

用于微型拉曼光谱仪的外光路光学系统

安岩^{1,2} 孙强¹ 朴仁官¹ 刘英¹ 李淳¹

(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 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 针对所研制的微型拉曼光谱仪的特定要求,数值孔径为 0.04 和工作波长在 781~1014 nm,设计了两款与单色仪配套的外光路光学系统:球面系统,非球面系统。收集光路采用单透镜,会聚光路采用“厚双胶合透镜”形式的摄远光学结构,会聚系统的摄远比达到 0.59,极大地缩短了系统的尺度。设计结果表明,采用传统球面设计时,光学系统的物方数值孔径达到 0.33,点斑半径小于 30 μm ,像面相对照度在 80% 以上;加入了非球面之后,物方数值孔径达到 0.4,点斑半径小于 20 μm ,像面相对照度在 80% 以上。光学系统总长 150 mm,满足小型化和便携式的要求。

关键词 成像系统;拉曼探头;微型拉曼光谱仪;摄远物镜;非球面技术

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP49.032204

Optical System of the Probe for a Micro-Raman Spectrometer

An Yan^{1,2} Sun Qiang¹ Piao Renguan¹ Liu Ying¹ Li Chun¹

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

Abstract In order to meet the requirements of a designed and manufactured micro-Raman spectrometer with numerical aperture of 0.04 and operation wavelength from 781 nm to 1014 nm, two types of the optical systems of the Raman probe are designed. One is the traditional spherical system, and the other, the aspheric system. The scatter light collection system is a single lens with large numerical aperture, and the light converge system is a kind of telephoto lens formed by a “thick double-cemented lens”. An excellent telephoto ratio of 0.59 of the system is achieved, which reduces the optical system of the probe greatly. It is shown that the traditional spherical system has a numerical aperture of 0.33 at the object space, with the spot diagram radius less than 30 μm and the relative illumination at the image plane higher than 80%. The aspheric system has a numerical aperture of 0.4 at the object space, with the spot diagram radius less than 20 μm and the relative illumination at the image plane higher than 80%. The overall length of the optical system is 150 mm, which meets the requirements of the compact and portable micro-Raman spectrometer.

Key words imaging system; Raman probe; micro-Raman spectrometer; telephoto lens; aspheric system

OCIS codes 220.3620; 140.3550; 220.2740

1 引言

拉曼光谱技术具有分析效率高、样品用量少、适用性强等特点,现在已经广泛应用到农业、化工、医药、安检、环境污染等领域^[1~4]。国际上各大光学公司竞相推出各种类型的拉曼光谱仪,特别是为适应在线和现场检测的大量需求,推出各类便携式和手持式拉曼光谱仪,例如美国 Ahura Scientific 公司生产的 TruScan 型

收稿日期: 2011-10-09; 收到修改稿日期: 2011-10-20; 网络出版日期: 2012-01-07

基金项目: 国家自然科学基金(60977001)资助课题。

作者简介: 安岩(1986—),男,博士研究生,主要从事光学系统设计和光谱仪器光机结构等方面的研究。

E-mail: onesincere_7@yahoo.com.cn

导师简介: 孙强(1971—),男,研究员,博士生导师,主要从事现代红外光学仪器和光谱仪器学等方面的研究。

E-mail: sunq@ciomp.an.cn

手持式拉曼光谱仪, BWTEK 公司生产的 MiniRam 型便携式拉曼光谱仪, 海洋公司生产的手持式 RSL plus 型拉曼光谱仪, 美国 DeltaNu 公司的 Inspector 便携式拉曼光谱仪, 荷兰 AvaRaman 公司的小型拉曼光谱仪等。当前便携式拉曼光谱仪的市场完全被国外公司占有, 我国在产业化上还相当落后, 尚无走向市场的有自主知识产权的产品^[5]。

便携式拉曼光谱仪除了有小型化的单色仪之外^[6,7], 还需要相应的小型拉曼探头或称外光路系统, 它由激发激光的聚焦系统和拉曼散射光的收集系统构成, 结构上有一般光学探头和光纤探头之分^[8]。目前商品便携式拉曼光谱仪的光纤探头的数值孔径(NA)一般在 0.22, 而一般光学探头的数值孔径可达到 0.33^[9]。本文以现代先进的手持式拉曼光谱仪的性能为指标, 研制了一款数值孔径为 0.04 的小型单色仪, 设计了与之相匹配的外光路光学系统。当采用普通球面系统时, 外光路的数值孔径达到 0.33, 采用非球面系统时, 数值孔径可提高到 0.4。外光路总长 150 mm, 满足拉曼光谱仪小型化和便携式的要求^[10]。

2 外光路设计

拉曼光谱仪外光路的基本结构如图 1 所示。激光器出射的激光经二向色镜反射和收集光路的聚焦照射到探测样品上, 探测样品产生的散射光经收集光路收集, 并经二向色镜和陷波滤光片滤除其中的瑞利散射光, 得到的拉曼散射光再经会聚光路, 会聚到单色仪狭缝处。收集光路要求有大的物方数值孔径以收集更多的散射光, 而会聚光路的像方数值孔径要与单色仪系统的数值孔径相匹配。

2.1 设计指标

外光路系统像面为单色仪的入射狭缝, 设定狭缝长度 1 mm, 外光路的设计指标如表 1 所示。

表 1 光学系统主要设计指标

Table 1 Design parameters of the optical system

Parameter	Value
Wavelength range /nm	780~1014
Field of view / μm^2	100×100
NA in object side (spherical system)	0.33
NA in object side (aspherical system)	0.40
NA in image side	0.04
System length /mm	150

2.2 球面系统设计

图 2 为采用球面设计的拉曼光谱仪外光路的光学系统, 采用单透镜实现激光光束的聚焦以及散射光大数值孔径的收集, 单透镜的数值孔径为 0.33, 相应的焦距和入射高分别为 24.36 mm 和 8.04 mm, 窗口的加入使单透镜的入射高度降低为 6.55 mm, 使光束直径在二向色镜和陷波滤光片有效口径内。为了避免照明激光对光学元件尤其是胶合面的损伤, 将二向色镜与陷波滤光片安放在第一双胶合透镜之前。聚焦到探测样品上的激光光斑即为外光路的物方视场高度。在小视场、大数值孔径的情况下, 影响单透镜的像差主要是球差和轴向色差, 采用单透镜不能完成对自身像差的校正, 因此在单透镜之后加入第一双胶合透镜来补偿单透镜的负球差和轴向色差。第一双胶合透镜不仅要补偿单透镜带来的像差, 还要补偿后组望远结构带来的像差。

为了和单色仪的分辨率相匹配, 外光路的像方数值孔径要求为 0.04, 根据前组单透镜出射准直光束的高度, 要满足所需要的像方数值孔径, 像方有效焦距 f' 应为

$$f' = \frac{6.55}{0.04} \text{ mm} = 163.75 \text{ mm}. \quad (1)$$

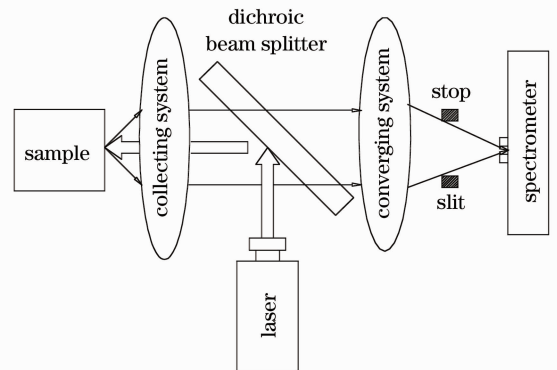


图 1 光学系统结构示意图

Fig. 1 Layout of the optical system

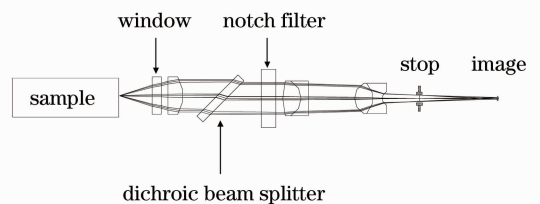


图 2 球面探头光学系统示意图 (NA 为 0.33)

Fig. 2 Optical system of spherical probe (NA: 0.33)

加上前面收集光路、二向色镜和陷波滤光片系统所占的空间,整个系统的长度将近 220 mm,而手持式拉曼光谱仪要求外光路的小尺寸,为此会聚光路需要设计成摄远结构,以缩短后工作距离。图 2 中厚透镜形式的第二双胶合透镜,通过正透镜加快光束的会聚,得到一个小光斑,而负透镜的发散,使主平面前移,构成了双胶合形式的摄远结构,从而实现大有效焦距和缩短系统尺度的目的。摄远结构的摄远比 K 定义为

$$K = \frac{T}{f'} = 1 + d(\varphi - \varphi_1), \quad (2)$$

式中 T 为筒长, d 为前组凸镜和后组凹镜的间距, φ 为总屈光度, φ_1 为前组凸镜的屈光度。由于双胶合透镜的 d 值较小,为获得满意的摄远比,凸镜的屈光度就要较大,从而带来较大的像差,特别是球差。厚透镜双胶合形式的摄远结构,其正负透镜的组合是为了达到缩短系统尺度的目的,而自身的像差校正能力较弱,因此需要其他光学结构进行像差补偿,前面的第一双胶合透镜正是起到这一作用。通过系统的全局优化,最终得到如图 2 所示的球面外光路系统。从第一双胶合透镜的前表面做起点,计算会聚系统的筒长 T ,根据(2)式和 f' 的数值,得到会聚系统的摄远比为 0.59。外光路系统是非成像系统,不需要采用评价函数 MTF,对点斑尺寸也没有特殊要求。然而点斑越小,聚光能力越强,因此用点列图作为系统评价的标准。图 3 给出了物方数值孔径达到 0.33 时系统的点斑情况,可以看出,零视场时点斑的均方根半径为 $20.51 \mu\text{m}$, -0.05 mm 视场时均方根半径为 $29.72 \mu\text{m}$, 0.05 mm 视场时均方根半径为 $29.56 \mu\text{m}$ 。这样的点斑尺寸,对于常用狭缝缝宽为 $50 \mu\text{m}$ 的微型拉曼光谱仪来说,是能够满意的。光谱仪外光路系统的另外一个指标是像面照度均匀性,它是光谱仪探测器上照度均匀性的保证。图 4 给出了本系统的像面相对照度图,可以看出外光路系统的相对照度可以达到 80% 以上。

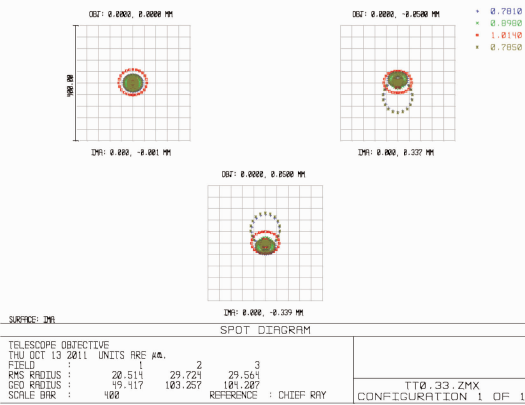


图 3 球面系统点列图

Fig. 3 Spot diagram of aspheric system

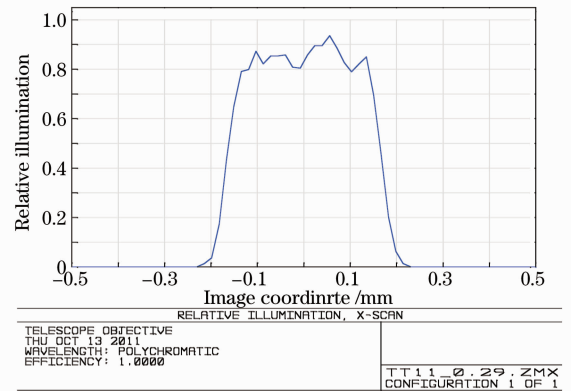


图 4 球面系统相对照度图

Fig. 4 Relative illumination of spherical system

2.3 非球面系统设计

由于球面很难校正大口径的初、高级球差,很难完成大物方数值孔径的设计,为此进行了采用非球面技术的外光路设计。球面镜表面各处的曲率相同,边缘光线与球面法线的夹角大于中心光线与球面法线的夹角,导致边缘光线的剧烈折射,从而在焦平面会聚成一个大的弥散斑。而非球面的曲率是变化的,边缘处相对平坦,可使到达焦平面的光线会聚到同一点,因而在大球差系统中有很好的像差校正功能。由于加工和检测技术的发展,非球面技术得到了广泛应用,在制造方面,主要采用包括研磨抛光法、离子抛光法、计算机控制非球面加工方法,其中通过计算机控制非球面加工法采用计算机控制小磨头对光学元件进行研磨或抛光,通过控制磨头在工件表面的驻留时间及磨头与工件间的相对压力来控制材料的去除量,从而实现复杂高次面形的制造。作为完整的非球面制造技术,同时还需要考虑检测技术,目前检测技术主要包括零位补偿检验法、轮廓测量法、剪切干涉技术等^[11~13]。凹面面型检测可以通过干涉方法进行检测,凸面面型检测采用零位补偿检验法^[14]。旋转对称的非球面矢高定义为

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2k^2}} + \sum a_i r^{2i}, \quad (3)$$

式中 c 为顶点处的曲率, k 为二次曲面常数, r 为垂直光轴方向的径向坐标, $a_i r^{2i}$ 为非球面的高次项。一般情

况下,圆锥曲面就可以满足校正三级球差和其他低级像差,通过优化可以找到最佳校正球差的圆锥曲面系数。本设计中,收集光路单透镜的第二个面承担的屈光度和光线高度均较大,这个面所带来球差也最大,在这个面上加入非球面校正系统球差的效果最好。同时,由于单透镜同时承担会聚激光光束的作用,非球面的引入,可使会聚光斑更小。由于第一双胶合透镜不仅起着校正它前面系统的像差,而且更要校正它后面的摄远结构的像差,因此单透镜的圆锥曲面系数是在全局优化中最终得到的。本设计中取 $k=-2.27$ 即双曲面类型时,可以达到较好的结果,系统的物方数值孔径达到了0.4。据知,这是迄今便携式拉曼光谱仪产品中最大数值孔径的拉曼探头。非球面系统的光路如图5所示。

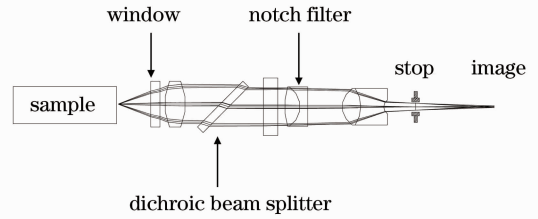


图5 非球面探头光学系统示意图(NA为0.40)

和2.2节类同,采用点列图和像面相对照度图对外光路系统的性能进行评价。图6和图7分别给出了系统的点列图和像面相对照度图。可以看出,零视场时点斑的均方根半径为 $13.92\ \mu\text{m}$, $-0.05\ \text{mm}$ 视场时均方根半径为 $18.27\ \mu\text{m}$, $0.05\ \text{mm}$ 视场时均方根半径为 $19.28\ \mu\text{m}$,和前面的球面系统相比较,非球面系统有相当大的改善。系统的像面相对照度在80%以上,是能够令人满意的。

Fig. 5 Optical system of aspheric probe (NA: 0.40)

可以看出,零视场时点斑的均方根半径为 $13.92\ \mu\text{m}$, $-0.05\ \text{mm}$ 视场时均方根半径为 $18.27\ \mu\text{m}$, $0.05\ \text{mm}$ 视场时均方根半径为 $19.28\ \mu\text{m}$,和前面的球面系统相比较,非球面系统有相当大的改善。系统的像面相对照度在80%以上,是能够令人满意的。

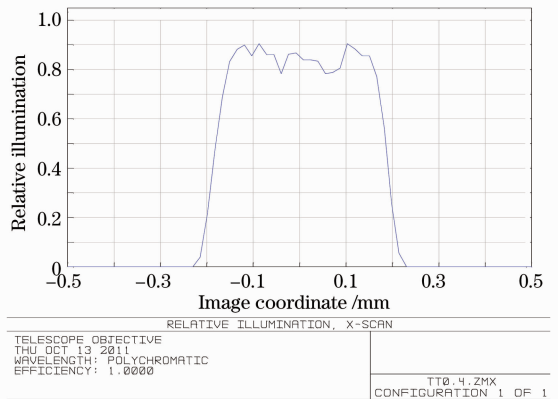


图7 非球面系统相对照度图

Fig. 7 Relative illumination of aspheric system

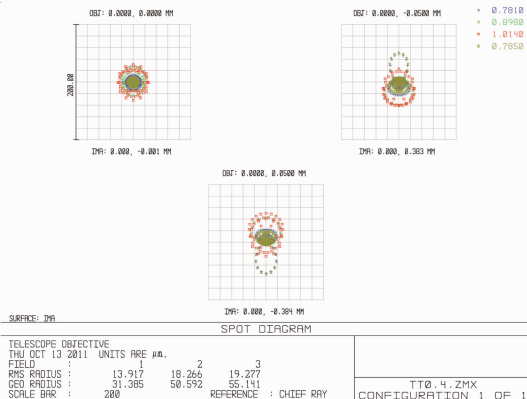


图6 非球面系统点列图

Fig. 6 Spot diagram of aspheric system

3 结 论

根据研制便携式拉曼光谱仪的需求,针对相对孔径为1:12的单色仪,设计了与其配套的外光路光学系统,物方数值孔径为0.33,加入非球面后系统数值孔径可以达到0.4,提高了拉曼散射光探测的灵敏度。系统像面的点斑小、光强度分布均匀。光学系统总长150 mm,满足小型化、便携式的要求。

参 考 文 献

- 1 I. Escudero-Sanz, B. Ahlers, G. B. Courreges-Lacoste. Optical design of a combined Raman laser induced breakdown spectroscopy instrument for the european space agency ExoMars mission[J]. *Opt. Engng.*, 2008, **47**(3): 033001
- 2 Jianhua Mo, Wei Zheng, Zhiwei Huang. Fiber-optic Raman probe couples ball lens for depth-selected Raman measurements of epithelial tissue[J]. *Biomed. Opt. Express*, 2010, **1**(1): 17~30
- 3 F. J. McClung, D. Weiner. Measurement of Raman scattering cross sections for use in calculating stimulated Raman scattering effects[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1964, **54**(4): 641~643
- 4 Yin Jianping, Song Conglong, Lu Zhiwei. Measurement of ultra-low stray light in a laser Raman spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 1990, **19**(2): 165~167
- 5 印建平, 宋从龙, 陆志伟. 激光拉曼分光计中超低杂散光的测试[J]. *光学学报*, 1990, **19**(2): 165~167
- 6 Liu Kedian. Design of a portable Raman spectrometer[J]. *Analytical Instrument*, 2009, (4): 22~24
- 7 刘可滇. 便携式拉曼光谱仪的设计[J]. *分析仪器*, 2009, (4): 22~24

- 6 Xue Qingsheng, Wang Shurong, Li Futian *et al.*. Limb imaging spectrometer for atmospheric remote sensing[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(4): 824~830
薛庆生, 王淑荣, 李福田 等. 用于大气遥感探测的临边成像光谱仪[J]. 光学精密工程, 2010, **18**(4): 824~830
- 7 Ju Hui, Wu Yihui. The state of the art of micro spectrometers[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, **9**(4): 372~375
鞠 挥, 吴一辉. 微型光谱仪的发展现状[J]. 光学精密工程, 2001, **9**(4): 372~375
- 8 Sun Xiuping, Feng Kecheng, Zhang Xinghe *et al.*. Study of polarized characters of stimulated Raman scattering spectrum in single mode circular fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(8): 1169~1171
孙秀平, 冯克成, 张喜和 等. 单模圆光纤中受激拉曼散射光谱偏振特性的研究[J]. 光子学报, 2005, **34**(8): 1169~1171
- 9 Ke Weizhong, Zhou Yixin. Effect of outer optical system arrangement on results of Raman spectra intensity[J]. *Journal of Nanjing Normal University (Natural Science)*, 1990, **13**(1): 39~45
柯惟中, 周义新. 外光路的不同设置对拉曼谱线的影响[J]. 南京师大学报(自然科学), 1990, **13**(1): 39~45
- 10 Yu Yongai, Wu Wei, Zhu Dongyan *et al.*. Portable Raman spectrometer 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
- 11 Zhao Chunmei, Ruan Hao, He Huiling *et al.*. Application of aspheric lens in optical pick-up[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2004, **41**(10): 6~8
赵春梅, 阮 昊, 何慧灵 等. 非球面镜在光学读取头中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2004, **41**(10): 6~8
- 12 Xin Qiming. Manufacturing Technology of Plastic Aspheric Lens[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005
辛企明. 光学塑料非球面制造技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005
- 13 Wang Quandou. Study on Computer Controlled Manufacturing Technology of Off-Axis Aspheric [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2001. 10~14
王权陡. 计算机控制离轴非球面制造技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2001. 10~14
- 14 Zhu Yongjian, Pan Weiqing. Measurement of aspheric surface[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(1): 30~39
朱勇建, 潘卫清. 非球面面形测量技术[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(1): 30~39