

# 光学多道光谱仪的应用

曹念文 刘文清 张玉均 王峰平 许克军

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

**提 要** 报道了一种新型光学多道光谱仪的结构, 光谱分辨率的提高及其在医学、激光器研究、水体及太阳光谱测量等方面的广泛应用。

**关键词** 多道光谱仪, 掺钛宝石, 应用

## 1 引言

光学多道光谱仪是采用电子技术和光学技术相结合的方法研制成功的, 较传统的光谱仪在技术上有很大的改进且应用方便。一般的光谱仪都是用棱镜或光栅等其它光学元件组成, 在光谱的焦平面上开一道狭缝让某一波长的光通过并用能量计测量其能量, 每次只能测量单个波长的光, 应用很不方便且准确度不高。光学多道光谱仪较一般的单色仪优越得多, 每次能测量很多非连续或连续波段的光谱且能准确地读出各光谱的波长值和相对强度值; 测量的光谱带宽可以从真空紫外到远红外。光学多道光谱仪在拉曼光谱、激光光谱、激光医学、大气光学、海洋光学、可调谐激光器的研究中起着重要的作用, 特别是用该光谱仪可以对水环境和大气环境的污染进行光学方法遥感测量, 为环境监测提供了一种新方法, 推动了我国环保事业的发展。

## 2 实验装置和原理

实验装置如图 1 所示。主要有狭缝、凹面

全息光栅、高灵敏度线阵 CCD 探测器组成, 光源发出的光照在狭缝上, 经光栅色散光谱聚焦在 CCD 表面上, CCD 探测的数据传到计算机经软件处理后便得到待测的光谱, 根据需要可以用导光纤把光信息传输到狭缝, 便可用来进行水体光谱遥感测量。

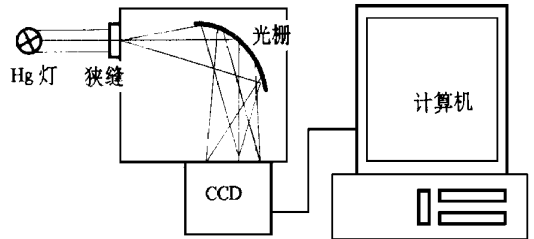


图 1 光学多道光谱仪装置图

### 2.1 光谱仪的理想分辨率

光谱仪的理想分辨率为

$$R = \frac{\lambda}{d\lambda} = KN \quad (1)$$

式中,  $K$  为光栅衍射级数,  $N$  为光栅光刻条纹总数。

### 2.2 光谱仪的实际分辨率

光谱仪的实际分辨率为

$$R_s = \frac{f}{w \cos \theta} \frac{\lambda}{d\lambda} = \frac{f}{w \cos \theta} R \quad (2)$$

式中,  $w$  为狭缝宽度,  $f$  为光栅焦距,  $R$  为光

栅理想分辨率。实际分辨率与光谱仪的狭缝宽度成反比,与光栅的焦距成正比,当狭缝很窄时,从单缝衍射的角度来看通过狭缝的光能充满整个光栅,使 $N$ 达到最大值,故不论从理论还是从实际的角度来看缩小狭缝宽度、增大光栅焦距都能提高光栅的光谱分辨率。

### 2.3 多道光谱仪的定标

多道光谱仪的波长为

$$\lambda = \alpha C + b$$

式中, $\alpha$ 为CCD通道数, $C$ 、 $b$ 为系统的校正系数,由计算机软件计算得出。

### 2.4 入射狭缝宽度为0.08mm时Hg灯的定标谱线

Hg灯放在一开有狭缝的圆筒内,使Hg灯发出的光成一光源垂直入射到光谱仪狭缝上。然后调整入射狭缝到光栅的距离和光栅的入射角使1级衍射光照射光栅的焦平面上即CCD表面上,CCD探测器采集的数据输入计算机,通过计算机软件处理便得到光谱线。图2为Hg灯的定标谱线。

### 2.5 入射狭缝宽度为0.02mm时Hg灯的定标谱线

把入射狭缝缩小为0.02mm,用同样的方法进行实验得到如图3所示的Hg灯谱线。从而可以看出图2的谱线半角宽度远大于图3的谱线的半角宽度,谱线半角宽度越小谱线的分辨率越高,图3光谱线的分辨

率远远大于图2光谱线的分辨率。从公式(4)可以看出光谱的分辨率与光栅衍射级数 $j$ 和光栅刻划条纹数目 $N$ 的乘积成正比,对该光谱仪来说 $j=1$ ,即对多波长光谱仪来说谱线的理想分辨率 $\frac{\lambda}{d\lambda} = N$ ,也就是说如果尽量让光源充满整个光栅表面从理论来说可得到最大的光谱分辨率,通过缩小狭缝的宽度从单缝衍射的角度来说可以让光充满整个光栅使 $N$ 达到最大值,这样光谱分辨率就能达到最大值。从(2)式可以看出光谱仪的实际分辨率 $R$ 与狭缝宽度 $w$ 成反比:狭缝越窄光谱线的分辨率越高,图2谱线对应的狭缝的宽度是图3谱线对应的狭缝的4倍,所以图3的光谱分辨率大于图2光谱的分辨率,这一理论分析和实验结果相符合。对于多波长光谱仪来说,入射光无需用透镜聚焦,因而公式(2)中的 $f$ 相当于衍射光栅的入臂即狭缝到光栅中心位置的距离 $r$ ,一般来说全息光栅的焦距越长光栅的入臂越长,故不管是从理论上还是从实际来说,缩小狭缝宽度都能提高光谱的分辨率。从公式(2)还可看出光谱的实际分辨率与光栅焦距即与光栅的入臂成正比,通过增大光栅的焦距同样能提高光谱的分辨率,若既增大光栅的焦距又缩小光栅的入射狭缝就能得到高分辨率的光谱,因而能分析物体的精细结构。

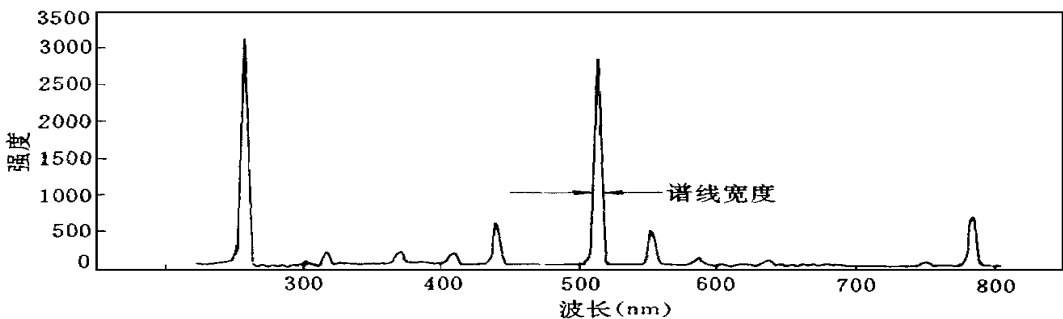


图2 狭缝宽度为0.08mm时Hg灯的定标谱线

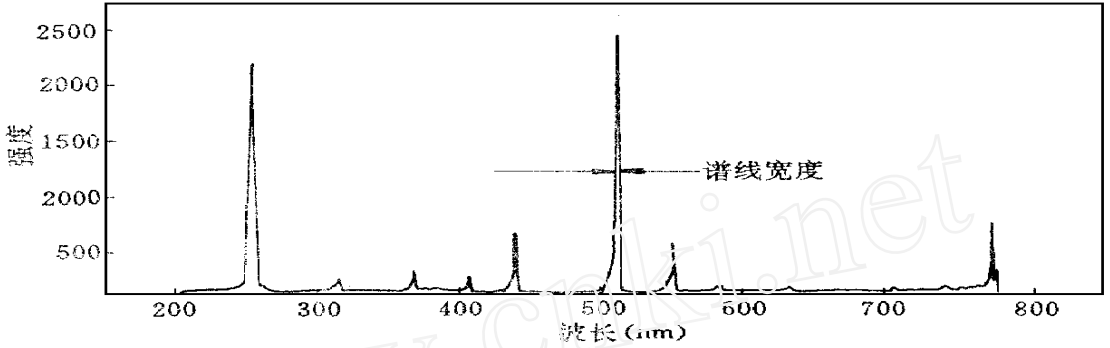


图3 狭缝宽度为0.02 mm 时 Hg 灯的定标谱线

### 3 光学多道光谱仪的实际应用

#### 3.1 用光学多道光谱仪测量牙齿的透射、反射光谱

图4(a)是用光谱仪实测的牙齿光谱,不同质地的牙齿,其光谱特征不同,从图中可以看出牙齿的反射光谱和透射光谱峰值都向长

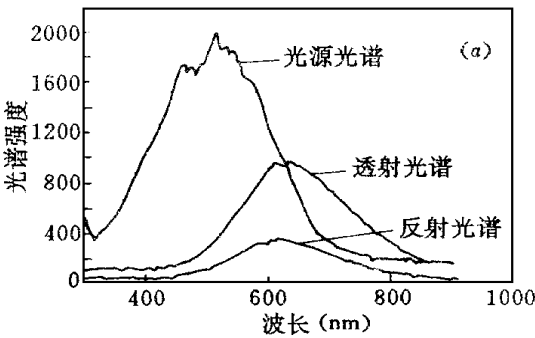
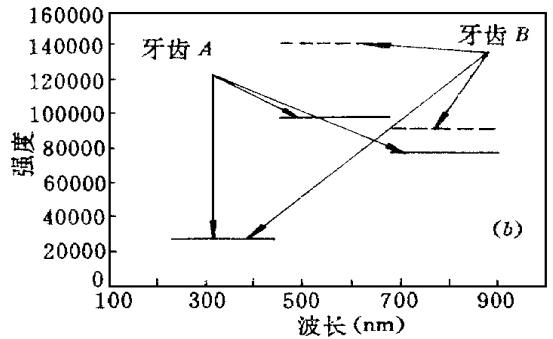


图4(a) 牙齿B的透射反射光谱; (b) 牙齿A和B的反射光谱的积分值

波方向移动。图4(b)是两种不同的牙齿A和B的反射光谱分别在230~455 nm、456~680 nm、680~905 nm三种波段对波长的积分值,通过测量牙齿的透射和反射光谱,和计算其光谱对波长的积分,可分析不同牙齿的性质,为牙齿病患者更换不同的牙齿提供一定的科学依据,这在医学上有着广泛的应用。



#### 3.2 新型可调谐掺钛宝石激光器的输出谱宽的实时测量

图5是用多道光谱仪实测的闪光灯泵浦可调谐掺钛宝石激光器的输出光谱,通常的钛宝石激光的调谐输出是通过棱镜来实现的<sup>[2]</sup>,它的缺点是每实现一种波长调谐都要重新调整激光腔,速度很慢。在激光腔内加一铌酸锂晶体光电开关,通过改变铌酸锂晶体上的电压使不同波长的光在激光腔内发生振荡,从而实现钛宝石调谐,这是一种新型的实

现钛宝石调谐的实验方法。图5是改变铌酸锂晶体电压,用多道光谱仪实测的钛宝石激光器的输出光谱线。每改变一次电压就能很快地、准确地得知输出光波长和输出光的带宽。这是一般的单色仪无法实现的。

#### 3.3 不同水体吸收光谱的测量

图6是不同浑浊度的水体的吸收谱线,可以看出不同水体的吸收谱不一样,图6(a)是浑水的吸收谱线,浑水对光的吸收大,吸收峰随水质的变化而不同,从图6(b)和图6(c)

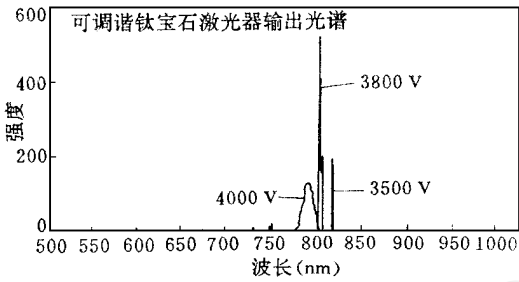


图5 掺钛宝石激光器电压调谐输出光谱

还可看出对海水来说衰减最弱的是波长为500 nm左右的蓝绿光,这对水下物体成像实验<sup>[3]</sup>提供一定的理论依据。

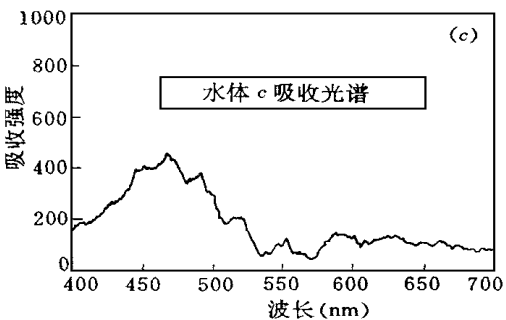
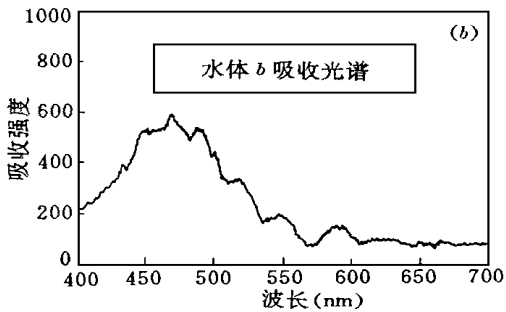
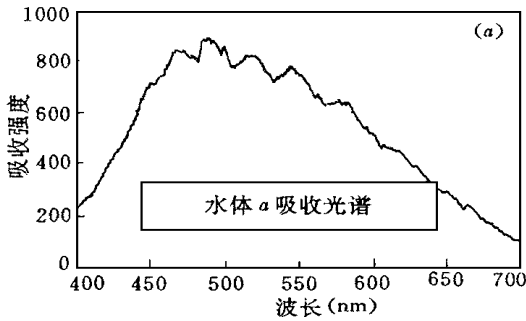


图6 不同水体的吸收谱线

### 3.4 太阳光谱的跟踪测量

用该光谱仪可以测量太阳光光谱,图7是在多道光谱仪的基础上做成的太阳光谱辐射计再加上异步电机就可以对太阳光谱实行实时跟踪测量,为了保证入射太阳光的光束质量,在光谱仪狭缝前加一圆柱型长管把太阳光发散角限制在1 mrad左右。整个装置加以密封可以长时间在野外工作。图8是用该太阳光谱辐射计实测的光谱线。

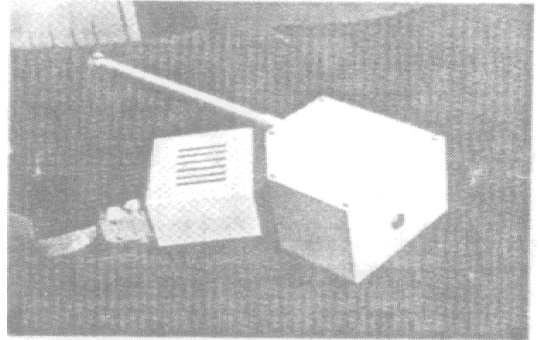


图7 太阳光谱辐射计

### 3.5 对水体叶绿素含量的测量

用多道光谱仪可以测出水中叶绿素的浓度,从而可以反演出水中富营养成分的含量,叶绿素浓度的计算公式

$$\alpha = (11.85E_{664} - 15.4E_{647} - 0.8E_{630}) \frac{V}{V}$$

式中  $E_{664} = \beta_{664} - \beta_{750}$ ,  $E_{647} = \beta_{647} - \beta_{750}$ ,  $E_{630} = \beta_{630} - \beta_{750}$

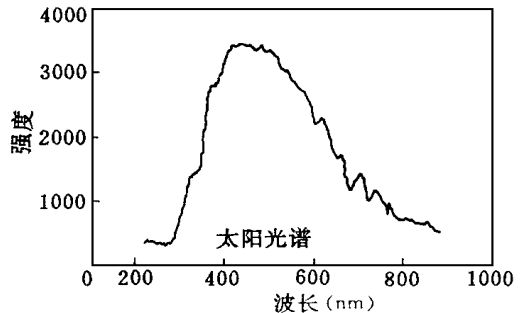


图8 太阳光谱线

$= \beta_{630} - \beta_{750}$ , 其中  $\beta_{664}$ ,  $\beta_{647}$ ,  $\beta_{630}$ , 为水样在中心波长664、750、647、630 nm处的消光

系数,  $\beta_{\lambda} = -C \log T_{\lambda} / h$ ,  $T_{\lambda}$  为水样的光谱透过率。故用光学多道光谱仪测量出水样在上述中心波长处的光谱透过率就可以测出水中叶绿素的浓度, 从而反演出水中营养成分的含量, 这是对水体污染进行光学方法测量的一种切实可行的实验方法。

### 3.6 大气污染光学监测系统

通常对大气中化合物的监测方法有两种: 在紫外光谱区常用的是紫外差分光学吸收光谱仪, 在红外监测系统中常用傅里叶变换红外干涉仪<sup>[4]</sup>。而光学多道光谱仪探测的波段范围很宽, 可以从真空紫外到中红外甚至远红外, 而且光谱分辨率很高, 特别是可以

用来测量大气中的  $SO_2$  的吸收谱线, 光学多道光谱仪是一种结构坚固、性能稳定、精确度高、价格合理、使用方便的大气污染光学监测系统。

### 参 考 文 献

- 1 母国光等, 光学, 人民教育出版社, 1978年出版, 341页
- 2 邹承就, 吴瑞芬, 光纤输出的掺钛宝石可调谐激光器. 量子电子学, 1989, 6(4): 334~339
- 3 刘文清, 曹念文等, 水下物体的激光偏振成像研究. 量子电子学, 1997, 14(6): 520~526
- 4 耿玉珍, 工业中的光学环境监测技术. 光电子技术与信息, 1995, 8(3): 34~39

## Optical Multichannel Spectrometer and Its Application

Cao Nianwen    Liu Wenqing    Zhang Yujun

Wang Fengping    Xu Kejun

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Science, Hefei 230031)

**Abstract** This paper reports a new kind of optical multichannel spectrometer and its structure and applications in medicine, laser, water and spectrum measurement. How to improve the resolving power of the spectrum has been discussed in the paper.

**Key words** multichannel spectrometer, Ti sapphire laser, applications

## 用超短激光脉冲进行精密加工

激光材料加工都用空间和时间压缩的激光能作材料消融、切割、焊接和其它改型。激光作为一种必不可少的工业手段已牢固确立自身的地位, 并以快速步伐开发激光在工业上的新应用。激光材料加工的一个分支是激光微加工, 一般包括特征尺寸小于  $100 \mu\text{m}$  的加工。

近几年, 用准分子激光器进行激光微加工已取得很大成功。准分子激光通过其短紫外波长, 主要是通过和加工材料的光化相互作用, 可达到很精细的特征尺寸。但准分子激

光也有一些缺点。它的紫外波长不能透过一大类透明材料, 其中包括某些玻璃和塑料。激光器内的腐蚀气体可能也较难处理。对于诸如氟化氩 (ArF) 之类深紫外准分子激光器 ( $193 \text{ nm}$  波长), 对光学元件的辐射损伤是个问题。这些因素可能影响准分子激光器的许多工业应用。

与电子之类互相排斥的带电粒子不同, 光子允许自身很紧密集合在一起。这种组合的光子群形成电磁脉冲。人为的最短脉冲就是由超快激光器产生的。这种超短脉冲提供