

文章编号: 1672-8785(2010)03-0006-05

HgCdTe 光导探测器的一种恒流偏置 低噪声放大电路的设计

李大宇 代作晓 魏焕东

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘 要: 在多元光导探测器的工程应用中, 串音是影响系统性能的一个重要因素。其中, 由公共地线电阻引入的电子学串音可以通过提高偏置电阻来抑制。本文从 HgCdTe 光导探测器的工作特性出发, 设计了等效内阻很高的恒流偏置低噪声前置放大电路。对电路的工作原理和噪声性能进行了分析和讨论, 给出了电路的噪声模型, 导出了电路的等效输入噪声表达式, 并进行了电路实现和低噪声性能测试。

关键词: 光导探测器; 前置放大; 低噪声; 恒流偏置

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2010.03.002

Design of a Low Noise Preamplifier with Constant Current Bias Circuit for HgCdTe Photoconductive Detector

LI Da-yu, DAI Zuo-xiao, WEI Huan-dong

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: The crosstalk in a multi-element photoconductor is one of the factors which have influences on the performance of a system. The electronic crosstalk caused by ground resistance can be reduced by increasing bias resistance. According to the characteristics of a HgCdTe photoconductive detector, a preamplifier with a constant current bias circuit is designed. The operation principle and noise of the circuit are analyzed. The noise model of the circuit is given. An expression for its equivalent input noise is derived. Finally, the circuit is implemented and its noise performance is tested.

Key words: photoconductive detector; preamplifier; low noise; constant current bias

1 引言

随着红外技术的发展, 为了改善红外系统的作用距离和响应速度, 扩大其视场和简化其光机扫描结构, 越来越多的人开始使用多元红外探测器^[1]。在多元 HgCdTe 光导探测器的应用中, 串音是一个重要的参数。其中, 由探测元间的接地电阻引起的电串音可以通过提高偏置电阻来抑制^[2,3]。在实际应用中, 电路的工作电压通常

有限, 使用限流电阻的探测器偏置电路在某些应用中只能取较小的阻值, 无法满足抑制电串音的要求。本文设计了一种 HgCdTe 光导探测器的晶体管恒流偏置放大电路, 其偏置源的内阻在几百 kΩ 以上。该电路结构简单, 可以用于多元 HgCdTe 光导探测器的信号获取, 并可以抑制由较大的接地电阻引起的电串音。此外, 在红外系统中, 红外探测器输出的电信号非常微弱, 一

收稿日期: 2009-12-15

基金项目: 国家 863 计划 (2007AA12Z179)

作者简介: 李大宇 (1981-), 男, 满族, 辽宁辽阳人, 博士研究生, 研究方向为信息获取技术研究。E-mail: lidayu@ustc.edu

般仅为微伏数量级, 因此信号放大电路还必须达到低噪声和高增益的要求。

2 电路设计方案

2.1 光导探测器的工作原理

当半导体材料吸收入射光子后, 半导体内的有些电子和空穴会从原来不导电的束缚状态转变到能导电的自由状态, 从而使半导体的电导率增加, 这种现象称为光电导效应。利用光电导效应制作的光探测器称为光电导探测器。光电导探测器在外加电压作用下, 将在输出电路中产生光电流或光电压。

2.2 偏置电路的设计

光导探测器必须工作在外加偏置状态, 而偏置电路的形式对探测器的性能又有很大影响。通常, 偏置电路引入的噪声必须远低于探测器本身的噪声。

光导探测器的直流偏置如图 1 所示。图中的 I_B 为直流偏置电流, R_d 为探测器的暗电阻。信号 V_s 被从 A 点取出, 然后被送到前置放大器。

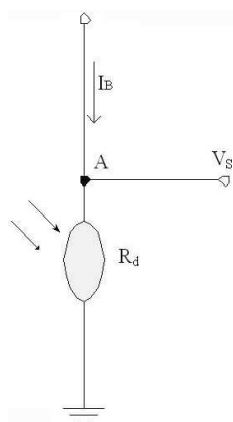


图 1 光导探测器的偏置电路

2.2.1 偏置电流的选择

光电导探测器输出信号的噪声电压和信噪比随偏置电流变化而变化。随着偏置电流的增大, 一方面, 从探测器取出的信号会增大, 另一方面, 探测器输出的噪声也会增大。当偏置电流增大到一定程度时, 探测器因消耗电功率而产生的热量会使暗阻减小, 从而导致输出信号的上升

速率随偏流的增大而降低。同时, 探测器的过剩噪声也会很快增大。因此, 探测器输出的信噪比随偏置电流从小到大有一个先上升后下降的变化过程。光电导探测器有一个最佳偏置范围, 在此偏置范围内, 探测器输出的信噪比较高。

2.2.2 恒流源偏置电路

图 2 中的电阻 R_E 和 PNP 晶体管 T 构成了标准晶体管电流源电路, 这个电路中的散粒噪声完全被负反馈消除了^[4], 因此该电路可以作为低噪声偏置源, 为探测器提供偏置电流。当该电路利用晶体管在线性区工作时, 集电极和射极的交流等效电阻很大, 其近似恒流的特性可实现恒流偏置, 适用于探测器暗电阻较小的情况。令图 2 中的 $V_{CC} - V_B > 0.7V$, 则有:

$$I_C \approx I_E = (V_{CC} - V_B - 0.7V)/R_E \quad (1)$$

式中, I_C 为集电极电流, 即偏置电流源的输出电流, I_E 为射极电流。从式 (1) 可知, 只要晶体管不处于饱和状态, I_C 就与集电极电压无关^[5]。

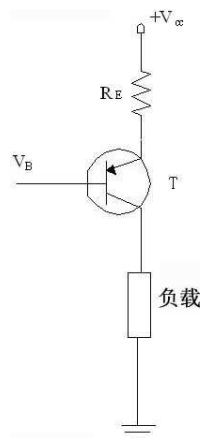


图 2 晶体管的电流源电路

2.3 前置放大器

红外光电导探测器的输出信号一般是很微弱的, 因此若要有效地使用这种信号, 就必须加前置放大以及后续放大电路。前置放大电路对探测器性能的充分发挥非常重要。在设计前置放大电路时, 应该考虑以下一些指标: 噪声、增益、带宽、阻抗以及稳定性等。在红外测量系统中, 噪声指标尤其重要, 一般都要将前置放大器设计成低噪声放大电路形式, 并通过选择合适的

的有源元件和无源元件来满足噪声指标要求。

2.4 恒流偏置低噪声放大电路的设计

图 3 是光导探测器的恒流偏置放大电路原理图。在这里,用齐纳二极管 Z 提供基极的电压 V_B 。

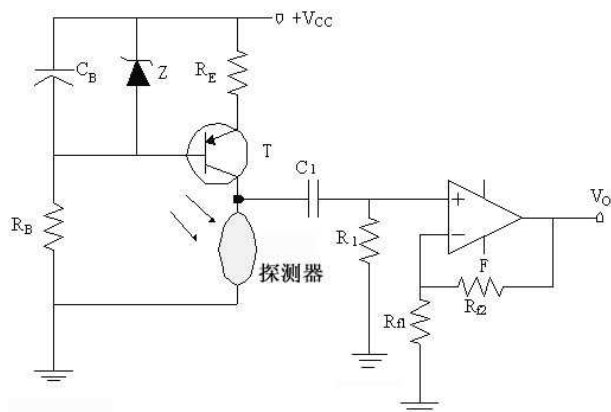


图 3 光导探测器的信号放大电路原理图

2.5 噪声分析

在设计低噪声电子电路中的直流电源时,必须考虑电源产生的电噪声及其纹波以及可能被耦合到电源中的共模电压。如果纹波对偏置电路的影响较大,就需要对电源进行有源滤波。在小信号放大电路中,电源往往需要附带一个一级晶体管电子滤波器^[6]。如果电源滤波良好,噪声就不会成为严重的问题,因为有效的纹波滤除方法对来自电源中的二极管和电阻的噪声同样是有用的。

图 3 的电路中,输入噪声主要由探测器、偏置电路和放大电路产生。由于电路中的元件较

多,在分析噪声模型时,可以先考虑偏置电流源部分,求解其电路噪声的诺顿等效电路,代入放大电路,再求解整个电路的等效输入噪声。

偏置电路部分的等效噪声模型如图 4 所示。晶体管输出的短路电流 i_o 即为偏置电流源的输出噪声 I_{nx} , r_b 、 $(1+\beta)r_e$ 、 $r_e/(1+\beta)$ 和 βr_b 为晶体管 T 的混合 h 参数等效电路, E_b 是基极扩展电阻的热噪声, I_b 是基极总电流的散粒噪声, I_c 是集电极电流的散粒噪声, I_f 为晶体管的 $1/f$ 噪声, E_E 是电阻 R_E 的热噪声, E_B 是电阻 R_B 的热噪声, R_z 和 I_z 分别是齐纳二极管 Z 的等效电阻和噪声电流。

图 5 为图 3 电路的等效噪声模型。其中, Z_i 为放大器的输入电阻, A_v 为增益, E_n 和 I_n 分别为放大器的等效输入噪声电压和电流, N_d 为探测器产生的噪声, R_d 为探测器电阻, E_c 、 E_{f1} 、 E_{f2} 分别为电阻 R_c 、 R_{f1} 、 R_{f2} 产生的热噪声, R_s 为偏置电流源的输出电阻, I_{ns} 为偏置电流源的等效输出噪声。图中的器件均为无噪声的理想器件。当耦合电容 C_1 容量不够时,会通过 I_n 产生附加噪声。当 C_1 值取得足够大时,可以略去耦合电容 C_1 对电路噪声的影响。

根据噪声模型的分析,考虑到实际应用中电路元件的参数,通过计算可以得出:电路噪声主要受运放的噪声电压和电流、反馈电阻 R_{f1} 及电阻 R_E 的热噪声的影响,其它各噪声源的影响可以忽略。图 3 中的电路在探测器位置产生的单位带宽噪声电压(探测器噪声除外)为

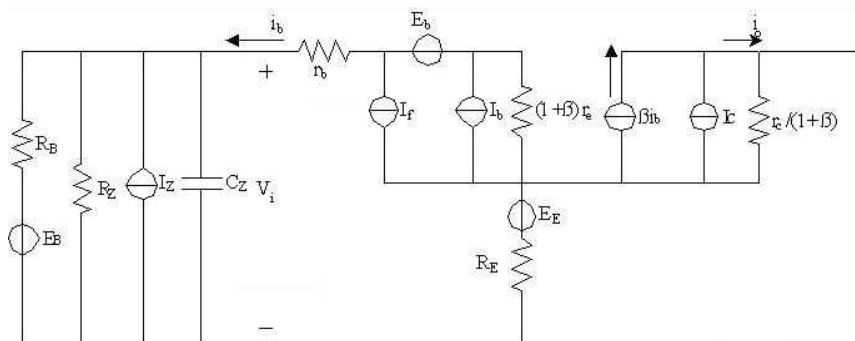


图 4 偏置电流源电路的等效噪声模型

$$E'_n = \left[E_n^2 + I_n^2 (R_d^2 + R_{f1}^2) + 4kTR_{f1} + 4kTR_d^2/R_E \right]^{1/2} \quad (2)$$

式中, E_n 是运放的单位带宽等效输入噪声电压, I_n 是运放的单位带宽等效输入噪声电流, k 为玻尔兹曼常数 (1.38×10^{-23} 瓦秒/K), T 为导体的绝对温度 (单位为 K)。

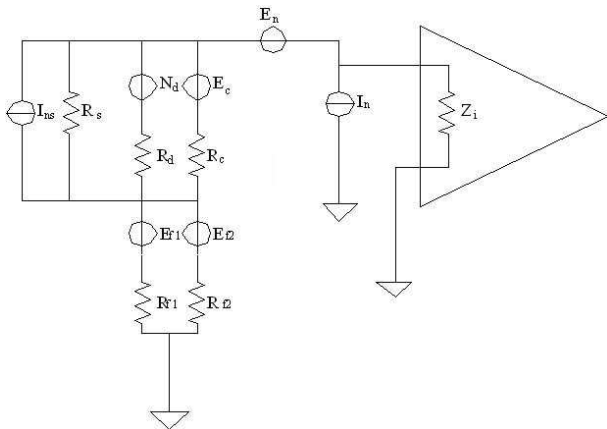


图 5 电路的等效输入噪声模型

2.6 低噪声器件的选取

本实验中采用的是 HgCdTe 长波红外探测器, 其工作波段为 $7.5\mu\text{m} \sim 15\mu\text{m}$, 工作温度为 77K, 探测器暗电阻 $R_d = 24\Omega$, 结电容 $C_d < 100\text{pF}$, 最佳偏置电流 $I_B = 5\text{mA}$ 。这里, 低噪声运算放大器选用带双极性晶体管输入的 LT1028。当频率 $f = 1\text{kHz}$ 时, 其等效噪声电压 $E_n = 0.86\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$, 等效噪声电流 $I_n = 1000\text{fA}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。晶体管恒流偏置电路中的齐纳二极管 Z 选用的齐纳击穿电压为 5.1V 的 1N4733。根据式 (1), 当 $R_E = 820\Omega$ 时, 电流源的输出电流为探测器的最佳偏置电流 5mA。电路中的电阻选用热噪声较低的金属膜电阻。根据式 (2), 反馈电阻越小越好, 这里取 $R_{f1} = 10\Omega$ 。

将各参数代入式 (2), 求得电路产生的单位带宽等效输入噪声电压为 $0.96\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

前放电路必须与选用的探测器匹配。由上述分析可知, 其设计原则应该是使噪声尽可能减小。在通常情况下, 放大电路的噪声被设计成与传感器的相同, 因为放大器和传感器都贡献相同的噪声, 系统的总噪声等于单个分量的 $\sqrt{2}$

倍。为了尽可能地减小由前放电路噪声引入的系统噪声, 应该将放大器的噪声贡献设计成探测器噪声的十分之一, 即放大器的噪声为探测器的 $1/\sqrt{10}$, 大约为 $1/3$ 。如果再减小放大电路的噪声, 将会增加设计难度, 而获益却会变得甚少。

3 电路噪声性能测试

通常讨论的噪声测量一般假设在有限的频率带宽内观察噪声的输出^[6]。在测量电路的输出噪声时, 接入了一个噪声带宽为 10.5kHz 的低通滤波器。在测试电路的噪声时, 在电路输入端接了一个 24Ω 电阻, 以模拟接入探测器的电路的工作状态。然后用示波器测量电路输出信号的均方根值。

表 1 给出了电路的实测结果。

表 1 电路噪声测试结果

电路增益	噪声带宽	输入接 24Ω 电阻时的输出噪声均方根值	输入接探测器时的输出噪声均方根值
11000	10.5kHz	1.47mV	4.92mV

单位带宽等效输入噪声均方根电压可以由下式求得

$$\begin{aligned} & \text{单位带宽等效输入噪声均方根电压} \\ &= \frac{\text{输出噪声电压 (均方根值)}}{\text{电路增益} \times \sqrt{\text{噪声带宽}}} \end{aligned} \quad (3)$$

由表 1 测得的数据可知, 输入接 24Ω 电阻时, 系统的单位带宽等效输入噪声均方根电压为

$$E_{ni1} = \frac{1.47 \times 10^{-3}}{11000 \sqrt{10.5 \times 10^3}} = 1.30\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}} \quad (4)$$

其中, 电路引入的等效输入噪声的均方根电压为

$$E_{ni2} = \sqrt{E_{ni1}^2 - E_i^2} \quad (5)$$

式中, E_i 为 24Ω 电阻的均方根噪声电压, 可以用下式求出:

$$E_i = \sqrt{4kTR} \quad (6)$$

式中, k 为玻尔兹曼常数, T 为导体的绝对温度 (单位为 K), R 为电阻。将参数代入式 (5) 和式 (6), 可以求得电路引入的噪声为 $1.14\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

当输入端接探测器时, 等效输入噪声为

$$E_{ni3} = \frac{4.92 \times 10^{-3}}{11000\sqrt{10.5 \times 10^3}} = 4.37\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}} \quad (7)$$

因此, 探测器的噪声为

$$E_{n4} = \sqrt{E_{ni3}^2 - E_{ni2}^2} = 4.21\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}} \quad (8)$$

由计算结果可知, 电路本身的噪声比探测器的噪声小得多, 电路设计符合要求。

4 结束语

以上介绍了光导探测器的恒流偏置电路和前置放大电路的设计及噪声分析, 并进行了电路测试。在实际测试中, 还要考虑电磁兼容设计, 以减小系统内部及外部各种电磁骚扰对电路的影响。为了进一步提高电路的性能, 还需要对电

路的印制电路板设计以及系统的屏蔽和接地方式进行更深入的研究和改进。

参考文献

- [1] 吴宗凡, 等. 红外与微光技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 182-183.
- [2] 梁宏林, 蔡毅, 姚英. 多元光导碲镉汞探测器的电串音 [J]. 红外与毫米波学报, 1997, 16(1): 77-80.
- [3] 李大宇, 段星辉, 魏焕东. 多元红外光导探测器电子学串音研究 [J]. 激光与红外, 2009, 39(9): 952-955.
- [4] Paul Horowitz, Winfield Hill. 电子学 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 349-350.
- [5] Paul Horowitz, Winfield Hill. 电子学 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 62-63.
- [6] C D Motchenbacher, F C Fitchen. 低噪声电子设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1979: 225-226.
- [7] Paul Horowitz, Winfield Hill. 电子学 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 366-367.

新闻动态 News

360 度红外传感器在小型无人 机上的首次飞行

据 www.shephard.co.uk 网站 2009 年 10 月 9 日报道, 洛克希德·马丁公司最近在其沙漠之鹰 III 无人机系统上成功完成了一种新式红外传感器回转头的测试, 这是小型无人机系统携带 360 度红外传感器所作的首次飞行。

在伊拉克战争和阿富汗战争期间, 手动发射的沙漠之鹰 III 在获取重要情报、监视和侦察方面为英国军队立下了汗马功劳。小型无人机系统(翼展为 54in)是专门为在高空、强风和极端温度条件下飞行而设计的。

沙漠之鹰 III 的新载荷于 2009 年 9 月在美国明尼苏达州国民警卫队营地进行的成功飞行试验, 证明无人机系统可大大提高在夜间为地面部队执行情报收集、监视和侦察任务的能力。通过 360 度的红外覆盖, 部队能够获得更精确的目标位置和更稳定的图像。结合一个已升级的 360 度彩色电光传感器, 操作人员可获得 10 倍的连

续变焦能力, 这非常有利于在发现目标后对目标进行识别。据该公司的有关负责人说, 他们已使红外载荷微型化, 整个传感器可装在一个不到两磅的回转头内。为了提高目标识别率, 电光摄像机也已升级。凭着这些传感器的性能, 用户将可体验到已大大提高的夜间态势感知能力。

沙漠之鹰 III 具有一个开放的结构环境, 它由一个手动发射的轻量加固式飞行器(配有掀钮式即插即用有效载荷)、一个便携式地面站和一个远程视频终端构成。掀钮式有效载荷使得操作人员能在不到 1min 的时间内变换飞行器上的传感器以及及时满足迅速变化的任务要求。

目前, 沙漠之鹰 III 可提供具有五种不同性能的组件式有效载荷以执行灵活多变的任务。这些有效载荷包括一个装有混合式电光和微光黑白成像器的 360 度回转头、一个安装在 90 度回转轴上的稳定式红外成像器、一个信号情报传感器、一个新式的 360 度红外传感器和一个已升级的具有连续变焦能力的 360 度电光成像器。

□ 顾聚兴