

文章编号: 0258-7025(2007)01-0094-05

双光栅纯转动拉曼测温激光雷达 单色仪的光学设计

苏 嘉, 张寅超, 赵日峰, 刘玉丽, 洪光烈, 赵培涛, 屈凯峰, 谢 军
(中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要 纯转动拉曼测温激光雷达中采用双光栅单色仪结构的优点是能提供优于 10^{-7} 抑制比, 能够很好地抑制瑞利-米氏散射, 得到纯度很高的转动拉曼谱, 并且能够提高光的透射率, 具有长期稳定性, 但双光栅单色仪的光路结构复杂一直是系统中的难点。首先对两种光栅光路结构进行讨论, 得出光纤对称式光栅光路结构对于光栅效率的利用要优于光纤直线排列式光路结构, 并通过对光栅公式和转动拉曼光谱公式结合, 推导出光栅闪耀级次和衍射角关系方程。当光栅常数为 600 line/mm 时, 其第 5 级为最佳闪耀级次。

关键词 激光技术; 雷达; 温度测量; 闪耀光栅; 光学设计

中图分类号 TN 958.98 **文献标识码** A

Optical Design of Double Grating Monochromator of a Pure Rotational Raman-Lidar

SU Jia, ZHANG Yin-chao, ZHAO Yue-feng, LIU Yu-li,
HONG Guang-lie, ZHAO Pei-tao, QU Kai-feng, XIE Jun

(Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
The Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract The double grating monochromator for a pure rotational Raman-lidar can provide for better than 10^{-7} suppression of the spectral line due to unshifted Mie + Rayleigh scattering, obtain high-purity rotational Raman spectrum, and improve transmission and stability of the optical system. The complexly structure of the double grating monochromator is always difficulty to Raman-lidar. Two optical paths of grating are compared and a conclusion can be drawn that the structure of beam path of grating of symmetrical arrange of optical fibre is better in grating efficiency than the structure of beam path of grating of linear arrange of optical fiber. Then a formula about relative of range of diffractive angle and order of grating is obtained through grating equation and rotational Raman equation. When grating constant is 600 line/mm, the fifth order of grating is optimal.

Key words laser technique; lidar; temperature-measuring; blazed grating; optical design

1 引 言

对流层温度是大气物理、天气分析与预报及大气环境研究中的一个重要气象参数。近几十年的气象探空资料分析表明, 对流层下层增温显著而对流层上层及平流层温度在降低^[1]。因此, 对对流层温

度的有效检测已显得十分重要。利用纯转动拉曼技术获取大气温度廓线在国外已经被报道^[2], 他们使用双光栅光谱仪^[3]、双窄带干涉滤光片^[4]、双光栅单色仪^[5]、金属蒸气滤光片加干涉滤光片^[5]和基于 CCD 分光光谱仪^[6]来获得转动拉曼谱线, 但是在国

收稿日期: 2006-02-16; **收到修改稿日期**: 2006-04-28

基金项目: 国家 863 计划(2002AA135030)资助项目。

作者简介: 苏 嘉(1979—), 男, 安徽利辛县人, 博士研究生, 主要从事激光雷达光路设计方面的研究工作。

E-mail: sujia0804@163.com

导师简介: 张寅超(1961—), 男, 浙江人, 研究员, 博士生导师, 目前研究方向为车载激光雷达处理技术。

E-mail: yczhang@aiofm.ac.cn

内还很少^[7], 主要是因为很强的散射光的附近两旁, 分布着许多强度很弱的拉曼散射光, 要从很强瑞利-米氏散射光中提取转动拉曼谱线是非常困难的, 它对雷达的分光系统提出很高的要求。由于双光栅单色仪结构能够提供由于 10^{-7} 抑制比, 能够很好地抑止瑞利-米氏散射, 得到纯度很高的转动拉曼谱; 双光栅单色仪结构分光是斯托克斯信号与对称的反斯托克斯信号之和, 大大提高了信号的信噪比; 双光栅单色仪结构具有长期的稳定性。由于双光栅单色仪结构具有以上的优点^[5], 因此本文采用双光栅单色仪来提取转动拉曼谱线, 主要阐述了双光栅纯转动拉曼测温激光雷达原理和双光栅单色仪结构, 并在此基础上通过对双光栅单色仪光学设计进行讨论来优化拉曼雷达的分光系统。

2 原理和双光栅单色仪结构

纯转动测温激光雷达通常根据大气中 N_2 和 O_2 分子高低量子数的转动拉曼散射回波信号比满足指数关系, 由此关系式可以反演出温度。其具体关系式为^[2,3]

$$R[T(z)] = \frac{I(J_i, T)}{I(J_h, T)} = \exp[A/T(z) + B], \quad (1)$$

式中 $I(J_i, T)$, $I(J_h, T)$ 分别为 N_2 和 O_2 分子高低量子数的转动拉曼回波信号强度, A, B 分别为激光雷达测出的两个拉曼信号的强度比和无线电探空仪测出的温度拟合参数。

图 1 为双光栅单色仪结构图, 该单色仪有两块光栅组成, 均工作于输入输出共焦面形式, 目的是要分别提取 N_2 和 O_2 分子转动拉曼谱的斯托克斯和反斯托克斯谱中的高阶谱和低阶谱。激光雷达的回

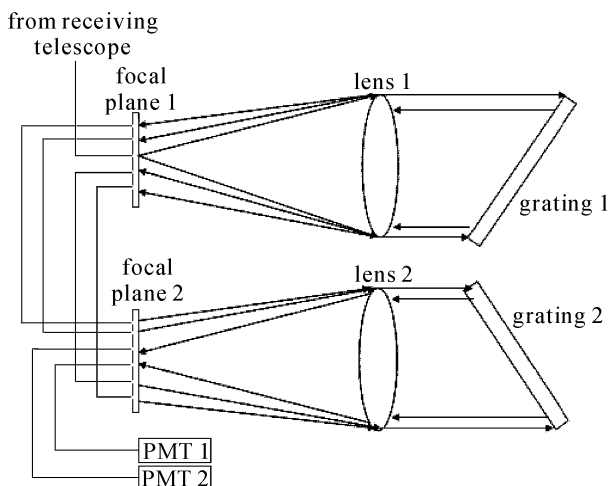


图 1 双光栅单色仪结构图

Fig. 1 Structure of double grating monochromator

波光由输入光纤从第一光栅系统的焦平面送入, N_2 分子的高阶、低阶斯托克斯和反斯托克斯四组谱线 ($\lambda_1 \sim \lambda_4$) 分别被在其焦平面相应位置处的四根光纤所接收。在第二光栅系统的焦平面上, 这四组光谱分别由严格选定的位置输入, 使经第二光栅衍射后, 两组低阶转动拉曼谱 (λ_1 和 λ_2) 会聚于输出光纤 1, 而两组高阶转动拉曼谱 (λ_3 和 λ_4) 会聚于输出光纤 2, 从而达到高带外抑制和高光谱分辨的目的^[5]。

3 闪耀光栅的结构设计和光学仿真

3.1 闪耀原理

闪耀光栅对于闪耀波长来说, 其单缝衍射的主级极大在斜槽的镜面反射的方向上, 而缝间干涉的零级极大则在光栅平面的法线方向上。如图 2 所示, 其中 n 为光栅槽面法线, N 为光栅法线, α 为光波的入射角, β 为光波的衍射角, θ 为光栅的闪耀角, φ 为入射光相对于斜槽表面法线的入射角, σ 为衍射光相对于斜槽表面法线的衍射角。对于闪耀波长, 必须满足关系式

$$\sin\alpha + \sin\beta = m\lambda/d, \quad (2)$$

$$\sigma = \varphi,$$

其中 m 为衍射级次, d 为光栅常数。

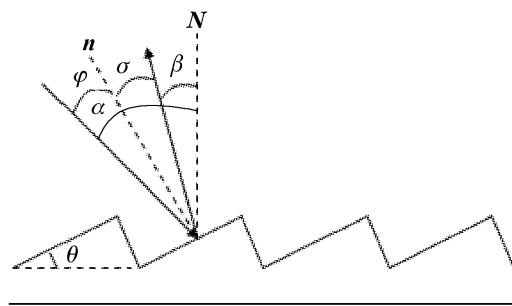


图 2 闪耀光栅各角之间的关系

Fig. 2 Relative of angles of the blazed diffractive grating

3.2 结构设计

因为在闪耀光栅的闪耀方向上, 闪耀波长的光强可以达到入射光强的 80%。由于单缝衍射函数是缓变函数, 因而在闪耀波长两旁的光谱线强度也得到了加强。通常闪耀光栅使用的波长范围是闪耀波长的 $(2/3 \sim 2)$ 倍之间, 超过此范围, 谱线强度将变弱。所设计的双光栅单色仪需要分离波长为 532 nm 的激光激发大气中 N_2 和 O_2 分子的四条拉曼谱线, 波长分别为 529 nm, 530.3 nm, 533.7 nm, 535.1 nm。由于要分离的四个波长都在 532 nm 附近, 要使光栅的闪耀波长尽量接近 $\lambda = 532$ nm, 才

能使这四个波长都可获得很高的光栅衍射效率。

除此之外,还要考虑接收光纤的数值孔径,这要求衍射光应该尽量接近透镜的主光轴,才能增大光纤的耦合效率。根据以上原理可以得到光栅光路(第一块光栅)两种结构,如图 3 和图 4 所示。可以看出,图 3 中光纤在焦平面的结构是直线排列的,而图 4 中光纤在焦平面的排列是对称结构的。图 3 采用 Littrow 型光路,其特点是平行光束 \vec{oe} 沿槽面法线 \vec{oc} 方向入射,单槽闪耀衍射方向沿原方向返回,此时闪耀波长不能选择 532 nm,因为闪耀波长若为 532 nm,该波长沿出射光路返回,又进入雷达系统,就会给雷达系统带来一定的影响。而且光栅的闪耀波长就应该选择大于 535.1 nm 或小于 529 nm,否则其中衍射回的 5 束光或多或少都会进入出射光纤,也会给雷达系统带来一定的影响。其中 $\vec{ek}, \vec{eh}, \vec{ei}, \vec{ej}$ 分别为要分离的 4 束衍射光, \vec{eg} 为 532 nm 的衍射光。而图 4 中采用的入射光线 \vec{ac} 与透镜主光轴有一个微小的偏角,其闪耀方向是 \vec{cf} , 此时就可以选择 532 nm 作为闪耀波长,其中 $\vec{cd}, \vec{ce}, \vec{cg}, \vec{ch}$ 分别为要分离的 4 束衍射光。从上述可知,从图 4 分离出的 4 束光距离闪耀波长的距离要小于从图 3 分离出的 4 束光距离闪耀波长的距离,所以图 4 分离出的 4 束光的衍射效率要高于图 3 分离出的 4 束光的衍射效率,由此推出光纤对称式焦平面结构要比直线式焦

平面结构优越。所以在单色仪第一块焦平面采用图

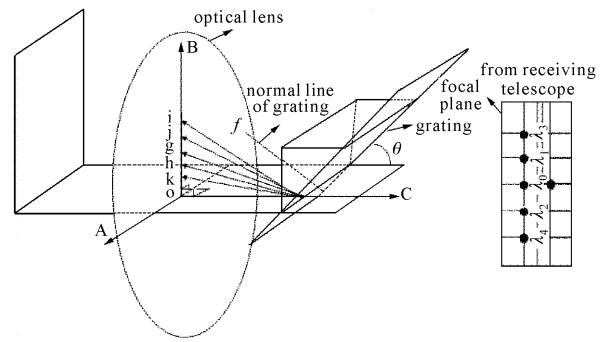


图 3 光纤直线排列光栅光路结构图

Fig. 3 Structure of beam path of grating of linear arrange of optical fiber

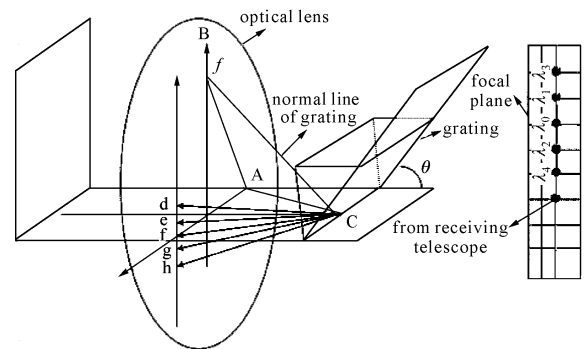


图 4 光纤对称光栅光路结构图

Fig. 4 Structure of beam path of grating of symmetrical arrange of optical fiber

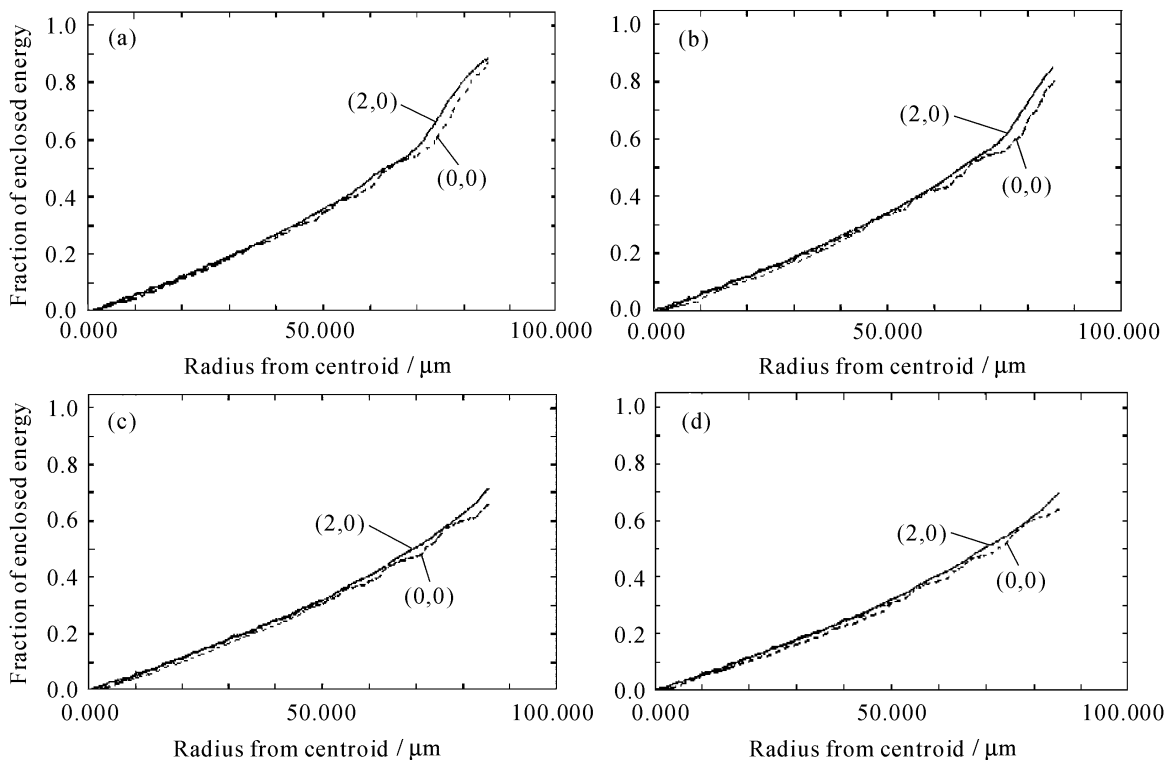


图 5 不同波长处的能量分布图

Fig. 5 Energy distribution at different wavelength (a) 529 nm; (b) 530.3 nm; (c) 533.7 nm; (d) 535.1 nm

4 的光路结构。同理可以推出第二块焦平面也采用此种结构。

3.3 光学仿真

利用 ZEMAX 软件进行光学仿真,如图 5 所示,(a)~(d)分别表示波长为 529 nm,530.3 nm,533.7 nm,535.1 nm 时的能量分布图,以离物点像重心的距离为函数的包围圆能量占总能量的比。其中 x 轴表示离物点像重心的距离,实线代表物点发光点的位置在焦平面的坐标是(2,0)的能量分布图,虚线代表物点发光点的位置在焦平面的坐标是(0,0)的能量分布图,坐标的单位为 mm。

从图 5 可以发现光源从坐标点(2,0)经光栅衍射后四条谱线的能量曲线要高于光源从坐标点(0,0)经光栅衍射后四条谱线的能量曲线,这是因为衍射光栅的函数是缓变函数,当衍射的谱线越靠近光栅的闪耀波长,其衍射效率越高。图 5 正好验证了我们的光路设计理论。利用图 4 中的光栅光路结构,可以提高整个光学系统的透射率,更有利于雷达系统获得更多的微弱转动拉曼谱线。

4 光栅闪耀级次和闪耀角的确定

光栅的作用是将不同波长的波阵面分离开来,也就是光栅的色散作用,通常定义两个相邻波长的衍射波阵面之间的角度分离为角色散,用 $d\beta/d\lambda$ 表示。因为我们利用的是入射光与光栅槽面的小角度入射,所以入射角与衍射角在法线的同侧,因此对(1)中光栅方程式两边微分,可以得到

$$\cos\alpha d\alpha + \cos\beta d\beta = \frac{m}{d} d\lambda, \quad (3)$$

通常入射角不变,即 $d\alpha = 0$,所以可以得到角色散为

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{1}{\cos\beta} \cdot \frac{m}{d}. \quad (4)$$

光栅的线色散 D 在数值上等于同级谱中单位波长间隔的两个主极大在接收屏上所分开的线距离。如果接收屏前的聚焦透镜的焦距为 f ,则线色散可以近似为

$$D = f \cdot \frac{d\beta}{d\lambda} = f \cdot \frac{1}{\cos\beta} \cdot \frac{m}{d}, \quad (5)$$

假设相邻两根谱线距离为 Δx 以及两根谱线之间的波长差值为 $\Delta\lambda$,则线色散数值为

$$D = \frac{\Delta x}{\Delta\lambda} \cdot n, \quad (6)$$

选用的光栅线色散必须大于等于实际计算出的线色散,因此有

$$\frac{\Delta x}{\Delta\lambda} n \leq f \cdot \frac{1}{\cos\beta} \cdot \frac{m}{d}. \quad (7)$$

两根谱线距离为 Δx 也就是接收光纤的芯径,对于光纤芯径的选取,应尽量选取较大的芯径,才有利于转动谱线的接收和不会因为光路的微小抖动而造成转动谱线的无法接收。但芯径也不能太大,太大会导致对光栅的要求太高,以致系统成本太高。所以选取的光纤芯径 Δx 为 600 μm ,所选光纤的折射率 $n = 1.47$,对于透镜的焦距选为 $f = 200 \text{ mm}$ 。

根据图 6 中的公式 $\Delta\nu_{J \rightarrow J'} = -(4J + 6)B$ 可以推出 N_2 的转动拉曼谱线的波长差值 $\Delta\lambda = 0.23 \text{ nm}^{[1]}$ 。在可见光范围内光栅常数的范围是 600 ~ 1200 line/mm。一方面为了节约成本,另一方面该分光系统本身采用了两块光栅,所以没必要选取刻线太密的光栅,选取的光栅刻线为 600 line/mm。

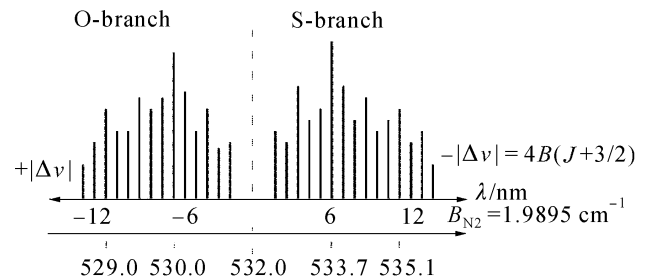


图 6 N_2 纯转动拉曼光谱

Fig. 6 Pure rotational Raman spectra of N_2 molecules

把以上数值代入公式(6),可得到

$$\frac{1.47 \times 600 \mu\text{m}}{0.23 \text{ nm} \times 2 \times 200 \text{ mm}} \times \cos\beta \times \frac{1 \text{ mm}}{600} \leq m, \quad (8)$$

表 1 衍射级次以及对应的衍射角范围和计算出的闪耀角
Table 1 Range of diffractive angle relative to the order of grating and the calculated blazed angle relative to the order of grating

Order of grating	Arrange of angle of meeting of the necessity of optical system / (°)	Calculated blazed angle / (°)
1	<86.412	9.18
2	<82.809	18.615
3	<79.178	28.607
4	<75.502	39.673
5	<71.764	52.94
6	<67.944	73.256
7	<64.018	(90-27.476i)
8	<59.955	(90-41.704i)
9	<55.718	(90-51.751i)

可得出衍射级次和对应的闪耀角范围以及通过闪耀级次计算出的光栅闪耀角,如表 1 所示。

根据上面所采用的光栅光路结构图可知,入射光线和衍射光线都应该分布在透镜的主光轴周围,也就是说其角度应该与光栅的闪耀角相差不大,从表 1 可以看出光栅的衍射级次 1~5 级都满足光学分光要求。一般来说,光栅的衍射级数越高,其衍射光的半宽越窄,但可以看出第 5 级衍射光的半宽最窄,所以光栅衍射级次第 5 级为该系统最佳选择。

5 结 论

采用双光栅单色仪来提取转动拉曼谱线,主要探讨了拉曼雷达单色仪的光学设计,从光栅光路和光栅参数的选择这两个方面对双光栅单色仪进行优化,从而提高了整个雷达测温系统的光学透射率,使整个雷达系统获得更好的信噪比,从而更准确地反演大气的温度廓线。由于双光栅单色仪的光路非常复杂,本文只讨论了其中与光栅有关的光学设计问题,还有一些其他的问题,例如双光栅单色仪中的光纤耦合问题和光纤在焦平面的位置等都对光学系统透射率有很大影响,这些问题留在以后进一步讨论。

参 考 文 献

- 1 Yonghua Wu, Tao Li, Jun Zhou. Raman lidar measured temperature profiles in the mid- and upper troposphere [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2002, **26**(5):702~708
吴永华,李陶,周军. Raman 激光雷达探测对流层中上部大气温度分布[J]. *大气科学*, 2002, **26**(5):702~708
- 2 Yu. F. Arshimov, S. M. Bobrovnikov, V. E. Zuev *et al.*. Atmospheric temperature measurements using a pure rotational Raman lidar [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(19):2984~2990
- 3 D. Nedeljkovic, A. Hauchecorne, M. L. Chanin. Rotational Raman lidar to measure the atmospheric temperature from the ground to 30 km [J]. *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, 1993, **31**(1):90~101
- 4 Franz Balsiger, Paul A. T. Haris, C. Russell Philbrick. Lower tropospheric temperature measurement using a rotational Raman lidar [C]. *SPIE*, 1996, **2832**:53~60
- 5 A. Ansmann, Yu. Arshimov, S. Bobrovnikov *et al.*. Double-grating monochromator for a pure rotational Raman lidar [C]. *SPIE*, 1998, **3583**:491~497
- 6 E. G. Norton, I. M. Povey, A. M. South. Broadband CCD detection system for rotational Raman lidar studies of the troposphere [C]. *SPIE*, **4153**:657~662
- 7 Wu Yonghua, Hu Huanling, Hu Shunxing *et al.*. Temperature measurement with Rayleigh scattering lidar in the mid and upper stratosphere [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(2):137~140
吴永华,胡欢陵,胡顺星等. 用瑞利散射激光雷达探测平流层中上部温度[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(2):137~140