

# 色散选通复合成像光谱系统的实验研究

李文冲 马春华

(中山大学微电子研究所, 广州 510275)

## 提 要

提出一种新的利用色散选通复合成像原理测量光谱空间分布的光学系统。对这个系统的成像质量、聚光本领和光谱带宽进行了理论和实验研究。探讨了它在荧光光谱和吸收光谱空间分布测量中的应用。

关键词: 成像光谱, 光谱的空间分布。

## 一、引 言

光谱技术可以用来测量等离子体, 喷焰的温度、电子密度等重要物理参数及其高温反应物的组成及变化。因此, 研究它们的光谱空间分布对了解等离子体及喷焰的高温物理、化学过程极其重要。此外, 近年来人们正在努力开拓生物单细胞和组织在活体(in vivo)、在原位(in situ)的生理、生化研究。光谱方法可以提供成份和结构的信息, 并具有非接触、非破坏检测的优点, 因而对生物样品的光谱空间分布技术正引起广泛的兴趣。当前为此目的而建立的实验装置有两种: (1)对样品或探测光束作 X-Y 扫描, 然后进行分光测量, 再用计算机作三维图谱显示。如 N. T. Yu 等<sup>[1]</sup>曾报道用共振喇曼数字化探针研究 *Argyropselcus affinis* Fish 的眼球晶体中类胡萝卜素的异常分布。(2)通过特定波长的滤光片, 用摄像机作图像检测、再配合计算机图像处理。Yoshihisa Kudo<sup>[2]</sup>曾报道用这种装置观察活单神经细胞中钙离子的荧光图像。显然, 第(1)种方法的光谱精确度很好, 但空间分辨率较差; 第(2)种方法空间分辨率有很大改善, 但损失了光谱精确度。本文将报道一种新型的成像光谱系统, 它的基本工作原理是色散选通复合成像, 可以兼顾空间分辨率和光谱精确度两方面的要求。

## 二、工作原理及实验装置

传统的光谱仪器均由三部分组成: 入射狭缝, 色散系统和出射狭缝(或焦平面)。入射狭缝的像在焦平面上沿分光系统弧矢面方向按频率(波长)展开, 这样可测量到光强-波长二维讯息。这种结构对于均匀介质的测量是十分合适的, 但进行空间分布测量则不方便, 位置精度也不够。为此, 本文提出一个新的色散选通复合成像的光学方案<sup>[3]</sup>, 可以一次获得样品某一光谱成分分布图像。其光路排布有三种, 如图 1(a)、(b)、和(c)。

在图 1(a)中用一个标准照相镜头 L 替代入射狭缝, 被测量物体发出的光通过 L 成像于

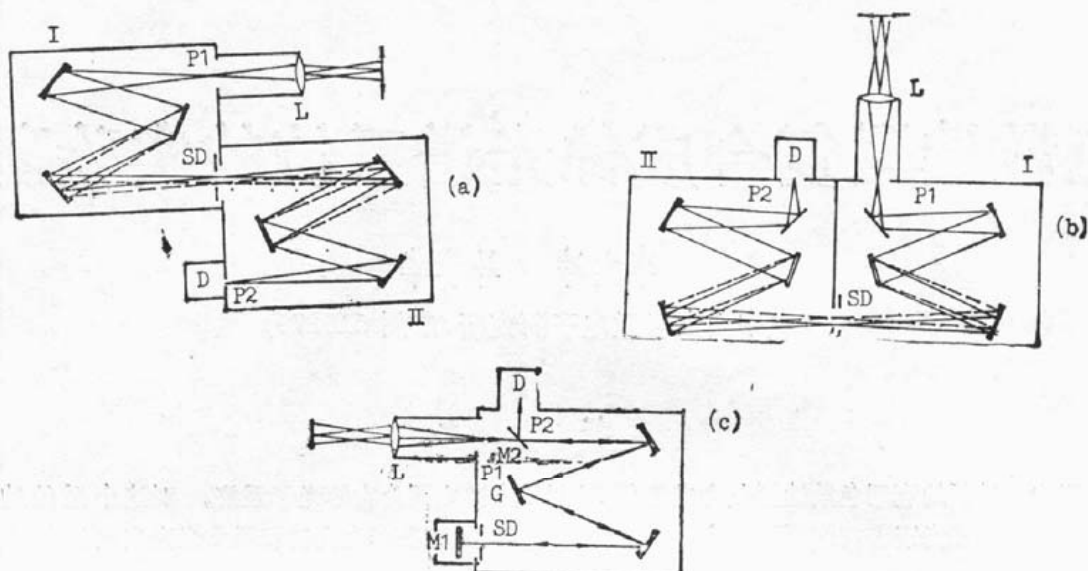


Fig. 1 Three optical arrangements of imaging spectroscopy (a, b, c)

L: lens; P1: inlet window; P2: outlet window;  
 D: detector; SD: wavelength selecting diaphragh;  
 I: 1st monochromator for image dispersive;  
 II: 2nd monochromator for image recombination.

“色散”单色仪 I 的入射窗口, 然后在焦平面上展开成一个随波长分布互相重叠的模糊图像。在 I 的出口处放置一个可调的带宽选通光阑 SD, 使部分已色散展开的图像光束进入“复合”单色仪 II。“复合”单色仪的光学排布是与“色散”单色仪实现色散相减, 并且逆行使用。根据光线可逆原理, 被色散展开的光束, 经选取一定带宽成份之后将会被复合成一个清晰的分光图像, 落在单色仪 II 的输出窗口, 在它后面可以放置照相机或摄像机进行检测。输出图像的波长由转动单色仪 I、II 的光栅调节, 带宽由 SD 的宽度决定。图 1(b) 的工作原理与 1(a)

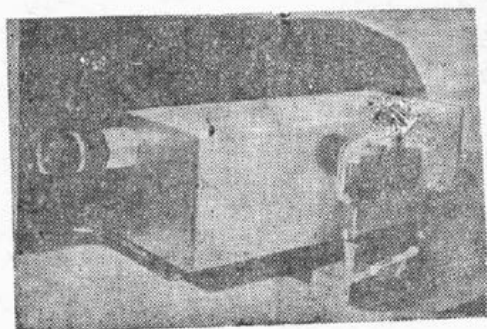


Fig. 2 Imaging Spectroscopy

相同, 但因输入与输出在同一面, 操作不方便。图 1(c) 用一面反射镜置于单色仪焦平面上, 使色散光束按原路返回, 实现复合成像。比较上述三个方案, (a) 和 (b) 可充分利用仪器的通光孔径, 互相干扰少, 杂散光少。但两个单色仪波长同步调节困难, 对光要求高。方案 (c) 为自准式光路, 对称性好, 容易调节, 但为了把入射和出射光束分离, 两路光要调偏一些。这样镜面的通光孔径不能充分利用, 杂散光也多些。最后本文选用

北京第二光学仪器厂生产的具有 Littrow 光路的光栅单色仪 WDG-500 作为基础光学系统,

Table 1 Specifications of WDG-500

Wavelength range	200~800 nm
focuss length	500 mm
aperture	1:8
$d\lambda/dl$	1.6 nm/mm
slit	0.005~3 mm × 25 mm
grating	1200 lines/mm
spectral resolution	<0.1 nm

采用 1(o) 方案研制成一台自准式成像光谱仪, 其外形如图 2。该仪器前面是一个高斯型标准镜头。在单色仪的焦平面上放置一块反射镜 M1, 把色散图像光束按原路折返, 使光束重新复合成像。带宽选通光阑 SD 置于 M1 的前面。为了把入射和出射光束分离, M1 应当略微倾斜。在输出光路中放置一块平面镜 M2, 把出射光束截取并成像在检测器窗口上。这套装置中光束两次经过 Littrow 光路, 调校比较复杂, 但减少了光学元件和简化了机械装置, 因而具有造价低, 体积小的优点, 并且使用十分方便。

### 三、图像质量与带宽

光学系统的图像质量主要决定于它的像差、色差、焦面场弯曲以及离轴畸变等因素。从光谱仪器设计理论知道, 采用反射元件的成像系统可以消除色差; 增加准光镜的焦距, 缩小孔径以及良好的光路对称性可以使几何像差减至最低水平。由于光谱仪器的长期发展, 它的设计理论已十分成熟<sup>[4]</sup>, 尽管这些理论主要针对单缝入射, 但经过适当推广, 完全可以用到成像光谱系统中去。

#### 1. 空间分辨率

成像光谱仪的空间分辨率测量采用了上海光学仪器厂出品的 CPG550 平行光管和标准分辨率板。平行光管用白炽灯照明, 分辨率板图像经分光后成像于仪器出口。用海鸥牌单反式照相机 21 DIN 黑白底片拍照单色图像。通过成像光谱的成像比为 1:1, 即  $5 \times 5$  (mm)。底片放大十倍之后进行检验, 可清晰分辨 2 号分辨率板的第 11 号花样, 即 89 lines pair/mm。为了比较, 亦对标准镜头及相机作检验, 测得分辨率为 113 lines pair/mm。就是说经过“色散-复合”系统, 空间分辨率下降 20%, 但就绝对值而言已比一般摄像管好 2~3 倍。另外, 从表 1 可知, 若作单色仪使用其空间分辨率只有 16 lines pair/mm。这是由单缝衍射的极限缝宽所引起的。

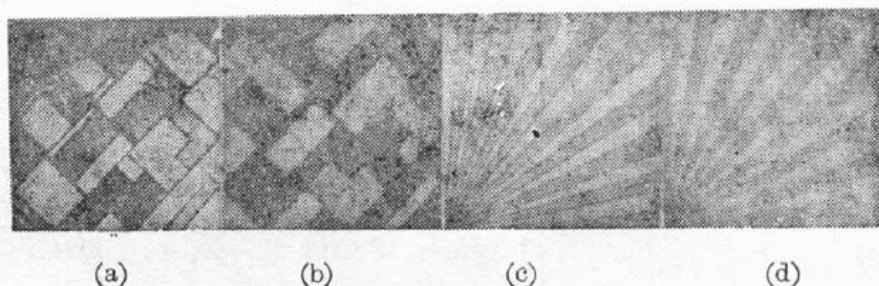


Fig. 3 Photos of four color random target (a, b) and resolution wedge (c, d)

(a), (c) are taken at 510 nm; (b), (d) are taken at 580 nm

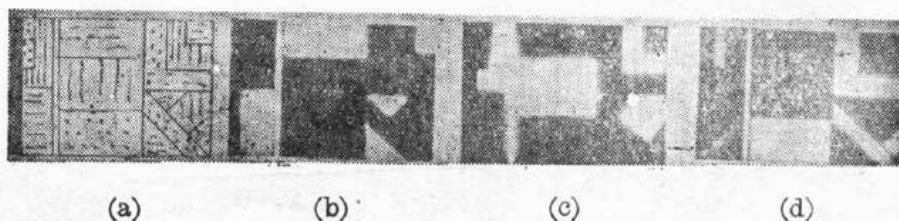


Fig. 4 Color separation pictures of a five color slide

(a) original distribution. □ white, ■ black, ▨ blue, ▩ green, ▪ red, (b), (c) and (d) taken at 435, 545 and 580 nm respectively.

### 2. 象差和畸变

畸变的检查采用一个方格纸靶它有  $50 \times 50 \text{ mm}$  的外框,  $30 \times 30 \text{ mm}$  的中框和  $20 \times 20 \text{ mm}$  的内框, 置于成像光谱仪镜头前  $330 \text{ mm}$  处。在照相底片上像的尺寸为  $10 \times 10 \text{ mm}$ , 然后放大到  $50 \times 50 \text{ mm}$  作检测, 得知外框上、下底形变  $\pm 3\%$ , 中框和内框无形变。

图 3 分别为四色随机规靶和二色角分辨率规靶的分色图像。可以看到在  $580$  和  $510 \text{ nm}$  波长位置上拍到的照片阴影部分正好互相交替。靶的尺寸为  $30 \times 30 \text{ mm}$ , 像尺寸为  $12.5 \times 12.5 \text{ mm}$ , 在白炽灯照明下拍摄。图 4(a) 是一张彩色幻灯片  $36 \times 24(\text{mm})$ , 4(b), 4(c) 和 4(d) 分别在  $435, 545$  和  $580 \text{ nm}$  处拍得的透射分色图像。

### 3. 聚光本领

仪器的聚光本领将直接影响它的检测灵敏度, 对本文报道的光学系统来说, 可以由输出窗口的光通量  $\phi$  表示:

$$\phi = L(\lambda) a h \frac{A}{f'} \Delta\lambda \quad (1)$$

式中  $L(\lambda)$  为分光照度,  $A$  为准光镜面积,  $f'$  为准光镜焦距,  $a, h$  为输入窗口的宽和高,  $\Delta\lambda$  为带宽。当这个光学系统作单色器使用时, 其典型参数为  $a = 0.1 \text{ mm}, h = 12 \text{ mm}$ ; 因而  $a h = 1.2 \text{ mm}^2$ , 作为光谱成像使用, 设  $a = h = 5 \text{ mm}$ , 则有  $a h = 25 \text{ mm}^2$ , 若其它参数相等, 两者的光通量比为 21 倍。但事实上光学系统内部有反射损失, 令

$$\phi' = T \phi, \quad (2)$$

式中  $T$  为整个仪器的透光效率, 对于 Littrow 光路共有四个镀铝反射面, 如果每个面的反射率为  $80\%$ , 通过系统一次,  $T \approx 41\%$ , 但在成像光谱使用时, 光束前向和后向两次经过光学系统, 这样(2)式将变成  $\phi' = T^2 \phi$ , 效率为  $T^2 = 0.168$ 。综合上述两个因素, 实际光通量比为 8.5 倍。如果入射窗口增加到  $10 \times 10 \text{ mm}$ , 则光通量再增大四倍。这就是说, 对本文报道的光学系统, 用作成像光谱仪, 比之用作单色仪, 它的聚光本领可以提高  $8.5 \sim 34$  倍。

### 4. 光谱带宽

成像光谱仪输出窗口所占的带宽  $\Delta\lambda$  取决于选通光阑在单色仪 I 焦平面上所截取的带宽。它的数值依赖于分光系统的平均倒数线色散  $\left(\frac{d\lambda}{dY}\right)$ 、入射图像的横向宽度和 SD 的光阑宽度  $\Delta Y$  等参数。为了计算  $\Delta\lambda$ , 先考虑一个标准情况, 即单色仪的横向放大系数为 1, 入射光强

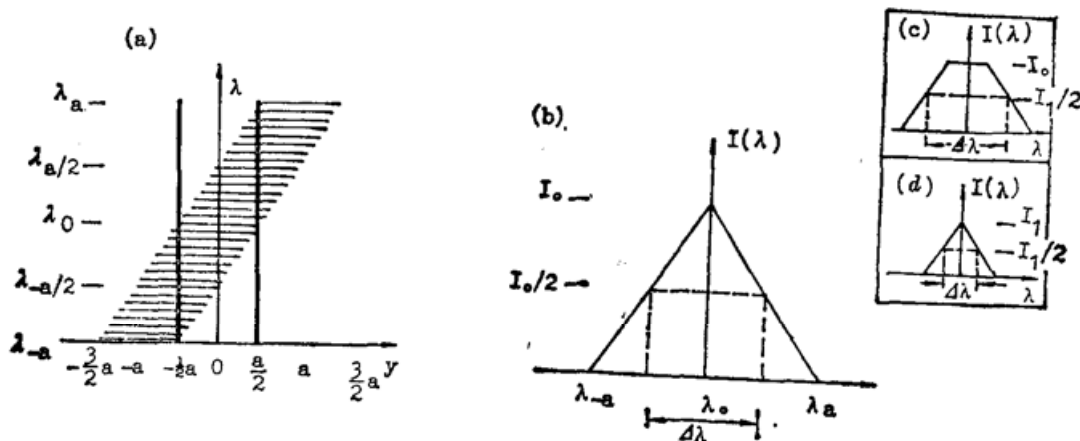


Fig. 5 Spectral energy distribution behind the selecting diaphragm SD.

(a) width of SD; (b) bandwidth of spectral image



$I_0$  在讨论的波长范围内不随波长变化。设输入图像的横向宽度为  $a$ , 并且光阑宽度  $\Delta Y = a$ 。如上所述, 图像光束经色散后沿弧矢面  $y$  轴在焦平面上展开, 图像互相重叠。为了便于考察, 在  $\lambda$ - $y$  平面上作图表示具有不同波长的图像通过选通光阑的情况 [参看图 5(a)]。图中两根粗的垂直线给出光阑宽度  $\Delta Y = a$ , 对于具有波长为  $\lambda_0$ , 尺寸为  $a$  的图像全部进入光阑; 对于波长  $\lambda(y) = \lambda_0 + \left(\frac{d\lambda}{dl}\right)y$  的图像, 因为几何位置向右偏移, 有一部分被遮挡, 通光部分为  $\frac{a-y}{a}$ , 这样在光阑后面的检测到具有  $\lambda(y)$  的光强为

$$\left. \begin{aligned} I(\lambda(y)) &= I_0 \left( \frac{a-y}{a} \right), \\ \lambda(y) &= \lambda_0 + \left( \frac{d\lambda}{dl} \right) y. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

经整理可得:

$$I(\lambda(y)) = I_0 \left[ 1 - \frac{1}{a} (\lambda(y) - \lambda_0) \sqrt{\left( \frac{d\lambda}{dl} \right)^{-2}} \right] \quad (4)$$

从式中可见当  $y = a/2$  时,  $I(\lambda) = I_0/2$ ;  $y = a$  时,  $I(\lambda) = 0$ , 考虑到左右对称, 在 SD 光阑后测得光强分布为一三角形曲线 [图 5(b)], 它的半高宽为  $\lambda_{\frac{a}{2}} - \lambda_{-\frac{a}{2}} = \left( \frac{d\lambda}{dl} \right) a$ ; 底宽为  $\lambda_a - \lambda_{-a} = \left( \frac{d\lambda}{dl} \right) 2a$ ; 也就是说在光阑后包含的波长成份为  $\lambda_a$  到  $\lambda_{-a}$ , 但按光谱学的定义光谱带宽是按半高宽计算的即  $\Delta\lambda = \left( \frac{d\lambda}{dl} \right) a$ ; 如果改变 SD 的宽度, 图像带宽亦随着改变, 当  $\Delta Y > a$ ; 如图 5(c),  $\Delta Y < a$ , 如图 5(d)。若保持选通光阑宽度与图像横向尺寸一致, 则有  $a = 2\text{mm}$ ,  $\Delta\lambda = 3.2\text{nm}$ ;  $a = 5\text{mm}$ ,  $\Delta\lambda = 8\text{nm}$ ;  $a = 10\text{mm}$ ,  $\Delta\lambda = 16\text{nm}$  等。

## 四、小结与讨论

本文建立了一套色散选通复合成像光谱实验系统, 并对它的成像质量、聚光本领及光谱带宽等重要参数进行了测量和计算, 得到比较好的结果。

这个系统的空间分辨率优于普通摄像管的 2~3 倍, 比逐点扫描法提高 5~10 倍, 带宽为 8~16 nm, 对于宏观样品的荧光光谱和吸收光谱空间分布测量完全满足要求。

对于微观样品(例如单细胞)测量, 本文的成像光谱技术将更具优越性。通常激光微束的光斑直径约为 10~15 倍波长, 用它作单细胞扫描, 位置精度将受限制。而一般显微镜的极限分辨率可达几倍波长, 且在非相干光照明下成像, 如果用一台显微镜与成像光谱仪配套使用, 将能一次获得某一波长的荧光或吸收光谱分布, 对于活体细胞的生理生化研究将可提供极其有用的信息。

本实验装置输出面平直、畸变小, 能方便地与摄像管匹配, 进而作计算机图像处理。

存在的缺点是反射损失较高, 加之自准式 Littrow 光路杂散光较多, 均会影响仪器的信噪比。输出讯号弱可以采用高灵敏度检测器得到部分补偿。此外, 若采用凹面光栅系统, 可删除两面准光镜, 从而减少光反射损失。当然亦会带来像质量较差的问题, 如何优化设计有待进一步探讨、试验。

最后,在系统中,为了获得较大尺寸的图像就需要增加带宽选通光阑的宽度,因此很难同时兼顾图像尺寸和光谱带宽两者要求。一个可行的折衷方案是用宽银幕电影的变形摄影镜头(Cinemascope)代替标准镜头,这样入射出射光学图像的纵横比将为1:2(横向压缩),在输出端用逆向变形镜头把图像恢复,这样即可把带宽压缩一半。模拟实验证明这个设想是可行的。此外,本装置一次获得整体图像,信息利用率高,可进行光谱分布与时间、激发频率关系的测量,作反应动力学和物质迁移的研究。

### 参 考 文 献

- [1] Yoshihisa Kudo; *«Proceedings of 3rd International summer school of Physics on Optical Methods in Biophysics»*, (13~23 July, 1987 Hongkong), 14.
- [2] N. T. Yu, M. Z. Cai *et al.*; *«Proceedings of XI International Conference on Raman Spectroscopy»*, (5~9 Sep. London, England), 643.
- [3] Li Wenchong, Ma Chunhua; *«Proceedings of Laser Spectroscopy Symposim»*, (20~25 Jan. 1991, Los Angeles, USA); Vol. 1428, SPIE, 17.
- [4] 林 中, 范世福; *«光谱仪器学»*, (机械工业出版社, 北京, 1989)。

## Investigation on imaging spectroscopy with gateable dispersion and imaging recombination

LI WENCHONG AND MA CHUNHUA

(Photo-electronics division, The Microelectronics Institute Zhongshan University, Guangzhou 510275, China)

(Received 20 December 1990; revised 18 March 1991)

### Abstract

A novel spectral spatial distribution measuring optical system is presented, which is based on the principle of gateable dispersion and imaging recombination. Image quality, light condensing power and bandwidth of image are studied theoretically and experimentally. Applications in fluorescent and absorption spectral distribution measurements are discussed.

**Key words:** imaging spectroscopy; spectral spatial distribution.