

光电模块中微弱电流测量电路的设计与测试

谭 同^{1,2,3}, 何慧敏^{1,2,3}, 李宝霞^{1,2}, 薛海韵^{1,2}, 周云燕^{1,2}, 曹立强^{1,2}

(1.中国科学院微电子研究所 北京 100029; 2.华进半导体封装先导技术研发中心有限公司,江苏 无锡 214135; 3.中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 为了实现对集成光路中各通道上的光强进行实时监测,测量 nA 级微弱电流,提出了两种基于运算放大器的微弱电流测量电路,并完成 PCB 板制作和电路测量。采用了将微弱电流转换成电压进而放大电压信号的方法,通过实际测试,两种电路达到了 0.09 nA/0.2 nA 分辨能力,80 nA/120 nA 测量范围,实现了光电模块中微弱电流测量需求;同时分析了电路的温度稳定性、占用 PCB 板的面积、功耗,为不同应用场景下光电模块中微弱电流测量电路的选择提供依据。

关键词: 光电模块; nA; 运算放大器; 微弱电流; 温度稳定性

中图分类号: TN407

文献标识码: A

文章编号: 1674-6236(2017)09-0006-04

Design and test of weak current measurement circuit in photoelectric module

TAN Tong^{1,2,3}, HE Hui-min^{1,2,3}, LI Bao-xia^{1,2}, XUE Hai-yun^{1,2}, ZHOU Yun-yan^{1,2}, CAO Li-qiang^{1,2}

(1. Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. National Center for Advanced Packaging Co., Ltd. Wuxi 214135, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to realize the real-time monitoring of the optical intensity of each channel in optical integrated circuits and the measurement of the nA level weak current, two kinds of weak current measurement circuit based on operational amplifier are put forward; and the PCB circuit board production and measurement are completed. With the method that the weak current is converted into voltage which would be amplified later, through the actual test, the two circuit reached resolution of 0.09nA/0.2nA, the measurement range of 80nA/120nA and the weak current measurement requirements of optoelectronic modules; the occupation of temperature stability, PCB circuit board area, power consumption are also analyzed, which providing the basis of choice for the weak current measurement circuit of photovoltaic modules under different scenarios.

Key words: optical transceiver modules; nA; operational amplifier; weak current; temperature stability

随着硅基光子集成技术的发展,需要在不影响光子芯片正常工作的情况下,对集成光路中各通道上的光强进行实时监测,来有效的调整光子集成系统的工作状态以达到最优系统性能^[1-2]。各种可在硅衬底上单片集成的新型监测光探测器(MPD)成为光电器件领域研究的热点,但不论这些 MPD 是基于何种吸收机制(表面态吸收、双光子吸收、锗吸收以及杂质能级缺陷态吸收)^[3],他们的共同特点是低速直

流工作,微量信号检测。也就是说,无论检测光路上光信号的调制速率高低,MPD 上得到的只是光功率的平均值,同时进入 MPD 的光是微量的(例如,仅为检测光路光功率的万分之一),MPD 上产生的光生电流也是微弱的(纳安量级)。MPD 光生电流的放大成为后续电子电路中的重要部分。

传统的 MPD 主要用在于长距离光发射模块中激光器的光发射功率监测,因放置位置在激光器后面,被称为背光检测器^[3]。随着系统对光电模块轻薄

收稿日期:2016-09-12 稿件编号:201609128

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)资助(2015AA016904)

作者简介:谭 同(1993—),男,河南周口人,硕士研究生。研究方向:光电模块中信号完整性及电源完整性。

短小、高通道数、低功耗的需求提高,对其内放大电路提出了新的要求。文中主要基于两款放大芯片 OPA4340 和 MAX44286 进行微弱电流测量电路的设计、制作与测试。分析比较这两种电路的可测电流范围、测量分辨率、温度稳定性,以及占用 PCB 板的面积、功耗等等,为不同应用场景下各种光电模块中微弱电流测量电路的选型提供实验依据。

1 微弱电流测量原理

光电模块中,被检测光路的光功率一般在 μW 到 mW 量级,MPD 上产生的光生电流在 nA 量级;对于如此微弱的电流,一般的测量方法无法准确的得到输入电流数值。

微弱电流的测量主要有 IV 转换(电流-电压转换)和 IF 转换(电流-频率转换)两种方法^[4];IV 转换有两种实现方式,分别是取样电阻法和运算放大器反馈法^[5]。取样电阻法的实现比较简单,但是取样电阻会对待测电流进行分流,减小待测电流数值;而运放反馈法是将运放和负反馈电阻组成互阻放大电路^[5-6],由于运放的高输入阻抗,所以测量电路对待测电流几乎没有什么影响,故一般都会采用后者进行微弱电流测量^[7-8]。

在光电模块中需要测量的是 MPD 光电二极管中流过的电流,且光电二极管需要有反向偏压才能正常工作^[9],因此设计电路原理图如图 1 所示。

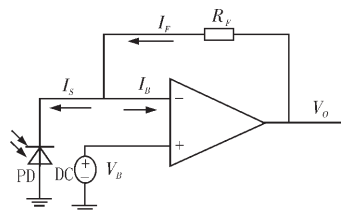


图 1 运放反馈法原理图

根据理想运算放大器的“虚短”特性,在同相端加上直流电压相当于在反相端也加上同样的电压,MPD 光电二极管被反向偏置,满足其正常工作状态;当 MPD 感应到光时,会产生反向电流。

在图 1 中,对于理想运算放大器,输入输出关系式为:

$$V_0 = I_S * R_F + V_B = I_F * R_F + V_B \quad (1)$$

对于实际的运放,由于集成电路制造技术及工艺的影响,会产生输入失调电压 V_0 和偏置电流 I_B 等,另外放大器的增益 A 也不会无穷大,故输入输出关系式为:

$$V_0 = I_S * R_F + (V_{0S} - V_0/A) + I_B * R_F + V_B \quad (2)$$

如果关系式(2)要趋近于关系式(1),就要使偏置电流 I_B 远远小于 I_S ,并且失调电压 V_{0S} 远远小于 $I_S * R_F$ ^[10]。

在用反馈法测量微弱电流时,由于电流非常微弱,达到 10^{-9} 数量级,反馈电阻 R_F 必须非常大才可以使输出满足后面放大电路的需求,但是一方面 R_F 过大又会在电路中产生较大的电压噪声^[4];另一方面运算放大器并不是理想的运算放大器,随着反馈电阻的增大,偏置电流 I_B 对 I_S 的分流作用将会越来越明显^[10-11];因此反馈电阻并不是越大越好,要根据具体的电路选择合适大小的反馈电阻。

由于反馈电阻过大会产生电压噪声,在反馈电阻两端并联反馈电容,在输出端添加阻容滤波电路,其可以抑制或平滑偶然尖峰噪声^[11-12]。

2 微弱电流测量电路设计和制备

MAX44286 是一款低功耗、零漂移、高精度的电流监测型运算放大器, $V_{0S}=30 \mu\text{V}$,当工作电压 $V_{0S}=3.3 \text{ V}$ 时,静态功耗 $P_{DQ}=0.041 \text{ mW}$ (一路);其内部集成了两个串接运算放大器,因此只需要选择外部的感应电阻即可,并且其采用 WLP 封装,在电路板中占用面积小,在小型光电模块中具有很大的优势^[13]。

基于 MAX44286 芯片的微弱电流测试电路原理图如图 2 所示。

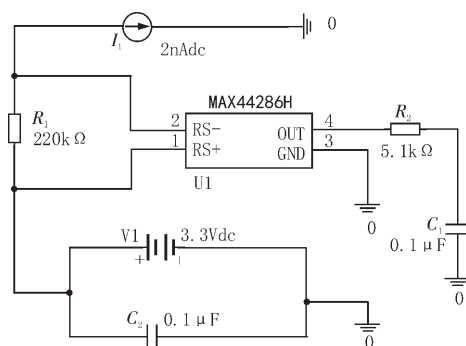


图 2 基于 MAX44286 芯片的微弱电流测试电路原理图

MAX44286 是对 R_1 上的电压进行放大,并且放大倍数可以选择;由于在测试电路中选用的单片机内部 AD 的参考电压是 2.44 V ,放大电路输出端的电压应限制在 2.44 V 之内^[14];并且设计可测微弱电流在之内,因此在此电路中选择 R_1 即 $R_S=220 \text{ k}\Omega$,选择增益 $G=100$ 型号芯片。

根据图 2 的电路原理图和 MAX44286 芯片手册,其输入电流与输出电压理论计算关系式:

$$V_0 = I_S * R_S * G \quad (3)$$

OPA4340 是一款轨到轨的低压、单电源运算放大器,其低噪声和轨到轨的输入输出特性非常适合驱动电路后级的 AD 转换器^[5];静态工作电流 $I_Q=680 \mu\text{A}$,当工作电压 $V_S=3.3 \text{ V}$ 时,静态功耗 $P_{DQ}=2.24 \text{ mW}$ (两

路);并且其偏置电流 $I_B=0.2 \text{ pA}$,远远小于测量电流 I_S ,输入失调电压 $V_{OS}=99 \mu\text{V}$,远远小于 $I_S * R_F$;因此此款运算放大器可以作为微弱电流测量的放大器。

基于 OPA4340 芯片的微弱电流测试电路原理图如图 3 所示。

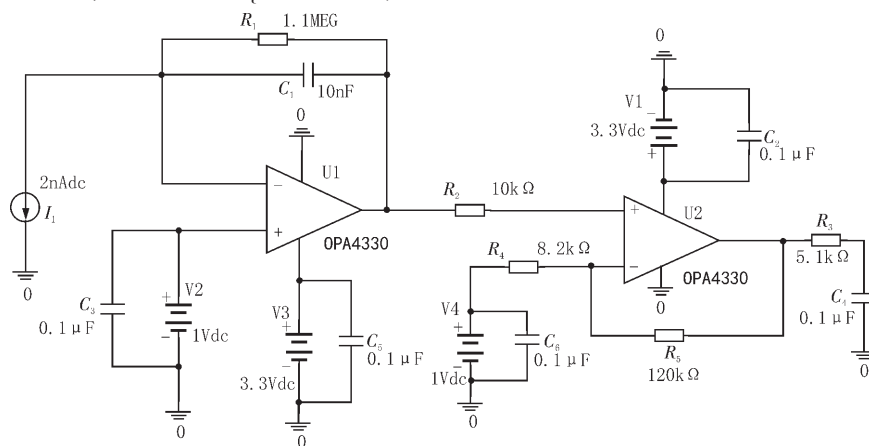


图 3 基于 OPA4340 芯片的微弱电流测试电路原理图

第一个运算放大器的作用是将电流转化为电压,之后通过第二个运算放大器进行电压放大。根据图 4 电路原理图可以得到输入电流与输出电压之间的理论计算关系式:

$$V_0 = I_S * K + V_B \quad (4)$$

根据图 2 和 3 的电路原理图,在设计版图时尽量将芯片需要的电容、电阻靠近运放布置,制作出 PCB 板,并贴装元器件。测量可知 MAX44286 电路所占面积为 $4*4.5 \text{ mm}^2$,而 OPA4340 电路所占面积为 $12*10 \text{ mm}^2$,因此在占用面积上,运放 MAX44286 更有优势。

3 实验测试

分别测量了电路在不同的输入电流时,输出电压的大小;同时为了测量温度对测量电路的影响,实验中也设置了环境温度作为参量;环境温度通过恒温真空干燥箱进行模拟,将实验电路板放置于恒温干燥箱中,通过导线与外部的电源、电压表、单片机连接。

同时在测试时,也对输出电压进行了单片机的 AD 采集。单片机内部的 AD 参考电压是 2.44 V ,故在单片机采集输出电压时,会在 2.44 V 左右达到饱和。

为了排除不同电路板造成的测试结果偶然偏差,考察测量电路的一致性,在测试之前对两块电路板依次编号 A、B,测试时在相同条件下对两块板子进行测试;测试数据用 MATLAB 进行处理,并

且将测试结果进行对比。

3.1 基于 MAX44286 芯片的测量电路测试结果

A/B 板分别在 20°C 、 40°C 、 60°C 、 80°C 条件下,基于 MAX44286 芯片的电路测试 $I-V$ 曲线如图 4、5 所示。

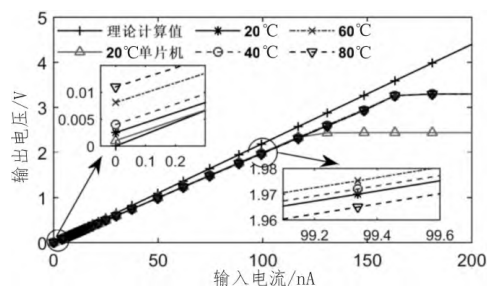


图 4 A 板在不同温度下 $I-V$ 对比

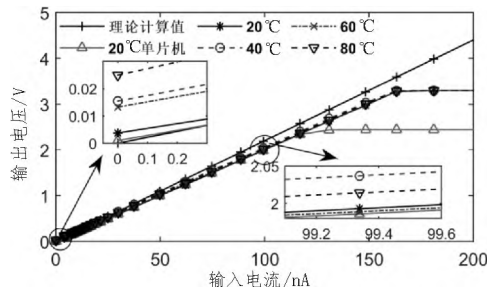


图 5 B 板在不同温度下 $I-V$ 对比

由测试结果可知:温度变化时,输入电流是 0 nA 时,A/B 板输出电压与理论计算最大差值是 25 mV ,根据测量斜率反推计算出电流值 1.25 nA ,因此可测量的最小电流应是 1.25 nA ;用电压表测量 A/B/C 输出电压时(3.3 V 限幅),电流可测最大电流 163 nA ;

单片机采集输出电压(2.44 V 限幅)时,电流可测最大电流 120 nA;实验中使用的单片机 AD 是 10 位的,反推计算可测量的电流精度是 0.108 nA;在测量中设置有 3 个电流值 14.718 nA,14.850 nA,14.917 nA,变化值是 0.14 nA 和 0.067 nA,单片机采集时不能稳定分辨出 0.14 nA 和 0.067 nA 的变化电流,但是却可以分辨出 0.207 nA 的差值电流,因此目前可测量的最高精度电流是 0.207 nA。

由图 4、5 知,MAX44286 电路测量值与理论值之差随着电流变大而逐渐变大;测量得到的三块电路板 I - V 曲线斜率 $K=0.019\ 9$,与理论计算值 $K_0=0.022$ 存在较大差距,因此可以将式(3)理论计算的斜率值调整为 0.019 9。

3.2 基于 OPA4340 芯片的测量电路测试结果

A/B 板在 20℃、40℃、60℃、80℃条件下,基于 OPA4340 芯片的电路测试 I - V 曲线分别如图 6、7 所示。

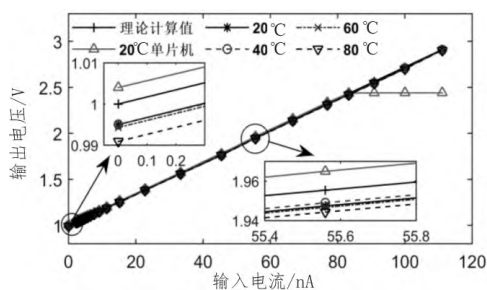


图 6 A 板在不同温度下 I - V 对比

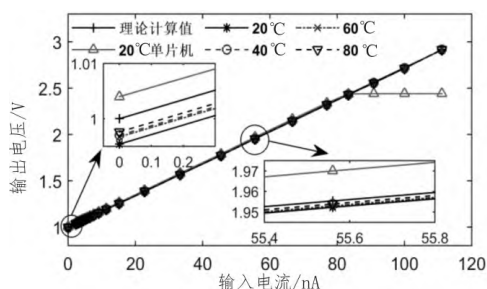


图 7 B 板在不同温度时 I - V 对比

由测试结果可知:温度变化时,输入电流是 0 nA 时,A/B 输出与计算值差值最大为 10 mV,根据式(4)反推计算电流 0.58 nA,故其最小测量电流是 0.58 nA;OPA4340 在实验中用电压表测量输出电压(3.3 V 限幅)时,可测最大电流 111 nA 之间;单片机采集输出电压(2.44 V 限幅)时,可测最大电流 83 nA;实验中使用的单片机 AD 是 10 位的,反推计算可测量的电流精度是 0.047 nA;在测量中当电流变化值是 0.03 nA 时,单片机已无法分辨出输出电压值,当

电流变化值是 0.09 nA 时,单片机可以分辨出输出电压值,因此可测量的最高精度电流是 0.09 nA。

测量得到的两块电路板 OPA4340 电路 I - V 曲线与式(4)计算公式的曲线几乎重合,3 块电路板测量得到的 I - V 曲线的斜率是 $K=0.017\ 0$,与理论计算的 $K_0=0.017\ 2$ 差值极小,式(4)可以作为理论计算公式。

3.3 两种测量电路对比

两种电路的测试结果对比如表 1 所示。MAX44286 电路可测量的电流范围较大并且静态功耗和占用面积较小,但是温度变化时其输出电压的波动较大,测量精度相对较低,实测 I - V 曲线斜率与理论计算值间误差也较大,建议以实测 I - V 曲线斜率做调整;OPA4340 电路测量范围比 MAX44286 小了 40 nA,静态功耗和占用面积也比后者高出许多,但是其测量精度和灵敏度高,输出稳定,不会随温度变化出现明显波动,当模块对尺寸和功耗没有苛刻要求时,OPA4340 是较好选择。而 MAX44286 更适合小体积、低功耗,对光功率检测精度要求不高的光电模块。

表 1 两种测量电路对比

两种电路的核心芯片	MAX44286	OPA4340
测量精度	0.207 nA	0.09 nA
静态功耗	0.041 mW	2.24 mW
电路所占面积	4*4.5 mm ²	12*10 mm ²
I - V 理论与实测斜率误差	10.5%	1.18%
温度引起输出波动(MAX)	59 mV	6.2 mV
可测电流范围(2.44V 限幅)	1.25~120 nA	0.58~83 nA

4 结 论

文中基于两款运算放大器芯片进行微弱电流测量电路的设计、制作与测试,测试结果显示两种电路的测量精度和测量范围都达到了光电模块中对 MPD 中微弱电流的测量需求;同时对基于两种芯片的电路的温度稳定性、占用面积、功耗进行了分析,其结果可用于各种光电模块中微弱电流测量电路的选型。

参考文献:

- [1] 李奇.光无线通信系统中光功率实时控制技术[D].武汉:华中科技大学,2007.
- [2] 沈玮栋.激光器光功率监测系统[D].苏州:苏州大学,2015.

(下转第 13 页)

生重复二次目标函数。迭代过程是为了处理最小乘方问题。多种设计实例的给出为了显示设计技术的有效性和灵活性。滤波器的正则性容易替换增加频率响应的清晰度转出。光滑的对称拓展和小波函数容易得到。值得注意,不可分的二维滤波器组可以转换成一维的滤波器组。

参考文献:

- [1] INGLE V K, PROAKIS J G. 数字信号处理 (MATLAB版)[M]. 柳树棠, 陈志刚, 译. 西安: 西安交通大学出版社, 2013.
- [2] ABDUKIRIM T, ROZI A. Design of Dyadic Wavelet Filters With Vanishing Moments Using Dyadic Lifting Scheme. IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent systems, 2011(3):150-222
- [3] 吐尔洪江·阿布都克力木. 小波信号处理基础[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2014.
- [4] 杨松涛. 完全重构滤波器组优化及其在宽带信道化中的应用[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- [5] Tay D B H. Two-stage, least squares design of biorthogonal filter banks using transformations of variable[J]. IEEE Trans. Circuits Systems, 2000(1): 591-594.
- [6] Phoong S M, Kim C W, Vaidyanathan P P, et al. A

new class of two -channel biorthogonal filter banks and wavelet bases[J]. IEEE Trans. Signal Processing, 1995(43):649.

- [7] 任堰牛, 青小渠. FIR半带滤波器的简化结构及其仿真研究[J]. 兵工自动化, 2013(3):53-56.
- [8] 段佳佳, 樊龙龙, 张波涛. 基于MATLAB的FIR滤波器的设计[J]. 电子测试, 2011(8):19-21.
- [9] K. Maleknejad, E. Hashemizadeh, B. Basirat. Computational method based on Bernstein operational matrices for nonlinear Volterra-Fredholm-Hammerstein integral equations [J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2011(1):100-150.
- [10] 韦柳泰. 一种双通带微带滤波器的设计[J]. 电子科技, 2012(6):98-103.
- [11] H. Caglar, A. N. AKansu. A generalized parametric PR-QMF design technique based on Bernstein polynomial approximation, IEEE trans. Signal Processing, 1993(41):2314.
- [12] 周明, 童创明, 付树洪, 等. 一种新颖的小型宽阻带低通滤波器[J]. 电讯技术, 2010(4):74-77.
- [13] Tay D B H. Design of filter-banks/wavelets using TROV: A survey. Digital Signal Processing, 1997, 4(7):229-238.

(上接第9页)

- [3] 卫欢, 余辉, 邵海峰, 等. 硅基光功率检测技术的最新进展[J]. 光通信研究, 2015(6):20-29.
- [4] 余乾顺. 微弱电流检测系统的设计与实现[D]. 兰州: 西北师范大学, 2009.
- [5] 于海洋, 袁瑞铭, 王长瑞, 等. 微电流测量方法评述[J]. 华北电力技术, 2006(11):51-54.
- [6] 汪诚伟, 王彦, 朱业青, 等. 基于DFB激光器的FBG功率解调测温系统实验研究 [J]. 光学与光电技术, 2015, 13(5):23-27.
- [7] 赵杰, 曹凡, 李翔宇. 微弱电流测量电路的设计和仿真[J]. 电子技术, 2009(12):39-41.
- [8] 赵章琰, 李勇滔, 夏洋, 等. 半导体器件测试设备中的微弱电流测量模块设计[J]. 传感器与微系统, 2011, 30(10):115-117.
- [9] 胡涛, 司汉英. 光电探测器前置放大电路设计与研究[J]. 光电技术应用, 2010, 25(1):52-55.
- [10] 周红, 夏勇, 苏建坡, 等. 电分析仪器中的微电流

测量[J]. 分析仪器, 2000(2):20-23.

- [11] 李岩, 宋常青, 侯跃新, 等. 提高微弱电流放大器性能的方法 [J]. 核电子学与探测技术, 2007, 27(5):978-981.
- [12] 王卫勋. 微电流检测方法研的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2007.
- [13] MAXIM. Low-Power, Precision, 4-Bump WLP, Current-Sense Amplifier [EB/OL]. (2014). <http://pdfserv.maximintegrated.com/en/an/AN5761.pdf>.
- [14] Silicon Laboratories. C8051F330/1/2/3/4/5 Mixed-Signal ISP Flash MCU[EB/OL]. (2010). <http://www.silabs.com/support/pages/document-library.aspx?p=MCUs&f=C8051F33x>.
- [15] TEXAS INSTRUMENTS. SINGLE -SUPPLY, RAIL-TO-RAIL OPERATIONAL AMPLIFIERS MicroAmplifier Series[EB/OL]. (2007). <http://www.ti.com.cn/product/cn/OPA4340/technicaldocument>.