

光谱仪联合使用提高谱线的测量宽度

刘汉臣¹ 王庆飞¹ 唐远河² 严祥安¹

(¹ 西安工程大学理学院, 陕西 西安 710048; ² 西安理工大学理学院, 陕西 西安 710048)

摘要 为了提高光谱仪测量谱线的精度, 推导出计算机自动控制多光栅转动的光谱仪测试系统的角色散率、线色散率和分辨本领等参量公式, 提出一种将两台光谱仪联合使用以提高谱线测量精度的测量方法。理论分析了两台光谱仪联合测激光线宽的原理, 并用两台光谱仪联合使用对 He-Ne 激光谱线宽度进行了测量。实验结果表明, 两台光谱仪联合测量 He-Ne 激光谱线的半峰全宽的放大倍数 3.38×10^5 , 比单台光谱仪测量至少可以将谱线宽度的测量精度提高 5 个数量级。

关键词 光学测量; 光栅光谱仪; 谱线宽度测量; 角色散率; 线色散率; 多光谱仪联合应用

中图分类号 O433.1 **文献标识码** A

Spectral Linewidth Measurement Enhancement by Two United Spectrometers

Liu Hanchen¹ Wang Qingfei¹ Tang Yuanhe² Yan Xiangan¹

(¹ School of Science, Xian Polytechnic University, Xian, Shaanxi 710048, China)
(² School of Science, Xian University of Technology, Xian, Shaanxi 710048, China)

Abstract In order to improve the measuring precision of spectral line by spectrometer, the parameters of angle dispersive power, line dispersive power and resolving power of spectrometer with grating scanning controlled by computer have been calculated theoretically, and then a method has been put forward to improve the linewidth measurement by two united homogeneous spectrometers. The principle of measuring laser linewidth by two united spectrometers is analyzed theoretically, and the linewidth of He-Ne laser is measured. The experimental results shows amplification factor of full width at half maximum (FWHM) of He-Ne laser spectral line is 3.38×10^5 , and 5 order magnitude of the line width measurement is enhanced at least by the two united homogeneous spectrometers than only one.

Key words optical measurement; grating spectrometer; linewidth measurement; angle dispersive power; line dispersive power; uniting application by spectrometers

1 引言

无论是吸收光谱, 还是荧光光谱、拉曼光谱, 光谱仪在获得单波长辐射过程中都是不可或缺的手段^[1~7]。光谱仪具有很宽的光谱范围、高光谱分辨率(0.001 nm)、自动波长扫描、完整计算机控制等功能, 极易与其他设备融为高性能自动测试系统。使用计算机自动扫描多光栅光谱仪已成为光谱研究的首选^[1,4]。在使用多光栅光谱仪进行相关实验中, 常需对宽度很窄的谱线进行高精度测量(例如 He-Ne 激光的谱线宽度)。而窄谱线的精确测量, 在

实验室常用干涉的方法(如法布里-珀罗干涉仪)进行测量^[8]。本文在只使用光谱仪而不增加干涉设备和光路的情况下, 提出一套切实可行的精确测量谱线宽度的方法: 几个光谱仪联合使用测量谱线宽度。

2 计算机自动控制光栅光谱仪的参量

计算机自动控制多光栅转动的光谱仪装置如图 1 所示。复色光进入光谱仪的入射狭缝, 由光学准直镜汇聚成平行光, 再通过衍射光栅色散为分开的波长。通过计算机控制光栅的转动, 可精确改变

收稿日期: 2007-05-11; 收到修改稿日期: 2007-12-06

基金项目: 陕西省教育厅专项基金(05J K197, 07JK261)和陕西省自然科学基金(2006A08)资助课题。

作者简介: 刘汉臣(1965-), 男, 江苏人, 硕士, 副教授, 主要从事光电信息与检测等方面的研究。

出射光的方向,利用各波长离开光栅的不同角度,得到相同级次各波长的衍射角分布,最后由聚焦反射镜成像于出射狭缝。实用中的光谱仪,光栅是转动的,入射光和反射光的方向均不改变,这与光学教材中推导角色散率等参量时入射角不变不同^[9,10]。在计算机自动控制光栅转动情况下,改变入射光与光栅法线的夹角,可以计算出光谱仪测试系统的角色散率、线色散率和分辨本领等参量。

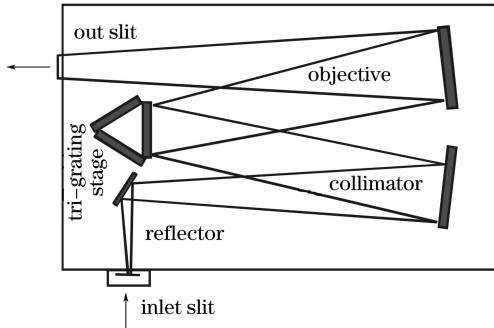


图 1 光栅光谱仪结构

Fig. 1 Structure of grating spectrometer

2.1 角色散率

光栅的角色散率是单位波长的偏向角增量,即 $d\beta/d\lambda$, β 为衍射角, λ 为入射光波长。光栅方程:

$$m\lambda = d(\sin\alpha \pm \sin\beta), \quad (1)$$

$(m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$

式中 d 为光栅常量, m 为光谱级次, α 为入射角, \pm 符号分别对应衍射光线与入射光线在光栅法线的同侧和异侧。使用计算机自动控制光栅转动,入射角和衍射角都在改变。假设入射光与衍射光在光栅法线异侧,则(1)式中 α 取正值, β 取负值。当光栅旋转时,入射角 α 改变了,衍射角 β 也改变了,而在 $(\alpha - \beta)$ 不变的方向上得到不同波长的谱线,则光栅光谱仪的角色散率为

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{d\alpha}{d\lambda} = \frac{m}{\sqrt{(2d\cos A)^2 - (m\lambda)^2}}, \quad (2)$$

式中 $A = (\alpha - \beta)/2$, 从(2)式可见,色散率取决于光栅色散元件的光栅常量 d 、衍射级次 m 、仪器的安放位置 A 和入射光波长 λ 。(2)式不同于传统光学教材中的光栅角色散率。^[9,10]

2.2 线色散率

线色散率是色散系统把两个不同波长的光在成像面上彼此分开的程度,即 $dl/d\lambda$ ^[9]:

$$\frac{dl}{d\lambda} = f \frac{d\beta}{d\lambda}, \quad (3)$$

式中 f 为光谱仪物镜焦距。如果光谱仪的接收焦平面为曲面,(3)式成立。如果焦平面是平面,线色散

率应该变为

$$\frac{dl}{d\lambda} = \frac{d\beta}{d\lambda} \frac{f}{\sin\epsilon}, \quad (4)$$

式中 ϵ 为焦平面与物镜光轴间的夹角。将(2)式代入(4)式,则入射角改变的情况下光栅光谱仪的线色散率为

$$\frac{dl}{d\lambda} = \frac{m}{\sqrt{(2d\cos A)^2 - (m\lambda)^2}} \frac{f}{\sin\epsilon}. \quad (5)$$

2.3 分辨本领

光谱仪的分辨本领是表征它能分开两条极为靠近谱线的能力,即

$$R_s = \frac{D}{f} \frac{dl}{d\lambda}, \quad (6)$$

式中 D 为光谱仪的色散元件的有效孔径, D/f 为光谱仪的相对孔径。结合(5)式、(6)式,则转动光栅光谱仪的分辨本领为

$$R_s = \frac{mN}{\sqrt{(2\cos A)^2 - (m\lambda/d)^2}}, \quad (7)$$

式中 N 为光栅总刻度数。

与光学教材中的光栅分辨本领 $R_g = mN$ 相比,(7)式的光栅扫描单色仪的分辨本领不仅与光栅的衍射级数 m 、光栅总刻度数 N 有关,还与入射光波长 λ 、光栅常量 d 和仪器的安放位置 A 有关。

3 两光谱仪联立测激光线宽的实验及结果

3.1 理论分析

如果线宽 $\Delta\lambda_0$ 的谱线进入第一台单色仪出口处的色散宽度为

$$\Delta l_1 = \Delta\lambda_0 \frac{d\beta}{d\lambda} f_1, \quad (8)$$

式中 f_1 为第一台光谱仪物镜焦距。具有 Δl_1 线宽的谱线再次进入第二台单色仪,其出口处的色散宽度为

$$\Delta l_2 = \Delta\lambda_0 \left(\frac{d\beta}{d\lambda} \right)^2 f_1 f_2, \quad (9)$$

式中 f_2 为第二台光谱仪物镜焦距。所以,谱线经两台单色仪联合使用后的色散宽度与单台单色仪使用时的色散宽度倍率为

$$\frac{\Delta l_2}{\Delta l_1} = \frac{d\beta}{d\lambda} f_2. \quad (10)$$

本文以 He-Ne 激光 632.8 nm 波长为例,从理论上分析,两台单色仪联合使用对测量谱线精度的提高程度。

所用设备有 He-Ne 激光器、SBP300 与 SBP500

两台单色仪、样品室、DCS102 数据采集器、DSi200 硅光电探测器、直角棱镜、计算机等。因为 SBP300 与 SBP500 单色仪的物镜焦距分别为 $f_1 = 300 \text{ mm}$ 和 $f_2 = 500 \text{ mm}$, 选用相同光栅就具有相同角色散率。SBP300 单色仪有 3 片光栅, 选刻线密度 1200 lp/mm , 将出射狭缝调至最小 $\Delta l = 10 \text{ }\mu\text{m}$, 以获得光谱仪的最高精度。厂家给定的两台单色仪的分辨率分别为 0.1 nm 和 0.05 nm 。

He-Ne 激光中心波长为 632.8 nm , 频宽取 $1.6 \times 10^6 \text{ Hz}^{[11]}$, 谱线线宽 $\Delta\lambda_0 = 2.14 \times 10^{-6} \text{ nm}$ 。在(2)式中取 $m=1$, 因为 $0 < A < 90^\circ$, 在此近似取 $A = 15^\circ$, 代入(2)式得角色散率为 $6.76 \times 10^{-4} \text{ nm}^{-1}$ 。(5)式中取 $\epsilon = 90^\circ$, 则线色散率为 0.203 mm/nm 。线宽为 $\Delta\lambda_0 = 2.14 \times 10^{-6} \text{ nm}$ 的激光经 SBP300 单色仪后被色散的宽度 $\Delta l_1 = 0.43 \text{ nm}$ 。

本文用 SBP300 光谱仪测量得到如图 2 所示的线宽为 $\Delta\lambda = 1.40 \text{ nm}$, 可见用单台光谱仪测量谱线的宽度与实际值相差较大, 说明单台光栅光谱仪的分辨率达不到精确测量激光谱线宽度的要求。而进行光学测量时, 时常只有光栅光谱仪, 而没有法布里-珀罗干涉仪等精密测量谱线宽度的仪器。为此, 本文把两个单色仪联合使用, 以求提高光路的色散率, 进而达到提高测量谱线精度的目的。

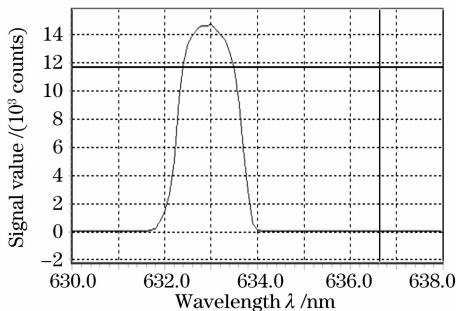


图 2 单台光谱仪测量 He-Ne 激光的线宽

Fig. 2 Linewidth of He-Ne laser measured with a single spectrometer

计算出来的谱线宽度 0.43 nm 是第二台单色仪 SBP500 的入口谱线宽度, SBP500 的分辨率为 0.05 nm , 完全可以完成激光谱线宽度的测量。

3.2 实验及结果

两台单色仪联合使用测量激光谱线宽度的装置, 如图 3 所示, 在出射狭缝处放置一个光电探测器以测量出射光强, 改变出射波长就可以测出相应波长的相对光强, 从而测出激光的谱线宽度。用计算机 1 把 SBP300 单色仪的出射波长调到 632.8 nm , 用与 SBP500 单色仪相连的计算机 2 对光谱仪控制

软件参量进行设置, 选择色散率较高的光栅 1 (1200 lp/mm), 增益 8, 扫描起始波长 632 nm , 终止波长 635 nm , 间隔 0.01 nm 。扫描结果如图 4 所示, 谱线中心波长在 633.15 nm , 半峰全宽 (HWHM) 0.2 nm , 这比单台光谱仪测量的 1.40 nm 线宽提高了 1 个数量级。

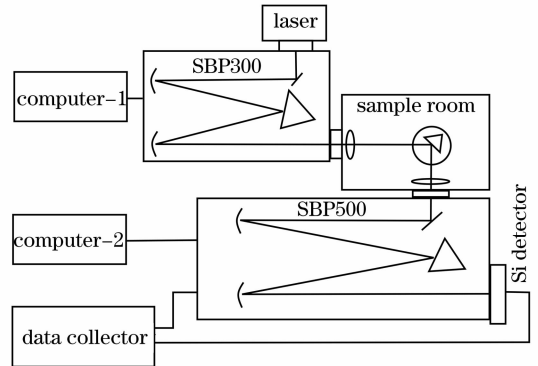


图 3 两台光谱仪联合测量激光线宽的装置

Fig. 3 Setup of measuring laser linewidth by two united spectrometers

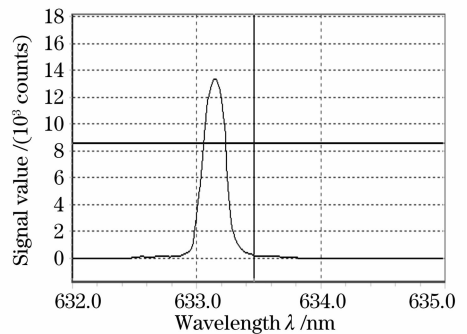


图 4 两台光谱仪联合扫描的单一谱线

Fig. 4 Single spectral line scanned by two united spectrometers

用计算机 1 控制调节第一台单色仪 SBP300 的出射波长, 扫描波长由 631.9 nm 到 633.8 nm , 步进 0.1 nm , 用第二台单色仪 SBP500 扫描一次, 找出每次扫描的波峰位置和半峰全宽, 测量结果如表 1 所示。

以第一台单色仪的出射波长作为横坐标, 将第二台单色仪的扫描结果绘制成图, 如图 5 所示。其中第二台光谱仪扫描的每条小峰的谱线宽度分别在 $0.16 \sim 0.20 \text{ nm}$ 之间。由(8)式可知, 在测得谱线的宽度为 Δl_r 时, 待测谱线的宽度为

$$\Delta\lambda_r = \frac{\Delta l_r}{(d\beta/d\lambda) f_1} \quad (11)$$

解(11)式得到 He-Ne 激光谱线的测量宽度为 $\Delta\lambda_r$ 为 $(0.79 \sim 0.99) \times 10^{-6} \text{ nm}$ 之间, 与理论估算值

$\Delta\lambda_0 = 2.14 \times 10^{-6}$ nm 在同一数量级上, 基本一致。

表 1 两台光谱仪联合测量 He-Ne 激光谱线的线宽

Table 1 Measured line width of He-Ne laser by two united spectrometers

Line serials	SBP300 centre /nm	SBP500 centre /nm	Peak value /counts	HWFM /nm	Left of HWFM /nm	Right of HWFM /nm
1	631.9	633.14	10817	0.18	633.04	633.22
2	632.0	633.135	11191	0.19	633.03	633.22
3	632.1	633.125	12000	0.20	633.01	633.21
4	632.2	633.13	12676	0.19	633.02	633.21
5	632.3	633.145	13069	0.19	633.03	633.22
6	632.4	633.15	13313	0.19	633.04	633.23
7	632.5	633.16	13364	0.20	633.04	633.24
8	632.6	633.16	13200	0.20	633.04	633.24
9	632.7	633.16	13311	0.20	633.05	633.25
10	632.8	633.16	13062	0.19	633.06	633.25
11	632.9	633.165	13018	0.18	633.08	633.26
12	633.0	633.165	12685	0.16	633.09	633.25
13	633.1	633.17	11982	0.15	633.1	633.25
14	633.2	633.155	11088	0.16	633.08	633.24
15	633.3	633.155	9850	0.15	633.09	633.24
16	633.4	633.155	8004	0.14	633.1	633.24
17	633.5	633.17	5980	0.13	633.11	633.24
18	633.6	633.175	3475	0.14	633.11	633.25
19	633.7	633.18	2213	0.16	633.1	633.26
20	633.8	633.175	1278	0.16	633.1	633.26

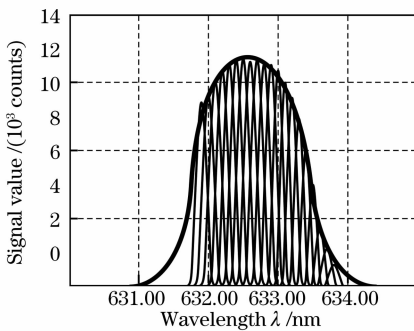


图 5 两台光谱仪联合测量的各谱线及其包络线

Fig. 5 Spectral line and their envelope measured by two united spectrometer

图 5 还显示第二个光谱仪所测量的各峰的峰值包络线, 其峰位为 632.65 nm, 峰值 13600, 半峰全宽 1.65 nm, 通过与 SBP300 单台光谱仪测量的 1.40 nm 半峰全宽相比较, 结果是一致的, 说明两台单色仪联合测量的包络线的半峰全宽就是第一台单色仪的出射谱线宽度。

3.3 结果分析

从联合光谱仪测量的谱线的半峰全宽反推回去可以获得所探测激光谱线的半峰全宽, 但对单色仪的角色散率的理论预估时, (2) 式中近似取了 $A = 15^\circ$, 导致由实验测量值反推的结果与实际谱线宽度有一定的出入。

当激光谱线通过第一台单色仪 SBP300 的线宽 $\Delta l_1 = 0.43$ nm 的光线再入射到 SBP500 单色仪上, 则 SBP500 单色仪的线色散率为 0.338 mm/nm, 利用(9)式则得经第二台 SBP500 单色仪后的色散线宽为 1453.4 nm。由(10)式可见, 经两台单色仪联合测量谱线的半峰全宽的放大倍数为 $\Delta l_2 / \Delta l_1 = 3.38 \times 10^5$, 即将两台光谱仪联合使用的上述方法, 能将 He-Ne 激光器的谱线宽度的测量值提高 5 个数量级的测量精度。按这样的方法, 将多台单色仪联合就可以提高谱线的测量宽度, 这是在实验室现有光栅光谱仪的情况下, 用提高光栅光谱仪的测量精度来提高谱线的测量宽度所采用的一种实用方法。

本文举例所用的是 He-Ne 激光谱线, 由于它的单色性非常好, 谱线宽度非常小, 如使用法布里-珀罗干涉仪可以更加精确地测量其谱线宽度。

4 结 论

推导出针对计算机自动控制多光栅转动的光谱仪的角色散率、线色散率等参量公式, 利用推导出的色散率公式, 将两台光谱仪联合使用提高了谱线的色散率, 使光谱分开的距离更大, 使谱线宽度的测量精度提高了 5 个数量级。两台光谱仪联合使用以提高谱线的测量线宽的这种方法, 可为不具备高精度

干涉测量的实验室提供有价值的参考。

参 考 文 献

- 1 Li Dong, Ding Zhihua, Meng Jie. Double-grating rapid scanning optical delay line for dispersion compensation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 505~509
李 栋,丁志华,孟 婕. 双光栅快速扫描光学延迟线的色散补偿. *光学学报*, 2007, **27**(3): 505~509
- 2 Yan Shubin, Wang Yanhua, Liu Tao *et al.*. Modulation-free laser frequency locking by AOM shifted cesium sub-Doppler spectra[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(10): 1335~1338
闫树斌,王彦华,刘 涛 等. 声光偏频亚多普勒光谱无调制激光频率锁定[J]. *光学学报*, 2004, **24**(10): 1335~1338
- 3 Zou Jian, Huang Xianyuan, Rao Cheng. Research on LED spectral parameters measurement based on linear CCD[J]. *J. Chongqing Institute of Technology*, 2006, **20**(8): 124~126
邹 建,黄贤园,饶 程. 基于线阵 CCD 的 LED 光谱参量测量研究[J]. *重庆工学院学报*, 2006, **20**(8): 124~126
- 4 Ding Yaofang, Zhou Ciming, Jiang Desheng. Analyses of spectra characteristics of multi-phase-shifts fiber grating [J]. *J. Southeast University* (Natural Science Edition), 2006, **36**(6): 908~911
丁瑶芳,周次明,姜德生. 多相移光纤光栅光谱特性分析[J]. *东南大学学报(自然版)*, 2006, **36**(6): 908~911
- 5 A. D. Bykov, L. N. Chebakova. Software for working with molecular vibration-rotation spectra [C]. *Proc. SPIE*, 2006, **6580**: 658009-1~8
- 6 Zhu Dandan, Li Zhiqian, Li Yan *et al.*. Analysis for the transmission spectrum character of phase-shift long period gratings[C]. *Proc. SPIE*, 2006, **6357**: 63573K-1~6
- 7 Tang Yuanhe, Zhang Chunmin, He Jian *et al.*. Study of the detection mode of upper atmospheric wind field based on Lorentzian profile aurora[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(6): 721~725
唐远河,张淳民,贺 健 等. 基于洛伦兹线型极光的上层大气风场探测模式研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(6): 721~725
- 8 Lu Honggang, Jiang Yayi, Bi Zhiyi. Measurement of reflectivity of optical mirrors using laser phase modulation and fineness of Fabry-Pérot cavity[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(12): 1675~1679
鲁红刚,蒋燕义,毕志毅. 激光相位调制法布里-珀罗腔精细度法测定反射率[J]. *中国激光*, 2006, **33**(12): 1675~1679
- 9 M. Born, E. Wolf. *Principles of Optics* [M]. Yang Jiasun trans., Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005. 377
M. 玻恩, E. 沃耳夫. *光学原理(上)*[M]. 杨葭荪译,北京: 电子工业出版社, 2005. 377
- 10 Yu Daoying, Tan Hengying. *Optics of Engineering* [M]. Beijing: Machine Industry Press, 2004. 268
郁道银,谈恒英. *工程光学*[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004. 268
- 11 Yu Kuanxin, Jiang Tieliang, Zhao Qida. *Laser Principle and Laser Technology* [M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 2005. 125
余宽新,江铁良,赵启大. *激光原理与激光技术*[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2005. 125