

水的光学特性专题实验

(光源、发射光谱、接收光谱、光谱仪应用)

一、课前预习

预习要点

1. 分析 LED 和 LD 发光原理有何不同？光谱特性有何不同？
2. 光敏电阻、光敏三极管的工作原理是什么？
3. 光谱仪的工作原理是什么？
4. 如何测量液体的浓度？

二、背景及应用介绍

科研领域液体的研究一般都会从液体的折射率、浓度、密度、透射吸收光谱、粘滞系数、表面张力、旋光性等角度入手，建立一个液体的性质和其他衡量液体性质参数的关系，将会有利于液体本质的分析。其中，液体的浓度指一定量溶液和溶剂中溶质的量，一定程度上能够反应物质的某些特点，与人们的生产生活息息相关，在医药、食品、化工、石油等方面，测定液体浓度具有重要的研究意义，因此测量液体浓度也一直是科研工作者研究的热点问题。目前常见的测量溶液浓度的方法有折射法、旋光法和吸收光谱法等。

对于液体浓度的测量，很多学者采用高效液相色谱、气相色谱、核磁共振等方法。而市场上检测系统主要采用光折射原理，这类方法对检测环境要求高，并且因为需要肉眼读数，因此受到主观因素影响较大。阿贝折射仪、波美计测定多使用实验室仪器，具有精度高的优点，却有体积大、移动困难，样品预处理复杂，仪器的工作环境要求苛刻，使用不便，成本高等诸多不足，难以实现现场检测。



波美计

许多物质具有旋光性(又称光学活性),如含有手征性碳原子的有机化合物。当平面偏振光通过这些物质(液体或溶液)时,偏振光的振动平面向左或向右旋转,这种现象称为旋光。这些旋光性质为化合物的特性,可以用于鉴别和定量测定。对于有旋光特性的液体,则可以利用旋光计测定液体的旋光度,从而确定相应浓度。

阿贝折射仪



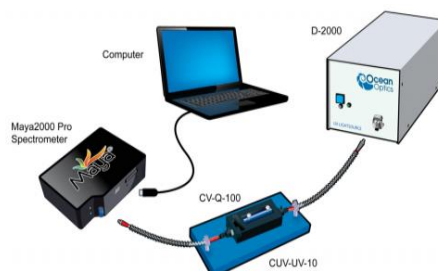
全自动旋光仪

吸收光谱法是一种利用物质分子吸收特定波长辐射,发生分子轨道电子跃迁的分析测定方法。吸收光谱法灵敏度高、操作简便,是定性和定量分析无机和有机化合物的一种常用方法。紫外吸收光谱范围为 200-400nm,可见光吸收光谱为 400-800nm。

光谱仪目前在诸多领域均有广泛应用,如:

液体浓度检测 (水质检测)

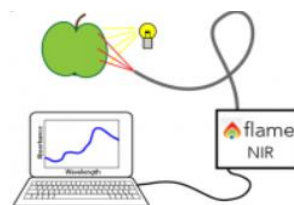
基于光纤光谱仪的紫外-可见 (UV-Vis) 光谱技术检测水质参数具有检测速度快、成本低、无二次污染、可实现在线原位测量等优点,在水质快速检测、多参数分析、水质分类和水质报警等领域都具有传统方法不可替代的优势。



液体浓度检测系统

苹果糖分检测

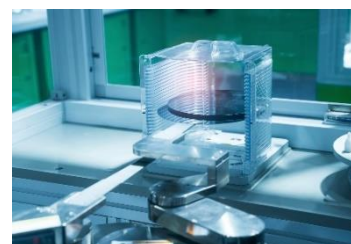
使用近红外反射光谱对水果的含糖量进行检测和计算,为客户提供快速、非破坏性测试等选择方案。



苹果糖分检测系统

半导体刻蚀高精度测量

使用海洋光学的高速、精密光谱仪进行光学终点改善半导体制造。格罗方德 (Global Foundries, GF) 公司目前已在系统中安装了海洋光学的光谱仪,并重新写入其算法,检测多项等离子体发射光谱,从而精确停止蚀刻。



半导体蚀刻高精度测量系统

原位气体测量

丹佛斯 IXA 公司开发的船用排放传感器采用了海洋光学的紫外吸收光谱技术。紫外光被直接射入气体中,光谱仪测量气体吸收的光。传感器的计算机包含一



原位气体测量

个带有支持气体“指纹”的数据库，可以精确报告每种气体的浓度。

三、实验目的

1. 在知识方面：

(1) 掌握 LED、LD 的发光原理；测量 LED、LD 的发射光谱，确定各光源的中心波长和谱线宽度；比较各种 LED 光源、LED 与 LD 光源的光谱特性，了解各类光源的区别；

(2) 掌握光敏电阻、光敏三极管的工作原理；测量光敏电阻和光敏三极管在不同光源照射下的伏安特性曲线，分析其特点；

(3) 了解光谱仪的结构和原理、学会测量物质的吸收光谱；

(4) 理解朗伯定律、比尔定律，以及常用的测量液体浓度的方法。

2. 在能力方面：

(1) 培养学生综合应用光学原理、光电检测知识的能力；

(2) 培养学生就给定测量目标，查阅文献、设计并实施相关实验方案的能力；

(3) 培养学生应用 Excel 或 Origin 实现数据可视化及分析数据曲线的能力。

3. 在素养方面：

(1) 通过本实验操作，深入培养学生理论（朗伯定律、比尔定律、发射光谱、吸收光谱）联系实际（液体浓度的测量）的科学研究素养及科学实验素养；

(2) 通过思政引导，培养学生正确的价值观；

(3) 通过拓展实验，引导学生在进一步探究透明液体浓度测量方法的过程中，激发学生主动探究的创新精神。

四、教学中的重点与难点

重点

1. LED、LD 发光原理的理解；

2. 光谱仪的应用；

3. 根据设计需求，能设计出合理有效的液体浓度测量装置。

难点

能根据不同液体的光学性质，选择合适的测量方法来设计整体测量方案。

五、实验原理

1. LED 发光原理

发光二极管（LED）被称为第四代照明光源或绿色光源，具有节能、环保、寿命长、体积小等特点，目前已广泛应用于各种指示、显示、装饰、普通照明和城市夜景等领域，如图 1 所示。



图 1 LED 的广泛应用

其结构如图 2 所示。

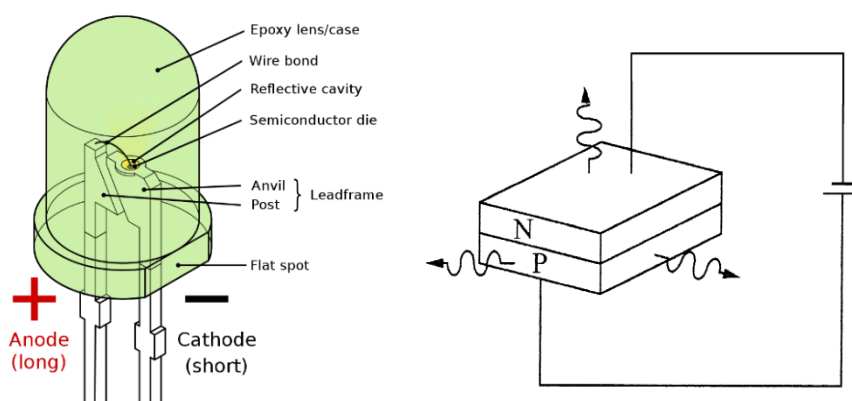


图 2 LED 的结构示意图

当在 PN 结上加正向偏压时，电子由 N 区注入 P 区导带，空穴由 P 区注入 N 区价带。在某些半导体材料的 PN 结中，注入的少数载流子与多数载流子复合时会把多余的能量以光的形式释放出来，从而把电能直接转换为光能。其波长由禁带宽度 E_g 决定，即

$$\lambda = \frac{hc}{E_g} \quad (1)$$

由于带隙辐射是导带中多余电子降至价带所致，属于自发辐射，参与辐射的能级很多，故产生的光辐射有相当大的谱线宽度。

2. LD 发光原理

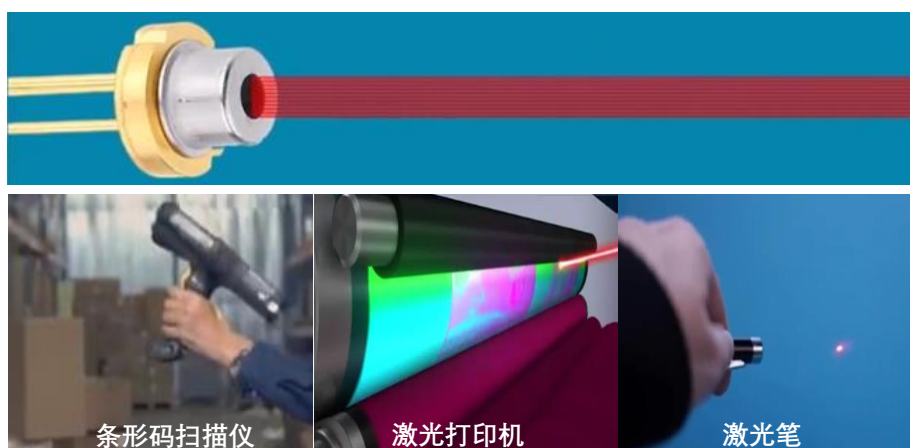


图 3 LD 及其常见应用

如图 3 所示，激光二极管(LD)，指半导体激光二极管或者半导体激光器。它能直接作为光通信光源，也可以作为激光器、放大器的泵浦源，在激光工程研究领域有着十分重要的地位。它具有半导体器件的特点:体积小、结构简单、效率高、能直接调制。半导体激光器的发光原理与其它激光器的原理相同，都涉及受激辐射、粒子数反转和谐振三个关键问题。

(1) 受激辐射

如图 4 所示，设 E_1 为基态能级， E_2 为激发态能级。常温下大部分电子都处于基态能级，当电子在基态能级和激发态能级之间跃迁时将产生自发辐射、受激辐射和受激吸收三个基本过程。当能量为 $h\nu = E_2 - E_1$ 的光子作用在处于受激能级 E_2 的电子上时，电子因受激而从不稳定的能级 E_2 跃回到基态，并发射出频率、相位和方向都与入射光子相同的能量为 $h\nu$ 的光子。这种过程称为受激辐射。

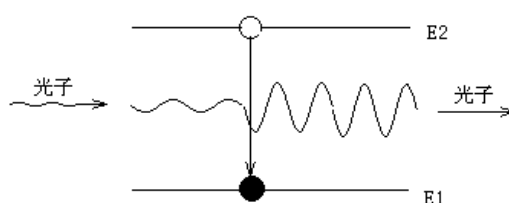


图 4 受激辐射示意图

(2) 粒子数反转

要使激光工作物质的受激辐射占主导地位，就必须从外部给工作物质提供能量，使处于激发态的载流子数远大于处于基态的载流子数，也就是把载流子的正常分布倒转过来，称为粒子数的反转或称粒子分布的反转状态。粒子数的反转是使受激辐射从次要地位转换为主导地位的必要条件，也是产生激光的必要条件。

(3) 谐振腔

激光物质发生粒子数反转后，尽管增益有所提高但还不足以产生激光。为使发射光束具有激光的特点，还必须使其产生“振荡”形成谐振。产生谐振的方法是，在激光物质的两侧放置相互平行的反光镜，形成光的“共振”现象。通常将能使光产生“共振”的装置称为“共振腔”或“谐振腔”。自发辐射的方向不与谐振腔轴线平行的光子将被反射出腔外，只有与轴线平行的自发辐射光子才能产生“共振”现象而被增强，形成受激辐射。也就是说，平行于腔轴的光子在腔内的两个反射面来回反射，反复通过激光工作物质，依靠受激辐射，光子每通过一次工作物质便得到一次增强，使光子数不断增长。所以，谐振腔是产生激光的又一个必要条件。

3. 光敏电阻工作原理

光与物质作用产生的光电效应分为内光电效应和外光电效应两类。被光激发所产生的载流子（自由电子或空穴）仍在物质内部运动，使物质的电导率发生变化或产生光生伏特现象，称为内光电效应；而被光激发产生的电子溢出物质表面，形成真空中的电子的现象，称为外光电效应。

光敏电阻，如图 5 所示，是基于半导体内光电效应工作的。由于光敏电阻是用光电导体制成的光电器件，又称光导管。光敏电阻没有极性，纯粹是一个电阻器件，使用时可加直流偏压，也可加交流电压。在其两极加上一定电压后，当无光照时，光敏电阻值（暗电流）很大，电路中电流很小；光敏电阻受到一定光照时，由光照产生的光生载流子在外加电场作用下沿一定方向运动，阻值急剧减少，电路中电流迅速增加，达到了光电转换的目的。



图 5 光敏电阻

(1) 伏安特性

在一定光照下，光敏电阻两端所加的电压与光电流之间的关系，称为伏安特性。图 6 所示为硫化镉光敏电阻的伏安特性曲线。

光敏电阻的本质是电阻，符合欧姆定律，因此它具有和普通电阻相似的伏安特性。由曲线可知，在偏压一定的情况下，光强越大，光电流也就越大；在光强一定的情况下，两端所加的电压越大，光电流越大，而且没有饱和现象。虽然光敏电阻没有饱和现象，但任何光敏电阻都有最大额定功率、最高工作电压和最大额定电

流。图中虚线是允许功耗线或额定功耗线，使用时应不使光敏电阻的实际功耗超过额定值。

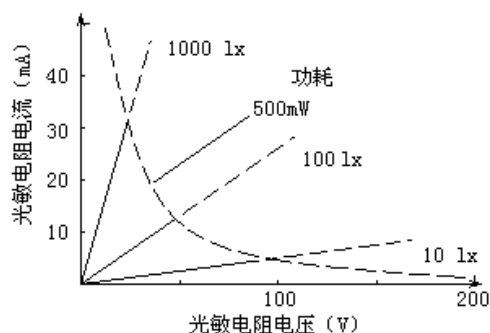


图 6 硫化镉光敏电阻的伏安特性

(2) 光谱响应特性

光敏电阻的光谱响应主要与光敏材料禁带宽度、杂质电离能、材料掺杂比与掺杂浓度等因素有关。图 7 所示为硫化镉、硫化铅、硫化铊三种光敏电阻的光谱特性曲线。从图中可以看出，硫化镉光敏电阻的光响应峰值在可见光区域，而硫化铅的峰值在红外区域。因此，在选用光敏电阻时，应根据光源光谱考虑，这样才能得到较好的效果。

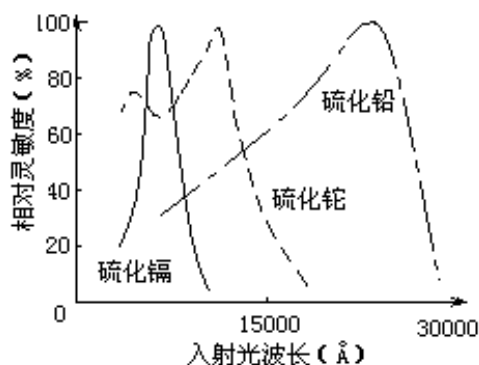


图 7 硫化镉、硫化铅、硫化铊三种光敏电阻的光谱特性曲线

4. 光敏三极管工作原理

光敏三极管和普通三极管相似，也有电流放大作用，只是它的集电极电流不只是受基极电路和电流控制，同时也受光辐射的控制。图 8 所示为 S150PTC-1A 型光敏三极管。



图 8 S150PTC-1A 光敏三极管

光敏三极管与普通晶体管一样具有两种基本结构，即 NPN 结构和 PNP 结构。用 N 型材料为衬底制作的光敏三极管为 NPN 结构，用 P 型材料为衬底制作的光敏三极管为 PNP 结构。

光敏三极管具有两个 PN 结，它在把光信号转换为电信号同时，又将信号电

流加以放大。

图 9 所示为 NPN 型光电晶体管的基本电路。当光敏三极管的基极放置不接，集电极加上相对于发射极为正的电压时，基极-集电极结就是反向偏压。当光照射在基-集结上时，就会在结附近产生电子-空穴对，从而形成光电流，输入到晶体管的基极，由于基极电流增加，因此集电极电流是光生电流的 α 倍，所以光电晶体管有放大作用。

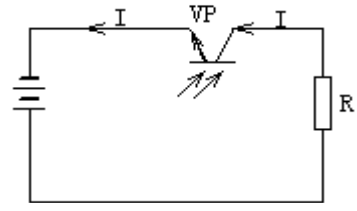


图 9 NPN 型光敏三极管基本电路

光电晶体管的结构与普通晶体管十分相似，不同的是光电晶体管的基极往往不接引线，但一些光敏三极管的基极有引出，用于温度补偿和附加控制等作用。实际上许多光电晶体管仅有集电极和发射极两端有引线，尤其是硅平面光电晶体管，因为其泄漏电流很小，因此一般不备基极外接点。

(1) 伏安特性

图 10 为硅光电晶体管在不同照度下的伏安特性曲线。从特性曲线可以看出，光电三极管在偏置电压为零时，无论光照度有多强，集电极电流都为零，也就是说光敏三极管必须在加一定的偏置电压时才能正常工作，并且偏置电压要保证集电结处于反偏，发射结处于正偏。随着偏置电压的增高，伏安特性曲线趋于平坦。特性曲线的弯曲部分为饱和区，在饱和区光敏三极管偏置电压提供给集电极的反向偏置电压过低，集电极的收集能力不强，造成三极管饱和。因此，使用如图 10 所示的光敏三极管时，应使光敏三极管工作在反向偏置电压大于 4V 的线性区域。

(2) 光谱特性

光敏三极管与光敏二极管具有相似的光谱特性，如图 11 所示。

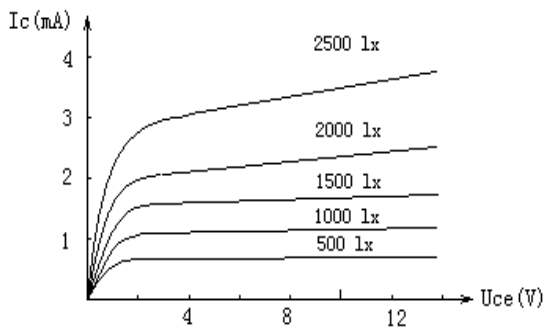


图 10 光敏三极管伏安特性曲线

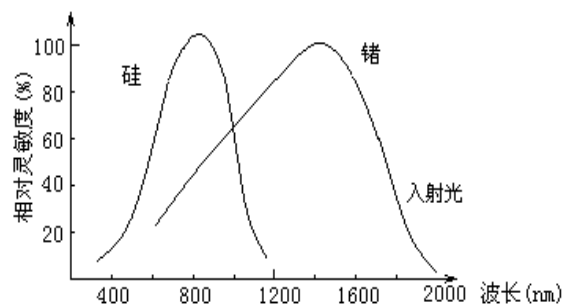


图 11 硅和锗光敏三极管的光谱特性曲线

从图 11 中曲线可以看出，当入射光自峰值波长增加时，相对灵敏度要下降，这是因为光波长增加，光子能量变小，不足以激发电子空穴对；当入射光自峰值波长缩小时，光子透过率下降，在表面产生的电子空穴对不能到达 pn 结，因而

灵敏度下降。由图 11 还可知，硅光敏三极管的响应光谱的波长范围为 400~1100nm，锗为 500~1800nm。两者的峰值波长约为 900nm 和 1500nm。因为锗管的暗电流较大，因而性能较差，故在可见光或探测赤热状态物体时，一般都用硅管。但在红外光进行探测时，则锗管较为适宜。

5. 朗伯定律和比尔定律

光的吸收，就是指光波通过媒质后，光强减弱的现象。除了真空，没有一种介质对任何波长的电磁波是完全透明的。所有的物质都是对某些范围内的光透明，而对另一些范围内的光不透明。因此，若在一定波长范围内，物质吸收不随波长而变，这种吸收就称为一般吸收，反之，随波长而变的吸收称为选择吸收。例如：在可见光范围，一般的光学玻璃吸收很小，且不随波长而变，它就是一般吸收。而有色玻璃在可见光范围内具有选择吸收。如“红”玻璃是对红色光微弱地吸收，而对绿光、蓝光及紫色光的吸收比较显著。当白光通过“红”玻璃时，除红光外，其本已被吸收，这就是滤光片的作用。不过，一般吸收和选择吸收的是相对有条件的，任何物质在一个波段范围内表现为一般吸收，在另一波段范围内表现为选择吸收。例如：普通光学玻璃，对可见光吸收很弱，是一般吸收，而对紫外及红外波段则表现出强烈的吸收，即为选择吸收。因此，任一介质对光的吸收都是由这两种吸收组成。

通常的近紫外和可见的吸收光谱实质是在电磁辐射的作用下，多原子的价电子发生跃迁而产生的分子吸收光谱，它又称为电子光谱。显然，物质吸收电磁辐射的本领是与物质分子的能级结构有关。当物质中能跃迁的两能级的能量差越接近电磁辐射的能量，则物质吸收越大；能级差相距辐射能量越大，则吸收越小。这就是物质有一般吸收和选择吸收的缘故。而吸收光谱法正是基于不同分子结构的各种物质对电磁辐射显示选择吸收这种特性建立起来的。

下面讨论光通过吸收媒质时，强度减弱的规律。

假设有一平面光波在一各向同性的均匀媒质中传播（如图 12）。

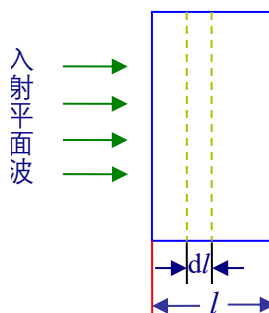


图 12 平面光波在吸收媒质中传播

经过一厚度为 dl 的平行薄层后，光强从 I 变到 $I+dI$ 。朗伯 (Lambert) 指出：

dI/I 应与吸收层的厚度 dl 成正比，即

$$\frac{dI}{I} = -kdl \quad (1)$$

其中 k 为吸收系数，由媒质的特性决定。

对于厚度为 l 的介质层，由 (1) 式得

$$\ln I = -kl + C \quad (2)$$

其中 C 为一积分常数，如当 $l=0$ 时， $I=I_0$ ，则 $C=\ln I_0$ ，代入 (2) 式有

$$I = I_0 e^{-kl} \quad (3)$$

这就是朗伯定律的数学表示式。

吸收系数 k 是波长的函数，在一般吸收的波段内， k 值很小，并且近乎于一常数；在选择吸收波段内， k 值很大，并且随波长的不同而有显著的变化。

吸收系数 k 愈大，光被吸收愈强烈，当 $k = \frac{1}{l}$ 时，由 (3) 式得

$$I = \frac{I_0}{e} \approx \frac{I_0}{2.73}$$

也就是说，厚度等于 $1/k$ 的介质层，可使光强减少到原光强的 2.73 分之一。

固体材料的吸收系数主要是随入射光波长而变，其它因素影响较小。而液体的吸收系数却与液体的浓度有关。实验证明，在很多情况下，当气体的分子或溶解在溶剂（实际上是不吸收光的溶剂）里的某些物质的分子吸收光时，吸收系数跟光波通过的路程上单位长度内吸收光的分子数也就是跟浓度 C 成正比。因此，比尔 (Beer) 指出：溶液的吸收系数 k 与浓度 C 成正比：

$$k = \alpha' C$$

此处 α' 为一个与浓度无关的新常数，它只决定于分子的特性，于是 (3) 式变为

$$I = I_0 e^{-\alpha' cl} \quad (4)$$

若以 $T = I/I_0$ 表示透过率， $A = -\log T = \log(\frac{1}{T})$ 表示吸光度，并将 (4) 式的

自然对数换成以 10 为底的对数时，则有

$$\log \frac{I}{I_0} = -\alpha cl \quad \left(\alpha = \frac{\alpha'}{2.303} \right)$$

或 $A = \alpha cl$ (5)

(5) 式即为比尔定律的数学形式。应该指出，比尔定律只有在物质分子的吸收本领不受它周围邻近分子的影响时，才是正确的。当浓度很大时，分子间的影响不能忽略。此时， α 与 C 有关，比尔定律就不成立。但朗伯定律始终是成立的，而比尔定律仅在一定条件下才成立。

在比尔定律成立时，就可用测量吸收的方法来测定物质的浓度。这就是快速测定物质浓度的吸收光谱分析法。在实际中很有用处。

6. 光谱仪及光谱检测原理

实验所用光谱仪内部结构如图 13 所示。

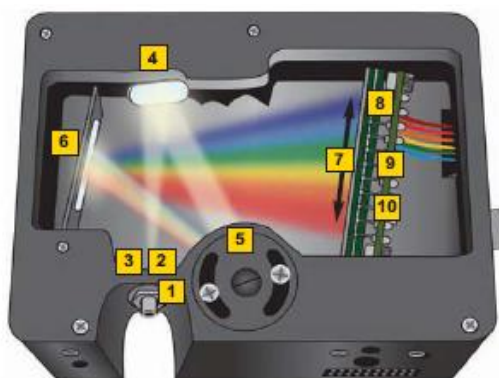


图 13 光谱仪内部结构图

图 13 中，1 为光纤连接器，2 为固定入射狭缝，3 为长通吸收滤光片，4 为准直镜，5 为衍射光栅，6 为聚焦镜，7 为探测器聚光透镜，8 为线阵 CCD 探测器，9 为消除高阶衍射滤光片，10 为探测器。

信号光由一个标准的光纤接口进入光谱仪，先经球面镜 4 准直入射到平面光栅上产生衍射，经由第二块球面镜 6 聚焦，最后光谱的像就被投射到一维线性探测器阵列上。

光谱检测方法是基于物质对光的选择性吸收的原理实现的。各种分子都有其特征的吸收光谱，即吸光度随波长的变化规律。吸收光谱的形状与物质的性质有关，以此进行定性分析。

为了清楚地描述各种物质对光辐射选择性吸收的情况，往往需绘制吸收光谱曲线，即吸光度对波长的曲线。在吸收光谱曲线上可以找到最大吸收峰波长。本实验通过光谱仪检测溶液的透射光谱分布曲线，横坐标为波长值，纵坐标为透过率值，由 $\lambda - T$ (透过率) 可得出不同波长对应的吸光度值。

六、实验内容

1. LED 与 LD 光源发射光谱的测量与比较

- (1) 观察并记录各光源光谱、各个单色光的中心波长 λ_0 、谱线宽度 $\Delta\lambda$ ；
- (2) 观察中心波长和谱线宽度随光源工作电流的变化规律，分析其原因；
- (3) 比较各个 LED 光源之间、LED 与 LD 光源之间的光谱，指出各类光源之间的区别。

2. 测量并分析光敏电阻和光敏三极管在不同光源照射下的伏安特性曲线

- (1) 分别测出白色、绿色大功率 LED 光源下光敏电阻的伏安特性，在同一坐标系上绘制伏安特性曲线；
- (2) 分别测出黄色、蓝色小功率 LED 光源下光敏电阻的伏安特性，在同一坐标系绘制伏安特性曲线；
- (3) 分别测出 LD 光源在光源电流为 16mA 和 18mA 下光敏电阻的伏安特性，在同一坐标系绘制伏安特性曲线；
- (4) 分别测出黄光光源、蓝光光源和激光光源下光敏三极管的伏安特性，并分别绘制伏安特性曲线；
- (5) 比较各个伏安特性曲线并加以分析。

3. 测量硫酸铜溶液的透射率与波长的曲线 ($T-\lambda$ 曲线)，由曲线测量硫酸铜溶液的浓度 x 。

4. 设计一种用光学方法测量透明液体浓度的装置，自行配置不同浓度的 NaCl 溶液，检验装置的准确性。

七、实验报告要求

1. 记录 LED 与 LD 光源光的中心波长 λ_0 ，谱线宽度 $\Delta\lambda$ ，给出相关分析分析（手写）。
2. 打印光敏电阻和光敏三极管在不同光源照射下的伏安特性曲线，在打印纸的背面比较各曲线并加以分析（手写）。
3. 将硫酸铜溶液 $T-\lambda$ 曲线图以及实验数据表整理在一个 word 中打印，并加以分析（手写）。
4. 论述测量透明液体浓度的实验设计方案、给出实验装置图；详细论述测量原理（包括原理图，公式推导等），说明实验方法；给出 NaCl 溶液浓度的测量结果，并就测量结果给出方案评价。

八、实验结果与分析

1、各种 LED 及 LD 发射光谱:

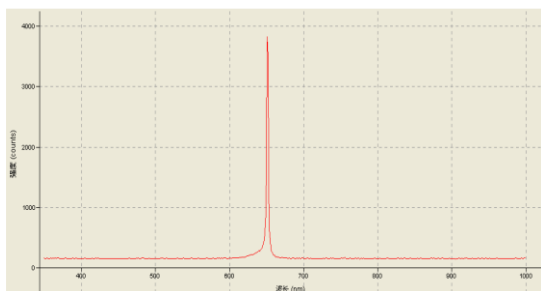


图 14 激光光谱

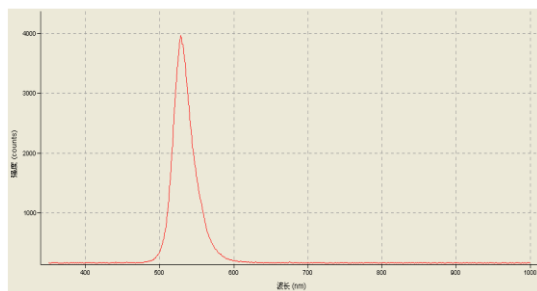


图 15 LED 绿光光谱

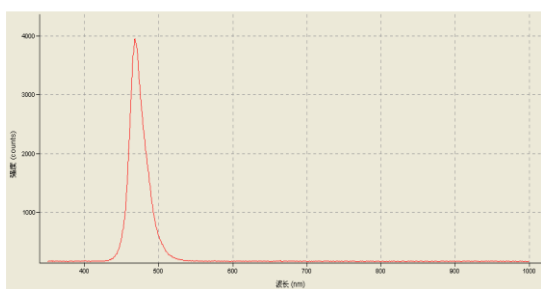


图 16 LED 蓝光光谱

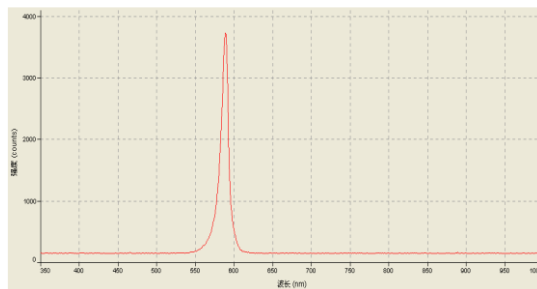


图 17 LED 黄光光谱

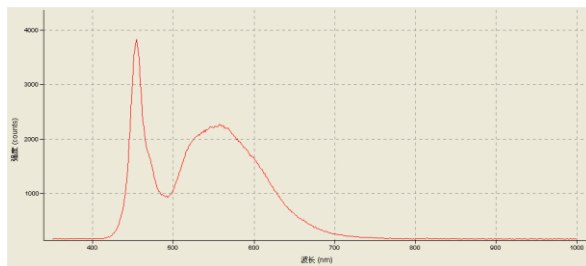


图 18 LED 白光光谱

2、光敏电阻及光敏三极管在不同光源下的伏安特性:

表 1 大功率 LED 光照下光敏电阻伏安特性 (I=80mA)

U/V	0	2	4	6	8	10	12	14	16
$I_{白}/mA$	0	0.9	1.9	2.8	3.8	4.7	5.7	6.7	7.7
$I_{绿}/mA$	0	0.6	1.1	1.7	2.3	2.9	3.4	4	4.6

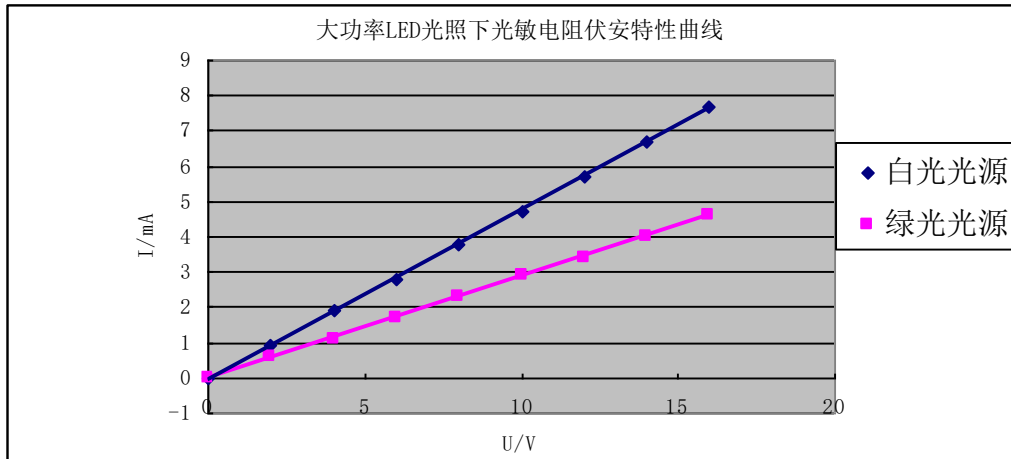


图 19 大功率 LED 光照下光敏电阻伏安特性曲线

表 2 小功率 LED 光照下光敏电阻伏安特性 (I=20mA)

U/V	0	2	4	6	8	10	12	14	16
$I_{\text{蓝}}/mA$	0	0.6	1.1	1.7	2.3	2.9	3.4	4	4.6
$I_{\text{黄}}/mA$	0	0.6	1.2	1.9	2.5	3.1	3.7	4.4	5.1

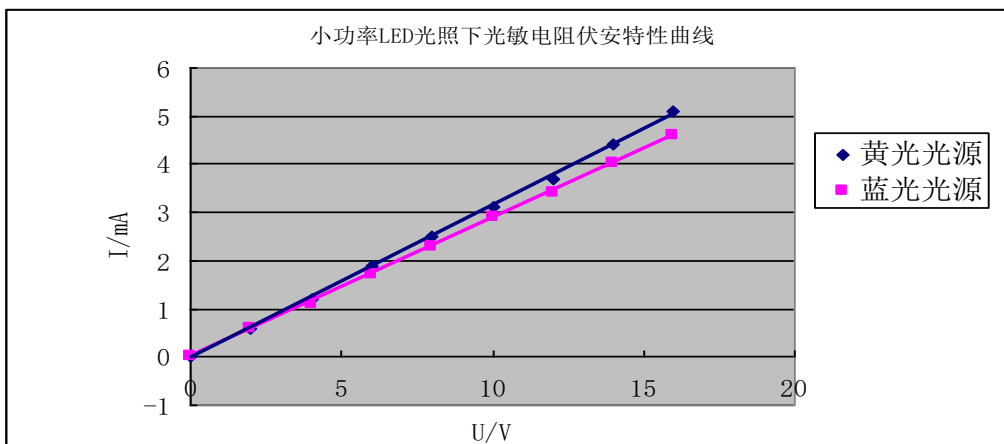


图 20 小功率 LED 光照下光敏电阻伏安特性曲线

表 3 LD 光照下光敏电阻伏安特性

U/V	0	2	4	6	8	10	12	14	16
I/mA (16mA)	0	0.4	0.8	1.3	1.7	2.2	2.6	3.1	3.5
I/mA (18mA)	0	0.5	1.1	1.7	2.2	2.8	3.4	4	4.6

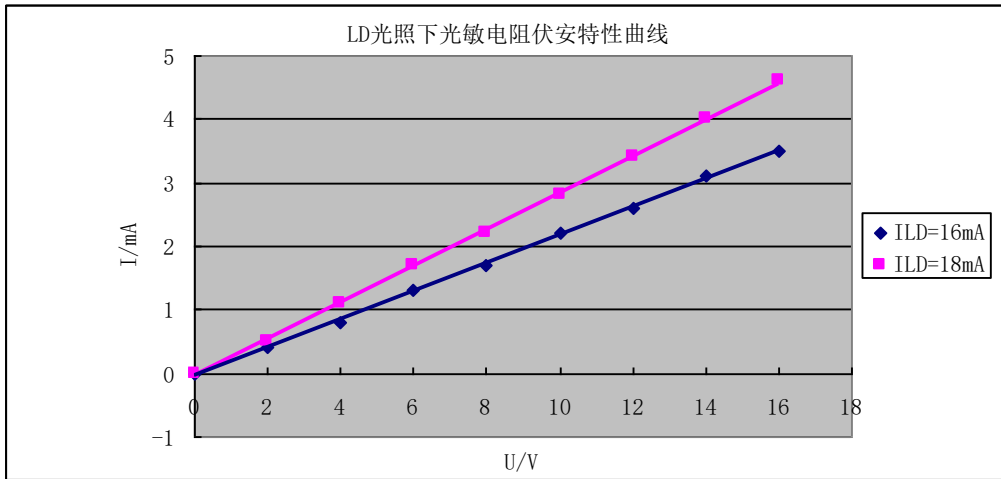


图 21 LD 光照下光敏电阻伏安特性曲线

表 4 黄光光源下光敏三极管的伏安特性

U/V	0	0.2	0.5	1.5	4	6	8	10	12
I/5mA	0	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7
I/10mA	0	0.8	1.1	1.2	1.3	1.4	1.4	1.5	1.6
I/15mA	0	1.2	1.6	1.7	1.9	2	2.1	2.2	2.3
I/20mA	0	1.9	2.2	2.3	2.6	2.7	2.9	3	3.2

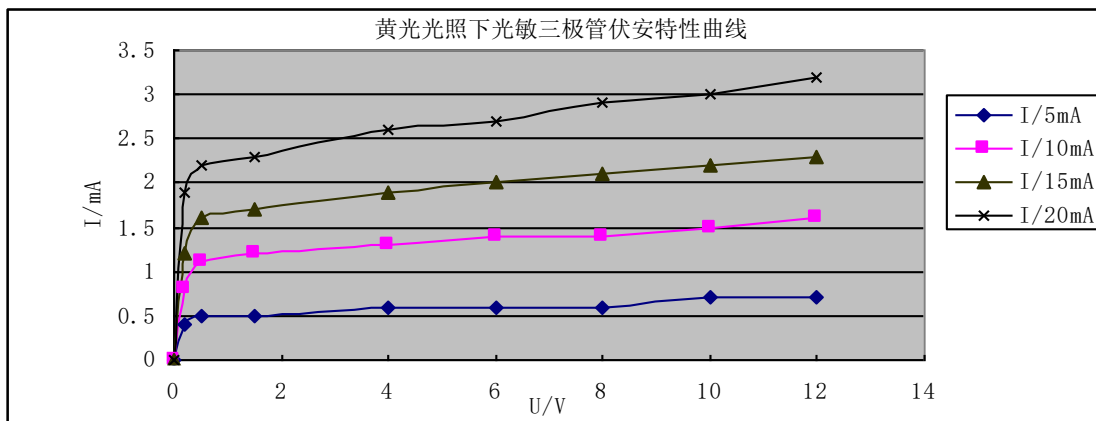


图 22 LED 黄光光照下光敏三极管伏安特性曲线

表 5 蓝光光源下光敏三极管的伏安特性

U/V	0	0.3	1	1.5	4	6	8	10	12
I/5mA	0	2.9	4.1	4.2	4.6	4.9	5.2	5.5	5.9

I/10mA	0	4	7.4	7.8	8.9	9.5	10.1	10.7	10.7
I/15mA	0	4.1	9	10	11.1	11.9	12.8	13.7	14.8
I/20mA	0	4.5	9.8	12.1	14.9	16.2	17.1	18	18.6

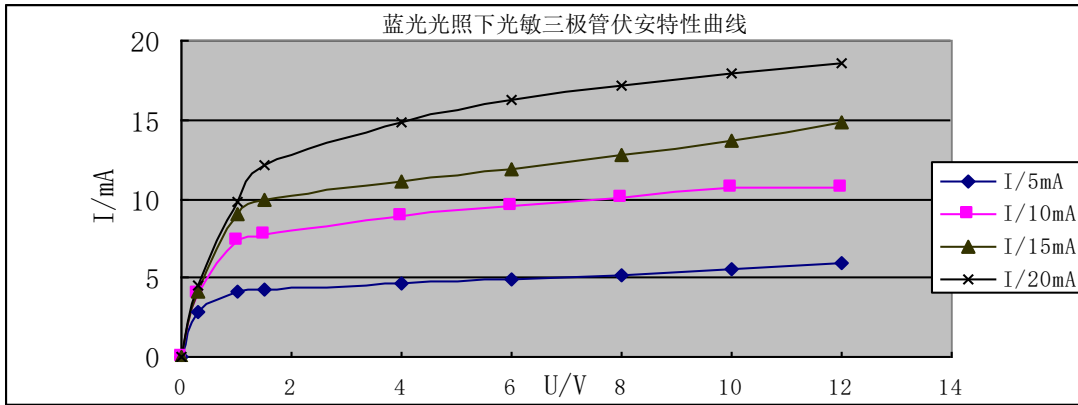


图 23 LED 蓝光光照下光敏三极管伏安特性曲线

表 6 LD 光源下光敏三极管的伏安特性

U/V	0	0.2	0.5	1.5	4	6	8	10	12
I/8mA	0	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9	1	1	1.1
I/12mA	0	1.1	1.7	1.9	2	2.2	2.3	2.4	2.6
I/14mA	0	1.5	2.5	2.6	2.9	3.1	3.3	3.4	3.6
I/16mA	0	2.6	3.6	3.8	4.2	4.5	4.7	5	5.3
I/18mA	0	2.8	4.9	6	6.8	7.3	7.8	8.2	8.7

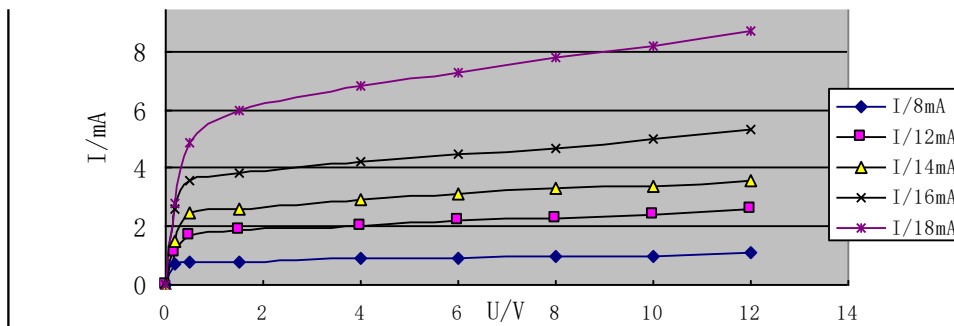


图 24 LD 光照下光敏三极管伏安特性曲线

3. 硫酸铜溶液溶度测量:

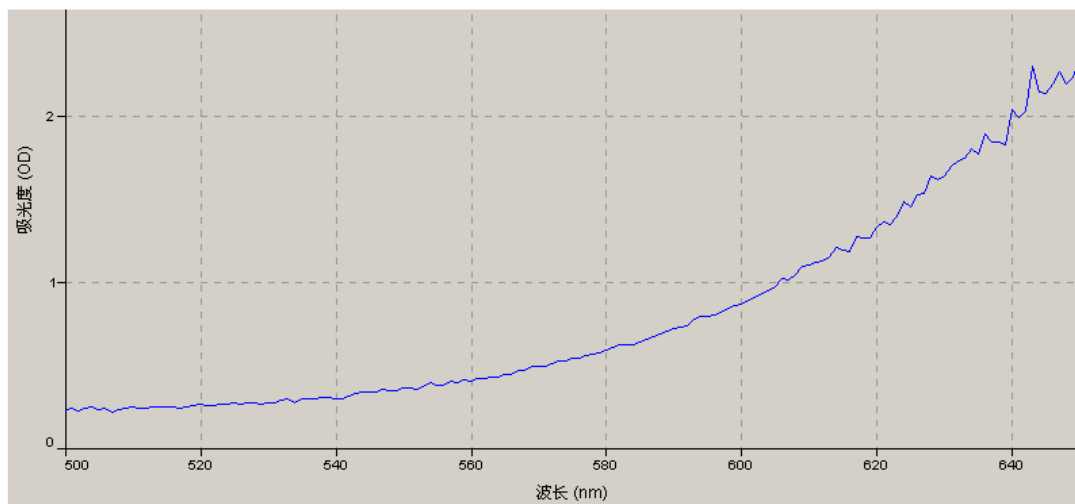


图 25 硫酸铜溶液的吸光度与波长曲线

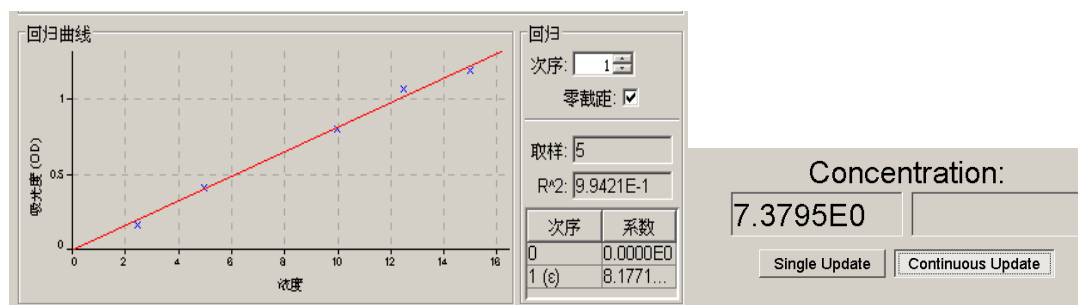


图 26 浓度-吸光度补偿数据

表 7 未知浓度硫酸铜溶液浓度

浓度 (%)	0	2.5	5	10	12.5	15	X(7.3795)
吸收度 OD	0	0.170455	0.417417	0.809648	1.06829	1.19629	0.616818

九、问题讨论与实验扩展

请自行设计一种用光学方法来测量透明液体浓度的装置，并用自配 NaCl 溶液检测装置的测量准确性。

★提示 1：液体的折射率与液体的浓度成正比。

★提示 2（问题讨论）：能否用旋光法测量？

【答】不能用旋光法！因为旋光法只能测出有旋光性的液体的浓度。

★提示 3（问题讨论）：能否用比尔定律测量？

【答】不能用实验指导书上的比尔定律方法！因为比尔定律方法只能测出有颜色的液体的浓度。

参考文献：

[1] 张凤云,曹文,张利巍. 测量液体折射率的几种光学方法的实验研究[J], 大学

物理实验, 2013,26(04):33-34+43.

[2] 汪晓春,杨博文,何冬慧. 一种基于迈克尔逊干涉仪测量透明液体折射率的方法[J], 光学仪器, 2012,34(05):1-4.

[3] 骆敏,郑凯璐,余观夏. 基于光栅衍射的液体折射率测量实验[J], 实验技术与管理, 2020,37(07):83-85

[4] 陈余行,马振斌. 最小偏向角法测量 NaCl 溶液浓度与折射率[J], 实验科学与技术, 2010,8(06):16-17+112.

[5] 向倩,丁益民,李政,等. 基于滴定法探究溶液浓度与折射率的关系[J], 大学物理实验, 2023,36(01):23-28.