

便携式拉曼光谱仪的光学系统设计与研制

安 岩^{1,2} 刘 英^{1*} 孙 强¹ 李 淳¹ 刘 兵^{1,2} 姜承志^{1,2}

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)
² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 针对便携式拉曼光谱仪的小型化、高分辨率需求及弱信号能量探测问题, 设计了基于高分辨率光栅光谱仪和物方大数值孔径光学探头的便携式拉曼光谱仪的光学系统, 完成了样机性能测试。利用 Czerny-Turner (C-T) 结构光栅光谱仪的像差特性, 在实现消彗差的条件下, 建立了像面大小与光栅光谱仪系统参数的关系, 保证了系统的像面大小与线阵 CCD 尺寸之间的完善匹配, 完成了新型消彗差 C-T 结构光栅光谱仪系统。通过采用厚双胶合透镜形式的摄远光学结构, 完成了物方数值孔径为 0.33, 并与光栅光谱仪入射光瞳完善匹配的紧凑型光学探头系统。实现了光谱分辨率优于 0.6 nm、拉曼光谱范围为 781~1014 nm 的便携式拉曼光谱仪的优化设计和样机研制, 样机尺寸为 243 mm×25 mm×71 mm。通过样机实验成功获得了 CCL₄ 的 5 个拉曼光谱特征峰, 验证了整机拉曼光谱仪系统光学设计的可行性和合理性。

关键词 光学设计; 拉曼光谱仪; Czerny-Turner 结构; 光学探头系统

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0330001

Design and Development of Optical System for Portable Raman Spectrometer

An Yan^{1,2} Liu Ying¹ Sun Qiang¹ Li Chun¹ Liu Bing^{1,2} Jiang Chengzhi^{1,2}

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Aiming at miniaturization, high resolution and weak-signal detection of portable Raman spectrometer, the rational optical systems of the high-resolution grating spectrometer and the optical probe system with large object space numerical aperture (NA) are designed, and the testing of the performance of the prototype Raman spectrometer is completed. According to the aberration theory of the Czerny-Turner (C-T) grating spectrometer, under the coma-free condition, the relation between the imaging plane and the system parameters of the grating spectrometer is established, which ensures the perfect match between the size of the image plane of the system and the size of the linear-array CCD, and then the design of the new coma-free C-T grating spectrometer is completed. By use of the telephoto optical structure of the “thick doublet”, the compact optical probe system with object NA of 0.33 is designed which perfectly matches with the entrance pupil of the grating spectrometer. The results of the spectral resolution are better than 0.6 nm and the Raman spectrum ranges from 781 nm to 1014 nm, with the prototype size of 243 mm×25 mm×71 mm. The five characteristic peaks of Raman spectrum of CCL₄ are successfully measured by the prototype Raman spectrometer, which verifies the feasibility and the rationality of the optical design of the whole Raman spectrometer system.

Key words optical design; Raman spectrometer; Czerny-Turner structure; optical probe system

OCIS codes 300.6450 170.5660 300.6190

收稿日期: 2012-07-19; 收到修改稿日期: 2012-09-15

基金项目: 国家自然科学基金(60977001)、吉林省与中国科学院合作长吉图开发开放先导区科技创新合作专项资金项目(2011CJT0004)和吉林省科技厅项目(20106015, 20100310)资助课题。

作者简介: 安 岩(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事光谱仪器设计和光学设计等方面的研究。

E-mail: onesincere_7@yahoo.com.cn

导师简介: 孙 强(1971—), 男, 博士, 研究员, 主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: sunq@ciomp.an.cn

* 通信联系人。E-mail: liuy613@163.com

1 引 言

拉曼光谱作为物体的一种散射光谱,能够反映物质分子结构情况,可提供丰富的信息,已经在生物、化学、医药材料、食品工业以及地质勘探等领域起着重要作用。随着科学技术日新月异的发展和众多前沿学科的相互交叉、渗透和融合,对拉曼光谱的应用需求提出了高分辨率、小型化、抗震动和抗干扰等一系列要求,因而便携式拉曼光谱仪受到了极大的关注。国外在拉曼光谱研究方面比较早,积累了丰富的研制经验,其中主要的拉曼光谱仪生产厂家有美国 Ocean Optics 公司、美国 Thermo Scientific 公司和美国 DeltaNu 公司等,这些设备已广泛的应用到了实际科研和测试工作中^[1~4],垄断着国内的市场份额,而在国内自主研发拉曼光谱仪的科研院所都是出于教学和实验目的,仅仅组装了大型的拉曼光谱仪,如苏州大学信息光学研究所的拉曼光谱测试仪^[5]、浙江大学所研制的 LRZ-1 型拉曼光谱仪^[6]、四川大学和成都科技大学组装的脉冲激光器激发的用于光多道分析器 (OMA) 控制与探测的激光共振拉曼光谱系统^[7]以及北京卓立汉光仪器有限公司和中国科学院大连化学物理研究所共同研发的大型紫外共振拉曼光谱仪^[8],而面向于市场用户的便携式拉曼光谱仪价格还是较昂贵,目前只存在一些组装机^[9]。

针对便携式拉曼光谱仪的重要性的国内的研发现状,本文应用 Czerny-Turner (C-T) 结构系统的像差理论^[10],同时考虑了像面与探测器尺寸匹配的必要性,设计了应用于近红外波段的 C-T 光栅光谱仪,获得了满足设计指标要求的初始结构,经 Zemax 优化设计,得到高分辨率消彗差 C-T 结构^[11]。同时设计了与之匹配的光学探头系统^[12],结合摄远光学结构^[13],实现了物方大数值孔径的光学探头设计。光栅光谱仪的设计解决了光谱分辨率问题,而光学探头系统的设计解决了弱拉曼信号光测量的问题。利用研制的原理样机获得 CCL₄ 拉曼光谱^[14],并得到良好的效果,从而充分证明了本光学系统设计的可行性和合理性,并为国内便携式拉曼光谱仪的发展提供了重要的理论和技术指导。

2 参数选择及结构设计

便携式拉曼光谱仪的结构主要分为激光器、探头光学系统、光栅光谱仪以及计算机信号处理部分,如图 1 所示,激光器提供稳定的激发光源,探头光学系统实现激发光源的会聚以及拉曼散射光的收集,光栅

光谱仪则实现了不同信号光谱的辨别,最终由微处理系统对信号进行一系列处理并最终处理拉曼光谱。

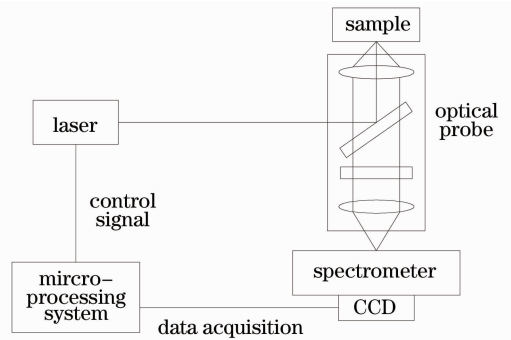


图 1 拉曼光谱仪光学系统

Fig. 1 Optical system of Raman spectrometer

由于近红外波段的荧光背景影响小,噪声低,窄带激光器提供更多的物质成分信息,因此考虑采用 785 nm 波长激光器,其带宽小于 0.2 nm;由于拉曼散射光能量是瑞利散射光能量的 $10^{-3} \sim 10^{-6}$ 倍,因此设计中所选用的陷波滤光片要求光密度 (OD) 大于 6,保证将瑞利散射光的信号降低到与拉曼散射光信号同等级能量上,才能测到拉曼光谱信号。常用物质的拉曼光谱范围在 $250 \sim 2875 \text{ cm}^{-1}$ 之间,以 785 nm 为激发波长的对应光谱范围在 781~1014 nm 之间。考虑到拉曼光谱信息的一般分辨率要求在 $7 \sim 10.5 \text{ cm}^{-1}$ 即可满足,即需要实现全波段 0.6 nm 的光谱分辨率,光栅常数越小,狭缝越小,光栅光谱仪的理论分辨率就越高。这里,拟采用的光栅常数为 1/1200 lp/mm,狭缝宽度为 20 μm 。但是光栅光谱仪的相对孔径就会变小,能量就会变小,为了弥补能量问题,要求光学探头系统的物方数值孔径设计为 0.33,满足拉曼散射光的收集(参考美国 Thermo Scientific 公司系列产品)。综合以上参数,便携式拉曼光谱仪的具体设计参数如表 1 所示。本文主要设计了两部分结构系统,即光栅光谱仪系统和光学探头系统。

表 1 拉曼系统初始结构参数

Table 1 Initial structural parameters of the Raman system

Parameter	Value
Laser wavelength /nm	785 \pm 0.5
Bandwidth /nm	0.2
Rayleigh filter	OD \geq 6
Slit / μm	20
Wavelength range /nm	781~1014
Spectral resolution /nm	0.6
Grating of groove spacing /(lp/mm)	1/1200
Relative aperture	1:10.6
NA of optical probe	0.33
CCD pixel	2048 \times 64

2.1 新型消彗差光栅光谱仪

常见 C-T 结构如图 2 所示,两镜分离的方式避免了 Ebert-Fastie 结构的二次和多次衍射所带来的杂光问题,也避免了离轴非球面系统的加工和装调问题。考虑到小球差条件和消彗差条件之后的 C-T 结构可以达到高光谱分辨率要求,可广泛应用于拉曼光谱等微弱信号检测,为达到高光谱分辨率,需要降低系统 F 数,同时降低轴上点球差所产生的谱线展宽影响;在离轴光学系统中,离轴球面镜产生的彗差不仅使谱线轮廓单边化,即降低仪器的分辨率,还会使谱线的极大值偏移,即产生假谱线。因此,在设计 C-T 结构时,需要考虑的主要像是彗差。

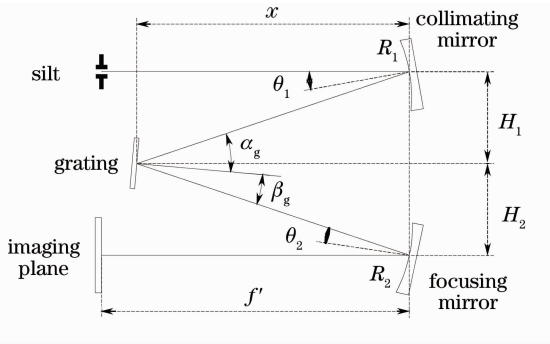


图 2 C-T 结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of C-T structure

图 2 中, R_1 和 R_2 是准直物镜和聚光物镜的球面半径, θ_1 和 θ_2 是中心波长光线分别在准直物镜和聚光物镜上的入射角, α_g 和 β_g 中心波长光线在光栅上的入射角和衍射角, H_1 和 H_2 分别是准直物镜和聚光物镜的中心点到过光栅中点垂直距离, x 为光栅中心点到聚光物镜中心点的水平距离, f' 为聚光物镜中心点到像面中心点的水平距离。实现消彗差

结构形式条件如下:

1) 非对称排列。 $H_1 \neq H_2$ 且 $R_1 = R_2$, 可对选定波长消彗差, 此时的消彗差条件为

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{\cos^3 \beta_g}{\cos^3 \alpha_g} = \frac{\theta_1}{\theta_2} \quad (1)$$

2) 对称排列。 $H_1 = H_2$ 且 $R_1 \neq R_2, \theta_1 = \theta_2$, 此时也可以做到对选定的波长消彗差, 此时满足的消彗差条件为

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{\cos \alpha_g}{\cos \beta_g} \quad (2)$$

在考虑像差校正的同时, 还需要考虑像面大小与线阵 CCD 尺寸的匹配问题。由于线阵 CCD 尺寸都是固定的, 当线阵 CCD 尺寸大于光栅光谱仪光学系统像面时, 线阵 CCD 尺寸过大造成不必要的浪费, 更严重的情况会引进不必要的杂散光信号; 当线阵 CCD 尺寸小于光栅光谱仪光学系统像面时, 会造成有用信号的丢失, 达不到设计要求, 在以往的设计中, 主要靠实际设计经验确定, 这种方法的人为影响因素太大, 不客观。因此线阵 CCD 尺寸和光栅光谱仪像面大小的匹配也是本文设计中考虑到的一个重要因素, 即需要保证所设计光谱范围的两边缘波长分别入射到线阵 CCD 的两个边缘, 如图 3 所示。图 3 中, C 是聚光物镜的球心, O 是光栅中心点, Z 是中心波长光线在聚光物镜上的交点, A, B 分别是两端边缘波长在聚光物镜上的交点, O' 是光栅中心点 O 投影到过 Z 点垂线的点, Z', A', B' 分别是中心波长和两端边缘波长光线与像面的交点, A'', B'' 分别是 A, B 两点投影到像面上的点, $\beta_z, \beta_A, \beta_B$ 分别为光栅在中心波长和两端边缘波长的衍射角度, $\theta_z = \theta_2, \theta_A, \theta_B$ 为中心波长和两端边缘波长在聚光物镜上的入射角度。

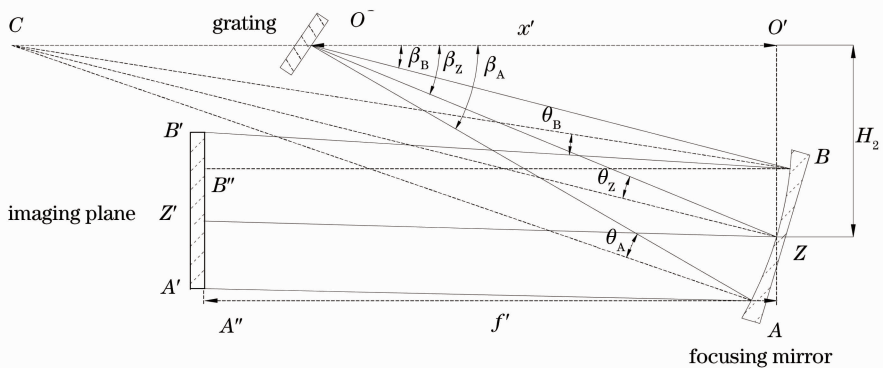


图 3 光栅光谱仪的像面分析

Fig. 3 Analysis of the imaging plane in grating spectrometer

考虑到光栅衍射角度以及聚光物镜焦距与确定线阵 CCD 尺寸有着重要关系,由于聚光物镜的转角为小角度,为了便于计算,假设聚光物镜的角度为 0。由图 3 可以求得像面大小与系统参数间的关系为

$$A'B' = A''B' - A'A'', \quad (3)$$

考虑到聚光物镜小角度转动, $AA''B''B$ 可近似为长方形,得到

$$A''B' = B'B'' + A''B'' = B'B'' + AB. \quad (4)$$

这样最终的像面大小可表示为

$$A'B' = B'B'' + AB - A'A'', \quad (5)$$

其中,根据几何关系可知

$$A'A'' = f' \tan(\beta_A - 2\theta_A), \quad (6)$$

$$B'B'' = f' \tan(\beta_B - 2\theta_B), \quad (7)$$

$$AB = x' (\tan \beta_A - \tan \beta_B). \quad (8)$$

对于高度较小的狭缝,聚光物镜的高斯焦面为最佳像面,此时的垂轴像差最小。通过相关文献[15]可知,当 $x' = 0.846f'$ 时,水平成像系统的谱面为平直面。这样,将(6)~(8)式代入(5)式,可以得到系统参数和像面之间的关系为

$$A'B' = f' [0.846(\tan \beta_B - \tan \beta_A) + \tan(\beta_B - 2\theta_B) - \tan(\beta_A - 2\theta_A)]. \quad (9)$$

可见,只要知道光栅在中心波长和边缘波长的衍射角度 $\beta_Z, \beta_A, \beta_B$ 以及以上三波长在聚光物镜上的入射角度 $\theta_A, \theta_B, \theta_Z$, 给定像面大小,就可以通过(9)式计算出相应聚光物镜的焦距。根据正弦定理可知

$$\frac{\sin \angle COB}{BC} = \frac{\sin \theta_B}{CO}, \quad (10)$$

$$\frac{\sin \angle COZ}{ZC} = \frac{\sin \theta_Z}{CO}, \quad (11)$$

$$\frac{\sin \angle COA}{AC} = \frac{\sin \theta_A}{CO}, \quad (12)$$

式中 $ZC = AC = BC$, 则可得到聚光物镜上不同入射波长的入射角关系式:

$$\frac{\sin \theta_Z}{\sin \angle COZ} = \frac{\sin \theta_A}{\sin \angle COA} = \frac{\sin \theta_B}{\sin \angle COB}, \quad (13)$$

式中 $\theta_Z = \theta_2, \angle COZ = \pi - \beta_Z, \angle COA = \pi - \beta_A, \angle COB = \pi - \beta_B$ 。

综上,按照本文的设计指标,通过给定波长范围、中心波长 λ 、像面大小、光栅级次 m 、光栅常数 d 和光栅入射角度 α_g , 具体参数指标如表 2 所示。由光栅公式变形形式 $d(\sin \alpha_g + \sin \beta_g) = m\lambda$, 可计算出此时的 3 个波长的光栅衍射角度; 利用消彗差(1)式和(2)式对准直物镜和聚光物镜的中心波长光线入射角度进行合理分配; 利用(13)式, 得到不同波长光线在聚光物镜上的入射角度; 并将以上所获得的计算

结果代入到系统参数和像面大小的关系(9)式, 可以得到满足系统要求的焦距及消彗差初始结构。经过软件模拟, 分别获得了对称型消彗差初始结构, 如图 4 所示, 和非对称型消彗差初始结构, 如图 5 所示, 从图中可以看出, 在聚光物镜小角度转动的情况下, 非对称型 C-T 结构比对称型 C-T 结构更合理, 因此选定非对称型消彗差 C-T 结构并进行优化, 图 6~8 是非对称 C-T 结构优化后的相邻 0.6 nm 点列图情况, 可以看出均可以实现全波段范围内 0.6 nm 的光谱分辨率。

表 2 光栅光谱仪设计参数

Table 2 Design parameters of the grating spectrometer

Parameter	Value
Wavelength range /nm	781~1014
Central wavelength /nm	898
Grating order	1
Grating of groove spacing /(lp/mm)	1/1200
Imaging plane /mm	28.672
Incident angle of grating /($^\circ$)	47.73

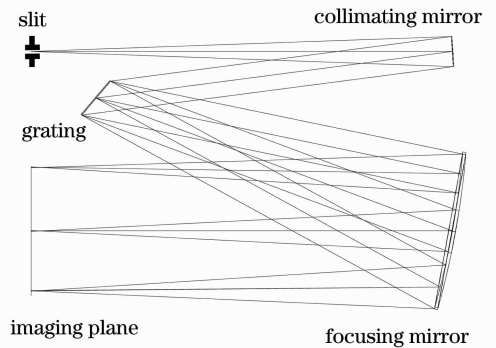


图 4 对称型消彗差结构

Fig. 4 Symmetric coma-free structure

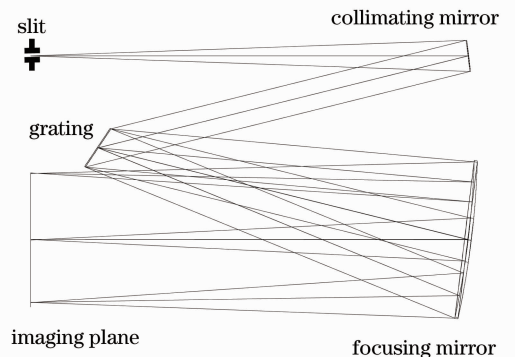


图 5 非对称型消彗差结构

Fig. 5 Asymmetric coma-free structure

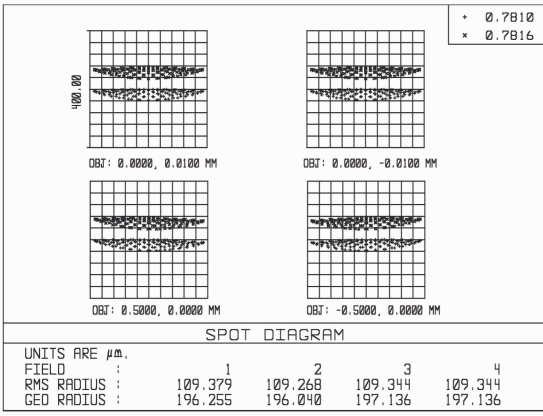


图 6 781 nm 处点列图
Fig. 6 Spot diagram at 781 nm

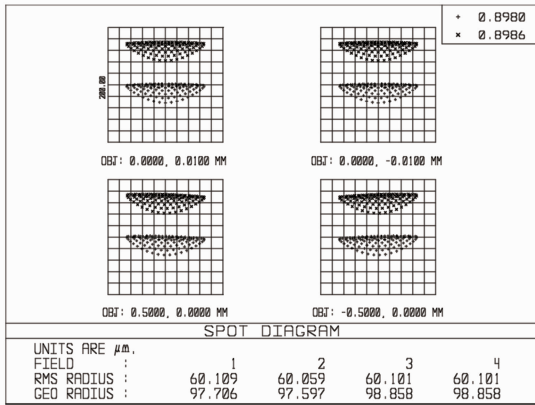


图 7 898 nm 处点列图
Fig. 7 Spot diagram at 898 nm

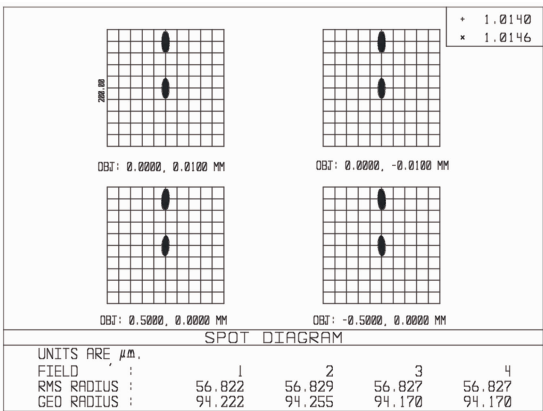


图 8 1014 nm 处点列图
Fig. 8 Spot diagram at 1014 nm

2.2 光学探头系统

光学探头系统或称拉曼探头是便携式拉曼光谱仪中重要的组成部分,为了实现整机系统的紧凑设计,激光照明光路和拉曼散射光收集光路共用一个光路,该光学结构实现将激发光聚焦到系统前方,接收该处物质产生的拉曼散射光,并将收集到的拉曼散射光会聚后输出给光栅光谱仪,考虑到便携式系

统对尺寸的要求,在光学探头设计中采用摄远光学结构,其中会聚系统由两个双胶合透镜构成,厚透镜形式的第二双胶合透镜构成摄远结构,缩短了筒长。第一双胶合透镜产生的正球差补偿了前面单透镜的负球差,同时校正后面第二双胶合透镜带来的像差,并对拉曼光谱的色差进行了校正,经过软件优化后,光路结构图如图 9 所示,图 10 为光学探头系统的像面照度分布图,从图中可以看出,像面照度在 80% 以上。

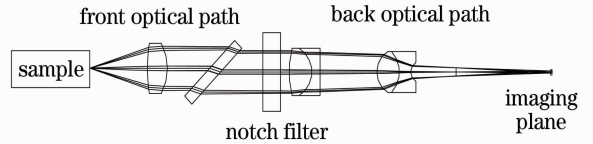


图 9 光学探头系统

Fig. 9 Optical system of optical probe

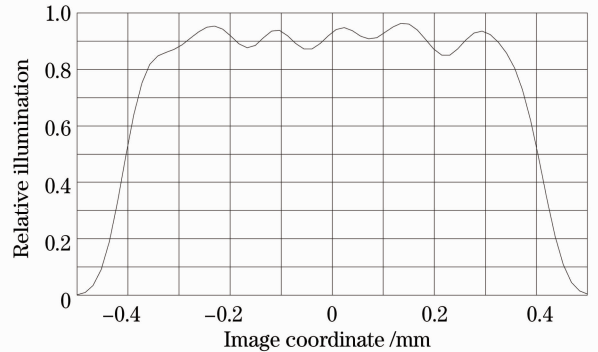


图 10 光学探头系统相对照度图

Fig. 10 Relative illumination of optical probe

2.3 整体设计结果

考虑到光学探头和光栅光谱仪均存在剩余像差,从而会影响最终拉曼光谱仪整机的分辨率,因此,需要将光学探头系统和光栅光谱仪系统匹配在仪器,并利用光学软件进行整机优化设计,图 11 为便携式拉曼光谱仪整机光学系统光路图。根据瑞利判据可知,一个亮点的衍射图案中心与另一亮点的衍射图案的第一暗环重合时,两亮点则能被分辨。在本系统中,当两相邻波长的狭缝像重合度为 50% 时,为该结构的极限分辨率,小于 50% 的情况均可以实现波长的分辨,为了进行狭缝的仿真,将狭缝的 6 个边缘点作为采样物点,进行实际光路模拟,并得到在最终像面上的采样点点斑,在 $20 \mu\text{m} \times 1 \text{mm}$ 狭缝情况下,图 12 给出了本文所设计的便携式拉曼光谱仪在不同波长的狭缝像面点斑分布图,可以看出,在全波段范围内可以实现 0.6nm 分辨率的要求。

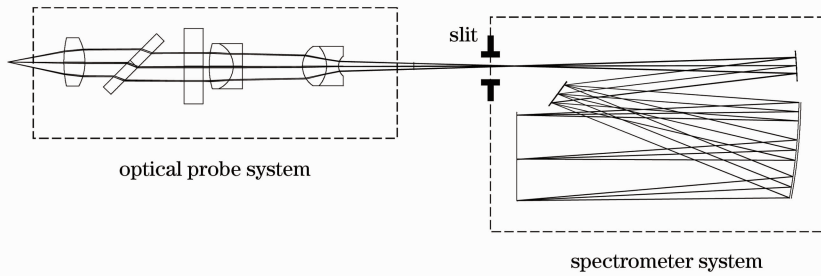


图 11 便携式拉曼光谱仪的光学系统

Fig. 11 Optical system of the portable Raman spectrometer

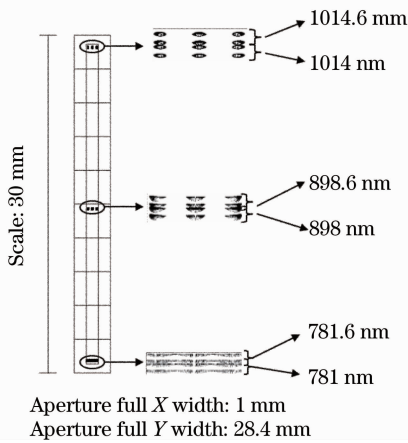


图 12 整机系统像面点斑图

Fig. 12 Imaging spots of the whole system

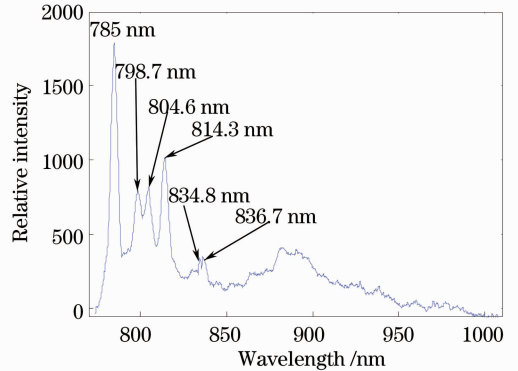


图 14 CCL₄ 的拉曼光谱

Fig. 14 Raman spectrum of the CCL₄

3 实验结果

利用所设计的便携式拉曼光谱仪光学系统,研制出光栅光谱仪系统以及光学探头系统,搭建了拉曼光谱仪的试验平台,图 13 为本文所研制的便携式拉曼光谱仪样机实物图,利用该样机进行了 CCL₄ 样品测试,获得了拉曼光谱曲线,如图 14 所示,从图中可以看出,本样机完全可以实现 CCL₄ 的拉曼特征峰采集。

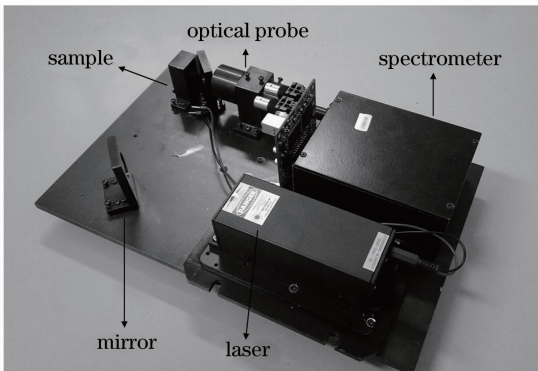


图 13 便携式拉曼光谱仪的原理样机

Fig. 13 Prototype of portable Raman spectrometer

4 结 论

本文设计了便携式拉曼光谱仪的光学总体结构,包括光学探头系统和新型消彗差型 C-T 光栅光谱仪系统的光学设计,在新型消彗差 C-T 光栅光谱仪的设计中,充分考虑到消彗差条件,并推导出了像面大小与系统参数之间的关系式,通过合理的参数设定,实现了线阵 CCD 尺寸与像面大小的良好匹配;在光学探头系统设计中,采用“厚双胶合透镜”形式的摄远光学结构完成了系统紧凑型、消色差、低球差的设计,并实现了物方数值孔径为 0.33 的强收集拉曼散射光线能力,并保证了像方数值孔径与光栅光谱仪的物方数值孔径匹配,结构小型化,符合便携式拉曼光谱仪的应用要求。通过光学探头和光栅光谱仪的匹配设计,获得了光谱分辨率为 0.6 nm 的便携式拉曼光谱仪的优化设计结果,并完成了尺寸为 243 mm×25 mm×71 mm 的原理样机研制。通过该样机对 CCL₄ 的拉曼光谱进行测量,得到了 5 个特征拉曼光谱:798.7、804.6、814.3、834.8、836.7 nm。从原理和技术上都充分证明了本文设计的合理性,为进一步研制小体积、优性能的便携式拉曼光谱仪奠定了良好的技术基础。

参 考 文 献

- 1 Yu Yongai, Wu Wei, Zhu Dongyan *et al.*. Portable Raman spectroscopy and Raman spectroscopy [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(8): 85~87
于永爱, 吴 维, 朱冬寅等. 拉曼光谱技术与便携式拉曼光谱仪[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(8): 85~87
- 2 Shiyamala Duraipandian, Wei Zheng, Joseph Ng *et al.*. In vivo diagnosis of cervical precancer using Raman spectroscopy and genetic algorithm techniques [J]. *Analyst*, 2011, **136**: 4328~4336
- 3 Chunyuan Song, Jeremy D. Driskell, Ralph A. Tripp *et al.*. The use of a handheld Raman system for virus detection [C]. *SPIE*, 2012, **8358**: 83580I
- 4 Rich Cox, Brad Williams, Mark H. Harpster *et al.*. Identification of targets at remote distances with Raman spectroscopy [C]. *SPIE*, 2012, **8374**: 83740O
- 5 Tang Minxue, Zhao Yanjiao, Wu Jianhong. Application of holographic notch filters in Raman spectrometer [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(7): 135~139
唐敏学, 赵艳皎, 吴建宏. 全息窄带带阻滤光片用于拉曼光谱测试仪[J]. *光电工程*, 2006, **33**(7): 135~139
- 6 Chen Yulun. Development of Raman Spectrometer and Its Spectroscopy Pretreatment[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. 25~26
陈玉伦. 拉曼光谱仪的研制及预处理方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006. 25~26
- 7 Li Taihua, Yang Yong. Laser resonance Raman spectrometer of OMA control and detection[J]. *Chinese J. Atomic and Molecular Physics*, 1994, **11**(2): 183~192
李泰华, 杨 勇. OMA控制与探测的激光共振拉曼谱仪[J]. *原子与分子物理学报*, 1994, **11**(2): 183~192
- 8 Li Can, Feng Zhaochi, Cao Ning. The development of DUV laser Raman spectroscopy [J]. *China Academic J. Electronic Publishing House*, 2011, **26**(5): 289~592
李 灿, 冯兆池, 曹 凝. 深紫外激光拉曼光谱仪研制[J]. *中国科学院院刊*, 2011, **26**(5): 589~592
- 9 Liu Kedian. Design of a portable Raman spectrometer [J]. *Analytical Instrument*, 2009, (4): 22~24
刘可滇. 便携式拉曼光谱仪的设计[J]. *分析仪器*, 2009, (4): 22~24
- 10 Peter Lindblom. Theory of the two-mirror plane-grating spectrograph[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1972, **62**(2): 756~762
- 11 A. B. Shafer, L. R. Megill, L. Droppelman. Optimization of the Czerny-Turner spectrometer[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1964, **54**(7): 879~887
- 12 An Yan, Sun Qiang, Piao Renguan *et al.*. Optical system of the probe for a micro-Raman spectrometer [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(3): 032204
安 岩, 孙 强, 朴仁官等. 用于微型拉曼光谱仪的外光路光学系统[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(3): 032204
- 13 Liu Fei, Li Yanqiu. Design of high numerical aperture projection objective for industrial extreme ultraviolet lithograph[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 02220031
刘 菲, 李艳秋. 大数值孔径产业化极紫外投影光刻物镜设计[J]. *光学学报*, 2011, **31**(2): 02220031
- 14 Gao Shuqin, He Jianing, Li Rongfu *et al.*. Study of the Raman spectrum of CCl₄ Fermi resonance[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2007, **27**(10): 2042~2044
高淑琴, 贺家宁, 李荣福等. 四氯化碳费米共振的拉曼光谱研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2007, **27**(10): 2042~2044
- 15 Joseph Reader. Optimizing Czerny-Turner spectrographs: a comparison between analytic theory and ray tracing[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1969, **59**(9): 1189~1196

栏目编辑：韩 峰