

文章编号: 0258-7025(2005)06-0775-04

波长光强分束器与光谱导数的实现

陈湛旭¹, 唐志列^{1*}, 万 巍², 王雄妹¹

(¹华南师范大学物理与电信工程学院, 广东 广州 510631)
(²华南师范大学信息光电子科技学院, 广东 广州 510631)

摘要 根据光谱导数原理, 设计了波长光强分束器, 它能对光束实现光强和波长的空间分离, 获得满足一阶光谱导数条件的两束光。开发了一种双光束双波长导数光谱技术, 在物理上实现了光谱求导。使用波长光强分束器获得两束满足一阶光谱导数条件的光束, 互补调制该两束光到同一个光电探测器进行差分, 探测器输出差分信号到计算机进行处理, 扫描波长从而获得光谱的一阶导数。实验验证了系统的可行性, 并测出氙灯发射谱的导数光谱, 发现其分辨率和光谱的精细结构都比其发射谱好。

关键词 光谱学; 导数光谱; 波长光强分束器; 差分技术

中图分类号 TH744.1 **文献标识码** A

A Wavelength-Intensity Splitter and a New Derivative Spectrum Technique

CHEN Zhan-xu¹, TANG Zhi-lie¹, WAN Wei², WANG Xiong-mei¹

(¹ School of Physics and Telecom Engineering, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510631, China)
(² School for Information and Optoelectronic Science and Engineering, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510631, China)

Abstract The derivative spectrum technique has been widely applied to spectral analysis due to its high resolution and sensitivity. A new kind of derivative spectrum technique is presented in this paper. In order to realize derivative spectrum, a wavelength-intensity splitter has been designed to obtain two light beams with slim difference in wavelength. The two light beams were complementarily modulated with an optical complementary chopper. The modulated light beams were focalized to a photoelectric detector and realized intensity difference. By scanning the wavelength, the derivative spectrum was obtained. The derivative spectrum signal from the detector was acquired and recorded by a computer. Through a lot of experiments, the rationality of the system was approved. The emission spectrum and its first derivative spectrum of the xenon lamp were measured on this system. Finally, the result shows that the first derivative spectrum sensitivity and resolution are both higher than that of the emission spectrum.

Key words spectroscopy; derivative spectrum; wavelength-intensity splitter; difference technique

1 引 言

导数光谱又称为微分光谱, Dymond^[1]首次提出把导数技术应用于物质分析领域, 它是发射(吸收)光谱强度对波长 λ 的变化率, 它对重叠谱有较好的分辨能力, 可以放大谱带精细结构, 从而有利于精确确定物质发射(吸收)峰的位置, 能分辨出弱峰、肩峰、重叠峰和复合峰, 提高光谱分析的灵敏度^[2]。已

广泛应用于化学分析、微量检测、医学分析和中药鉴定等领域^[2~10]。目前, 获得导数光谱的方法有^[1]: 双波长扫描法、波长调制法、固定狭缝法、位移记忆法、模拟微分法和计算机的数字微分法等。通常的导数光谱仪都是使用双波长法获得一阶导数谱, 大多数的双光束技术采用双单色器设计, 要控制两个单色器分出的单色光的波长差 $\Delta\lambda$ 足够小 ($1 \sim$

收稿日期: 2004-08-31; 收到修改稿日期: 2005-01-24

基金项目: 国家自然科学基金(60377009)资助项目。

作者简介: 陈湛旭(1978—), 男, 广东吴川人, 华南师范大学物理与电信工程学院硕士研究生, 主要从事光谱分析及光信息处理方面的研究。E-mail: chenzhanxu@163.net

* 通信联系人。E-mail: tangzhl@senu.edu.cn

2 nm),对工艺技术的要求比较高。本文设计了一种波长光强分束器,它利用一台光栅单色仪和一个分光棱镜,成功地获得了发光体光谱的一阶导数,这有利于光源发射光谱的研究。该系统具有分辨率高、微分波长 $\Delta\lambda$ 小,结果准确等特点。

2 波长光强分束器的基本原理

为了获得中心波长稍有差别的两光束 $I(\lambda + \Delta\lambda)$ 和 $I(\lambda)$,利用一台光栅单色仪和一个分光棱镜,设计了一台波长光强分束器,它既能使复合光色散,又能调节色散光束强度大小。光栅单色仪输出光在空间展开成有规律分布的单色光,在输出狭缝口左右两边,光束的波长必然会有微小差别。在狭缝出口处,使用一个尖劈棱镜将光栅单色仪输出光分成波长稍有差别的两束光 $I(\lambda + \Delta\lambda)$ 和 $I(\lambda)$,这两束光经棱镜进一步折射后分开为中心波长有微小差异、光强可以调节的空间上分离的光束。如图 1 所示,假如棱镜位于出射光束的中心位置,左边光的波长为 λ ,右边光的波长为 $\lambda + \Delta\lambda_0$ 。在极小的范围内,波长分布可以看成是线性的,因此,左右两光束的中心波长分别为 $\lambda + \Delta\lambda_0/4$ 和 $\lambda + 3\Delta\lambda_0/4$,可计算这两光束的中心波长差为

$$\Delta\lambda = \left(\lambda + \frac{3\Delta\lambda_0}{4}\right) - \left(\lambda + \frac{\Delta\lambda_0}{4}\right) = \frac{\Delta\lambda_0}{2}, \quad (1)$$

若左右移动棱镜的位置,可以调节两光束的中心波长和光强的大小,就能同时实现波长和光强的空间分束与调节。

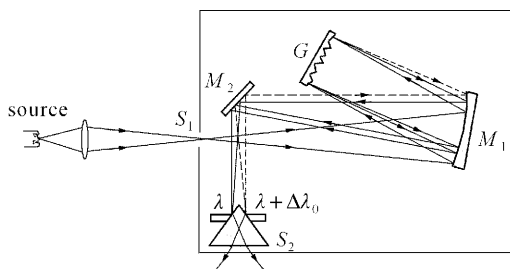


图 1 波长光强分束器原理图

Fig. 1 Principle of wavelength-intensity splitter

3 光谱导数原理与设计

由数学基本导数公式出发,光谱强度对波长 λ 的变化率(光谱导数)可以写为

$$\frac{dI}{d\lambda} = \lim_{\Delta\lambda \rightarrow 0} \frac{\Delta I}{\Delta\lambda} = \lim_{\Delta\lambda \rightarrow 0} \frac{I(\lambda + \Delta\lambda) - I(\lambda)}{\Delta\lambda}, \quad (2)$$

式中 $I(\lambda + \Delta\lambda)$ 和 $I(\lambda)$ 分别代表发光体波长在

$\lambda + \Delta\lambda$ 和 λ 处的光强。因此,只要同时满足下列三个条件,就可以实现光谱导数:1) 获得两束光,它们的强度为 λ 的函数;2) 两光束波长的差异足够小,即 $\Delta\lambda \rightarrow 0$; 3) 实现 $I(\lambda + \Delta\lambda)$ 和 $I(\lambda)$ 的差分。

3.1 $I(\lambda + \Delta\lambda)$ 和 $I(\lambda)$ 的获得与 $\Delta\lambda \rightarrow 0$ 的实现

使用波长光强分束器能得到两光束 $I(\lambda + \Delta\lambda)$ 和 $I(\lambda)$,它们的强度相互可调节。光栅单色仪输出光单色性较好,分束后两光束的中心波长差 $\Delta\lambda \rightarrow 0$ 。由于光栅单色仪和尖劈棱镜的共同作用,使得输出两光束的中心波长差异足够小,从而获得所需的两光束并满足 $\Delta\lambda \rightarrow 0$ 。使用光栅单色仪进行连续扫描,使输出光的波长连续变化,便可以在一个比较长的波段内得到两光束并满足 $\Delta\lambda \rightarrow 0$ 。

3.2 $I(\lambda + \Delta\lambda)$ 和 $I(\lambda)$ 的差分技术

使用自行设计的斩波器将两束光互补调制,然后将两透射光束聚焦到同一探测器上,它交替接收这两光束的光信号,探测器最后输出信号的大小决定于两光束的强度之差。探测器输出的差分信号输入到锁相放大器,锁相放大器提取、放大后将差分信号输入到计算机记录并处理,最后得到发光体发射光谱的导数值。

4 实验装置

实验装置如图 2 所示。实验时,分别用中心波长为 623.8 nm 的 He-Ne 激光器和 1000 W 磁场稳弧卧式氙灯作光源。光栅单色仪使用的是北京第二光学仪器厂生产的 WDP500-2A 型平面光栅型(线色散率倒数约为 1.6 nm/mm),锁相放大器是 Stanford Research System 的 SR530-Lock In Amplifier,探测器是光敏电阻型的光电探测器。数据采集卡为 PCL-818HG 型采集卡。波长光强分束器和斩波器是自行设计的。

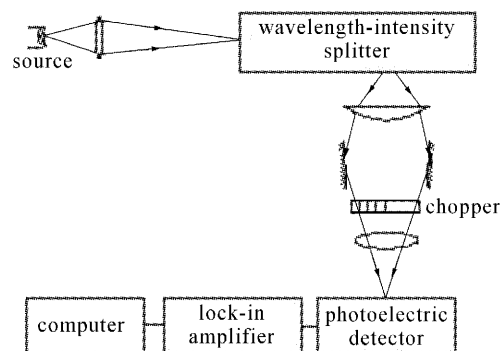


图 2 导数光谱实验装置图

Fig. 2 Experiment setup of derivative spectrum

5 实验结果与分析

5.1 $\Delta\lambda$ 的计算与影响

导数光谱中, 微分波长 $\Delta\lambda$ 的大小对导数结果有关键性的影响。光栅单色仪出射光的单色性比较好, 对其出射光进行分束, 微分波长 $\Delta\lambda$ 相对小。在光栅单色仪的谱面上分光时, 光栅单色仪在单色仪系统参量确定后, 分辨率主要取决于单色仪入、出射狭缝的开启宽度, 而微分波长 $\Delta\lambda$ 的大小由出射狭缝的开启宽度决定。出射狭缝宽度 Δl 与 $\Delta\lambda_0$ 大小关系由单色仪的线色散率倒数得到^[11], 线色散率倒数指的是每单位长度 (mm) 内所包含的波长数 (nm)。即

$$\Delta\lambda_0 = k \cdot \Delta l, \quad (3)$$

其中 k 为线色散率倒数。由(1)式和(3)式可得

$$\Delta\lambda = \frac{1}{2}\Delta\lambda_0 = \frac{1}{2}k \cdot \Delta l. \quad (4)$$

由此可见, 入、出射狭缝越小, 微分波长 $\Delta\lambda$ 就越小, 系统的分辨率越高, 导数谱的精度越高, 但是光强相对就越小, 信号就越微弱, 噪声干扰大, 故入、出射狭缝不能太小。

5.2 He-Ne 激光的发射谱和一阶导数谱

首先用已知光谱分布的 He-Ne 激光来校准。由于 He-Ne 激光单色性好, 发射谱呈高斯分布, 若在中心波长 632.8 nm 处使用波长光强分束器分光, 能获得两束光强相等的 $I(\lambda + \Delta\lambda)$ 和 $I(\lambda)$ 。因此, 使用波长光强分束器对 He-Ne 激光在中心波长处分束, 调节两束光 $I(\lambda + \Delta\lambda)$ 和 $I(\lambda)$ 使两者光强相等。测量 He-Ne 激光有两方面作用: 1) 调节光路, 保证波长光强分束器位于出射光束的中心位置, 即调节波长光强分束器使两束光光强相等, 此后, 扫描波长使两光束强度随 λ 变化而改变; 2) 验证系统的可行

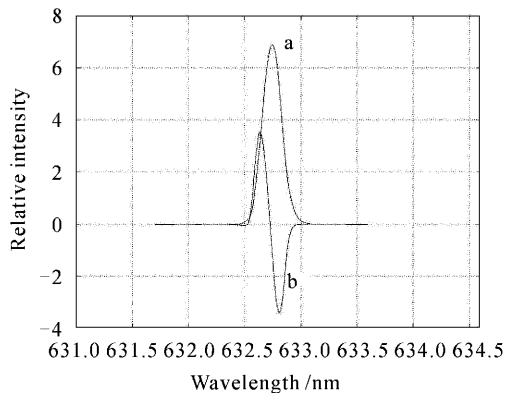


图 3 He-Ne 激光发射谱(a)和一阶导数谱(b)
Fig. 3 Spectrum (a) and it's derivative spectrum (b) of He-Ne laser output

性, 选取单色仪的入、出射狭缝的宽度为 0.5 mm, 扫描速度为 1 档, 调制频率为 80 Hz, 时间常数 1 s, 锁相放大器的灵敏度为 100 mV, 波长扫描范围是 632~633 nm。最后测得 He-Ne 激光的发射谱和一阶导数谱如图 3 所示。

同时, 由(4)式可以计算微分波长

$$\Delta\lambda = \frac{1}{2} \times 1.6 \text{ nm/mm} \times 0.5 \text{ mm} = 0.4 \text{ nm}$$

5.3 氙灯的发射谱与一阶导数谱

图 4(a)为氙灯的发射光谱, (b)为用该系统测得的导数光谱。测量时单色仪的入、出射狭缝的宽度为 1.5 mm, 扫描速度为 3 档, 调制频率为 40 Hz, 时间常数为 1 s, 锁相放大器的灵敏度为 50 mV, 波长扫描范围为 680~820 nm。由图 4 可以看到, 在发射谱的一系列谱峰处(例如 712 nm, 740 nm, 765 nm), 其所对应的一阶导数为零; 同时, 图 4(a)在 780~820 nm 之间的三个特征峰幅度相对较小, 图 4(b)中峰值却比较明显, 并且发射谱中波长为 685 nm 和 730 nm 附近的肩峰, 在导数谱线中却易于分辨。由此说明导数光谱能放大谱线的精细结构、定位峰值波长和分辨肩峰, 具有比发射谱更高的分辨率和精细结构。

同样由(4)式可计算微分波长

$$\Delta\lambda = \frac{1}{2} \times 1.6 \text{ nm/mm} \times 1.5 \text{ mm} = 1.2 \text{ nm}$$

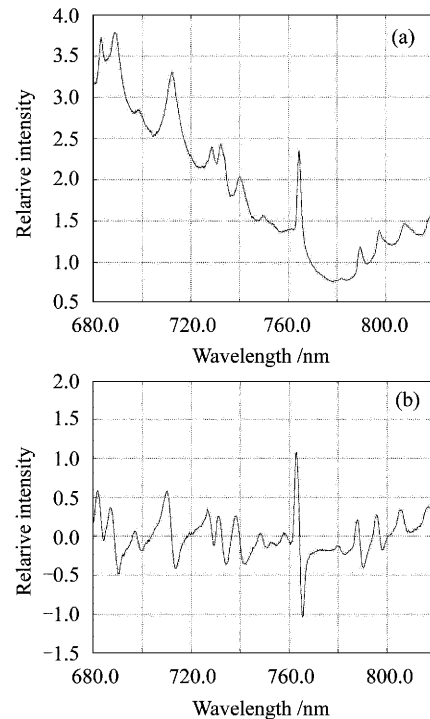


图 4 氙灯发射谱(a)和一阶导数谱(b)
Fig. 4 Spectrum (a) and it's derivative spectrum (b) of xenon lamp output

6 结 论

通过实际的测量与对实验结果的分析,验证了本系统的可行性与准确性,为光谱导数提供了一种新的简便的分析方法。波长光强分束器使复合光色散,能调节色散光束强度大小。由于使用分束棱镜将单色仪出射的单色性较好的光一分为二,提高了系统的分辨率,微分波长 $\Delta\lambda$ 自然比较小,导数结果更加准确。若入射光的强度加强,微分波长 $\Delta\lambda$ 可以进一步减小,得到的导数结果可以更加准确。而使用同一个探测器进行差分,保证了结果误差小,准确性高。

参 考 文 献

- 1 Luo Qingyao, Deng Yanzhuo, Cai Ruxiu *et al.*. Spectrophotometry [M]. Beijing: Science Press, 1998. 240~249
罗庆尧,邓延倬,蔡汝秀等. 分光光度分析[M]. 北京: 科学出版社, 1998. 240~249
- 2 Tang Zhilie, Liu Jinlong, Xia Yunfei *et al.*. Characteristic absorption peak of the human blood measured with differential photoacoustic spectroscopy [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, **47**(24): 2029~2033
- 3 W. C. Bradford, J. D. Beach, R. T. Collins *et al.*. Spatially resolved derivative spectroscopy of vertical-cavity surface-emitting lasers using near-field scanning optical microscopy [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **80**(6): 929~931
- 4 Nuran Özalpin, Aysegül Kocer. Determination of omeprazole in pharmaceuticals by derivative spectroscopy [J]. *J. Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 1997, **16**: 337~342
- 5 Shao Jun. Spectroscopic derivative in optical study of GaInAsP/InP and GaInP/AlGaInP multiple quantum wells [J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, **52**(10): 2534~2540
- 6 Zhang Shufang, Qin Mei, Qu Liqiang. The simultaneous determination of iron (III) and aluminium (III) in quartz sand by first derivative spectrophotometry [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2002, **22**(1): 113~115
张淑芳,秦梅,曲立强. 一阶导数光谱法同时测定石英砂中铁和铝的研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2002, **22**(1): 113~115
- 7 Qiaojuan Gong, Liming Du, Weijun Jin *et al.*. Determination of ofloxacin in urine by synchronous-derivative fluorimetry [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2001, **21**(3): 356~358
弓巧娟,杜黎明,晋卫军等. 同步-导数荧光光谱法测定尿样中的痕量氧氟沙星 [J]. 光谱学与光谱分析, 2001, **21**(3): 356~358
- 8 Liang Hong, Zhou Yongqia, Shen Panwen. Conformational studies on serum albumin III. Alcohol acetone-induced conformational change of HAS [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 1996, **16**(5): 116~119
梁宏,周永洽,申泮文. 血清白蛋白的构象研究 III. 乙醇、丙酮诱导 HAS 构象变化 [J]. 光谱学与光谱分析, 1996, **16**(5): 116~119
- 9 Wang Ruifeng, Cai Borong, Hu Yu *et al.*. Study of the frequency stabilization of InGaAsP semiconductor laser using the optogalvanic effect of a gas absorption cell [J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **A25**(1): 37~40
王瑞峰,蔡伯荣,胡渝等. 利用气体吸收池光电流信号稳定 InGaAsP 半导体激光器频率 [J]. 中国激光, 1998, **A25**(1): 37~40
- 10 Zhang Ruizhi, Luo Jinsheng. Spectroscopic ellipsometry of strained Si/Ge superlattices [J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(7): 870~873
张瑞智,罗晋生. Si/Ge 应变层超晶格的椭圆偏光光谱 [J]. 光学学报, 1997, **17**(7): 870~873
- 11 Li Tingjun, Jiang Tieshan, Zhang Bingyi. The Analyse of Emission Spectrums [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1983. 145
李廷钧,蒋铁珊,张秉义. 发射光谱分析[M]. 北京: 原子能出版社, 1983. 145