

采用双石英棱镜对的掺钛蓝宝石 自锁模激光器*

邢岐荣 张伟力 李 鹏 王清月

(天津大学精仪系, 现代光学仪器研究所, 超快激光研究室, 天津 300072)

摘 要 给出了双棱镜对的二、三阶色散的解析式。报道了采用双石英棱镜对的掺钛蓝宝石自锁模激光器的实验结果, 获得与理论分析一致的结论。

关键词 棱镜对色散, 自锁模。

1 引 言

以掺钛蓝宝石为代表的固体激光介质有优良的光学性质和足够的增益带宽^[1,2], 加之克尔透镜锁模(KLM)技术在固体锁模激光器中的应用, 飞秒固体激光器已成为人们特别关注的研究内容。掺钛蓝宝石的增益带宽足以支持获得小于 10 fs 的超短光脉冲。由于掺杂浓度的问题, 使用的增益介质长度一般为几毫米到 20 多毫米。超短光脉冲通过如此长的增益介质后一般要受到强的正色散和强的自相位调制, 使超短光脉冲具有强的正啁啾特性。为得到傅里叶变换极限的光脉冲, 通常在激光腔内插入由高色散介质做成的棱镜对以进行色散补偿。研究表明, 小于 100 fs 的超短光脉冲受色散元件三阶色散的扰动而不能获得较窄的光脉冲^[3]。为减少插入腔内的棱镜对所带来的三阶色散的影响, 应尽量采用色散量较小的介质制备棱镜。但这样也减少了棱镜对的二阶色散量。为此还必须同时减少增益介质的长度, 以减少腔内正色散和自相位调制。Huang 等人^[4]使用石英棱镜对作为腔内色散补偿元件, 与此同时将增益介质的长度减少为 4.5 mm, 得到 11 fs 的光脉冲。但缩短增益介质的长度, 需增加掺杂浓度, 以保证对泵浦能量的一定的吸收, 为此给增益晶体的制备带来一些不便; 另外, 采用低色散介质的棱镜对, 必须加长两棱镜顶之间的距离, 以补偿相应的二阶色散及正啁啾, 这样便加长了激光腔的长度。

Proctor 和 Wise^[5]将双石英棱镜对插入自锁模掺钛蓝宝石激光器腔内作为色散补偿元件, 他们指出, 这种双石英棱镜对通过增大角色散量增加了它的二阶色散, 并由于石英材料具有较低的 $(dn/d\lambda)(d^2n/d\lambda^2)$ 而减少了它的三阶色散。他们采用光束描迹法计算了双石英棱镜对在中心波长处的二、三阶色散量。计算表明, 这种双石英棱镜对在补偿腔内二阶色散的同时, 大大降低了腔内的三阶色散量, 实验上亦取得较满意的结果。

* 国家攀登计划资助项目, 并得到国家教委光电子信息工程开放实验室的部分资助。

收稿日期: 1994年12月22日; 收到修改稿日期: 1995年3月21日

本文通过几何光学原理推导出双棱镜对的二、三阶色散的解析表达式。解析结果与 Proctor 等人的说法不同。结果表明, 双棱镜对不是由于角色散的增加而增加其二阶色散, 它的二阶色散量的增加是通过等效间距 l_{eff} 的作用结果。数值计算结果清楚表明, 采用双石英棱镜对, 在不增加空间间距的情况下, 补偿相应的腔内二阶色散的同时, 大大减少腔内三阶色散量。

2 双棱镜对色散公式

Fork 等人给出了棱镜对的二、三阶色散的解析表达式^[6]为

$$\frac{d^2 \varphi}{d \omega^2} = \frac{\lambda^3}{2\pi^2 c^3} \frac{d^2 P}{d \lambda^2} \quad (1)$$

$$\frac{d^3 \varphi}{d \omega^3} = -\frac{\lambda^4}{4\pi^2 c^3} \left(3 \frac{d^2 P}{d \lambda^2} + \lambda \frac{d^3 P}{d \lambda^3} \right) \quad (2)$$

其中:

$$\frac{d^2 P}{d \lambda^2} = 4 \left[\frac{d^2 n}{d \lambda^2} + (2n - n^{-3}) \left(\frac{dn}{d \lambda} \right)^2 \right] l \sin \beta - 8 \left(\frac{dn}{d \lambda} \right)^2 l \cos \beta \quad (3)$$

$$\frac{d^3 P}{d \lambda^3} = 4 \frac{d^3 n}{d \lambda^3} l \sin \beta - 24 \frac{dn}{d \lambda} \frac{d^2 n}{d \lambda^2} l \cos \beta \quad (4)$$

式中 P 为光学长度, λ 为光在空气中的波长, l 为两棱镜顶之间的空间距离, β 为某频率 ω 的光线与两顶连线之间的夹角, 它是光频率的函数, n 为光学材料的折射率。

图 1(a) 为双棱镜对的光路图, 图 1(b) 是其等效棱镜对的示意图。如图 1(a) 所示, 作者依次在 $\Delta P_1 A P_2$ 、 $\Delta A B P_2$ 、 $\Delta P_1 B P_2$ 、 $\Delta P_1 P_3 C$ 、 $\Delta P_3 D C$ 及 $\Delta P_2 P_3 D$ 中使用正弦定理, 最终可以推导出等效的色散角 β_{eff} 和等效棱镜顶的间距 l_{eff} :

$$\beta_{\text{eff}} = \beta(\omega) \quad (5)$$

$$l_{\text{eff}} = l_1 + \frac{l_1 \cos \{ \sin^{-1} [\sin(\theta - \beta) / n_1] \} \cos \theta}{\cos(\theta - \beta) \cos \{ \sin^{-1} [\sin(\theta - \beta) / n_1 - \alpha] \}} + \frac{l_2 \sin \{ \sin^{-1} \{ n_2 \sin [\alpha - \sin^{-1} \sin(\theta - \beta) / n_2] \} - \theta \} \cos \theta}{\sin \beta \cos \{ \sin^{-1} \{ n_2 \sin [\alpha - \sin^{-1} \sin(\theta - \beta) / n_2] \} \}} \quad (6)$$

在推导(5)、(6)式时, 作者设光线以布儒斯特角 θ 入射到棱镜 1 上, α 为与布儒斯特角入射的光线对应的棱镜顶角, 频率为 ω 的光线以 $\beta(\omega)$ 角出射棱镜 2, $\beta(\omega)$ 为光线与 $P_1 P_2$ (棱镜 1、2 顶间连线) 之间的夹角, 也是频率为 ω 的光线的色散角。设光线 $P_1 P_2$ 、 $P_2 C$ 、 CD 以布儒斯特角分别入射到棱镜 2、3、4 上。 l_1 为棱镜 1、2 顶间距离和棱镜 3、4 顶间距, $l_2 = P_2 C$ 。

把公式(5)、(6)代入(1)、(2)即可以求得双棱镜对的二、三阶色散解析表达式。由公式(5)、(6)可以看出, 双棱镜对并没有改变原棱镜的角色散, 即 $\beta_{\text{eff}} = \beta$; 与具有相同间距的棱镜对相比, 双棱镜对的较大的二阶色散来自于等效间距 l_{eff} 。

图 2 给出了双石英棱镜对(曲线 1)和 LaF 28 光学玻璃棱镜对(曲线 2)的二、三阶色散曲

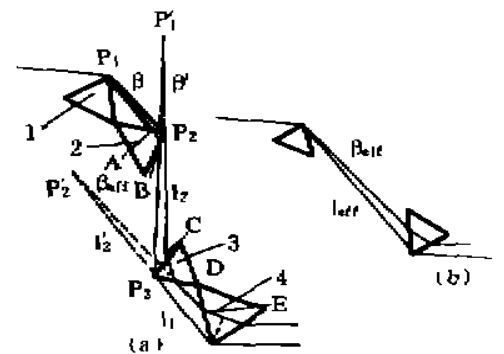


Fig. 1 (a) Quartz prism sequence and (b) its equivalent prism pair

线。图中曲线表明，在保证相同二阶色散情况下，双石英棱镜对具有更小的三阶色散量。图 3 给出用相同的石英棱镜对的二阶色散量。虚线表示石英棱镜对的二阶色散，其两棱镜顶间距取为 56 cm，实践表示双石英棱镜对的二阶色散，其中 l_1 为 4 cm， l_2 为 56 cm。曲线表明，在空间距离相同的情况下，双石英棱镜对具有更大的二阶色散量。计算结果表明，可以采用双石英棱镜对结构用于掺钛蓝宝石自锁模激光腔内，补偿腔内二阶色散和正啁啾，同时大大降低三阶色散的影响。

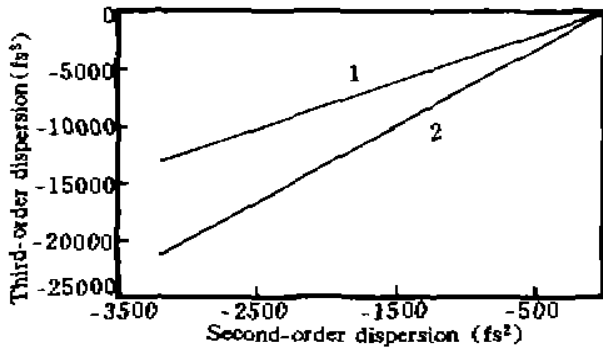


Fig.2 The third-order dispersion vs second-order dispersion for quartz prism sequence (curve 1) and LaF 28 prism pair (curve 2)

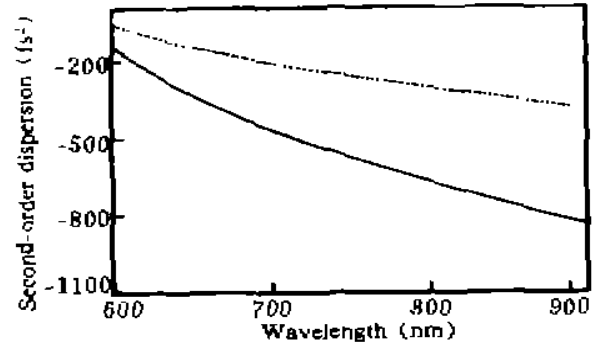


Fig.3 Second-order dispersion of double quartz prism pair (solid) and quartz prism pair (dashed)

3 实验结果

实验装置如图 4 所示。主激光腔是由反射镜 M_1 到 M_4 组成的一个标准的象散补偿腔。长 20 mm 布儒斯特角端面的掺钛蓝宝石晶体放在两折迭镜 M_2 、 M_3 之间，其曲率半径为 10 cm，曲面镀有多层介质膜，对 720 nm~820 nm 全反射，对 488 nm~514 nm 为高透射。另一面(平面)镀有对 488 nm~514 nm 的增透膜。 M_1 为平面耦合输出镜，透射率为 3%，中心波长在 780 nm。端镜 M_4 是对 720 nm~820 nm 全反射的平面反射镜。双石英棱镜对插入端镜 M_4 所在的一臂。石英棱镜的顶角为 69°。实验发现，插入棱镜时应保证光束以布儒斯特角入射，否则损耗很大，而不能使激光器工作在最佳锁模状态。泵浦镜的曲率半径为 20 cm。用南京电子管厂生产的 A-20 全谱线 Ar^+ 激光器为泵浦源，最大输出为 13 W，一定要保证其远场模式为中心亮斑。锁模脉冲宽度采用共线强度相关器测量。当泵浦功率为 5.5 W， $l_1 = 4$ cm， $l_2 = 54$ cm 时，测得最窄脉宽为 52 fs，平均输出功率 200 mW。图 5 给出锁模光脉冲的自相关曲线和相应的光谱曲线，谱宽 14 nm， $\Delta\nu\Delta t = 0.358$ ，很接近傅里叶变换极限。与采用高折射率棱镜对的掺钛蓝宝石自锁模激光器^[7]相比，采用双石英棱镜对，可把输出脉宽压缩了三倍多。这主要是双石英棱镜对降低了三阶色散，因而降低了对锁模脉冲的影响。

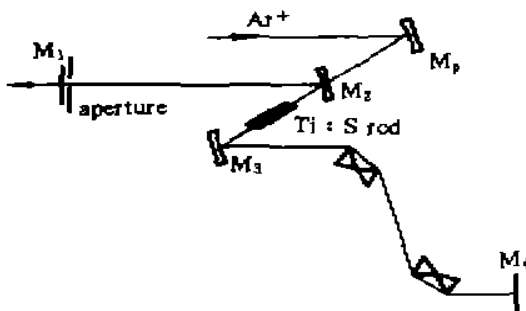


Fig.4 Schematic of the laser cavity

保证光束以布儒斯特角入射，否则损耗很大，而不能使激光器工作在最佳锁模状态。泵浦镜的曲率半径为 20 cm。用南京电子管厂生产的 A-20 全谱线 Ar^+ 激光器为泵浦源，最大输出为 13 W，一定要保证其远场模式为中心亮斑。锁模脉冲宽度采用共线强度相关器测量。当泵浦功率为 5.5 W， $l_1 = 4$ cm， $l_2 = 54$ cm 时，测得最窄脉宽为 52 fs，平均输出功率 200 mW。图 5 给出锁模光脉冲的自相关曲线和相应的光谱曲线，谱宽 14 nm， $\Delta\nu\Delta t = 0.358$ ，很接近傅里叶变换极限。与采用高折射率棱镜对的掺钛蓝宝石自锁模激光器^[7]相比，采用双石英棱镜对，可把输出脉宽压缩了三倍多。这主要是双石英棱镜对降低了三阶色散，因而降低了对锁模脉冲的影响。

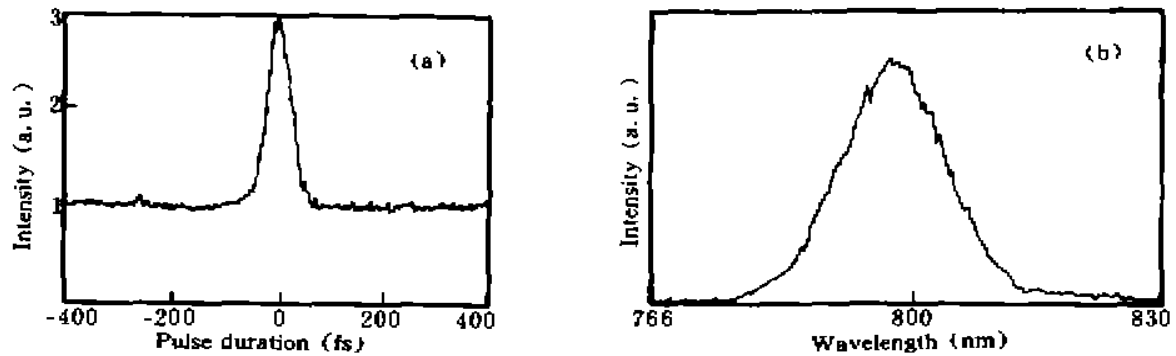


Fig. 5 (a) Autocorrelation trace for the mode-locked laser pulses and (b) the associated spectrum

结 论 推导出双棱镜对的二、三阶色散的解析式。数值计算表明, 与高折射率材料做成的棱镜对相比, 在保证相同二阶色散情况下, 双石英棱镜对具有较小的三阶色散量。因而把双石英棱镜对用于自锁掺钛蓝宝石激光器或其他固体飞秒激光器中补偿腔内正色散及正啁啾, 可以大大减少三阶色散对光脉冲的扰动, 而得到较窄的锁模脉冲。实验结果证明了这一点。

参 考 文 献

- [1] P. F. Moulton, Spectroscopic and laser characteristics of Ti:Al₂O₃. *J. Opt. Soc. Am B*, 1986, 3(1): 125~133
- [2] Stephen A. Payne, L. L. Chase, L. K. Smith *et al.*, Laser performance of Cr³⁺:LiSrAlF₆. *J. Appl. Phys.*, 1989, 66(3): 1091~1056
- [3] H. A. Haus, J. D. Moores, L. E. Nelson, Effect of third-order dispersion on passive mode locking. *Opt. Lett.*, 1993, 18(1): 51~53
- [4] Melanie T. Asaki, Chung-po Huang, Dennis Garvey *et al.*, Generation of 11 fs pulses from a self-mode-locked Ti:sapphire laser. *Opt. Lett.*, 1993, 18(12): 977~979
- [5] Bob Proctor and Frank Wise, Quartz prism sequence for reduction of cubic phase in a mode-locked Ti:Al₂O₃ laser. *Opt. Lett.*, 1992, 17(18): 1295~1297
- [6] R. L. Fork, O. E. Martinez, J. P. Gordon, Negative dispersion using pairs of prisms. *Opt. Lett.*, 1984, 9(5): 150~155
- [7] 王清月, 戴建明, 向望华等, 掺钛蓝宝石激光器实现自聚焦锁模运转. *光学学报*, 1993, 13(1): 93~94

A Self-Mode-Locked Ti:Sapphire Laser with the Pair of the Quartz Prism Sequence

Xing Qirong Zhang Weili Li Peng Wang Chingye

(Ultrafast Laser Research Laboratory, Modern Optical Instrument Institute,
Department Precision Instrument, Tianjin University, Tianjin 300072)

(Received 22 December 1994; revised 21 March 1995)

Abstract The dispersive formulas were derived for the pair of prism sequence. Experimental results of the self-mode-locked Ti:sapphire laser with quartz prism sequence were reported which are in good agreement with the theory.

Key words dispersion of prism pair, self-mode-locking.