



物理学国家级实验教学示范中心

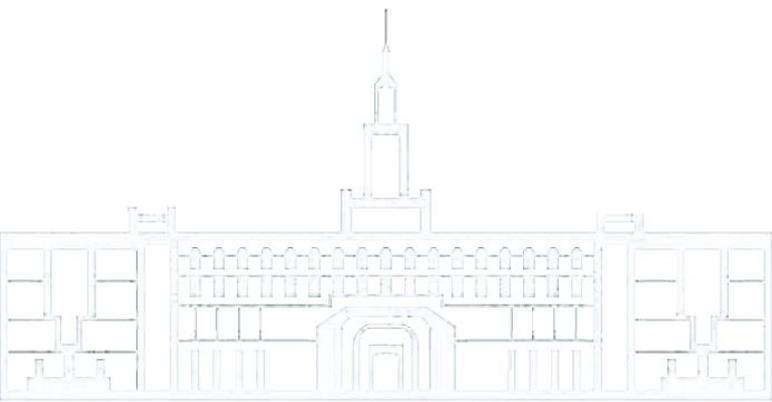
National Demonstration Center for Experimental Physics Education



单光子计数

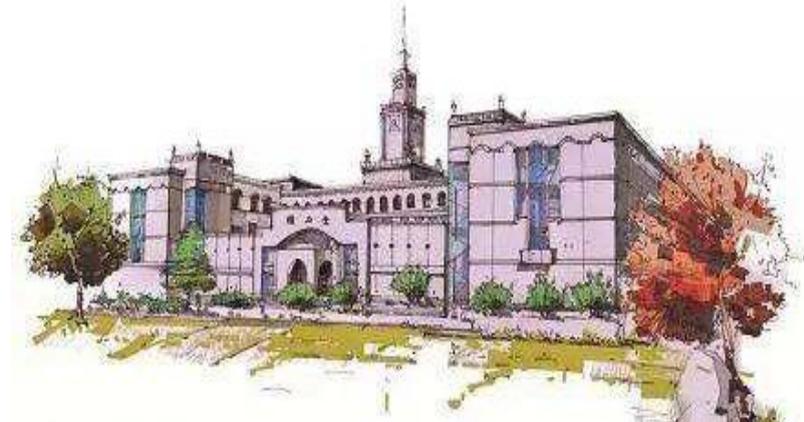
2023.9

堅守·奮斗





◀ 目 录 ▶



01

实验背景

04

实验内容

02

实验原理

05

实验问题

03

实验装置

06

注意事项

堅守·奮斗

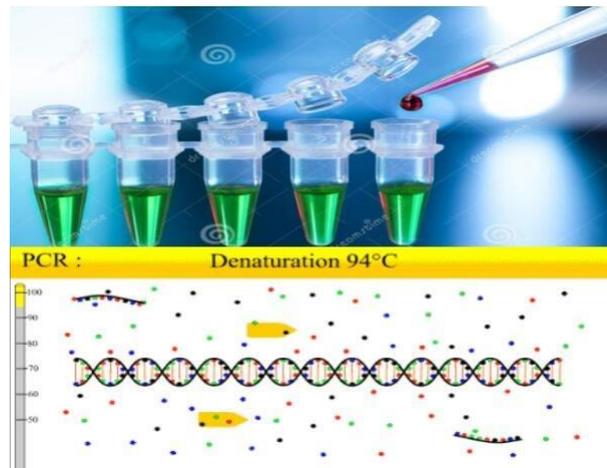


实验背景





实验背景





实验背景

微弱光检测应用

现代光测量技术已步入极微弱发光分析时代，在高分辨率的光谱测量、非破坏性物质分析、高速现象检测、精密分析、大气测污、生物发光、放射探测、高能物理、天文测光、量子密钥分发系统等领域，辐射光强度极其微弱，要求对所辐射的光子数进行计数检测。



实验背景

随着光强的减弱，光电信号会逐渐的便显出分立的脉冲特征，通过对脉冲计数，就可以实现对光流强度的检测。



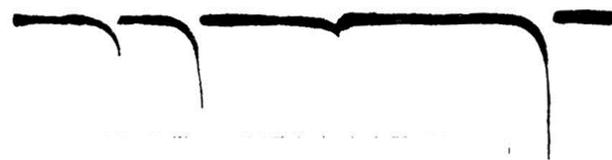
(a) 光强 10^{-13} 瓦光电速率脉冲及噪声



(b) 光强 10^{-14} 瓦光电速率脉冲及噪声



(c) 光强 10^{-15} 瓦光电速率脉冲及噪声



(d) 光强 10^{-16} 瓦光电速率脉冲及噪声



实验背景

光子计数

对于一个具有一定光强的光源，若用光电倍增管接收它的光强，如果光源的输出功率极其微弱，相当于每秒钟光源在光电倍增管接收方向发射数百个光子的程度，那么，光电倍增管输出就呈现一系列分立的尖脉冲，脉冲的平均速率与光强成正比，在一定的时间内对光脉冲计数，便可检测到光子流的强度，这种测量光强的方法称为光子计数。



实验背景

单光子计数

当光流强度小于 10^{-16}W 时通常称为弱光，此时可见光的光子流量可降到一毫秒内不到一个光子，因此实验中要完成的将是对单个光子进行检测，进而得出弱光的光流强度，这就是单光子计数。



实验背景

	光通量	光功率	检测方法		
超微弱光	10	3.3×10^{-18}	光子计 数		
	10^2	3.3×10^{-17}			
	10^3	3.3×10^{-16}			
	10^4	3.3×10^{-15}			
微弱光	10^5	3.3×10^{-14}			锁相放 大
	10^6	3.3×10^{-13}			
	10^7	3.3×10^{-12}			
	10^8	3.3×10^{-11}			
	10^9	3.3×10^{-10}			



实验原理





实验原理

光子的量子特性

光是由一束光子组成的光子流，光子静止质量为零。一个光子的能量可用下式确定

$$E = h\nu = hc / \lambda$$

光流强度常用光功率P表示，单位为W。单色光的光功率可用下式表示

$$p = R \cdot E$$

式中R为光子流量，即单位时间通过某一截面的光子数。只要测得R，就可得到P。



实验原理

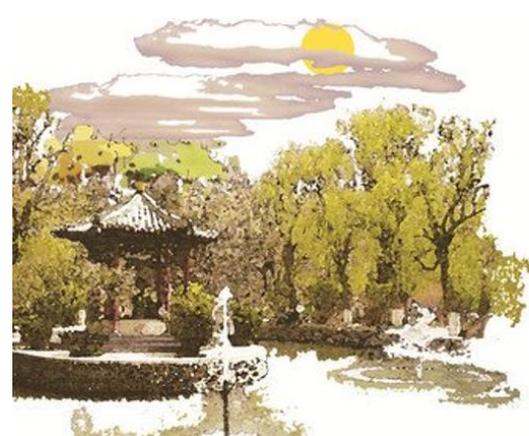
光子的量子特性

如果光源发出的是波长为500nm的近单色光，可以计算出这种光子的能量 E_p 为

$$\frac{hc}{\lambda} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \times 3.0 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{5.0 \times 10^{-7} \text{ m}} = 3.978 \times 10^{-19} \text{ J}$$

当光功率为 10^{-14} W 时，这种近单色光的光子流量为

$$R = \frac{10 \times 10^{-16} \text{ W}}{3.16 \times 10^{-19} \text{ J}} = 3.2 \times 10^2 \text{ s}^{-1}$$



自强不息
惟勤惟一

实验装置





实验装置

- 单光子计数探测技术是一种**极微弱光探测**法。
- 利用弱光照射下光电探测器输出电信号**自然离散的特点**，采用脉冲甄别技术和数字计数技术把极其微弱的信号识别并提取出来。
- 它所探测的光的光电流强度**比光电检测器本身在室温下的热噪声水平**（ 10^{-14}W ）**还要低**，用通常的直流检测方法不能把这种湮没在噪声中的信号提取出来。



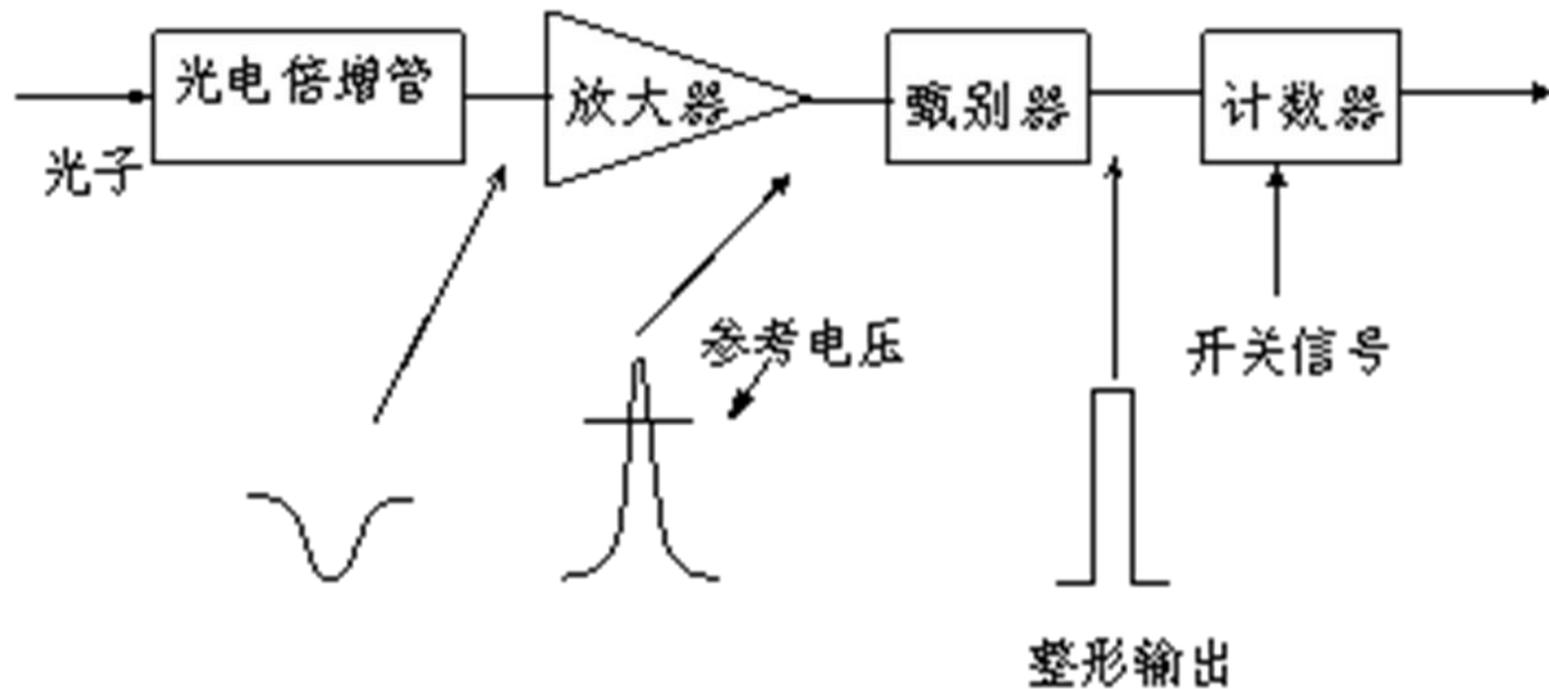
实验装置

光子计数器工作原理

当光强微弱到一定程度时，光的量子特征开始突出起来，例如He-Ne激光光源，其每个光子的能量为 $3.19 \times 10^{-19} \text{J}$ 。当光功率小于 10^{-11}W 时，相当光子的发射率为 10^8 光子数/秒，即光子的发射周期约为 10^{-8} 秒，刚好是光电倍增管（简称PMT）输出脉冲可分辨的极限宽度（即PMT响应时间）。这样，PMT的输出呈现出脉冲序列的特点，可测得一个个不重叠的光子能量脉冲。光子计数器就是利用光信号脉冲和噪声脉冲之间的差异，如幅度上的差异，通过一定的鉴别手段进行工作，从而达到提高信噪比的目的，



实验装置

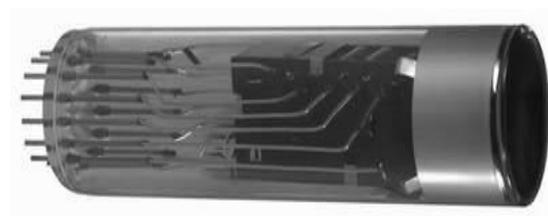
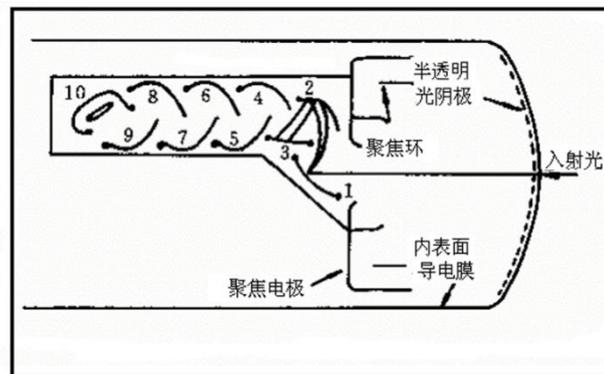




实验装置

光电倍增管 光电倍增管性能的好坏直接关系到光子计数器能否正常工作。

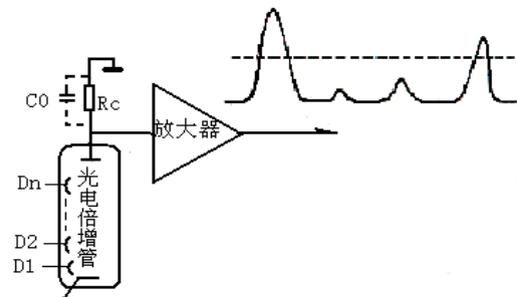
对光子计数器中所用的光电倍增管的主要要求有：光谱响应适合于所用的工作波段；暗电流要小（它决定管子的探测灵敏度）；响应速度快、后续脉冲效应小及光阴极稳定性高。





实验装置

放大器 放大器的功能是把光电倍增管阳极回路输出的光电子脉冲和其它的噪声脉冲线性放大，因而放大器的设计本着有利于光电子脉冲的形成和传输。对放大器的主要要求有：有一定的增益；上升时间 $t_r \leq 3\text{ns}$ ，即放大器的通频带宽达 100MHz ；有较宽的线性动态范围及噪声系数要低。

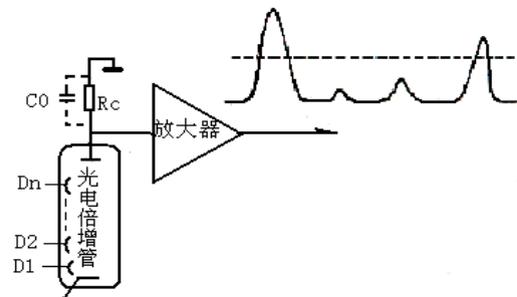


实际上由于各倍增极的倍增系数遵从泊松分布的统计规律，输出脉冲的高度也遵从泊松分布如图，一般的脉冲高度甄别器的甄别电平在几十毫伏到几伏内连续可调，所以要求放大器的增益大于**100**倍即可。



实验装置

放大器 放大器的功能是把光电倍增管阳极回路输出的光电子脉冲和其它的噪声脉冲线性放大，因而放大器的设计本着有利于光电子脉冲的形成和传输。对放大器的主要要求有：有一定的增益；上升时间 $t_r \leq 3\text{ns}$ ，即放大器的通频带宽达 100MHz ；有较宽的线性动态范围及噪声系数要低。

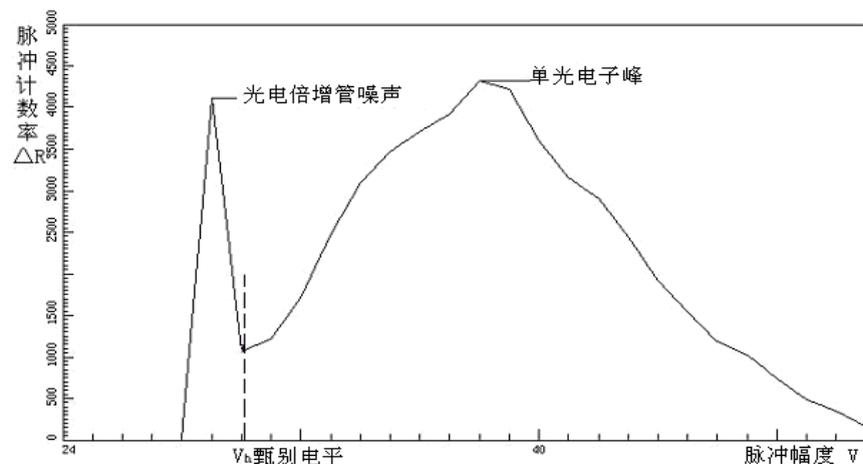


实际上由于各倍增极的倍增系数遵从泊松分布的统计规律，输出脉冲的高度也遵从泊松分布如图，一般的脉冲高度甄别器的甄别电平在几十毫伏到几伏内连续可调，所以要求放大器的增益大于**100**倍即可。



实验装置

除光电子脉冲外，还有各倍增极的热发射电子在阳极回路形成的热发射噪声脉冲。热电子受倍增的次数比光电子少，因此它们在阳极上形成的脉冲大部分幅度较低。各倍增极的倍增系数有一定的统计分布（大体上遵从泊松分布），因此，噪声脉冲及光电子脉冲的幅度也有一个分布，如图，脉冲幅度较小的主要是热发射噪声信号，而光阴极发射的电子（包括热发射电子和光电子）形成的脉冲，它的幅度大部分集中在横坐标的中部，出现“单光电子峰”。如果用脉冲幅度甄别器把幅度高于 V_h 的脉冲鉴别输出，就能实现单光子计数。

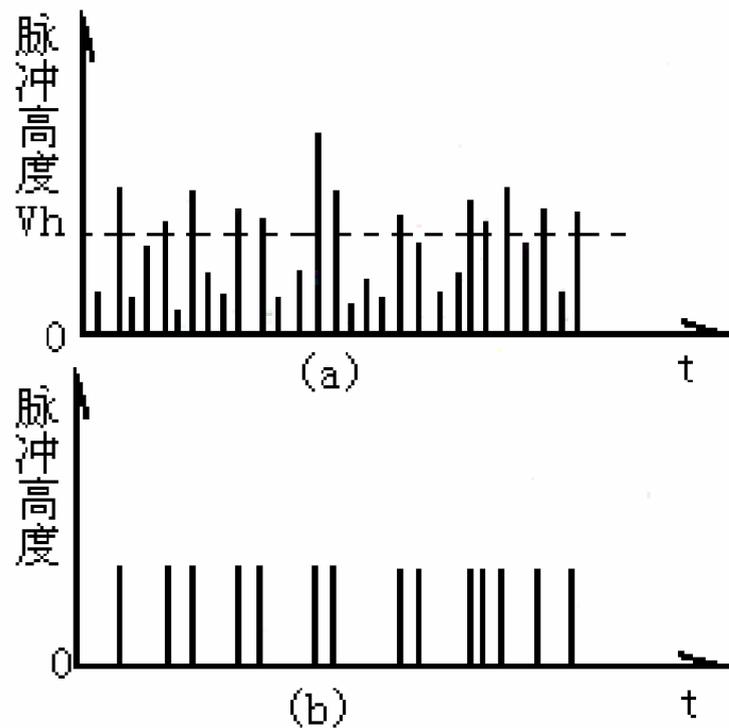


光电倍增管输出脉冲幅度分布曲线



实验装置

脉冲高度甄别器 脉冲高度甄别器的功能是鉴别输出光电子脉冲，弃除光电倍增管的热发射噪声脉冲。在甄别器内设有一个连续可调的参考电压——甄别电平 V_h 。当输出脉冲高度高于甄别电平 V_h 时，甄别器就输出一个标准脉冲；当输入脉冲高度低于 V_h 时，甄别器无输出。如果把甄别电平选在与脉冲幅度分布曲线中谷点对应的脉冲高度 V_h 上，这就弃除了大量的噪声脉冲，因对光电子脉冲影响较小，从而大大提高了信噪比。





实验装置

甄别器工作原理

甄别对象：光电子信号、热电子信号

甄别条件：电子能量

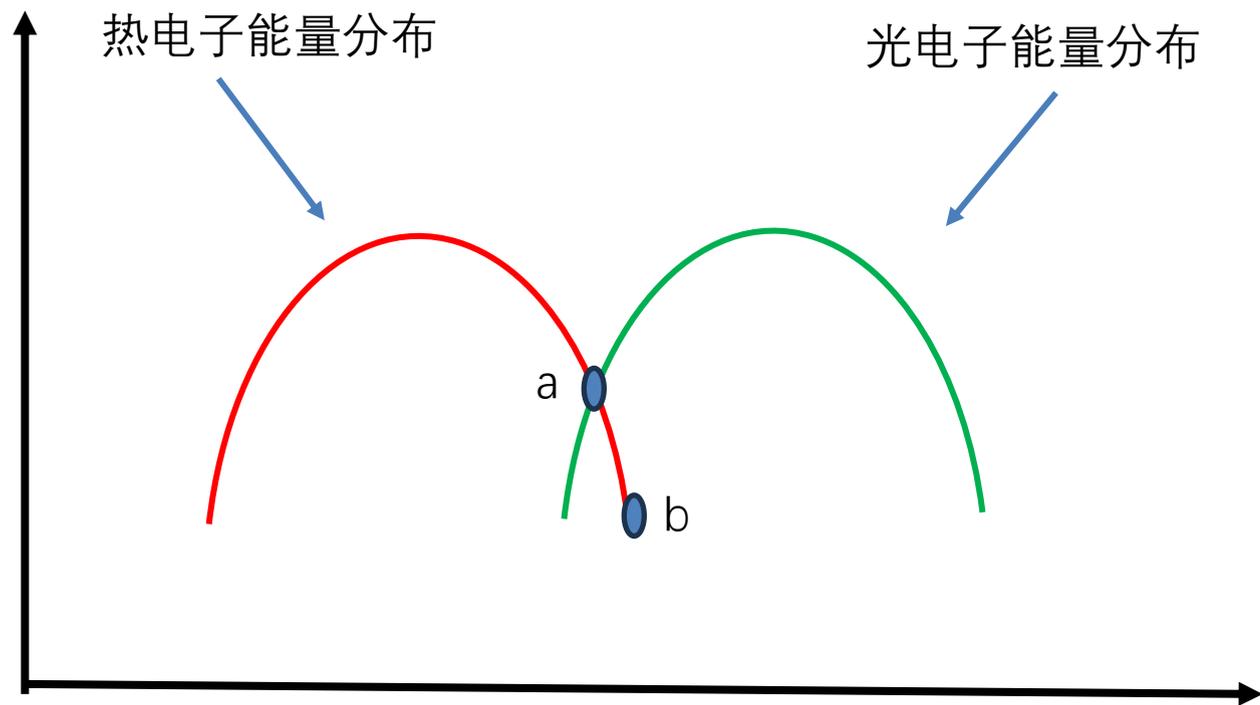
甄别方法：外加电场

甄别标准：阈值



实验装置

甄别器阈值的选取





实验装置

甄别器阈值 V 的获得

$V=0$, n =所有电子数目

$V=1$, n =能量大于1的电子数目

$V=2$, n =能量大于2的电子数目

$V=3$, n =能量大于3的电子数目

$V=4$, n =能量大于4的电子数目

→ 能量在0-1之间的电子数目

→ 能量在1-2之间的电子数目

→ 能量在2-3之间的电子数目

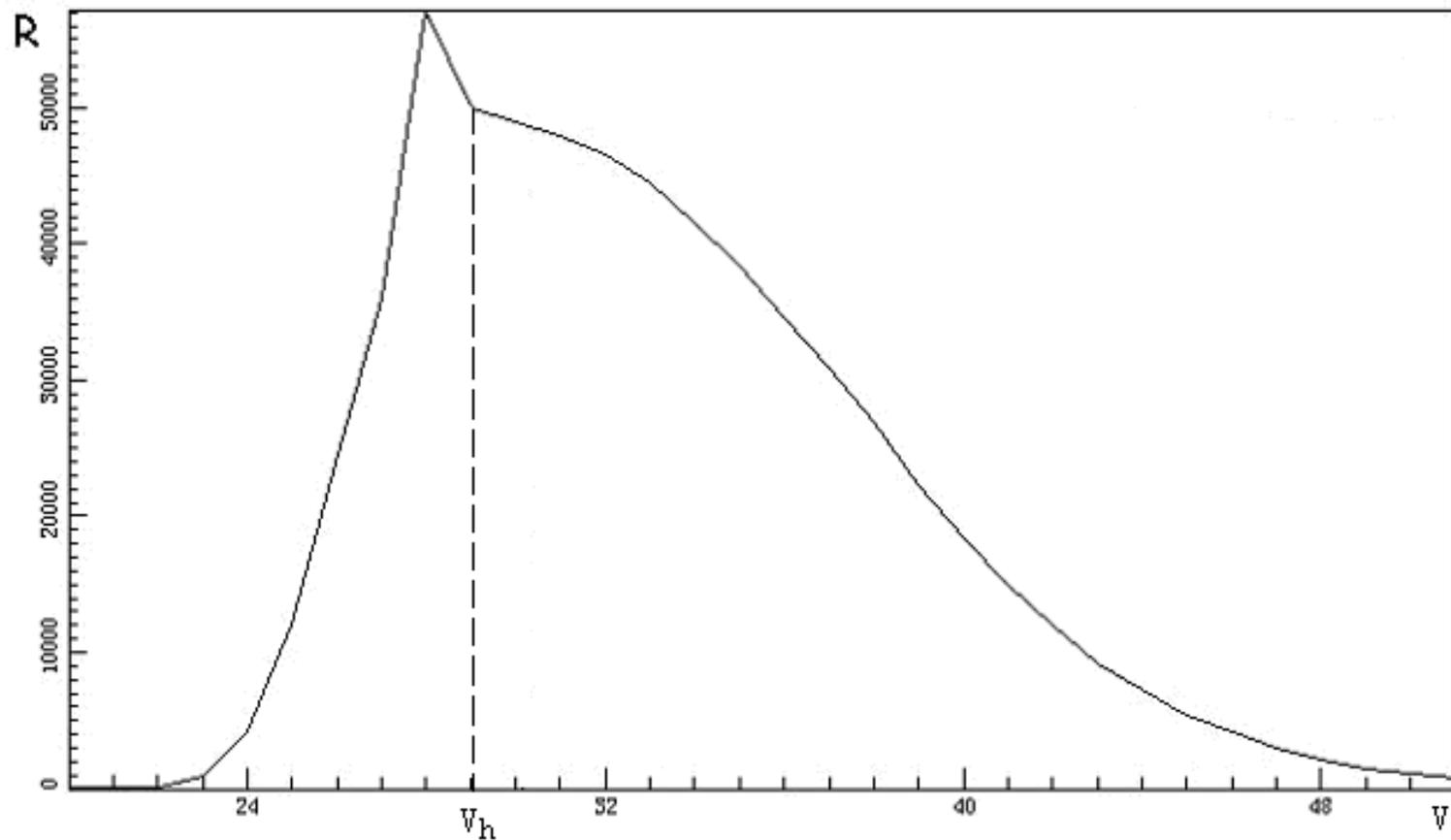
→ 能量在3-4之间的电子数目

阈值模式： 阈值扫描

获取能量分布曲线： 微分



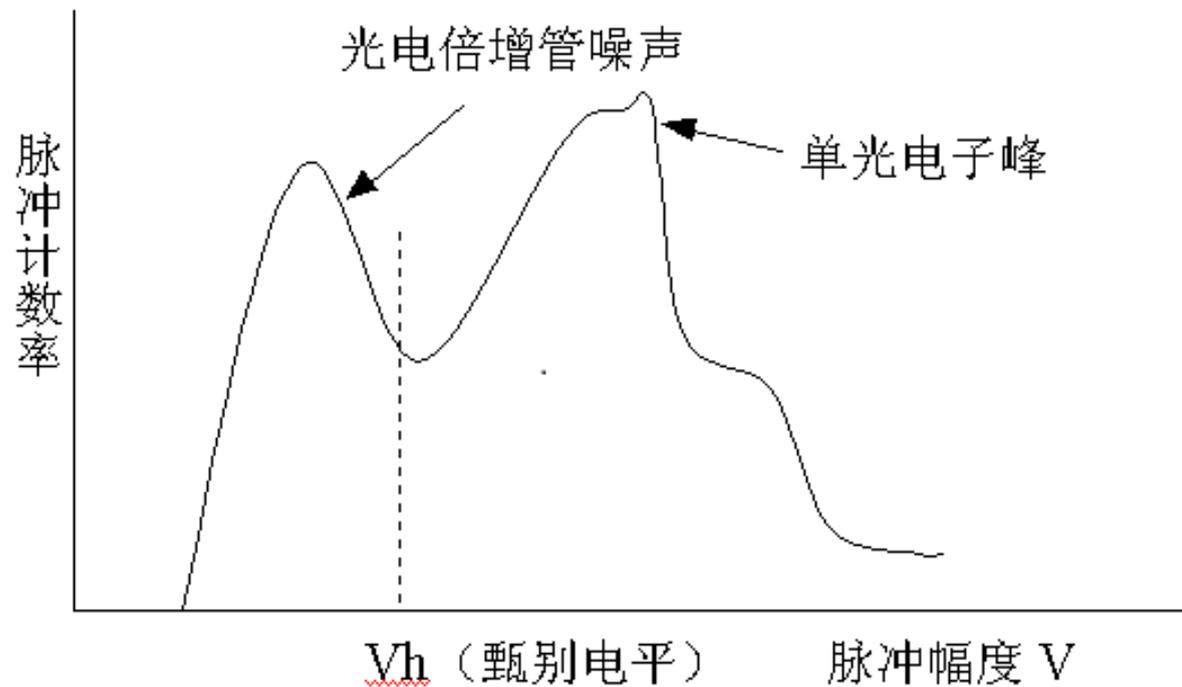
实验装置



光电倍增管脉冲积分曲线



实验装置



光电倍增管脉冲微分曲线



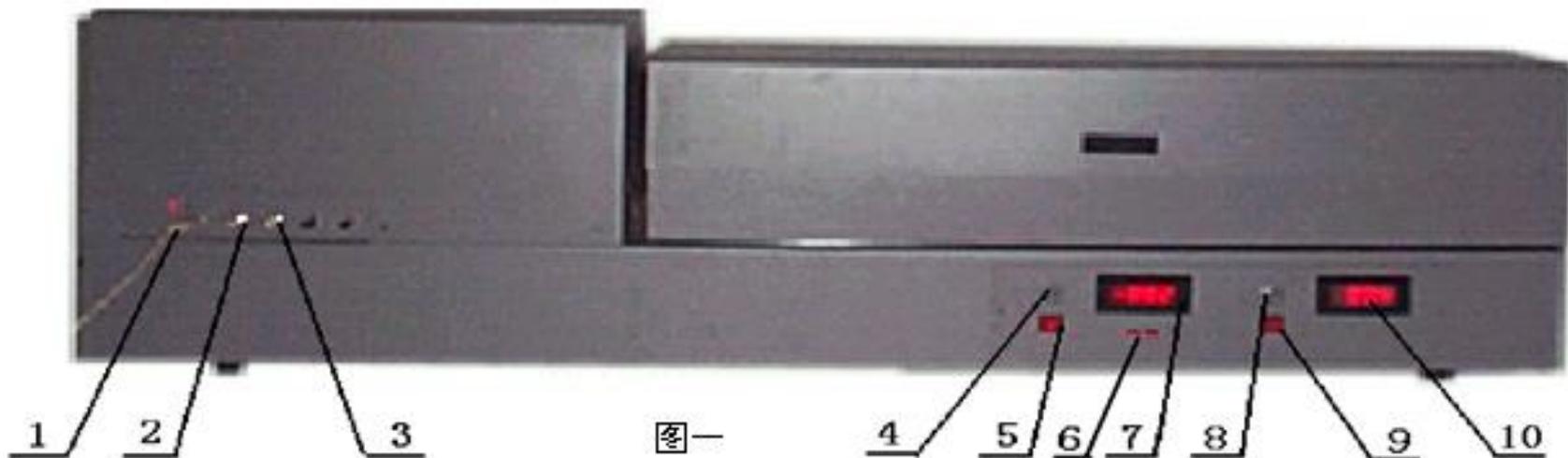
实验内容





实验内容

实验设备



图一

1 USB 接口
2 监测 2
6 量程变换

3 监测 1
7 功率指示

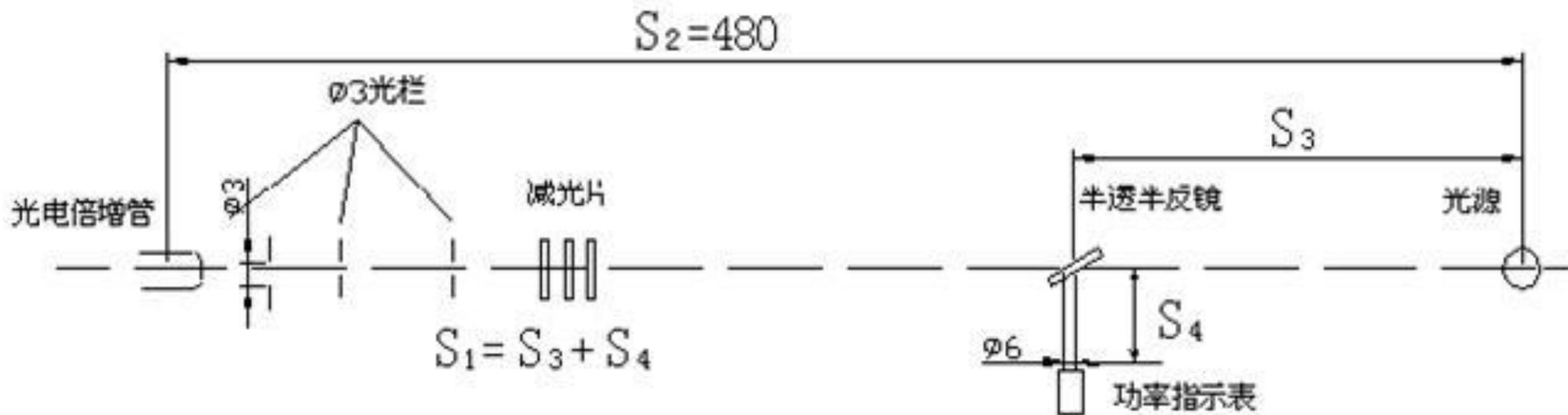
8 电流调节

4 调零钮
5 功率计电源开关
9 光源开关
10 电流指示



实验内容

实验光源





实验内容

实验步骤

1. 将冷却水管接在水龙头上并开始通水，打开光子计数器开关。两分钟后打开制冷器开关。
2. 约20分钟后，待PV显示值与SV显示相符合后，打开计算机开始采集数据。
3. 开机后，在桌面上打开“单光子计数”文件，将模式项为“阈值方式”，改变参数。然后点“开始”开始，采集数据，得到一曲线，取阈值。



实验内容

实验步骤

1. 将冷却水管接在水龙头上并开始通水，打开光子计数器开关。两分钟后打开制冷器开关。
2. 约20分钟后，待PV显示值与SV显示相符合后，打开计算机开始采集数据。
3. 开机后，在桌面上打开“单光子计数”文件，将模式项为“阈值方式”，改变参数。然后点“开始”开始，采集数据，得到一曲线，取阈值。



实验内容

实验步骤

7. 改变设定温度SV，再重复实验，看信噪比与温度有何关系。
8. 实验结束后，关闭单光子计数器及制冷器开关，关闭计算机与光源电源。2分钟后再关闭水源。



实验问题





实验问题

1. 如何处理比阈值大的那一部分噪声?
2. 温度升高会对阈值有什么影响?
3. 增大光的功率会对阈值有什么影响?



注意事项





注意事项

- 1、 在开制冷器前，一定先通冷却水。关闭制冷器后才能切断水源，否则将发生严重事故。
- 2、 保存曲线时，若想将不同曲线比较，应将这些曲线存在不同寄存器中，否则不能同时打开。
- 3、 测量时，不可打开光路的上盖。以避免杂散光的影响。

【注意】 仪器通电后，在开灯情况下，绝不能打开仪器上盖，旋下减光筒上的“窄带滤光片”和“衰减滤光片”，以免进入强光损坏光电倍增管。



参考资料

1. 黄润生, 沙振舜, 唐涛等 《近代物理实验》 南京大学出版社
2. 赵远 张宇 《光电信号检测原理与技术》 机械工业出版社
3. 天津市港东科技发展有限公司 单光子计数实验系统使用说明书