

文章编号 1004-924X(2003)05-0461-05

# 激光共振电离质谱计用光入射系统的研制

李红艳, 俞士胜, 任向军, 邓 虎  
(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要: 针对 NINT3000 质谱计的结构特点, 利用高斯光学理论, 推导出双透镜系统光学参数传递方程, 并以此为依据设计出一套光学系统和光路调整装置, 实现了激光束在离子源腔内的精确定位和聚集, 焦斑半径为  $160\ \mu\text{m}$ , 调节精度为  $10\ \mu\text{m}$ 。目前, 该系统已经安装在激光共振电离质谱计上, 并实现了镧的单色双光子共振电离。

关键词: 高斯光束; 光学设计; 调光装置; 共振电离

中图分类号: TH843 文献标识码: A

## Development of light incidence system for laser resonance ionization mass spectroscopy

LI Hong-yan, YU Shi-sheng, REN Xiang-jun, DENG Hu

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

**Abstract:** An equation has been established for the transmission of optical parameters in a two lens system using the Gaussian optical theory, and in the light of the structural features of NINT3000 laser resonance ionization mass spectrometer, an optical system and a laser path adjustment device were then designed using the above equation to achieve precise location and focusing of laser beam in the ion source cavity. The radius of the laser focal spot is  $160\ \mu\text{m}$ , and the adjusting precision being  $10\ \mu\text{m}$ . The system has now been installed in the laser resonance ionization mass spectrometer, and the homochromatic two-photon resonance ionizations of lutetium has been realized.

**Key words:** Gaussian laser beam; optical design; laser path adjustment device; resonance ionization

## 1 引言

激光共振电离质谱学是近十几年发展起来的一种新兴的分析手段, 是激光光谱学和质谱分析相结合的一门交叉科学<sup>[1]</sup>。它利用原子能级的量子化分布, 选定特定波长的激光与原子的某一特定能级产生共振激发, 从而有选择地电离某一特定元素。这种新型的电离方式, 具有普通质谱分析方法所不能比拟的元素选择性, 特别是对排除同质异位素的干扰, 是其他分析手段所望尘莫及的。该项技术在原子能工业、地质、医药卫生、核

试验放化诊断等领域具有广阔的应用前景<sup>[2-5]</sup>。

实验室自行研制的激光共振电离质谱计选用了磁悬浮涡轮分子泵的真空系统和微通道板、法拉第筒和电子倍增器的探测系统。不同强度的离子流应有不同种类的探测器, 对于低信号( $\leq 2.5 \times 10^5$  ions/s)采用电子倍增器进行脉冲计数探测, 对于强信号用法拉第筒进行模数探测, 对于多个低信号的同时接收可用微通道板。质谱计离子源外部开有通光窗口, 既可以用来做超高精度、超高灵敏度的热电离同位素质谱分析, 又可以做超高选择性的激光共振电离质谱分析。

在自行研制的质谱计的基础上, 加上激光束引入装置, 将激光器输出的一定波长的激光, 经过光学系统聚焦成直径约几百  $\mu\text{m}$  的光斑, 并将焦点位置准确定位在离子源内样品附近, 以达到最佳的电离效果。

## 2 问题的提出

实验所采用的热电离式双带离子源, 其结构如图 1 所示。其中, 样品带为 Ta 带, 电离带为 Re 带, 在一般热电离工作方式下, 是通过加热样品带, 将样品蒸发出来, 打到高温的电离带上产生热电离, 但这种方式没有元素选择性, 所有打到电离带上的元素原子都将被电离。在激光共振电离方式下, 则是用特征波长的激光束穿越两带之间仅 1 mm 左右的狭缝, 并在狭缝中心聚焦至 160  $\mu\text{m}$ , 样品就处于焦点的对应位置。加热样品带蒸发出样品原子, 激光在穿越原子蒸汽区时与具有特定能级结构的元素原子相互作用, 发生共振电离, 产生的离子经离子光学系统进入分析管道。

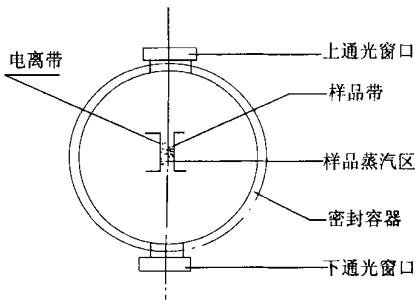


图 1 离子源结构示意图

Fig. 1 Ion source structure

整个离子源位于高真空的封闭环境之中, 光线所要穿越的狭缝很窄, 且位于进样装置的后面, 光线和焦点的位置不可见, 而光路的调节在真空系统的外边, 距离离子源狭缝距离远, 对焦点的位置和大小要求又很严格。所以, 离子源的这些特点正是本工作所要解决的难点。

## 3 光路计算

### 3.1 理论假设

(1) 若染料激光输出为  $\text{TEM}_{00}$  模, 则光束强度的空间分布可认为近似服从高斯函数。

(2) 是高斯光束就必有一束腰  $\omega_0$ 。在束腰中央, 高斯束光线的两条渐近线相交, 该交角就是整个高斯光束的发散角, 两者的关系为:

$$\omega_0 = \frac{2\lambda}{\pi\theta}, \quad (1)$$

假设激光器的远场发散角近似为输出激光高斯光束的发散角。

### 3.2 光路计算<sup>[6]</sup>

激光输入的高斯光束双透镜系统如图 2 所示。

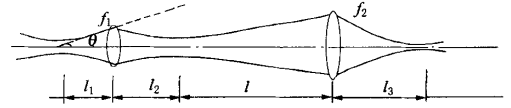


图 2 双透镜系统高斯光路图

Fig. 2 Gaussian laser path in the two lens system

由高斯光学理论, 推导出双透镜系统高斯光学参数传递方程组:

$$\omega_0 = 2\lambda/\pi\theta, \quad (2)$$

$$\omega_{10} = \omega_0 \times \frac{1}{((1 - l_1/f_1)^2 + (\pi\omega_0^2/(f_1\lambda)^2)^{1/2}}, \quad (3)$$

$$l_2 = f_1 - \frac{f_1 - l_1}{(1 - l_1/f_1)^2 + (\pi\omega_0^2/(f_1\lambda)^2)}, \quad (4)$$

$$l = 3.825 - l_1 - l_2, \quad (5)$$

$$\omega(1) = \omega_{10}(1 + (\frac{l\lambda}{\pi\omega_{10}^2})^2)^{1/2}, \quad (6)$$

$$\omega_{20} = \omega_{10} \times \frac{1}{((1 - l/f_2)^2 + (\pi\omega_{10}^2/(f_2\lambda)^2)^{1/2}}, \quad (7)$$

$$l_3 = f_2 - \frac{f_2 - l}{(1 - l/f_2)^2 + (\pi\omega_{10}^2/(f_2\lambda)^2)}, \quad (8)$$

式中:  $\theta$  为高斯光束的发散角;  $f_1, f_2$  为两透镜的焦距;  $l_1, l_2, l, l_3$  分别为各焦点到透镜的距离;  $\omega_0, \omega_{10}, \omega_{20}$  分别为激光束出束, 激光束经过第 1 和第 2 个透镜后的束腰半径;  $\omega(1)$  为激光束在第 2 个透镜前的光斑半径。

对于多透镜系统, 按以上公式递推。将以上公式输入计算机, 分别对单透镜、双透镜和多透镜系统进行计算, 选择出最佳光路系统。

$$f_1 = 1 \text{ m} \quad f_2 = 0.28 \text{ m}$$

$$l_1 = 1.247 \text{ m} \quad l = 2.954 \text{ m} \quad l_3 = 0.267 \text{ m}$$

$$\omega_{10} = 0.552 \text{ mm} \quad \omega(1) = 0.554 \text{ mm}$$

$$\omega_{20} = 0.07 \text{ mm}$$

$\omega_{20}$  即为离子源内的光斑半径。

## 4 系统组成

系统由 4 个部分组成: 外光路系统, 光入射调节装置, 基准光路与出射光调节装置, 波长和功率在线测量系统。

### 4.1 外光路系统

根据光路计算的结果, 设计出外光路系统, 如图 3 所示。该装置位于激光防震平台上, 由一组反射镜、透镜和一个楔形镜组成, 其目的是将聚焦光束准确引到光入射调节装置的入口。

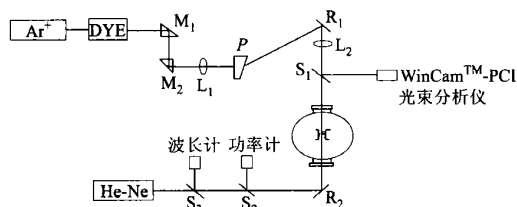


图 3 外光路系统示意图

Fig. 3 Outside laser path system

$M_1$ 、 $M_2$  是直角棱镜,  $L_1$ 、 $L_2$  是透镜,  $P$  是楔形镜,  $R_1$ 、 $R_2$  是全反镜,  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  是分束镜。

外光路系统的调节, 主要在激光防震平台上进行, 利用现有的调节支架就可以完成。由  $Ar^+$  激光器泵浦染料激光器, 产生可调谐波长的激光输出。激光束通过一对直角棱镜  $M_1$ 、 $M_2$  改变传输方向, 通过透镜  $L_1$  初步聚焦, 通过楔形镜  $P$  在垂直于水平面方向上抬高。激光束再经全反镜  $R_1$  转向, 经透镜  $L_2$  聚焦在离子源中心位置。激光束聚焦在离子源中心处的光斑大小不能直接测得, 如图 3 所示, 可用分束镜  $S_1$  从光路中分出一束光到离子源外与离子源中心等距离处一点, 用激光束腰测量装置进行测量。

### 4.2 光入射调节装置

激光与质谱计接口的光路调节必须用高精度的调节装置来实现, 因此设计了类似于对单个元件进行五维调节的装置<sup>[7]</sup>。该装置内装有一个全反镜  $R_1$  和一个聚焦透镜  $L_2$ , 全反镜  $R_1$  改变激光束的传输方向, 聚焦透镜  $L_2$  与外光路中的聚焦

透镜  $L_1$  一起组成倒装望远镜系统以对激光束进行准直和压缩光束发散角, 并使激光束聚焦到离子源的中心。光入射调节装置由 4 个部分组成: 反射镜调节、聚焦透镜调节、 $X$ - $Y$  轴水平调节和转动底盘。

#### (1) 反射镜调节

反射镜调节架的结构如图 4 所示, 该装置采用滚动磨擦的“爬坡”结构, 有效利用现有空间, 实现反射镜仰角的精密调节。反射镜与水平面夹角为  $40^\circ$ , 仰角调节范围为  $10^\circ$ , 调节精度可达  $1'$ 。该装置具有灵活和紧凑的特点。

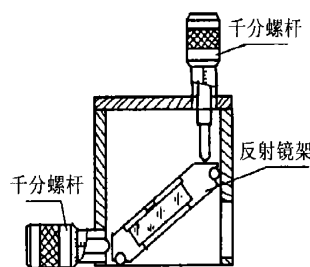


图 4 反射镜调节架示意图

Fig. 4 Reflector adjustment holder

#### (2) 聚焦透镜的调节

聚焦透镜调节装置如图 5 所示。该装置采用的是“三筒”结构<sup>[8]</sup>。外筒为调节旋钮, 中筒为导轨, 内筒为透镜架。通过旋转外筒, 实现透镜架上的透镜沿着中筒导轨作上下平移, 调节范围为 20 mm。整个装置用无间隙螺纹传动, 提高了调节的平稳性和精密性。

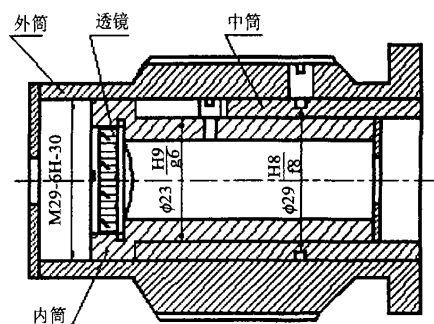


图 5 聚焦透镜调节装置示意图

Fig. 5 Focusing lens adjustment device

### (3) X-Y 轴水平调节

该装置由两个相互垂直的水平调节架,以千分螺杆为调节旋钮,实现座落在上面的所有装置在 X-Y 轴方向的水平移动,调节精度为 10  $\mu\text{m}$ 。

### (4) 转动底盘

转动底盘的结构如图 6 所示。该装置位于整个调节装置的最底部,带动整个调节装置在  $5^\circ$  的范围内转动,转动精度为 10 mrad。

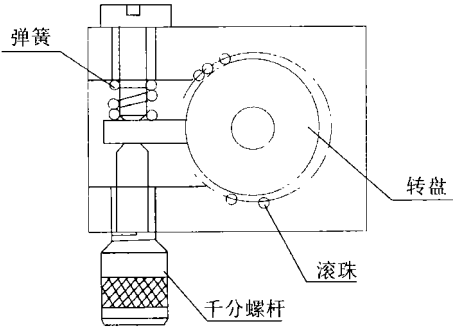


图 6 转动底盘结构示意图

Fig. 6 Structure of rotating stage

通过以上的光入射调节,可以将激光束准确引到离子源的中心位置,达到对样品共振电离的目的。

### 4.3 基准光和出射光调节

该装置由 He-Ne 激光器和一系列光学调整装置组成,可以作为整个系统调光的基准,并将从离子源出射的激光调回到激光平台上。

在整个系统的初建过程中,必须有一个基准光源。可用一台 He-Ne 激光器作基准,利用波长

和功率在线测量,让 He-Ne 激光从质谱计的后面逆着染料激光入射的方向,入射到离子源的指定位置。再以这条光线为基准,安装所有的光学调节装置,使穿过离子源的 He-Ne 激光再次回到激光防震平台上。最后,在激光平台上调节染料激光,使之与 He-Ne 激光重合。这样,染料激光便能够基本上入射到离子源的指定位置,通过对各调节装置进行微调,便能使整个光路及其焦点准确定位。

### 4.4 波长和功率的在线测量

波长和功率在线测量系统可以在质谱计工作过程中,在线测量激光波长和功率及其稳定性。为了最大效率利用激光功率,在质谱计离子源的后部,加上了一组 X-Y 轴水平调节装置和一个反射镜调节架,将从离子源出射的激光再次引到激光防震平台上,用波长计和功率计对激光束进行在线测量,随时监测激光功率和波长的变化。

## 5 结 果

高斯光束光路计算结果,激光聚焦在离子源微区的光斑直径为 150  $\mu\text{m}$ 。实验中,用 Win-Cam<sup>TM</sup>-PCI 光束分析仪进行光束分析,光束分析仪的 CCD 成像系统给出光束能量分布轮廓图。测量结果激光聚焦在离子源微区,其位于离子源中心处的光斑直径为 160  $\mu\text{m}$ ,符合共振电离的需要,达到了设计要求<sup>[9]</sup>。整套系统精度高,调节方便。目前,该系统已经安装到激光共振电离质谱计上,实现了镱的单体双光子共振电离<sup>[10]</sup>。

### 参考文献:

- [1] 朱凤蓉. 激光共振电离质谱学及应用[J]. 国外核试验技术, 1990, 13(3): 1-18.  
ZHU F R. Laser resonance ionization mass spectroscopy and the application [J]. *Nuclear and High Technology Development A broad*, 1990, 3(3): 1-18.
- [2] 李春明, 戴松涛. 溅射原子化激光共振电离飞行时间质谱仪的研究及应用进展[J]. 光谱学与光谱分析, 1997, 17(1): 102-107.  
LI CH M, DAI SH T. Development of a SRF-TOFMS and the application research progress [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 1997, 17(1): 102-107.
- [3] 史桂珍. 铀原子多色三光子共振电离谱研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2000, 20(1): 5-8.  
SHI G ZH. The multicolor three photon resonant ionization spectrum studies in uranium atom [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2000, 20(1): 5-8.
- [4] MILLER C M. Resonance ionization spectroscopy [J]. *J Opt Soc Am B*, 1985, 12(6): 897-902.
- [5] RUSTER W. Detection of very rare isotopes by collinear resonance ionization of accelerated atoms [A]. *Inst Phys Conf*

Ser[C]. 1989. 114-119.

- [6] 常军, 翁志成, 姜会林, 等. 宽覆盖、离轴空间相机光学系统的设计[J]. 光学精密工程, 2003, 11(1): 55-57.  
CHANG J, WENG ZH CH, JIANG H L, *et al*. Design of optical system for space camera with long focal length, wide coverage and high resolution[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(1): 55-57.
- [7] 杜俊峰. 楔铁式调平机构的设计[J]. 光学精密工程, 2003, 11(3): 301-304.  
DU J F. Design of the wedge lever[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(3): 301-304.
- [8] 杨劲松. 光学镜头机械结构参数化设计系统的开发[J]. 光学精密工程, 1999, 7(6): 6-9.  
YANG J S. A parameter design system for mechanical structure[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1999, 7(6): 6-9.
- [9] 吴晗平. 激光束光束质量的评价与应用分析[J]. 光学精密工程, 2000, 8(2): 128-132.  
WU H P. Evaluation and applied analysis of laser beam quality[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8(2): 128-132.
- [10] 李志明, 余士胜, 张子斌, 等. 利用激光质谱从镱镧混合物中测定镧同位素比值[J]. 质谱学报, 1999, 20(3, 4): 34-35.  
LIZH M, YU SH SH, ZHANG Z B, *et al*. Measurement of lutetium isotope ratio in the mixture of ytterbium and lutetium by laser resonance ionization mass spectrometer[J]. *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society Transaction*, 1999, 20(3, 4): 34-35.

作者简介: 李红艳(1967-), 女, 陕西临潼人, 1990年毕业于西北大学激光物理专业, 学士, 从事激光共振电离质谱学工作。E-mail: gzheng@nint.ac.cn