

文章编号:1002-2082(2010)05-0724-04

微弱光信号检测电路的实现

李常青¹, 梅欣丽^{1,2}, 明 奇¹

(1. 郑州大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 新乡学院 物理系, 河南 新乡 453000)

摘 要:为将微弱光信号有效地转换为电信号以方便后续电路处理,设计了微弱光信号检测电路。电路由光电转换和前置放大两部分组成。光电转换电路采用低输入偏置电流运算放大器AD549实现;前置放大电路使用对称三极管组成的对数比率放大电路实现,并在同等条件下与集成电路LOG100组成的前置放大电路相比较。实际测量表明,该放大电路设计可有效放大低于1 nW的微弱输入信号,同时对噪声也有很强的抑制作用,而由LOG100组成的电路对噪声的抑制能力明显衰减。

关键词:微弱光信号;光电检测;前置放大;对数电路

中图分类号:TN247

文献标志码:A

Implementation of weak optical signal detection circuit

LI Chang-qing¹, MEI Xin-li^{1,2}, MING Qi¹

(1. School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. Institute of Physics, Xinxiang University, Xinxiang 453000, China)

Abstract: In order to convert weak optical signals into electrical signals effectively for post-processing, a weak optical signal detection circuit is designed. The circuit consists of a photoelectric conversion circuit and a preamplifier circuit. The photoelectric conversion circuit was implemented with a low input bias current operational amplifier AD549. The preamplifier circuit was implemented with a logarithmic ratio circuit using symmetric transistors, and was compared with the preamplifier composed of IC LOG100 under the same conditions. Measurement results show that the amplifier circuit can amplify weak input signals lower than 1 nW and noise can also be suppressed efficiently, while the circuit composed of LOG100 has a relatively poor performance in noise suppression.

Key words: weak optical signal; photoelectric detection; pre-amp; logarithmic circuit

引言

对微弱或极微弱光的检测,在科学研究和军事等领域有广泛的应用。微弱光信号检测的一般办法是通过光电转换器件将微弱的光信号转换为微弱电信号,然后再通过电路放大,将这个微弱电信号转变为可处理的电信号。微弱光信号检测的难点在于光电器件接收到的光信号和转换后的电信号都很微弱,很容易淹没在各种噪声中,为了得到有

效的信号以便于后续电路的分析处理,制作低噪声、高精度光电放大器是非常重要的。

现在一般采用光电转换电路和前置放大电路组成放大器的方法,并且多采用专用集成电路来构建电路。全部采用专用集成电路的方法在电路实现起来比较简单,但缺乏灵活性,在有些应用中并不十分合适,因此本文比较了专用集成电路和相对分立的元器件构成的两种放大器。其中光电转换电路

收稿日期:2010-03-31; 修回日期:2010-06-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60678045)。

作者简介:李常青(1965—),男,河南商丘人,博士,主要从事光电材料、光谱分析研究工作。E-mail:ieqcqli@zzu.edu.cn

采用低输入偏置电流放大器 AD549 为主构成。前置放大电路采用两种方式:一种使用对管和高精度集成运放 OP07 构成对数的放大电路;另一种使用专用集成电路 LOG100。实验表明在输入为微弱光信号情况下,分立电路更能有效抑制干扰信号,并为后继处理输出有效信号。

1 光电转换电路

光电二极管是光电转换电路中的主要器件,其灵敏度和动态响应速度是整个检测电路工作速度和精度的先决条件^[1-5]。本实验中光电二极管使用 PIN 硅光电二极管(S1227-66B),它具有灵敏度高,暗电流小的优点。图 1 为实验中采用的光电转换电路的等效电路。由理论分析可知,电路输出电压为

$$u_{o1} = I \times R_F = S \times P \times R_F$$

式中: S 为光电二极管的灵敏度; P 为入射光功率。实验中光电二极管的灵敏度为 0.36 A/W ,入射光功率为 nW 量级, R_F 值为数百 $\text{k}\Omega \sim$ 数百 $\text{M}\Omega$,输出电压 u_{o1} 的值为几 $\text{mV} \sim$ 几十 mV 。电路中 C_F 用于防止电路自激振荡和抑制噪声干扰,同时也限制电路的带宽 $\frac{1}{2\pi R_F C_F}$,保证电路工作在良好的线性条件下,也减小了带外干扰的影响。

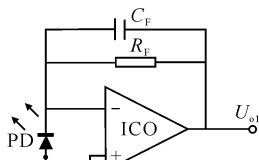


图 1 光电转换电路

Fig. 1 Photoelectric conversion circuit

在微弱光信号检测中,因输入的光功率通常在 0 到几十 nW 之间,光电探测器输出的光电流约为几个到几十 nA 之间,故对前级运算放大器(图1、图2 ICO)的要求较高。为了获取较好的信噪比,一般要求输入偏置电流比输入信号小 $1 \sim 2$ 个数量级。本实验中选择了具有较低的输入失调电压和极低输入偏置电流的 AD549^[6] 作为前级放大电路的运放。

图 2 为光电二极管等效电路,输入偏置电流 I_B 对输出电压的影响为 $I_B \times R_F$,输入失调电压 V_B 对输出电压的影响为 $(1 + R_F/R_s)V_B$ 。为得到较高的输出电压,实验中 R_F 取数百 $\text{M}\Omega$ 。由于 AD549S 系列的输入偏置电流不超过 100 fA ,所以 I_B 对输出

电压的影响一般为十几个 μV ,通常可忽略不计。光电二极管内阻 R_s 的值约为 $10 \text{ M}\Omega$,AD549S 的输入失调电压在 0.3 mV 左右,这样 V_B 对输出电压的影响可能达到几个 mV ,对于微弱信号的检测有较大影响。为了减小这种影响, R_F 的值不宜选择过大,同时接入微调电阻,将输入失调电压降为最小。

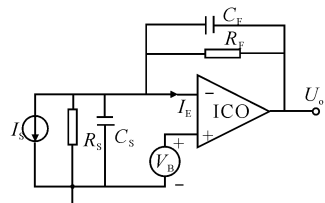


图 2 光电二极管等效电路

Fig. 2 Photodiode equivalent circuit

2 前置放大电路

光电转换及放大电路输出的信号只有 mV 量级,因此需要工作稳定的低噪声前置放大电路将信号进一步放大,以便与后续的控制和运算系统对接。由于对数比率放大电路相对于线性放大电路具有控制简单、动态范围大和线性度好的优点,且对数放大电路能够实现数据压缩的功能,方便与 A/D 转换器连接,本实验中采用对数比率放大电路作为前置放大电路,如图 3 所示。

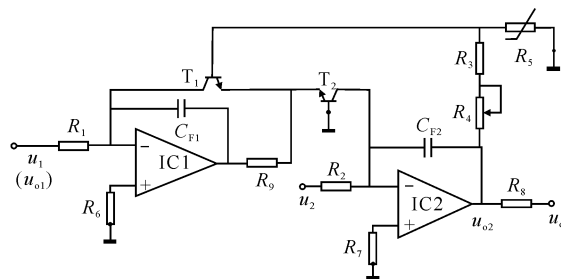


图 3 前置放大电路

Fig. 3 Preamplifier circuit

为了克服温度的影响,电路中采用了 2 只对称匹配的晶体三极管来消除晶体管集电极电流的温度漂移。同时,由于 u_o 还与 U_T (温度电压当量,约为 26 mV) 有关,而 U_T 受温度影响较大,本实验中利用具有正温度系数的电阻 R_5 来补偿 U_T 的温度影响。IC1 和 IC2 均采用低噪声高精度集成运放 OP07^[6], C_{F1} 和 C_{F2} 用于相位补偿,保证闭环工作的稳定性。

由图 3 知: $u_o = \frac{R_3 + R_4 + R_5}{R_5} U_T \ln \frac{R_2 u_1}{R_1 u_2}$ 。取 $R_1 = R_2$, 则 $u_o = \frac{R_3 + R_4 + R_5}{R_5} U_T \ln \frac{u_1}{u_2}$ 。

将光电转换电路的输出接在前置放大电路的

u_1 端,调整 u_2 的值即可得到不同的增益。

3 实验分析

本实验采用 $\pm 10\text{V}$ 直流稳压电源供电,光源使用发射功率约为 1 mW 的普通红光发光二极管,经振荡电路控制输出周期性光脉冲信号。为了减小干扰,检测电路封装在金属盒内,电源线与信号线均使用屏蔽电缆。分别检测 u_2 和输入光强变化对微弱光光电检测电路输出信号的影响。

1) 在保持发光二极管光强度不变的情况下,改变外加电压 u_2 的大小,分析电路输出信号的变化。图4显示的是输入光功率在 0.1 nW 时,光电转换电路输出的信号波形,信号较弱且叠加有较强高频噪声,此噪声可能来源于是电路的内部噪声。图5所示为输入光功率 0.1 nW ,改变 u_2 大小,由对数比率前置放大电路输出的波形。结果表明,输出信号随 u_2 的变化而改变,即形成一个增益可调的光电检测放大电路。经过对数比前置放大电路后,信号被放大的同时,高频噪声也基本上被滤除干净,

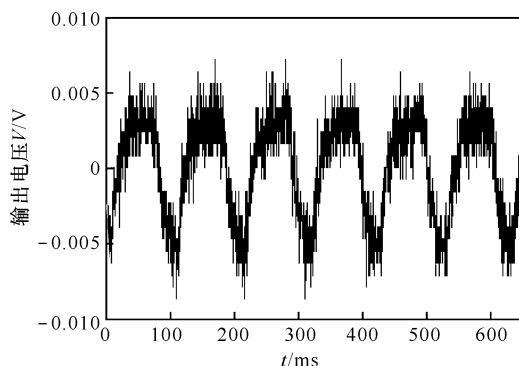


图4 光电转换电路输出的电压波形

Fig. 4 Output voltage waveform of photoelectric conversion circuit

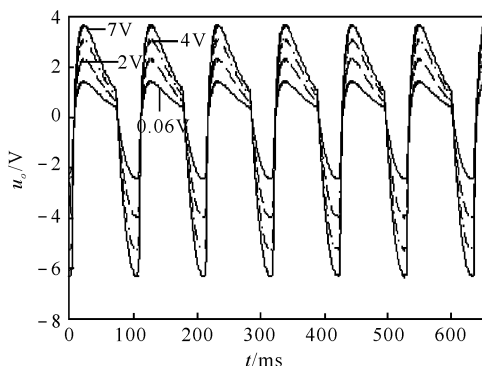


图5 输入光功率约为 0.1 nW ,不同 u_2 所对应的输出波形

Fig. 5 When input optical power is 0.1 nW , the corresponding output waveform of different u_2

原因是由于 C_{F1} 、 C_{F2} 电容的滤噪作用。

2) 保持外加电压 u_2 的大小不变,改变入射光强度,测试电路输出信号的变化。图6显示的是 $u_2 = 2\text{ V}$,输入光功率改变时的输出波形。

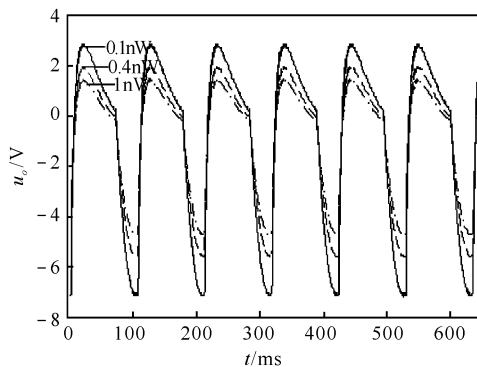


图6 外加 $u_2 = 2\text{ V}$ 时,不同入射光功率时的输出波形

Fig. 6 When $u_2 = 2\text{ V}$, output waveform of different input optical power

从图6可以看出,在 u_2 保持不变的情况下,当入射光功率增大时,总的输出 u_o 有所减小。这是由于加在IC2上的电压 $u_2 > u_1$ 造成的, u_2 不变而 u_1 增加使得输出函数中 $|\ln \frac{u_1}{u_2}|$ 因子减小,从而使得整体增益下降。由此可知, u_2 的选取对电路增益的影响很大,当 u_2 取值的大小可与 u_1 相比较时, $|\ln \frac{u_1}{u_2}|$ 的值很小,因此输出电压 u_o 也较小;当 u_2 取值的大小与 u_1 相差较大时, $|\ln \frac{u_1}{u_2}|$ 的值较大, u_o 也较大。本实验选取的 u_2 在 mV 级,而光电转换电路的输出在 μV 至 mV 量级,只要保持 u_2 在一定取值范围内,可保证电路工作在线性状态。

以上的实验数据证明:以AD549为核心组成的光电转换电路,加上采用2只对称匹配的晶体三极管和OP07组成的对数比率放大电路作为前置放大电路完全可以满足微弱光检测的需要。

3) 现有的集成对数运算电路如LOG100、LOG101、LOG104^[7]等,其内部电路与文中电路结构非常相似。考虑到LOG100有一内置 $220\ \Omega$ 激光微调电阻,对温度变化有自动调节作用,与LOG101、LOG104相比更接近图3中的电路,故使用LOG100作为比较电路代替图3中的电路用作前置放大,光电转换部分仍采用图1中电路,如图7所示。

取 $R_{11} = R_{12}$, 则输出信号 $u_{10} = \frac{270 + 220}{270 + 220 + R_x} \times U_T |\ln \frac{u_{11}}{u_{12}}|$ 。

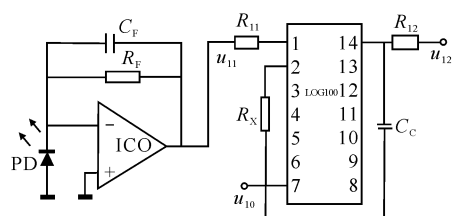


图7 LOG100 用作前置放大电路的原理图

Fig. 7 LOG100 preamplifier circuit schematic

替换后的电路在输入光信号强度在几个 nW 以上时,工作稳定,有良好的放大作用和线性。但当光强降低至 1 nW 以下时,输出信号中开始出现噪声,随着光强再度减弱最终会完全失去放大作用(见图8)。这是因为LOG100 缺少反馈电容 C_{F1} 和补偿电阻 R_6 、 R_7 ,使得它在微弱光信号检测中的滤噪能力大大降低。

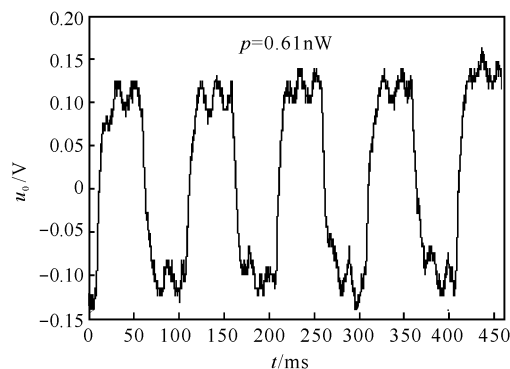


图8 LOG100 的输出波形

Fig. 8 Output waveform of LOG100

由于前置放大电路的输入信号是光电转换电路的输出信号,因此为了使LOG100 能在微弱光信号检测中得到与图3 电路相近的工作性能,只有使用增益很高、性能非常稳定的光电转换电路,但这大大提高了对电路元件的要求和设计难度。因此在进行微弱光信号检测时,图3 中的前置放大电路在同等条件下,其性能要优于结构相似的集成电路组成的前置放大电路。

4 结束语

本文验证了由光电转换电路和前置放大电路组成的放大器实现微弱光检测的方法。其中采用2 只对称匹配的晶体三极管和高精度集成运放OP07 组成具有温度补偿功能的对数比率放大电路作为前置放大电路,除实现了微弱光检测输出有效信号的要求外,还实现了增益可调,扩大了有效信号的可检测范围。在测试条件相同的微弱光检测中,此

前置电路工作性能优于结构相似的集成电路。

实验结果表明,整个微弱光信号检测电路工作稳定,具有很好的抗噪能力,在低频微弱光信号下工作良好,有较强的有效信号输出,当输入光功率为nW 量级时,输出可达到V 级,噪声控制在mV 以下,完全可以满足微弱光检测的需要,并且便于与后续处理电路连接。在对增益和通频带宽有不同要求的场合,可通过适当调节 R_F 的阻值和 C_F 的容值来满足设计要求。

参考文献:

- [1] 刘彬,张秋婵. 光电检测前置放大电路的设计[J]. 燕山大学学报,2003,23(3):193-196.
LIU Bin, ZHANG Qiu-chan. Designing of pre-amplifier circuit of photodiode monitoring [J]. Journal of Yanshan University, 2003, 23(3): 193-196. (in Chinese with an English abstract)
- [2] 龚涵,陈浩宇. 微弱光信号检测电路的设计与实现[J]. 科技信息:科学·教研,2007(27):85-87.
GONG Han, CHEN Hao-yu. The design and realization of an optic-electric detecting circuit for weak signal[J]. Science & Technology Information, 2007(27): 85-87. (in Chinese with an English abstract)
- [3] 王立刚,张殿元. 低噪声光电检测电路的研究与设计[J]. 电测与仪表,2004,41(500):63-66.
WANG Li-gang, ZHANG Dian-yuan. Research and design of photoelectric detection circuit with low noise [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2007, 44(500): 63-66. (in Chinese with an English abstract)
- [4] 王立婷. 光电检测电路的设计及实验研究[D]. 吉林: 吉林大学,2007.
WANG Li-ting. The design and experimental study on the photoelectric detecting circuit [D]. Jinlin: Jilin University, 2007. (in Chinese)
- [5] 刘建朝. 微弱激光功率计研究[D]. 河北: 河北工业大学,2007.
LIU Jian-chao. Research on the weak laser power meter[D]. Hebei: Hebei University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [6] Analog Devices Inc. Products AD549 datasheets [EB/OL]. Norwood: Massachusetts, 2002[2008]. http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD549.pdf.
- [7] Texas Instruments Incorporated. BURR-BROWN Corporation Products LOG100 Datasheets [EB/OL]. Dallas: Texas, 1995[2005]. <http://focus.ti.com/lit/ds/sbfs014/sbfs014.pdf>.