

光平衡探测器研究进展和发展趋势分析

王姣姣^{1,2**}, 赵泽平^{1,2}, 刘建国^{1,3*}¹中国科学院半导体研究所集成光电子国家重点实验室, 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;³中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 100049

摘要 平衡相干检测技术能够大幅度提高光通信系统的灵敏度,在相干光通信和微波光子系统中得到广泛应用。作为相干检测的核心器件,平衡探测器近年来已成为研究热点。阐述了平衡探测器的工作原理、器件结构和性能参数,概述了平衡探测器的最新研究进展,并对平衡探测器发展过程中存在的问题和发展趋势进行了分析。随着光通信技术的发展,平衡探测器将在高速率、高射频功率、高响应度和高共模抑制比等方面不断优化,封装模块将朝着高集成度、低成本和低功耗方向发展。

关键词 光通信; 相干光通信; 平衡探测器; 波导集成; 单片集成; 混合集成

中图分类号 TN929.14

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.100001

Research Progress and Development Trend of Balanced Photodetectors

Wang Jiaojiao^{1,2**}, Zhao Zeping^{1,2}, Liu Jianguo^{1,3*}¹ State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;² School of Materials Science and Optoelectronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;³ School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Balanced coherent detection technology is widely used in coherent optical communication and microwave photonic systems because the sensitivity can be significantly improved by the technology. Balanced photodetector, as a key device for coherent detection, has been the workhorse of research in recent years. This paper introduces the principle, structure and some parameters of balanced photodetectors and provides an overview on recent advances of the device, with analysis on current problems and development trends. With the development of optical communication technology, the performance of balanced photodetectors will be promoted in terms of speed, responsivity, radio frequency power, and common mode rejection ratio. Moreover, the package module should be highly integrated, with lower cost and lower power consumption in the future.

Key words optical communications; coherent optical communication; balanced photodetector; waveguide integration; monolithical integration; hybrid integration

OCIS codes 060.1660; 030.1640; 040.5160; 250.0040

1 引言

近年来,随着互联网络和通信网络的不断发展,人们对信息交流的需求越来越高,对传输网络带宽

提出了更高的要求,促使光纤通信向长距离、高速率、大容量方向发展。相干光通信凭借灵敏度高、中继距离长、选择性好、通信容量大、可采用多种调制方式等优势成为现代光通信的研究热点。平衡探测

收稿日期: 2018-03-19; **修回日期:** 2018-04-20; **录用日期:** 2018-04-25

基金项目: 国家自然科学基金(61527820,11674313,61535014,61727815,61625504)、国家科技部 973 与重点研发计划(2017YFF0104601,2014CB340102)

* **E-mail:** jgliu@semi.ac.cn; ** **E-mail:** wjj16@semi.ac.cn

器作为相干光通信系统的一部分,在高级调制格式的长距离光纤通信链路中起到至关重要的作用。高级调制格式,如差分相移键控(DPSK),因其能够实现高效稳定的链路性能,且相对于传统的二进制启闭键控(OOK)调制可以提高 3 dB 灵敏度,获得了越来越多的关注^[1-3]。平衡探测器因其高灵敏度和低噪声的优点,广泛应用于空间光通信中。近年来,欧洲多国、美国、日本先后在飞行平台、卫星平台等空间平台上进行了空间相干光通信技术的研究,并成功搭建了空间相干光通信链路^[4-6]。此外,平衡探测器能够抑制激光器的相对强度噪声和掺铒光纤放大器(EDFA)中的自发辐射噪声,在模拟光链路和微波光子系统中也得到广泛应用^[7-8]。

在平衡探测器技术研究方面,西欧、北美、东亚区域多个国家都投入了相当的力量。近年来以集成为主,在射频输出功率、饱和光电流、带宽和共模抑制比等方面卓有成效。集成包括单片集成和混合集成,单片集成以 Si 和 InP 材料为主要平台,混合集成包括 SiO₂ 平台和聚合物波导平台。单片集成和混合集成技术有各自的优势,相信未来这两种集成技术将以互补的方式相互融合,实现高性能的集成平台。同时高集成度、低损耗的平衡探测器也会在光通信和微波光子系统中发挥重要的作用。

本文分三部分对平衡探测器进行阐述,分别介

绍平衡探测器的工作原理和性能参数,目前平衡探测器的封装结构分类,以及平衡探测器的发展历史和研究热点,并对存在的问题及发展趋势进行重点分析。

2 工作原理及性能参数

2.1 工作原理

相干光通信技术可以获得 10 dB~25 dB 的转换增益^[9],得到频率和相位的全部信息,有利于微弱信号的检测,但在相干检测中,本振激光器的相对强度噪声(RIN)、光电二极管的散粒噪声、信道传输引入的噪声以及电路的热噪声等对相干解调灵敏度的影响仍无法消除^[10-11]。为了更好地使用本振激光器功率,消除或抑制数字光通信中产生的 RIN 和信道噪声,提出了基于相干探测的平衡探测技术。在相干光通信中,平衡探测器采用双光电二极管接收光信号、抑制或消除信号中的共模噪声,是相干光通信的核心器件之一。平衡探测器由两个并联的反向偏置的光电二极管组成,两个光电二极管生成的电流作减法运算。图 1 为单管探测和平衡探测的结构图,信号光与本振光经过分光棱镜进行相干混频后,直接由一个光电探测器进行探测为单管探测;信号光与本振光通过 180°光混频器进行相干混频得到的两束光,分别由两个光电探测器进行探测则为平衡探测。

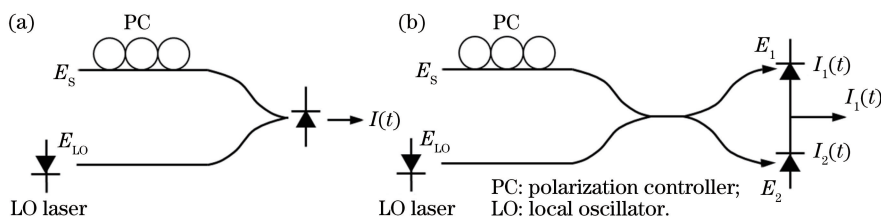


图 1 (a)单管探测和(b)平衡探测结构图

Fig. 1 Schematics of (a) the single photodetector and (b) the balanced photodetector

调制后的光信号和接收端的本振光可表示为

$$E_s(t) = A_s(t) \exp(j\omega_s t + j\theta_s), \quad (1)$$

$$E_{LO}(t) = A_{LO}(t) \exp(j\omega_{LO} t + j\varphi), \quad (2)$$

式中: $A_s(t)$ 为信号光的幅度; $A_{LO}(t)$ 为本振光的幅度; ω_{LO} 为对应的角频率; θ_s 为信号光的瞬时相位; φ 为本振光的瞬时相位。经过单个光电探测器(PD)后,电流可分别表示为

$$I(t) = \frac{R}{2} [E_s(t) + E_{LO}(t)] [E_s(t) + E_{LO}(t)]^* =$$

$$\frac{R}{2} [P_s(t) + P_{LO}(t) +$$

$$2\sqrt{P_s(t)P_{LO}(t)} \cos(\omega_{IF} t + \theta_s - \varphi)], \quad (3)$$

式中: $P_s(t)$ 为信号光功率; $P_{LO}(t)$ 为本振光功率; $\omega_{IF} = |\omega_{LO} - \omega_s|$ 为两个频率差的绝对值; R 为探测器的响应度。

经过 180°耦合器,即上下臂光场分别为

$$E_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} [E_s(t) + E_{LO}(t)], \quad (4)$$

$$E_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} [E_s(t) - E_{LO}(t)]. \quad (5)$$

采用平衡探测结构后,接收电信号可以表示为

$$I(t) = I_1(t) - I_2(t) =$$

$$2R \sqrt{P_s(t)P_{L0}(t)} \cos(\omega_{IF} + \theta_s - \varphi)。 \quad (6)$$

对比(3)式和(6)式可见,平衡探测消除了信号中的直流分量,对共模信号起到抑制作用,抑制了本振光的噪声,并且射频信号的能量提高了 3 dB,进而提高了探测灵敏度。

根据 ω_{IF} 的值将相干检测分为零差检测和外差检测。零差检测就是本振信号和接收信号的频率完全相同,即 $\omega_{IF}=0$,这样检测到的信号是基带信号;外差检测即本振信号和接收信号存在频率差,检测后的信号处在中频,因此还需要进行电域的下变频处理才能得到基带信号。可见零差检测的系统较外差检测简单,但其对激光的频率稳定性要求更高。一般的核心传输网采用简单的零差检测,而在光与无线的混合网络中多采用外差检测。

2.2 性能参数

平衡探测器的基本参数与单光电探测器的基本参数大致相同,如响应度、带宽、输出功率、灵敏度、饱和光电流、暗电流等,除此以外,共模抑制比(CMRR)也是衡量平衡探测器性能的重要参数。

2.2.1 响应度

响应度即输出光电流与入射光功率的比值,表示光电二极管将光转换成电流的效率,单位为 A/W。对于垂直入射的光电二极管,可以从三个方面来提高响应度。首先是吸收层材料的性质,可忽略载流子复合的优质吸收材料是实现高响应度的基本条件。由于光吸收随着吸收体厚度和吸收系数的乘积呈指数型增长,所以必须有足够厚度的吸收体。将光耦合到探测器中会有表面反射损失,需要抗反射涂层来提高耦合效率。对于 InP 基底一般选取易粘附的 SiO_2 材料作为抗反射层。

2.2.2 带宽

带宽也称 3 dB 截止频率,即输出功率比低频时下降了 3 dB 所对应的频率,单位为 Hz。不考虑外部匹配电路时,带宽与 RC(电阻-电容)时间常数和载流子渡越时间(扩散加漂移)有关。3 dB 截止频率可近似表示为

$$f_{3\text{-dB}} \approx \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{f_{RC}^2} + \frac{1}{f_{tr}^2}}}, \quad (7)$$

式中: f_{RC} 为 RC 限制的带宽,表达式为

$$f_{RC} = \frac{1}{2\pi R_{\text{tot}} C_{\text{pd}}}, \quad (8)$$

式中: R_{tot} 为包括串联电阻和负载电阻在内的总电阻; C_{pd} 为结电容; f_{tr} 为载流子渡越时间限制的带

宽,在 PIN 结构中其表达式为

$$f_{tr} = \frac{3.5\bar{v}}{2\pi d}, \quad (9)$$

式中: \bar{v} 为耗尽层中载流子的平均漂移速度; d 为耗尽区的厚度。由(8)式和(9)式可知带宽与总电阻(串联电阻和负载电阻)、结电容和耗尽区厚度成反比,与载流子平均漂移速度成正比。

2.2.3 输出射频功率

输出功率通常是指输送到 50Ω 负载电阻上的射频功率。当信号频率较低时,光电二极管的功率损耗很小,输出的射频功率可表示为

$$P_f = 0.5 (mI)^2 R_L, \quad (10)$$

式中: m 为输入光信号的调制深度; I 为平均光电流; R_L 为负载电阻。对于低水平激励,输出功率随着调制频率接近 3 dB 带宽而下降。光电二极管工作在高强度光照下时,输出功率会由于空间电荷效应迅速下降。

2.2.4 饱和电流

光电二极管的输出射频功率通常随着入射光功率或光电流(以对数刻度)线性增加,直到输出功率偏离线性响应。饱和电流就是指输出功率与入射光功率或光电流偏离线性变化曲线 1 dB 时对应的平均光电流。影响因素包括:空间电荷效应,即在高入射光功率的情况下,空间电荷引起耗尽区中电场的重新分布,这会导致载流子速度降低,从而使带宽和输出功率降低;热效应,即高电流和高偏置会使有源区温度升高,降低输出功率;偏置电压摆动,即光电流感应瞬态电压会叠加在直流偏压上,引起的电压摆幅可以将光电二极管上的偏置摆动到低偏置点,降低其功率和线性度。

2.2.5 共模抑制比

在平衡探测中,使用相同的光电二极管探测到两个光信号,所产生的光电流被差分放大以产生与它们的差异成比例的电信号。这种差分探测的目的是通过抑制光学信号中的共模成分来突出两个相似光信号的差,共模抑制比是用来量化一对平衡探测器的这种抑制能力的^[12]。图 2 所示为测量共模抑制比时需要的三种照射模式。以相同的光功率同时照射双二极管时,测量微弱的电流 ΔI ,当以同样的光功率照射单个光电二极管时测量强电流 I_1 和 $-I_2$ 。因此共模抑制比(C_{MRR})可定义为

$$C_{\text{MRR}} = \frac{|\Delta I|}{|I_1| + |I_2|}。 \quad (11)$$

测量共模抑制比时一定要保证入射到二极管表面的光功率相同,而且两个二极管的频响不同会使

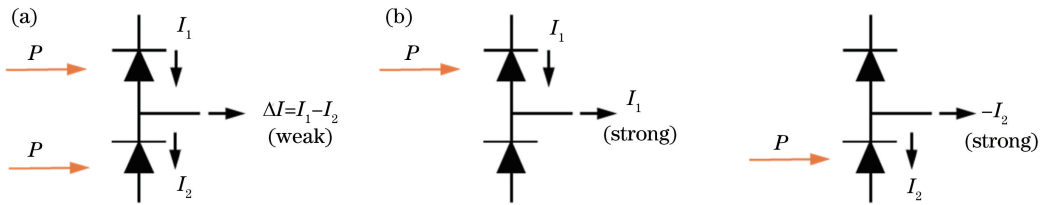


图 2 测量平衡探测器共模抑制比的照射条件。(a)双端照射;(b)单端照射

Fig. 2 Illumination conditions for determining the CMRR of a pair of balanced photodetectors.

(a) Single-end illumination; (b) dual-end illumination

共模抑制比依赖于入射光的调制频率,因此一般情况下,平衡探测器的共模抑制比是频率的函数。通常用 dB 的形式表示共模抑制比的值,所以共模抑制比的定义为

$$C_{\text{MRR}} = 20 \log \left(\frac{I_{\text{PD}_P} - I_{\text{PD}_N}}{I_{\text{PD}_P} + I_{\text{PD}_N}} \right), \quad (12)$$

式中: I_{PD_P} 为照射上面的光电二极管时平衡探测器产生的光电流; I_{PD_N} 为照射下面的光电二极管时产生的光电流。目前商业应用上要求平衡探测器的共模抑制比为 25 dB 以上。

3 结构分类

3.1 芯片连接结构分类

平衡探测器输出的是两个探测器芯片产生的光电流差,按芯片连接结构的不同可分为两种结构,即电流自减型和差分放大型。

3.1.1 电流自减型

电流自减型即直接将两个光电二极管并联,这也是平衡探测器最简单的结构,如图 3 所示, R_b 和 C_b 为偏置电路的电阻和电容, R_L 为负载电阻,上下两臂的电流差通过负载电阻转换成电压输出。

电流自减型结构更容易将两个光电二极管集成在单个芯片上,即在生长芯片时直接将其中一个二极管的阳极与另一个二极管的阴极连接在一起,实

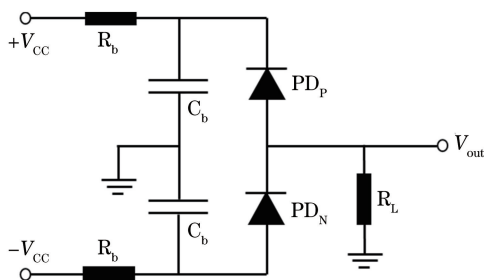


图 3 电流自减型平衡探测器结构图

Fig. 3 Schematic view of the current self-reducing balanced photodetector

现更好的匹配并减少封装成本,因此目前针对平衡探测器的研究均采用这种结构。一般光电探测器产生的电信号在应用时都要经过电放大过程,该结构的输出可以与一个单端输入的放大器相连进行电放大。

3.1.2 差分放大型

差分放大型是通过差分放大器获得两臂的电流差,即两个光电二极管与一个具有双输入端的差分跨阻放大器(TIA)相连接,如图 4 所示,实现差分的电压输出。

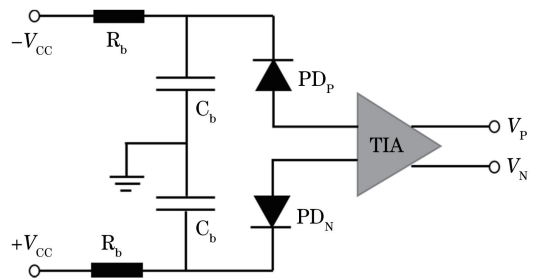


图 4 差分放大型平衡探测器结构图

Fig. 4 Schematic view of the differential amplification balanced photodetector

目前在接收机前端模块^[13]和相干接收机^[14]中多使用此结构。该结构多用探测器阵列芯片取代单个探测器芯片,以实现更好的匹配和更小的封装尺寸。

3.2 光耦合方式分类

平衡探测器也可根据光耦合方式不同分为光纤耦合平衡探测器和空间光耦合平衡探测器。

3.2.1 光纤耦合平衡探测器

光纤耦合平衡探测器主要应用在工作速率 10 Gbit/s 以上、工作波长覆盖 1550 nm 的高速相干光纤通信领域。国外在商业上普遍采用双管差分 TIA 平衡探测器,比较有代表性的厂商为德国 U²T 公司和美国 Optoplex、Discovery 与 Thorlabs 等公司。图 5 所示为两种相关知名品牌的实物图,这些

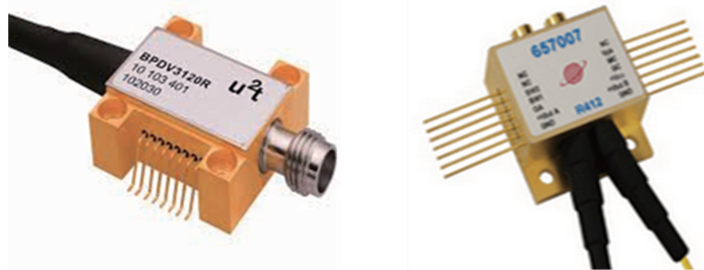


图5 单模光纤耦合平衡探测器模块

Fig. 5 Single-mode fiber-coupled balanced photodetector modules

公司的高速平衡探测器主要采用蝶形封装,以单模光纤耦合为主,绝大部分使用斜面端口的光纤连接器形式(FC/APC)耦合光信号,通过管壳上的引脚与电源和低速的控制信号相连。

3.2.2 空间光耦合平衡探测器

空间光耦合平衡探测器一般以大面积、低通信速率为主。通过将空间光直接耦合到平衡探测器的光敏面上,避免了使用单模光纤时单模光纤芯径较小以及大气湍流引起的强度闪烁、光斑抖动等现象造成的空间光耦合效率降低等问题,进一步提高了探测灵敏度。武汉大学在平衡探测器方面做了很多研究^[15-17],图6为其研制的空间光耦合平衡探测器,探测面直径达 $100\ \mu\text{m}$,工作速率为 $5\ \text{Gbit/s}$ ^[17]。

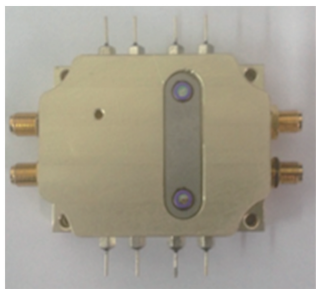


图6 空间光耦合平衡探测器

Fig. 6 Spatial light coupling balanced photodetector

4 研究现状及发展趋势

自20世纪60年代激光器发明以来,关于平衡探测器的研究就伴随着激光探测技术的发展而逐步深入。先后有很多研究人员提出各种方法来实现平衡探测,如采用双光电二极管与差分运算放大器组成跨阻放大器来实现相干零差探测^[18],采用魔T进行电信号合成的平衡探测模式^[19],采用电路调谐的方式实现两个光电管之间的平衡调节^[20]等。其中采用差分放大器可以获得高的跨阻增益,但速度受到运算放大器带宽的限制;魔T虽然有一定带宽,

但作为无源器件会造成信号衰减;电路调节可以获得高的共模抑制比,但速度依然受限。可见这些方法都无法同时获得高带宽、高功率的信号。针对以上问题,目前平衡探测器主要从芯片结构和集成技术两方面进行研究。

4.1 芯片研究

为了使平衡探测器在相干通信和模拟链路中发挥更好的作用,如何提高平衡探测器的带宽和输出射频功率一直是研究中的关键问题。目前有两种通用的方法来改善PD的射频输出功率。1)使吸收层中的光功率分布均匀。为了使吸收体层的光功率分布均匀,研究人员相继研制出表面垂直照射的PD^[21-23]、波导集成倏逝波耦合PD^[24]和PD阵列^[25]。在低频率下,表面垂直照射的PD可以有效地提供高射频输出功率,如Cross等^[22]设计的表面垂直照射PD在 $15\ \text{GHz}$ 的射频输出功率为 $28.5\ \text{dBm}$,响应度为 $0.7\ \text{A/W}$ 。但是光吸收效率和载流子渡越时间之间的矛盾制约使其产生的高射频输出功率随着频率的增加而急剧降低。Li等^[23]提出的表面入射单行载流子(UTC)PD在 $100\ \text{GHz}$ 时具有 $9.6\ \text{dBm}$ 的高射频输出功率,但响应度仅为 $0.17\ \text{A/W}$ 。与表面照射的PD相比,波导集成的PD通过解除光吸收效率和载流子渡越时间之间的矛盾制约显示出实现高射频输出功率的潜力^[25],而且波导集成PD可以与其他光子元件单片集成到光子集成电路中。2)使空间电荷效应最小化。空间电荷效应是由光生载流子在耗尽区的空间分布引起的^[26],在大的光输入功率下,自由载流子产生的电场与偏置电压引起的电场相反,不容忽视。总电场可能会急剧减小,使载流子渡越时间显著增加,导致射频输出功率压缩。研究人员已经研制出各种新型PD结构来实现高频率下的高输出功率,如部分耗尽的吸收层,双耗尽区和单行载流子等。在UTC-PD中,光子在薄的未耗尽吸收体中产生载流子,并

且只有快速载流子被注入并穿过耗尽的漂移层。例如,电场强度为 10 kV/cm 时,InP 中电子的饱和漂移速度比 $\text{In}_{0.48}\text{Ga}_{0.52}\text{As}$ 中的空穴大一个数量级以上。因此,InGaAs/InP UTC-PD 与耗尽区宽度相同的 $\text{In}_{0.48}\text{Ga}_{0.52}\text{As}$ pin PD 相比,可以缩短传输时间,降低高电流下的空间电荷效应。另外 UTC 结构可以进一步优化到带有部分掺杂吸收层^[27]和悬崖层^[28]的改进型单行载流子(MUTC)结构中,达到保持高带宽的同时提高射频输出功率的目的。

在以上单个探测器芯片研究的基础上,集成的平衡探测器(BPD)芯片结构不断发展,目前高功率、高带宽的平衡探测器芯片大多采用 UTC 结构。表面垂直照射的平衡探测器结构中比较有代表性的有 Houtsma 等^[29]研制的 InP 基 UTC 型 BPD,如图 7 所示,其在 2 GHz 时输出射频功率高达 30 dBm,响应度为 0.65 A/W,共模抑制比大于 40 dB。Zhou 等^[30]采用倒装芯片的封装方式提供更好的散热条件,进一步提高射频功率,实现了 8 GHz、11 V 高偏压下 31.7 dBm 的高射频功率。针对波导型高射频功率、高带宽 BPD, Xie 等^[31]在 SOI(silicon-on-insulator)波导上实现 BPD 的混合集成,BPD 的射频功率在 10 GHz 时为 17.2 dBm,在 20 GHz 时为 15.2 dBm。



图 7 平衡光电二极管的俯视图

Fig. 7 Top view of balanced photo-diode pair

图 8 所示为近几年来先进的平衡探测器芯片的射频功率和带宽之间的关系^[29-38]。由图 8 可以看出,垂直照射的 BPD 可以实现高射频功率,但带宽不会太大,而波导集成 BPD 的带宽可以很大,射频功率却达不到垂直照射结构的高度。由于波导结构易于与模场转换器和偏置电路等集成,所以波导结构的平衡探测器芯片受到越来越多研究人员的青睐。Runge 等^[39]成功研制了带宽高达 115 GHz 的单片集成的波导型平衡探测器,是迄今为止报道的最大带宽。

4.2 集成研究

平衡探测器的集成研究包括与低噪声放大电路或微波功能的 InP 基单片集成技术,如 Schramm

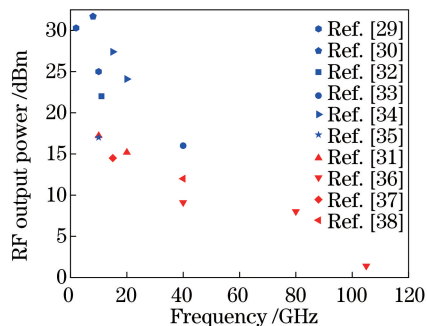


图 8 单模光纤耦合的平衡探测器芯片最大射频(RF)输出功率与频率的关系图(蓝色:表面照射平衡探测器芯片;红色:波导集成平衡探测器芯片;以上结果在差模情况下测量)

Fig. 8 Maximum radio frequency (RF) output power of single-mode-fiber-coupled balanced PDs as a function of frequency (blue: surface illuminated balanced PDs; red: waveguide integrated balanced PDs; the balanced PDs were measured in differential mode)

等^[40]将光电二极管单片与基于高电子迁移率晶体管(HEMT)的分布行波放大器集成,在 DPSK 系统下实现速率为 40 Gbit/s 的平衡探测器,以及与光子器件的集成研究,如 Runge 等^[39]设计的基于光子集成电路(PIC)的接收机,集模场转换器、90°光混频器、平衡光电二极管和偏置电路于一体。

平衡探测器的集成技术包括两类,即单片集成和混合集成。针对单片集成的情况,目前的材料平台包括 Si 和 InP。InP 基的材料体系研究相对较早,如今已经发展比较成熟。最近,硅上高速锗光电二极管的发展已经得到证实^[41-42],显示了其在下一代数据通信光子集成电路中的应用潜力。基于 Si 的光子单片集成是一个相对较新的研究课题,由于其可以与公认的低成本 CMOS 制造工艺兼容,因而引起了广泛关注。在相同的制造工艺中实现光学和电学功能的集成,可以使整体制造成本降低并提高器件的性能^[43-45]。Mohammed 等^[46]在硅基上实现了具有片上偏置电容的平衡光电探测器,结构如图 9 所示,其在 50 Ω 负载下的带宽为 16.2 GHz,支持 25 Gbit/s 光信号传输,无需进行信号后处理。将 SiGe 中的 PD 技术与 InP 比较,SiGe 的响应度、带宽或暗电流表现都比较差。因此,至少对于需要低暗电流、高光功率或高速率的应用,InP 和晶格匹配的 III-V 半导体似乎仍然是更好的活性材料,并且在设计光接收机时可提供更多的自由度。例如,Runge 等^[47]和 Takechi 等^[48]已经提出了针对 64 GBd 应用的基于单片 InP 的相干接收机芯片。

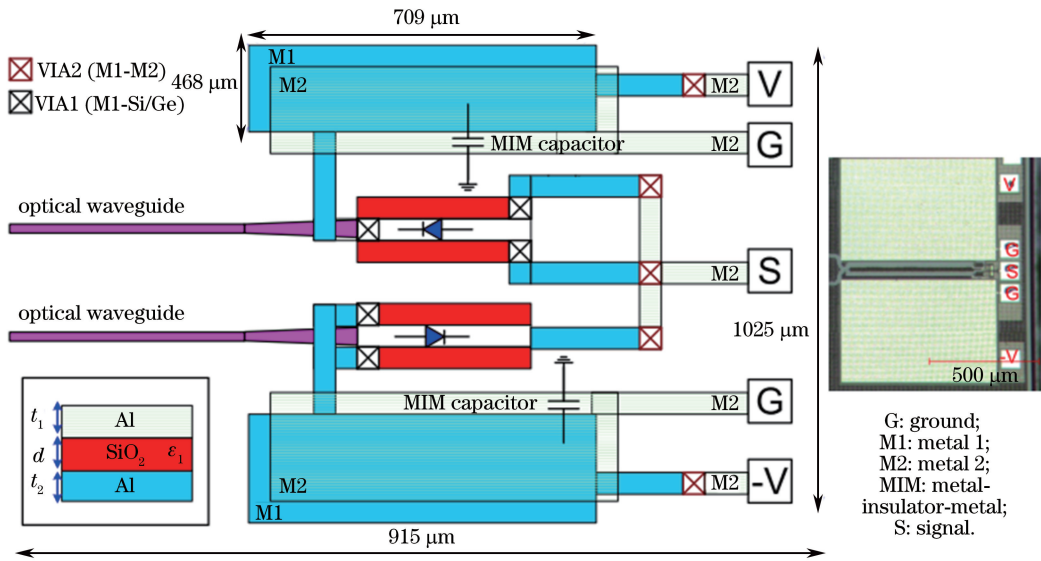


图 9 带有片上偏置电容器的平衡探测器(左下方插图为片上电容器的横截面)

Fig. 9 Balanced photodetector with on-chip capacitor for biasing (the bottom left inset shows the cross-section of the on-chip capacitor)

混合集成是针对波导型芯片而言,包括二氧化硅平台和聚合物波导平台。研究人员已经证实在二氧化硅上混合集成 III-V 光子器件与 InP 基的器件性能相近,甚至更优异。Wang 等^[37]通过晶圆结合将平衡 MUTC PD 混合集成在 SOI 纳米波导上,其带宽为 20 GHz,射频功率在 15 GHz 时为 14.5 dBm。

与二氧化硅平台相比,聚合物平台明显的优势是允许更灵活的设计和加工来增强器件的性能并降低制造成本。Zhang 等^[49]已在聚合物平台上成功

实现混合集成的相干接收机芯片,结构如图 10 所示。其中聚合物板提供包括弯曲、锥形和多模干涉设备(MMI)在内的低损耗波导元件,以及包括可调谐布拉格光栅和可变光衰减器(VOA)在内的热光元件;基于聚合物和电介质的混合层的薄膜元件被用于分离和旋转偏振态;InP 光子学平台提供光源(GC)和高速(100 G)波导 PD 阵列;InP 电子平台提供高速差分跨阻放大器(DTIA)。

综上所述,目前平衡探测器芯片的性能有了很大的提升,如何将优越的性能,如高带宽和高射频

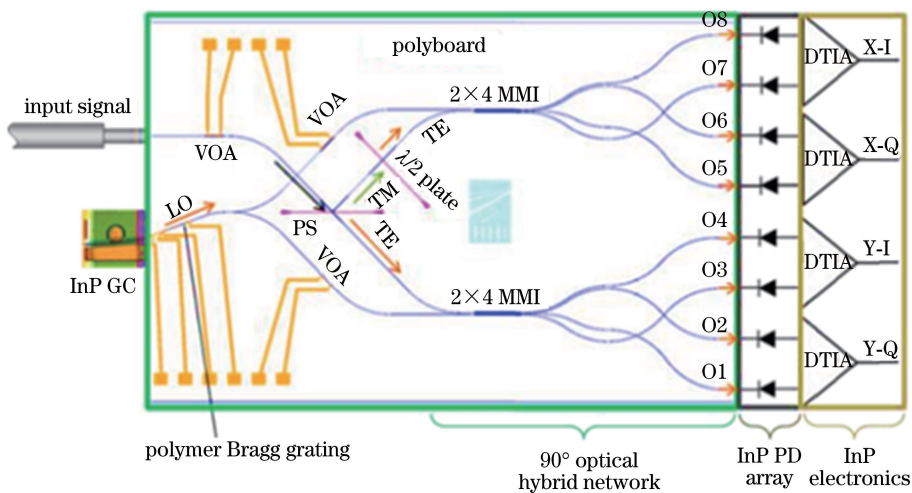


图 10 混合集成的相干接收机结构图

Fig. 10 Schematic layout of a hybrid integration coherent receiver

输出功率集于一体是亟需解决的问题。未来科研人员会对现有的探测器芯片结构进行改进,并且尝试研制新型的芯片结构,使其能够同时具有波导型芯片的高速率和垂直照射型芯片的高射频输出功率。除了芯片的设计和制作,高性能的封装技术也是需要关注的重点。本项目组在高速光电子器件封装方面一直处于国内领先地位。通过建立光电探测器的等效电路模型,利用寄生参数补偿技术实现带宽的增益。目前已成功研制出 5 Gbit/s 的大模场平衡探测器,在模块封装方面已实现 8×12.5 Gbit/s 接收机模块的研制^[50]。随着集成技术的发展,芯片的尺寸越来越小,封装带来的影响也越来越严重。未来会建立更准确的等效电路模型和精确的测试手段,实现芯片的最佳性能。在集成研究方面,与单片集成相比,混合集成优势更大,因为混合集成可以结合两种平台的优点来实现最佳性能。但是在混合结合过程中仍然存在一些悬而未决的问题,如可靠性、热管理和光学耦合等,因此单片集成仍然是研究中的主流。相信未来随着研究的深入和光子集成复杂度越来越高,单片集成和混合集成技术最终将以互补的方式相互融合,建立高性能的集成平台。

5 结束语

介绍了平衡探测器的基本参数,其中带宽和射频输出功率是相干通信和模拟光链路中重点关注的指标。从平衡探测器的研究进展概述中可知平衡探测器芯片结构在经历不断的改进之后,单行载流子结构的平衡探测器芯片已经成为高射频功率、高带宽的主流。波导结构的平衡探测器能够解除光吸收效率和载流子渡越时间之间的矛盾制约且易与其他光子元件单片集成,凭借这些优点已成为领域内的研究热点。但是目前仍未研制出兼具垂直照射结构高射频功率和波导结构高带宽的平衡探测器,突破此瓶颈是将来亟待解决的问题。光子集成技术实现了平衡探测器与光混频器等的单片集成,使得相干接收机的尺寸和功耗越来越小,不同的集成材料平台具备自身的优势,如何将各优势加以整合是需要研究的难题。总之,平衡探测器将会在高速率、高射频功率、高响应度和高共模抑制比等方向上不断优化,封装模块会向小体积、高集成度、低成本和低功耗方向发展,未来平衡探测器在光通信和微波光子系统中将发挥越来越重要的作用。

参 考 文 献

[1] Rohde M, Caspar C, Heimes N, *et al.* Robustness

of DPSK direct detection transmission format in standard fibre WDM systems [J]. *Electronics Letters*, 2000, 36(17): 1483-1484.

- [2] Winzer P J, Chandrasekhar S, Kim H. Impact of filtering on RZ-DPSK reception[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, 15(6): 840-842.
- [3] Winzer P J, Essiambre R J. Advanced modulation formats for high-capacity optical transport networks [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(12): 4711-4728.
- [4] Arnon S. Power versus stabilization for laser satellite communication[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(15): 3229-3233.
- [5] Heine F, Hildebrand U, Lange R, *et al.* 5.6 Gbps optical intersatellite communication link [J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7199: 719906.
- [6] Jono A T, Takayama Y, Shiratama K, *et al.* Overview of the inter-or-bit and orbit-to-ground laser communication demonstration by OICE-TS [J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6457: 645702.
- [7] Kim H J, Leaird D E, Weiner A W. Improved RF performance of a comb-based microwave photonic filter using a balanced photodetector [C] // *IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP)*, 2013: 80-83.
- [8] Zhang W, Wen A J, Gao Y S, *et al.* Large bandwidth photonic microwave image rejection mixer with high conversion efficiency[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(3): 2681663.
- [9] Meijerink A, Roeloffzen C G H, Meijerink R, *et al.* Novel ring resonator-based integrated photonic beamformer for broadband phased array receive antennas—part I: design and performance analysis [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(1): 3-18.
- [10] Joshi A, Becker D, Wree C, *et al.* Coherent optical receiver system with balanced photo-detection [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 6243: 62430E.
- [11] Chan V W. Free-space optical communications [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(12): 4750-4762.
- [12] Bach H G. Ultra-broadband photodiodes and balanced detectors towards 100 Gbit/s and beyond [C]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 6014: 60140B.
- [13] Sinsky J H, Adamiecki A, Gnauck A, *et al.* A 42.7-Gb/s integrated balanced optical front end with record sensitivity[C] // *Optical Fiber Communications Conference, IEEE*, 2003: PD39-P1-3.

- [14] Painchaud Y, Pelletier M, Poulin M, *et al.* Ultra-compact coherent receiver based on hybrid integration on silicon [C] // Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC), 2013: OMJ.2.
- [15] Liu H Y, Zhang Y G, Ai Y, *et al.* Design and implementation of balance detector used in coherent optical communication system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(7): 070601.
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): 070601.
- [16] Dai Y H, Ai Y, Xiao W, *et al.* The research of balance detector for high-speed coherence optical communications[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(1): 0125002.
代永红, 艾勇, 肖伟, 等. 高速相干光通信平衡探测器研究 [J]. *光子学报*, 2015, 44(1): 0125002.
- [17] Liang H X, Dai Y H, Ai Y, *et al.* Design and test of space optical coupling balance detector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(3): 196-202.
梁赫西, 代永红, 艾勇, 等. 空间光耦合平衡探测器设计与测试 [J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(3): 196-202.
- [18] Carleton H R, Maloney W T. A balanced optical heterodyne detector [J]. *Applied Optics*, 1968, 7(6): 1241-1246.
- [19] Abbas G L, Chan V W, Yee S, *et al.* A dual-detector optical heterodyne receiver for local oscillator noise suppression [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1985, 3(5): 1110-1122.
- [20] Jacobsen G, Kan J X, Garrett I. Tuned front-end design for heterodyne optical receivers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1989, 7(1): 105-114.
- [21] Beling A. High-power microwave photodiodes [C] // Optical Fiber Communication Conference and Exhibition, OSA, 2014: Tu2A.4.
- [22] Cross A S, Zhou Q G, Beling A, *et al.* High power flip-chip mounted photodiode array [J]. *Optics Express*, 2013, 21(8): 9967-9973.
- [23] Li Q L, Li K J, Fu Y, *et al.* High-power flip-chip bonded photodiode with 110 GHz bandwidth [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(9): 2139-2144.
- [24] Runge P, Zhou G, Beckerwerth T, *et al.* InP-based waveguide integrated photodetectors [C] // Photonics Conference, IEEE, 2017: 256-257.
- [25] Zhou G, Runge P, Lankes S, *et al.* Waveguide integrated pin-photodiode array with high power and high linearity [C] // International Topical Meeting on Microwave Photonics, IEEE, 2015: 1-4.
- [26] Beling A, Xie X J, Campbell J C. High-power, high-linearity photodiodes [J]. *Optica*, 2016, 3(3): 328-338.
- [27] Ishibashi T, Muramoto Y, Yoshimatsu T, *et al.* Unitraveling-carrier photodiodes for terahertz applications [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(6): 3804210.
- [28] Li Z, Pan H, Chen H, *et al.* High-saturation-current modified uni-traveling-carrier photodiode with cliff layer [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2010, 46(5): 626-632.
- [29] Houtsma V, Hu T, Weimann N G, *et al.* A 1 W linear high-power InP balanced uni-traveling carrier photodetector [C] // 37th European Conference and Exposition on Optical Communications, IEEE, 2011: Tu.3. LeSaleve.6.
- [30] Zhou Q G, Cross A S, Fu Y, *et al.* Balanced InP/InGaAs photodiodes with 1.5-W output power [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5(3): 6800307.
- [31] Xie X J, Zhou Q G, Norberg E, *et al.* High-power heterogeneously integrated waveguide-coupled balanced photodiodes on silicon-on-insulator [C] // IEEE Photonics Conference, IEEE, 2015: 468-469.
- [32] Li Z, Chen H, Pan H P, *et al.* High-power integrated balanced photodetector [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, 21(24): 1858-1860.
- [33] Beling A, Cross A S, Zhou Q G, *et al.* High-power flip-chip balanced photodetector with > 40 GHz bandwidth [C] // IEEE Photonics Conference, IEEE, 2013: 352-353.
- [34] Zhou Q G, Cross A S, Beling A, *et al.* High power balanced InGaAs/InP photodetector flip-chip bonded on diamond [C] // Integrated Photonics Research, Silicon and Nanophotonics, OSA, 2013: IW5A.5.
- [35] Beling A, Chen H, Duan N, *et al.* 10 GHz balanced photodetector with +17 dBm RF output power [C] // 33rd European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC), 2007: 1-2.
- [36] Zhou G, Runge P, Keyvaninia S, *et al.* High-power InP-based waveguide integrated modified uni-traveling-carrier photodiodes [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(4): 717-721.
- [37] Wang Y, Yu Q, Xie X J, *et al.* InP-based balanced

- photodiodes heterogeneously integrated on SOI nanowaveguides[C]// IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP), IEEE, 2016: 237-240.
- [38] Xie X J, Zhou Q G, Norberg E, *et al.* Heterogeneously integrated waveguide-coupled photodiodes on SOI with 12 dBm output power at 40 GHz[C]// Optical Fiber Communication Conference and Exhibition (OFC), OSA, 2015: Th5B.7.
- [39] Runge P, Zhou G, Beckerwerth T, *et al.* Waveguide integrated balanced photodetectors for coherent receivers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2018, 24(2): 2723844.
- [40] Schramm C, Bach H G, Beling A, *et al.* High-bandwidth balanced photoreceiver suitable for 40 Gb/s RZ-DPSK modulation formats[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2005, 11(1): 127-134.
- [41] Lischke S, Knoll D, Mai C, *et al.* High bandwidth, high responsivity waveguide-coupled germanium p-i-n photodiode[J]. Optics Express, 2015, 33: 27213-27220.
- [42] Verbist J, Verplaetse M, Srivinasan S A, *et al.* First real-time 100 Gb/s NRZ-OOK transmission over 2 km with a silicon photonic electro-absorption modulator [C] // Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), OSA, 2017: Th5C.4.
- [43] Schell M, Bach H G, Janiak K, *et al.* Coherent receiver photonic integrated circuits [C] // Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference, OSA, 2013: OW3J.6.
- [44] Doerr C, Winzer P, Chen Y, *et al.* Monolithic polarization and phase diversity coherent receiver in silicon[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(4): 520-525.
- [45] Doerr C, Buhl L, Baeyens Y, *et al.* Packaged monolithic silicon 112-Gb/s coherent receiver [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(12): 762-764.
- [46] Mohammed S H, Meer N S, Odile L L. A 16 GHz silicon-based monolithic balanced photodetector with on-chip capacitors for 25 Gbaud front-end receivers [J]. Optics Express, 2013, 21(26): 32680-32689.
- [47] Runge P, Stefan S, Angela S, *et al.* Monolithic InP receiver chip with a 90° hybrid and 56 GHz balanced photodiodes [C] // European Conference and Exhibition on Optical Communication, OSA, 2012: Mo.2.E.3.
- [48] Takechi M, Tateiwa Y, Kurokawa M, *et al.* 64 GBaud high-bandwidth micro intradyne coherent receiver using high-efficiency and high-speed InP-based photodetector integrated with 90° hybrid[C] // Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), OSA, 2017: Th1A.2.
- [49] Zhang Z Y, Felipe D, Katopodis V, *et al.* Hybrid photonic integration on a polymer platform [J]. Photonics, 2015, 2(3): 1005-1026.
- [50] Zhao Z P, Liu Y, Zhang Z K, *et al.* 1. 5 μm , 8×12 . 5 Gb/s of hybrid-integrated TOSA with isolators and ROSA for 100 GbE application [J]. Chinese Optics Letters, 2016, 15(12): 120603.