

# 基于镀膜四面角锥棱镜技术的 上层大气风场探测研究\*

唐远河<sup>1,2)†</sup> 张淳民<sup>1)</sup> 刘汉臣<sup>3)</sup> 陈光德<sup>1)</sup> 贺 健<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 西安交通大学理学院, 西安 710049)

<sup>2)</sup> 西安理工大学理学院, 西安 710048)

<sup>3)</sup> 西安工程科技学院理学院, 西安 710048)

(2004 年 11 月 16 日收到, 2005 年 1 月 28 日收到修改稿)

阐述了“镀膜四面角锥棱镜 (coating pyramid prism, CPP)”技术探测上层大气风场的原理, 提出可以在四面角锥棱镜的 4 个面上分别按  $\lambda/4$  ( $\lambda$  波长) 的步进光程差递增镀增透膜, 同时获得一个干涉条纹中的 4 个强度值, 实现上层大气风场的探测模式. 对该模式下的相关参数进行了理论计算并得出结论: 四面角锥棱镜的顶角必须大于  $24^\circ$ 、宽度为 8mm 的对称光束入射到 CPP 顶点能满足 LF7 玻璃上镀  $MgF_2$  增透膜以实现大气风场探测的要求. 按  $9^\circ \times 9^\circ$  干涉仪视场和 CCD  $4.5^\circ \times 4.5^\circ$  视场设计了干涉仪前后的光路, 用 CCD 照相机并调节定标光源 Kr 灯 557.0nm 到所需光束宽度进行了模拟实验, 分别得到顶角为  $60^\circ$  和  $90^\circ$  的两面镀膜棱镜在 CCD 上的两个干涉光斑, 这两个光斑再复制即可获得 CPP 的 4 个干涉光斑, 从而证实了 CPP 技术探测上层大气风场的可行性. 该模式发展了被动探测上层大气风场的光学遥感探测技术.

关键词: 四面角锥棱镜, 镀膜, 上层大气风场, 探测

PACC: 0760, 4278D, 4378H

## 1. 引 言

1991 年 9 月, 由美国 NASA 发射的上层大气研究卫星 (Upper Atmospheric Research Satellite, UARS), 搭载了一台由加拿大和法国合作研制的风成像干涉仪 (Wind Imaging Interferometer, WINDII)<sup>[1]</sup>, 开创了被动探测上层大气 (80—300km) 风场 (风速、温度、压强等物理量) 的先河. 继 WINDII 之后, PAMI (Polarizing Atmospheric Michelson interferometer)<sup>[2]</sup>, SWIFT (Stratospheric Wind Interferometer For Transport studies)<sup>[3]</sup>, ERWIN (E-region wind interferometer)<sup>[4]</sup>, MIMI (Mesospheric Imaging Michelson Interferometer)<sup>[5]</sup>, WAMI (Waves Michelson Interferometer)<sup>[6]</sup> 和 DYNAMO (Dynamics Atmosphere Mars Observer)<sup>[7]</sup> 等大气风场探测仪都使用了广角迈克尔孙干涉仪. WINDII 的探测方法是在广角迈克尔孙干涉仪的一个臂上用压电驱动镜子, 在一个波长范围内先后以  $\lambda/4$  ( $\lambda$  为波长) 步

进移动 4 次, 用阵列 CCD 记录一个干涉条纹的 4 个强度值以实现上层大气风场的探测<sup>[1,8]</sup>.

随着 WINDII 传回地面的数据, 发现不少技术问题: WINDII 中迈克尔孙干涉仪动镜的连续步进, 测量一个干涉条纹的 4 个强度值时, 连续探测的相移很小, 多普勒频移的误差将带来系统误差, 在动镜移动过程中, 快速运动的极光强度的变化将引起干涉条纹发生位移; 系统的抗震性能差. 为克服上述缺陷, 将迈克尔孙干涉仪的动镜改为固定镜子, 并将镜子均匀四等份镀反射膜, 薄膜厚度以  $\lambda/4$  光程差递增<sup>[9,10]</sup>. 基于该技术的 WAMI 将于 2008 年由日本发射的 GCOM 卫星搭载升空<sup>[11,12]</sup>.

如果将迈克尔孙干涉仪的反射镜镀膜, 对多通道的极光或红外辐射探测源而言, 镜子的镀膜厚度有所不同, 况且镀膜镜子在干涉仪内部, 更换不方便. 近年来成像干涉仪的发展, 可以使用非迈克尔孙的成像干涉仪进行大气风场探测. 本文设计使用 Fabry-Pero (F-P) 干涉仪, 在 CCD 探测器之前放置一

\* 国家自然科学基金 (批准号: 40375010, 60278019) 西安理工大学科技创新研究项目资助的课题.

† E-mail: ltp200@sohu.com

个四面角锥棱镜(4个棱面和1个底面),其中一个棱面不镀膜,3个面上依次按 $\lambda/4$ 的光程差递增镀膜,可以同时 CCD 探测器获得一个干涉条纹内的4个强度值,这种探测大气风场的模式能解决多通道的成像干涉仪关于风速矢量的探测问题。

## 2. 上层大气风场探测的基本原理

基于高斯线型极光的上层大气风场探测,其强度与光程差的关系为<sup>[18]</sup>

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

其中 $\Delta$ 为光程差, $\sigma_0$ 是极光谱线的中心波数,干涉谱线的调制度

$$V_G = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \exp(-Q\Delta^2 T) \quad (2)$$

直接决定大气的温度

$$T = -\frac{\ln V_G}{Q\Delta^2}, \quad (3)$$

其中 $Q = 1.82 \times 10^{-12} (M\lambda_0^2) \text{cm}^{-2} \text{K}^{-1}$ 与高斯型谱线有关, $M$ 为原子摩尔质量, $\lambda_0$ 为零风速时的波长。

基于洛伦兹线型极光的上层大气风场探测,我们计算出强度与光程差的关系为

$$I_{(\Delta)} = I_0 [1 + \exp(-2\pi\gamma\Delta) \cdot \cos(2\pi\sigma_0\Delta)]. \quad (4)$$

干涉条纹的调制度为

$$V_L = \exp(-2\pi\gamma\Delta), \quad (5)$$

其中 $\gamma$ 为碰撞展宽的半高宽,它与压强 $P$ 和温度 $T$ 的关系为

$$\gamma = 9.470 \times 10^{18} P \sigma_L^2 \times \sqrt{\frac{2R}{\pi T} \left( \frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \right)}, \quad (6)$$

其中 $\sigma_L$ 是碰撞有效截面, $R$ 为气体普适常数, $M_1$ 和 $M_2$ 为碰撞粒子的摩尔质量.在已知干涉条纹的调制度和气态方程后,由(5)和(6)两式也可以得到温度和压强。

不论是(1)式还是(4)式的极光谱线,要探测视线方向(line-of-sight)上气辉粒子的运动速度即风速,均可用相位差表示干涉强度,即

$$I_{(\theta)} = I_0 [1 + VU \cos(\Phi_w + \theta)], \quad (7)$$

其中 $I_0$ 是未知的平均强度, $U$ 是仪器的调制度因子, $V$ 分别对应 $V_G$ 或 $V_L$ , $\Phi_w$ 是上层大气风速引起的相位差, $\theta$ 是干涉仪和卫星运动引起的位相差.视线方向上的风速与位相差的关系为<sup>[18]</sup>

$$v = \frac{c\lambda_0}{2\pi\Delta} \Phi_w, \quad (8)$$

其中 $c$ 是真空中光速。

由(8)式确定探测上层大气风场的光程差:对 $(^1\text{S})$ 极光,其中心波长 $\lambda_0 = 557.7 \text{nm}$ ,假设探测的风速精度为 $v = 10 \text{m/s}$ ,相位差精度为 $\Phi_w = 1^\circ$ ,则通过(8)式得光程差 $\Delta = 4.64 \text{cm}$ .由(2)和(8)式可见,增大光程差,干涉条纹的调制度下降,而测量风速精度的仪器灵敏度增大,调和这两种矛盾是首选干涉条纹的调制度,同时兼顾可见光波段的其他极光谱线而选取一个合理的光程差.实践中,将光程差 $\Delta$ 分为基准光程差 $\Delta_0$ 和步进光程差 $\Delta'$ ,即

$$\Delta = \Delta_0 + \Delta' (\Delta_0 \gg \Delta'). \quad (9)$$

基准光程差 $\Delta_0$ 来源于后面所讨论的干涉仪和棱镜,步进光程差 $\Delta'$ 来源于角锥棱镜4个面上镀膜的厚度.在(7)式中,当 $\theta$ 取不同的值 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ ,则测量大气风速的相位差为<sup>[9]</sup>

$$\tan \Phi_w = \frac{\frac{C_{12}}{S_{12}} - \frac{C_{23}}{S_{23}}}{\frac{C_{34}}{S_{34}} - \frac{C_{23}}{S_{23}}} \cdot \frac{\frac{I_2 - I_3}{C_{23}} - \frac{I_3 - I_4}{C_{34}}}{\frac{I_1 - I_2}{S_{12}} - \frac{I_2 - I_3}{S_{23}}}, \quad (10)$$

其中

$$\begin{aligned} C_{12} &= U_1 \cos \theta_1 - U_2 \cos \theta_2, \\ C_{23} &= U_2 \cos \theta_2 - U_3 \cos \theta_3, \\ C_{34} &= U_3 \cos \theta_3 - U_4 \cos \theta_4, \\ S_{12} &= U_1 \sin \theta_1 - U_2 \sin \theta_2, \\ S_{23} &= U_2 \sin \theta_2 - U_3 \sin \theta_3, \\ S_{34} &= U_3 \sin \theta_3 - U_4 \sin \theta_4. \end{aligned} \quad (11)$$

(10)式中的 $C$ 和 $S$ 由实验开始前的定标数值所确定,因为 $U_1, \dots, U_4$ 是与 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ 对应仪器的4个调制度因子,由于步进光程差有细微的差别,4个调制度因子一般不同,但通过改进镀膜技术,可以获得相同的仪器调制度值 $U_1 = U_2 = U_3 = U_4 = U$ . $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ 决定于从起始点取样的位置,一般能精确控制,最简单方法是,当取 $\theta_1 = 0, \theta_2 = \frac{\pi}{2}, \theta_3 = \pi, \theta_4 = \frac{3\pi}{2}$ 时,相应得到一个波长范围内的4个干涉强度值 $I_1, I_2, I_3, I_4$ ,则(7)式中的 $I_0, VU, \Phi_w$ 可由这4个强度值得到

$$I_0 = (I_1 + I_3)/2 = (I_2 + I_4)/2, \quad (12)$$

$$VU = \sqrt{(I_1 - I_3)^2 + (I_4 - I_2)^2} / 2I_0, \quad (13)$$

$$\tan \Phi_w = \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}. \quad (14)$$

仪器的调制度  $U$  由定标获得, 由(13)式获得调制度  $V$  后, 再由(3)式得大气温度, 联合(14)和(8)式获得视线方向上的风速, 这就是用所谓的“4 强度法”探测上层大气风场的原理。

### 3. 四面角锥棱镜镀膜技术实现风场的探测

图 1 所示为四面角锥棱镜 (pyramid prism, PP) 及其在 CCD 上的成像图。假设棱镜的四个棱面大小相等, 形状一致, 过四面角锥棱镜顶点的光轴与 CCD 面垂直。有一定宽度的平行于光轴的相干光对称地从四面角锥棱镜的顶点  $O$  进入  $OCB, OCD, ODA, OBA$  四个面, 而从底面  $ABCD$  有一定的偏折地射出, 再分别汇聚到 CCD 的 I, II, III 和 IV 区域, 则在 CCD 上就获得 4 束光的像。如果在 PP 的面上分别按  $\lambda/4$  的光程差递增镀膜, 则可以在阵列 CCD 上同时接收到一个干涉条纹的 4 个干涉强度值, 实现“4 强度法”测量上层大气风场。在四面角锥棱镜上永久镀膜的精度和坚固性依赖于镀膜过程, 通过控制镀膜方式可以实现(11)式中各仪器调制度因子, 让  $U_1 = U_2 = U_3 = U_4 = U$ 。下面就镀膜四面角锥棱镜 (CPP) 技术探测上层大气风场进行细致研究。

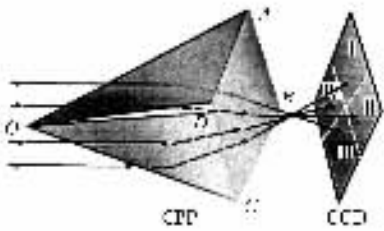


图 1 镀膜四面角锥棱镜 (CPP) 及 CCD 探测器

#### 3.1. 棱镜产生光程差

平行光对称地进入四面角锥棱镜的各面, 如图 2 所示, 假设宽度为  $r$  的入射光, 在  $EF$  线之前和  $MN$  之后光程相同, 通过棱镜内部的光程差  $\Delta_p$  来源于  $FM$  和  $EN$  之间, 则  $\Delta_p$  为

$$\Delta_p = Rn_g \tan \phi - R \sin \phi, \quad (15)$$

其中  $R$  是出射光线的宽度,  $\phi$  是光线的偏折角,  $n_g$  是棱镜玻璃的折射率,  $R$  和  $\phi$  将在后面相继给出。通过棱镜的 4 个面, 只要光线以相同的入射角 ( $i = \frac{\pi}{2} - \alpha$ ) 进入棱镜表面, 则光程差  $\Delta_p$  相同。图 2

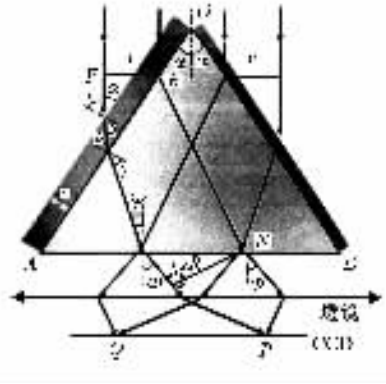


图 2 CPP 及光线的偏折

中  $\alpha$  是入射角的补角,  $2\alpha$  是棱镜的顶角。

#### 3.2. CPP 面上增透膜的厚度

(7) 式中, 如果  $\theta_1 = 0, \theta_2 = \frac{\pi}{2}, \theta_3 = \pi, \theta_4 = \frac{3\pi}{2}$ , 则各面引起  $\lambda/4$  递增的步进光程差。让角锥棱镜的 4 个面均匀镀膜来实现步进光程差。某个面镀膜后, 薄膜所产生的步进光程差为

$$\Delta' = 2e \sqrt{n_c^2 - \sin^2 i}, \quad (16)$$

其中  $e$  是增透膜厚度,  $n_c$  是薄膜折射率,  $i$  是入射角。当  $\Delta' = 0, \frac{\lambda_0}{4}, \frac{2\lambda_0}{4}, \frac{3\lambda_0}{4}$  时, 薄膜厚度为

$$e = \lambda_0 m / 8 \sqrt{n_c^2 - \sin^2 i} \quad (m = 0, 1, 2, 3). \quad (17)$$

(17) 式表明, 四面角锥棱镜面上镀膜的厚度是极光波长、薄膜折射率和入射角的函数。入射角越大, 镀膜厚度也越大。选用探测上层大气风场常用的 2 条可见光波段的极光 ( $O(^1S)557.7\text{nm}$  和  $O(^1D)630.0\text{nm}$ ), 计算出相应 CPP 上的增透膜厚度, 如表 1 所示, 其中入射角分别为  $45^\circ$  和  $60^\circ$ , 增透膜折射率取 1.38。

表 1 CPP 对不同极光谱线的镀膜厚度 (nm) ( $n_c = 1.38$ )

极光波长 (nm)	$i = 45^\circ (\alpha = 45^\circ)$		$i = 60^\circ (\alpha = 30^\circ)$	
$O(^1S)557.7$	58.83	117.66	176.50	62.35
$O(^1D)630.0$	66.45	132.90	199.35	70.44
				124.71
				187.07
				140.88
				211.32

#### 3.3. 增透膜的选择

当光从空气射入玻璃界面时, 由菲涅耳公式得知在介质表面将有近 4% 的反射。为避免反射损失, 当所镀薄膜的折射率满足

$$n = \sqrt{n_a n_g} \quad (18)$$

增透条件时,光线在薄膜上表面的反射率为零,透射达到最大值,其中  $n_a$  和  $n_g$  是薄膜上下界面材料的折射率.当极光从空气进入 LF7 玻璃上的薄膜时,则  $n_a = 1$ ,  $n_g(\text{LF7}) = 1.56$ ,则薄膜折射率  $n = 1.25$  时增透效果最好,但是目前找不到一种透明介质其折射率正好是 1.25,既稳定又能牢牢附着在 LF7 玻璃上,因此选用  $\text{MgF}_2$  作增透膜, $\text{MgF}_2$  的折射率  $n = 1.38$  略高于反射光干涉相消所要求的折射率.涂层使用  $\text{MgF}_2$  后,对波长为 557.7 nm 的极光降低了反射率,单面反射光的强度仅占入射光强度的 1.4%,即 98.6% 的光线透过四面角锥棱镜的各面.

### 3.4. CPP 对光线的偏折

由于干涉仪视场的要求,来自干涉仪完全混合的相干光,经棱镜顶点进入四面角锥棱镜的 4 个面有一定的宽度,在 CCD 上相应的探测区域内某条光线所成的像就有一定范围,亦即入射到四面角锥棱镜上,光线的入射角变化范围直接决定着四面角锥棱镜的光束大小,也决定着 CCD 探测器上光斑的范围,为此将图 1 中的棱镜面  $OAD$  隔离出来,探讨入射光线的偏折.

不考虑增透膜导致入射光的横向位移,光线从空气进入四面角锥棱镜某面的薄膜后再进入玻璃的偏折如图 2 所示.假设宽度为  $r$  的平行于光轴的光束进入棱镜的某个面,入射角  $i = 90^\circ - \alpha$ ,则从 CPP 的出射光线与入射光线之间的偏折角为

$$\phi = \arcsin[\cos\alpha(\sqrt{n_g^2 - \cos^2\alpha} - \sin\alpha)], \quad (19)$$

其中  $n_g = 1.56$  (LF7),  $\alpha$  是棱镜的半顶角.出射光线的宽度  $R$  为

$$R = r \frac{\cos\beta \cos\phi}{\sin\alpha \cos(\alpha + \beta)}, \quad (20)$$

其中  $r$  是对称入射到 CPP 顶点上的光束半径,  $\beta$  是从空气到薄膜的折射角.由(19)式决定的出射光线经透镜汇聚进入 CCD 探测器,光线发生了偏折,而且 CPP 将较窄的入射光线改变方向后,聚焦在 CCD 上某位置就形成干涉斑点,这些干涉斑点分得较开,有利于成像和检测数据的提取.

从(19)式可见,一束平行光对称地入射到 CPP 上其偏折角相同,如图 2 所示.(19)式确定的偏折角  $\phi$  随棱镜的半顶角  $\alpha$  的关系曲线如图 3 所示.例如,对  $n_g = 1.56$  的 LF7 玻璃棱镜顶角为  $60^\circ$  ( $\alpha = 30^\circ$ ),则光线偏折  $43.7^\circ$ .棱镜顶角为  $90^\circ$  ( $\alpha = 45^\circ$ ),则光线

偏折  $28.9^\circ$ .  $\alpha$  增大时,  $\phi$  则变小,但  $\alpha$  有最小极限,对 LF7,  $\alpha > 12^\circ$ .四面角锥镀膜棱镜的顶角必须大于  $24^\circ$ .因此 CPP 的顶角不宜太窄,需要选择一个合理的棱镜顶角来匹配干涉仪的视场角和 CCD 的面积.由于 CPP 的光线分开在 CCD 上的不同位置,因此在 CCD 上就可以同时测量一个干涉条纹的 4 个光斑图像,从 4 个光斑图像强度的变化就可以获得条纹的调制度,由 4 个干涉强度值再通过(14)和(8)式就能探测到上层大气的视线方向上的风速.

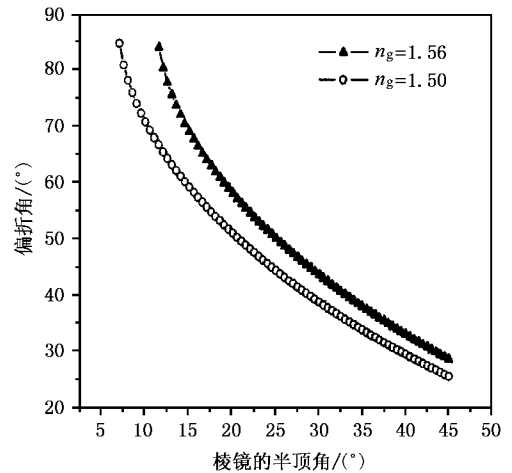


图 3 CPP 的偏折角与棱镜半顶角的关系曲线

## 4. 光路设计与模拟实验

在实验室模拟上层大气风场的探测, F-P 干涉仪前后的光学元件如图 4 所示,从干涉仪出来的完全混合的平行于光轴的极光入射到 CPP 的顶点上,当入瞳(通过滤镜)进入 F-P 干涉仪,望远镜将光束扩展到干涉仪  $9^\circ \times 9^\circ$  的视场,透镜 1 和 CPP 再将视场从  $9^\circ \times 9^\circ$  变到 CCD 探测器的  $4.5^\circ \times 4.5^\circ$ .

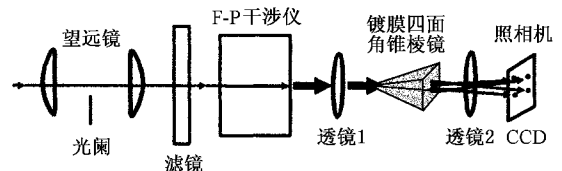


图 4 干涉仪前后的光学元件

### 4.1. 基准光程差的分配

使用 F-P 干涉仪探测上层大气风场, F-P 干涉仪产生的光程差为

$$\Delta_F = 2nh \cos i_F, \quad (21)$$

其中  $n$  是 F-P 板内的折射率,一般为空气,  $h$  是 F-P 板间距离,  $i_F$  是光线斜入射到 F-P 板上的入射角。

图 4 中,由 F-P 干涉仪出来的光线再进入 CPP 的某个面后,让(21)式决定的 F-P 干涉仪光程差加上(15)式决定的棱镜光程差成为(9)式中的基准光程差

$$\Delta_0 = \Delta_F + \Delta_P = 2nh \cos i_F + R n_g \tan \phi - R \sin \phi. \quad (22)$$

分配  $\Delta_0 = 4.64\text{cm}$  的基准光程差:如果  $557.7\text{nm}$  极光垂直入射 ( $i_F = 0^\circ$ ) 到空气 F-P 干涉仪内,取  $h = 2.00\text{cm}$ ,则由(21)式得  $\Delta_F = 4.00\text{cm}$ ,相应地  $\Delta_P = 0.64\text{cm}$ .让直角 ( $\alpha = 45^\circ$ ) 四面角锥棱镜实现  $\Delta_P = 0.64\text{cm}$  的光程差.将(19)式的偏折角  $\phi$  和(20)式的光束宽度  $R$  代入(15)式,得到入射到 CPP 顶点的光线半径宽度与棱镜光程差之间的关系为

$$r = \Delta_P \frac{\sin \alpha \cos(\alpha + \beta)}{\cos \beta \cos \phi (n_g \tan \phi - \sin \phi)}. \quad (23)$$

当  $\alpha = 45^\circ$  时,则  $\phi = 29.1^\circ$ ,  $\beta = 30.82^\circ$ ,  $\Delta_P = 0.64\text{cm}$ ,将这些数据代入(23)式,得  $r = 3.843\text{mm}$ ,则光斑直径为  $7.68\text{mm}$ ;对  $9^\circ \times 9^\circ$  的视场角,入射角  $i_F = 4.5^\circ$ ,则得干涉仪光程差  $3.99\text{cm}$ ,棱镜光程差  $0.65\text{cm}$ ,入射到直角 CPP 顶点处的平行光线的半径

为  $3.903\text{mm}$ ,如表 2 所示.所以只要光束以直径  $8\text{mm}$  对称入射到 CPP 顶点,通过 CPP 就能实现  $9^\circ \times 9^\circ$  视场的上层大气风场探测。

表 2 入射到 CPP 上光束宽度(极光波长  $557.7\text{nm}$ ,  $\Delta_0 = 4.64\text{cm}$ )

F-P 干涉仪 ( $h = 2.00\text{cm}$ )		四面角锥棱镜 ( $\alpha = 45^\circ$ )	
入射角 ( $i_F$ ) ( $^\circ$ )	干涉仪光程差 $\Delta_F/\text{cm}$	棱镜光程差 $\Delta_P/\text{cm}$	光束半径 $r/\text{mm}$
0	4.00	0.64	3.843
4.5	3.99	0.65	3.903

## 4.2. 模拟实验结果

我们使用 MINTRON MTV-1802CB  $768 \times 576$  CCD 照相机,其单个像素面积  $8.3\mu\text{m} \times 8.3\mu\text{m}$ ,Kr 灯  $557.0\text{nm}$  光源和两面镀膜棱镜模拟了 CPP 实验,棱镜顶角分别为  $60^\circ$  和  $90^\circ$ ,对称光线的偏折和在 CCD 上的干涉图像光斑的模拟结果如图 5 所示. $60^\circ$  顶角棱镜的两光斑间的距离比  $90^\circ$  顶角棱镜间的距离大,验证了(19)式.两图中间较弱的光线是由棱镜顶点直接来的光线投影.CPP 在 CCD 上所成的 4 个干涉光斑应是图 5 所示两个光斑的再复制,这样就证实了可以通过“四强度法”实现上层大气风场的探测。

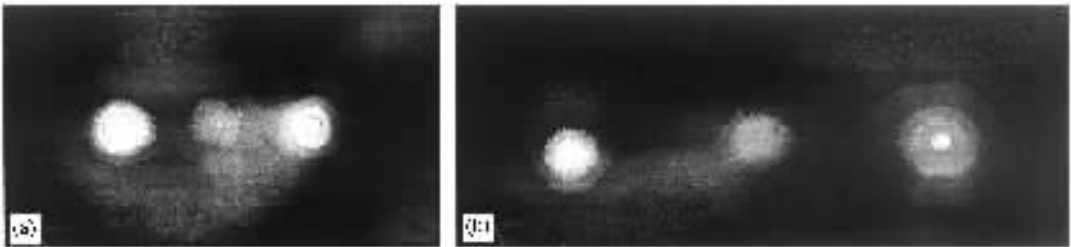


图 5 两面镀膜棱镜的光斑位置及与棱镜顶角大小的比较 (a)  $90^\circ$  棱镜顶角 (b)  $60^\circ$  棱镜顶角

CPP 探测上层大气风场技术中,如果从干涉仪出来的光线偏离光轴,进入 CPP 顶点的光线有可能仅入射到 CPP 的某个面上,不进入其他 3 个面,更谈不上发生相干进行“四强度法”探测了.也有可能光线照射到某个 CPP 面上的光线多,其他面上的光线少,将导致 CCD 上获得的光强有差异.实际中仔细准直入射到 CPP 顶点处的光线,对非对称光线进入 CPP 顶点偏离光轴的极限将继续研究。

## 5. 结论与讨论

本文提出用 CPP 技术实现上层大气风场探测

的原理和模式.计算了对称光线入射到四面角锥棱镜顶点后,出射光线的偏折角度,得出四面角锥棱镜顶角必须大于  $24^\circ$  的结论,计算了与上层大气极光谱线对应的四面角锥棱镜(LF7 玻璃)的各面上以四分之一波长递增地附着  $\text{MgF}_2$  增透膜镀的厚度,以实现风场探测的步进光程差,并计算了通过干涉仪和四面角锥棱镜某个面所产生的基准光程差等基本参量。

本文设计出使用 F-P 干涉仪前后的光学系统,对  $9^\circ \times 9^\circ$  干涉仪视场和  $\text{CCD} 4.5^\circ \times 4.5^\circ$  探测视场,给出了入射到镀膜直角四面角锥棱镜顶点的对称光束小于  $8\text{mm}$  的宽度。

在实验室使用了两个顶角分别为  $60^\circ$  和  $90^\circ$  的两面镀膜棱镜进行了模拟实验,使用  $768 \times 576$  像素 MINTRON MTV-1802CB CCD 照相机,将 Kr 557.0nm 定标灯的宽度调到所需的 8mm 光束直径,分别获得了两个干涉斑点, CPP 的探测结果应该是这两个光斑的再复制.

基于 CPP 技术探测上层大气风场的模式是对国际上光学遥感被动探测上层大气风场的进一步完善和发展.探测地球上层大气的温度、风速和压力,

为大气物理、地球物理、航天器的发射与运行,中长期天气预报提供大量的资料、图像和数据,为宇宙大爆炸理论、宇宙的起源、演化和归宿提供可能的依据.由该技术支撑的实际上层大气风场探测,必须在实验室完成多普勒频移的模拟才能实现气辉粒子运动发光的真正探测,可以用声光调制器和旋转盘产生多普勒频移,这些工作正在实验室定标,并同时确定 CPP 的相关参数.

- 
- [ 1 ] Shepherd G G ,Thullier G , Gault W A *et al* 1993 *Geophys. Res.* **98** 10725
- [ 2 ] Bird J C ,Liang F C , Solheim B H 1995 *Meas. Sci. Technol.* **6** 1368
- [ 3 ] Gault W ,McDade I C ,Rochon Y *et al* 2003 *Proceedings SPIE* **4881** 60
- [ 4 ] Gault W A ,Brown S , Moise A 1996 *Appl. Opt.* **35** 2913
- [ 5 ] Gault W A ,Ward W E , Shepherd G G *et al* 1999 *IEEE* 1612
- [ 6 ] Rochon Y J ,Rahnama P , McDade I C 2004 *Proceedings SPIE* ( Bellingham , WA ) **5234** 335
- [ 7 ] Ward W E ,Gault W A , Rowlands N *et al* 2002 *Proceedings SPIE* **4833** 226
- [ 8 ] Zhang C M ,Wang W , Xiang L B 2000 *Acta Optica Sinica* **20** 234 ( in Chinese ) 张淳民、王 炜、相里斌等 2000 光学学报 **20** 234 ]
- [ 9 ] Gault W A , Sargoytchev S and Shepherd G G 1996 *Proceedings of the SPIE International Symposium on Optical Science , Engineering , and Instrumentation* , 2830 , Denver , 4 - 9 August
- [ 10 ] Gault W , Sargoytchev S , Brown S. 2001 *Proceedings SPIE* **4306** 266
- [ 11 ] Shimoda H ,GCOM Mission Concept 2003 *Proceedings SPIE* **4881** 52
- [ 12 ] Xiang J Y , Wu Z , Zheng S Q *et al* 1999 *Acta Phys. Sin.* **48** 1831 ( in Chinese ) 向际鹰、吴 震、曾绍群等 1999 物理学报 **48** 1831 ]

# Study of the technique of 4-face coated pyramid prism for measurement of upper atmospheric wind field<sup>\*</sup>

Tang Yuan-He<sup>1,2)†</sup> Zhang Chun-Min<sup>1)</sup> Liu Han-Chen<sup>3)</sup> Chen Guang-De<sup>1)</sup> He Jian<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> School of Science, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

<sup>2)</sup> School of Science, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

<sup>3)</sup> School of Science, Xi'an University of Engineer Science and Technology, Xi'an 710048, China)

(Received 16 November 2004; revised manuscript received 28 January 2005)

## Abstract

The principle of measurement of upper atmospheric wind field has been described first by using the technique of 4-face coated pyramid prism (CPP). If the anti-refraction films is coated by  $\lambda/4$  ( $\lambda$  wavelength) stepped optical path difference (OPD), there can be obtained 4 interference intensities for one fringe simultaneously to measure the upper atmospheric wind field. After correlative parameters of CPP technique are calculated, the CPP's vertex angle must be larger than 24 degree and the width of symmetric incident beam to CPP vertex may be less than 8mm by LF7 prism and  $MgF_2$  anti-refraction films, so that it can be used to detect the upper atmospheric wind for  $9^\circ \times 9^\circ$  interferometer's field of view (FOV) and CCD  $4.5^\circ \times 4.5^\circ$ . Finally, we made a simulation test for 2-face coated prism, two group of speckle patterns of deflection light and intensities on CCD have been obtained for prism vertex angle  $60^\circ$  and  $90^\circ$ . By copying the two-speckle patterns to obtain CPP's four ones, it can achieve "four intensities way" for upper atmospheric wind field measurement. The test result is made sure of this way to measure the atmospheric wind. This way has developed the technique of passive measurement of wind field.

**Keywords:** four-face pyramid prism (CPP), coating, upper atmospheric wind field, measurement

**PACC:** 0760, 4278D, 4378H

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 40375010, 60278019), and the Xi'an University of Technology Innovation Foundation.

<sup>†</sup> E-mail: ltp200@sohu.com