# 反射式转镜干涉光谱仪光程差计算

魏儒义<sup>1,2,3</sup> 张学敏<sup>2,3</sup> 周锦松<sup>4\*</sup> 周泗忠<sup>2</sup> 高晓惠<sup>1,2,3</sup> 卫俊霞<sup>1,2,3</sup> 王 乐<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院光谱成像技术重点实验室,陕西西安 710119)

<sup>2</sup>中国科学院西安光学精密机械研究所,陕西西安 710119

<sup>3</sup>中国科学院研究生院,北京 100049

4中国科学院光电研究院,北京 100190

**摘要** 高分辨率反射式转镜干涉光谱仪是一种新型傅里叶变换光谱仪,它利用倾斜旋转镜的转动产生非线性的光 程差(OPD)。光程差的研究对于干涉光谱仪的性能指标分析、设计和研制具有重要意义。在介绍反射式转镜干涉 光谱仪的原理基础上,描述了利用基于马吕斯定律的光线追迹法和基于镜面成像原理的像点法分析其光程差的方 法。利用光线追迹法导出了任意时刻光程差的表达式,分析了影响光程差的因素和影响最大光程差的因素及其权 重。像点法直接利用计算机仿真计算,是一种新的分析光程差的方法。计算结果表明,光程差与主、次转镜中心之 间的空间距离、转镜倾斜角以及光线入射角密切相关;同时,用这两种方法计算光程差行之有效且结果一致。 关键词 光谱仪;光程差;光线追迹;像点;转镜;傅里叶变换

中图分类号 TH744.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0730001

## Calculations on Optical Path Difference of a High Resolution Reflecting Scanning Fourier Transform Spectrometry

Wei Ruyi<sup>1,2,3</sup> Zhang Xuemin<sup>2,3</sup> Zhou Jinsong<sup>4</sup> Zhou Sizhong<sup>2</sup> Gao Xiaohui<sup>1,2,3</sup> Wei Junxia<sup>1,2,3</sup> Wang Le<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Spectral Imaging Technology, Xi'an, Shaanxi 710119, China

<sup>2</sup>Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China

<sup>3</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

<sup>4</sup> Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

**Abstract** A new high resolution reflecting scanning Fourier transform spectrometry produces nonlinear optical path difference (OPD) by rotating two tilted plane mirrors. OPD plays an important role in evaluating the performance and parameters and designing the spectrometry. Based on analyzing the principle of this reflecting scanning Fourier transform spectrometry, we adopt two methods to study OPD. One method is conventional tracing rays method by tracing rays following the Malus law, the other is novel point-image method by using mirror imaging principle and computer simulation to calculate OPD. The general expression of OPD with time change is deduced by the tracing rays method, and factors associated with the change of OPD are pointed out. Factors and their weights on the maximum OPD are also discussed. The calculation results demonstrate that OPD is closely related to the spatial distance between the primary rotating mirror (PRM) and secondary rotating mirror (SRM), the tilted angle between rotating mirrors' plane and the plane perpendicular to rotational axis, and the incident angle between incident beam split from beam splitter and the rotational axis. Also, it is proved that the tracing rays method and point-image method are both feasible and efficient; and the simulation curves of them agree with each other.

Key words spectrometry; optical path difference; tracing ray; point image; rotating mirror; Fourier transform OCIS codes 300.6190; 300.6300; 300.6530

收稿日期: 2010-12-13; 收到修改稿日期: 2011-03-07

基金项目:国家自然科学基金(40805013)资助课题。

作者简介:魏儒义(1982-),男,硕士,助理研究员,主要从事红外干涉光谱技术等方面的研究。

E-mail: ruyiwei@opt.ac.cn

<sup>\*</sup> 通信联系人。E-mail: jszhou@opt.ac.cn

## 1 引 言

与传统色散型光谱技术相比,基于时间调制的 干涉光谱技术具有多通道(Felleget 优点)、高通量 (Jacquinot 优点)、波数准确度高(Connes 优点)及 杂散光低等优点<sup>[1,2]</sup>。它扩展了红外光谱研究领 域,近几十年来受到世界各国的广泛关注并得到了 快速发展,在工农业生产、科学研究、环境监测、航空 航天遥感等领域有着广泛的应用。传统时间调制干 涉光谱(成像)仪的研究方案大多基于迈克耳孙干涉 仪,它的突出优点是灵敏度高,可依靠动镜移动产生 大光程差,进而实现高光谱分辨率的探测;它的主要 难点是高稳定性的动镜驱动系统。自 Wadsworth 等[3,4]于 20 世纪 90 年代提出透射转镜式干涉光谱 技术以来,基于旋转镜的时间调制型干涉光谱技术 成为一种新的研究方向。1999 年 Griffiths 等<sup>[5]</sup>提 出的反射式高速转镜干涉光谱技术方案,继承了透 射式转镜稳定性好、测量速度快等突出优点,克服了 它对光学材料要求高、光能损耗大、时间利用率低等 缺陷[6]。

国内诸多学者对透射式和反射式的转镜干涉光 谱技术做过研究<sup>[6~9]</sup>。在深入分析反射式转镜干涉 光谱仪的原理和结构后提出了一种高光谱分辨率反 射式转镜干涉光谱仪方案,并重点定性分析了影响 光程差的主要因素<sup>[10]</sup>。光程差的研究对于干涉光 谱仪的设计和性能指标分析具有重要意义,本文将 采用像点法和光线追迹法分别对高分辨率反射式转 镜干涉光谱仪的光程差及其计算表达式进行研究, 并分析影响光程差的因素。

#### 2 原理介绍

Griffiths 等<sup>[5]</sup>在 1999 年提出反射式高速转镜 红外干涉光谱仪原理,其主要特点是在干涉仪的动 镜部分采用了一个立方反射镜巧妙地将光束反射回 到倾斜的旋转镜(以下简称转镜)上,最终使得这一 路光束按照原路返回,从而产生干涉。这种反射式 转镜光谱仪结构依靠倾斜旋转镜的旋转产生光程 差,在快速测量上占有明显优势,其转镜转速高达 1000 r/s,时间利用率几乎达100%。它的光程差与 光线入射角、旋转反射镜的倾角和角反射体的空间 位置等多个参数均有关系。在该技术中,理论上可 以通过增大干涉仪的体积来改变光程,并增大光程 差,从而获得高光谱分辨率。虽然立方反射镜在控 制其自身引起的光束偏差和光程误差方面很有优 势<sup>[11]</sup>,但是仪器的体积和光程的增大会给结构设计和光学设计带来困难。

文献[10]提出一种新的反射式转镜干涉光谱仪 设计方案,继承了前述方案在高速旋转和反射式结 构等方面的主要优点,采用双平面镜(主转镜和次转 镜)为动镜,其结构如图1所示,取消了立方反射镜, 用一块倾斜旋转平面反射镜(SRM) 替换了原有的 立方反射镜,这块平面镜与倾斜旋转平面反射镜 (PRM)始终保持平行且在运行时保持其间距不变; 同时用另一块固定平面镜 SM2 反射,使光束原路返 回。目标辐射经前置光学系统(CS)准直后入射到 分束器(BS)上,被分为反射光束和透射光束,其中 反射光束到达由主转镜 PRM、次转镜 SRM 和固定 平面镜 SM2 组成的动臂光路后,被固定平面镜 SM2 反射而原路返回到分束器;而透射光束经固定 反射镜 SM1 沿原光路返回到分束器。前者的透射 部分和后者的反射部分发生干涉,经会聚后被探测 器接收。电机带动两倾斜反射镜产生旋转从而使两 東光产生变化的光程差,不同光程差的干涉信号经 探测器接收得到随时间变化的干涉谱,经数据反演 后最终得到目标的光谱信息。





Fig. 1 Schematic diagram of high resolution reflecting scanning Fourier transform spectrometry

探测器接收的干涉光强随反射转镜的转动而变 化,探测器采集到的是按时间调制的干涉谱,其数学 表达式为

$$I(x) = \int_{v_1}^{v_2} B(v) \exp(i2\pi v x) dv, \qquad (1)$$

式中 *I*(*x*) 是干涉强度随时间的分布,*B*(*v*) 是入射 光谱分布,*v* 代表波数,复原光谱由干涉谱的逆傅里 叶变换得到,其光谱分辨率由最大光程差决定。

$$B(v) = \int_{-L}^{+L} I(x) \exp(-i2\pi v x) dx, \qquad (2)$$

$$\delta v = \frac{1}{2L},\tag{3}$$

式中x为光程差增量, $\delta v$ 为光谱分辨率,L为最大光程差。

### 3 光程差分析计算

转镜式干涉光谱仪的光程差计算比传统迈克耳 孙干涉仪复杂得多,不再是简单的两倍关系。在转 镜匀速转动的过程中,光程是随时间周期变化的,产 生了非线性的光程差。本文利用光线追迹法和像点 法两种不同的方法来进行对比计算分析。

#### 3.1 光线追迹法

根据马吕斯定律<sup>[12]</sup>,寻找平行光路中的特殊光线,以方便地求出光程,进而求出光程差。

如图 2 所示,定义主转镜 PRM 镜面上绕电机 转轴转动的中心 O1 为坐标系原点,电机转轴中心线 为 x 轴并指向次转镜的方向, 入射到主转镜光束中 的主光线与 x 轴所在平面为 xO<sub>1</sub> y 平面,并以此建立 空间直角坐标系  $O_1 - x_{VZ}$ 。设  $O_1$  和  $O_2$  之间的距离为 D,主次转镜的转动角速度皆为 w,旋转镜的倾角为 γ, 入射到主转镜的主光线与 x 轴所成的角为光线入 射角 β,主转镜的法向量记为 N<sub>1</sub>。由马吕斯定律可 知,在入射平行光束中任意截取一波面,在反射平行 光中任意截取另一波面,这两个波面间的任意光线 的光程相等。以主转镜的旋转中心 O1 作为入射光束 等波面的参考点,以次转镜的旋转中心 O2 作为出射 光束等波面的参考点来计算光线的光程。用几何光 学的知识可以证明,在主次镜绕转轴旋转的过程中, 光程的变化仅产生于过参考点 O1 和 O1 的等波面之 间的光程。从而可假设过Oi点存在一条平行主光线 的入射光线  $R_i(-\cos\beta,\sin\beta,0)$ 。则在主转镜绕 x 轴



图 2 光线追迹法分析光程差的原理图 Fig. 2 Principle of analyzing OPD by tracing rays method

旋转的过程中,主转镜的法向量形成了顶角为 2 $\gamma$ 的 立体角,记为  $\Omega_{2\gamma}$ ;反射光束则形成了顶角为 4 $\gamma$ 的立 体角,记为  $\Omega_{4\gamma}$ 。从过参考点  $O_1$ 的入射等波面到过参 考点  $O_2$ 的出射等波面的光程为

 $L = 2 |O_1 H| = 2 |O_1 O_2| \cos \angle O_2 O_1 H, \quad (4)$ 即

$$L = 2 |O_1 O_2| \cos \angle O_2 O_1 H =$$

$$2|O_1O_2|\frac{O_1O_2 \cdot O_1P}{|O_1O_2||O_1P|} = 2\frac{O_1O_2 \cdot O_1P}{|O_1P|}.$$
 (5)

又 $O_1P$ 为过 $O_1$ 的入射光线关于法向量 $N_1$ 的反射光线,根据反射公式

$$\begin{bmatrix} n_{rx} \\ n_{ry} \\ n_{rz} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{N} \begin{bmatrix} n_{ix} \\ n_{iy} \\ n_{iz} \end{bmatrix},$$
  
$$\mathbb{H} \mathbf{R}_{N} = \begin{bmatrix} 1 - 2N_{x}^{2} & -2N_{x}N_{y} & -2N_{x}N_{z} \\ -2N_{x}N_{y} & 1 - 2N_{y}^{2} & -2N_{y}N_{z} \\ -2N_{x}N_{z} & -2N_{y}N_{z} & 1 - 2N_{z}^{2} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中 $R_N$ 为反射系数,是关于反射面的单位法向量  $N(N_x, N_y, N_z)$ 的单位矩阵, $\hat{n}_i(n_{ix}, n_{iy}, n_{iz})$ 为入射 光线单位向量, $\hat{n}_r(n_{rx}, n_{ry}, n_{rz})$ 为所求反射光线单位 向量。则

$$\boldsymbol{O}_{1}\boldsymbol{P} = \boldsymbol{R}_{N_{1}} \begin{bmatrix} R_{ix} & R_{iy} & R_{iz} \end{bmatrix}' =$$

 $\mathbf{R}_{N_{1}}[-\cos\beta \sin\beta 0]', \quad (7)$ 式中  $\mathbf{R}_{N_{1}}$ 为关于法向量  $N_{1}(N_{1x}, N_{1y}, N_{1z})$ 的反射系 数矩阵,转镜随时间 t 在转动过程中的转角设为  $\alpha$ , 则  $\alpha = xt$ 。在转镜旋转过程中

$$\begin{bmatrix} N_{1x} \\ N_{1y} \\ N_{1z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma \\ \sin \gamma \cos \alpha \\ \sin \gamma \sin \alpha \end{bmatrix}, \quad (8)$$

产生的光程化简得

$$L(\alpha) = 2 \frac{\boldsymbol{O}_1 \boldsymbol{O}_2 \cdot \boldsymbol{O}_1 \boldsymbol{P}}{|\boldsymbol{O}_1 \boldsymbol{P}|} =$$

 $2D\cos(2\gamma)\cos\beta - 2D\sin(2\gamma)\sin\beta\cos(\alpha)$ . (9) 若以  $t_0 = 0$  时刻的光程为零光程差,而仪器在

任意时刻 t 产生的光程差为

 $D_{\rm OP}(\alpha = wt) = 2D\sin(2\gamma)\sin\beta(1 - \cos\alpha),$ (10)

主次转镜在旋转过程中产生的最大光程差为

 $D_{\text{OPmax}} = L_{\text{max}} - L_{\text{min}} = 4D\sin(2\gamma)\sin\beta.$  (11) 由(10)式可知:

 1)反射式转镜干涉光谱仪的光程差与主次转 镜中心之间的空间距离 D、转镜倾斜角 γ 以及光线 入射角 β 密切相关。

2) 函数  $D_{OP} = f(\alpha = \omega t)$  的周期为  $2\pi$ 。

3) 当  $\gamma = 0$  时, $D_{OP} = 0$ ,即倾斜旋转反射镜在 没有倾斜时不产生光程差。

4) 函数  $D_{OP} = f(\alpha = \omega t)$  在周期[0,2 $\pi$ ]内有 3 个极值,说明转镜每旋转一周将能完成两次最大值 与最小值之间的变换,也就是说,转镜每旋转一周能 获得两幅干涉图。

由(11)式可见,仪器最大光程差同样与转镜中 心之间的距离 D、转镜倾斜角γ以及光线入射角β密 切相关,而与转镜的转速、光束入射到主转镜的位置 无关。最大光程差的增量 ΔD<sub>OPmax</sub> 可表示为

 $\Delta D_{\rm OPmax} = 4\sin(2\gamma)\sin\beta \cdot \Delta D +$ 

 $4D\sin(2\gamma)\cos\beta \cdot \Delta\beta + 8D\sin\beta\cos(2\gamma) \cdot \Delta\gamma.$  (12) -般来讲, β ∈ [30°,60°], γ ∈ [0°,10°], D 在几

十到几百毫米,所以

 $8D\sin\beta\cos(2\gamma) > 4D\sin(2\gamma)\cos\beta >$ 

 $4\sin(2\gamma)\sin\beta. \tag{13}$ 

在不考虑其他因素的条件下,γ的权重最大,即 对最大光程差的贡献最大。

#### 3.2 像点法

在反射光路中,利用镜面成像的原理,计算主光 线上已知空间点关于镜面的像,光线有多少次反射 就有多少个像,然后按照光线行进的方向和轨迹将 这些像的顺序确定下来,通过最后一次反射得到的 像与已知空间点之间的位置关系,求得主光线在整 个光路中行进产生的光程。

利用像点法计算高分辨率反射式转镜干涉光谱 仪光程的原理如图 3 所示。定义主转镜 PRM 镜面 所在平面在  $O_1$ -*xyz* 坐标系内的平面方程为 $N_{1x}x$  +  $N_{1y}y$  + $N_{1z}z$  +  $D_1$  = 0,次转镜 SRM 镜面所在平面 的平面方程为  $N_{2x}x$  + $N_{2y}y$  + $N_{2z}z$  + $D_2$  = 0,固定折 返镜 SM2 镜面所在平面的平面方程为  $N_{3x}x$  +  $N_{3y}y$  + $N_{3z}z$  + $D_3$  = 0。如图 2 所示某一主光线 **BS** 在



图 3 像点法计算光程的原理图 Fig. 3 Principle of analyzing OPD by point-image method

水平面内由分束器反射,B点为主光线在分束器上 的反射点,S点为从分束器反射来的主光线在主转 镜镜面的入射点,P点为从点S反射来的主光线在 次转镜镜面的入射点,R点为从P点反射来的主光 线在 SM2 镜面的入射点,R点为从 P点反射来的主光 线在 SM2 镜面的入射点,光线到达 SM2 后被反射而 原路返回。以**BS**为入射方向,按照像点法,可依次计 算 $S(s_x, s_y, s_z)$ 点关于次转镜的像点 $S^{(1)}(s_x^1, s_y^1, s_z^1)$ ,  $S^{(1)}$ 关于固定折返镜 2 的像点 $S^{(2)}(s_x^2, s_y^2, s_z^2)$ , $S^{(2)}$ 关 于次转镜的像点 $S^{(3)}(s_x^3, s_y^3, s_z^3)$ , $S^{(3)}$ 关于主转镜的 像点 $S^{(4)}(s_x^4, s_y^4, s_z^4)$ 。由此求得各个像点的坐标为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} s_{1}^{x} \\ s_{y}^{1} \\ s_{z}^{1} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{N_{2}} \begin{bmatrix} s_{x} \\ s_{y} \\ s_{z} \end{bmatrix} - 2D_{2} \begin{bmatrix} N_{2x} \\ N_{2y} \\ N_{2z} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} s_{x}^{2} \\ s_{y}^{2} \\ s_{z}^{2} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{N_{3}} \begin{bmatrix} s_{1}^{1} \\ s_{y}^{1} \\ s_{z}^{1} \end{bmatrix} - 2D_{3} \begin{bmatrix} N_{3x} \\ N_{3y} \\ N_{3z} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} s_{x}^{3} \\ s_{y}^{3} \\ s_{z}^{3} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{N_{2}} \begin{bmatrix} s_{x}^{2} \\ s_{y}^{2} \\ s_{z}^{2} \end{bmatrix} - 2D_{2} \begin{bmatrix} N_{2x} \\ N_{2y} \\ N_{2z} \end{bmatrix} ,$$
(14)
$$\begin{bmatrix} s_{x}^{4} \\ s_{y}^{4} \\ s_{z}^{4} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{N_{1}} \begin{bmatrix} s_{x}^{3} \\ s_{y}^{3} \\ s_{z}^{3} \end{bmatrix} - 2D_{1} \begin{bmatrix} N_{1x} \\ N_{1y} \\ N_{1z} \end{bmatrix}$$

式中  $R_N$  即(6) 式中的反射系数。因为主转镜和次转 镜的反射面相互平行,所以 $[N_{1x} N_{1y} N_{1z}]' =$  $[N_{2x} N_{2y} N_{2z}]',且在转镜旋转过程中,这两个法$ 向量是随转镜的转速、倾角和时间变化的,如同(8)式。因为 S 点的位置是随转镜转动而变化的,但是主光线 BS 的方向是不变的,且由像点法知 S<sup>(4)</sup> 点在主光线 BS 的延长线上,所以在转镜转动的过程中,由分束器反射来的这一支光路产生的光程为

$$L = 2 |BS| + |SS^{(4)}|.$$
(15)

假设固定点 *B* 点在 *O*<sub>1</sub>-*xyz* 坐标系内的坐标为 *B*(*b<sub>x</sub>*,*b<sub>y</sub>*,*b<sub>z</sub>*),那么光程 *L* 又可表示为

 $L = 2[(s_x - b_x)^2 + (s_y - b_y)^2 + (s_z - b_z)^2]^{1/2} + [(s_x^4 - s_x)^2 + (s_y^4 - s_y)^2 + (s_z^4 - s_z)^2]^{1/2}.$  (16)

在转镜以角速度 w 匀速转动的过程中,这个光 程是随时间周期变化的,产生了非线性的光程差。如 果定义主光线 BS 与其反射光线 SP 都在水平面内, 即 S 点在主转镜镜面所在的平面与水平面的交线上 时为零光程差的位置,且  $t_0 = 0$ ,此时的光程记为  $L_0$ ,则光程差可表示为

$$D_{\rm OP} = L - L_0, \qquad (17)$$

在转镜旋转一周的过程中,最大光程差表达式为

$$D_{\text{OPmax}} = L_{\text{max}} - L_{\text{min}}.$$
 (18)

由此,结合数值仿真计算,便可确定光程和光程 差与各个因素如倾斜旋转反射镜的转速和倾角、主 光线的入射角、入射点 B 和反射点 S 的位置、转镜 和固定折返镜 2 的空间位置等的关系。

#### 3.3 光线追迹法和像点法的结果比较

当转镜匀速转动时,分别采用光线追迹法和像 点法对随旋转角变化而变化的光程差进行仿真计 算。图4给出了在设定相关参数下利用 Matlab 分 别计算的结果。主要相关参数的具体设定为:两转 镜中心之间的距离 D=50 mm,转镜倾斜角 γ=5°, 入射角  $\beta = 45^{\circ}$ 。

用相关系数法对图 4 中(a)和(b)获得的曲线进 行分析,计算表明它们的相关性为 100%。这表明 采用光线追迹法和像点法分别获得的光程差随转镜 旋转角变化的规律是完全一致的,从而也交叉验证 了这两种计算方法的可行性。

图 4 得到的结果表明反射式转镜干涉光谱仪的 光程差变化是非线性的,也就意味着对干涉图的采 样可能不是等间隔的,所以进行光谱图复原的过程 中必要时需进行非线性的补偿。



图 4 两种方法的光程差计算结果。(a)光线追迹法;(b)像点法

Fig. 4 Simulation results of the OPD by two methods. (a) Tracing rays method; (b) point-image method

## 4 结 论

通过对反射式转镜干涉光谱仪光程差的分析可 知,反射式转镜干涉光谱仪的光程差是非线性的,它 与主次转镜中心之间的空间距离、转镜倾斜角以及 光线入射角密切相关。而且光程差的变化周期为 2π,转镜每旋转一周能获得两幅干涉图,这意味着 这种干涉光谱仪将能在快变化光谱的探测方面发挥 作用。光线追迹法和像点法可分别对反射式转镜干 涉光谱仪光程差进行分析计算。采用光线追迹法时 对影响光程差的因子权重分析表明,在最优化设计 仪器结构时考虑转镜转轴扭矩平衡的同时,需保证 γ角以获得高光谱分辨率。这些信息有利于仪器光 学和结构设计,提供了改善仪器性能的方向。像点 法是计算复杂光程差的一种新方法,为光程差计算 提供了新的途径。可根据不同场合采用不同的计算 方法。这两种方法的特点在于:

 1)光线追迹法简化了结果表达式,利于确定各 个因子与所求光程和光程差之间的明确关系,便于 综合考虑各个因子的权重,为工程设计提供明确的 指导;但是使用特殊光线的过程却很难反映全面的 情况,若要了解中间过程则需要更多的计算。

2)像点法设计简单,直接通过计算机计算和仿 真结果来确定各个因子与所求光程和光程差的关 系,避免了光线追迹法中寻求特殊光线的繁琐过程。

#### 参考文献

- 1 R. J. Bell. Introductory Fourier Transform Spectroscopy [M]. New York: Academic Press, 1972
- 2 Wu Jinguang. Applications of Fourier Transform Infrared Spectroscopy[M]. Beijing: Sci. & Tech. Press, 1994. 54~56 吴谨光 主编. 近代傅里叶变换红外光谱技术及应用[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994. 54~56
- 3 W. Wadsworth, J. P. Dybwad. Ultra high speed chemical imaging spectrometer[C]. SPIE, 1997, 3082: 148~194
- 4 W. Wadsworth, J. P. Dybwad. A very fast imaging FT spectrometer for on line process monitoring and control [C]. SPIE, 1998, 3537: 54~61
- 5 P. R. Griffiths, B. L. Hirsche, C. J. Manning. Ultra-rapidscanning Fourier transform infrared spectrometry[J]. *Vibrational Spectroscopy*, 1999, **19**(1): 165~176
- 6 Yang Xiaoxu, Zhou Sizhong, Xiangli Bin *et al.*. Studies on nonlinearity of optical path difference of rotary Fourier transform spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(10): 1388~1392 杨晓许,周泗忠,相里斌等. 转镜式傅里叶变换光谱仪光程差非 线性的研究[J]. 光学学报, 2004, 24(10): 1388~1392
- 7 Su Xing, Huang Huimin, Xiangli Bin. Analyses of nonlinearity of high resolution spectrometer oriented on high speed rotating reflector[J]. Acta Photonica Sinica, 2001, **30**(12): 1474~1480 苏 星, 黄惠民, 相里斌. 基于高速转镜的高分辨率干涉光谱仪 非线性理论研究[J]. 光子学报, 2001, **30**(12): 1474~1480
- 8 Yuan Yan, Xiangli Bin. Rotary high sensitive interference spectral imager (ROSI) [J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(6): 935~938

袁 艳,相里斌. 转镜式高灵敏度干涉光谱成像仪 ROSI[J]. 光 子学报, 2005, **34**(6): 935~938

9 Zhang Wenxi, Xiangli Bin, Yuan Yan et al.. Ultra-rapid-

scanning imaging interferometer [J]. Acta Photonica Sinica, 2006, **35**(8): 1153~1155

张文喜,相里斌,袁 艳等.高速转镜干涉成像光谱仪[J].光 子学报,2006,**35**(8):1153~1155

- 10 Zhou Jinsong, Wei Ruyi, Li Siyuan et al.. High resolution ultrarapid scanning Fourier transform spectrometry [C]. OSA Technical Digest in Fourier Transform Spectroscopy, 2009, FTuB5
- 11 Huang Jian, Xian Hao, Jiang Wenhan et al.. The reflected

beam's phase aberration induced by the fabrication errors of corner cube retroreflector[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(7):  $1951 \sim 1955$ 

黄 健,鲜 浩,姜文汉等.角锥棱镜的误差引起的反射光束相 位误差分析[J].光学学报,2009,**29**(7):1951~1955

- 12 Hu Yuxi, An Liansheng. Applied Optics [M]. Hefei: USTC Press, 1996. 8
  - 胡玉禧,安连生.应用光学[M].合肥:中国科学技术大学出版 社,1996.8