

新型风成像干涉仪温度补偿理论研究^{*}

朱化春 张淳民[†] 简小华

(西安交通大学理学院, 非平衡物质结构及量子调控教育部重点实验室, 西安 710049)

(2009 年 1 月 19 日收到; 2009 年 5 月 13 日收到修改稿)

简述了高层大气风场被动式遥感探测的基本原理; 论述了新型风成像干涉仪宽场、消色差、温度补偿理论, 针对目前国际上采用的风成像干涉仪补偿方法的不足, 从理论上进行了分析与讨论, 给出了四层介质的优化补偿理论和方案. 模拟结果表明, 该补偿可完全理想地消去单色光的温差, 且复色光的温差补偿要比现有的方法提高 1—2 个量级. 该研究为设计宽场、消色差、温度补偿的新型风成像干涉仪和提高风场探测精度提供了重要的理论依据和实践指导.

关键词: 风成像干涉仪, 温度补偿, 宽场, 消色差

PACC: 0760, 0765

1. 引 言

高层大气风场被动式风成像干涉探测的基本原理是干涉成像光谱技术和电磁波的多普勒效应^[1-8], 它以高层大气中的气辉(极光)作为被探测源, 在大光程差的条件下探测干涉条纹的调制度和谱线的频移, 从而反演出高层大气的速度、温度等信息. 被动式大气风场探测由于具有较高的灵敏度, 并且无需自带发射源, 更适合星载探测, 因此已成为近年来的研究热点^[9-29], 得到了各国政府, 特别是军方的高度重视. 目前国际上比较成功的风成像干涉仪是 1991 年美国航空航天局(NASA)发射的一颗上层大气研究卫星 UARS(upper atmosphere research satellite)搭载的 Shepherd 等^[9]研制的风成像干涉仪(WINDII)以及正在研究之中的用于红外探测的 SWIFT^[13]. 它们都是以迈克耳逊干涉仪为基础设计而成的, 通过在迈克耳逊干涉仪的两臂上加两块玻璃和一层空气隙来达到宽场、消色差、温度补偿的目的. 宽场可以增大系统的灵敏度^[10], 消色差可以使仪器工作在不同的波长而不破坏系统

的宽场条件^[2], 温度补偿可以减小仪器的精度所受环境温度的影响^[3].

但是受限于补偿方法上的不足, 目前国际上使用的风成像干涉仪的温度补偿效果很不理想^[9]. 因风成像干涉仪的探测精度受环境温度的影响很大, 如果想得到比较理想的探测精度, 需要非常精密的温度控制仪器, 增加了仪器的复杂度和建设费用.

鉴于此, 为了得到更好的温度补偿风成像干涉仪, 我们在 WINDII 中使用的风成像干涉仪的基础上, 提出了使用四块补偿介质, 引进四个变量, 可以满足被动式大气风场探测中使用的大光程差、宽场、消色差、消单色温差的风成像干涉仪进行补偿所应满足的所需四个方程的要求, 实现了宽场、消色差、消单色温差的目的. 模拟结果显示, 对复色温差的补偿也得到了很好的结果.

利用这种四层介质的补偿方法, 可以有效地消除环境温度对风成像干涉仪被动式大气风场探测精度的影响, 降低仪器对温控设备的要求, 从而大大简化了仪器设计结构, 并极大地提高了仪器的整体性能, 减少了仪器建设费用.

^{*} 国家自然科学基金重点项目(批准号:40537031)、国家高技术研究发展计划(批准号:2006AA12Z152)、国防基础科学研究基金(批准号:A1420080187)、国家自然科学基金(批准号:40875013, 40375010, 60278019)、陕西省科技攻关计划(批准号:2001K06-G12, 2005K04-G18)和西安交通大学“985”二期电子信息平台资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: zcm@mail.xjtu.edu.cn

2. 风成像干涉仪大气风场探测基本原理^[19]

2.1. 风成像干涉仪原理

图 1 为我们设计的新型风成像干涉仪的原理图,其由前置望远系统 (Lens1)、分束器 (BS)、补偿介质 (玻璃 1 (G1)、玻璃 2 (G2)、玻璃 3 (G3) 以及空气隙)、静镜 (Ms)、动镜 (Mm)、纳米压电步进装置 (PI)、成像光学系统 (Lens2) 和 CCD 构成。

进入新型风成像干涉仪的光线,首先经过前置望远系统准直,进入分束器,分为两束光,一束被反射后通过 G1,G2 到达反射镜 (Ms),被反射回来通过分束器通过成像光学系统,另一束通过分束器后经过 G3 和空气隙到达反射镜 (Mm),被反射回来后,再经分束器反射后通过成像光学系统,两束光线在汇聚后,在 CCD 上发生干涉。

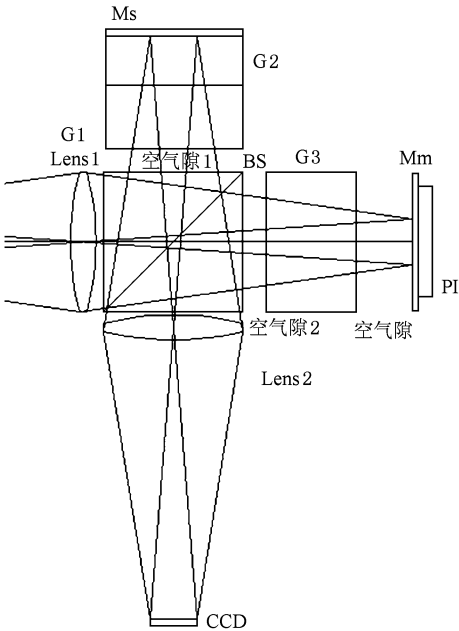


图 1 风成像干涉仪原理图

2.2. 风成像干涉仪被动式探测的原理

对于上层大气多普勒展宽占主要地位,因此谱线线型分布函数用高斯函数表示为

$$B(\sigma) = B_0 \exp\{[-4(\sigma - \sigma_0)^2 \ln 2 / W^2]\}, \quad (1)$$

式中 B_0 为波数 σ 等于中心波数 σ_0 时光源的辐射强度, W 为半高宽

$$W = [(7.16 \times 10^{-7})^2 \sigma_0^2 T / M]^{1/2}, \quad (2)$$

式中 T 为热力学温度 (单位为 K), M 为原子量. 对 (1) 式进行傅里叶变换,则可得到干涉强度的分布函数

$$I(\Delta) = I_0 [1 + \exp(-QT\Delta^2) \cos(2\pi\sigma_0\Delta)], \quad (3)$$

式中 $Q = 1.82 \times 10^{-12} (\sigma_0^2 / M) (\text{K}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2})$, Δ 为有效光程差,单位为 cm, I_0 为平均强度. 则干涉条纹的调制度为

$$V = \exp(-QT\Delta^2) = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (4)$$

把 (4) 式代入 (3) 式可得

$$I = I_0 [1 + V \cos(2\pi\sigma_0\Delta)], \quad (5)$$

式中 σ_0 为零风速时的波数,由电磁波的多普勒效应可得

$$\sigma = \sigma_0 (1 + v/c), \quad (6)$$

式中 v 为光源与仪器的相对速度, c 为光速.

令

$$\Delta = \Delta_0 + \Delta', \quad (7)$$

其中, Δ_0 称为基准光程差,且 $\cos(2\pi\Delta_0\sigma_0) = 1$. Δ' 为仪器以 $\lambda/4$ 为间隔的步进光程差. 将 (6) 和 (7) 式代入 (5) 式,化简并消去极小项可得

$$I = I_0 \{1 + V \cos[\phi + 2\pi\sigma_0\Delta']\}, \quad (8)$$

式中

$$\phi = 2\pi\sigma_0\Delta_0 \frac{v}{c} \quad (9)$$

是由风速而产生的相位位移.

假定 Δ' 从 $\Delta' = 0$ 以 $\lambda/4$ 的步进递增,得到每一步的干涉强度分别为

$$I_1 = I_0 (1 + V \cos\phi), \quad (10)$$

$$I_2 = I_0 (1 - V \sin\phi), \quad (11)$$

$$I_3 = I_0 (1 - V \cos\phi), \quad (12)$$

$$I_4 = I_0 (1 + V \sin\phi). \quad (13)$$

由以上四式可以得到

$$I_0 = (I_1 + I_2) / 2 = (I_2 + I_4) / 2, \quad (14)$$

$$V = [(I_1 - I_3)^2 + (I_4 - I_2)^2]^{1/2} / 2I_0, \quad (15)$$

$$\tan\phi = (I_4 - I_2) / (I_1 - I_3). \quad (16)$$

得到调制度 V 和 ϕ 后,分别利用 (4) 和 (9) 式,即可求得大气风场的温度和速度.

3. 风成像干涉仪补偿基本原理^[10]

高层大气风场探测的大光程差、大视场、消色差、消温差风成像干涉仪,必须满足以下五个方程:

基准光程差

$$\Delta_0 = D, \tag{17}$$

光程差的二次项的系数和为零,

$$w = 0, \tag{18}$$

消色差条件

$$\frac{\partial w}{\partial \lambda} = 0, \tag{19}$$

消温差条件

$$\frac{\partial \Delta_0}{\partial T} = 0, \tag{20}$$

消复色温差

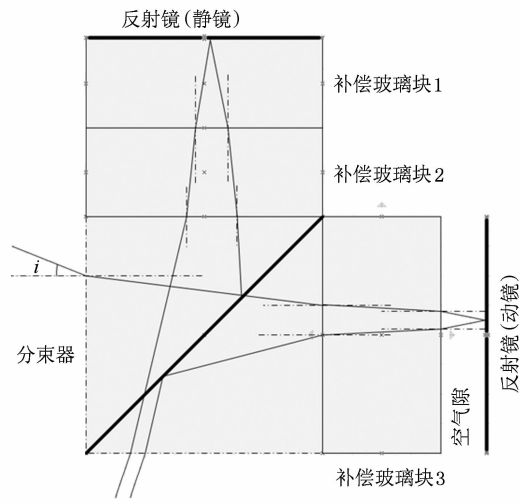
$$\frac{\partial^2 \Delta_0}{\partial T \partial \lambda} = 0. \tag{21}$$


图2 新型风成像干涉仪温度补偿原理图

4. 用于高层大气探测的风成像干涉仪的温度补偿方法

图1为自行设计的大光程差、宽场、消色差、消温差风成像干涉仪。此干涉仪由一块分束器和三块不同材质的玻璃及一层空气隙组成。在风成像干涉仪的一个臂上加两块不同的(或一块)玻璃,而在另一个臂上加上一块玻璃(或两块玻璃)和空气隙,来达到对风成像干涉仪进行补偿的目的。其基本工作原理如下。

如图2,其单臂上的光程分别^[10]为

$$P_1 = 2(n_1 d_1 \cos \theta_1 + n_2 d_2 \cos \theta_2 + n_3 d_3 \cos \theta_3), \tag{22}$$

式中 n_1, n_2, n_3 分别为分束器、补偿玻璃块1和2的折射率, d_1, d_2, d_3 分别是分束器、补偿玻璃块1和2的厚度, $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 分别为光线进入分束器、补偿介质1和2后的折射角;

$P_2 = 2(n_1 d_1 \cos \theta_1 + n_3 d_3 \cos \theta_3 + n_4 d_4 \cos \theta_4), \tag{23}$

式中 n_1, n_4, n_5 分别为分束器、补偿玻璃块3和4的折射率, d_1, d_4, d_5 分别是分束器、补偿玻璃块3和4的厚度, $\theta_1, \theta_4, \theta_5$ 分别为光线进入分束器、补偿介质3和4后的折射角。

(22)与(23)式相减可得系统的光程差为

$$\Delta = 2(n_2 d_2 \cos \theta_2 + n_3 d_3 \cos \theta_3 - n_4 d_4 \cos \theta_4 - n_5 d_5 \cos \theta_5).$$

令上式角标从1开始,在风成像干涉仪臂1上的介质的厚度为正,在干涉仪臂2上的介质的厚度为负,则可得

$$\Delta = 2(n_1 d_1 \cos \theta_1 + n_2 d_2 \cos \theta_2 + n_3 d_3 \cos \theta_3 + n_4 d_4 \cos \theta_4). \tag{24}$$

对上式进行展开,并代入初始条件可得

$$\begin{aligned} \Delta = & 2(n_1 d_1 + n_2 d_2 + n_3 d_3 + n_4 d_4) \\ & - \sin^2 i \left(\frac{d_1}{n_1} + \frac{d_2}{n_2} + \frac{d_3}{n_3} + \frac{d_4}{n_4} \right) \\ & - \frac{\sin^4 i}{4} \left(\frac{d_1}{n_1^3} + \frac{d_2}{n_2^3} + \frac{d_3}{n_3^3} + \frac{d_4}{n_4^3} \right) - \cdots, \end{aligned} \tag{25}$$

上式中 i 为光线进入分束器的入射角。

所以可得基准光程差为

$$\Delta_0 = 2(n_1 d_1 + n_2 d_2 + n_3 d_3 + n_4 d_4), \tag{26}$$

宽场条件为

$$\left. \frac{d_1}{n_1} + \frac{d_2}{n_2} + \frac{d_3}{n_3} + \frac{d_4}{n_4} \right|_{\lambda = \lambda_0} = 0. \tag{27}$$

(11)式两端对波长求导,即可得到消色差条件为

$$\frac{d_1}{n_1^2} \frac{\partial n_1}{\partial \lambda} + \frac{d_2}{n_2^2} \frac{\partial n_2}{\partial \lambda} + \frac{d_3}{n_3^2} \frac{\partial n_3}{\partial \lambda} + \frac{d_4}{n_4^2} \frac{\partial n_4}{\partial \lambda} = 0. \tag{28}$$

(10)式两端对温度求导,即可得到消单色温差条件为

$$\begin{aligned} & d_1(n_1 \alpha_1 + \beta_1) + d_2(n_2 \alpha_2 + \beta_2) \\ & + d_3(n_3 \alpha_3 + \beta_3) + d_4(n_4 \alpha_4 + \beta_4) = 0. \end{aligned} \tag{29}$$

式中, α 为玻璃的线性膨胀系数, β 为折射率随温度变化系数,在玻璃选定的情况下,这两个参数为定值。

联立(26)——(29)式可得

$$\Delta_0 = 2(n_1 d_1 + n_2 d_2 + n_3 d_3 + n_4 d_4),$$

$$\left. \frac{d_1}{n_1} + \frac{d_2}{n_2} + \frac{d_3}{n_3} + \frac{d_4}{n_4} \right|_{\lambda = \lambda_0} = 0,$$
$$\frac{d_1}{n_1^2} \frac{\partial n_1}{\partial \lambda} + \frac{d_2}{n_2^2} \frac{\partial n_2}{\partial \lambda} + \frac{d_3}{n_3^2} \frac{\partial n_3}{\partial \lambda} + \frac{d_4}{n_4^2} \frac{\partial n_4}{\partial \lambda} = 0,$$
$$d_1(n_1\alpha_1 + \beta_1) + d_2(n_2\alpha_2 + \beta_2) + d_3(n_3\alpha_3 + \beta_3) + d_4(n_4\alpha_4 + \beta_4) = 0. \quad (30)$$

综上所述可知,方程组(30)中只有介质(包括玻璃和空气隙)的厚度是未知变量,方程组有四个方程,四个未知量,理论上可以解出四个未知变量,即介质的厚度,且得到的结果可以完全满足(29)式,即消单色温差的要求。

我们使用肖特玻璃 2007 年的玻璃数据库代入计算^[30],得到各个玻璃对所对应的厚度后,再进行优化选取,综合考虑价格、设计、制造、误差等因素,设定如下选取条件:1)两臂上的介质的厚度要小于 20 cm;2)轴外光线和轴上光线的光程差要小于 10 nm;3)(21)式左端项的绝对值要小于 10⁻⁹. 使用四层介质时,我们得到了 200 余玻璃对,选取其中一组,如表 1 所示;三层介质时,只得到有限的几组,选取其中温度补偿效果较好的一组,如表 2 所示。

表 1 四层介质时的玻璃对

	玻璃 G1 (臂 1)	玻璃 G2 (臂 2)	玻璃 G3 (臂 2)	补偿介 质 4(臂 2)
玻璃名称	N-KF9	N-LASF44	P-PK53	真空
厚度/cm	11.84126	6.29973	5.33151	0.78920

表 2 三层介质时的玻璃对

	补偿玻璃 1 (臂 1)	补偿玻璃 2 (臂 2)	补偿介质 (臂 2)
玻璃名称	LF5	N-LaF21	空气隙
厚度/cm	6.07636	6.52867	0.19100

5. 补偿效果模拟

我们在两种补偿方法中选取补偿效果比较好的两组玻璃对,分别画出了它们的宽场和温度补偿的效果图,具体效果见图 3—图 6。

由图 3 和图 5 比较可知,使用四层介质可以获得更好的宽场效果. 虽然使用三层时,在 557.7 和 762 nm 可以获得很好的宽场效果,但是在 630 nm 时的宽场效果很不理想,光程差位移达到了 10 nm 左右. 使用四层介质时的宽场效果比较理想,各谱线在半角 4.2°时,其与垂直入射时的光程差相差不到 2.5 nm.

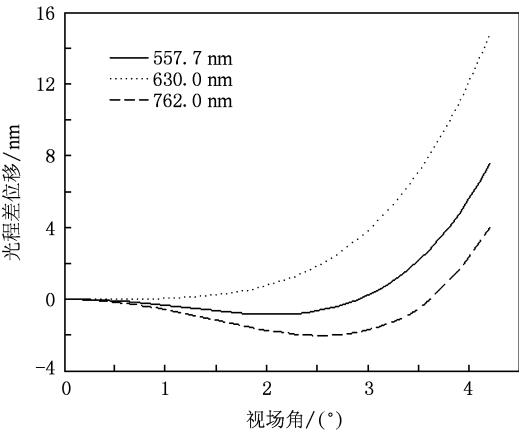


图 3 三层介质(两块玻璃+一层空气)的宽场效果

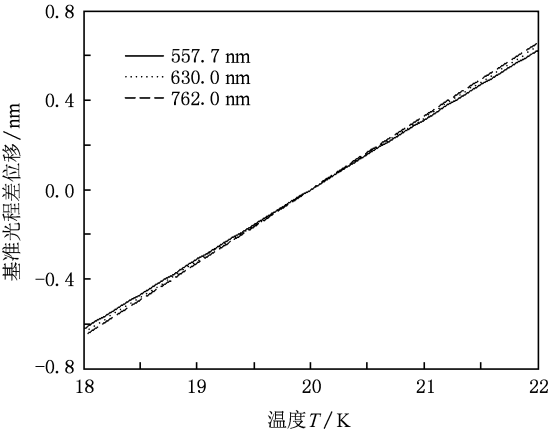


图 4 三层介质时消温差效果图

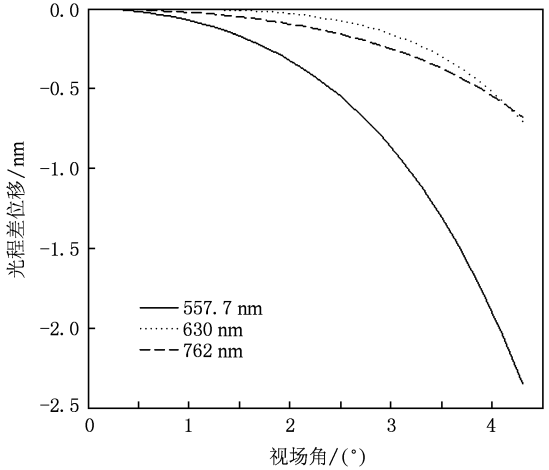


图 5 四层介质时的宽场效果图

由图 4 和图 6 比较可知,四层介质时的温度补

偿效果比较理想,四层介质时的温度变化对基准光程差的影响比三层介质时的要小 1—2 个数量级。

综上所述,使用四层介质进行补偿时,无论是宽场,还是消温差,都获得了比较理想的效果。

6. 结 论

1)理论分析可知,目前国际上使用的补偿方法(使用三层介质)无法完全消去温差,只能对风成像干涉仪的温差进行一定的补偿,补偿效果不明显,需要很精密的温度控制仪器来提高大气风场探测的精度。

2)理论分析可知,使用四层介质可以在单色光的情况下完全消去温度对风成像干涉仪基准光程差的影响,但是使用四层介质并不能完全消除复色光温差的影响。

3)模拟结果表明,使用四层介质的补偿方法可以大大地提高仪器的温度补偿效果,通过比较可知,比目前国际上风成像干涉仪所用补偿方法所得

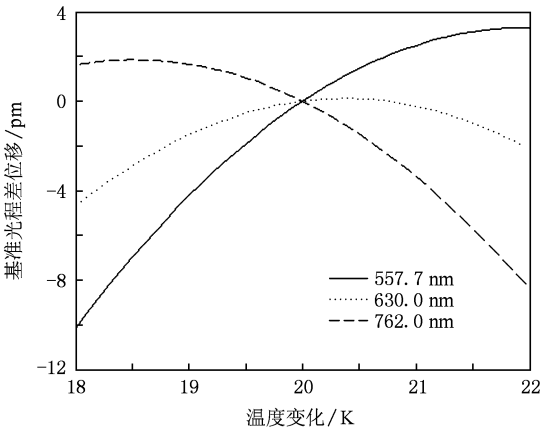


图 6 四层介质时的消温差效果图

效果好 1—2 个数量级。

4)使用该补偿方法,可以得到较好的温度补偿效果,可以有效地消除环境温度对仪器探测精度的影响. 为设计宽场、消色差、温度补偿的新型风成像干涉仪和提高风场探测精度提供了重要的理论依据和实践指导。

[1] Zhang C M, Zhao B C, Xiang L B 2004 *Appl. Opt.* **33** 6090

[2] Zhang C M, Xiang L B, Zhao B C 2004 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **8** 815

[3] Zhang C M, Xiang L B, Zhao B C 2002 *Opt. Commun.* **1-2** 21

[4] Zhang C M, Zhao B C, Xiang L B 2003 *Opt. Commun.* **4-6** 221

[5] Wu L, Zhang C M, Zhao B C 2007 *Opt. Commun.* **1** 67

[6] Jian X H, Zhang C M, Zhao B C 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 824 (in Chinese) [简小华、张淳民、赵葆常 2007 物理学报 **56** 824]

[7] Yuan Z L, Zhang C M, Zhao B C 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6413 (in Chinese) [袁志林、张淳民、赵葆常 2007 物理学报 **56** 6413]

[8] Peng Z H, Zhang C M, Zhao B C, Li Y C, Wu F Q 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6374 (in Chinese) [彭志红、张淳民、赵葆常、李英才、吴福全 2006 物理学报 **55** 6374]

[9] Gault W A, Shepherd G G 1983 *Adv. Space Re.* **2** 111

[10] Shepherd G G 1985 *Appl. Opt.* **24** 1571

[11] Rochon Y J, Rahnama P, McDade I C, Scott A, Gault W A, Lukovich J V 2004 *Pro. SPIE* **5234** 335

[12] Gault W, McDade I C, Rochon Y, Scott A 2003 *Pro. SPIE* **4881** 60

[13] McDade I C, Shepherd G G, Gault W A, Rochon Y J, McLandress C, Scott A, Rowlands N, Butter G 2001 *IEEE* **3** 1344

[14] Gault W A, Ward W E, Shepherd G G, Rowlands N 1999 *IEEE* **3** 1612

[15] Shimoda H 2003 *Pro. SPIE* **4881** 52

[16] Bird J C, Facheng Liang, Solheim B H, Shepherd G G 1995 *Meas. Sci. Technol.* **6** 1368

[17] Gault W A, Brown S, Moise A, Liang D, Seller G, Shepherd G G, Wimperis J 1996 *Appl. Opt.* **35** 2913

[18] Ward W E, Gault W A, Rowlands N, Wang S, Shepherd G G, McCommeld J C, Michelangelid D, Caldwell J 2002 *Pro. SPIE* **4833** 226

[19] Zhang C M, Wang W, Xiangli B, Zhao B C 2000 *Acta Opt. Sin.* **20** 234 (in Chinese) [张淳民、王 炜、相里斌、赵葆常 2000 光学学报 **20** 234]

[20] Zhang C M, He J 2006 *Opt. Express* **14** 12561

[21] Zhang C M, Zhao B C, Xiang L B, Li Y C 2006 *Optik* **117** 265

[22] He J, Zhang C M, Zhang G Q 2007 *Spectroscopy and Spectral Analysis* **27** 423 (in Chinese) [贺 健、张淳民、张庆国 2007 光谱学与光谱分析 **27** 423]

[23] He J, Zhang C M 2005 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **7** 613

[24] Tang Y H, Zhang C M, Liu H C, Chen G D, He J 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4065 (in Chinese) [唐远河、张淳民、刘汉臣、陈光德、贺 健 2005 物理学报 **54** 4065]

[25] Ye J Y, Zhang C M, Zhao B C 2007 *Acta Phys. Sin.* **57** 67 (in Chinese) [叶健勇、张淳民、赵葆常 2007 物理学报 **57** 67]

[26] Wang L, Zhao B C, Xiangli B, Zhang C M 2007 *Acta Photonica Sinica* **36** 1697 (in Chinese) [汪 丽、赵葆常、相里斌、张淳民 2007 光子学报 **36** 1697]

- [27] Zhang C M, Zhao B C, Li Y C, Ye J Y 2007 *Proc. SPIE* (Xian China) **6279** 62791D1 – 8
- [28] Ruan K, Zhang C M, Zhao B C 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 9 [阮凯、张淳民、赵葆常 2008 物理学报 **57** 9]
- [29] Du J, Zhang C M, Zhao B C, Sun Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 10 [杜 鹏、张淳民、赵葆常、孙 尧 2008 物理学报 **57** 10]
- [30] SCHOTT 2007 *Optical Glass Catalog*

A wide field wind image interferometer with chromatic and thermal compensation^{*}

Zhu Hua-Chun Zhang Chun-Min[†] Jian Xiao-Hua

(Key Laboratory of Non-equilibrium Condensed Matter and Quantum Engineering of Ministry of Education,

School of Science, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(Received 19 January 2009; revised manuscript received 13 May 2009)

Abstract

The basic conditions for designing a wide field Michelson interferometer with chromatic and thermal compensation, which is used to measure the upper atmospheric wind field, is briefly described. Comparing with the current method for designing the wide field Michelson interferometer with chromatic and thermal compensation, we present a method uses four media for the compensation of the MI to eliminate the monochromatic thermal aberration. The result shows that, by using this method, the polychromatic thermal aberration is ten to hundred times smaller than the method now in use. The research has important theoretical significance and practical value both for the research and development of the wide field Michelson interferometer with chromatic and thermal compensation for detection of the upper atmospheric wind field.

Keywords: wind image interferometer, thermal compensation, wide field, chromatic compensation

PACC: 0760, 0765

^{*} Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 40537031), the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2006AA12Z152), the National Defense Basic Scientific Research Program of China (Grant No. A1420080187), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 40875013, 40375010, 60278019), the Science and Technology Key Program of Shaanxi Province, China (Grant Nos. 2001K06-G12, 2005K04-G18), and the Second Phase of the "985 Project" of the Electronic Information Platform of Xi'an Jiaotong University, China.

[†] Corresponding author. E-mail: zcm@mail.xjtu.edu.cn