

文章编号 1004-924X(2012)08-1704-06

光热低相干干涉法测量大气气溶胶吸收

李保生^{1*}, 李正强², 纪峰¹, 周海洋¹

(1. 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009;

2. 中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101)

摘要:研究了气溶胶粒子的光热敏效应和热感应光致折射率变化, 提出了通过增加光热作用区个数来提高探测灵敏度及用低相干干涉法降低成本的方法。建立了光热低相干干涉法测量大气气溶胶吸收系数的数学模型, 分析了干涉仪正交状态测量和干涉条纹细分探测两种方式下的探测灵敏度, 讨论了低相干偏振干涉情况下的探测限。结果显示, 在典型条纹细分情况下理论探测灵敏度可达 $1 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$; 增加光热作用区 m 个, 探测灵敏度理论值可提高 m 倍。理论和方法研究证明光热低相干干涉法具有可直接测量大气气溶胶吸收系数、在线原位、低成本, 易于进行温度修正等优点。

关键词:气溶胶; 气溶胶吸收测量; 光热敏效应; 光致折射; 光热低相干干涉

中图分类号: P427.1; P422.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122008.1704

Measurement of aerosol absorption using photothermal low coherence interferometry

LI Bao-sheng^{1*}, LI Zheng-qiang², JI Feng¹, ZHOU Hai-yang¹

(1. School of Instrument Sciences and Opto-electronics Engineering,
Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

* Corresponding author, E-mail: libaosheng@hfut.edu.cn

Abstract: The photothermal effect and thermal induced photorefractive change of aerosols in the atmosphere were researched. The method to improve detection sensitivity by increasing the number of photothermal effect zones and to reduce the costs by low coherence interferometry was proposed. A mathematics model to measure the aerosol absorption coefficients by photothermal low coherent interferometry was established, the detection sensitivities from two ways, interferometric orthogonal measurement and interferometric fringe subdividing detecting, were analyzed, and the detecting limit in low coherent polarized interferometry was discussed. Experiments demonstrate that the detection sensitivity in theory can be $1 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$. If a longer interaction length and more number interaction zones are chosen, higher sensitivity can be arrived. The theory and method proposed in this paper can provide references for aerosol measurements.

收稿日期: 2012-02-09; 修订日期: 2012-03-15.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 41075024); 教育部科学技术研究资助项目(No. 108073); 国家 973 重点基础研究发展计划资助项目(No. 2010CB950801)

Key words: aerosol; aerosol absorption measurement; photothermal effect; thermal induced photorefraction; photothermal interferometry

1 引言

气溶胶吸收在地球大气直接和间接辐射强迫及对能见度的影响中发挥着重要作用。气溶胶吸收光能量将电磁能转化成热能,加热吸收性粒子及其周围大气,减少了太阳对地面的辐射能量^[1]。气溶胶吸收直接使气候模型中的非吸收性气溶胶增加了加热项,是气候模型中最不确定的因素之一^[2]。因此,为了准确地估计气溶胶辐射强迫的数值,降低气溶胶辐射强迫计算中的不确定度,提高气候变化模型的灵敏度,对气溶胶吸收系数的准确测量方法开展研究是非常紧迫和必要的。

随着气候问题的日益突出,大气气溶胶吸收系数的测量方法成为近来研究的热点之一。常用的大气气溶胶吸收系数的测量方法有^[3-6]:基于滤膜采样的方法(如积分片法、PSAP、MAAP等)^[7-11]、消光减散射(又叫差分方法)^[12]、遥感方法^[3]、光声法^[13]、激光诱导的热辐射法^[14-15]等。光热干涉法能直接测量大气气溶胶吸收系数而不受散射光的影响,具有精度高、不确定度低、在线原位等优点。其基本原理是:气溶胶吸收光辐射加热了气溶胶粒子及其周围空气,导致气溶胶粒子周围空气的折射率变化,通过干涉方法测量气溶胶粒子周围空气的折射率来确定气溶胶吸收系数。H. B. Lin 和 A. J. Campillo 及其合作者研究了用 Mach-Zehnder 热光干涉法测量大气气溶胶的吸收^[16-17]。M. A. Owens 等实现了光热干涉法测量硫酸铵气溶胶的吸收系数^[18-20],但由于光热干涉法存在振动敏感性等问题,多年来一直没有进展。最近,美国布克海文国家实验室(Brookhaven National Laboratory)的 A. J. Sedlacek 在 NASA 大气成分项目、美国能源部等项目支持下在光热干涉法测量气溶胶吸收方面取得了很大进展,采用折返式干涉结构克服了光热干涉测量中的振动敏感问题,并在实验室和野外进行了测量实验^[21]。

本文主要研究一种低成本的光热干涉测量气溶胶吸收系数方法,分析了 2 种不同探测方式下

所能达到的探测限,并提出了通过增加作用区个数提高探测限的方法。

2 大气气溶胶光热吸收原理

光热干涉方法是指激光通过大气气溶胶产生吸收,导致气溶胶粒子温度升高,并向周围空气辐射热量,导致粒子周围空气的折射率由于温度升高而发生变化。气溶胶粒子吸收光能量导致温度升高可以用热传导方程来描述,C. H. Chan 建立了气溶胶吸收引起的温度升高的数学模型^[22]。假设 c_a , ρ_a 分别为空气的热容,密度, c_p 和 ρ_p 是气溶胶粒子的热容和密度, a 是粒子半径, I 是光强, Q_{abs} 为气溶胶吸收效率因子, P_{exc} 为激发光功率,并且在作用区域内是均匀的。设激发光束半径为 A ,作用区长度为 l ,激发光以频率 $f = 1/2\delta t$ 调制, δt 大于热平衡时间,则半个周期内达到热平衡时的温度变化为:^[19]

$$\Delta T = \frac{P_{\text{exc}}}{2\pi A^2 \rho_a c_a f} \alpha, \quad (1)$$

上式推导了大气气溶胶吸收光能量后,周围空气温度的变化关系。对于一般物质,根据分子的极化率和温度^[23],及极化率和折射率^[24],得到温度变化和折射率变化间的关系^[17]:

$$\Delta n = -(n-1) \frac{\Delta T}{T}, \quad (2)$$

上式为热光效应(即温度变化引起折射率变化)公式,由公式(1)和(2)可推导出热光干涉的气溶胶吸收系数和空气折射率的关系。

3 干涉测量方法

气溶胶吸收使粒子周围空气膨胀和密度变化,导致空气折射率的变化。这种折射率变化可以用光学干涉仪测量得到^[24-25]。根据光电探测器的平方律特性,输出光电流为:

$$i(t) = \frac{e\eta}{h\nu} \left\{ A_{\text{ref}}^2 + A_{\text{probe}}^2 + 2A_{\text{ref}} A_{\text{probe}} \left[\cos(\phi_{\text{probe}} - \phi_{\text{ref}}) \cos \Delta\phi(t) - \sin(\phi_{\text{probe}} - \phi_{\text{ref}}) \sin \frac{2\pi\Delta n l}{\lambda} \right] \right\}, \quad (3)$$

式中: E 为信号光的电场, A 为幅度, ϕ_{probe} 为测量臂的初始相位, ϕ_{pref} 为参考臂的初始相位, e 为电子电量, $h\nu$ 为光子能量, η 为探测器量子效率。式(3)的 A_{ref}^2 、 A_{probe}^2 、参考臂光功率、探测臂光功率为直流项,一般在测量中电路滤波消除;第三、四项是相位变化的余弦项和正弦项。由此,对应两种探测方式:在相位变化很小($\Delta\phi(t) \ll 1$)时,用干涉仪正交状态下探测;在相位变化较大时,用干涉条纹细分探测。

4 光热低相干干涉测量方法研究

4.1 低相干测量方案

对于气溶胶光热干涉法中的干涉结构,早期采用 Mach-Zehnder 干涉仪,但其应用受到振动灵敏度等问题的限制^[17]。H. Moosmüller 和 W. P. Arnott 提出了一种折返式 Jamin 干涉仪,其抗干扰性成功地解决了实际使用中的问题^[25]。Arthur J. Sedlacek 使用折返式 Jamin 干涉仪在正交状态下测量大气气溶胶的吸收系数^[21,25],但其测量范围受到一定限制。

本文提出采用超辐射发光二极管(Super Luminescent Diode, SLD)偏振折返式 Jamin 干涉仪(SLD Polarization Folded Jamin Interferometer, SPFJI),光路结构如图所示。这种方法的特点主要有两个:一是光源 SLD 采用自发辐射放大的半导体器件,频率特性无须稳频,成本和体积比稳频

HeNe 气体激光要小,故可降低激光稳频的要求,从而降低成本;另外一个采用干涉条纹细分探测方案,不仅扩大了大气气溶胶吸收系数的测量范围,而且更便于使用。偏振主要是实现辨向和细分,折返式干涉仪还具有不振动和对转动不敏感等优点。

为了便于分析 SPFJI 的输出,先假设 SLD 的谱分布是高斯分布,可以写成如下形式:

$$B(\sigma) = \frac{B_0}{\sigma'\sqrt{2\pi}} \exp[-(\sigma - \sigma_0)/2\sigma']^2, \quad (4)$$

其中: B_0 是常数, $\sigma_0 = \frac{1}{\lambda}$ 是平均波数, σ' 是波数均方差,则式(3)的光电流输出又可以写成:

$$i(t) \propto 2 \frac{e\eta}{h\nu} B_0 \exp\left[-\frac{1}{2}(2\pi\sigma'\Delta nl)^2\right] \cos \frac{2\pi\Delta nl}{\lambda}. \quad (5)$$

从上式可以看出,低相干干涉的光电流输出和激光干涉具有类似的输出形式。这 2 种技术的区别在于低相干干涉存在一个零光程的位置,可测量气溶胶吸收引起的折射率的绝对变化,而激光干涉测量却没有。在实际测定中,需要对温度引起的偏移进行修定,因为采用低相干干涉存在干涉条纹的绝对零位,这种温度变化引起的偏移可以由每次测量前条纹的移动量来确定,易实现温度校正。有关温度校正等问题还有待进一步研究。

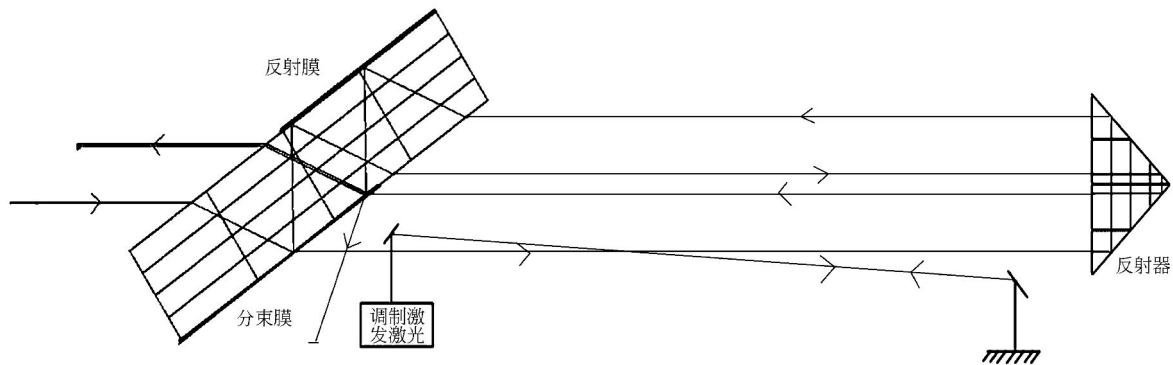


图 1 光热干涉气溶胶吸收系数测量方法

Fig. 1 Framework of aerosol absorption measurement with photothermal interferometry

4.2 探测方法和灵敏度分析

光热干涉气溶胶吸收测量的探测限根据式(3)来确定。根据 $\Delta\phi(t)$ 的变化,分两种情况进行

讨论:

$$(1) \text{ 当相位变化很小 } \Delta\phi(t) = \frac{2\pi\Delta nl}{\lambda} \ll 1 \text{ 时}$$

对于 $\Delta\phi(t) \ll 1$, 为了获得最大的灵敏度, 调整光程使得干涉仪的光程差在 $\phi_{\text{probe}} - \phi_{\text{ref}} = (2n+1)\frac{\pi}{2}$, 并设干涉仪两臂光强相等, 有 $P_0 = 2A_{\text{ref}}^2 = 2A_{\text{probe}}^2$, 则式(3)变成:

$$i(t) \propto \frac{e\eta}{h\nu} P_0 \sin[\Delta\phi(t)]. \quad (6)$$

由上式可得信噪比表达式:

$$\text{SNR} = \frac{i_{\text{sig}}^2}{i_{\text{noise}}^2} = \frac{(e\eta/h\nu)^2 P_0^2 \Delta\phi^2}{2e(e\eta/h\nu) P_0 \Delta f} = \frac{\eta P_0 \Delta\phi(t)^2}{2h\nu \Delta f}, \quad (7)$$

通过上式, 并设 $\text{SNR}=1$, 可得干涉仪可探测的最小相位变换为:

$$\delta\phi_{\text{min}}(l) = \sqrt{\frac{2h\nu \Delta f}{\eta P_0}}, \quad (8)$$

可以看出灵敏度与光电探测器带宽成反比。举例来说, 若干涉仪采用 1 mW 的 632.8 nm 的激光, 探测效率为 0.6, 带宽为 1 Hz, 则最小可探测相位变化约为 3×10^{-8} rad。通过锁相放大可以增加信号探测的带宽。

对于气溶胶的光热效应, 干涉仪相位变化表示为 $\delta\phi(t) = \frac{2\pi\Delta nl}{\lambda}$, 结合式(1)、(2)、(8), 可得:

$$\delta\phi(t) = \frac{2\pi(n-1)l}{\lambda T_{\text{abs}}} \frac{\alpha P_{\text{exc}}}{2\pi A^2 \rho_a c_a f}, \quad (9)$$

由上式可得光热气溶胶吸收系数的表达式:

$$\alpha = \frac{2\pi A^2 \rho_a c_a f}{P_{\text{exc}}} \frac{\lambda T_{\text{abs}}}{2\pi(n-1)l} \delta\phi(t), \quad (10)$$

则最小可探测的吸收系数为^[19]:

$$\alpha_{\text{min}} = \frac{2\pi A^2 \rho_a c_a f}{P_{\text{exc}}} \frac{\lambda T_{\text{abs}}}{2\pi(n-1)l} \sqrt{\frac{2h\nu \Delta f}{\eta P_0}}, \quad (11)$$

上式为光热干涉测量吸收系数所能得到的最小探测限, 其典型值为:

$n-1 = 2.73 \times 10^{-4}$, $P_{\text{exc}} = 0.5 \text{ W}$, $\pi A^2 = 3 \times 10^{-6} \text{ m}^2$, $\rho_a = 2.3 \text{ kg/m}^3$, $c_a = 1 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$, $T = 300 \text{ K}$, $f = 100 \text{ Hz}$, $l = 1 \text{ cm}$ 。为探测 10^{-7} m^{-1} 气溶胶吸收系数, 干涉系统探测的温度幅度为 70 nK, 折射率变化为 6×10^{-14} 。这种探测方法虽然能取得很高的灵敏度, 但是探测上限很小, 仅适合极微弱吸收的气溶胶测量。

(2) 当相位变化 $\Delta\phi(t) = \frac{2\pi\Delta nl}{\lambda}$ 较大时

由于相位变化 $\Delta\phi(t)$ 较大, 使得干涉仪的初始相位差 $\phi_{\text{probe}} = \phi_{\text{ref}}$, 并设干涉仪两臂光强相等, 有 $P_0 = 2A_{\text{ref}}^2 = 2A_{\text{probe}}^2$, 且有 $\delta\phi(t) = \frac{2\pi\Delta nl}{\lambda}$, 则式(3)变成:

$$i(t) = \frac{e\eta}{h\nu} [P_0^2 + 2P_0 \cos \frac{2\pi\Delta nl}{\lambda}], \quad (12)$$

上式为干涉仪光电流与折射率变化的关系。通过干涉仪输出的这种条纹变化也可以探测折射率的变化。这种吸收系数用折射率变化表示:

$$\alpha = \frac{2\pi A^2 \rho_a c_a f}{P_{\text{exc}}} \frac{T_{\text{abs}}}{(n-1)} \Delta n. \quad (13)$$

干涉条纹细分变相方法常用来探测微小位移变化。微小位移变化和本方法中的折射率变化都可以归结为光程差 nl 的变化。目前流行的干涉仪用光学细分产生 4 路相位差为 $\lambda/4$ 的正交信号。通过电路细分理论上可实现 200 细分, 也就是 $\lambda/800$ 的光程变化。如果取作用区长度为 1 cm, 则可探测折射率变化可达到约 8×10^{-8} , 吸收系数的探测限可以达到 $1 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ 。对于 $10^{-7} \sim 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ 的吸收系数, 可以采用增加作用区长度或增加作用区个数方法得到。

4.3 提高探测限的新方法

假设光热作用区的个数为 m , 则低相干干涉仪的相位变化为:

$$\Delta\phi(t) = m \frac{2\pi\Delta nl}{\lambda}, \quad (14)$$

干涉测量方法的灵敏度将提高 m 倍。式(13)可写成:

$$\alpha = m \frac{2\pi A^2 \rho_a c_a f}{P_{\text{exc}}} \frac{T_{\text{abs}}}{(n-1)} \Delta n. \quad (15)$$

因此, 通过增加光热作用区个数, 吸收系数的灵敏度提高了 m 倍。如可以增加作用区个数为 5, 则吸收系数的探测限提高 5 倍。通过干涉条纹移动, 可以实现很大范围内的气溶胶吸收系数测量。探测上限与激发激光功率、作用区距离等因素有关。

此外, 要注意的是光热干涉测量气溶胶吸收系数的时间, 受到气溶胶达到热平衡时间的限制。在达到热平衡前, 被气溶胶吸收的光能主要用于加热气溶胶(由于气溶胶有热容的存在), 故激发激光的频率 $f = 1/(2\delta t)$ 一定要小于达到热平衡的时间 $\tau(a) = a^2 \rho_p c_p / 3\kappa_a$ 的 2 倍的倒数。由于气溶胶测量一般是慢过程, 所需时间响应都比热平衡的时间长, 故在一般研究和观测中易达到上述要求。从式(13)可以看出, 影响吸收系数测量准确度的因素, 除了与测量折射率变化的干涉仪有关外, 还与温度、激发光功率、空气折射率、空气密度、空气热容等因素有关。温度的影响通过观测

条纹移动来消除。空气折射率、空气密度、空气热容等影响通过调制激发激光功率在两个半周期内的测量数值之差来消除,激发光功率起伏可以采用高稳光源或监控光功率修正来消除。采用折返式 Jamin 干涉仪结构,对震动和转动基本不敏感。有关长时间工作状态下干涉仪的稳定性和环境适应性等还需要进一步研究。

5 结 论

本文系统地研究了光热低相干干涉气溶胶吸

收测量方法的模型,分析了两种不同探测方式下气溶胶吸收系数的探测限:在相位变化很小的情况下干涉仪正交状态下的探测灵敏度可达 $1 \times 10^{-7} \text{ m}^{-1}$;在干涉仪初始相位相同的情况下,通过条纹辨向和细分探测理论灵敏度可达 $1 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$;通过增加光热作用区个数 m ,可使探测灵敏度提高 m 倍。文中对各种误差来源也进行了分析,目前课题组正在开展进一步的理论和实验研究工作。

参考文献:

- [1] GADHAVI H, JAYARAMAN A. Absorbing aerosols: contribution of biomass burning and implications for radiative forcing[J]. *Am. Geophys*, 2010, 28(1):103-111.
- [2] STIER P, SEINFELD J H, KINNE S. Aerosol absorption and radiative forcing[J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2007, 7:5237-5261.
- [3] MOOSMÜLLER H, CHAKRABARTY R K, ARNOTT W P. Aerosol light absorption and its measurement: a review[J]. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 2009, 110(11):844-878.
- [4] 黄书华,刘建国,刘文清,等. 高速大容量气溶胶粒子分类计数存储器的设计[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(1):15-20.
HUANG SH H, LIU J G, LIU W Q, *et al.*. Design of high-speed and large-capacity classifying count storages for aerosol particles[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1):15-20. (in Chinese)
- [5] 李学彬,黄印博,徐赤东,等. 厦门地区气溶胶折射率的测量[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(10):1831-1835.
LI X B, HUANG Y B, XU CH D. Measurement of refractive index for aerosol particle in Xiamen[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(10):1831-1835. (in Chinese)
- [6] 王刚,禹秉熙. 基于对比度的空中红外点目标探测距离估计方法[J]. *光学精密工程*, 2002, 10(3):276-280.
WANG G, YU B X. Approach to estimate infrared point target detection range against sky background based on contrast[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(3):276-280. (in Chinese)
- [7] BOND T C, ANDERSON T L, CAMPBELL D. Calibration and intercomparison of filter-based measurements of visible light absorption by aerosols[J]. *Aerosol Science and Technology*, 1999, 30:582-600.
- [8] 杨小丽,罗九强,王俊波. 大气气溶胶粒子光吸收系数的测量[J]. *强激光与粒子束*, 2003, 15(6):543-546.
YANG X L, LUO J Q, WANG J B. Measurement of the absorption coefficient of light by aerosol particles in atmosphere[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15, (6):543-546. (in Chinese)
- [9] ANDERSON T L, MASONIS S J, COVERT D S, *et al.*. Variability of aerosol optical properties derived from in situ aircraft measurements during aceasia[J]. *J. Geophys. Res.*, 2003, 108 (D23):ACE15-1-19.
- [10] WEINGARTNER E, SAATHOFF H, SCHNAITNER M, *et al.*. Absorption of light by soot particles: determination of the absorption coefficient by means of aethalometers[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2003, 34(10):1445-1463.
- [11] PETZOLD A, SCHÖNLINER M. Multi-angle absorption photometry—a new method for the measurement of aerosol light absorption and atmospheric black carbon[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2004, 35(4):421-441.
- [12] STRAWA A W, CASTANEDA R, OWANO T, *et al.*. The measurement of aerosol optical properties using continuous wave cavity ring-down techniques

- [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2003,20:454-465.
- [13] REY J M, MARINOV D, VOGLER DE, *et al.*. Investigation and optimisation of a multipass resonant photoacoustic cell at high absorption levels [J]. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 2005,80(2):261-266.
- [14] STEPHENS M, TURNER N, SANDBERG J, *et al.*. Particle identification by laser-induced incandescence in a solid-state laser cavity[J]. *Applied Optics*, 2003,42(19):3726-3736.
- [15] MICHELSEN H A, LIU F, KOCK B F, *et al.*. Modeling laser-induced incandescence of soot: a summary and comparison of LII models[J]. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 2007,87(3):503-512.
- [16] CAMPILLO A J, LIN H B. Method and apparatus for aerosol particle absorption spectroscopy: U. S. Patent,4415265[P]. 1983.
- [17] LIN H B, CAMPILLO A J. Photothermal aerosol absorption spectroscopy [J]. *Applied Optics*, 1985,24:422-433.
- [18] MAZZONI D L, DAVIS C C. Trace detection of hydrazines by optical homodyne interferometry [J]. *Applied Optics*, 1991,30(7):756-764.
- [19] MOOSMÜLLER H, ARNOTT W P, ROGERS C F. Methods for real-time, in site measurement of aerosol light absorption[J]. *Journal of The Air & Waste Management Association*, 1997,47:157-166.
- [20] OWENS M A, DAVIS C C, DICKERSON R R. A photothermal interferometer for gas-phase ammonia detection [J]. *Anal. Chem.*, 1999, 71: 1391-1399.
- [21] SEDLACEK A, LEE J. Photothermal interferometric aerosol absorption spectrometry[J]. *Aerosol Science and Technology*, 2007, 41: 1089-1101.
- [22] CHAN C H. Effective absorption for thermal blooming due to aerosols[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1975, 26:628.
- [23] JACKSON J D. *Classical Electrodynamics*[M]. Wiley, 1962:121-123.
- [24] BORN M, WOLF E. *Principles Of Optics*[M]. 7th. Ed. . Chinese Version. Publishing House Of Electrics Industry,1999,79-81.
- [25] MOOSMÜLLER H, ARNOTT W P. Folded jamin interferometer: a stable instrument for refractive-index measurement[J]. *Optics Letters*, 1996,21(6):438-440.

作者简介:



李保生(1974—),男,甘肃武威人,博士,副研究员,2001年于中国科学院安徽光学精密机械研究所获得硕士学位,2006年于中国科学院合肥物质科学研究院获得博士学位,主要从事大气探测与大气遥感、光学干涉及成像技术研究。E-mail: libaosheng@hfut.edu.cn



李正强(1977—),男,河南洛阳人,研究员,2005年于中国科学院合肥物质科学研究院获得博士学位,2009年入选中国科学院百人计划,主要从事环境遥感、气溶胶观测等研究。E-mail: lizq@irsa.ac.cn



纪峰(1981—),男,安徽利辛人,博士,讲师,2002年、2005年、2008年于天津大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事激光光源及测量技术的研究。E-mail: jifeng@hfut.edu.cn



周海洋(1987—),男,山东济宁人,硕士研究生,2009年于山东科技大学获得学士学位,主要从事光学干涉测量技术的研究。E-mail: hyayh@163.com