光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.04.005

星载高灵敏度平衡光电探测器研究

崔大健[1*]，周　浪[1]，奚水清[1]，任　丽[1]，兰　枫[2]，郭精忠[2]

（1. 重庆光电技术研究所，重庆 400060；2. 西安空间无线电技术研究所，西安 710100）

摘　要： 设计了一种由平衡光电二极管芯片和跨阻放大器混合集成的星载高灵敏度平衡光电探测器。平衡光电二极管芯片采用双 InP-InGaAs 光电二极管单元单片集成的内平衡结构，以降低芯片自身噪声，提高探测器灵敏度。通过 Cadence 仿真软件对集成了正负双向电流输入电路、自动增益控制电路和反相器型输入电路的闭环放大器结构进行了仿真，得到等效噪声功率、带宽和增益三者之间的关系，制作出适配平衡光电二极管芯片的跨阻放大器。搭建 1.55 μm 激光测试系统对研制的探测器进行性能测试，结果显示，其 3 dB 带宽为 1.58 GHz，等效噪声功率密度为 5.96 pW/Hz$^{1/2}$，共模抑制比为 42.04 dB(@DC～1.58 GHz)，在相干激光通信系统中的接收灵敏度达到－61 dBm。

关键词： 平衡光电探测器；高灵敏度；卫星相干光通信

中图分类号： TN929.11　**文章编号：** 1001－5868(2020)04－0480－05

Research on High Sensitivity Balanced Photodetector for Space Application

CUI Dajian[1], ZHOU Lang[1], XI Shuiqing[1], REN Li[1], LAN Feng[2], GUO Jingzhong[2]

（1. Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN;
2. Xi'an Institute of Space Radio Technology, Xi'an 710100, CHN）

Abstract: Designed is an onboard balanced photoelectric detector with high sensitivity, which is composed of a balanced photodiode chip and a trans-impedance amplifier. The balanced photodiode chip adopts the internal balance structure of dual InP-InGaAs photodiode unit to reduce the noise of the chip itself and improve the detection sensitivity. The closed-loop amplifier integrated with positive and negative bi-directional current input circuit, automatic gain control circuit and inverter input circuit was simulated by Cadence software, and the relationship of the equivalent noise power, bandwidth and gain was obtained. Then a tran-resistance amplifier being adaptive to balanced photodiode chip was produced. A 1.55 μm laser test system was set up to test the performance of the developed detector, and the results show that its 3 dB bandwidth of 1.58 GHz, equivalent noise power density of 5.96 pW/Hz$^{1/2}$, and the common-mode rejection ratio of 42.04 dB (@DC～1.58 GHz) are realized, and the receiving sensitivity in the coherent laser communication system reaches －61 dBm.

Key words: balanced photodetector; high sensitivity; satellite coherent communication

0　引言

随着空间相干激光通信技术[1]在长距离星间激光通信中的广泛应用，对其核心器件之一[2-3]——平衡光电探测器的研究也越来越受到重视。平衡光电探测器具有共模噪声抑制特性，可以消除本征激光器的相对强度噪声和二极管自身噪声，从而提升接收信噪比[4]，相较于其他激光探测技术，其探测接收灵敏度提高了 20 dB 左右[5]。

在已知的国外空间相干激光通信技术的报道

收稿日期：2020－03－29.

* 通信作者：崔大健　E-mail：cuidj@cetccq.com.cn

中，空间相干激光通信终端均采用系统配套定制的平衡光电探测器模块，无商用化平衡光电探测器产品。其中，欧洲 EDRS 系统采用了零差相干通信方案[6-7]，利用定制化的光电混合集成平衡光探测器模块，实现最高通信速率 5.6 Gb/s，灵敏度达到 −45 dBm；而国内关于光电混合集成小型化平衡光电探测器的研究还未见报道。

为此，本文设计了一种小型化和高灵敏度星载平衡光电探测器。探测器由平衡光电二极管芯片与跨阻放大器在陶瓷薄膜基板上混合集成而成，并成功应用于空间相干激光通信系统，其实测接收灵敏度达到 −61 dBm。

1　器件设计

平衡光电探测器工作原理如图 1，平衡光电二极管芯片（由对称的光电二极管串联组成）同时接收由前端光混频器输出的 2 路空间光信号（相位相差 180°），将光信号转换为电流信号合成一个端口输出，再经低噪声跨阻放大器（TIA）放大后差分输出，送至后级信号处理电路。

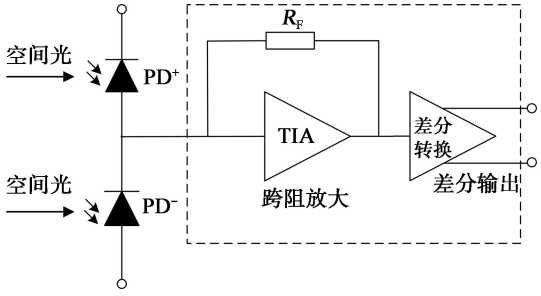


图 1　平衡光电探测器工作原理图

1.1　平衡光电二极管芯片

平衡光电二极管芯片通过采用单片集成双 InP-InGaAs 光电二极管单元的方式实现内平衡结构，保证了芯片两单元参数的对称一致性，如图 2 所示。

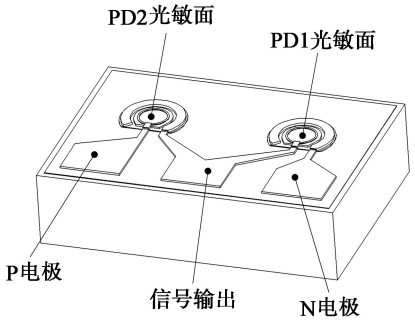


图 2　平衡光电二极管芯片结构图

相干激光通信工作波长为 1.55 μm，因此平衡光电二极管芯片单元采用正入光、半绝缘衬底（SI-InP）台面型 InP/InGaAs/InP 双异质结 pin 结构，如图 3 所示。该结构既能实现隔离保护，降低光电信号的串扰，又能有效降低芯片寄生电容，提高器件的响应频率。

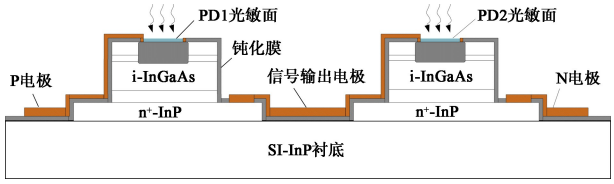


图 3　平衡光电二极管芯片剖面图

设计的平衡光电二极管芯片主要结构参数为：单元光敏面直径为 45 μm，InGaAs 吸收层厚度为 2.5 μm；采用平面和台面相结合的工艺，包括介质膜淀积、光刻、扩散掺杂、金属电极蒸发、剥离、减薄抛光、合金等工序，完成芯片制备。性能测试分析得出芯片响应度为 0.95 A/W，3 dB 带宽为 10 GHz，响应度不一致性为 0.02 dB，饱和光功率为 11 dBm，电容为 0.25 pF。

1.2　跨阻放大器芯片

根据平衡光电探测器工作需求，定制化设计 1 GHz 跨阻放大器，整体设计方案框图如图 4 所示。

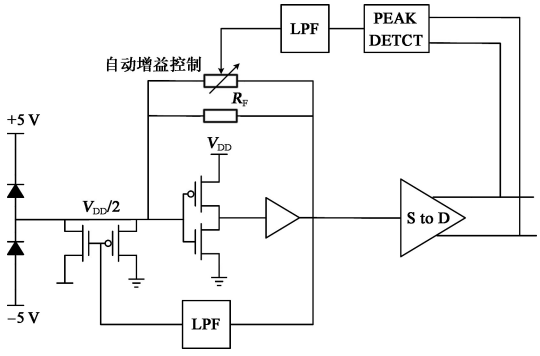


图 4　放大器整体设计方案框图

跨阻放大器芯片集成了正负双向电流输入电路、自动增益控制电路和反相器型输入电路等电路。正负双向电流输入电路[8]可以稳定探测器和放大器的偏置，提高直流光动态范围；自动增益控制电路可以根据光强调节放大器增益，提高放大器交流光动态响应范围；输入端的反相器型输入电路，可以提高放大器对正负信号响应的一致性和灵敏度[9]。

跨阻放大器核心部分采用闭环放大器结构，如图 5 所示。闭环放大器的反馈环使输入节点交流接地，使得输入电流流向反馈电阻，并通过反馈电阻把

电流信号转化为电压信号。相比于低噪声放大器与开环放大器，闭环放大器的噪声和信号具有两种不同的转换增益，进而可以通过噪声的增益小于信号的增益来获得更高的信噪比。

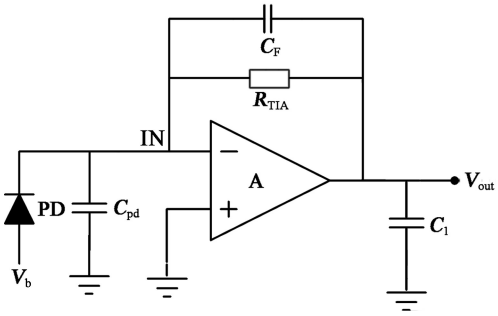


图 5 闭环放大器原理图

闭环放大器噪声模型如图 6 所示，C_{pd} 是放大器输入端的总电容，A 是电压放大器 A 的直流增益，$R_{out,A}$ 是电压放大器 A 的输出阻抗，C_l 是放大器的负载电容。闭环放大器的传递函数为

$$Z_{TIA}=R_{TIA}/((1+j2\pi fR_{TIA}C_{pd}/A)\times(1+j2\pi fR_{out,A}C_l)) \quad (1)$$

根据式(1)，可以推导出闭环放大器的增益约等于 R_{TIA}，−3 dB 带宽等于 $A/2\pi R_{TIA}C_{pd}$。

闭环放大器的输入等效噪声电流近似为

$$i_{n,in,rms}=(kT(Ag_mR_{TIA}^2R_{out,A}C_lC_{pd}+g_mR_{TIA}\cdot R_{out,A}^2C_{pd}^2-A^2g_mR_{TIA}R_{out,A}^2C_l^2-Ag_mR_{out,A}^3\cdot C_lC_{pd}+\gamma A^2R_{TIA}^2C_{pd}^2+\gamma AR_{TIA}R_{out,A}C_lC_{pd}-\gamma A^3R_{TIA}R_{out,A}C_lC_{pd}-\gamma A^2R_{out,A}^2C_l^2)/(R_{TIA}^2C_{pd}^2-A^2R_{out,A}^2C_l^2)(g_mR_{TIA}^2R_{out,A}C_l))^{1/2} \quad (2)$$

其中，g_m 是电压放大器 A 的输入跨导，γ 是热噪声系数，k 是玻尔兹曼常数，T 是绝对温度。

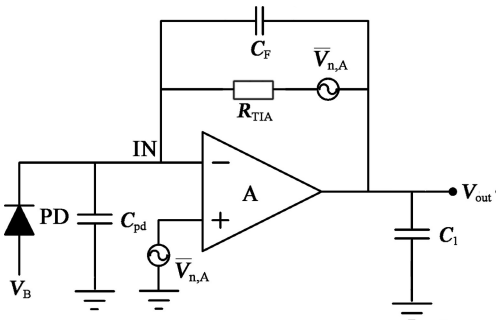


图 6 闭环放大器噪声模型

根据式(1)和(2)，采用 Cadence 软件对闭环放大器模型进行仿真，其等效噪声功率密度仿真结果如图 7 所示，在 1 GHz 处，等效噪声功率密度 $I_N\approx 6.9\ pA/Hz^{1/2}$。

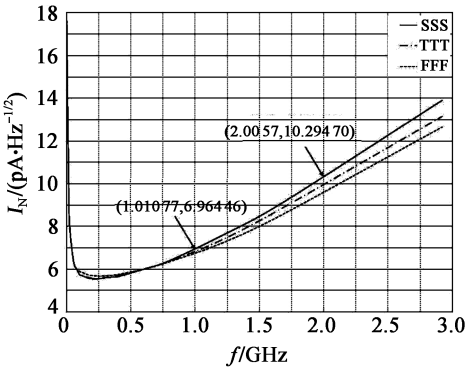


图 7 放大器在三种不同工艺角下的噪声仿真曲线

跨阻放大器在设计中增加的自动增益控制模块，会通过检测输出差分摆幅，产生自动增益控制的控制电压 V_C，以调节放大器的增益，但是也会影响放大器的带宽和输入等效噪声功率。因此，在仿真模型中加入正负双向电流输入电路、自动增益控制电路和反相器型输入电路，分析增益 G、带宽 BW 与输入等效噪声功率 I_n 随控制电压 V_C 的变化情况，仿真结果如图 8 所示。由图可知，增益随控制电压 V_C 的变大而变小，所以通过增益控制可以有效提高放大器的动态范围；同时，带宽和等效噪声功率均随控制电压 V_C 的变大而变大，表明放大器的带宽和等效噪声功率会随放大器的自动增益调节而变化，并且在增益的自动调节范围内，放大器带宽大于等于 1.3 GHz，等效噪声功率小于等于 574 nA(即等效噪声功率密度为 10.4 pA/Hz$^{1/2}$@3 GHz)。

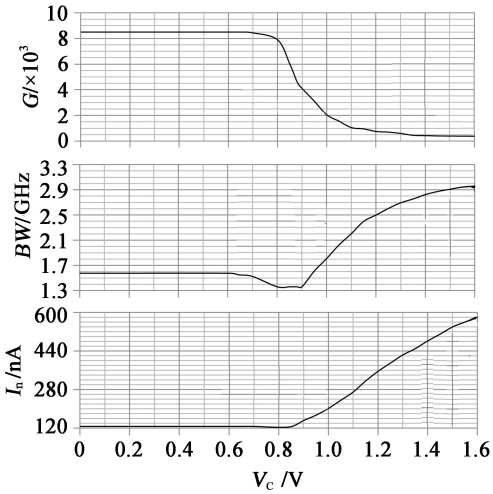


图 8 放大器增益、带宽与等效噪声功率随 V_C 的变化曲线

已知光电二极管芯片的响应度 $R_{e,pd}=0.95$ A/W，经计算得到最终平衡光电探测器的总等效噪声功率密度 $I_N\approx 10.9\ pW/Hz^{1/2}$@3 GHz，满足

星载激光通信系统应用需求。

1.3 光电混合集成

平衡光电探测器主要由平衡光电二极管芯片、跨阻放大器芯片、射频陶瓷电路基板、金属化光纤、SSMA 连接器、气密金属腔体组成。采用光电混合集成工艺，将平衡光电二极管芯片、跨阻放大器芯片混合集成在射频陶瓷电路基板上，以缩小器件体积，提高探测器性能；采用铅锡焊工艺进行光纤同轴耦合封装，并在氮气氛围中采用平行缝焊工艺进行气密性封盖，以保证平衡光电探测器的长期可靠性。

该平衡探测器相比于传统分立器件组装方案，具有明显集成小型化优势，外形尺寸长×宽×高约为 18 mm×16 mm×8 mm。

2 性能测试

2.1 器件性能测试

如图 9 所示，采用矢量网络分析仪搭建测试系统，对平衡光电探测器的 3 dB 带宽、共模抑制比等关键技术指标进行测试。

试验结果如图 10 所示，平衡光电探测器在高增益工作模式下，3 dB 带宽为 1.58 GHz，共模抑制比 $CMRR \geqslant 42.04$ dB(@DC～1.58 GHz)。由于受器件中跨阻放大器带宽的限制，器件 3 dB 带宽小于平衡光电二极管芯片 3 dB 带宽。高共模抑制比表明该平衡光电探测器具有高共模信号抑制特性、高信噪比和高灵敏度。

采用示波器对器件的等效噪声功率密度 I_N、转换增益等参数指标进行测试。设置示波器的带宽为 1 GHz，采样速率为 5 Gb/s。测得示波器噪底 V_{RMS0} 为 141 μV，在高增益模式下，平衡光电探测器 RMS 噪声幅度 V_{RMS1} 为 670 μV，输出幅度 V_{out} 为 55.3 mV(@输入光功率 $P_{in}=10$ μW)。

$$G = V_{out}/2P_{in} \tag{3}$$

通过式(3)计算出平衡光电探测器的转换增益为 2.8 kV/W。

$$I_N = V_{RMS}/(G \cdot (BW)^{1/2}) \tag{4}$$

其中，$V_{RMS}=(V_{RMS1}^2 - V_{RMS0}^2)^{1/2}$，再由式(4)，可计算出平衡光电探测器的等效噪声功率密度 I_N 为 5.96 pW/Hz$^{1/2}$。

将该试验测试结果与模拟仿真结果进行对比，在相同增益下(即增益为 2.8 kV/W)，对比结果如表 1 所示。

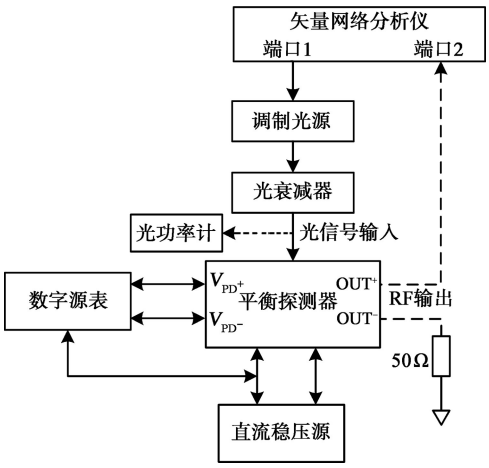
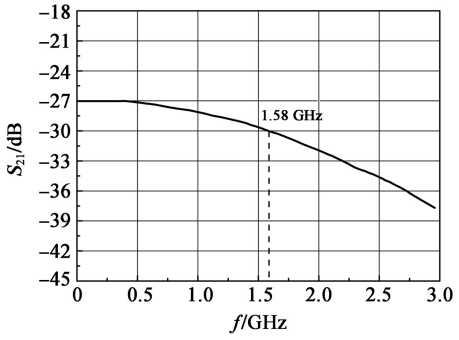
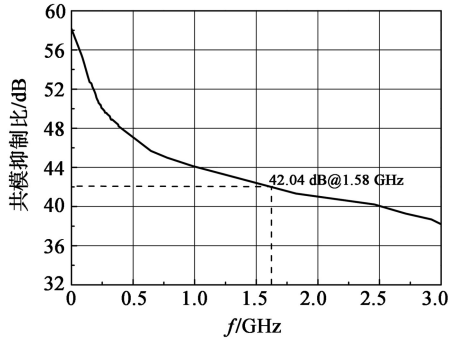


图 9　测试框图



(a)　3 dB 带宽



(b)　共模抑制比

图 10　试验结果

表 1　试验测试结果与模拟仿真结果对比表

参数	增益/(kV·W^{-1})	3 dB 带宽/GHz	等效噪声功率密度 I_N/(pW·Hz$^{-1/2}$)
模拟仿真	2.8	1.66	4.65
试验测试	2.8	1.58	5.96

从表 1 中可以发现，平衡光电探测器的实测值略低于模拟值，这是光电混合集成中引入的匹配电路和输出电路造成的；但是平衡光电探测器的整体参数指标符合设计要求。

2.2 系统验证测试

图 11 所示为平衡光电探测器在空间相干激光

通信系统终端中的典型应用实例，平衡光电探测器将混频器与本振光相干混频的光信号进行光电转换及放大，并送至后级高速采集处理电路进行解调译码等相关处理。

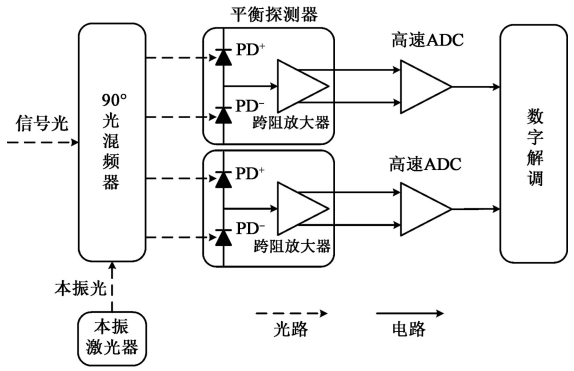


图 11 平衡探测器典型应用实例

经过用户试验测试，其灵敏度测试曲线如图 12 所示，在不同误码率和 1 Gb/s 通信速率测试条件下，接收灵敏度达到－61 dBm，相对于理论值[10]，其总损失约为 2.5 dB，这是由于光混频器损耗约 1 dB、平衡探测器损耗约 0.7 dB，数字处理损耗约 0.8 dB。平衡光电探测器的等效噪声功率密度为 5.96 pW/$Hz^{1/2}$，与相干接收机的本振光功率带来的散粒噪声 56 pW/$Hz^{1/2}$ 相比，对灵敏度的影响较小，可以忽略。同时，该平衡光电探测器已通过辐照试验考核并成功实现批量空间应用。

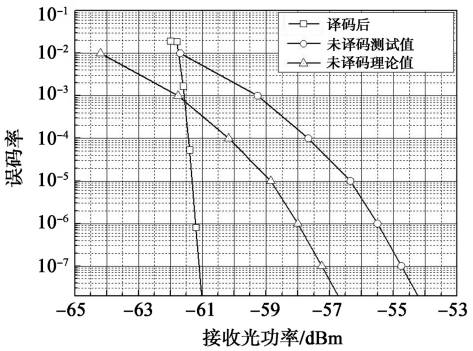


图 12 系统灵敏度测试曲线

综上所述，该平衡光电探测器满足长距离星间激光通信系统的应用要求。

3 结论

本文研制了由平衡光电二极管芯片和跨阻放大器进行光电混合集成的星载高灵敏度平衡光电探测器。通过在平衡二极管芯片中采用双 InP-InGaAs 光电二极管单元单片集成的内平衡结构和仿真设计，集成了正负双向输入电流方案、自动增益控制模块和反相器型输入电路的跨阻放大器，降低了探测器的噪声，提高了信噪比、带宽和增益，解决了星载平衡光电探测器探测接收灵敏度低的问题。经实际测试，探测器共模抑制比达 42.04 dB 以上，3 dB 带宽为 1.58 GHz，转换增益为 2.8 kV/W，输入噪声等效功率密度为 5.96 pW/$Hz^{1/2}$，在相干激光通信系统中的接收灵敏度达到－61 dBm。

参考文献：

[1] Chan V W S. Free-space optical communications [J]. J. Lightwave Technol., 2007, 24(12): 4750-4862.

[2] Li Guifang. Recent advances in coherent optical communication[J]. Advances in Opt. and Photon., 2009(1): 279-307.

[3] Clark T R, Dennis M L. Coherent optical phase-modulation link[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2007, 19(16): 1206-1208.

[4] Zhuang L, Roeloffzen C G H, Meijerink A, et al. Novel ring resonator-based integrated photonic beamformer for broadband phased array receive antennas-part Ⅱ: experimental prototype [J]. J. Lightwave Technol., 2010, 28(1): 19-31.

[5] 刘宏阳，张燕革，艾 勇，等. 用于相干光通信的平衡探测器的设计与实现[J]. 激光与光电子学进展，2014，51(7)：23-29.
Liu Hongyang, Zhang Yange, Ai Yong, et al. Design and implementation of balance detector used in coherent optical communication system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(7): 23-29.

[6] Heine F, Kmpfner H, Lange R, et al. Laser communication applied for EDRS, the European data relay system[J]. Ceas Space J., 2011, 2(1/4): 85-90.

[7] Lange R, Smutny B. BPSK laser communication terminals to be verified in space [C]// Proc. IEEE Military Communications Conf., 2004.

[8] Shahdoost S, Medi A, Saniei N. Design of low-noise transimpedance amplifiers with capacitive feedback [J]. Integrated Circuits & Signal Proc., 2016, 86(2): 233-240.

[9] Ngo T H, Kim C H, Kwon Y J, et al. Wideband receiver for a three-dimensional ranging LADAR system[J]. IEEE Trans. on Circuits & Systems Ⅰ Regular Papers, 2013, 60(2): 448-456.

[10] Kikuchi K, Tsukamoto S. Evaluation of sensitivity of the digital coherent receiver[J]. J. of Lightwave Technol., 2008, 26(13): 1817-1822.

作者简介：

崔大健(1982－)，男，硕士研究生，高级工程师，主要从事光电子器件的研究。