

## 一种可连续调谐空间光学衰减器的研究

徐圣奇, 辛玉军, 韩文杰, 王治中, 张文平, 鄒双阳, 董光焰, 李卫森

(中国电子科技集团公司第二十七研究所, 河南 郑州 450007)

**摘要:** 可调谐空间光学衰减器在各类光电系统中具有广泛的应用前景。基于法布里-珀罗多光束干涉原理, 创新性地设计了一种适用于相干光束的可调谐空间光学衰减器, 该衰减器选取在红外波段具有较高折射率的碲化锌晶体作为材料, 结合温度控制系统, 实现光功率的调谐。采用 Nd:YAG 激光器作为光源, 对该衰减器的性能进行测量, 其调谐范围可以达到 3 dB。理论分析表明, 相对于热膨胀系数, 碲化锌材料的热光系数是决定衰减器性能的关键参量。此外, 通过在碲化锌光学平板前后表面镀高反膜, 可进一步提高调谐范围。

**关键词:** 光学衰减; 连续调谐; 法布里-珀罗干涉; 热光系数

**中图分类号:** O439   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1007-2276(2015)02-0673-04

## Research on a continuously tunable space optical attenuator

Xu Shengqi, Xin Yujun, Han Wenjie, Wang Zhizhong, Zhang Wenping, Wu Shuangyang,  
Dong Guangyan, Li Weisen

(27th Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Zhengzhou 450007, China)

**Abstract:** Continuously tunable space optical attenuator has a wide prospect in various optoelectronic equipments. Based on the principle of Fabry-Perot interferometer, a new space optical attenuator was presented, its key component is a ZnSe crystal sheet, combined with a high accurate temperature control system, the attenuation ratio of laser beam can be tuned. The attenuation performance was measured with a Nd:YAG laser as light source. The experimental results indicate that the tuning range of the attenuator can reach 3 dB. Theoretical analysis shows that compared with thermal expansion coefficient, thermo-optic coefficient of ZnSe material plays a key role in determining the attenuator performance. In addition, by coating highly reflective dielectric film on both sides of ZnSe sheet, the tuning range can be further increased.

**Key words:** optical attenuator; continuously tunable; Fabry-Perot interference; thermo-optic coefficient

收稿日期: 2014-06-05; 修订日期: 2014-07-03

基金项目: 国家 863 计划(2009AA7010402)

作者简介: 徐圣奇(1985-), 男, 博士, 主要从事超快激光科学、空间相干光通信等方面的研究。Email: xsq851011@163.com

## 0 引言

空间光学衰减器是一种常用的光学器件,在各类光电系统中,如微光探测器、电子学显微镜、大气远程测距机、高能激光器等领域均得到广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。其工作原理一般是通过材料对光的反射或吸收特性实现光强衰减<sup>[3]</sup>。其中,吸收型光学衰减器是利用散布在光学玻璃中的光吸收物质衰减光强,通过改变吸收物质的掺杂浓度或衰减片的厚度来控制衰减量<sup>[4-5]</sup>。反射式光学衰减器是通过在光学玻璃表面镀膜高反膜来衰减光强,其衰减量由光学薄膜的设计结构决定<sup>[6]</sup>。上述两种类型光学衰减器均为固定式的,当需要改变衰减量时,只能根据需要在光路中插入不同的光学衰减器,无法实现光强的连续调谐,这极大地限制了固定式光学衰减器的使用范围。

目前,常用的可调谐空间光学衰减器包括圆形渐变衰减器、线性渐变衰减器以及偏振衰减器,圆形渐变衰减器和线性渐变衰减器二者工作原理基本相同,圆形渐变衰减器的光学衰减量沿扇形区域线性变化,通过旋转衰减器实现衰减量的调谐;线性渐变衰减器的衰减量沿长边区域线性变化。这两种衰减器虽然均可根据需要改变衰减量,但当入射光斑较大时,会改变光斑的相对强度分布。偏振器与波片相结合构成的偏振衰减器虽然也可以实现对光束强度的可调谐衰减,但该型器件不仅价格昂贵,而且对入射光的偏振态和波长均有较高的要求。采用可调衍射光栅技术、液晶技术、磁光技术等同样可以实现光学衰减,基于这些技术开发的光纤衰减器在光通讯网络系统中得到广泛的应用,然而,在空间光学衰减器应用中,这些技术均未实现工程化。此外,上海光学精密机械研究所在神光二号精密化项目中,为了达到多路激光功率的平衡,需要大口径、高能量负载以及精密连续可调的空间光学衰减器对能量进行精确地控制,基于该需求,研究人员开发出变角度薄膜空间光学衰减器,并在小激光装置上进行了闭环自动衰减控制实验,取得了很好的实验结果<sup>[7]</sup>,由于是采用闭环自动衰减控制设计方案,该设备不仅成本较高,而且对光源输出能量的稳定性要求极为严格,此外,改衰减器对入射光的偏振态具有较高的要求。

文中将详细介绍一种结构简单的可调谐的空间

光学衰减器,该衰减器以硒化锌光学平板的前后表面作为法布里-珀罗腔,通过改变温度控制光学平板前后表面之间的光程差,实现衰减量的调谐。

## 1 工作原理

如图1所示,当光束入射到表面反射率较高的光学平板上时,入射光将在前后表面之间发生多次内反射和透射,各部分光波相遇后发生干涉,并形成法布里-珀罗效应<sup>[8-9]</sup>。

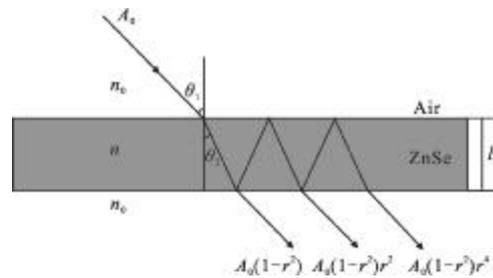


图1 法布里-珀罗多光束干涉原理图

Fig.1 Principle diagram of Fabry-Perot multiple beam interference

假设入射光的振幅为  $A_0$ , 相邻两级次透射光的相位差为  $\delta$ , 光学平板前后表面的振幅反射率为  $r$ , 入射光的角频率为  $\omega$ , 各阶次透射光振幅的叠加为:

$$A_T = \frac{A_0(1-r^2)e^{i\omega t}}{1-r^2e^{-i\delta}} \quad (1)$$

根据菲涅尔公式<sup>[10]</sup>,  $r$  取决于介质的折射率( $n_0, n$ )和入射角  $\theta_1$ :

$$r = \frac{n_0 \cos \theta_1 - n \cos \theta_2}{n_0 \cos \theta_1 + n \cos \theta_2} \quad (2)$$

结合欧拉公式  $e^{i\delta} = \cos \delta + i \sin \delta$ , 可以得到透射光的光强为:

$$I_T = A_T A_T^* = \frac{I_0}{1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2 \left( \frac{\delta}{2} \right)} \quad (3)$$

式中:光强反射率  $R=r^2$ ;入射光强  $I_0=A_0^2$ 。

当相干光束垂直入射到光学平板上时,其入射角  $\theta_1 = \theta_2 = 90^\circ$  保持不变,根据公式(3),在光强反射率保持不变的条件下,如果相邻级次透射光的相位差  $\delta = 2nl \frac{2\pi}{\lambda}$  发生改变,光强透过率会随之发生变化。对于大部分光学介质,当温度变化时,由于热光效应和热胀冷缩效应,光学平板本身的折射率  $n$  和几何尺寸  $l$  会发生改变,相邻阶次透射光的相位差  $\delta$  随之发生变化,从而改变光强的透过率。

## 2 实验与结果

测量温度调谐空间光学衰减器性能的实验装置如图 2 所示, 硒化锌光学平板的直径为 25.4 mm, 厚度为 0.5 mm, 前后表面均作抛光处理, 平行度优于  $2 \mu\text{rad}$ , 将其安装好后放置在温度控制系统中。采用一台 Nd:YAG 激光器作为光源, 其中心波长为 1064 nm, 重复频率为 10 Hz, 脉冲能量为 20 mJ, 脉冲宽度为 10 ns, 光斑直径 12 mm ( $1/e^2$ )。经过准直后, 光束由透反比为 2:1 的分光镜分为两束, 其中, 透射光垂直入射到硒化锌光学平板上, 为了防止激光脉冲反射回激光腔, 在激光器的输出端安装了光学隔离器。在测量过程中, 缓慢升高温度控制系统的温度, 能量计 1 用来实时监测激光器的输出脉冲能量, 以确保整个实验过程中激光器输出能量稳定, 能量计 2 实时测量透射光的脉冲能量。

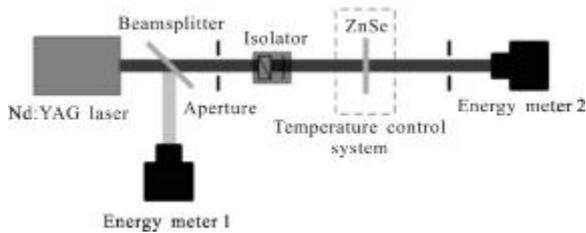


图 2 实验装置图

Fig.2 Schematic diagram of experimental set-up

由公式(3)可知, 光强透过率随光程差  $\delta$  的改变是周期性的, 因此在测量过程中应选择合适的温度工作点。从低温到高温扫描光强透过率最大点, 当温度升至 22.3  $^{\circ}\text{C}$  时, 能量计 2 测量的脉冲能量最大, 约为 12.5 mJ, 以该点作为起始温度, 继续缓慢升温, 实验结果如图 3 所示, 能量计 2 测量的激光脉冲能量

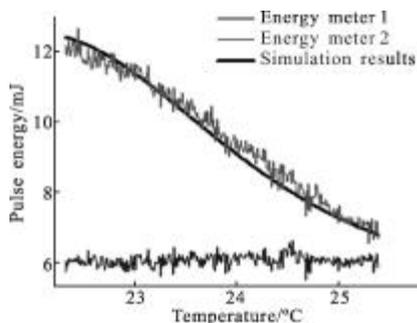


图 3 实验测量与模拟结果对比

Fig.3 Contrast of experimental result and simulated result

逐渐降低, 待温度升至 25.4  $^{\circ}\text{C}$  时, 透过激光脉冲能量降低至 6.3 mJ, 继续升高温度, 透过激光脉冲能量逐渐增加。在整个实验过程中, 能量计 1 的测量结果始终稳定在 6 mJ 左右。

## 3 讨论

上述实验结果表明, 基于硒化锌材料的温控衰减器可以实现对激光功率的调谐, 下面将详细讨论温度变化过程中影响透过率的因素。用  $n$  代表硒化锌材料的折射率,  $\lambda$  代表入射光束的波长,  $l$  代表硒化锌光学平板的厚度,  $T$  代表硒化锌材料的工作温度, 法布里-珀罗多光束干涉相邻级次透射光的光程差  $\delta$  随温度的变化率为:

$$\frac{d\delta}{dT} = 2nl \frac{2\pi}{\lambda} * \left( \frac{dn}{dT} + \frac{dl}{dT} \right) \quad (4)$$

硒化锌材料在 1064nm 波段的折射率  $n$  为 2.49<sup>[11]</sup>, 热膨胀系数  $dl/dT$  为  $7.57 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ <sup>[11]</sup>, 热光系数  $dn/dT$  为  $8 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ <sup>[12]</sup>。将硒化锌光学平板的折射率、线性热膨胀系数、折射率温度变化率等参数代入公式(4), 通过计算, 可以得到在 20  $^{\circ}\text{C}$  条件下, 对于厚度  $l$  为 0.5 mm 的硒化锌光学平板, 在光束垂直入射条件下, 光程差  $\delta$  随温度的变化率为:

$$\frac{d\delta}{dT} = 1.287 \text{ rad}/^{\circ}\text{C} \quad (5)$$

其中, 热光系数导致折射率的变化率为 1.176 rad/ $^{\circ}\text{C}$ , 热膨胀系数导致折射率的变化率为 0.111 rad/ $^{\circ}\text{C}$ , 通过对比, 热光系数对折射率变化的贡献远高于热膨胀系数。将公式(5)代入公式(3), 并对实验测量结果进行模拟, 图三中粗黑线是模拟的曲线, 通过对比可以看出, 模拟结果与实验结果基本吻合。

根据公式(3), 表面反射率  $R$  决定了衰减器的调谐范围, 对于硒化锌光学平板, 在上述实验条件下, 其表面反射率  $R$  是一个固定值, 约为 18%, 经理论计算其调谐范围为 3 dB, 与实验结果基本吻合。

为了研究表面反射率对衰减器调谐范围的影响, 在硒化锌光学平板前后表面分别镀增透膜、未镀膜和镀增反膜, 三者对应的表面反射率分别为 5%、18%、42%, 分别测量其调谐范围, 如图 4 所示, 方形节点是试验测量的结果, 当表面反射率为 42%, 其调谐范围可以达到 7 dB 左右, 黑色实线是通过理论计算得到的衰减器调谐范围与表面反射率的关系曲线, 与

实验结果基本吻合。该实验结果表明提高光学平板的表面反射率可进一步提高衰减器的调谐范围。

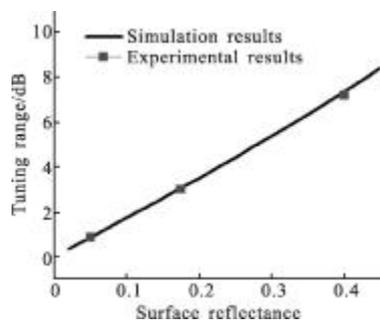


图 4 衰减器调谐范围与表面反射率的关系

Fig.4 Relationship between the tuning range of attenuator and surface reflectance

## 4 结 论

基于法布里-珀罗多光束干涉原理,以硒化锌为材料,设计了一款可连续调谐的空间光学衰减器。以 Nd:YAG 激光器作为光源测量其衰减性能,调谐范围可以达到 3 dB。理论分析表明,相对于热膨胀系数,硒化锌材料的热光系数是决定衰减器性能的关键参量。此外,通过在硒化锌前后表面镀高反膜,可进一步提高衰减器调谐范围。该空间光学衰减器具有可调谐和制作成本低廉等优点,适用于多个光学波段和任意偏振态,因此在光电系统中具有广泛的应用前景。

## 参考文献:

- [1] Asselin D, Galarneau P, Lacroix J M, et al. Holographic variable attenuator for high power Nd:YAG lasers [J]. Opt and Quant Electron, 1994, 27(12): 1427-1432.
- [2] Li Mi, Song Yingsong, Yu Jing, et al. High precision laser pulse distance measuring technology [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(8): 1469-1473.  
李密, 宋影松, 虞静, 等. 高精度激光脉冲测距技术[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(8): 1469-1473. (in Chinese)
- [3] Yang Ruike, Ma Chunlin, Han Xiange, et al. Study of the attenuation characteristics of laser propagation in the atmosphere [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(z2): 415-418. (in Chinese)  
杨瑞科, 马春林, 韩香娥, 等. 激光在大气中传输衰减特性研究[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(z2): 415-418.
- [4] Thomas Michael E. Optical Propagation in Linear Media: Atmospheric Gases and Particles, Solid-State Components, and Water[M]. New York: Oxford University Press, 2006.
- [5] Hemingway D J. Properties of weakly absorbing multilayer systems in terms of the concept of potential transmittance[J]. Optica Acta, 1973, 20(2): 85-89.
- [6] Chen Shaowu, Wang Qunshu, Shao Bibo, et al. Optical attenuation design for high energy laser beam on line diagnostic system [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(11): 1645-1649. (in Chinese)  
陈绍武, 王群书, 邵碧波, 等. 高能激光束在线测量系统的光强衰减设计[J]. 强激光与离子束, 2009, 21(11): 1645-1649.
- [7] Huang Jie, Cai Xijie, Lin Zunqi. Study on film attenuator of variable angle[J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(8): 1008-1011. (in Chinese)  
黄杰, 蔡希洁, 林尊琪. 变角度薄膜衰减器的应用研究[J]. 光学学报, 2001, 21(8): 1008-1011.
- [8] Vaughan J M. The Fabry-Perot Interferometer: History, Theory, Practice, and Applications and Applications [M]. Bristol: Adam Hilger Press, 1989: 1-583.
- [9] Sandercock J R. Simple stabilization scheme for maintenance of alignment in a scanning Fabry-Perot interferometer [J]. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1976, 9(7): 566-569.
- [10] Max Born, Emil Wolf. Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999: 40-43.
- [11] Zhang Youwen. Infrared Optical Engineering [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1982: 152-154. (in Chinese)  
张幼文. 红外光学工程 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1982: 152-154.
- [12] Dmitry Okhrimenko. ZnSe base properties [EB/OL]. [2013-08-10] <http://www.ZnSe.org>.