

微型高分辨率光纤光谱仪在光谱学领域的应用

张志伟 侯统熙

(北京晨辉日升光电技术有限公司 010-84574045)

E-mail: sales@bjlaser.com

1. 引言

光谱学是光学的一个分支，它主要研究各种物质的光谱的产生及其同物质之间的相互作用。

光谱是电磁辐射按波长的有序排列，根据实验条件的不同，各个辐射波长都具有各自的特征强度。

通过光谱的研究，人们可以得到原子、分子等的能级结构、能级寿命、电子的组态、分子的几何形状、化学键的性质、反应动力学等多方面物质结构的知识。在化学分析中它也提供了重要的定性与定量的分析方法。

根据研究光谱方法的不同，习惯上把光谱学分为发射光谱学、吸收光谱学与散射光谱学。这些不同类型的光谱学，从不同方面提供了物质微观结构的知识及不同的化学分析方法。

目前，测量各种光谱（如发射光谱、反射光谱、吸收光谱、LED、荧光、拉曼等）最简单、最有效的方法就是使用荷兰 Avantes 公司的 AvaSpec 系列微型、高分辨率、多通道光纤光谱仪。下面的段落将会详细介绍上述几种光谱测量。

2. 实验部分

2.1 仪器原理

荷兰 Avantes 公司的 AvaSpec 系列光纤光谱仪，采用对称 Czerny-Turner 光路设计，入射焦距和色散焦距比是严格的 1:1 关系。

光谱仪包括光纤接头（标准 SMA 接口，也可以选择其它类型的接口）、准直镜、衍射光栅、聚焦镜和探测器；探测器包括 SONY 2048 像素线阵 CCD，TOSHIBA 3648 像素线阵 CCD，HAMAMATSU 2048x14 像素背照式 CCD、1024 像素线阵 CMOS、256 像素线阵 InGaAs，TAOS 128 像素线阵 PDA；对应型号分别为 AvaSpec-2048，AvaSpec-3648，AvaSpec-2048x14，AvaSpec-1024，AvaSpec-256-NIR 和 AvaSpec-128。

波长范围 200-1100nm、1000-1700nm 和 1000-2500nm，光学分辨率最高可达 0.025nm；接口方面提供 USB1.1 或 USB2.0 接口、RS-232 接口和 I/O 数字/模拟接口。

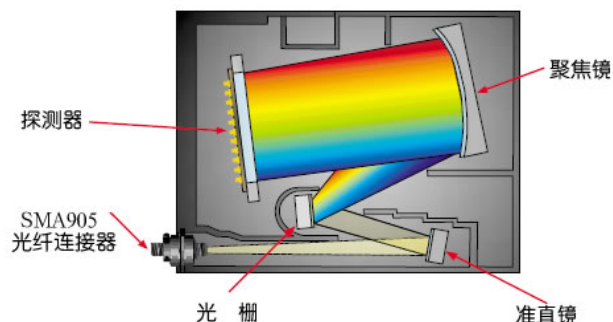


图 1 光学平台



图 2 AvaSpec-2048FT 快触发型光谱仪

2.2 功能及特点

2.2.1 外触发功能

AvaSpec-2048FT 快触发型光谱仪能够在接受外触发信号之后延迟 1.3 微秒开始采样；此外，该光谱仪还可以发出一个 TTL 信号来触发脉冲激光器，而且在 AvaSoft-Full 软件中可以设置 -42ns 至 2.7ms 的延迟采样时间，步长为 42ns；-42ns 的负延迟采样时间的特性对测量脉冲激光器非常有用。

AvaSpec-2048FT 的这些特点使其适用于需要快速响应和需要与外触发设备精确同步的应用领域（时间抖动只有 $\pm 21\text{ns}$ ），例如传送带上的产品检测等。而输出 TTL 信号的特性则使其用于 LIBS（激光诱导击穿光谱）测量或荧光测量，这两种应用都是在激光器脉冲结束一段时间后才开始测量。

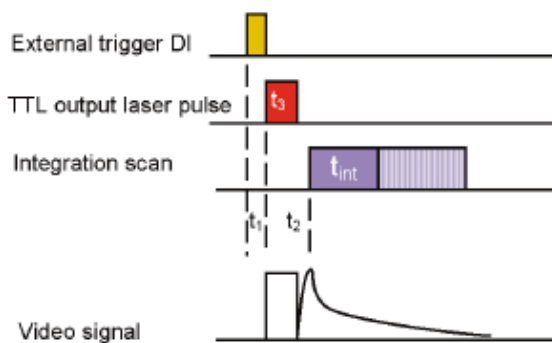


图 3 外触发时序图

参数	2048FT
t_1 激光脉冲延迟	fixed 1.3 μ s
t_1 的步长	n.a.
t_2 积分时间延迟	-42ns-2.7ms
t_2 的步长	42ns
t_3 脉冲宽度	fixed 15 μ s
t_3 的步长	n.a
t_{int} 积分时间	2ms-60sec
t_{int} 的步长	1 ms

2.2.2 历史通道功能

AvaSpec 系列光谱仪可以同时监测最多 8 个输出参数随时间的变化，如用户定义的函数、积分、峰值（波长，相对强度）等。函数可以用 Visual-Basic 代码编写。时序测量的结果可以被存储、载入或者打印。缩放和全景显示功能可以把时序测量结果中感兴趣的部分快速放大至全图显示。

2.2.3 独立测量功能

AvaSpec 系列光谱仪可以配置成进行独立测量工作，而不必使用计算机。USB2 平台的 AvaSpec 系列光谱仪添加了蓝牙（-BT）通信以及在板卡上存储光谱的 SDRAM 卡选项，能够实现远距离测量和传输（大于 300 米）以及长时间光谱数据存储。

2.2.4 宽光谱范围内的高分辨率

对于激光波长测量、等离子体测量和 LIBS（激光诱导击穿光谱）测量，一般都要求光谱仪在较宽的光谱范围内，具有较高的光学分辨率（FWHM）。AvaSpec-2048 光谱仪的光学分辨率最高可达 0.04nm，而 AvaSpec-2048-x-DT/RM 多通道光谱仪可以满足在 200-900nm 光谱范围内，光学分辨率优于 0.1nm，同时使用光纤束进行探测（一端为一个光纤接头，用于探测信号；另一端为多个接头，连接各个通道），操作既简单，又可以保证探测位于同一位置的信号。



图 4 AvaSpec-八通道光谱仪

2.2.5 对称式光路设计

AvaSpec 系列光谱仪采用对称式光路设计，入射焦距和色散焦距比是严格的 1:1 关系，在 CCD 上成的是完美的直线象，没有象差，并且由于不存在光路交叉，使得杂散光的影响被降低到最小。

2.2.6 多通道间数据同步采样

AvaSpec 系列光谱仪可以配置成双通道或多通道（USB1.1 平台最多 8 个通道，USB2.0 平台最多 128 通道），整套光谱仪采用主从电路板控制，各通道间可实现真正意义上的同步数据采集。每个通道均包括一个独立的光学平台。

2.2.7 温度稳定性好，热漂移小

AvaSpec 系列光谱仪的光学元件和底板间采用无应力装配，出厂前经过特殊工序处理，因此环境温度对光谱仪影响极小，环境温度每变化 1℃ 仅漂移 0.1 个象元。优秀的温度稳定性确保了其长时间测量的精确性和可重复性。

2.3 典型应用测量

2.3.1 发射光谱测量、辐射度/光度测量

发射光谱测量：可以直接使用光纤进行测量，也可以配合使用余弦校正器 (CC-UV/VIS) 或积分球 (AvaSphere-50-IRRAD) 来测量，光谱范围可以是紫外/可见光波段，也可以是可见光/近红外波段。

辐射度/光度测量：如果要进行绝对辐射测量，可以选择在荷兰 Avantes 公司的定标实验室里对光谱仪进行辐射定标，标定后整个光谱仪测量装置就要保持固定，如光纤和余弦校正器等在实际测量时均不能改变。为了使整个测量装置更加灵活，可以购买一台标定过的光源，在现场进行标定工作。

AvaSoft-IRRAD 软件：可以让用户轻松进行标定和调用标定文件；可以通过测量到的光谱分布来计算各个参数；在辐射测量图中测量数据可以显示为光谱强度，单位 μ Watt/nm；而且还可以显示下面的输出参数：辐射

量（单位： $\mu\text{Watt}/\text{cm}^2$, $\mu\text{Joule}/\text{cm}^2$, μWatt , μJoule ），光度量（单位：Lux, Lumen），色坐标X, Y, Z, x, y, z, u, v, 色温，以及光子数 $\mu\text{Mol}/\text{s}/\text{m}^2$, $\mu\text{Mol}/\text{m}^2$, $\mu\text{Mol}/\text{s}$ 和 μMol ；另外，在该图中还显示有在光谱模式（Scope）下获得的原始光谱数据。

时间序列测量模式：最多可以同时显示 8 个函数随时间的变化，每个函数都可以选择一个不同的辐射量、光度量或者色坐标等输出参数和波长范围。

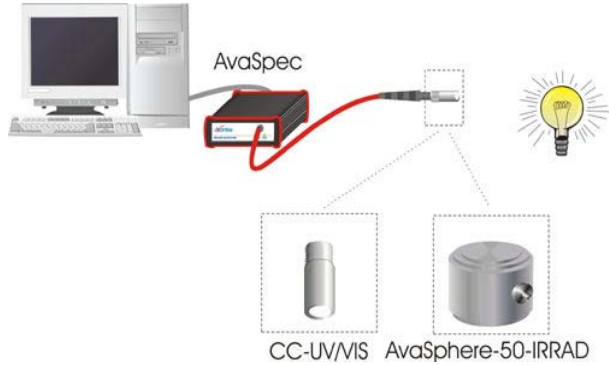


图 5 发射光谱测量装置

2.3.2 LED 测量

测量原理：LED测量一般采用两种方法：光度测量和辐射度测量。光度测量仅仅局限于可见光波段，如人眼的响应。而辐射度测量则不受人眼的限制。两种方法都可以表述LED的辐射功率和发光强度。辐射功率是LED在任何方向发射的所有功率（光通量），单位是流明或瓦。而发光强度是指向观察者方向的每单位立体角内照射到物体上的光通量，经常认为是沿着LED的轴线方向，单位是坎德拉。

测量方法：因为LED发光面独有的外形尺寸，导致其发光很难均匀化，因此测量LED总光通量最简单的方法就是使用积分球和Avantes公司的AvaSpec-2048 光谱仪。积分球(AvaSphere-50-IRRAD)的内表面具有完美的散射性，光线在其内表面发生均匀反射。辐射光在内表面上经过多次反射后变得十分均匀，导致在球壁上任何一点的光辐射度都相同。

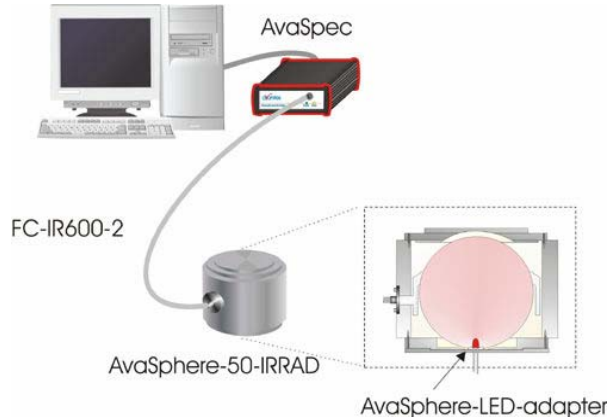


图 6 LED 测量装置

AvaSoft-IRRAD软件：除了上述输出参数外，也可以显示为X-Y色度图，包括对于LED测量非常有用的参数：主波长，纯度，中心波长，峰值波长，质心等。

2.3.3 反射光谱测量

测量原理及方法：反射又可分为：镜面反射和漫反射。当入射光在物体表面发生镜面反射，通过反射探头进入光谱仪内部的光，其强度非常高，极易造成光谱仪饱和，无法正常测量；为了避免光谱仪饱和，采用反射式积分球(AvaSphere-50-REFL)，镜面反射光在积分球内经过多次反射后变得十分均匀，而且强度也随之衰减。当入射光在物体表面发生漫反射，直接通过反射探头测量即可。

反射率测量：如果是测量镜面发射率，首先将标准白板置于反射型积分球样品口处，打开光源、光谱仪测量反射光谱并保存作为参考，然后再把待测样品置于样品口处进行测量，软件自动将测量到的反射光谱与参考进行计算，得到反射率分布谱图。

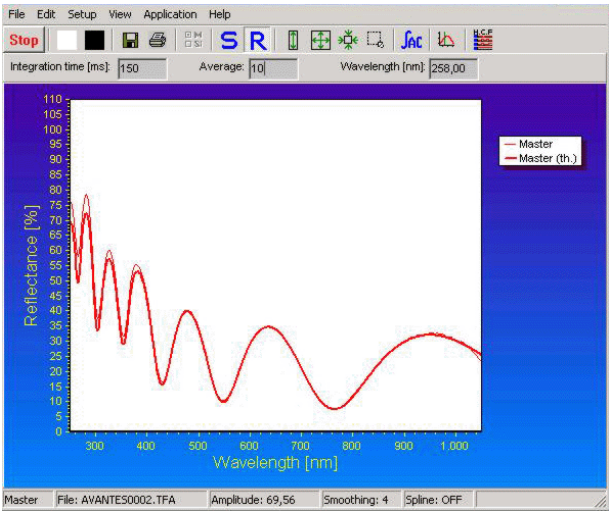


图 7 反射光谱软件界面

薄膜测量系统：是基于白光干涉的原理来确定光学薄膜的厚度。可以通过对干涉图样进行数学运算，来计算出薄膜厚度。可测膜层厚度范围 10nm-200um，分辨率可达 1nm。

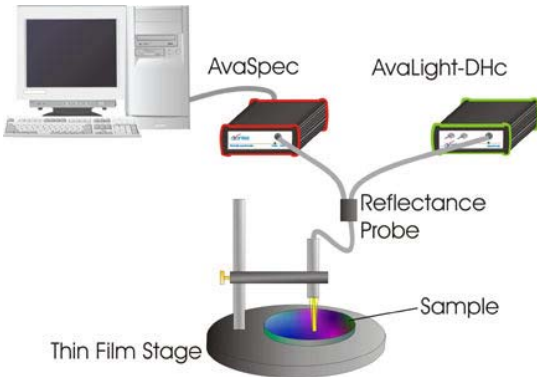


图 8 薄膜测量装置

2.3.4 吸收光谱测量

测量原理：吸收光谱的测量对象一般分为：透明晶体、液体和气体。光谱仪通过测量吸收光谱，可以得到吸光度或吸收率。通过测量和研究吸收光谱的性质（如峰值和强度），可以做定性和定量分析。

测量方法：

对于透明晶体，可以置于样品支架（CUV-UV/VIS）中测量，如下图所示；

对于液体，荷兰 Avantes 公司提供浸入式光纤探头（FDP-7UV200-VAR）和流动样品池（Flow Cell），如下图所示，可以做在线测量；

对于气体，可以将太阳光作为光源来测量，用户也可以自己做一个 1-1.5m 长的石英流通管，将待测气体充入，一端用紫外光源（氙灯或氙灯）照射，另一端用光谱仪探测；

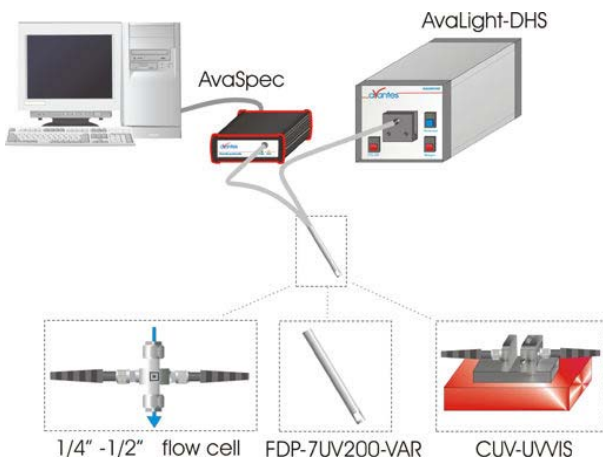


图 8 吸收光谱测量装置

2.3.5 荧光测量

荧光测量在进行高聚物荧光、光电性能研究和许多生物学（叶绿素和类胡萝卜素）、生物医学（荧光病变诊断）和环境科学研究中是非常必要的一种手段。荧光测量通常需要高灵敏度的光谱仪(推荐-TEC 致冷式光谱仪，积分时间 > 5 seconds)。对于大多数荧光应用来说，产生的荧光能量只占激发光能量的 3%左右。荧光能量比激发光能量要小（所以波长要长），而且一般都是散射光（在各个方向上辐射能量）。

对于荧光测量装置，最重要一点是防止激发光进入光谱仪，这可以通过不同方法实现，各种方法不互相排斥：

1. 使用AvaLight-LED作为激发光源（窄带宽），激发光波长不在荧光光谱范围内；
2. 使用（干涉）带通或低通滤光片与AvaLight-HAL光源一起得到高强度窄带宽的激发光；
3. 确保激发光与荧光是90度正交的，这样激发光不会

进入接收光纤（使用CUV-UV/VIS-FL）；

4. 利用荧光的延迟时间把激发光和荧光积分时间起始脉冲分离开。此时需要一个脉冲光源(脉冲激光器或XE-2000闪光氙灯)和AvaSpec-2048FT快触发型光谱仪（可编程控制延迟时间）；

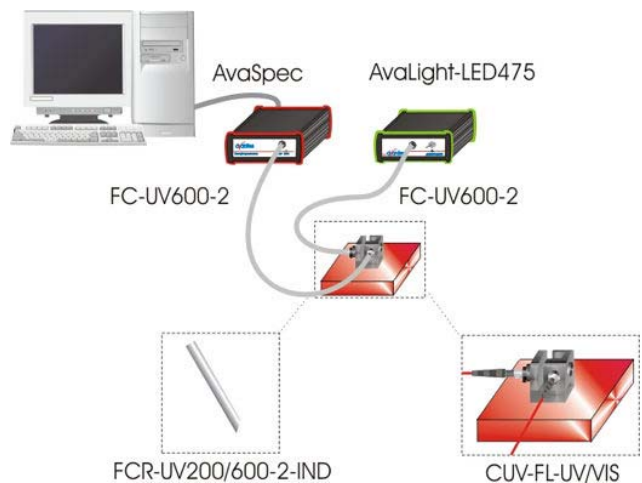


图 9 荧光测量装置

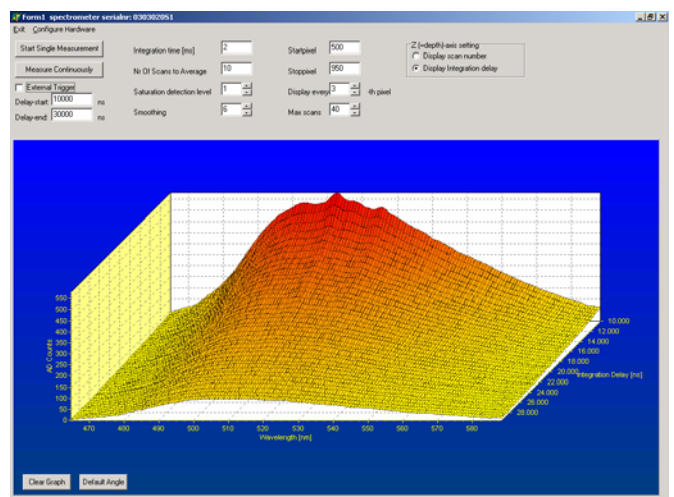


图 10 3D 荧光谱图

2.3.6 拉曼测量

AvaRaman 拉曼光谱仪是一款集成式的低成本拉曼系统。AvaRaman 系统包括半导体激光器、AvaSpec-2048 线阵 CCD 光谱仪、AvaSoft-Raman 操作软件和多种光纤探头。AvaRaman 拉曼光谱仪系统适用于多种 Raman 波长，有 2 种基本型号：

1. 低成本、非致冷型：光学分辨率为 25cm^{-1} ，标准配置包括半导体激光器；
2. 高性能、热电致冷型：包括高稳定激光器，光学分辨率可达 8cm^{-1} ；

AvaRaman 拉曼光谱仪特别适用于分析领域的应用，诸如反应监控、产品识别、遥感，以及水溶液、胶体和其它介质中高散射性微粒特性的研究。

AvaRaman 拉曼光谱仪系统除了标准 785nm 半导体激光器，还可以选择其它不同类型的激光器，比如 514nm 氩离子激光器，50mW 或 100mW 固体激光器（532 nm），或 633nm He-Ne 激光器。



图 11 AvaRaman 拉曼测量装置

2.4 测试数据及装置



图 12 用 AvaSpec-2048 光谱仪测量惰性气体高压放电等离子体的实际照片

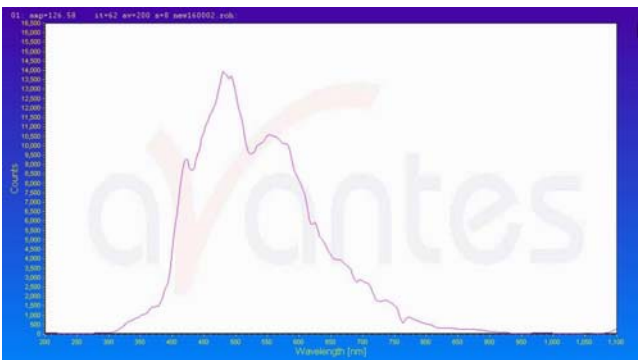


图 12 用 AvaSpec-2048 光谱仪测量太阳光的发射光谱图

3. 已有光谱仪用户

国内有很多高校、科研院所及公司都在使用 AvaSpec 系列光谱仪，具体用户信息属于公司机密，在此就不一一列举了；如果您想看一下光谱仪实物，欢迎您来我们公司，或者我们公司可以为您提供附近用户的详细信息。

4. 结 论

AvaSpec 系列光谱仪在光谱学领域的应用，具有性价比高、灵敏度高、测量精度高、测量速度快、操作简单等特点，而且体积小巧，方便集成到系统中进行在线监测。