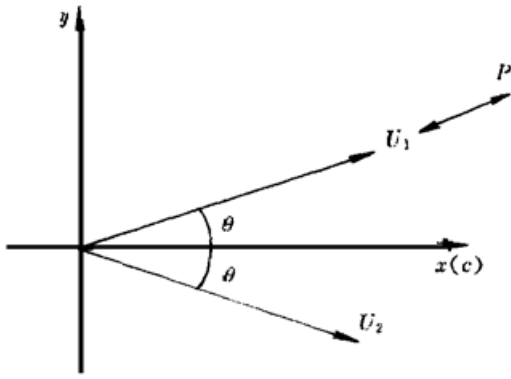


图 2 半波片的坐标系

U_1 和 U_2 分别代表入射和出射光束的电场振动方向, 半波片的光轴 c 并行于 x 轴, P 代表偏振器的通光方向

Fig. 2 The coordinate system of the half-wave plate U_1 and U_2 represent the electric field vibration vectors of the input and output light beams respectively, the optical axis c of the half-wave plate is parallel to the x -axis, P represents the light transmission direction of the polarizer

为了求出射光束沿着和垂直于波片光轴的分量(用 Jones 矢量 U_1 表示), 首先应用旋转矩阵 $R(-\theta)$

$$U_1 = R(-\theta) \times E_1 = A \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \end{bmatrix}$$

我们知道光束通过波片以后, 两分量之间发生位相推迟 $\delta = (\varphi_2 - \varphi_1)$ 。波片的 Jones 矩阵 J_1 由下式表示

$$J_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(i\delta) \end{bmatrix}$$

于是波片出射光束 U_2 为

$$U_2 = A \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \exp(i\delta) \end{bmatrix}$$

因为偏振片的通光方向 P 和 x 轴成 θ 角, 所以坐标系需要旋转 θ 角, 于是进入偏振片的光束用 E_2 表示

$$E_2 = R(\theta) \times U_2 = A \begin{bmatrix} \cos^2(\theta) + \sin^2(\theta) \exp(i\delta) \\ -\sin(\theta) \cos(\theta) + \cos(\theta) \sin(\theta) \exp(i\delta) \end{bmatrix}$$

偏振片的 Jones 矩阵为

$$J_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

这时通过偏振片的透过光束 E_3 表示为

$$E_3 = J_2 \times E_2 = A \begin{bmatrix} \cos^2(\theta) + \sin^2(\theta) \exp(i\delta) \\ 0 \end{bmatrix}$$

所以组合装置的 Jones 矩阵 J_{ZH} 表示为

$$J_{ZH} = A \begin{bmatrix} \cos^2(\theta) + \sin^2(\theta) \exp(i\delta) \\ 0 \end{bmatrix}$$

这时出射光束的强度 I_3 可通过 Jones 矢量 E_3 的复共轭转置与其左乘来得到

$$I_3 = A^2 \times [\cos^2(\theta) + \sin^2(\theta) \exp(-i\delta)] \times \begin{bmatrix} \cos^2(\theta) + \sin^2(\theta) \exp(i\delta) \\ 0 \end{bmatrix} =$$

$$A^2 \{1 - \sin^2(2\theta) [1 - \cos(\delta)] / 2\} = A^2 [1 - \sin^2(2\theta) \sin^2(\delta/2)]$$

於是组合装置的透过率为

$$T = I_3/I_1 = 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2(\delta/2)$$

从上式可知, 波片和偏振片组合装置透过率是 θ 角和 δ 角的偶函数; 再考虑到三角函数基本关

系等特点, 在计算 $T(\theta, \delta)$ 时, 只需要选取 θ 角的变化范围在 $0 \sim 45^\circ$ 和 δ 角的变化范围在 $180 \sim 270^\circ$, 就可了解到所有情况下组合装置透过率的取值。图 3 给出了波片和偏振片组合装置透过率在几种情况下的计算结果。

以下做几点讨论:

(1) 当波片引入的位相推迟 $\delta = \pi$ 即为半波片时, 出射光束 E_2 表示为

$$E_2 = A \begin{bmatrix} \cos(-2\theta) \\ \sin(-2\theta) \end{bmatrix}$$

很明显这时输出光束为线偏振光, 其振动方向与入射光束成 $(-2 \times \theta)$ 角, 也就是说与 x 轴成 $(-\theta)$ 角。两光束的振动方向与 x 轴成对称分布, 见图 2 所示。此时半波片组合装置的透过率简化为

$$T = \cos^2(2\theta)$$

这是我们所需要情况, 组合装置的透过率 T 在 $1 \sim 0$ 之间连续变化, 如图 3 曲线 1 所示。

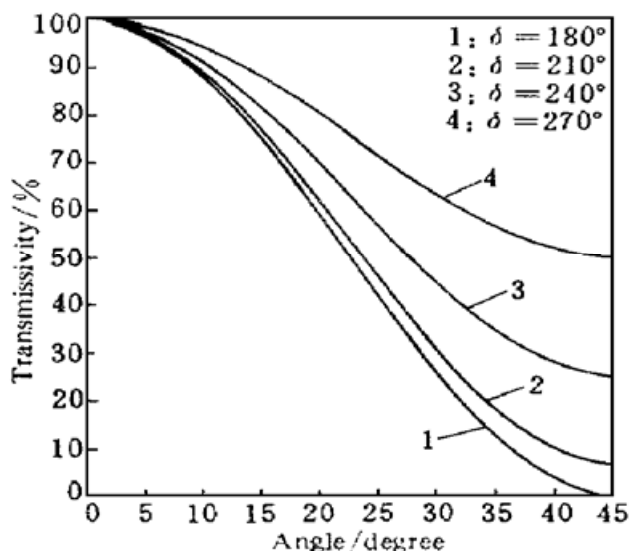


图 3 波片和偏振片组合装置透过率曲线

Fig. 3 Transmissivity curves of attenuation assemblies of wave plates and polarizers

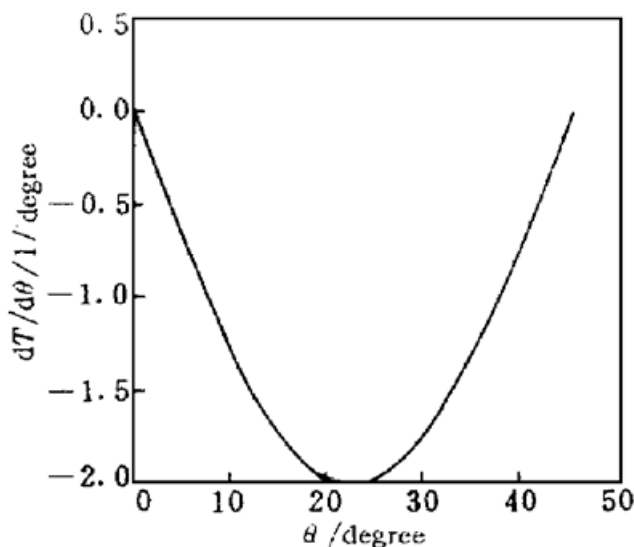


图 4 组合衰减装置透过率随 θ 角的变化率

g. 4 Variance rate of transmissivity of an attenuation assembly versus rotated angle of a half-wave plate

(2) 当波片引入的位相推迟 $\delta = \pi/2$ 即为 $1/4$ 波片时,

$$T = 1 - 0.5 \times \sin^2(2\theta)$$

如果 $\theta = 45^\circ$ 放置, 则 $T = 1/2$ 。这时组合装置的透过率 T 在 $1 \sim 0.5$ 之间变化, 其输出特性如曲线 4 所示。

(3) 当波片引入的位相推迟 δ 为任何其他情况时, 组合装置的透过率曲线介于曲线 1 和曲线 4 之间。这时透过率最大值为 1, 最小值为 T_{\min} , 即 $0 < T_{\min} < 0.5$ 。所以实际使用的半波片, 如果它的位相推迟 δ 与半波的整数倍有小的偏差, 不会改变衰减器的性质, 但是会使得透过率 T 随 θ 角的变化率降低。

根据组合装置的透过率 $T(\theta, \delta)$ 的变化规律可知, 当 $\theta = 45^\circ$ 放置时, T 对于 δ 的变化最敏感, 所以组合装置调试过程首先应使 $\theta = 45^\circ$ 放置, 此时透过率取极小值, 我们应尽量调试到接近零值。剩余透过率反映半波片推迟偏差的量值。

(4) 关于半波片和偏振片组合装置衰减控制精度

半波片和偏振片组合装置透过率随 θ 连续变化, 所以机械调整装置伺服马达每步的角偏转量决定了衰减装置的控制精度。从半波片和偏振片组合装置透过率表达式可求出透过率 T 随 θ 的变化率

$$dT/d\theta = - 2\sin(4\theta)$$

当 $\theta = 22.5^\circ$ 时, $dT/d\theta$ 取极值 $(dT/d\theta)_m = - 2$, 如图 4 所示。

只要我们确定了最小控制精度 ΔT_0 , 则伺服马达的每步角偏转量 $\Delta\theta_{step}$ 可用下式求出

$$\Delta\theta_{step} < \Delta T_0 / (dT/d\theta)_m$$

设最小控制精度为 $\Delta T_0 = 0.1\%$, 因为 $(dT/d\theta)_m = - 2$, 所以只要使 $\Delta\theta_{step} < 0.5 \text{ mrad}$ 便能满足要求。现在选取伺服马达走步的角偏转量 $\Delta\theta_{step} = 0.45 \text{ mrad}$, 也就是说设定伺服马达走步的角偏转量为 $1.5'/step$, 即可保证在全角度范围内均能达到要求的控制精度。此外伺服马达走步速度为 $1^\circ/40step$, 实际应用也较为适宜。

2 半波片组合衰减器的实验和讨论

对半波片组合衰减器的透过率特性进行了实验测量。实验对象是一块曲阜师范大学研制的 $\phi 45 \text{ mm}$ 口径石英晶体半波片, 厚度约为 2.5

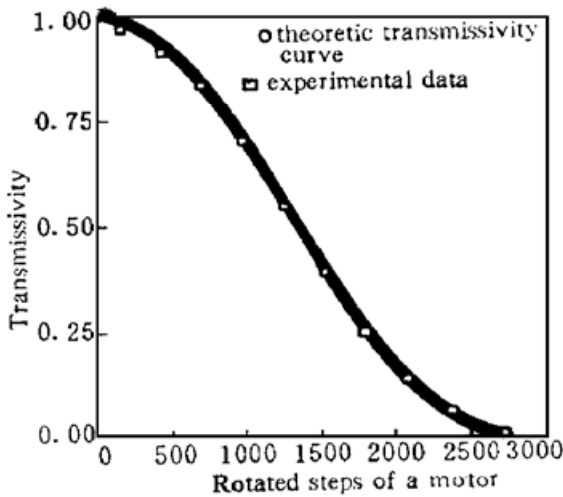


图 5 组合衰减装置的透过特性

Fig. 5 Transmissivity property of a half-wave plate assemble

mm 。使 YAG 激光器输出的 $1.06 \mu\text{m}$ 激光通过半波片, 同时测定入射激光能量和透射激光能量, 再计算得到半波片组合衰减器的透过率 T 。实验测量精度优于 0.5% 。实验结果如图 5 所示, 与理论符合很好。

从半波片组合衰减器的实验特性曲线可看出, 即使加工得到的半波片存在小量推迟偏差, 其透过率特性曲线仍从 1 开始, 而且高透过率部分和理论值的偏差很小。所以特别适合于用来补偿多路能量的不平衡性。另一方面半波片小量推迟偏差的存在也使其特性曲线的极低透过率部分与理论值有差别, 曲线不能到零。测得的最小透过率为 1.6% , 相应的半波片推迟偏差约为 6% , 这与我们用其他方法得

到的结果相一致。应该指出的是上述小量推迟偏差仍落在允差范围内, 所以测定的 $\phi 45 \text{ mm}$ 口径石英晶体半波片能够满足大型激光工程能量平衡实验的要求。

最后对半波片组合衰减器的特点做几点讨论。

半波片组合衰减器可以做成 $T = 1 \sim 0$ 之间全范围连续可调衰减器, 使用十分方便; 半波片组合衰减器配上高精度角偏转机构可做成高精度衰减器; 在改变衰减系数时光路不会发生影响, 这对某些高精度应用场合是至关重要的; 这种衰减器是用石英晶体制成的, 可以做成大口径、高能量负载、高光束质量衰减器。这是目前已有的其他种类衰减器所不可能做到的, 因而在大型激光系统工程中获得重要应用; 实际半波片小量推迟偏差的存在使得其透过率曲线不能到零。显然这种衰减器不宜用在其特性曲线的极低透过率 ($T < 0.05$) 部分, 例如不宜用作几个量级的精密衰减片。

半波片和偏振片组合衰减装置所以具有上述特点是因为它本质上是一种分光器,它是通过将一部分光以另一偏振分量的形式从主光路偏离出去的方法来实现衰减的。当然,正因为半波片组合衰减器是一种偏光装置,只适用于偏振光系统。对于大部分激光系统特别是大型大功率激光工程是完全适用的。半波片和偏振片组合装置除了用作特定带宽的衰减器外还可用作其他功能元件,值得进一步开发和应用。

参 考 文 献

- 1 H. T. Powell, J. A. Caird, J. E. Murray *et al.*. Laser Improvements for the precision Nova project. ICF Quarterly Report, 1991, **1**(4): 169~ 177, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, UCRL-LR-105821-91-4 (1991)
- 2 Zhu Qingchun, Chen Shisheng translation. Introduce of optics matrix. Shanghai: Shanghai Science and Technology Literature Publishing Company. 1991. 177

An Assemble of a Half-wave Plate and Polarizers for Precision Controlled Attenuator

Cai Xijie Xu Faming Lin Zunqi Yang Jingxin

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract The general property of an assemble of a half-wave plate and polarizers is discussed by Jones algorithm. An expression for attenuation precision of the assemble is given. Finally, the experimental result of transmissivity property of an assemble, consisting of a 45 mm quartz half-wave plate and two polarizers, is reported.

Key words attenuator, half-wave plate, polarized light system