

复合折射棱镜的色散研究

朱健强 陈绍和 陈韬略 陈有明 逯其荣 郭小东 张筑虹 邓锡铭
(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

提 要

理论分析用二种不同材料组成复合色散棱镜的色散量, 提出变相色散棱镜, 以增大色散量. 结论在实验中得到验证.

关键词 复合棱镜, 色散.

1 引 言

负色散对超短脉冲的获得至关重要, 用光栅对可产生负色散. 但其损耗较大, 抗破坏阈值低, 大尺寸的光栅制备有一定难度, 故在实际应用中受到了不同程度的限制, 研制具有高色散量的棱镜, 具有实际意义.

一般光学材料, 在可见光波段, 色散均为正色散, 但用正色散材料制成的色散棱镜组, 既能产生负色散, 又能产生正色散^[1]. 文献[2]中用单一棱镜放在激光腔内, 构成环形腔, 也能产生负色散. fs 脉冲的获得, 都要在腔内或腔外补偿色散^[3,4]. 6fs 脉冲的产生, 就是利用光栅对和棱镜组联合作用, 补偿二阶和三阶色散量得到的^[4].

棱镜组色散量的大小, 取决于棱镜之间的距离和单块棱镜角色散量大小, 这点和光栅对的结论一致^[6]. 一般材料的色散量较小, 要产生较大的负色散量, 二棱镜之间的距离扩大. 文献[6]中, 利用重火石玻璃(SF-10)的高折射率和高色散量, 设计成的色散棱镜组, 能有效地缩短两棱镜之间的距离; 提高棱镜组的色散量. 用 TiO₂ 晶体制成的色散棱镜组, 其色散量可以与等间距的光栅对相比, (光栅常数 $d = 1200 \text{ 1/mm}$)^[7].

本文设计的复合色散棱镜, 能有效地提高色散率, 以在其某些场合取代光栅对, 因为棱镜组较光栅对有许多优点, 如损耗小, 抗破坏阈值高, 大尺寸加工, 成本低等.

2 复合棱镜的原理及设计

所谓复合棱镜, 就是用二种或多种材料制成的三棱镜, 本文仅就二种材料组成的三棱镜作理论和实验研究.

用复合棱镜组产生负色散, 棱镜组的排布如图 1 所示. n_1, n_2 为构成复合三棱镜材料的折射率, 复合三棱镜的子棱镜外形尺寸按布儒斯特(Brewster)角入射, 折射光线具有最小偏向角,

即

$$\sin i = n_i \sin \alpha_i \quad (1)$$

式中 i 为光线的入射角, n_i 为子棱镜的折射率, α_i 为子棱镜的顶角, 子棱镜底角 $\beta_i = 90^\circ - \alpha_i$

计算色散以前, 先把角度符号按光学设计习惯作一规定:

1) 为使法线与光线重合, 将它沿最小角度逆时针转动时光线的入射角 i_k 和折射角 i'_k 为正, 反之为负.

2) 为使棱镜的折射顶角的第一表面与第二表面重合, 将它沿最小角度逆时针转动时, 子棱镜顶角 α_k 为正, 反之为负.

3) 为使出射光线与入射光线重合, 逆时针转动时偏向角为正, 反之为负.

设复合棱镜三分面上光线的入射角, 折射射角分别为 $i_1, i'_1, i_2, i'_2, i_3, i'_3$, 子棱镜的顶角为 α_1 和 α_2 . 根据几何光学定律则有:

$$\sin i_1 = n_1 \sin i'_1, \quad i'_1 - i_2 = \alpha_1 \quad (2)$$

$$n_1 \sin i_2 = n_2 \sin i'_2, \quad i'_2 - i_3 = \alpha_2, \quad (3)$$

$$n_2 \sin i_3 = \sin i'_3 \quad (4)$$

计算复合棱镜的色散量, 可通过计算色散常数 $D^{[1]}$

$$D = -L^{-1} \frac{dT}{d\lambda} = \left(\frac{\lambda}{CL}\right) \frac{d^2P}{d\lambda^2} \quad (5)$$

式中 L 为光线通过的距离, P 为相应的光程, T 为光线通过 L 所需的时间, 在图 2 中, 光程 ABF 等于 CDE , 因为 BF 和 DE 是对应的波前, 相应的光程为

$$P = (l + l_0) \cos \beta \quad (6)$$

式中 l 为两棱镜间的距离, l_0 为第二块棱镜顶点到等相面的距离, 以后以 $L = l + l_0$ 处理计算问题. 设第一块棱镜的色散角为 β , 则

$$dP/d\beta = -L \sin \beta, \quad d^2P/d\beta^2 = -L \cos \beta \quad (7)$$

利用复合函数求微分可得:

$$dP/d\lambda = dP/d\beta \left[\frac{d\beta}{dn_1} \frac{dn_1}{d\lambda} + \frac{d\beta}{dn_2} \frac{dn_2}{d\lambda} \right] \quad (8)$$

$$\begin{aligned} d^2P/d\lambda^2 = & d^2P/d\beta^2 \left[\frac{d\beta}{dn_1} \frac{dn_1}{d\lambda} + \frac{d\beta}{dn_2} \frac{dn_2}{d\lambda} \right]^2 + dP/d\beta \left[\frac{d^2\beta}{dn_1^2} \left(\frac{dn_1}{d\lambda}\right)^2 + 2 \frac{d^2\beta}{dn_1 dn_2} \left(\frac{dn_1}{d\lambda} \frac{dn_2}{d\lambda}\right) \right. \\ & \left. + \frac{d\beta}{dn_1} \frac{d^2n_1}{d\lambda^2} + \frac{d^2\beta}{dn_2^2} \left(\frac{dn_2}{d\lambda}\right)^2 + \frac{d\beta}{dn_2} \frac{d^2n_2}{d\lambda^2} \right] \quad (9) \end{aligned}$$

欲求出色散量 $d^2P/d\lambda^2$, 只需求出以下五个棱镜结构参量, $d\beta/dn_1, d\beta/dn_2, d^2\beta/dn_1^2, d^2\beta/dn_2^2, d^2\beta/dn_1 dn_2$.

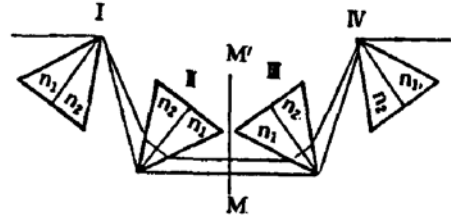


Fig. 1 Coupled four-prism sequence having negative dispersion. The prisms are used at minimum deviation and oriented so that the rays enter and leave at Brewster's angle. The arrangement is symmetric about the plane MM'

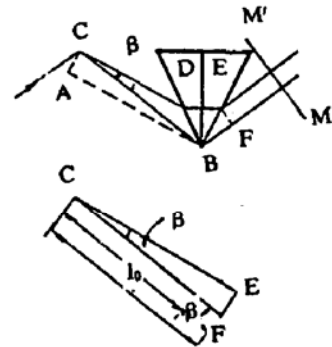


Fig. 2 Construction for calculation

为使表达式简单而又能说明问题,我们考虑在布儒斯特角入射和出射,即有关系式:

$$\text{tg } i_1 = n_1, \quad \text{tg } i_1' = 1/n_1, \quad \text{tg } i_3 = 1/n_2, \quad \text{tg } i_3' = n_2 \quad (10)$$

和光束按最小偏向角出射,即有:

$$i_2 = i_2' = 0 \quad (11)$$

由(2)~(4)式,并利用(10)和(11)式,略去无物理意义的项,经计算可得:

$$\left. \begin{aligned} di_3'/dn_1 &= -n_2/n_1, & di_3'/dn_2 &= -1, & d^2i_3'/dn_1^2 &= -n_2/n_1, \\ d^2i_3'/dn_2^2 &= -1, & d^2i_3'/dn_1dn_2 &= 2n_2^2/n_1 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

在本文角度符号规定下: $d\beta = di_3'$, $d^2\beta = d^2i_3'$, 将(7)式及(12)式代入(9)式可得:

$$\begin{aligned} d^2P/d\lambda^2 &= L \left\{ \left[\frac{n_2}{n_1} \left(\frac{dn_1}{d\lambda} \right)^2 + \left(\frac{dn_2}{d\lambda} \right)^2 - 4 \frac{n_2^2}{n_1} \left(\frac{dn_1}{d\lambda} \frac{dn_2}{d\lambda} \right) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{n_2}{n_1} \frac{d^2n_1}{d\lambda^2} + \frac{d^2n_2^2}{d\lambda^2} \right] \sin \beta - \left(\frac{n_2}{n_1} \frac{dn_1}{d\lambda} + \frac{dn_2}{d\lambda} \right)^2 \cos \beta \right\} \quad (13) \end{aligned}$$

这样就把棱镜对的色散量全部转化为棱镜本身的参数. 当 β 较小时, $\sin \beta \simeq 0$, $\cos \beta \simeq 1$ 利用(5)式可将(13)式简化成

$$dt/d\lambda \simeq \left(\frac{L\lambda}{C} \right) \left(\frac{n_2}{n_1} \frac{dn_1}{d\lambda} + \frac{dn_2}{d\lambda} \right)^2 \quad (14)$$

若光束的入射角不满足布儒斯特角,出射光线不按最小偏向角出射,则(14)式,应乘以一角度因子^[7] $G(i_m, \alpha_1, \alpha_2)$ 即

$$dt/d\lambda = \left(\frac{L\lambda}{C} \right) \left(\frac{n_2}{n_1} \frac{dn_1}{d\lambda} + \frac{dn_2}{d\lambda} \right) G(i_m, \alpha_1, \alpha_2) \quad (15)$$

i_m 为光束入射角, α_1, α_2 为子棱镜顶角.

由文献[8]中可以看出,当 $i_m > 40^\circ$ 后, $dt/d\lambda \simeq$ 常数. 由此可以推出 $G(i_m, \alpha_1, \alpha_2) \simeq 1$, 则实际应用中可以用(14)式代替(15)式,从(14)式可以看出:

- 1) $L, n_2, dn_1/d\lambda, dn_2/d\lambda$ 其中任一项越大则色散量越大,
- 2) 色散量仅是材料的参数,由此可以把图

1 中的复合色散棱镜改成形如图 3 的变相复合棱镜,其色散量仍可按(14)式计算.

变相复合棱镜的提出,不仅节约了昂贵的特种高折射率、色散率材料,而且其色散量仍和高折射率材料相当,以石英玻璃和 ZF10 组成的变相复合棱镜与单纯用 ZF10 制成的色散棱镜的色散量为例,在 $\lambda = 0.62 \mu\text{m}$ 处对石英玻璃 $n_1 = 1.457$, $dn_1/d\lambda = -0.031 \mu\text{m}^{-1}$, $d^2n_1/d\lambda^2 = 0.1267 \mu\text{m}^{-2}$. 对 ZF10, $n_2 = 1.686$, $dn_2/d\lambda = -0.0957 \mu\text{m}^{-1}$, $d^2n_2/d\lambda^2 = 0.463 \mu\text{m}^{-2}$. 由(13)式计算可得,两者在其它参数相同情况下,色散量之比近似为 1

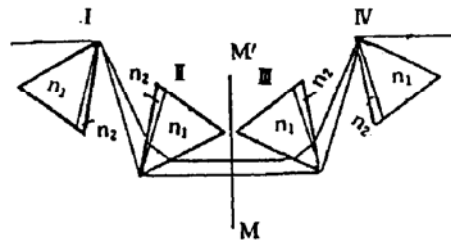


Fig. 3 Modification coupled-four-prism sequence

3 实验结果及讨论

为了验证复合棱镜与变相复合棱镜有近似等量的色散量及其有较高的色散量,进行腔外压缩 fs 脉冲实验,复合棱镜及变相复棱镜由石英玻璃及 ZF10 组成,其外形参数如下:石英

子棱镜顶角 $\alpha_1 = 34^\circ$, 底角 $v_1 = 56^\circ$, ZF10 顶角 $\alpha_2 = 31^\circ$, 底角 $v_2 = 59^\circ$; 变相复合棱镜参数: $\alpha_1 = 64^\circ$, $v_1 = 56^\circ$, $v_1' = 60^\circ$; $\alpha_2 = 2^\circ$, $v_2 = 58^\circ$, $v_2' = 120^\circ$. 以下用变相复合棱镜及石英玻璃棱镜进行实验(两种棱镜外形尺寸一样, 高均为 2 cm), 装置图如图 4 所示. fs 脉冲源由氩离子连续泵浦染料对撞锁模激光器输出, 脉宽 80 fs, 平均功率 6 mW, 重复率 84 MHz, 中心波长 $0.62 \mu\text{m}$, 谱宽 10.3 nm, 增益染料为 R6G + 乙二醇(浓度 $\sim 10^{-3} \text{ mol/l}$), 锁模染料 DODC + 乙二醇(浓度 $\sim 5 \times 10^{-4} \text{ mol/l}$). 用间距为 10 cm 的石英棱镜补偿色散, 测得的脉宽为 70 fs, 图 5(a) 是其自相关波形, 用同样间距的变相复合棱镜补偿色散, 测得有脉宽为 40 fs, 图 5(b) 是其自相关波形. 根据(14)式算得的 $dt_1/dt_2 = 4.5$, 实验结果 $dt_1/dt_2 = 4$, 说明理论与实验符合较好, 两者之间的偏差是由于以(14)式代替(13)式的缘故.

由上讨论可以看出, 用变相复合棱镜能有效提高色散率, 利用特种材料制成的变相复合棱镜在可见光波段代替光栅对压缩光脉冲是完全可能的, 在棱镜一侧镀高色散膜以增加色散量也是可行的, 这方面正在进行实验研究.

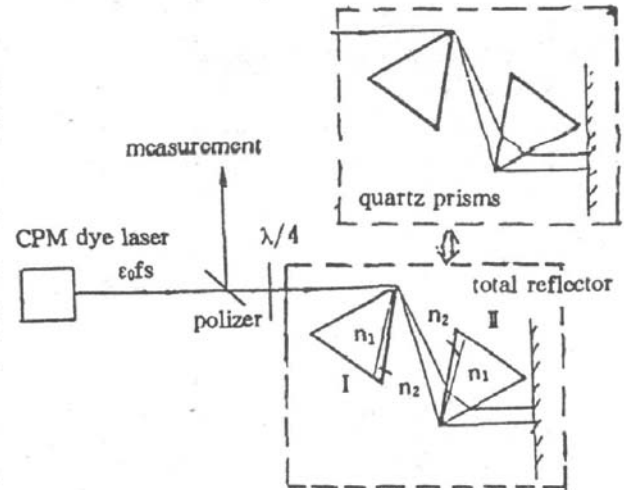


Fig. 4 Experiment setup

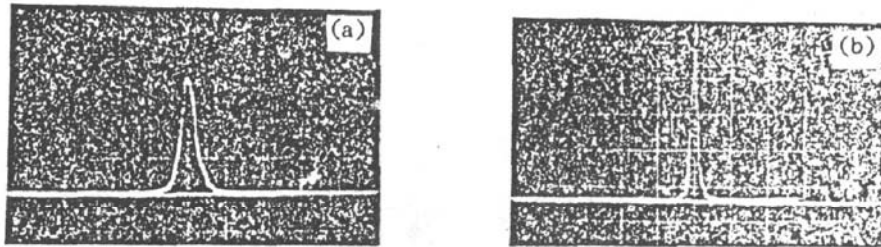


Fig. 5 Autocorrelation waveforms for pulse compression. (a) Compressed pulse by quartz prisms, FWHM is about 70 fs; (b) Compressed pulse by modification-four-prism, FWHM is about 40 fs

参 考 文 献

- [1] R. L. Fork, O. E. Martinez, J. P. Gordon, Negative dispersion using pairs of prisms. *Opt. Lett.*, 1984, 9(5): 150~152
- [2] J. P. Gordon, R. L. Fork, Optical resonator with negative dispersion. *Opt. Lett.*, 1984, 9(5): 153~155
- [3] J. A. Valdmainis, R. L. Fork, Design considerations for a femtosecond pulse laser balance self phase modulation, group velocity dispersion, saturable absorption and saturable gain. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1986, QE-22(1): 112~118
- [4] R. L. Fork, C. H. Brito Cruz, P. C. Becker *et al.*, Compression of optical pulses to six femtoseconds by using cubic phase compensation. *Opt. Lett.*, 1987, 12(7): 483~485
- [5] E. P. Treacy, Optical pulse compression with diffraction gratings. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1969, QE-5(9): 454~458

- [6] J. D. Kafka, T. Baer, Prism-pair dispersive delay lines in optical pulse compression. *Opt. Lett.*, 1987, 12(6) : 401~403
- [7] Masatak Nakazawa, Takash Nakashima, Hirokazu Kubita *et al.*, Efficient optical pulse compression using a pair of Brewster-angle TeO₂ crystal prisms. *J. O. S. A(B)*, 1988, 5(2) : 215~221
- [8] Zs Bor, B. Race, Group velocity dispersion in prisms and its application to pulse compression and traveling-wave excitation. *Opt. Commun.*, 1985, 54(3) : 165~169

Study on dispersion of coupled prisms

ZHU Jianqiang CHEN Shaoh CHEN Taolu CHEN Youming
LU Qirong GUO Xiaodong ZHANG Zhuhong DENG Ximing

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

(Received 16 October 1992)

Abstract

The dispersion of coupled prisms composed of two different materials is analysed theoretically. The modification coupled prisms are proposed to increase the dispersion. Experimental demonstration has proved the calculated results.

Key words modification compled prisms, dispersion.