

飞秒钛宝石激光器腔内双色镜反射 相移的突变现象*

孙 虹** 王清月

(天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光研究室, 天津 300072)

摘 要 研究了钛宝石激光器增益介质两端的两块双色镜的相移色散, 发现反射相移在中心波长附近发生了突变, 由此而造成反射相移色散在此点是不连续的, 并对影响反射相移突变点的因素进行了详细的研究。

关键词 飞秒钛宝石激光器, 双色镜, 相移突变。

1 引 言

自飞秒激光器出现以来, 人们越来越认识到锁模激光器腔内色散的控制对脉冲宽度影响的重要性^[1]。目前掺钛蓝宝石激光器脉冲持续时间已压缩到小于 10 fs ^[2, 3]。由于脉冲持续时间如此之短, 腔内色散对脉冲的影响已更为明显和重要, 除为了补偿腔内色散而引入的色散元件(如棱镜)外, 还要值得研究的是那些腔内反射镜的色散。一般腔镜的设计只是考虑它的反射和透射要求, 而忽略了其反射相移的色散。作者已经对钛宝石激光器腔内高反射介质镜的二、三阶色散做了详尽的研究^[4, 5]。本文研究了掺钛蓝宝石激光器增益介质两端的两块双色镜的相移色散, 发现反射相移在中心波长附近发生了突变, 由此而造成反射相移色散在此点是不连续的。这种现象必将给超短脉冲激光器在中心波长附近的调节和正常运转带来一定的影响, 值得进行深入研究。

2 结构和方法

激光器腔内的高反射镜一般是介质膜反射镜, 其结构为: 空气(HL)ⁿH 基质, 其中 H 表示高折射率、厚度为 $\lambda_0/4$ 的膜层, L 为低折射率层, 厚度为 $\lambda_0/4$, 但是钛宝石激光器中在增益介质两端的两块反射镜是特殊的。因为增益介质是用氙离子激光泵浦, 氙离子激光器的激光输出波长为 488.0 nm 和 514.5 nm , 光腔结构要求这两块反射镜对氙离子光透射率高, 而对钛宝石红光 800 nm 反射率高, 因此它们多采用干涉滤光片的常用结构: 空气(L/2)

* 国家攀登计划基金资助项目。

** 现通讯地址: 中国科学院化学所分子反应动力学国家重点实验室, 北京 100080。

收稿日期: 1996 年 8 月 23 日

(HL)ⁿH(L/2) 基质。对于这种结构介质镜的光学特性的讨论是用等效折射率方法^[6]，将(L/2)(HL)ⁿH(L/2) 分成由对称膜系[(L/2)H(L/2)]组成的周期性介质膜系来处理。

本文用特征矩阵和等效折射率的方法对这种双色镜进行讨论。单层膜的特征矩阵为

$$M = \begin{bmatrix} \cos \delta & (i/\eta) \sin \delta \\ i\eta \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 η 为膜层的修正导纳(或称有效折射率)

$$\eta = \begin{cases} N/\cos \theta, & (\text{对于 P 偏振波}) \\ N \cos \theta, & (\text{对于 S 偏振波}) \end{cases} \quad (2)$$

有效相位厚度 $\delta = (2\pi/\lambda) N d \cos \theta$ ，其中 d 为膜层的实际厚度， θ 为膜层内的折射角。如果矩阵元用 m_{11} 、 m_{12} 、 m_{21} 、 m_{22} 表示，

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \quad (3)$$

对于无吸收介质， m_{11} 和 m_{22} 为纯实数， m_{12} 和 m_{21} 为纯虚数，并具有如下特点： $m_{11} = m_{22}$ ，矩阵的行列式值等于 1，即 $m_{11}m_{22} - m_{21}m_{12} = 1$ 。对于对称膜系(pqp) 在数学上存在一个等效折射率的概念，这个对称膜系的特征矩阵为^[7]

$$M_{pqp} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中

$$M_{11} = \cos 2\delta_p \cos \delta_q - \frac{1}{2} \left(\frac{\eta_q}{\eta_p} + \frac{\eta_p}{\eta_q} \right) \sin 2\delta_p \sin \delta_q$$

$$M_{12} = \frac{i}{\eta_p} \left[\sin 2\delta_p \cos \delta_q + \frac{1}{2} \left(\frac{\eta_q}{\eta_p} + \frac{\eta_p}{\eta_q} \right) \cos 2\delta_p \sin \delta_q + \frac{1}{2} \left(\frac{\eta_p}{\eta_q} - \frac{\eta_q}{\eta_p} \right) \sin \delta_q \right]$$

$$M_{21} = i\eta_p \left[\sin 2\delta_p \cos \delta_q + \frac{1}{2} \left(\frac{\eta_p}{\eta_q} + \frac{\eta_q}{\eta_p} \right) \cos 2\delta_p \sin \delta_q - \frac{1}{2} \left(\frac{\eta_p}{\eta_q} - \frac{\eta_q}{\eta_p} \right) \sin \delta_q \right]$$

$$M_{22} = M_{11}$$

正是由于最后一个关系成立，才有可能引入等效折射率的概念。由于对称膜系的特征矩阵和单层膜的特征矩阵具有相同的性质，可以假定以相似的形式来表示：

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Gamma & (i/E) \sin \Gamma \\ iE \sin \Gamma & \cos \Gamma \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$M_{12} = (i/E) \sin \Gamma \quad (6)$$

$$M_{21} = iE \sin \Gamma \quad (7)$$

$$E = + (M_{21}/M_{12})^{1/2} \quad (8)$$

$$E_{pqp} = \left\{ \eta_p^2 \left[\sin 2\delta_p \cos \delta_q + \frac{1}{2} \left(\frac{\eta_p}{\eta_q} + \frac{\eta_q}{\eta_p} \right) \cos 2\delta_p \sin \delta_q - \frac{1}{2} \left(\frac{\eta_p}{\eta_q} - \frac{\eta_q}{\eta_p} \right) \sin \delta_q \right] / \left[\sin 2\delta_p \cos \delta_q + \frac{1}{2} \left(\frac{\eta_p}{\eta_q} + \frac{\eta_q}{\eta_p} \right) \cos 2\delta_p \sin \delta_q + \frac{1}{2} \left(\frac{\eta_p}{\eta_q} - \frac{\eta_q}{\eta_p} \right) \sin \delta_q \right] \right\}^{1/2} \quad (9)$$

$$\Gamma_{pp} = \cos^{-1} [\cos 2\delta_p \cos \delta_q - \frac{1}{2} (\frac{\eta_q}{\eta_p} + \frac{\eta_p}{\eta_q}) \sin 2\delta_p \sin \delta_q] \quad (10)$$

周期性对称膜系的特征矩阵应为各基本周期的特征矩阵的乘积, 即

$$M^S = \begin{bmatrix} \cos S\Gamma & (i/E) \sin S\Gamma \\ iE \sin S\Gamma & \cos S\Gamma \end{bmatrix} \quad (11)$$

上式表示周期性对称膜系仍存在一个等效折射率, 它和基本周期(对称组合)的等效折射率 E 完全相同, 并且它的等效相位厚度等于基本周期的等效相位厚度 Γ 的 S 倍。这说明在考虑周期性对称膜系透射带中的透射问题时, 只要考虑它的基本周期的性质就够了。

从 M_{11} 和 M_{22} 的表达式中可以看到, 在某些波长范围内, 必然会出现 $|M_{11}| = |M_{22}| > 1$ 的情况, 即这些波段内等效相位厚度 Γ 是虚数, $|\cos \Gamma| > 1$, $\sin \Gamma = \sqrt{1 - \cos^2 \Gamma} = i \sqrt{\cos^2 \Gamma - 1}$, 又由式 $M_{11}M_{22} - M_{12}M_{21} = 1$ 可知, 这时 M_{12} 和 M_{21} 的值符号反向, 因而在这些波段内, 等效折射率 $E = \sqrt{M_{21}/M_{12}}$ 也是虚数, 这就是说, 在这些波段内等效折射率的概念不复存在, 这些波段相应于对称膜系的截止带。在截止带中, 随着周期数的变动, 光学特性将有显著的变化, 截止带中光学特性的计算, 只能借助于它的特征矩阵的连乘积。

作者在研究这种双色镜的光学特性时采用了矩阵连乘积的方法, 用计算机编程进行了精确的计算, 确实发现了一种出乎意料的现象, 就是反射相移在中心波长附近有一个突变, 由此而引起了反射相移色散在此处有一个间断点。

3 结果与讨论

计算了双色镜的反射率和反射相移, 计算结果如图 1 所示。在计算时首先选取二氧化锆 (ZrO_2) 为高折射率材料, $n_H = 2.10$ 。二氧化硅 (SiO_2) 为低折射率材料, $n_L = 1.45$ 。光束垂直入射, 不考虑膜的吸收, 对称膜系 $[(L/2)H(L/2)]^S$ 的周期 $S = 10$, 中心波长 $\lambda_0 = 800 \text{ nm}$ 。

由图 1 反射率曲线可以看出在 $488.0 \sim 514.5 \text{ nm}$ 处的介质膜高透射区, 其反射率小于 0.04 , 这是满足腔内双色镜反射率要求的, 但是再看它的反射相移曲线, 这是以前没有考虑的, 发现在 $\lambda \approx 768 \text{ nm}$ 处相移有一个突变, 相移量为 $\pm 1.56 \text{ rad}$, 而这一点正好在等效折射率方法失效的截止带内。

图 2 实线为双色镜的二阶色散曲线, 从图中明显看出, 在 768 nm 处也就是相移发生突变的地方色散曲线是不连续的。将双色镜的色散曲线与普通介质膜高反射镜的色散进行比

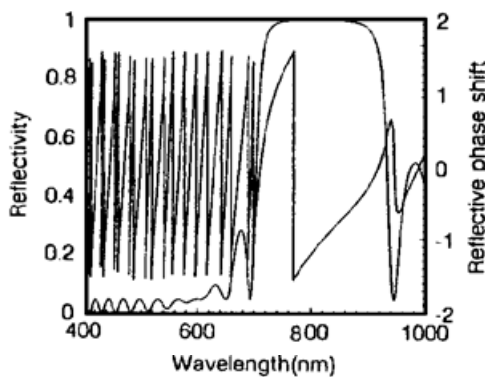


Fig. 1 Reflectivity and phase shift on reflection of dichroic mirror

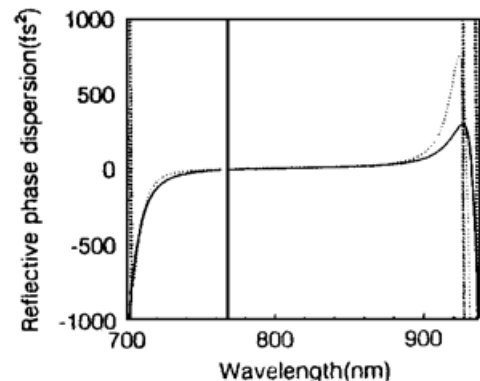


Fig. 2 Second order dispersion of dichroic mirror and common high reflector

较，图 2 中的点线代表高反射镜的色散曲线，其结构为：空气(HL)¹⁰H 基质，材料为二氧化锆和二氧化硅，中心波长 800 nm。看到双色镜除中心波长附近出现一间断点外，在长波段其色散量值比高反射镜的要小。

综合图 1、图 2 可以得到如下结论，反射相移与反射相移色散在中心波长附近都有一突变，而且经过计算发现这种突变的位置与层数关系不大。图 3 是双色镜层数分别为 13、17、21 的反射相移曲线，由此可明显看出，层数每变化 4 层，突变点位置大约仅改变 0.6 nm。

对于这种突变和不连续的现象，由特征矩阵元可推测，高低折射率材料以及它们的不同组合会对突变的位置产生影响，为此，保持相同的双色镜结构和层数(21 层)，改变材料，计算了反射相移，图 4 为计算结果。其中，实线： $n_H = 2.10, n_L = 1.45, n_H/n_L = 1.45$ ，(二氧化锆/二氧化硅)；虚线： $n_H = 2.28, n_L = 1.45, n_H/n_L = 1.57$ ，(二氧化钛/二氧化硅)；点划线： $n_H = 2.48, n_L = 1.38, n_H/n_L = 1.79$ ，(硫化砷/氟化镁)。突变点分别在 768 nm、762 nm、756 nm 处，虽然突变点的位置发生了变化，但是这几个突变点依然在截止带内，由此可得出结论：高、低折射率及其比值的确对突变点的位置有影响。

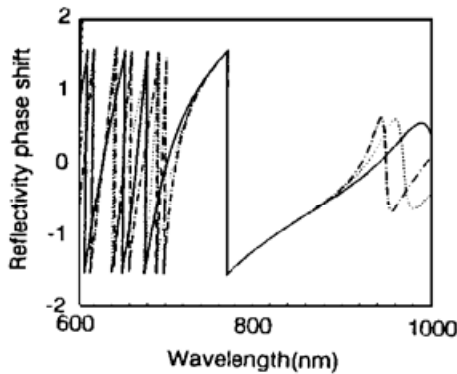


Fig. 3 Plots of phase shift on reflection of dichroic mirror consisting different layers
Solid line: 13-layer, Dotted line: 17-layer, Dotted and dashed line: 21-layer

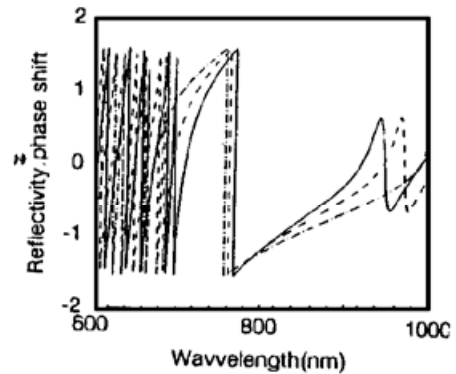


Fig. 4 Reflective phase shift of dichroic mirror with different refractive indices and their different combination

另外还计算了结构为空气(LH)ⁿL 基质、21 层、材料仍是二氧化锆和二氧化硅、中心波长 800 nm 介质镜的相移与二阶色散曲线，结果如图 5(a)、图 5(b)中虚线所示，相移突变点偏

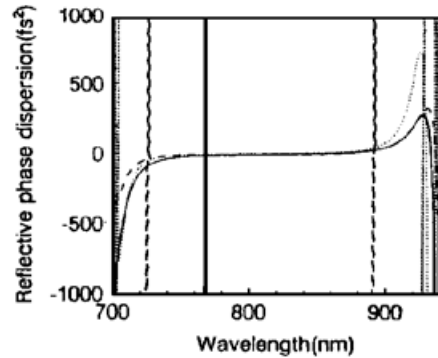
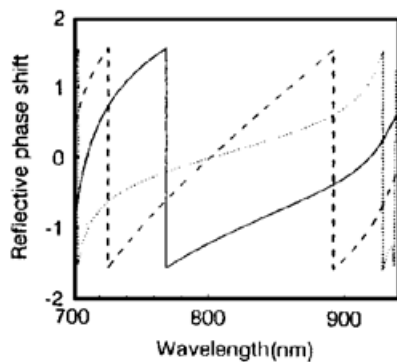


Fig. 5 (a) Reflective phase shift and (b) Second order dispersion curves with different structure.
Solid line: (air) [(0.5L)H(0.5L)]¹⁰(substrate); Dashed line: (air) (HL)¹⁰H (substrate);
Dotted line: (air) (HL)¹⁰L (substrate)

离中心波长较远,但是却出现了两个。图中实线、点划线分别为双色镜和普通高反射镜的相移和色散曲线。

结束语 综上所述,本文通过特征矩阵和数值微分的方法对双色镜的反射相移色散进行了精确的计算。发现在等效折射率方法失效的截止带内,在中心波长附近,反射相移发生了突变,由此而造成反射相移色散曲线在相移突变波长处不连续。作者对这种现象进行了讨论,发现双色镜镀膜层数对突变位置影响不大,高低折射率及其比值决定了突变点的位置,同时对双色镜和普通高反射镜的反射相移色散曲线进行了比较,通过以上讨论得出结论为:双色镜的色散在钛宝石激光器中是不容忽视的。

参 考 文 献

- [1] R. L. Fork, C. V. Shank, R. Yen *et al.*, Femtosecond optical pulses. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1983, **QE-19**(4): 500~ 506
- [2] Jianping Zhou, Greg Taft, Chung-Po Huang *et al.*, Pulse evolution in a broad-bandwidth Ti:Sapphire laser. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(15): 1149~ 1151
- [3] A. Leitenstorfer, C. Furst, A. Laubereau, Widely tunable two-color mode-locked Ti:sapphire laser with pulse jitter of less than 2 fs. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(8): 916~ 918
- [4] Hong Sun, Ching-Yue Wang, Third order dispersion produced by a $\lambda/4$ dielectric cavity mirror in femtosecond pulse laser. *Opt. Commun.*, 1996, **123**(1, 2, 3): 148~ 154
- [5] 孙 虹, 王清月, 飞秒脉冲激光器腔镜二、三阶色散的理论研究. *中国激光*, 1996, **A23**(7): 577~ 582
- [6] 唐晋发, 郑 权, 应用薄膜光学. 上海, 科学技术出版社, 1984: 209
- [7] H. A. Macleod, *Thin Film Optical Filters*, Bristol, Adam Hilger Ltd, 1985

Sudden Change of Phase Shift of Dichroic Mirrors Used in Femtosecond Ti:Sapphire Laser

Sun Hong Wang Chingyue

(*Ultrafast Laser Laboratory, Institute of Precision Instruments and Photoelectronic Engineering,
Tianjin University, Tianjin 300072*)

(Received 23 August 1996)

Abstract Phase shift and dispersion properties of dichroic mirror used in femtosecond Ti:sapphire laser are investigated. A sudden change of reflective phase shift near central wavelength is observed. Because of this transition point the second and third order dispersion have a discontinuous point. The factors affecting the transition point are discussed in detail.

Key words femtosecond Ti:sapphire laser, dichroic mirror, sudden change of phase shift.