

光电技术(16)

四、光电倍增管的工作电路

工作电路如图80，各分压电阻的大小决定了相邻两倍增级间的电势差，即加速电压。由于后级的电流越来越大，所以引起流过电阻的电流波动大，进而大的电压波动。因此在后级分压电阻上并联旁路电容，以减小电阻上的电流波动。[PMT产品数据](#)

五、通道式光电倍增管

通道式光电倍增管是六十年代研制成功的一种连续式倍增管，简称CEM

1、CEM的结构和工作原理

如图所示为CEM，管内壁涂 $10^9\Omega$ 的导电层，并具有 $\delta > 3$ 的二次发射系数。电子从低电压端入射到管壁产生二次电子，在均匀电场的

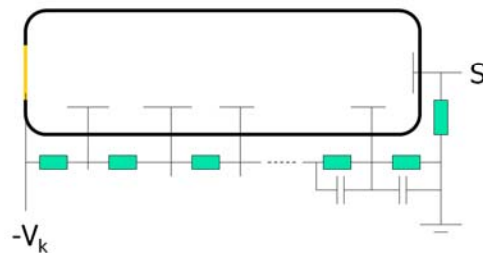


Fig.80 光电倍增管工作电路

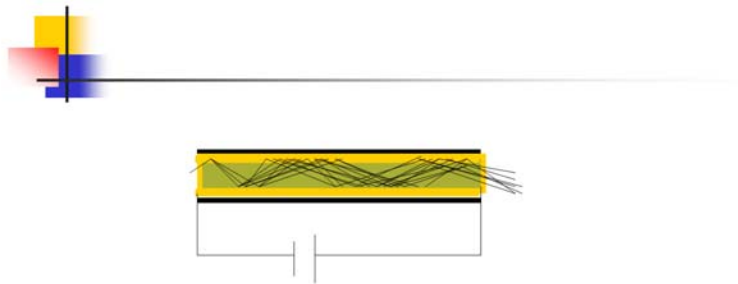


Fig.81 通道式光电倍增管



光电子技术(16)

加速下，电子与管内壁多次碰撞，产生倍增电子，在高压端输出，可达到 10^8 的增益。

CEM的增益可表示为：
$$G = \left(\frac{AV}{2\alpha V_0^{0.5}} \right)^{\frac{4V_0\alpha^2}{V}}$$

式中A为二次发射体的物质常数，一般为0.2-0.25， V_0 为垂直管壁方向的二次电子的平均发射电位，约为1-2V， $\alpha=L/d$ 为CEM的长度、直径比，V为加速电压。

CEM的增益饱和效应：当输出脉冲电子数约为 3×10^8 个时，增益就趋于饱和。引起饱和的物理原因是输出端的负空间电荷场排斥来自管壁的二次电子，不能获得足够的动能再次碰撞管壁产生二次电子。当 $\alpha=L/d > 60$ 时，饱和输出电流约为管壁传导电流的1/10，小于微安量级。



光电子技术(16)

2、微通道板（MCP）式光电倍增器

MCP倍增器是由多根**CEM**并在一起形成的二维倍增器件。每平方厘米中就有多于 10^5 根**CEM**，所以，分辨率很高，主要用于微弱图象的亮度增强。

MCP的图象编码与解码

如果并**CEM**时，每根**CEM**的出入位置不相同对应，而是随机对应，则**MCP**的输出图象就是混乱的，即图象编码。要恢复原始图象，可使用另一个排列完全一样的**MCP**，但反向使用，即出入口颠倒，则可恢复图象，实现图象解码。

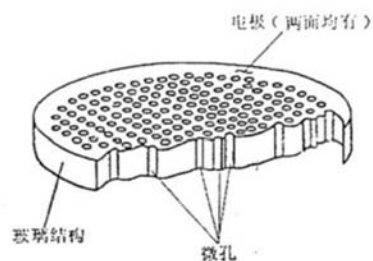
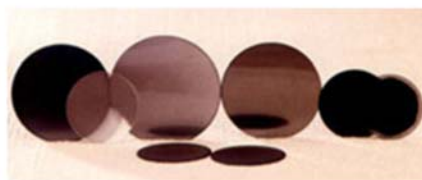


Fig.81a MCP结构原理图

微通道板的实体图如下



光电子技术(16)

§ 4.4 光电导探测器

一、光电导探测器的结构与原理

光电导探测器的结构很简单，就是一块半导体。

光电导探测器的原理与前面的真空光电探测器不同，真空光电探测器基于外光电效应，即光电子发射。而光电导探测器基于内光电效应，即电子从价带激发到导带，使光电导的电导率发生变化，即光敏电阻

如图所示为一块半导体光电导，其长、宽和高尺寸分别为L、W和D。被光子能量大于禁带宽度 E_g 的光子照射，每秒钟激发的电子-空穴对为：

$$I_0 WL \eta / h \nu$$

η 为量子转换效率， ν 为光子频率， I_0 为光强。

光电子技术(16)

单位体积载流子的激发率为：
$$\gamma_g = \frac{I_0 WL \eta / h \nu}{WLD} = \frac{\eta I_0}{D h \nu}$$

电子-空穴的复合率为：
$$\gamma_c = \frac{\Delta n}{\tau_c} = \frac{\Delta p}{\tau_c}$$

式中 $\Delta n = \Delta p$ ，为光生电子和空穴的平衡浓度， τ_c 为少数载流子的寿命在平衡状态， $\gamma_g = \gamma_c$ ，即：

$$\Delta n = \Delta p = \tau_c \gamma_g = \frac{\eta I_0 \tau_c}{D h \nu}$$

因为电导率：
$$\sigma = ne\mu_e + pe\mu_h$$

所以，光电导的电导率变化为：

$$\Delta \sigma = \Delta ne\mu_e + \Delta pe\mu_h = \tau_c \gamma_g e (\mu_e + \mu_h)$$

光电子技术(16)

式中 μ_e 和 μ_h 分别为电子和空穴的迁移率，单位为 $\text{m}^2/\text{s/V}$ 。

两极间加电压 V 时，产生的光电流为：

$$\begin{aligned}\Delta i &= WD\Delta\sigma E = WD\Delta\sigma \frac{V}{L} = \frac{WD}{L} \tau_c e \gamma_g (\mu_e + \mu_h) V \\ &= I_0 \frac{\eta W}{h\nu L} \tau_c e (\mu_e + \mu_h) V\end{aligned}$$

二、光电导增益

光电导增益定义为单位时间内流出光电导的电子数与产生的电子-空穴对数目之比，即

光电子技术(16)

$$G = \frac{\Delta i}{e} \frac{1}{\gamma_g WLD} = \frac{\tau_c (\mu_e + \mu_h) V}{L^2} = \frac{\tau_c (\mu_e + \mu_h) E}{L}$$

上式表明 G 正比于电场强度和少数载流子的寿命，反比于光电导的长度。 G 可以大于1。

光电导增益原理：起源于“电荷放大”效应，半导体中的杂质能级（位于禁带中）会捕获少数载流子，如N型（P型）光电导的空穴（电子）会被杂质能级捕获，使光电导带正电（负电），而吸引负极（正极）的电子（空穴）进入光电导，在电场作用下漂移到正极（负极），这就相当于增加了电子（空穴）的产生率。



光电子技术(16)

三、光电导探测器特性

1、光谱光电灵敏度

单位光功率产生的光电流随光波长的变化关系，用 $S(\lambda)$ 表示，典型的光电灵敏度光谱如图

2、噪声

光电导探测器的噪声主要有三类：热噪声、产生-复合噪声、散粒噪声。

热噪声起源于电子空穴的热激发，通过降低温度可以减小热噪声。



光电子技术(16)

产生-复合噪声引起的电流波动的均方根值为：

$$\Delta i_{n(g-c)} = \left(\frac{4ieG\Delta f}{1 + 4\pi^2 f^2 \tau_c^2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

散粒噪声又称 $1/f$ 噪声，存在于大多数半导体器件中，可能起源于电子的漂移速率的涨落，散粒噪声电流的均方根值为：

$$\Delta i_n = i \left(B \frac{\Delta f}{f} \right)^{\frac{1}{2}}$$

四、常见光电导材料

1、CdS和CdSe

低成本可见光光电导材料。光电导增益 $G=10^3-10^4$ ，响应时间较长，工作波段在紫、蓝、绿短波区。



光电子技术(16)

2、PbS

近红外灵敏光电导材料，光谱范围在1-3.4 μm ，2 μm 处最灵敏。响应时间约200 μs 。

3、InSb

近红外灵敏光电导材料，响应峰波长约5 μm 。热噪声较大。

4、碲镉汞 ($\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$)

中红外灵敏光电导，峰值波长10 μm 左右，通过调节Hg和Cd的相对比例可以改变禁带宽度，从而改变灵敏波长。通常需要制冷，热噪声大。



光电子技术(16)

§ 4.5 结型光电探测器

结型光电探测器是基于p-n结的一类探测器

一、光电池原理

光电池就是一个p-n结，它基于光生伏特效应。

问题:一个平衡p-n结两端存在电势差，用导线将两端连接，回路中会有电流流动吗？

如图所示，尽管p-n结两端存在电势，但用导线连接后，回路中无电流，因为，金属连线与p端和n连接也会产生接触电势差，结果总回路电势差等于零。

问题:光照时回路中会有光电流吗？

光电子技术(16)

如图所示, p-n结耗尽层受到光照后, 产生电子空穴对, 在内建电场的作用下, 电子漂向n端, 而空穴漂向p端, 结果n端电势降低, p端电势升高, 即p-n产生附加光生电势差, 记为 ΔE 。P端为光生电动势的正极。

光电池可以等效为恒电流源与反向二极管并联, 如图, 其伏安特性为:

$$I = I_d - I_\phi = I_s(e^{\frac{qV}{kT}} - 1) - I_\phi$$

式中 I_s 为二极管的反向饱和电流。

开路电压为:

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_\phi}{I_s} + 1\right)$$

1、硅光电池

(1) 单晶硅光电池: 转换效率通常在10%左右, 高的可达15-20%, 价格较贵。

光电子技术(16)

(2) 多晶硅薄膜型光电池: 价格便宜, 转换效率4-7%, 制造容易, 可制成大面积的光电池。

2、光电池的主要特性

(1) 光照特性

指光电池的光生电动势或光电流与光照度的关系。光生电流与光照度成线性关系, 而光生电动势与光照度成非线性关系。

(2) 光电转换效率

指光电池的最大输出功率与输入辐射功率的比值, 即 $\eta = \frac{P_{omax}}{P_m}$

3、光谱响应特性

指相同照度下, 光电池的短路电流随光波长变化关系。

光电子技术(16)

4、频率特性

频率特性指光电池对不同重复频率的光脉冲的响应特性。由于光电池的结面积大，所以结电容大，频率响应慢。硅光电池的截止频率最高达10-30kHz，减小负载电阻可改善频率特性。

5、光电池的探测应用

指用光电池作为光探测器，由于光电池的输出功率很弱，不能直接带负载进行检测，所以光电池的输信号通常要通过功率放大电路放大。常用放大电路如图88。

6、太阳能电源装置

由于单片光电池的的输出电流很微弱，不能直接做电源应用。通常是将很多光电池通过串、并联组成光电池组，并与蓄电池组装在一

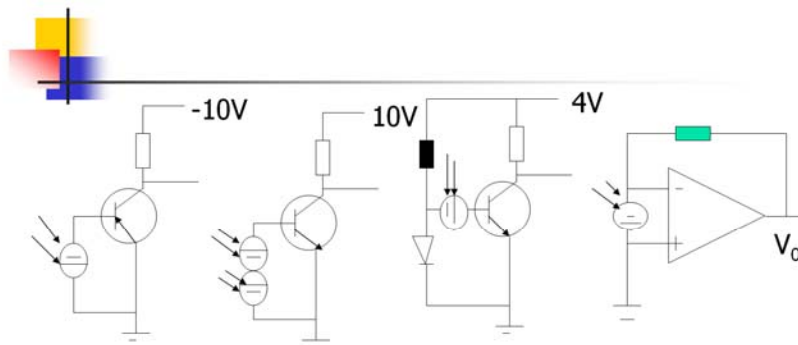


Fig.88 光电池探测器基本电路



复习要点

- 1、通道是光电倍增管的结构、工作原理，增益饱和效应？
- 2、MCP的结构，MCP图象加秘、解密器原理？
- 3、光电导探测的原理，增益效应，特性参数，常见光电导材料？
- 4、光电池结构、工作原理，等效模型，特性参数，工作电路？
- 5、单晶硅、多晶硅光电池的典型转换效率？



作业十六

- 1、光电导探测器的光探测原理，增益原理？
- 2、光电池的结构和光探测原理？