

# 基于视场展宽迈克尔孙干涉仪的高光谱分辨率 激光雷达滤光器设计研究

黄寒璐 刘东 杨甬英 成中涛 罗敬 沈亦兵

(浙江大学光电系现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

**摘要** 提出了用作近红外高光谱分辨率激光雷达(HSRL)光谱滤波器的视场展宽迈克尔孙干涉仪(FWMI)的设计方法。详细给出了FWMI的设计理论和设计指标的确定过程,通过视场补偿及热补偿设计,使FWMI能在一定温度范围内保证较大的入射视场。给出了针对近红外FWMI的设计结果。性能评估表明,所设计的FWMI可接收的视场角大于 $2^\circ$ ,并在 $(20 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 的温度范围内具有几乎不变的工作性能。最后通过公差分析,保证了该设计结果能满足现有的加工工艺。该设计过程和方法对FWMI的设计加工具有一定的指导意义。

**关键词** 大气光学;大气气溶胶探测;迈克尔孙干涉仪;高光谱分辨率激光雷达

**中图分类号** TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0913003

## Design of the High Spectral Resolution Lidar Filter Based on a Field-Widened Michelson Interferometer

Huang Hanlu Liu Dong Yang Yongying Cheng Zhongtao Luo Jing Shen Yibing

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

**Abstract** A design method of field-widened Michelson interferometer (FWMI) applied as the spectroscopic filter for high spectral resolution lidars (HSRLs) is proposed. The theoretical principles and design criteria are described in detail. Making use of the field-widened and thermal compensation conditions, the FWMI can achieve large incident field within a certain temperature range. The design result of the near-infrared FWMI is provided. The performance analysis of designed FWMI indicates that its available incident divergence is larger than  $2^\circ$ , and its working performance remains constant within  $(20 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ . What's more, according to the tolerance analysis, the design result meets the current glass processing technic. The design procedure and method introduced have guiding significance for the FWMI design and production.

**Key words** atmosphere optics; atmosphere aerosol measurement; Michelson interferometer; high spectral resolution lidar

**OCIS codes** 010.3640; 010.1100; 010.1350; 010.1290; 280.1100

## 1 引言

大气气溶胶是指悬浮在大气中直径在 $0.001 \sim 100 \mu\text{m}$ 之间的固体和液体微粒,其物理和光学特性将会直接或间接作用于气候的辐射平衡,并对大气

环境质量和人体健康有非常重要的影响。激光雷达作为一种主动式现代光学遥感设备,由于其在探测高度、时空分辨率、测量精度等方面的优势,目前已成为探测气溶胶的一种有效手段。而高光谱分辨率

**收稿日期**: 2014-01-03; **收到修改稿日期**: 2014-04-17

**基金项目**: 国家自然科学基金(41305014)、教育部博士点基金(20130101120133)、中央高校基本科研业务费专项资金(2013QNA5006)、浙江省教育厅科研项目(Y201329660)、浙江省“仪器科学与技术”重中之重学科开放基金(JL130113)、现代光学仪器国家重点实验室创新基金(MOI201208)

**作者简介**: 黄寒璐(1992—),女,本科生,主要从事激光雷达大气遥感方面的研究。E-mail: huang\_hanlu@163.com

**导师简介**: 刘东(1982—),男,博士,副教授,主要从事光学传感与信息处理技术等方面的研究。

E-mail: liudongopt@zju.edu.cn(通信联系人)

激光雷达(HSRL)作为当前公认的与气溶胶拉曼探测激光雷达<sup>[1-2]</sup>并列的两种可不依靠关键参数的假设、直接探测气溶胶后向散射参数的技术之一,可以实现高精度的气溶胶探测<sup>[3]</sup>,是目前大气遥感的研究热点。

激光入射到大气中会与大气成分发生相互作用并产生散射,通过接收这些加载了大气参数信息的后向散射光可以反演出需要测量的量(如气溶胶后向散射系数和消光系数等)。HSRL主要利用气溶胶粒子对入射激光的米氏散射信号和大气分子对入射激光的瑞利散射信号作为反演大气信息的媒介,通过光谱滤波器来分离这两种不同的散射信号并分别测试这两种信号的强度信息,从而解决了传统后向散射激光雷达所遇到的使用一个雷达方程反演气溶胶散射系数和消光系数两个未知量的困难<sup>[4-6]</sup>。目前在HSRL中应用最多的光谱滤波器是碘分子吸收滤波器和法布里-珀罗(F-P)干涉滤波器。碘分子吸收滤波器<sup>[7-10]</sup>因对米氏散射信号具有高过滤率、吸收特性的高稳定性等优点已被用在很多HSRL中。但是由于此类滤波器的吸收峰值在很多常用的激光频率处不存在,以致限制了它的使用。与此相反,F-P干涉滤波器<sup>[11-12]</sup>的透射峰值可以通过改变腔长方便地协调到任何激光频率,从而也越来越受欢迎。但是,F-P干涉仪接收大视场的入射光时滤光性能下降很快,故它要求入射光的发散角较小,所以其光能收集效率不高。

如今现有的HSRL大多工作在355 nm和532 nm两个激光波长。为了能获得多波段的气溶胶光学参数,对于1064 nm HSRL的研制工作也一直是激光雷达领域较为关注的问题。但是,由于大气分子散射谱能量密度和波长四次方成反比,故波长越长,散射能量越低。为了克服上述诸多已有滤波器的缺点以及用在1064 nm波长时的不足,视

场展宽迈克尔孙干涉仪(FWMI)作为HSRL光谱滤波器<sup>[13-16]</sup>被提出。它既具有较大视场角,可收集较大视场范围内的雷达回波信号,又不受发射激光波长的限制,对工作在1064 nm波长的用于测量气溶胶参数的近红外HSRL具有重要的意义。

本文主要介绍了用于测量气溶胶参数的HSRL光谱滤波器的FWMI的设计理论和方法。详细给出了FWMI视场展宽和热补偿的实现过程,使FWMI能在一定的温度范围内保持稳定一致的大视场特性。讨论了FWMI指标的确定过程,并对1064 nm近红外FWMI实际设计结果进行了性能验证。分析表明,利用该方法所设计的FWMI具有较为理想的工作性能。这种设计理论对所有波长都是通用的,可以方便地应用到其他任意感兴趣的激光波长上。

## 2 原理与方法

### 2.1 用于气溶胶参数测量的HSRL基本原理

一束单色窄脉宽激光发射到大气中后,经大气后向散射并由望远镜接收到的激光雷达回波信号光谱中主要包含了两部分成分:由大气分子散射产生的瑞利散射信号和由气溶胶粒子散射产生的米氏散射信号。这两种信号谱均可以看作中心在发射激光中心频率而宽度不同的高斯线形分布。其中,由于大气分子热运动速度较快,对激光的多普勒展宽比较明显,故分子散射谱宽也较宽,一般在吉赫兹量级;气溶胶粒子对激光光谱的展宽主要是由其布朗运动引起,由于运动速度较慢,展宽并不明显,通常认为气溶胶散射谱具有和所发射激光相当的谱宽度(约100 MHz)<sup>[3-4]</sup>。这两种谱分布叠加在一起,则形成了如图1(a)所示的总散射谱。可以看到,气溶胶信号以一个很窄的尖峰出现在总散射光谱的中心。HSRL则主要利用了总散射谱的这一特点,通

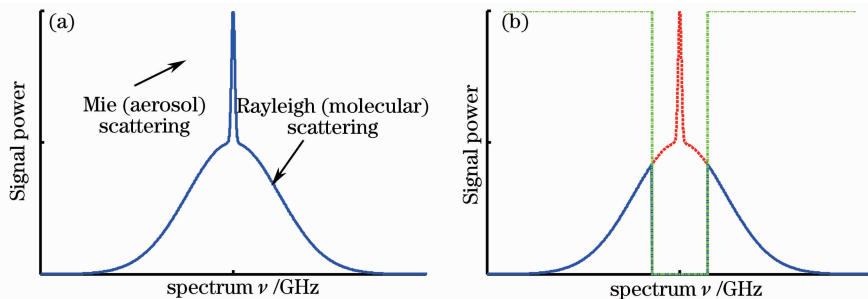


图1 (a) 大气后向散射信号光谱;(b) 经窄带矩形滤波器后的光谱图像

Fig. 1 (a) Spectral diagram for the atmosphere backscatter signal; (b) spectral diagram for the output signal through a narrow-band rectangular filter

过窄带光谱滤波器将气溶胶散射成分和分子散射成分分开。理想情况下,使用具有矩形光谱函数的窄带滤波器能完全滤除气溶胶散射信号,如图 1(b)所示,这样剩下的信号中主要由大气分子散射所贡献。然后通过对滤波后的接收信号和未做滤波的原始信号,可以容易地反演出诸多大气光学参数,如后向散射系数和消光系数等。但是,具有这样理想特性的光谱滤波器是不存在的。实际常用的滤波器,如之前提到的碘分子吸收滤波器、F-P 干涉仪、FWMI 等都只是具有近似矩形特性。但这并不影响它们在 HSRL 中的使用,只要通过合适的透射率校正方式,同样能较精确地得到需要测量的大气参数<sup>[16]</sup>。

## 2.2 FWMI 设计理论

FWMI 本质上还是一种迈克尔孙干涉仪(MI),只是它通过合适的玻璃选材和长度匹配,使其光程差(OPD)随着入射光的入射角增大而变化得较传统 MI 更缓慢,同时当温度变化时这一性能依然能够具有一定的保持能力。这两个特性即所谓的视场展宽和热补偿,就是 FWMI 设计所需要达到的两个基本目标。下面将从理论上推导出完成这两个目标所需要满足的条件。

FWMI 的结构如图 2 所示,该干涉仪由一个 50/50 立方体分束镜和两个干涉臂组成。两个干涉臂分别为不同材质的玻璃,胶合在分束镜的两侧,并在其中一臂的末端留有一段空气间隔,紧接着是一个可以移动的反射镜。该反射镜与压电晶体连接在一起,通过改变压电晶体上的电压,可以对空气间隔

的长度进行微调。图 2 中,  $n_1$ 、 $n_2$ 、 $n'_2$ 、 $n_3$  分别为分束镜、两臂玻璃材料以及空气间隔的折射率,  $i$  为入射光束中心的入射角,  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta'_2$ 、 $\theta_3$  为在材料各分界面上的折射角,  $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d'_2$ 、 $d_3$  分别为分束镜的边长、两个玻璃臂的长度以及空气间隔的厚度。光线经 MI 后会有两个输出,其中 output1 为有效信号。为了避免 output2 的信号沿原路返回对输入光路造成影响,因此在系统中让光线以  $i$  角度倾斜入射 MI,从而将 input 和 output2 光路分离开来。

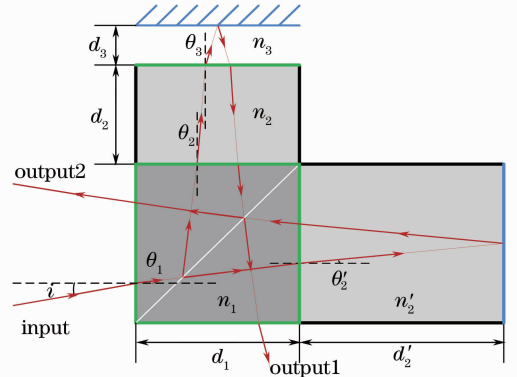


图 2 视场展宽迈克尔孙干涉仪结构

Fig. 2 Structure of the field-widened Michelson interferometer

由图 2 可知,对于以入射角  $i$  入射的光,分别经过 FWMI 两干涉臂后两路光的 OPD 可以表示为

$$\Delta = 2n_2d_2 \cos \theta_2 + 2n_3d_3 \cos \theta_3 - 2n'_2d'_2 \cos \theta'_2, \quad (1)$$

将其经斯涅耳定律变化后,可以得到 OPD 关于入射角的表达式,即

$$\Delta = 2n_2d_2 (1 - \sin^2 i/n_2^2)^{1/2} + 2n_3d_3 (1 - \sin^2 i/n_3^2)^{1/2} - 2n'_2d'_2 (1 - \sin^2 i/n_2'^2)^{1/2}. \quad (2)$$

正如前面所述,实际入射到 FWMI 的光是倾斜的,而且入射光本身可能具有一定的发散角。FWMI 设计的目的就是为了使偏离入射光束中心光线入射的光与中心光线具有尽量一致的 OPD。考察具有一定发散角的入射光束,设中心光束的入射角为  $i_0$ 。由(2)式可以看到,光程差是入射角的函数,并记为  $\Delta = f(\sin i)$ ,将(2)式对  $\sin i_0$  进行泰勒展开,得到

$$f(\sin i) \approx f(\sin i_0) + f'(\sin i_0)(\sin i - \sin i_0) + \frac{f''(\sin i_0)}{2} (\sin i - \sin i_0)^2, \quad (3)$$

式中

$$f'(\sin i_0) = -2d_2 \left( \frac{n_2^2}{\sin^2 i_0} - 1 \right)^{-1/2} - 2d_3 \left( \frac{n_3^2}{\sin^2 i_0} - 1 \right)^{-1/2} + 2d'_2 \left( \frac{n_2'^2}{\sin^2 i_0} - 1 \right)^{-1/2}, \quad (4)$$

$$f''(\sin i_0) = -2d_2n_2^2(n_2^2 - \sin^2 i_0)^{-3/2} - 2d_3n_3^2(n_3^2 - \sin^2 i_0)^{-3/2} + 2d'_2n_2'^2(n_2'^2 - \sin^2 i_0)^{-3/2}. \quad (5)$$

由(3)式可以看到,等式右边的第一项不随入射角的变化而变化,因此称这一项为该干涉仪的基准 OPD,并表示为

$$\Delta_0 = f(\sin i_0) = 2n_2d_2(1 - \sin^2 i_0/n_2^2)^{1/2} + 2n_3d_3(1 - \sin^2 i_0/n_3^2)^{1/2} - 2n'_2d'_2(1 - \sin^2 i_0/n_2'^2)^{1/2}. \quad (6)$$

1) 视场补偿条件

如果令(3)式中 $(\sin i - \sin i_0)$ 项的系数接近于0,这样 OPD 随入射角的变化将主要由后面高次项

$(\sin i - \sin i_0)^2$  决定。这时由于高次项非常小,故 OPD 随入射角的变化也将很小,如此即达到了视场展宽的目的。由此可得到 MI 的视场展宽条件为

$$\omega = f'(\sin i_0) = -2d_2 \left( \frac{n_2^2}{\sin^2 i_0} - 1 \right)^{-1/2} - 2d_3 \left( \frac{n_3^2}{\sin^2 i_0} - 1 \right)^{-1/2} + 2d'_2 \left( \frac{n_2'^2}{\sin^2 i_0} - 1 \right)^{-1/2} = 0. \quad (7)$$

2) 热补偿条件

即使按满足(7)式的要求设计好了 FWMI,由于在 HSRL 进行测量工作的时候,环境温度也会发生一定的变动,从而引起玻璃、空气长度以及折射率发生变化,继而破坏视场补偿条件。因此,在设计

FWMI 时,其温度稳定性也是必须考虑的因素之一。为此,可以使(7)式中  $\omega$  对温度的导数等于 0,即尽量使得当温度变化时, $\omega$  能够保持在 0 附近,这样视场展宽条件被破坏的程度会极大减少。因此热补偿条件可以表达为

$$\frac{\partial \omega}{\partial T} = -2d_2 \alpha_2 \left( \frac{n_2^2}{\sin^2 i} - 1 \right)^{-1/2} + \frac{2n_2 d_2 \beta_2}{\sin^2 i} \left( \frac{n_2^2}{\sin^2 i} - 1 \right)^{-3/2} - 2d_3 \alpha_3 \left( \frac{n_3^2}{\sin^2 i} - 1 \right)^{-1/2} + \frac{2n_3 d_3 \beta_3}{\sin^2 i} \left( \frac{n_3^2}{\sin^2 i} - 1 \right)^{-3/2} - 2d'_2 \alpha'_2 \left( \frac{n_2'^2}{\sin^2 i} - 1 \right)^{-1/2} + \frac{2n_2' d_2' \beta_2'}{\sin^2 i} \left( \frac{n_2'^2}{\sin^2 i} - 1 \right)^{-3/2} = 0, \quad (8)$$

式中  $\alpha_2 = \frac{1}{d_2} \frac{\partial d_2}{\partial T}, \alpha'_2 = \frac{1}{d'_2} \frac{\partial d'_2}{\partial T}, \alpha_3 = \frac{1}{d_3} \frac{\partial d_3}{\partial T}$  是玻璃及空气的热膨胀系数,  $\beta_2 = \frac{dn_2}{dT}, \beta'_2 = \frac{dn_2'}{dT}, \beta_3 = \frac{dn_3}{dT}$  是玻璃及空气折射率的温度系数。

同时满足了(7)式和(8)式两个式子的 MI 即为所述的 FWMI。该干涉仪可以保证具有一定发散角入射的光具有尽可能一致的 OPD,而且该特性在温度变化一定程度时依然能够保持。关于这两条特性带来的优点将在下面进行详细叙述。

的工作性能,它的定义为

$$f_{\text{SDR}} = T_m / T_a, \quad (9)$$

式中  $T_m$  为 FWMI 对大气分子散射信号的透射率,  $T_a$  为 FWMI 对气溶胶散射信号的透射率。这两个透射率可以通过 FWMI 的光谱透射曲线和相应的散射谱采用数值积分的方法得到。根据相干光的干涉原理不难发现,FWMI 的光谱滤波曲线为余弦函数,对于基准 OPD 为  $\Delta_0$ ,透射率函数谷点在气溶胶散射谱中心频率  $\nu_0$  的 FWMI,其透射谱函数可以表示为

$$F(\nu) = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \cos \left[ \frac{2\pi(\nu - \nu_0)}{l_{\text{FSR}}} \right] \right\}, \quad (10)$$

3 FWMI 设计指标的确定

要进行 FWMI 的设计,首先需要选择合适的玻璃组合。对玻璃进行筛选的依据主要有满足要求的玻璃臂长不能太长,视场展宽情况和热补偿情况要尽可能好,以及允许的制作容差也要在加工工艺水平内。通常,可以从很多种候选玻璃中采用遍历的方式来计算采用每一对玻璃组合时的这些指标,然后选取所有结果中最符合各项要求的玻璃对。

对于每一对玻璃组合,由(6)~(8)式可以解出两个玻璃臂和空气间隔的长度。为了利用(6)式,需要首先确定 FWMI 的基准 OPD。这是 FWMI 一个很重要的参数,它选取的好坏直接关系到 FWMI 滤波效果的优劣。为此,需要有定量评估 FWMI 滤波能力的指标。文献[14]对 FWMI 用作 HSRL 光谱滤波器的机理做了较深入的研究,这里将借用其中提出的光谱分离比(SDR,  $f_{\text{SDR}}$ ) 指标来衡量 FWMI

式中的  $l_{\text{FSR}} = c/\Delta_0$  称为 FWMI 的自由光谱范围(FSR)。该函数的示意图如图 3 中间部分所示。由气溶胶和大气分子散射的叠加谱通过该余弦函数作用后,剩余的谱线如图 3 最右边所示。通过数值积分的方式不难得到 FWMI 对气溶胶信号和分子信号的透射率。由(10)式可知, $\Delta_0$  的选取会改变余弦函数的周期宽度,从而影响到  $T_m$  与  $T_a$ 。文献[14]指出, $T_m$  与  $T_a$  的比值越大,即 SDR 越大,表示光谱滤波器对两种散射信号的分离程度越好,这样越利于精确的大气参数反演;但另一方面追求过大的 SDR 需要较大的 FSR,而 FSR 越大,分子信号的透射率会越小,导致信噪比过低。这一变化关系可以清楚地由图 4 看出。为了使选取的 FSR 能同时得到较大的 SDR 和较大的分子信号透射率,可以将 FSR 选定在 2 GHz 左右,这样得到的 SDR 在 100

以上,分子信号的透射率接近 40%,将是很好的设计结果。这样选取的 FSR 对应的基准 OPD 将为  $\Delta_0 = 150 \text{ mm}$ 。选定了基准 OPD 之后,FWMI 的上限 SDR 已经确定了。实际的缺陷,例如玻璃长度加

工误差,温度变化导致玻璃长度与折射率的变化等因素,都将会破坏视场展宽条件而使 SDR 下降。所以,可以使用 SDR 作为衡量 FWMI 工作性能的重要指标。

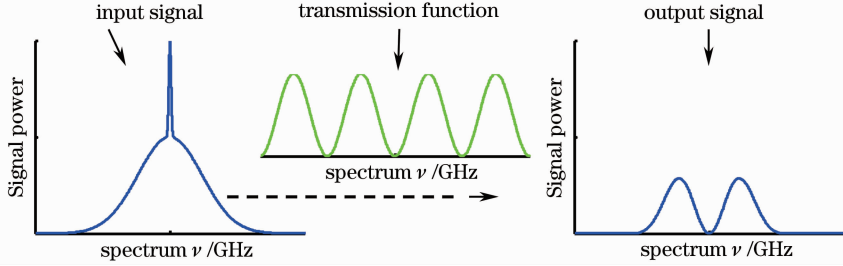


图 3 基于迈克尔孙干涉仪的 HSRL 滤光器原理

Fig. 3 Schematic spectral transmission diagram of a Michelson interferometer in HSRL system

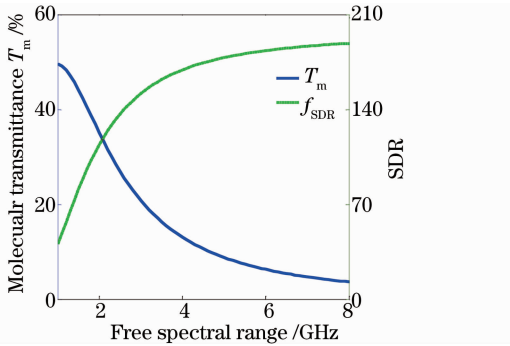


图 4 FWMI 分子信号透射率和 SDR 随自由光谱范围的变化关系

Fig. 4 Variations of the molecular transmittance and SDR of the FWMI with respect to its free spectral range

需要说明的是,尽管 FWMI 在测量大气温度和风场的激光雷达中已经得到了较为广泛的应用<sup>[17-18]</sup>,但由于测量大气气溶胶参数的 HSRL 同风场温度场激光雷达原理上的差异,它们的设计方法上也存在几个明显的不同。

1) 基准 OPD 的选取原则不同。HSRL 选取基准 OPD 主要是权衡 SDR 和分子信号透射率,而温度场激光雷达则主要是权衡条纹调制度和相位变化的灵敏性<sup>[19]</sup>。

2) 视场展宽条件不同。为了防止 FWMI 干涉光束和入射光重合,HSRL 中需要 FWMI 倾斜使用。从 2.2 节可见,视场展宽是在特定的倾斜角上的展宽。而目前所有关于风场测量的 FWMI 均是在  $0^\circ$  入射角上做展宽。当然,本文所提出的方法也包含  $0^\circ$  角展宽这一特例,只要将(6)~(8)式中的  $i_0$  设置为 0 即可。

3) 热补偿的目的不同。用作 HSRL 光谱滤波器的 FWMI 做热补偿的目的是为了让视场展宽条件不随温度改变而改变,这样能保证 FWMI 在温度

变化时也能保证较大的 SDR,所以需要令视场展宽表达式对温度的导数尽量小;而风场激光雷达需要做 FWMI 热补偿则是为了保证温度变化时基准 OPD 尽量不变,以便探测到的多波长光谱的条纹信息之间不发生混叠,所以需要令基准 OPD 对温度的变化尽量小。

## 4 设计结果及性能评估

设计 FWMI 即是为两干涉臂选择适合材料并确定其尺寸的过程。按照前面所述的设计方法和基本指标的选定,利用肖特玻璃库中 120 种候选的玻璃逐对计算出满足(6)~(8)式的各干涉臂的长度,并考察每一对候选玻璃的 SDR 随入射光束发散角和温度的变化情况。选取 SDR 随光束发散角和温度变化最不敏感的玻璃组合作为可以满足要求的 FWMI 玻璃材料。再在选取出来的多对玻璃中,挑选总长度较小的方案作为最终设计结果。经计算和筛选,得到了若干组肖特玻璃库中的材料作为候选的 FWMI 玻璃材料。下面将以 P-SF68 以及 N-SF66 两种玻璃为例对设计结果进行介绍,各干涉臂具体参数如表 1 所示。

表 1 FWMI 设计结果

Table 1 Designing results of FWMI

	Hybrid arm		Pure glass arm
Material	N-SF66	air	P-SF68
Refractive index	1.87981	1.000269	1.95953
Length /mm	7.254	25.9972	58.504

### 4.1 视场展宽与热补偿验证

从上面的分析可知,用最终挑选出的玻璃按(6)~(8)式设计得到的 FWMI 应该具有出色的视场展宽和热补偿的性能。从(7)式和(8)式可见,视



场展宽和热补偿的本质是使两干涉臂的 OPD 在入射光的入射角和温度变化时都能几乎保持不变。图 5 对表 1 中所示的设计结果进行视场展宽以及热补偿条件检验,其中,图 5(a)和(b)分别示出了 OPD 在不同入射角和温度的变化情况。需要再次强调的是,本文提出的 FWMI 设计方案具有更一般的意义,它能让 FWMI 在任意角度的附近实现视场展宽,而不仅仅是如已有的 FWMI 设计方案只在平行入射时具有视场展宽效果。在本文的设计中,让 FWMI 在  $1.5^\circ$  做视场展宽设计,这样在使用 FWMI 时就可以让入射光束倾斜  $1.5^\circ$  射入,从而避免了返回光束对入射光的污染。由图 5(a)可见,即使入射光入射角达到  $4^\circ$ ,其相对于入射角为  $1.5^\circ$  时的 OPD 变化小于 0.08 个波长。而图 5(b)则表明当温度变化  $0.5^\circ\text{C}$  时,FWMI 在  $1^\circ$  发散角内 OPD 变化量为  $10^{-3}$  量级,并维持恒定,可见热补偿效果也十分理想。

对于用于风场测量的 FWMI 的设计分析,关注其 OPD 变化是有意义的<sup>[20]</sup>。但对于作为 HSRL 光

谱滤波器的 FWMI,考察其 OPD 的变化并不是估计其滤光性能最好的指标。虽然图 5(a)和 5(b)直观地表现出了 FWMI 视场展宽和热补偿的情况,可是显然它们无法反映 FWMI 光谱分离性能。正如(9)式所示,使用 SDR 能更容易显示出 FWMI 对气溶胶散射信号和分子散射信号的分离能力。为此,将 SDR 随入射光束发散角的变化情况示于图 5(c)。由图 5(c)可见,SDR 随发散角的变化也较小,当发散角小于  $1^\circ$  时,SDR 几乎维持在最大值,而且当发散角等于  $2^\circ$  时,SDR 的减小幅度小于 1。这正是视场展宽设计所带来的优点。它表明,即使对于较大视场的入射光,FWMI 也能保持几乎不变的光谱滤光性能。同理,图 5(d)表示温度变化对 SDR 产生的影响。SDR 的变化量在  $10^{-3}$  数量级,几乎可以认为在该温度范围内 FWMI 具有一致的滤光性能。

通过这些分析,表明按照表 1 参数所设计出来的 FWMI 具有较大的视场和稳定的热工作性能,用作 HSRL 光谱滤波器能获得较理想的效果。

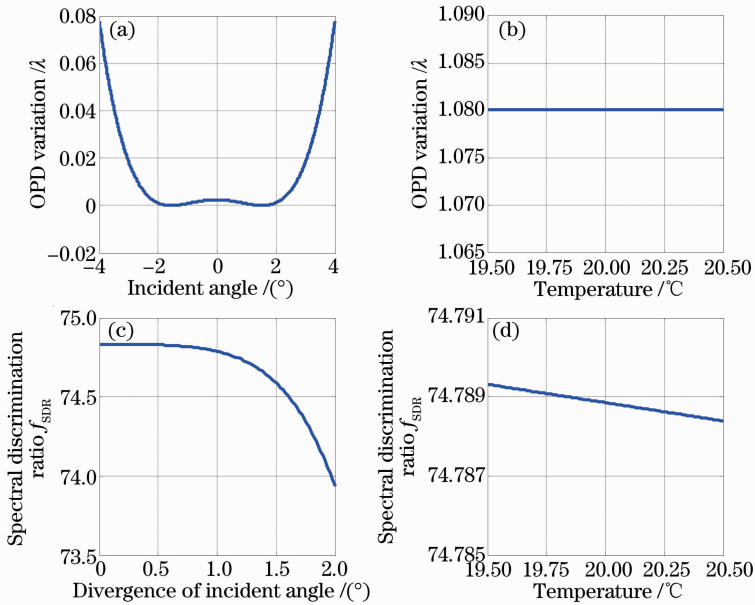


图 5 (a)、(b) 光程差随入射角及温度的变化情况;(c)、(d) SDR 随光束发散角及温度的变化情况

Fig. 5 (a), (b) OPD variation with respect to the incident angle and environment temperatures; (c), (d) SDR variation with respect to the incident divergence and environment temperatures

#### 4.2 容差条件检验

合理的设计应当不仅能保证 FWMI 良好的工作性能,而且需要使设计能满足加工工艺的要求。其中,容差条件是玻璃加工中最重要的指标要求之一。虽然表 1 中的理论设计结果经检验后能够较好地满足设计要求,但在实际加工中,玻璃材料的厚度以及折射率与理论值之间不可避免地会存在一定的

误差,从而影响到 FWMI 的工作性能。为此,还需要考察表 1 中玻璃长度和玻璃折射率偏离理论值时 SDR 的变化情况以反映该设计对玻璃长度加工和折射率偏差的容许范围。

对表 1 设计结果的容差分析如图 6 所示,其中  $\Delta d_2$ 、 $\Delta d_2'$  分别是混合臂以及纯玻璃臂的玻璃厚度制作误差, $\Delta n_2$ 、 $\Delta n_2'$  则分别是这两块玻璃的折射率与

理论值的偏差。由图 6(a)可见,随着玻璃长度偏离理论设计值,FWMI 的 SDR 开始显著下降。这是因为玻璃长度的偏差破坏了视场展宽条件。若能保证长度加工误差在 0.02 mm 以内,FWMI 的 SDR 将依旧可以在 40 以上。在图 6(b)中,由于玻璃的

折射率通常能保证小数点后三位和理论值一致,故仅仅分析了当玻璃折射率在  $10^{-4}$  量级变动时 SDR 的变化情况。不难发现,在这样的折射率精度前提下 FWMI 的工作性能几乎保持不变。

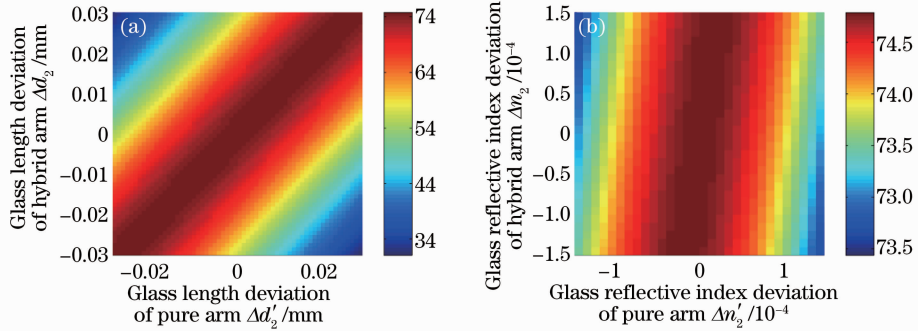


图 6 FWMI 容差分析结果。(a) 玻璃长度偏差对 SDR 的影响;(b) 玻璃折射率偏差对 SDR 的影响

Fig. 6 Diagram of manufacture tolerance analysis results. (a) SDR variation with respect to the length deviation of the glasses; (b) SDR variation with respect to the refractive index deviation of the glasses

## 5 结 论

提出了用作 HSRL 光谱滤波器的 FWMI 的设计方法。详细介绍了该 FWMI 的设计理论以及指标确定过程。通过视场补偿和热补偿,能保证 FWMI 在一定的温度范围内保持良好的视场特性。对设计的结果进行了指标验证,分析表明,通过本文提出的方法,该 FWMI 能在  $2^\circ$  发散角的范围内具有较好的工作性能,并在  $(20 \pm 0.5)^\circ\text{C}$  的温度范围内工作性能几乎保持稳定不变。同时,通过容差分析,该 FWMI 还很好地满足了玻璃的实际制作容差要求。

本文设计实例中 FWMI 的工作波长为 1064 nm,但从以上的设计过程中可以看出,FWMI 可以针对任意的工作波长进行设计,并且具有较大的视场范围和较好的温度稳定性,一定程度上解决了 F-P 干涉仪可接收的入射角较小以及原子/分子吸收滤光器可使用的工作波长有限等缺点,是一种非常具有发展前景的 HSRL 滤光器。

## 参 考 文 献

- 1 Yu Haili, Hu Shunxing, Wu Xiaoqing, *et al.*. Measurement of  $\text{CO}_2$  concentration profiles of lower-troposphere with Raman lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(8): 0801003.  
于海利, 胡顺星, 吴晓庆, 等. 拉曼激光雷达探测低对流层大气二氧化碳分布[J]. *光学学报*, 2012, 32(8): 0801003.
- 2 Liu Dong, Tao Zongming, Wu Decheng, *et al.*. Development of three-wavelength-Raman-polarization lidar system and case study [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(2): 0228001.

- 刘东, 陶宗明, 吴德成, 等. 三波长拉曼偏振激光雷达系统研制及探测个例[J]. *光学学报*, 2013, 33(2): 0228001.
- 3 Hua Dengxin, Song Xiaoquan. Advances in lidar remote sensing techniques[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S3): 21-27.  
华灯鑫, 宋小全. 先进激光雷达探测技术研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(S3): 21-27.
- 4 Eloranta E E. High Spectral Resolution Lidar[M]. New York: Springer, 2005. 143-163.
- 5 Zhang Zhaoyang, Su Lin, Chen Liangfu. Retrieval and analysis of aerosol lidar ratio at several typical regions in China [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(5): 0513002.  
张朝阳, 苏林, 陈良富. 中国典型地区气溶胶激光雷达比反演与分析[J]. *中国激光*, 2013, 40(5): 0513002.
- 6 Tao Zongming, Wu Decheng, Liu Dong, *et al.*. Estimation of aerosol backscatter coefficient error in lidar data processing [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(12): 1214001.  
陶宗明, 吴德成, 刘东, 等. 激光雷达反演气溶胶后向散射系数误差估算[J]. *中国激光*, 2011, 38(12): 1214001.
- 7 Liu Jintao, Chen Weibiao, Song Xiaoquan. Theory of iodine filter based on high spectral resolution lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(6): 1548-1553.  
刘金涛, 陈卫标, 宋小全. 基于碘分子滤波器的高光谱分辨率激光雷达原理[J]. *光学学报*, 2010, 30(6): 1548-1553.
- 8 Liu Zhishen, Wu Dong, Song Xiaoquan, *et al.*. Development of lidar and experimental research for measuring atmosphere aerosol [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(6): 724-728.  
刘智深, 吴东, 宋小全, 等. 激光雷达研制及其探测大气气溶胶的实验研究[J]. *光学学报*, 2001, 21(6): 724-728.
- 9 Piironen P, Eloranta E W. Demonstration of a high-spectral-resolution lidar based on an iodine absorption filter [J]. *Optics Letters*, 1994, 19(3): 234-236.
- 10 Hair J W, Hostetler C A, Cook A L, *et al.*. Airborne high spectral resolution lidar for profiling aerosol optical properties [J]. *Appl Opt*, 2008, 47(36): 6734-6752.
- 11 Shipley S T, Tracy D H, Eloranta E W, *et al.*. High spectral resolution lidar to measure optical scattering properties of atmospheric aerosols. 1: theory and instrumentation [J]. *Appl Opt*, 1983, 22(23): 3716-3724.

- 12 Grund C J, Eloranta E W. University of Wisconsin high spectral resolution lidar[J]. *Opt Eng*, 1991, 30(1): 6—12.
- 13 Liu D, Hostetler C, Miller I, *et al.*. System analysis of a tilted field-widened Michelson interferometer for high spectral resolution lidar[J]. *Opt Express*, 2012, 20(2): 1406—1420.
- 14 Cheng Z, Liu D, Yang Y, *et al.*. Interferometric filters for spectral discrimination in high-spectral-resolution lidar: performance comparisons between Fabry-Perot interferometer and field-widened Michelson interferometer[J]. *Appl Opt*, 2013, 52(32): 7838—7850.
- 15 Huang H, Liu D, Yang Y, *et al.*. Design of a field-widened Michelson interferometer for a near-infrared high spectral resolution lidar[C]. *SPIE*, 2013, 8872: 88720P.
- 16 Liu D, Yang Y, Cheng Z, *et al.*. Retrieval and analysis of a polarized high-spectral-resolution lidar for profiling aerosol optical properties[J]. *Opt Express*, 2013, 21(11): 13084—13093.
- 17 Shepherd G G, Gault W A, Miller D W, *et al.*. WAMDII: wide-angle Michelson Doppler imaging interferometer for Spacelab[J]. *Appl Opt*, 1985, 24(11): 1571—1584.
- 18 Shepherd G G. Application of Doppler Michelson imaging to upper atmospheric wind measurement: WINDII and beyond[J]. *Appl Opt*, 1996, 35(16): 2764—2773.
- 19 Wang Li, Zhao Baochang, Xiang Libin, *et al.*. The selective principle of fixed optical path difference of wind measurement interferometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(8): 1254—1258.
- 汪 丽, 赵葆常, 相里斌, 等. 风场探测干涉仪中基准光程差的选择原理[J]. *光子学报*, 2006, 35(8): 1254—1258.
- 20 Wang Li, Zhao Baochang, Zhang Chunmin. Realization of field widening of Michelson interferometer for wind measurement[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(3): 426—432.
- 汪 丽, 赵葆常, 张淳民. 迈克尔孙风场探测干涉仪视场展宽的实现[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(3): 426—432.

栏目编辑: 王晓球