

基于取样光纤布拉格光栅的全光纤拉曼测温分光系统设计及优化

巩鑫 华灯鑫 李仕春 王骏 石晓菁

Design and optimization of all-fiber rotational Raman spectroscope for temperature measurement based on sampled fiber Bragg grating

Gong Xin Hua Deng-Xin Li Shi-Chun Wang Jun Shi Xiao-Jing

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 65, 073601 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.073601

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.073601>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I7>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种自适应光学系统响应矩阵的直接计算方法

[Direct computation of the interaction matrix of adaptive optical system](#)

物理学报.2014, 63(14): 149501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.149501>

自适应光学系统倾斜校正回路的最优闭环带宽

[Optimal closed-loop bandwidth of tip-tilt correction loop in adaptive optics system](#)

物理学报.2014, 63(6): 069502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.069502>

大气湍流三维波前探测模式层析算法分析

[Analysis of modal tomography for three-dimensional wavefront sensing of atmosphere turbulence](#)

物理学报.2013, 62(16): 169501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.169501>

快速响应的硅基纯相位液晶器件对动态大气湍流波前的校正能力研究

[Dynamic wavefront correction with a fast liquid-crystal on silicon device of pure phase](#)

物理学报.2012, 61(8): 089501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.089501>

相位差波前检测方法应用于平移误差检测的实验研究

[Experimental study on phase diversity wavefront sensing technology in piston error detection](#)

物理学报.2012, 61(6): 069501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.069501>

基于取样光纤布拉格光栅的全光纤拉曼测温分光系统设计及优化*

巩鑫 华灯鑫[†] 李仕春 王骏 石晓菁

(西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 西安 710048)

(2015年10月16日收到; 2016年1月20日收到修改稿)

为实现大气温度全天时和高精度主动遥感探测, 转动拉曼测温激光雷达的分光系统需要滤除强烈的背景光噪声, 以及对 Mie-Rayleigh 散射提供 70 dB 以上的带外抑制率. 本文提出了以可见光波段取样光纤布拉格光栅为核心的多级级联的特征光谱提取光路, 构建高抑制率的全光纤拉曼测温分光系统, 以实现大气温度的全天时和高精度探测. 根据分光系统光路的传输特性, 采用传输矩阵模型, 优化设计了影响取样光纤布拉格光栅带外抑制率的主要因素 (折射率调制深度、栅区总长度、取样周期和占空比), 得到了优化的光谱分光系统参数. 利用该分光系统可实现太阳背景光强度和 Mie-Rayleigh 散射信号强度分别比转动拉曼散射信号强度弱 40 dB 和 50 dB, 信噪比高于 100 时, 白天探测高度可达 1.6 km. 该全光纤分光系统具有小型化、抗干扰和稳定性高的优点, 可为陆基及星载拉曼测温激光雷达提供一种全新的解决方案.

关键词: 转动拉曼光谱, 拉曼激光雷达, 大气温度, 取样光纤布拉格光栅

PACS: 36.20.Ng, 95.75.Qr, 92.60.hv, 07.60.Rd

DOI: 10.7498/aps.65.073601

1 引言

大气温度是描述大气状态的基本参数之一^[1], 反演相对湿度廓线和研究大气污染物扩散问题都需要对大气温度的高精度、高时空分辨率观测^[2-4]. 1972年, Coony^[5]提出了利用大气中氮气分子的转动拉曼信号与温度的相关性探测大气温度的原理, 全天时和高时空分辨率的拉曼测温激光雷达技术受到广泛关注与研究^[6,7]. 利用转动拉曼测温技术可实现近地面至 30 km 以上大气温度探测, 是研究大范围大气波动现象及微观物理特性的重要前提^[6]. 由于拉曼散射截面相对 Mie-Rayleigh 散射要小 3—4 个数量级, 高精度大气温度的探测一方面需要大的激光能量和望远镜接收系统, 另一方面需要对强烈的 Mie-Rayleigh 散射信号进行 7 个数量级以上的抑制^[8], 从而提取出微弱的转动拉曼谱

线. 这就要求拉曼激光雷达的分光系统具有极高的带外抑制能力, 实际中通过观测经过云层的激光雷达回波信号特征, 确保拉曼分光系统的带外抑制能力^[8-10]. 此外, 用于全天时探测时, 还需要考虑对太阳背景光进行有效的滤除^[11-16]. 因此, 对高精度、高可靠性的拉曼分光系统的研究一直都是拉曼测温激光雷达技术的核心问题. 为此国内外研究者设计并实现了多种分光系统方案, 其核心光谱分光器件主要涉及衍射光栅、干涉滤光片、Fabry-Perot 干涉仪、原子蒸汽过滤器等块状光学滤光器^[4-7], 以实现在强背景光噪声条件下精细提取微弱转动拉曼信号 (对微弱转动拉曼信号的提取). 但其存在系统调整复杂、体积大等缺陷, 限制了空基转动拉曼激光雷达系统的发展^[17-20].

可见光波段光纤布拉格光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 技术由于具有优良的波长选择性、极

* 国家自然科学基金 (批准号: 61275185, 61308106)、陕西省自然科学基金 (批准号: 2013JM5001) 和陕西省教育厅科学研究计划专项 (批准号: 15JK1529) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: dengxinhua@xaut.edu.cn

高的光谱分辨率、小的光谱响应函数旁瓣等优点^[14-16],同时具有体积小、插入损耗低、结构紧凑、性能稳定以及易于实现全光纤连接的特点^[19-24],在光谱分光领域得到广泛研究与应用.因此,我们在前期研究中提出并实现了基于FBG的全光纤分光系统的转动拉曼激光雷达系统^[25,26],但是由于信噪比较低,夜间探测高度只有0.7 km.为提高激光雷达回波信号的信噪比,并提供白天探测能力,本文提出了在可见光谱范围内以取样光纤布拉格光栅(sampled fiber Bragg grating, SFBG)为核心的多级级联全光纤光路,对大气回波信号中Mie-Rayleigh散射信号进行7个数量级以上的抑制,以实现氮气分子高低量子数两个通道的转动拉曼信号提取,且每路拉曼通道中包含3个转动量子数的转动拉曼谱线信号以提高回波信号信噪比.通过优化设计获得了分光光路的系统参数,验证了分光系统具有极高的带外抑制能力,确保了全天时遥感探测性能.该全光纤拉曼测温分光系统的小型化和轻量化,可为陆基甚至星载激光雷达提供全新的设计思路及解决方案.

2 理 论

在拉曼测温分光系统中,单独使用FBG时,为了实现高信噪比,需要级联多组FBG^[25],因此,采用FBG和SFBG多级级联的光路结构构建高抑制率的拉曼测温激光雷达全光纤分光系统.SFBG是一种非均匀的光纤光栅,其工作原理是通过对一段均匀的FBG采用不同的取样函数调制栅区纤芯折射率,使其产生周期性变化,源信号通过栅区时,按照特定调制函数规律取样多个目标信号.因此,SFBG具有反射率高、峰-峰间隔稳定、半高谱宽窄等优点.如图1所示, Λ 为光纤光栅的周期, λ_B 为Bragg波长, n_{eff} 为光纤光栅的有效折射率, p 和 q 分别表示一个取样周期内栅区长度和非曝光区长度,则一个取样周期 $d = p + q$,占空比 $t = p/d$,取样数量 $K = L/d$.

传输矩阵法被广泛应用于非均匀光纤光栅^[21-23]的优化设计,假设SFBG中包括 M 个长度相等的近似均匀的取样周期,每个取样周期的传输特性都可表示为一个 2×2 矩阵,这些矩阵的数量积用于描述SFBG的传输特性.基于耦合模理论,利用傅里叶变换可以得到SFBG的谐振条件及

谱间距,进而得到相邻峰间的波长间隔 $\Delta\lambda$.假设相邻谐振峰对应波长分别为 λ_1 和 λ_2 ,有效折射率分别为 $n_{\text{eff}1}$ 和 $n_{\text{eff}2}$,对应的传播常数分别为 β_1 和 β_2 .由于 $n_{\text{eff}1}$ 和 $n_{\text{eff}2}$ 的差异很小,在计算中取值相等.设未取样时的谐振波长为 λ_0 ,对应的有效折射率为 n_{eff} .

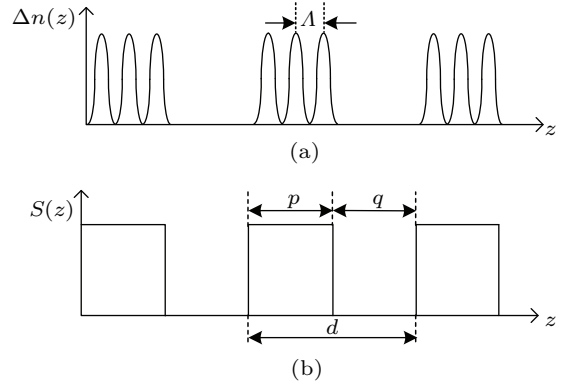


图1 SFBG折射率调制原理图 (a) SFBG; (b) 矩形取样函数

Fig. 1. Refractive index modulation of SFBG: (a) SFBG; (b) rectangular sampling function.

优化设计时,取光纤光轴方向为 z 轴,每个取样周期两端的坐标分别为 z_k 和 z'_k ($k = 1, 2, \dots, M$).一个取样周期中的特征参量可分别表示为

$$\begin{cases} p = z'_k - z_k, \\ d = z_{k+1} - z_k, \\ q = z_{k+1} - z'_k. \end{cases} \quad (1)$$

采用传输矩阵法分析SFBG时,需要附加一个相移分量 $e^{\pm j\beta z}$,光纤的前向和后向纤芯模分别为 $a = A e^{j\beta z}$ 和 $b = B e^{-j\beta z}$,传输通过第 k 个取样周期后模场振幅分别为 A_k 和 B_k ,则 z_k 处SFBG的传输矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} a(z_k) \\ b(z_k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{j\beta z_k} & 0 \\ 0 & e^{-j\beta z_k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A(z_k) \\ B(z_k) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

采用 \mathbf{F}_k 描述通过第 k 个取样周期的模场振幅,即SFBG的传输矩阵可表示为

$$\begin{bmatrix} a(z_{k+1}) \\ b(z_{k+1}) \end{bmatrix} = \mathbf{F}_k \begin{bmatrix} a(z_k) \\ b(z_k) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

$$\kappa_m = \kappa \frac{\pi p \sin(m\pi p/d)}{d} \frac{1}{m\pi p/d} e^{-j \frac{m\pi p}{d}}, \quad (4)$$

式中, κ 表示未取样时光纤光栅的耦合系数,第 m 个傅里叶分量的耦合系数通过(4)式来计算.则

SFBG 中经过 M 个取样周期后, 在坐标 z'_M 处的传输总矩阵表达式为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} a(z'_M) \\ b(z'_M) \end{bmatrix} &= \mathbf{F}_M \mathbf{F}_{M-1} \cdots \mathbf{F}_k \cdots \mathbf{F}_1 \begin{bmatrix} a(z_1) \\ b(z_1) \end{bmatrix} \\ &= \mathbf{F} \begin{bmatrix} a(z_1) \\ b(z_1) \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_k &= \begin{bmatrix} e^{j\beta z_k} & 0 \\ 0 & e^{-j\beta z_k} \end{bmatrix} \mathbf{F}'_k \begin{bmatrix} e^{-j\beta z} & 0 \\ 0 & e^{j\beta z} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} F_{11}^k & F_{12}^k \\ F_{21}^k & F_{22}^k \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (6)$$

其中,

$$\begin{cases} F_{11}^k = \left\{ \cosh [s(z'_k - z_k)] + j \frac{\delta}{s} \sinh [s(z'_k - z_k)] \right\} \\ \quad \times e^{-j\delta(z'_k - z_k)} e^{j\beta(z_{k+1} - z_k)}, \\ F_{12}^k = j \frac{\kappa}{s} \sinh [s(z'_k - z_k)] e^{-j\delta(z'_k + z_k)} e^{j\beta(z_{k+1} + z_k)}, \\ F_{21}^k = -j \frac{\kappa}{s} \sinh [s(z'_k - z_k)] e^{j\delta(z'_k + z_k)} e^{-j\beta(z_{k+1} + z_k)}, \\ F_{22}^k = \left\{ \cosh [s(z'_k - z_k)] - j \frac{\delta}{s} \sinh [s(z'_k - z_k)] \right\} \\ \quad \times e^{j\delta(z'_k - z_k)} e^{-j\beta(z_{k+1} - z_k)}. \end{cases} \quad (7)$$

取 z_1 作为坐标原点, 可以得到

$$\begin{cases} z_k = (k-1)d, \\ z'_k = (k-1)d + p, \\ z'_k + z_k = 2(k-1)d + p. \end{cases} \quad (8)$$

将 (8) 式代入 (7) 式, \mathbf{F}_k 可表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_k &= \begin{bmatrix} \mathcal{F}_{11} & \mathcal{F}_{12} \\ \mathcal{F}_{21} & \mathcal{F}_{22} \end{bmatrix}; \\ \mathcal{F}_{11} &= \left[\cosh(sp) + j \frac{\delta}{s} \sinh(sp) \right] e^{-j\delta p}, \\ \mathcal{F}_{12} &= j \frac{\kappa}{s} \sinh(sp) e^{-j\delta[2(k-1)d+p]}, \\ \mathcal{F}_{21} &= -j \frac{\kappa}{s} \sinh(sp) e^{j\delta[2(k-1)d+p]}, \\ \mathcal{F}_{22} &= \left[\cosh(sp) - j \frac{\delta}{s} \sinh(sp) \right] e^{j\delta p}. \end{aligned} \quad (9)$$

根据耦合模理论, 用 a, b 表示的 SFBG 的反射率和透射率为

$$\begin{cases} R = \left| \frac{B(z_1)}{A(z_1)} \right|^2 = \left| \frac{b(z_1)}{a(z_1)} \right|^2, \\ T = \left| \frac{A(z'_M)}{A(z_1)} \right|^2 = \left| \frac{a(z'_M)}{a(z_1)} \right|^2. \end{cases} \quad (10)$$

由 (1) 和 (8) 式可知在 z_M 处的 $b(z_{M+1}) = 0$, 由此可以得出

$$\begin{cases} b(z_1) = -\frac{F_{21}}{F_{11}} a(z_1), \\ a(z_{M+1}) = \left(F_{11} - \frac{F_{12}F_{21}}{F_{22}} \right) a(z_1). \end{cases} \quad (11)$$

由上述分析可知, SFBG 的反射率 R 和透射率 T 为

$$\begin{cases} R = \left| \frac{b(z_1)}{a(z_1)} \right|^2 = \left| \frac{B(z_1)}{A(z_1)} \right|^2 = \left| \frac{F_{21}}{F_{11}} \right|^2, \\ T = \left| \frac{A(z_{M+1})}{A(z_1)} \right|^2 = \left| \frac{a(z_{M+1})}{a(z_1)} \right|^2 \\ = \left| F_{11} - \frac{F_{12}F_{21}}{F_{22}} \right|^2. \end{cases} \quad (12)$$

综上所述, 通过建立 SFBG 的数学模型, 可对 SFBG 的光谱特性进行分析. 影响 SFBG 反射谱的主要参数有: 单模光纤有效折射率、取样光栅占空比、SFBG 总长度、取样周期、布拉格波长和折射率调制深度.

3 分光光路设计

图 2 展示了由 SFBG 和 FBG 多级级联构成的高抑制率全光纤拉曼光谱分光光路示意图, 光路中的传输介质与光纤器件由 460-HP 型可见光单模光纤构成.

首先, 回波信号经由非球面聚焦透镜耦合进入光纤; 其次, 由于高量子数信号比低量子数信号强度弱且耦合光学结构会代入附加损耗, 因此回波信号首先依次通过 FBG₁, 2 × 2 Coupler1 (C₁), SFBG₁₁, SFBG₁₂ 和 FBG₂ 来获取拉曼高量子数信号 (端口 1); 最后, 两路回波信号分别通过 SFBG_{2x} ($x = 1-4$), C₁, C₂, FBG₃ 和 FBG₄ 获取两路拉曼低量子数信号 (端口 2 和端口 3). SFBG_{2x} ($x = 1-4$) 的透射端输出信号为 Mie-Rayleigh 散射信号 (端口 4). 表 1 展示了分光光路中 SFBG 和 FBG 的主要设计参数, 其中 FBG₍₁₋₄₎ 的反射率大于 99%, 也就意味着对 Mie-Rayleigh 信号可提供 20 dB 的抑制率, 而 SFBG 的带外抑制率要求大于 30 dB, 这样每路转动拉曼信号经过两次 FBG 反射和一次 SFBG 带外抑制, 对 Mie-Rayleigh 信号可提供 70 dB 以上的抑制率. 本课题组已获得 35 dB 带外抑制率的可见光波段 FBG [26], 毛建东等 [27] 设计了 FBG₍₁₋₄₎ 的相关参数.

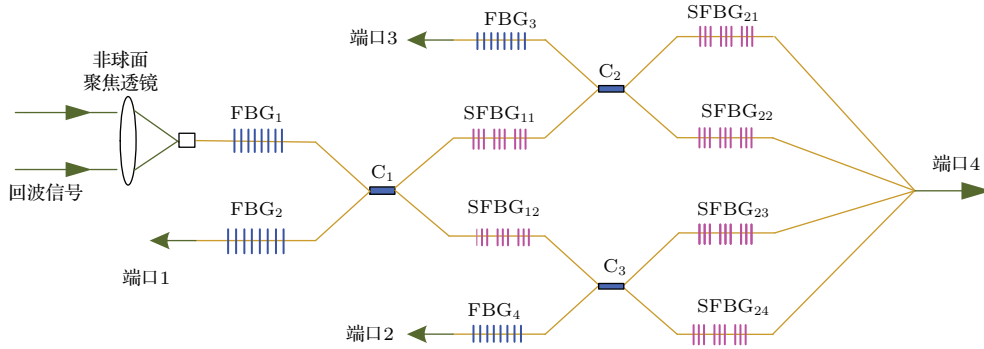


图2 由SFBG和FBG多级级联构成的高抑制率全光纤拉曼光谱分光光路示意图

Fig. 2. Experimental setup for all-fiber spectroscopy with high inhibition rate.

表1 分光光路中SFBG和FBG的主要设计参数
Table 1. Main parameters of SFBG and FBG in the experimental setup.

光纤光栅的参数	FBG ₍₁₋₄₎	SFBG ₁₍₁₋₂₎	SFBG _{2x(1-4)}
中心波长 /nm	532.0	528.07, 528.51, 528.96	530.31, 530.76, 531.21
半高全宽/nm	0.2	0.03	0.03
最大反射率/%	>99	>90	>90
带外抑制率/dB	>20	>30	>30

通过上述对SFBG性能参数的优化设计, 并且由于转动拉曼散射谱线信号比较微弱, 为保证足够的信号强度, 需要选取多条高低量子数转动拉曼散射谱线, 因此, 结合SFBG可以提取多通道信号的特点, 采用SFBG分别提取和分离出特定波长的高、低量子数转动拉曼散射谱线, 与氮气的转动拉曼谱线相匹配。

分光光路在获取转动拉曼散射高低量子数时, 需要两次经过FBG反射提高拉曼散射信噪比以及抑制Mie-Rayleigh散射。由于采用SFBG和FBG多级级联光路结构, 对于可见光波段FBG的性能参数要求大大降低。同时, 采用SFBG既能够保证滤波带宽的要求, 又可提取多条转动拉曼谱线, 进而增强高、低量子数信号的信噪比, 有利于后续系统对特征信号的处理。

4 SFBG分光仿真及全天时探测的实现

由于拉曼测温分光系统需要对Mie-Rayleigh散射信号实现70 dB以上的抑制率, 因此分光系统中SFBG的性能参数需要特殊设计, 特别是带外

抑制率。针对影响SFBG带外抑制率的主要因素折射率调制深度 $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$ 、栅区总长度 L 、取样周期 d 和占空比 r 可利用理论部分讨论的矩阵法进行优化设计, 得到最优化结果, 进而实现拉曼测温分光系统对SFBG带外抑制率的特殊需求。根据拉曼测温激光雷达发射的基频频率, 在SFBG的优化设计中采用布拉格波长和单模光纤有效折射率分别为 $\lambda_B = 528.5 \text{ nm}$ 和 $n_{\text{eff}} = 1.465$ 。根据(11)式, 图3展示了通过改变 $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$, L , d 和 r 对SFBG特征光谱反射率的影响。

根据分光光路的设计要求, 对比不同参数下SFBG的反射谱变化规律, 在SFBG性能参数的优化设计中初始值分别为 $\overline{\delta n_{\text{eff}}} = 0.00005$, $L = 20 \text{ mm}$, $d = 0.2 \text{ mm}$ 和 $r = 0.5$ 。在图3(a)中, 当 $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$ 取值为0.00002时, SFBG的3个特征光谱的反射率从左到右分别为52%, 71%和60%, 半高全宽(FWHM)分别为0.011, 0.012和0.009 nm。当 $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$ 取值为0.00005时, 3个特征光谱的反射率分别为95%, 98%和97%, FWHM分别为0.012, 0.014和0.011 nm。因此, 在栅区总长度内, $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$ 取值越大, SFBG的反射谱中每个特征光谱的反射率 R 越高, FWHM越大。然而, 反射光谱具有红移趋势, 旁瓣干扰增大, 进而影响带外抑制率。相邻峰-峰间距 $\Delta\lambda$ 不变。

在图3(b)中, 当 L 取值为10 mm时, 3个特征光谱的反射率分别为65%, 81%和76%, FWHM分别为0.020, 0.022和0.021 nm。当 L 取值为20 mm时, 3个特征光谱的反射率分别为95%, 99%和97%, FWHM分别为0.018, 0.020和0.019 nm。因此, SFBG的栅区总长度越长, 特征光谱的反射率越高, 而该措施对带外抑制率影响较小, 虽然这样会增加光信号传输的群时延, 但激光雷达系统中可

忽略其影响. 因此, 通过增加SFBG的长度来提高分光系统的性能是可行的.

在图3(c)中, 当 d 取值为0.2 mm时, SFBG只存在两个反射峰, 反射率分别为94%和99%, FWHM都为0.013 nm. d 取值为0.4 mm时, SFBG的3个反射峰的反射率分别为95%, 99%和99%, FWHM分别为0.013, 0.012和0.013 nm. 表明取样周期 d 的取值基本不影响取样光栅的反射峰谱宽和反射率的大小, 但是取样周期越小, 相邻反射峰的间距越大.

在图3(d)中, r 取值0.3时, SFBG的4个反射峰的反射率分别为80%, 87%, 90%和89%, FWHM分别为0.009, 0.010, 0.012和0.012 nm. r 取值0.7

时, SFBG的4个反射峰的反射率分别为66%, 99%, 99%和36%, FWHM分别为0.008, 0.025, 0.022和0.007 nm. 表明随着SFBG的占空比 r 的增大, 反射谱中间主峰的反射峰谱宽、反射峰间距和反射率 R 均增大, 占空比 r 取值越小, 反射峰数目越多.

在SFBG性能参数的优化设计中, 通过增加 $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$, L 或 r 均可提高特征光谱的反射率. 然而, 改变占空比 r 会引起反射谱中心波长改变. 因此, 通过优化 $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$ 和 L 可获得高的特征光谱的反射率. 反射谱FWHM和相邻峰-峰间距可通过优化 d 和 r 获得. 在优化过程中由于改变SFBG性能参数引起的反射谱中心波长漂移, 可通过微调中心波长 λ_B 进行矫正.

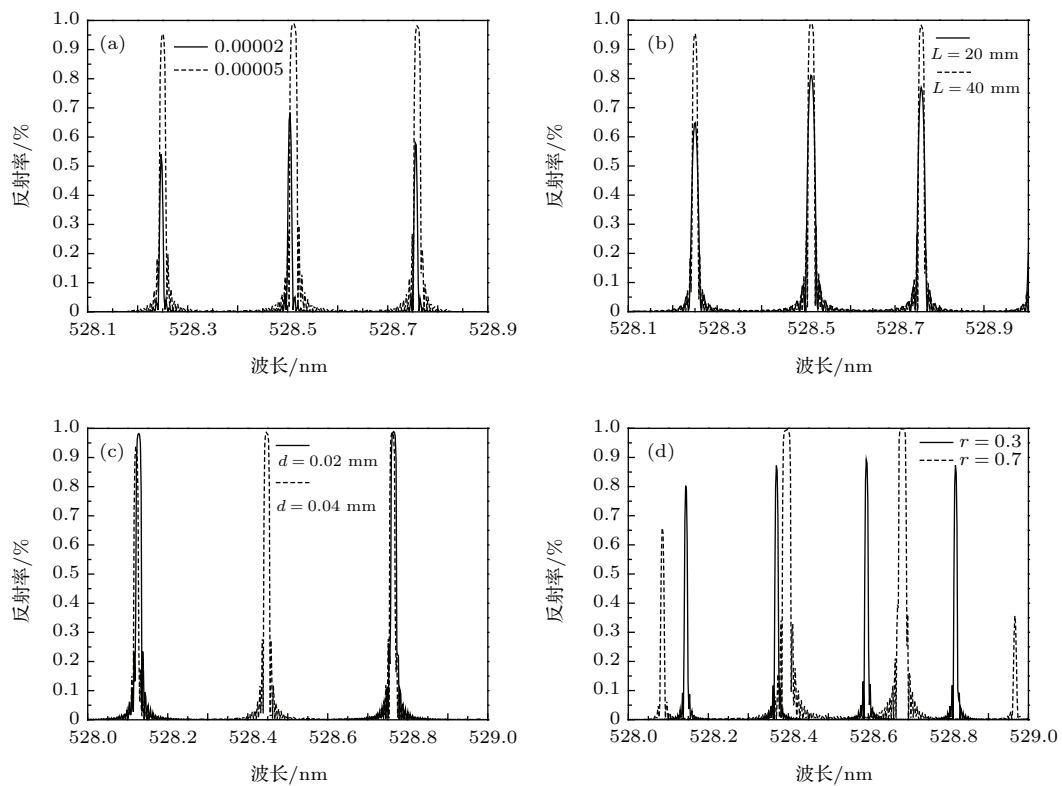


图3 改变SFBG性能参数对特征光谱反射率的影响 (a) 改变 $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$; (b) 改变 L ; (c) 改变 d ; (d) 改变 r

Fig. 3. Effects on the reflectivity of characteristic spectrum by varying parameters of SFBG: (a) $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$; (b) L ; (c) d ; (d) r .

图2中SFBG₁的优化参数为: $\lambda_B = 528.51$ nm, $n_{\text{eff}} = 1.465$, $\overline{\delta n_{\text{eff}}} = 0.00005$, $L = 20$ mm, $d = 0.4$ mm和 $r = 0.8$, 则SFBG₁的反射谱如图4所示.

图4(a)显示了SFBG₁的反射谱中3个反射峰的中心波长分别为528.07, 528.51和528.96 nm, 转动量子数 J 为10, 12和14时, 转动拉曼的散射截面基本满足设计要求. 中间反射峰的反射率为97%, 由于其为主反射峰, 反射率虽然明显高

于其他反射峰, 但其谱宽为0.032 nm, 略大于设计要求; 而左右两个反射峰的反射率均小于90%, 反射峰谱宽均小于0.03 nm, 达到提高信噪比的目的. 图4(b)在532 nm处, SFBG₁的抑制率约为 5×10^{-4} , 优于表1中设计要求的30 dB带外抑制率. 因此, SFBG₁的性能参数可达到精细分光系统的要求.

SFBG₂优化参数为: $\lambda_B = 530.76$ nm, $n_{\text{eff}} = 1.465$, $\overline{\delta n_{\text{eff}}} = 0.00005$, $L = 20$ mm, $d = 0.4$ mm和

$r = 0.8$, 则 SFBG₂ 的反射谱如图 5 所示.

图 5(a) 显示的 3 个反射峰中心波长分别为 530.31, 530.76, 531.21 nm, 转动量子数 J 为 20, 22 和 24 时, 转动拉曼的散射截面面积满足设计要求. 中间反射峰的反射率为 99%, 其谱宽为 0.032 nm, 略大于设计要求; 第一峰和第三峰反射率分别为 97% 和 73%, 两峰的 FWHM 均小于 0.03 nm, 优于设计要求. 图 5(b) 中, 在 532 nm 处 SFBG₂ 的抑制率为 2×10^{-4} , 大于表 1 中设计要求的 30 dB 带外抑制率. 综上所述, SFBG₂ 的性能参数满足精细分光系统的要求.

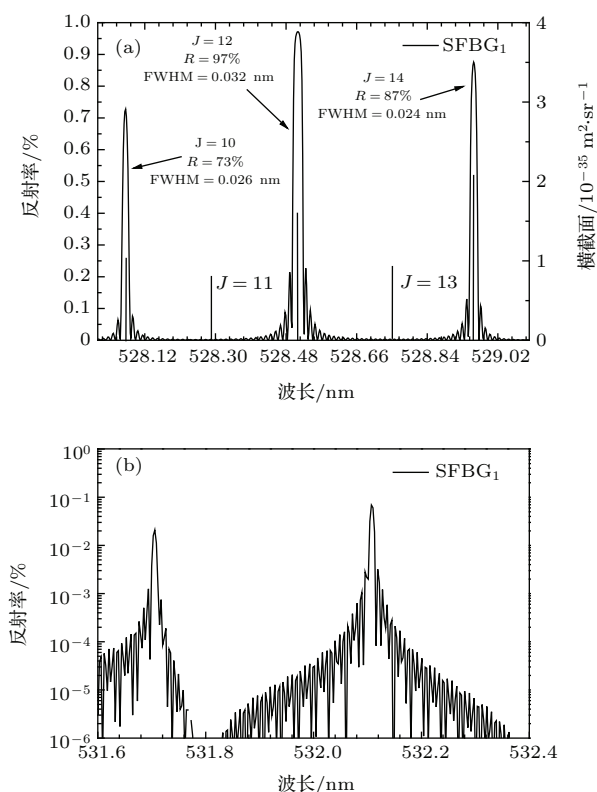


图 4 可见光波段 SFBG₁ 反射谱线仿真结果 (a) SFBG₁ 的 3 个反射峰; (b) SFBG₁ 在 532 nm 处的抑制率

Fig. 4. Simulation results of reflectance spectrum of SFBG₁ in visible light: (a) Three reflection peaks of SFBG₁; (b) inhibition rate of SFBG₁ at 532 nm.

图 6(a) 显示了在低于 3 km 高度范围内, 利用图 2 所示分光光路可实现太阳背景光强度和 Mie-Rayleigh 散射信号强度分别比转动拉曼散射信号强度弱 40 dB 和 50 dB. 因此, 该分光光路可实现背景光噪声的滤除以及特征信号的有效提取, 为反演大气温度廓线提供保障.

在图 6(b) 中, 当信噪比达到 100 时, 白天探测高度为 1.6 km, 夜间随着环境背景光的减少, 最高探测高度可达 2.6 km.

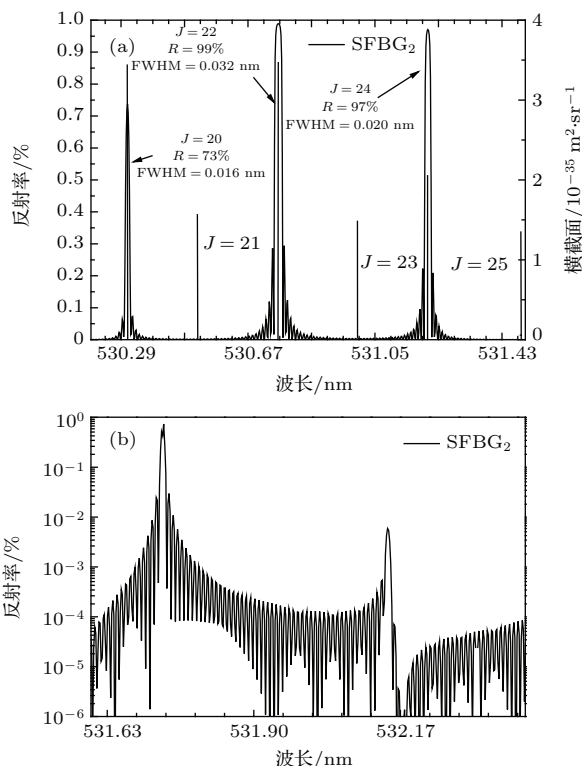


图 5 可见光波段 SFBG₂ 反射谱线仿真结果 (a) SFBG₂ 的 3 个反射峰; (b) SFBG₂ 在 532 nm 处的抑制率

Fig. 5. Simulation results of reflectance spectrum of SFBG₂ in visible light: (a) Three reflection peaks of SFBG₂; (b) inhibition rate of SFBG₂ at 532 nm.

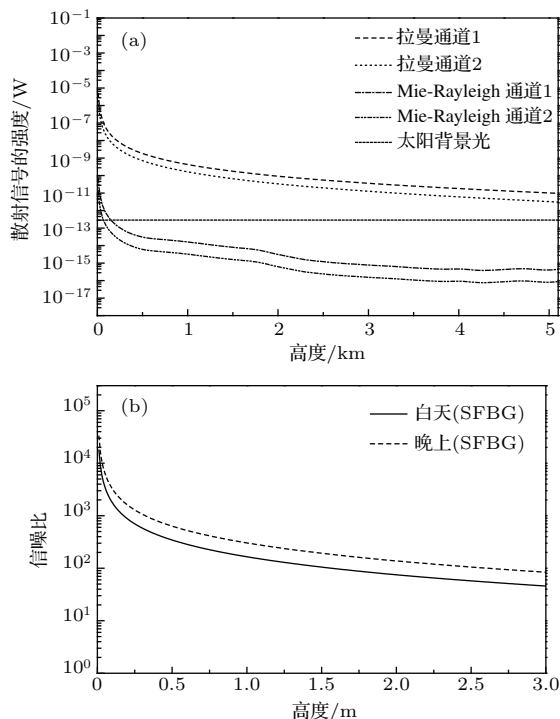


图 6 仿真结果 (a) 双通道中回波信号与探测高度高度的仿真结果; (b) 信噪比的仿真结果

Fig. 6. Simulation results: (a) Return signal vs. detection heights in dual-channels; (b) signal-noise ratio vs. detection heights.

5 结 论

针对拉曼测温激光雷达实现全天时和高精度探测的需求,设计了以SFBG为核心的多级级联光路的全光纤拉曼测温激光雷达分光系统,克服了单独使用可见光波段FBG需要多组串联的缺点.结合多级级联光路的传输特性,利用传输矩阵模型优化设计了影响SFBG带外抑制率的主要因素(折射率调制深度、栅区总长度、取样周期和占空比),并获得了高抑制率型SFBG的优化参数.分析表明,利用该分光系统可实现太阳背景光强度和Mie-Rayleigh散射信号强度分别比转动拉曼散射信号强度弱40 dB和50 dB,信噪比高于100时,白天探测高度可达1.6 km,夜晚探测高度可以达到2.6 km.同时,本文设计的全光纤拉曼测温激光雷达分光系统具有小型化、抗干扰和稳定性高的优点使大气探测激光雷达系统具备成为卫星载荷的条件.

参考文献

- [1] Girolamo P D, Behrendt A, Wulfmeyer V 2006 *Appl. Opt.* **45** 2474
- [2] Liu Y, Wang L S, Tao P L, Feng S C, Yin G L, Ren W H, Tan Z W, Jian S S 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 024207 (in Chinese) [刘艳, 汪磊石, 陶沛琳, 冯素春, 尹国路, 任文华, 谭中伟, 简水生 2011 物理学报 **60** 024207]
- [3] Tang B H, Wang N, Qian Y G 2012 *Geosciences and Remote Sensing Symposium* Munich, Germany, July 22–27, 2012 pp2482–2485
- [4] Li S C, Hua D X, Wang L, Song Y H 2013 *Optik* **124** 1450
- [5] Cooney J 1972 *J. Appl. Meteorol.* **11** 108
- [6] Li Y J, Song S L, Li F Q, Cheng X W, Chen Z W, Liu L M, Yang Y, Gong S S 2015 *Chinese J. Geophys.* **58** 2294 (in Chinese) [李亚娟, 宋沙磊, 李发泉, 程学武, 陈振威, 刘林美, 杨勇, 龚顺生 2015 地球物理学报 **58** 2294]
- [7] Zhang Y C, Chen W, Sun S L, Meng Z 2015 *Chin. Phys. B* **24** 094209
- [8] Wang Y F, Gao F, Zhu C X, He T Y, Hua D X 2015 *Acta Opt. Sin.* **35** 03280004 (in Chinese) [王玉峰, 高飞, 朱承炫, 何廷尧, 华灯鑫 2015 光学学报 **35** 03280004]
- [9] Andreas B, Takuji N, Michitaka O, Rudolf B, Toshitaka T 2002 *Appl. Opt.* **36** 7657
- [10] Wang H W, Hua D X, Wang Y F, Gao P, Zhao H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 120701 (in Chinese) [王红伟, 华灯鑫, 王玉峰, 高朋, 赵虎 2013 物理学报 **62** 120701]
- [11] Borovoi A, Konoshonkin A, Kustova N, Okamoto H 2012 *Opt. Express* **20** 28222
- [12] Ren X Y, Tian Z S, Sun L J, Fu S Y 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 164209 (in Chinese) [任秀云, 田兆硕, 孙兰君, 付石友 2014 物理学报 **63** 164209]
- [13] Wang X, Huang J P, Zhang R D, Chen B, Bi J R 2010 *J. Geophys. Res.* **115** 1
- [14] Ma C J, Ren L Y, Qu E S 2012 *Opt. Commun.* **285** 4949
- [15] Mi Q S, Zhu H N, Gao X R, Li J L 2015 *Optik* **126** 432
- [16] Chen S, Qiu Z, Zhang Y, Chen H, Wang Y 2011 *J. Quant. Spectrosc. Radiat.* **112** 304
- [17] Mihailov S J 2012 *Sensors-Basel* **12** 1898
- [18] Jia B H, Sheng Q Q, Feng D Q, Dong X Y 2003 *Chin. J. Lasers* **20** 247 (in Chinese) [贾宝华, 盛秋琴, 冯丹琴, 董孝义 2003 中国激光 **20** 247]
- [19] Zhang Z J, Wang C M 2007 *Laser Infrared* **37** 552 (in Chinese) [张自嘉, 王昌明 2007 激光与红外 **37** 552]
- [20] Zhu H N, Luo B, Pan W 2012 *J. Opt. Soc. Am. B* **29** 1497
- [21] Wu H, Yan H, Li X 2010 *Optik* **121** 1789
- [22] Wen K, Yan L, Pan W 2011 *Optik* **122** 2249
- [23] Dukhyeon K, Hyungki C 2005 *Opt. Lett.* **30** 1728
- [24] Behrendt A, Reichardt J 2000 *Appl. Opt.* **39** 1372
- [25] Li S C, Hua D X, Hu L L, Yan Q, Tian X Y 2014 *Spectrosc. Lett.* **47** 244
- [26] Li S C, Hua D X, Wang Y F, Gao F, Yan Q, Shi X J 2015 *J. Quant. Spectrosc. Radiat.* **153** 113
- [27] Mao J D, Hua D X, Hu L L, Wang Y F, Wang L 2010 *Acta Opt. Sin.* **30** 7 (in Chinese) [毛建东, 华灯鑫, 胡辽林, 王玉峰, 汪丽 2010 光学学报 **30** 7]

Design and optimization of all-fiber rotational Raman spectroscopy for temperature measurement based on sampled fiber Bragg grating*

Gong Xin Hua Deng-Xin[†] Li Shi-Chun Wang Jun Shi Xiao-Jing

(School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

(Received 16 October 2015; revised manuscript received 20 January 2016)

Abstract

Atmospheric temperature is a key parameter to characterize the state of the atmosphere. Owing to the independence of the aerosol effect for profiling the temperature, the pure rotational Raman lidar has become one of valid tools. To achieve all-time and high-precision active remote sensing, strong background noise needs to be filtered out, and the inhibition rate outside the band of more than 70 dB is needed for Mie-Rayleigh scattering in a rotational Raman temperature measurement lidar. In this paper, a multiple cascaded light path based on sampled fiber Bragg grating (SFBG) and fiber Bragg grating (FBG) in visible spectrum is presented to obtain characteristic spectrum. All-fiber spectroscopic system with high inhibition rate for Raman thermometry is set up based on the above light path. The core device consists of single mode fibers (460-HP) to ensure the compatibility with optical fiber. The main factors affecting the inhibition rate outside the band of sampled fiber Bragg grating, including refractive index modulation depth, total length of grating, sampling period and duty, are optimally designed by using mode coupling theory and transmission matrix model. Then the optimized parameters of spectroscopy are obtained. The results show that the inhibition rate outside the band is proportional to the refractive index modulation depth and duty, when the total length of grating is a constant. However, a larger sidelobe jamming will be caused by overlarge refractive index modulation depth. The less amount and widened full width half maximum of reflectivity peak appear following overlarge duty. In the Raman spectroscopic system of this paper, the inhibition rates outside the bands of SFBG and FBG are 30 dB and 20 dB, respectively. The inhibition rate of more than 70 dB is realized for Mie-Rayleigh scattering, after passing through two FBGs and one SFBG. The simulated optimum parameters of SFBGs are the effective index of the guide mode of 1.465, the saturation index variation of 0.00005, the SFBG length of 20 mm, the sampled period of 0.4 mm, and the Bragg wavelengths of 528.51 nm and 530.76 nm. By using the American standard model and atmospheric scattering signal model, the all-time signal-to-noise ratio (SNR) and inhibition rate of Mie-Rayleigh scattering and solar background light are simulated and analyzed. The results show that the intensities of solar background light and Mie-Rayleigh scattering signal are weaker than Raman scattering signals at 40 dB and 50 dB, respectively. The detection height in daytime and night can reach up to 1.6 km and 2.6 km under the condition of SNR of more than 100, respectively. Owing to these advantages such as miniaturization, anti-interference and high stability, this spectroscopy provides a viable solution for filter systems of ground-based and spaceborne lidars.

Keywords: rotational Raman spectra, Raman lidar, atmospheric temperature, sampled fiber Bragg grating

PACS: 36.20.Ng, 95.75.Qr, 92.60.hv, 07.60.Rd

DOI: 10.7498/aps.65.073601

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61275185, 61308106), the Natural Science Foundation of Shaanxi Province, China (Grant No. 2013JM5001), and the Scientific Research Plan Projects of Shaanxi Education Department, China (Grant No. 15JK1529).

[†] Corresponding author. E-mail: dengxinhua@xaut.edu.cn