光子和光电子集成专题

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022022101

基于混合集成的高增益光接收模块

孙　博[1,2]，赵泽平[1,2]，刘建国[1,2*]

（1. 中国科学院半导体研究所 光电子研究发展中心，北京 100083；
2. 中国科学院大学 材料科学与光电技术学院，北京 100049）

摘　要： 针对光载无线通信(RoF)系统对高增益、小型化光接收模块(ROSA)的需求，基于混合集成技术，设计并制作了一种高增益的四通道 ROSA 器件，尺寸为 20.0 mm×14.0 mm×5.9 mm。模块内集成了低噪声放大器(LNA)芯片以提高射频信号增益，建立了射频信号传输电路，并对器件特性进行了仿真分析。经测试，器件的射频信号增益达 14 dB，－3 dB 带宽为 23 GHz，在 1 550 nm 波长的入射光下，器件的响应度为 0.81 A/W，相邻信道之间的射频信号串扰小于－40 dB。该模块对于减小 RoF 系统的体积和功耗具有重要意义。

关键词： 光接收模块；光电探测器；低噪声放大器；增益；低串扰

中图分类号： TN36　**文章编号：** 1001－5868(2022)02－0243－04

High Gain Receiver Optical Subassembly Based on Hybrid Integration Technology

SUN Bo[1,2], ZHAO Zeping[1,2], LIU Jianguo[1,2]

(1. State Key Lab. of Integrated Optoelectron., Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, CHN;
2. College of Materials Science and Opto-Electronic Technol., University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN)

Abstract: To meet the requirements of a high-gain and miniaturized receiver optical subassembly (ROSA) for radio over fiber (RoF) systems, a four-channel ROSA device with a size of 20.0 mm×14.0 mm×5.9 mm is designed and fabricated based on hybrid integration technology. Low noise amplifier (LNA) chips are integrated into the module to improve the radio frequency (RF) signal gain, and the RF signal transmission circuit is established to simulate the performance of the device. The RF signal gain of the device is 14 dB, the －3 dB bandwidth of the device is 23 GHz, and the responsivity of the device is 0.81 A/W at the incident light wavelength of 1 550 nm. The crosstalk of RF signals between adjacent channels is less than －40 dB. This module has important significance for reducing the volume and power consumption of the RoF system.

Key words: receiver optical subassembly; photodetector; low noise amplifier; gain; low crosstalk

0　引言

无线通信业务的快速发展，迫切需要提高传输速率和传输容量，光载无线通信(RoF)技术应运而生[1-4]。在 RoF 系统中，光收发模块是核心组件之一，通信系统的不断发展要求光模块在满足高带宽的同时，实现低损耗和小型化[5-8]。混合集成技术是实现器件小型化的关键技术之一，通过将不同功能的器件组装在一个小型管壳中，可以在减小封装模块尺寸的同时提升器件性能，例如，将激光器芯片、光放大器芯片、微波电路和聚焦透镜集成到光发射

收稿日期：2022－02－21.
基金项目：国家自然科学基金项目(61727815,61731014).
* **通信作者：**刘建国　**E-mail：**jgliu@semi.ac.cn

模块中[9-10]，或者将探测器芯片和解复用器集成到光接收模块中[11]。目前，在光器件的混合集成领域已取得了很多成果。2011 年，日本 NTT 光学实验室研制了一种小型光发射模块，设计了一种新型的射频电路板，采用桥式结构，以实现更小的尺寸，尺寸为 8.1 mm×12 mm×20 mm[12]。2013 年，该研究团队研制出第一个可用于 100 G 以太网的光发射模块，设计了一个由垫片支撑的三维射频电路板，模块体积仅为 1.82 cm^2[13]。2018 年，安俊明团队研制出 4×20 GHz 的光接收模块，将硅基阵列波导光栅芯片集成到器件中，实现了波导光栅和探测器芯片之间的高效耦合[14]。2019 年，刘建国团队将跨阻放大器芯片和光电探测器阵列芯片集成，研制出一种结构紧凑的四通道光接收模块，尺寸为 23.3 mm×6.0 mm×6.5 mm[15]。2020 年，Yang 团队将全差分结构的跨组放大器和平衡探测器集成，应用到直接探测中，降低了系统的误码率[16]。

在传统无线通信系统中，为提高射频信号增益，常常在射频接收机前端接入一个低噪声放大器，导致系统体积和功耗增加。为改善这一问题，本文基于混合集成技术，设计并制作了一种四通道光接收模块(ROSA)，将低噪声放大器(LNA)芯片集成到 ROSA 中，实现光电信号的转化和放大输出。并建立射频信号传输电路对模块结构进行了仿真设计。测试结果表明，制作出的器件，性能参数符合仿真结果，满足射频通信需求。

1 仿真与设计

在 Advanced Design System(ADS)软件中建立 ROSA 模块的射频信号传输电路，如图 1 所示。红色虚线内为探测器芯片的本征电路，利用电压控制电流源(VCCS)模型表示光生电流，即 $I=G_0\cdot V_{RF}$[17]，G_0 表示探测器芯片的量子效率，C_j 和 R_j 分别表示有源区的结电容和结电阻，R_b 表示非耗尽层电阻，C_a 表示金属电极接触电容，R_0 表示源阻抗，其值为 50 Ω。LNA 采用天津中科海高微波技术有限公司提供的HGC362H芯片，探测器芯片与 LNA 芯片通过射频信号传输线连接。在探测器芯片的本征电路后端接入射频信号线和 LNA 芯片的 S2P 模型，电路的输入端口和输出端口分别接入 50 Ω 负载，以满足阻抗匹配。

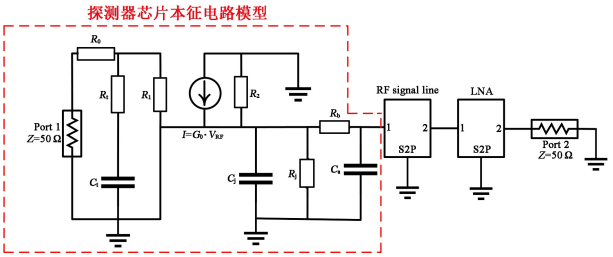
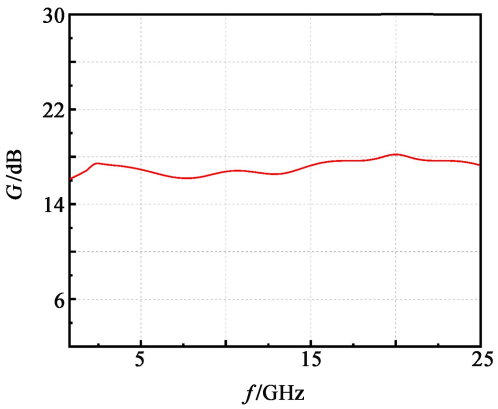
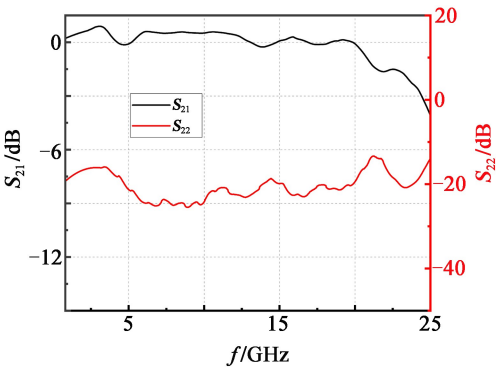


图 1 ROSA 模块射频信号传输电路

对射频信号传输电路进行仿真计算，射频信号的增益约为 16～18 dB，如图 2(a)所示。传输损耗和回波损耗如图 2(b)所示，传输损耗用 S_{21} 曲线表示，从 S_{21} 曲线可知，ROSA 模块的－3 dB 带宽约为 24 GHz，回波损耗用 S_{22} 曲线表示，回波损耗为－20～－10 dB。由以上分析可知，将 LNA 芯片接入 ROSA 模块之中，可以有效提高射频信号增益，并实现 24 GHz 的－3 dB 带宽，回波损耗小于－10 dB，满足应用需求。



(a) 射频信号增益

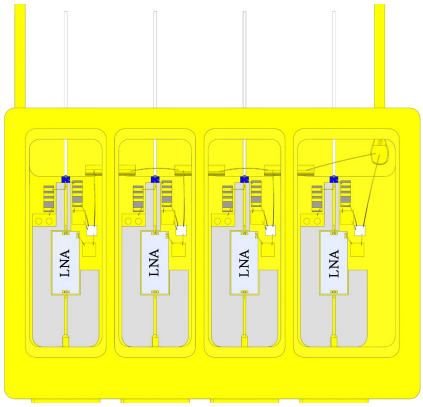


(b) 传输损耗和回波损耗

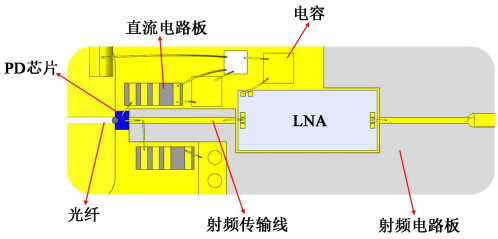
图 2 ADS 仿真结果

本文设计的 ROSA 模块整体结构如图 3(a)所示，管壳采用可伐合金材料，模块被分隔成四个腔室以降低射频信号串扰。如图 3(b)所示，每个腔室包含独立的光纤、PIN 探测器芯片、LNA 芯片、射频电路板和直流电路板。射频电路板用于传输射频信号，直流电路板为探测器芯片提供 5 V 的工作电压

和 50 Ω 阻抗匹配。芯片和电路通过金丝连接。光通过光纤传输至探测器芯片表面，光信号被转换成射频信号，通过射频电路板传输，然后由 LNA 芯片进行放大输出。



(a)　整体结构



(b)　单路结构

图 3　ROSA 模块结构

在 High Frequency Structure Simulator (HFSS)电磁仿真软件中对图 3 所示的管壳结构进行仿真，相邻通道间射频信号串扰在 0～40 GHz 频率范围内小于－40 dB，如图 4 所示，可以看出，其电磁屏蔽效果良好。

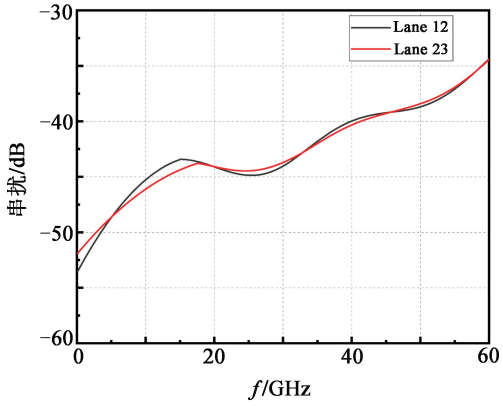


图 4　相邻通道间射频信号串扰

2　测试与分析

ROSA 模块的照片如图 5 所示，其尺寸为 20.0 mm×14.0 mm×5.9 mm。对 ROSA 模块进

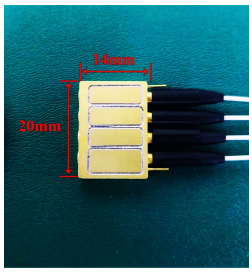


图 5　ROSA 照片

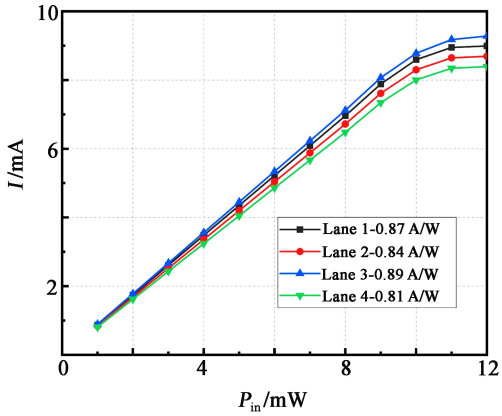
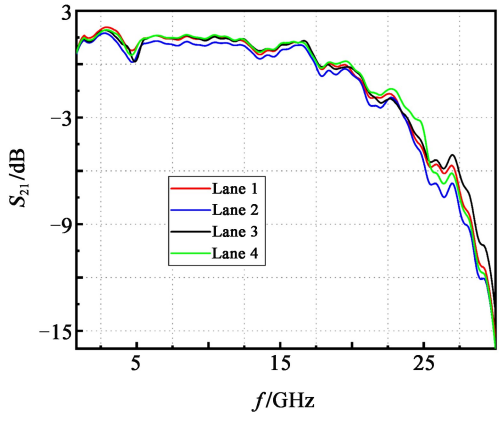
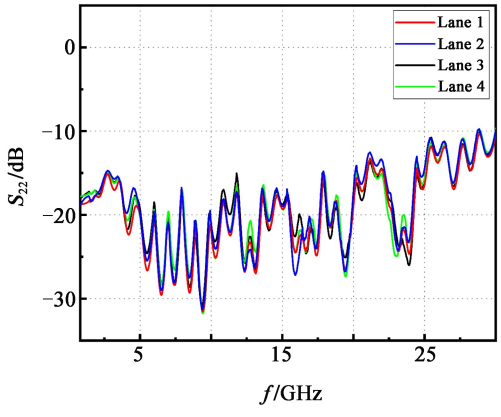


图 6　ROSA 模块响应度测试



(a)　S_{21} 曲线

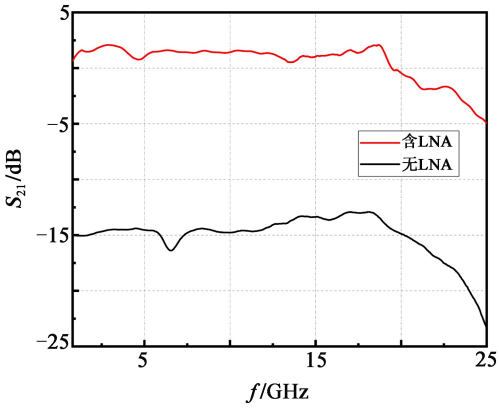


(b)　S_{22} 曲线

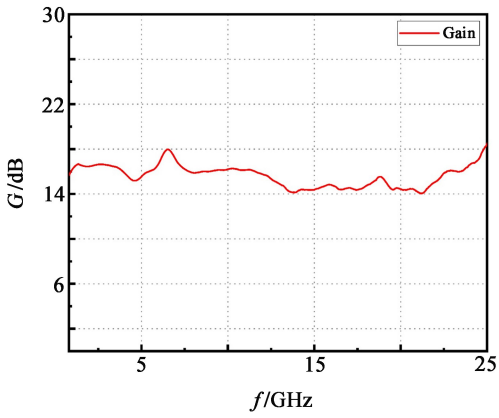
图 7　ROSA 模块的传输损耗和回波损耗测试

行性能参数测试，信号光波长为 1 550 nm，工作电压为＋5 V。各通道响应度如图 6 所示，分别为 0.87，0.84，0.89，0.81 A/W，光电转换效率满足 RoF 系统的要求。ROSA 模块的传输损耗如图 7(a)所示，四路通道保持了良好的一致性。每个通道的－3 dB 带宽约为 23 GHz，覆盖了 L-Ku 波段，与仿真结果接近。模块的回波损耗如图 7(b)所示。在 0～30 GHz 范围内，回波损耗小于－10 dB，阻抗匹配良好。

射频信号增益如图 8 所示，集成了 LNA 芯片的 ROSA 模块，与无 LNA 的探测器模块相比，射频信号增益约为 14～18 dB，满足射频放大的需求。仿真模型是一个简化的理想模型，没有考虑封装过程中金丝引入寄生参数的影响，因此当频率大于 10 GHz 时，射频信号增益的测试值略小于仿真值。



(a) S_{21} 曲线



(b) 增益曲线

图 8 射频信号增益测试结果

如图 9 所示，本文设计的封装结构很好地抑制了射频信号串扰，在 0～30 GHz 范围内，相邻通道间的射频信号串扰小于－40 dB，符合仿真结果。

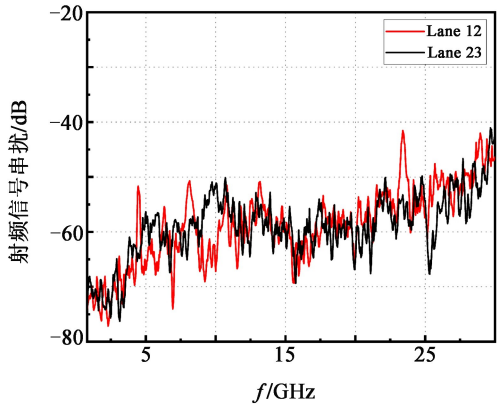


图 9 相邻通道间的射频信号串扰

3 结论

本文基于光电集成技术，设计了一种四通道高增益的 ROSA 模块，通过在 ROSA 模块中集成 LNA 芯片来提高射频信号增益，并建立射频信号传输电路验证了其可行性。经测试，器件射频信号增益达 14 dB，－3 dB 带宽达 23 GHz，响应度达 0.81 A/W。在实现小型化的同时，将相邻信道之间的射频信号串扰降低到－40 dB 以下。该器件可有效减小通信系统体积、降低功耗，除用于无线通信系统外，还可用于其他射频系统，如远程天线、卫星天线、雷达系统等。

参考文献：

[1] Luo Biao, Wang Renfan, Hu Hai, et al. Review of RoF core technologies[J]. Science & Technology Review, 2016, 34(16): 45-53.

[2] Shivika R, Rakesh G. A review on radio-over-fiber technology-based integrated (Optical/Wireless) networks[J]. J. of Optical Communications, 2017, 38(1): 19-25.

[3] Zhang Xiupu. Broadband linearization for 5G fronthaul transmission[J]. Frontiers of Optoelectronics, 2018, 11(2): 107-115.

[4] He J Y, Lee J, Sithamparanathan K, et al. Machine learning techniques in radio-over-fiber systems and networks [J]. Photonics, 2020, 7(4): 105-135.

[5] Chen N, Minoru O. Toward 6G internet of things and the convergence with RoF system[J]. IEEE Internet of Things J., 2021, 8(11): 8719-8733.

[6] David Z B, Gabriel C, Ivan A, et al. Impact of partial phase decorrelation on the performance of pilot-assisted millimeter-wave RoF-OFDM systems [J]. Physical Communication, 2018, 26: 106-115.

[7] Ahmadreza F, Wang Y, Reza M, et al. A review of wireless-photonic systems: design methodologies and topologies,

constraints, challenges, and innovations in electronics and photonics[J]. Optics Communications, 2016, 373: 16-34.

[8] Vishal S, Amarpal S, Sharm A K. Challenges to radio over fiber (RoF) technology and its mitigation schemes-A review [J]. Optik, 2012, 123(4): 338-342.

[9] Zhang Zhike, Liu Yu, An Junming, et al. 112 Gbit/s transmitter optical subassembly based on hybrid integrated directly modulated lasers[J]. Chinese Optics Lett., 2018, 16 (6): 062501.

[10] Shigeru K, Takeshi F, Nobuhiro N, et al. Ultra-compact 100 GbE transmitter optical subassembly for 40 km SMF transmission[J]. J. of Lightwave Technol., 2013, 31(4): 602-608.

[11] Park K, Lee G D, Lee S N, et al. Compact size and low cost hermetic sealed 100 Gb/s (25 Gb/s×4 Ch) receiver optical sub-assembly (ROSA) design using AIN substrate and Si optical bench (SiOB) cover[C]// 2017 European Conf. on Optical Communication (ECOC), 2017: 1-3.

[12] Shigeru K, Takeshi F, Akira O, et al. A compact EADFB laser array module for a future 100 Gb/s ethernet transceiver [J]. Quantum Electron., 2011, 17(5): 1191-1197.

[13] Takeshi F, Toshio I, Shigeru K, et al. Ultracompact, 160 Gbit/s transmitter optical subassembly based on 40 Gbit/s×4 monolithically integrated light source[J]. Opt. Express, 2013, 21(1): 182-189.

[14] Li Chaoyi, An Junming, Zhang Jiashun, et al. 4×20 GHz silica-based AWG hybrid integrated receiver optical sub-assemblies[J]. Chinese Optics Lett., 2018, 16(6): 060603.

[15] Zhao Zeping, Wang Jiaojiao, Han Xueyan, et al. Ultra-compact four-lane hybrid-integrated ROSA based on three-dimensional microwave circuit design[J]. Chinese Optics Lett., 2019, 17(3): 030401.

[16] Yang H, Ke L, Cosimo L, et al. High-speed DD transmission using a silicon receiver co-integrated with a 28 nm CMOS gain-tunable fully-differential TIA[J]. J. of Lightwave Technol., 39(4): 1138-1147.

[17] Wang G, Tokumitsu T, Hanawa I, et al. Analysis of high speed p-i-n photodiode S-parameters by a novel small-signal equivalent circuit model[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Lett., 12(10): 378-380.

作者简介：

孙　博(1996—)，男，河北省人，硕士研究生，主要研究方向为微波光子系统和光电器件；

赵泽平(1990—)，女，河北省人，博士，助理研究员，主要研究方向为高速光电探测器、光纤通信技术、高速微波封装设计和阵列混合集成；

刘建国(1975—)，男，内蒙古自治区人，博士，研究员，教授，主要研究方向为应用光学。