

# 光电探测器特性测量实验

## 一、引言

光电探测器可将一定的光辐射转换为电信号，然后经过信号处理，去实现某种目的，它是光电系统的核心组成部分，其性能直接影响着光电系统的性能。因此，无论是设计还是使用光电系统，深入了解光电探测器的性能参数都是很重要的。

通常，光电探测器的光电转换特性用响应度表示。响应特性用来表征光电探测器在确定入射光照下输出信号和入射光辐射之间的关系。主要的响应特征包括：响应度、光谱响应、时间响应特性等性能参数。

本实验内容主要是光电探测器性能参数测量和光电探测器的一般使用方法，并专门列举了几种常用的光电探测器的使用方法。

## 二. 实验目的

1. 加深对光谱响应概念的理解；
2. 掌握光谱响应的探测方法；
3. 了解对光电探测器的响应度的影响因素；
4. 掌握测量探测器响应时间的方法

### 第一部分 光电探测器光谱响应度的测量

光谱响应度是光电探测器的基本性能参数之一，它表征了光电探测器对不同波长入射辐射的响应。通常热探测器的光谱响应较平坦，而光子探测器的光谱响应却具有明显的选择性。一般情况下，以波长为横坐标，以探测器接收到的等能量单色辐射所产生的电信号的相对大小为纵坐标，绘出光电探测器的相对光谱响应曲线。典型的光子探测器和热探测器的光谱响应曲线如图 1-1 所示。

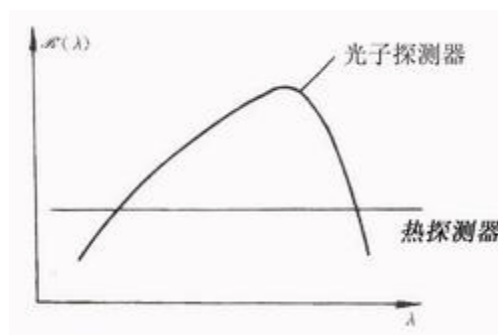


图 1-1 典型光电探测器的光谱响应

### 一. 实验目的

1. 加深对光谱响应概念的理解；
2. 掌握光谱响应的探测方法；
3. 熟悉热释电探测器和硅光电二极管。

### 二. 实验内容

1. 用热释电探测器测量钨丝灯的光谱辐射特性曲线；
2. 用比较法测量硅光电二极管的光谱响应曲线。

### 三. 基本原理

光谱响应度是光电探测器对单色入射辐射的响应能力。电压光谱响应度

$R_v(\lambda)$  定义为在波长为  $\lambda$  的单位入射辐射功率的照射下，光电探测器输出的信号电压，用公式表示，则为

$$R_v(\lambda) = \frac{V(\lambda)}{P(\lambda)} \quad (1-1)$$

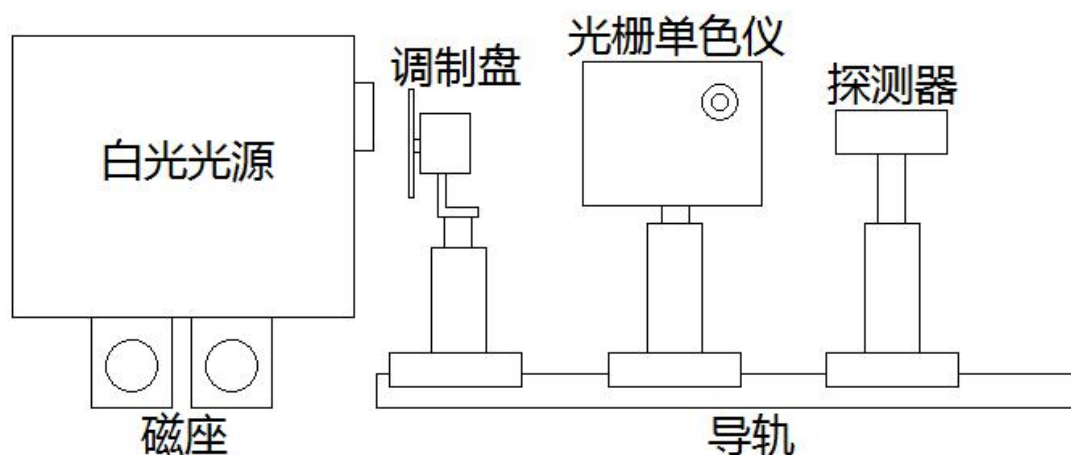
而光电探测器在波长为  $\lambda$  的单位入射辐射功率的作用下，其所输出的光电流叫做探测器的电流光谱响应度，用下式表示

$$R_i(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{P(\lambda)} \quad (1-2)$$

式中， $P(\lambda)$  为波长  $\lambda$  时的入射光功率； $V(\lambda)$  为光电探测器在入射光功率  $P(\lambda)$

作用下的输出信号电压； $I(\lambda)$  则为输出用电流表示的输出信号电流。

通常，测量光电探测器的光谱响应多用单色仪对辐射源的辐射功率进行分光来得到不同波长的单色辐射，然后测量在各种波长的辐射照射下光电探测器输出的电信号  $V(\lambda)$ 。然而由于实际光源的辐射功率是波长的函数，因此在相对测量中要确定单色辐射功率  $P(\lambda)$  需要利用参考探测器（基准探测器）。即使用一个光谱响应度为  $R_f(\lambda)$  的探测器为基准，用同一波长的单色辐射分别照射待测探测器和基准探测器。由参考探测器的电信号输出（例如为电压信号） $V_f(\lambda)$  可得单色辐射功率  $P(\lambda) = V_f(\lambda) R_f(\lambda)$ ，再通过 (1-1) 式计算即可得到待测探测器的光谱响应度。本实验采用图 1-2 所示的实验装置。用单色仪对白光点光源辐射进行分光，得到单色光功率  $P(\lambda)$ 。



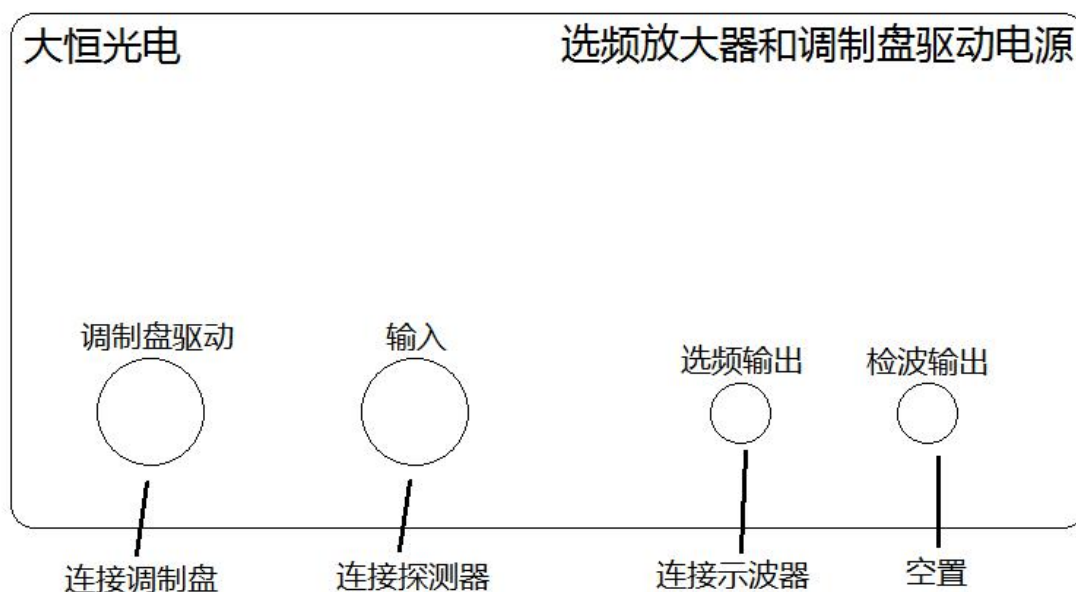


图 1-2 光谱响应测试装置

这里用响应度和波长无关的热释电探测器作参考探测器，测得  $P(\lambda)$  入射时的输出电压为  $V_f(\lambda)$ 。若用  $R_f$  表示热释电探测器的响应度，则显然有

$$P(\lambda) = \frac{V_f(\lambda)}{R_f K_f} \quad (1-3)$$

这里  $K_f$  为热释电探测器前放和主放放大倍数的乘积，即总的放大倍数。在本实验中， $K_f = 100 \times 300$ ， $R_f$  为热释电探测器的响应度，实验中在所用的 25Hz 调制频率下， $R_f = 900 \text{V/W}$ 。

然后在相同的光功率  $P(\lambda)$  下，用硅光电二极管测量相应的单色光，得到输出电压  $V_b(\lambda)$ ，从而得到光电二极管的光谱响应度

$$R(\lambda) = \frac{V(\lambda)}{P(\lambda)} = \frac{V_b(\lambda)/K_b}{V_f(\lambda)/R_f K_f}$$

式中  $K_b$  为硅光电二极管测量时总的放大倍数，这里  $K_b = 150 \times 300$ 。

#### 四. 实验装置

实验装置示于图 1-2。用白光点光源作光源，用直流稳压电源供电，光源发

出的光由聚光镜会聚于入射狭缝前用同步电机带动的调制盘对入射光束进行调制。光栅单色仪把入射光分解成单色光并从出射狭缝射出。转动单色仪的波长手轮可以改变出射光的波长（参见图 1-3）。在出射狭缝后分别用热释电探测器和硅光电二极管进行测量，所得光电信号经放大后由毫伏表指示。下面简要介绍实验装置的各个部分。

### 1. 光栅单色仪的光学系统

图 1-3 是单色仪光学系统的示意图，聚光镜把光源发出的光会聚于单色仪入射狭缝  $S_1$  上，光束经狭缝  $B_1$  射向球面反射镜  $M_1$  反射后的光束为平行光束。平行光束经平面光栅  $G$  分光后，不同的波长以不同的入射角投向球面反射镜  $M_2$ 。球面镜  $M_2$  把分光后的光聚在焦面上，形成波长不同的一系列光谱线。出射狭缝  $S_2$  位于球面镜  $M_2$  的聚焦面上。把狭缝  $S_1$  和  $S_2$  开得很窄，测量时转动手轮使光栅转动，在出射狭缝  $S_2$  处就会得到各个光谱分量的输出。输出光的波长可在千分尺上读出。

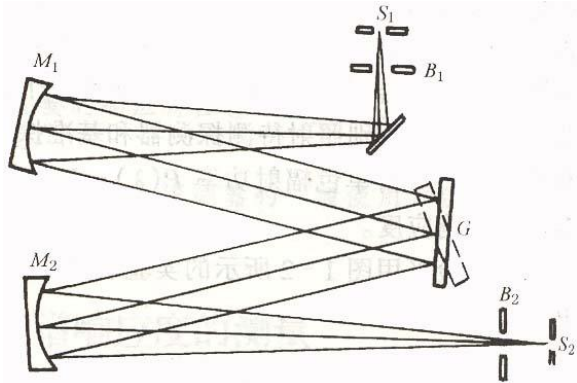


图 1-3 光栅单色仪光学系统图

### 2. 热释电探测器

本实验所用的热释电探测器是钽酸锂热释电器件，前置放大器与探测器装在同一屏蔽壳里。前放工作时需要正 12V 电压。为减小噪声，用干电池供电。图 1-4 示出了热释电探测器的典型调制特性。

### 3. 硅光电二极管

硅光电二极管为待测器件，它的前置放大器与它装在同一屏蔽壳中，所需 +12V 电压由选频放大器提供。前置放大器的放大倍数为 150。

### 4. 选频放大器

由于分光后的光谱辐射功率很小，虽然热释电探测器和光电二极管都带有前置放大器，但仍需按选频放大器放大。选频放大器的频率特性如图 1-5 所示。其中心频率  $f_0$  与调制频率一致（这里为 25Hz）。

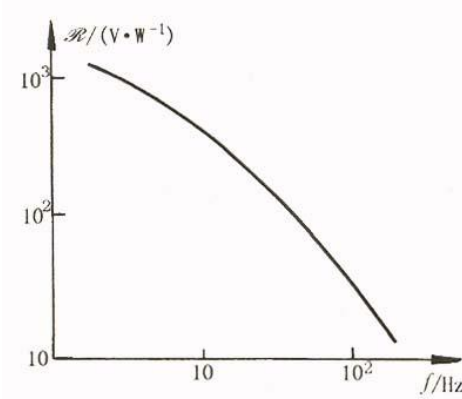


图 1-4 热释电探测器的典型调制特性

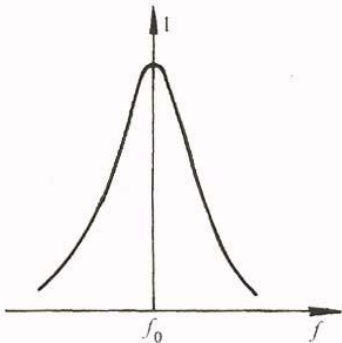


图 1-5 选频放大器的频率特性

### 5. 调制盘的电机使用 220V 电压

## 五. 实验步骤

1. 打开光源开关，调整光源位置，使灯丝通过聚光镜成像在单色仪入射狭缝，肉眼通过  $S_2$  能看到与波长读数相应的光。

注意：狭缝开大时不能超过 3mm，关小时不能超过零位，否则将损坏仪器！

2. 在光路中靠近  $S_1$  的位置放入调制器，并接通机电电源。

3. 把热释电器件光敏面对准出射狭缝  $S_2$ 。

转动光谱手轮，记下探测器的入射波长及毫伏表上相应波长的输出电压值，并填入表 1-1。

用光电二极管换下热释电器件，给光电二极管加上+12V 电压，重复步骤 4，将数据记入表 1-1。

表 1-1 光谱响应测试实验数据

入射光波长 $\lambda / \text{nm}$	热释电探测器 电压输出 $V_f$	硅光电二极管探测器 电压输出 $V_b$
300		
400		
500		
600		
700		

## 六. 实验报告

画出光源的光谱辐射分布曲线；

画出硅光电二极管的光谱响应曲线；

分析实验结果，并确定硅光电二极管的峰值响应波长  $\lambda_p$ 。

## 七. 思考题

1. 单色仪入射狭缝和出射狭缝的宽度分别控制着哪些物理量？测量时开大些好还是开小些好？

2. 如果在测量过程中，用热释电器件和光电二极管测量时，二者光源光强度不一致是否仍能保持结果的正确性？如果二者的调制频率不同呢？

## 第二部分 光电探测器响应时间的测试

通常，光电探测器输出的电信号都有要在时间上落后于作用在其上的光信号，即光电探测器的输出相对于输入的光信号要发生沿时间轴扩展。扩展的程序可由响应时间来描述。光电探测器的这种响应落后于作用信号的特性称为惰性。由于惰性的存在，会使先后作用的信号在输出端相互交叠，从而降低了信号的调制度。如果探测器观测的是随时间快速变化的物理量，则由于惰性的影响会造成输出严重畸变。因此，深入了解探测器的时间响应特性是十分必要的。

### 一、实验目的

(1) 了解光电探测器的响应度不仅与信号光的波长有关，而且与信号光的调制

频率有关；

- (2) 掌握发光二极管的电流调制法；
- (3) 熟悉测量探测器响应时间的方法。

## 二、实验内容

- (1) 用探测器的脉冲响应特性测量响应时间；
- (2) 利用探测器的幅频特性确定其响应时间。

## 三、基本原理

表示时间响应特性的方法主要有两种，一种是脉冲响应特性法，另一种是幅频特性法。

**1. 脉冲响应** 响应落后于作用信号的现象称为弛豫。对于信号开始作用时产弛豫称为上升弛豫或起始弛豫；信号停止作用时的弛豫称为衰减弛豫。弛豫时间的具体定义如下：

如用阶跃信号作用于器件，则起始弛豫定义为探测器的响应从零上升为稳定值的  $(1-1/e)$ （即 63%）时所需的时间。衰减弛豫定义为信号撤去后，探测器的响应下降到稳定值的  $1/e$ （即 37%）所需的时间。这类探测器有光电池、光敏电阻及热电探测器等。另一种定义弛豫的时间的方法是：起始弛豫为响应值从稳态值的 10% 上升到 90% 所用的时间；衰减弛豫为响应从稳态值的 90% 下降到 10% 所用的时间。这种定义多用于响应速度很快的器件，如光电二极管、雪崩光电二极管和光电倍增管等。

若光电探测器在单位跃信号作用下的起始阶跃响应函数为  $[1-\exp(-t/\tau_1)]$ ，衰减响应函数为  $\exp(-t/\tau_2)$ ，则根据第一种定义，起始弛豫时间为  $\tau_1$ ，衰减弛豫时间为  $\tau_2$ 。

此外，如果测出了光电探测器的单位冲激响应函数，则可直接用其半值宽度来表示时间特性。为了得到具有单位冲激函数形式的信号光源，即  $\delta$  函数光源，可以采用脉搏冲式发光二极管、锁模激光器以及火花源等光源来近似。在通常测试中，更方便的是采用具有单位阶跃函数形式亮度分布的光源。从而得到单位阶跃响应函数，进而确定响应时间。

**2. 幅频特性** 由于光电探测器惰性的存在，使得其响应度不仅与入射辐射的波长有关，而且还是入射辐射调制频率的函数。这种函数关系还与入射光强信号的波形有关。通常定义光电探测器对正弦光信号的响应同值同调制频率间的关系为它的幅频特性。许多光电探测器的幅频特性具有如下形式。

$$A(\omega) = \frac{1}{(1 + \omega^2 \tau^2)^{1/2}} \quad (2-1)$$

式中， $A$  表示归一化后幅频特性； $\omega = 2\pi f$  为调制圆频率； $f$  为调制频率； $\tau$  为响应时间。

在实验中可以测得探测器输出电压  $V(\omega)$  为

$$V(\omega) = \frac{V_0}{(1 + \omega^2 \tau^2)^{1/2}} \quad (2-2)$$



式中  $V_0$  为探测器在入射光调制频率为零时的输出电压。这样，如果测得调制频率为  $f_1$  时的输出信号电压  $V_1$  和调制频率为  $f_2$  时为输出信号电压  $V_2$ ，就可由下式确定响应时间

$$\tau = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{V_1^2 - V_2^2}{(V_2 f_2)^2 - (V_1 f_1)^2}} \quad (2-3)$$

为减小误差， $V_1$  与  $V_2$  的取值应相差 10% 以上。

由于许多光电探测器的幅频特性都可由式 (2-1) 描述，人们为了更方便地表示这种特性，引出截止频率。它的定义是当输出信号功率降至超低频一半时，即探测到的信号电压降至初始信号频率最低时探测器所探测到的电压幅值的 70.7% 时的调制频率。故  $f_c$  频率点又称为三分贝点或拐点。由式 (2-1) 可知

$$f_c = \frac{1}{2\pi\tau} \quad (2-4)$$

实际上，用截止频率描述时间特性是由式 (2-1) 定义的  $\tau$  参数的另一种形式。

在实际测量中，对入射辐射调制的方式可以是内调制也可是外调制外调制是用机械调制盘在光源外进行调制因这种方法在使用时需要采取稳频措施，而且很难达到很高的调制频率，因此不适用于响应速度很快的光子探测器所以具有很大的局限性。内调制通常采用快束响应的电致发光元件作辐射源。采取电调制的方法可以克服机械调制的不足，得到稳定度高的快速调制。

## 四、实验仪器

光电探测器时间常数测试实验箱：20M 双踪示波器。

在光电探测器时间常数测试实验箱中，提供了需测试两个光电器件：峰值波长为 900nm 的光电二极管和可见光波段的光敏电阻。所需的光源分别由峰值波长为 900nm 的红外发光管和可见光（红）发光管来提供。光电二极管的偏压与负载都是可调的，偏压分为 5V、10V、15V 三档，负载分 100 欧姆、1K 欧姆、10K 欧姆、50K 欧姆、100K 欧姆五档。根据需要，光源的驱动电源有脉搏冲和正弦波两种，并且频率可调。

下面简要介绍 CS-1022 型示波器的外触发工作方式和 10% 到 90% 的上升响应时间的测试方法。

### 1. 外触发同步工作方式


当示波器的触发源选择 ext 档时，CS-1022 型示波器右下角的外触发输入插座上的输入信号成为触发信号。在很多应用方面，外触发同步更为适用于波形观测。这样可以获得精确的触发而与馈送到输入插座 CH1 和 CH2 的信号无关。因此，即使当输入信号变化时，也不需要进一步触发。

### 2. 10% 到 90% 的上升响应时间的测试

(1) 将信号加到 CH1 输入插座，置垂直方式于 CH1。用  $V/\text{div}$  和微调旋钮测量波形峰峰值。

(2) 用  位移钮和其它旋钮调节波形，使其显示在屏幕垂直中心。将  $t/\text{div}$

开关调到尽可能快速的档位，能同时观测 10% 和 90% 两个点。将微调置于校准档。

(3) 用  位移旋钮调节 10% 点，使之与垂直刻度重合，测量波形上 10% 和 90% 点之间的距离 (div)。将该值乘以  $t/\text{div}$ ，如果用“ $\times 10$  扩展”方式，再诚意 1/10。

请正确使用 10%、90% 线。在 CS-1022 型示波器上，每个 0%、10%、90% 和 100% 测量点都标记在示波器屏幕上。

使用公式：

上升响应时间  $t_r = \text{水平距离 (div)} \times t/\text{div}$  档位  $\times$  “ $\times 10$  扩展”的倒数 (1/10)。

#### 【举例】

例如，水平距离为 4div， $t/\text{div}$  是  $2\mu\text{s}$  (见图 2-2)。代入给定值：

上升响应时间  $t_r = 4.0(\text{div}) \times 2(\mu\text{s}) = 8\mu\text{s}$

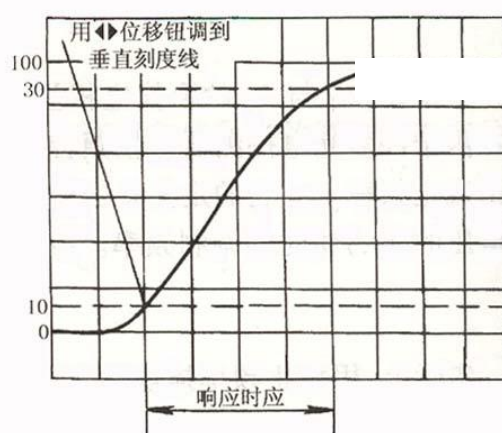


图 2-2 上升响应时间测量距离

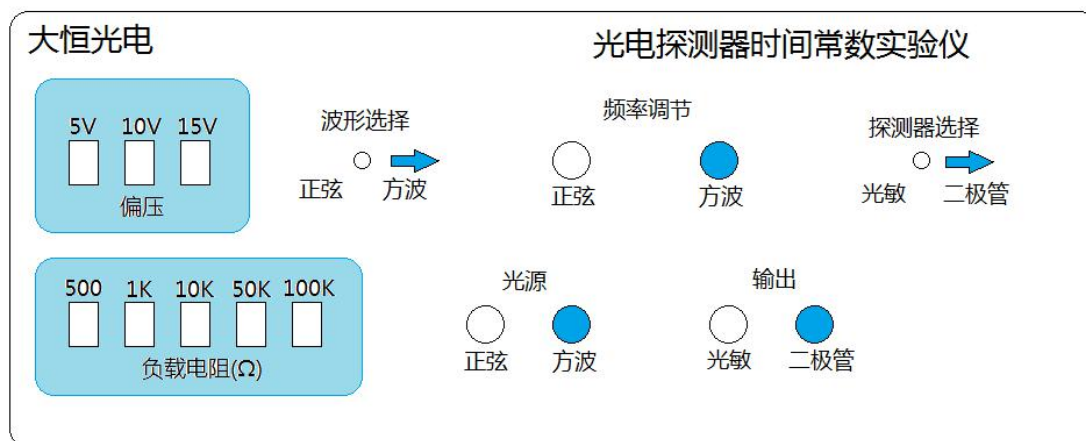
## 五、实验步骤

### 1. 用脉冲法测量光电二极管的响应时间

首先要将本实验箱（光电探测器时间常数仪）面板上“偏压”档和“负载”分别选通一组。

将“波形选择”开关拨至脉冲档，“探测器选择”开关拨至光电二极管档，此时由“波形”的二极管处应可观测到方波，由“输出”接口可得到光电二极管的输出波形，其频率可通过“频率调节”处的方波旋钮来调节，一般情况下默认将频率旋至最低。如下图所示，其中有色部分表示需要操作的部分，光源和输出模块需连接示波器。





调节示波器的扫描时间和触发同步，使光电二极管对光脉冲的响应在示波器上得到清晰的显示。

选定负载为  $10\text{k}\Omega$ ，改变其偏压。观察并记录在零偏（不选偏压即可）及不同反偏下光电二极管的响应时间，并填入表 2-1。

表 2-1 硅光电二极管的响应时间与偏置电压的关系

偏置电压 $E/\text{V}$	0	5	12	15	
响应时间 $t_r/\text{s}$					

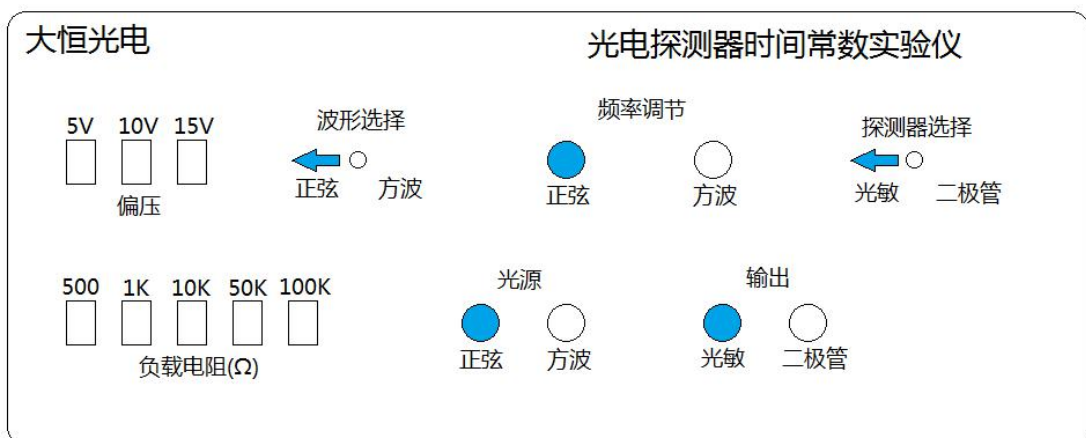
在反向偏压为  $15\text{V}$  时，改变探测器的偏置电阻，观察探测器在不同偏置电阻时的脉冲响应时间。记录填入表 2-2。

表 2-2 硅光电二极管的响应时间与负载电阻的关系

负载电阻 $R_L/\Omega$	50	100	1k	10k	100k
响应时间 $t_r/\text{s}$					

## 2. 用幅频特性法测量 CaSe 光敏电阻的响应时间

将本实验箱面版上“波形选择”开关拨至正弦档，“探测器选择”开关拨至光敏电阻档，此时由“输入波形”的光敏电阻处应可观测到正弦波形，由“输出”处引出的输出线（蓝线）即可得到光敏电阻的输出波形，其频率可改变“频率调节”处的正弦钮来调节。如下图所示，其中有色部分表示需要操作的部分，光源和输出模块需连接示波器。



改变光波信号频率，测出不同频率下 CdSe 的输出电压（至少测三个频率点）并记录。

根据式（2-3）计算出其响应时间。

**3. 用截止频率测量 CdSe 光敏电阻的响应时间** 改变正弦波的频率，可以发现随着调制频率的提高，CdSe 负载电阻两端的信号电压将减小。测出其衰减到超低频的 70.7% 时的调制频率  $f_c$  (若初始正弦信号频率最低时，光敏电阻探测器探测到的信号幅值为 1.5V，则增加初始正弦信号频率直到光敏电阻探测器探测到的信号幅值为 1.05V 左右为止，此时的调制频率即为  $f_c$ )，并由式（2-4）确定时间  $\tau$ 。

## 六、实验报告

列出表 2-1、表 2-2 并解释光电二级管的响应时间与负载电阻和偏置电压的关系。

列出用脉冲响应法测得的 CdSe 光敏电阻的响应时间，并与用幅频特性法测出的响应时间相比较。

写出用截止频率测得的 CdSe 的响应时间。并比较三种方式的特点。