

TI 模拟电路应用专栏竞赛

精密光电检测电路设计方案

Design a Precision Photo Detection Circuit

中科院上海技术物理所 李晓坤

摘要: 针对大面积探测器,采用低噪声精密 Difet 运放 OPA128 和超低噪声精密 OPA27,设计了前置放大器,以实现微弱光电流信号检测,给出后端屏蔽、滤波器设计以及信号处理的基本方法。

关键词: 光电检测;信噪比;高阻抗;精密运放;稳定性

引言

高阻抗探测器主要有:光电二极管、湿度传感器、pH 传感器、化学传感器、烟雾传感器等,在现实生活中具有广泛的应用。

光电二极管及其相关的前置放大器是基本物理量和电子量之间的桥梁;光检测电路广泛应用于 CT 扫描仪、血液分析仪、烟雾检测器、位置传感器、红外高温计、光纤 pH 探测仪和色谱分析仪等系统中。

由于是微弱光电流信号检测,所要求检测的光电流一般在 nA 级以下,这就要求放大器具有优异的高阻性能

和较低的噪声,TI公司的低噪声精密 Difet 系列精密运放,符合以上要求,是专门为高阻应用定制的放大器。

采用高阻抗反馈电阻实现高的光电流—电压转换,容易产生自激,这就要求分析系统稳定性、噪声特性以及提高稳定性和减小噪声的方法。

设计光电检测前置放大器主要考虑以下因素:

硅光电二极管探测器选择

集成精密运放的选择

RC反馈网络设计

硅光电探测器

探测器的选择:硅光电二极管的光谱响应从可见光一直延伸到 1100nm,由于光电二极管的绝对响应率比较低,材料绝对响应率 0.5A/W,大面积的硅光电探测器制备比较容易,可以利用大面积的探测器提高探测器响应率,这样会降低暗电阻,增加结电容。

探测器 SPICE 模型:在光电二极管工作模型图中,它由一个被辐射光激发的电流源、理想的二极管、结电容和寄生的串联及并联电阻组成(见图 1)。

结电容 C_{pd} :是由光电二极管的 P 型和 N 型材料之间的耗尽层宽度产生的。耗尽层窄,结电容的值大。相反,较宽的耗尽层(如 PIN 光电二极管)会表现出较宽的频谱响应。硅二极管结电容的数值范围大约从 3pF 到几千 pF 以上。

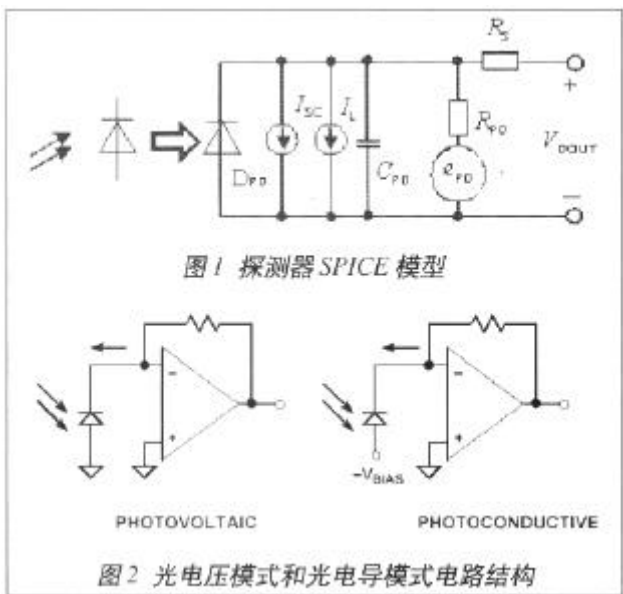


表1 光电导模式和光电流模式比较

| 特性 | 光电导模式 | 光电压模式 |
|------|---------------------|----------------------|
| 偏置 | 需要外加反向偏置电压 | 探测器处于零偏置状态下 |
| 暗电流 | 存在暗电流 I_{dark} | 不存在暗电流 I_{dark} 影响 |
| 线性度 | 非线性 | 线性 |
| 噪声 | 较高的噪声(Johnson+Shot) | 较低的噪声(Johnson) |
| 应用情况 | 通常在高速场合,例如光纤通信中 | 通常在比较精确的场合使用,例如光功率计中 |

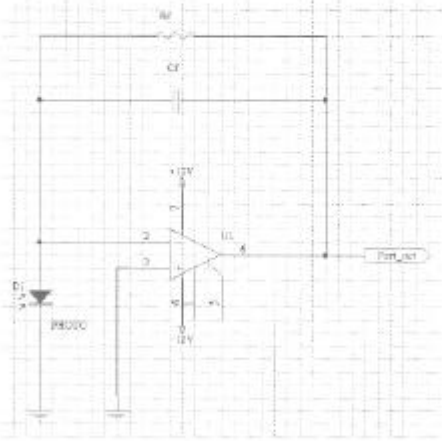


图3 光电压模式光电流测量电路图

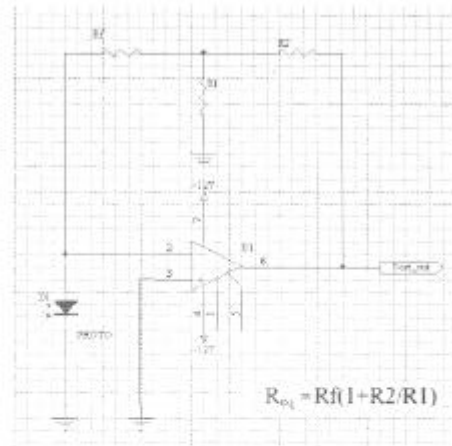


图4 T型反馈网络

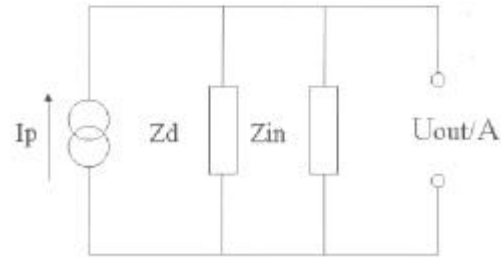


图5 等效电路

寄生电阻 R_{pd} ：该电阻与光电二极管零偏或正偏有关。在室温下，该电阻的典型值可超过 $100M\Omega$ ，是主要的噪声源，这种噪声在图中表示为 e_{pd} 。 R_{pd} 产生的噪声称作散粒噪声(热噪声)，是由于载流子热运动产生的。

寄生电阻 R_s ：其典型值 $10\Omega \sim 1000\Omega$ 。由于此电阻值很小，它仅对电路的频率响应有影响。

硅光电二极管光电探测电路

硅光电二极管光电探测电路有两种结构(见图2) 这两种电路结构的比较示于表1。

通过以上比较，可以看出：进行精密测量时应该采用光电压模式，在光电通信等快速应用中应该使用光电导模式。

前置放大器电路设计和器件选择

光电压模式电路设计

为了达到光灵敏度及其线性度，探测器工作在光电压模式下，探测器零偏，光电二极管被应用到了极至，处于最灵敏的状态，反馈电阻 R_f 和电容构成了一个一阶低

通滤波电路，这种电路适合用于比较慢速的精密测量领域。影响电路性能的关键是 C_f 和 R_f ，它们会影响光检测电路的频率稳定性和噪声性能。-3dB带宽为：

$$f_{-3dB} = 1 / (2\pi R_f C_f)$$

系统信噪比的计算

$$SNR = \frac{R_0 \cdot P_0}{\sqrt{4k \cdot T \cdot \frac{B}{R_f}}}$$

式中 R_0 为探测器响应率， P_0 为入射光功率， k 为 Boltzmann 常数， B 为噪声带宽， T 为绝对温度。

系统信噪比由反馈电阻 R_f 决定，根据不同的应用 R_f 的数值可以从几十 $k\Omega$ 到几百 $M\Omega$ ，如果系统需要也可以到几十 G ，乃至更高的反馈电阻，电路容易产生自激，这就给电路的稳定带来了严重问题。

很多情况采用 T 型网络构成反馈电阻，如图 4，通过对 T 型网络的分析可以看出： $R_{eq} = R_f (1 + R_2 / R_1)$ ，利用三个阻值较小的电阻就获得较大的反馈电阻，但是系统信噪比是由 T 型网络左臂电阻 R_1 决定，T 型网络实质是放

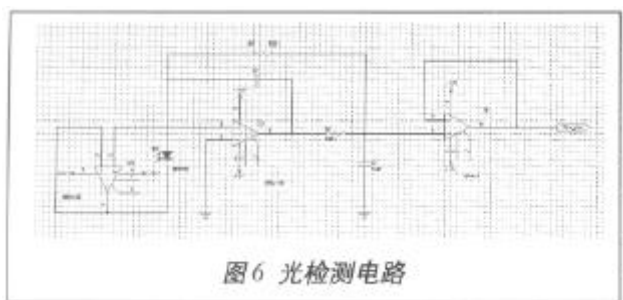


图6 光检测电路

大,而没有改善系统信噪比,失调电压在这里也会被放大,在实际应用中应该注意。

等效电路分析

为了改善电路的性能,可以画出光电电压模式下电流-电压转换的等效电路图(见图5)。

由于 $Z_{in} \ll Z_d$, 几乎所有光电流都流过 Z_{in} 产生光电电压,如果使用大面积的探测器或者其它情况, Z_d 下降,则情况相反;利用电压跟随器提升虚拟阻抗是比较好的办法。

改善后的光电检测电路

图3复阻抗采用大电阻并联小电容构成一阶低通滤波器,小电容的作用是限制带宽,抑制尖峰。图6在电路中增加一个电阻R1和一个电容C1,使反馈回路中多一个极点,降低了系统噪声, $R_f \gg R_1$ 。-3dB带宽 $f_{-3dB} = 1 / [2\pi(R_f C_f R_1 C_1)^{1/2}]$ 。

如果取 $C_f R_f = 2R_1 C_1$, 则图3和图6电路系统带宽不变。

器件选择

精密应用情况下要求放大器具有很低的噪声以及良好的高阻性能, TI公司的超低输入偏置电流(<75fA) Difet系列运放,输入级采用介质隔离场效应管(常规场效应管常采用PN结隔离工艺),并且改进输入晶体的几何图形,使之具有极低的输入偏置电流,具备优异的高阻性能。本例中采用二个OPA128,其主要性指标如下:

输入偏置电流 <75fA;输入失调电压 $< \pm 500\mu V$;差模输入阻抗 $10^{-13} // 1pF$;共模输入阻抗 $10^{-15} // 2pF$;开环电压增益 >110dB。

采用OPA27超低噪声精密运算放大器,构成电压跟随器,隔离前放和后端电路。电容可以采用瓷片电容器。

其它需要考虑的因素

屏蔽

由于电路中使用高阻元件,输入端要采用屏蔽环, OPA128采用T099金属壳封装,引脚8接放大器封装金属壳,所以8引脚要接地。防止电路板上电源线对反馈环路和输入端漏电,产生噪声或漂移。整个电路应该采用金属壳屏蔽,外壳接地。电路板采用玻璃环氧,输入端引线应该尽可能短,应该采用聚四氟乙烯高绝缘导线,如果需要可以将放大器装配在绝缘子上(聚四氟乙烯制成)。

滤波器设计

为了限制信号带宽,去除高频噪声,可以增加滤波器。要求滤波器能够达到的边缘下降-12dB/octave,如果采用-6dB/octave不能对噪声起到有效的衰减,只能对噪声进行“染色”或者把噪声转换为白噪声,更高阶的滤波器对噪声没有更明显的衰减,-12dB/octave能够满足系统需求。

信号处理方法

在比较慢速的测量中,通过增加测量次数或测量时间可以提取噪声中的信号。在信号出现的周期内,将时间分成若干片断,时间间隔的大小取决于恢复信号的精度,然后对信号进行多次测量和平均,由于信号的测量是n次测量线性积累的结果,随机噪声遵从统计规律,增加n/2倍。经过n次累积之后输出信噪比为:

$$\left(\frac{V_s}{V_N}\right)_{out} = n^{1/2} \left(\frac{V_s}{V_N}\right)_{in}$$

信噪比增加了 $n^{1/2}$ 。

结语

本文利用OPA128构建了硅光电二极管前置放大电路,给出屏蔽、滤波器设计和信号处理的方法。由于光电检测电路具有广泛的应用,实际中应该根据具体应用选择反馈电阻,设计RC反馈网络,实现低噪声和电路稳定性。

参考文献:

1. jános P.Makai, józsef J.Makai, János Balázs: noise characteristics of bootstrapped photovoltaic and photoconductive detectors, SPIE 3794