

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2211654

# 混频器研究进展

梁静远 张庆洋 吴加丽 柯熙政

(西安理工大学自动化与信息工程学院 西安 710048)

**摘要:** 混频器是电子通信系统中必不可少的部件,是外差接收机和微波测量仪器的前端电路,在微波通信、雷达以及许多微波测量系统都有应用。随着光通信的发展,相干光通信中的光混频器件在相干接收终端以及光学测量系统中也发挥着重要作用。本文由电混频器着手,对光混频器、以及太赫兹频段的混频器的工作原理和发展现状进行阐述,并且对西安理工大学在光混频器领域的工作进行了简要介绍,最后对混频器未来的发展趋势和发展前景进行展望。

**关键词:** 微波电路;相干光通信;微波混频器;光混频器

**中图分类号:** TN929 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 120.99

## Research progress of mixers

Liang Jingyuan Zhang Qingyang Wu Jiali Ke Xizheng

(School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Mixer is an indispensable part in electronic communication system, and is the front-end circuit of heterodyne receiver and microwave measuring instrument. Whether it is microwave communication, radar and many microwave measurement systems, the microwave signal must be mixer down to IF for processing. With the development of optical communication, optical mixer in coherent optical communication plays an important role in coherent receiving terminal and optical measurement system. This paper starts with the electric mixer, expounds the principle and development status of the optical mixer, and briefly introduces the work of Xi'an University of Technology in the field of optical mixer, and prospects the development trend and prospects of mixer in the future.

**Keywords:** microwave circuits; coherent optical communication; microwave mixers; optical mixers

## 0 引言

世界上第1只微波混频器是1924年由Armstrong<sup>[1]</sup>在第二次世界大战中研制出来,当时主要用来增加雷达的探测距离和接收灵敏度。变阻二极管是当时混频器的主要组成结构和功能部件,但是当时时代电子管器件的发展缓慢,混频器的发展也因此停滞不前<sup>[2]</sup>。混频器用途广泛,在电子对抗领域、雷达观测领域、无线电测量以及相干光通信领域当中当中都有不可或缺的作用,同时还可以作为倍频器、分频器以及鉴相器等器件使用。作为接收终端中的关键器件,微波混频器的研究具有重要意义。

混频器是利用非线性器件的非线性效应将不同频率的信号以及本振信号变换成为二者的差频信号或者和频信号的一种电路结构<sup>[3]</sup>。变频电路可以分为上变频和下变频,下变频器又被称为混频器<sup>[4]</sup>。混频器将接收到的信号载波和本振信号通过非线性效应发生混频然后发射中频电流信

号的光电子器件。

根据非线性器件的基本工作原理,可以将混频器分为有源器件和无源器件;采用晶体管和场效应管作为基本结构的混频器称为有源器件混频器,采用二极管作为基本结构的混频器称为无源器件混频器又称为电阻性混频器。根据电路基本结构还可以将微波混频器可以分为单端混频器,单平衡混频器、双平衡混频器等。

## 1 电子管混频器

宋牧襄<sup>[5]</sup>在其文章中介绍了Armstrong开发出的超外差架构,这一结构实现了简单易用的无线电。超外差接收器具有增益功能和额外降噪优势,同时还可以提供中频电流信号,该结构为早期基于电子管结构的混频器概念雏形。

如图1所示,真空电子管将输入信号和独立外差器件(本振信号)调谐为组合振荡信号,多真空电子管组成高频放大器对组合信号进行外差处理并检波。通过这种方法可

收稿日期:2022-10-10

以高效率的将射频信号转换成稳定输出的中频信号,同时对信号进行放大,是典型混频器的和差积。

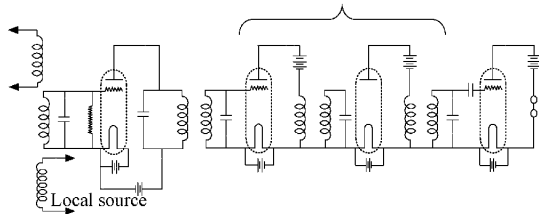


图 1 电子管混频器结构<sup>[6]</sup>

将电子管混频器电路方案和晶体管混频器方案进行对比,根据 Armstrong 的专利<sup>[6]</sup>,电路结构中起到混频作用的是一个真空管整流系统,真空电子管的整流属性可以把接受到的微波信号和本振信号生成典型混频信号。今天的混频器设计结构与 100 年前的设计高度相似。但是由于今天材料,集成技术以及材料学科的发展,基于二极管和晶体管结构的混频器具有更小的体积、更高的灵敏度和更高的带宽和工作频谱范围。

## 2 射频混频器

### 2.1 肖特基二极管混频器

早在 20 世纪 80 年代,美国科学家就研制出了工作频率在 1~10 THz 范围的 GaAs 肖特基二极管混频器<sup>[7]</sup>。随后,欧美等多个国家对肖特基二极管的展开了研究,内容从肖特基二极管基本结构设计、肖特基结电容的并联效应到趋肤效应、等离子共振等多个方面<sup>[8]</sup>。

肖特基二极管不依赖温度条件就可以完成超导特性转变进而完成非线性效应过程,工作环境温度要求低、温度噪声低、工作频带宽和速度快等是其主要优势特点,是当前重要的二极管混频器类型。肖特基二极管基波混频器根据其组成结构可以分为 3 种:交叉杆结构、环形电桥结构和鳍线波导立体结构<sup>[9]</sup>。随着集成技术的发展,单片集成和混合集成类型的肖特基二极管混频器也逐渐成为研究和应用的热点。

根据电路结构还可以将混频器分类为:不平衡混频、单平衡混频<sup>[10]</sup>、双平衡混频<sup>[11]</sup>以及三平衡混频器等。

#### 1) 二极管类型

##### (1) 肖特基势垒二极管

肖特基势垒二极管被广泛应用于混频器件的设计中,如图 2 所示。二极管被制造在具有高电子迁移率的 N 型半导体衬底之上,金属阳极与外延层接触形成肖特基结,常用金来制作空气桥(平面肖特基二极管)或者触须接触(触须式肖特基二极管)<sup>[12]</sup>。

##### (2) 平面肖特基二极管

平面肖特基二极管的阳极和阴极被雕刻在同一块金属基板上,金属阳极与势垒的部分区域进行接触,依次形成半导体掺杂外延层、掺杂增强层 N++ 和金属阴极。因为平

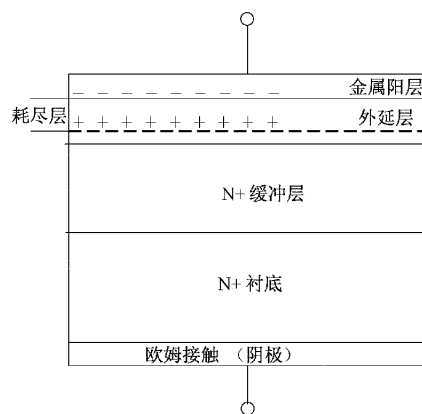


图 2 肖特基势垒二极管剖面图

面肖特基二极管这种独特的结构工艺,其制造程序可完全通过光刻工艺流程进行,从而大大提高了器件质量的可靠性和生成成品率,并且降低了单个器件的生产成本<sup>[13]</sup>。

准垂直型肖特基二极管对触须接触肖特基二极管的导电结构进行了改进,在保留触须接触肖特基二极管制造流程相同的管蜂窝操作的同时,应用了晶体触须的平面电路集成技术<sup>[14]</sup>。

目前最为成熟的平面技术是表面通道型平面二极管技术。并应用于混频器当中<sup>[15-16]</sup>。这种结构所引入的寄生电容与触须结构肖特基二极管相比大幅度降低<sup>[17]</sup>。

平面肖特基二极管技术经过多次重大变革:首先是发展了贴片二极管(flip-chip)技术,并于 1990 年首次去掉了高介质损耗的 GaAs 基板,将肖特基二极管及其电路在石英基片上完成集成封装,从而进一步减小了寄生电容<sup>[18]</sup>。

对比传统肖特基二极管的势垒材料,平面肖特基二极管的势垒可以通过几种类型的 III-V 材料进行制造,若要求半导体具有高势垒性能,则需采用砷化镓制造肖特基势垒<sup>[19]</sup>,因为采用其他材料制造的二极管混频器的需要本振驱动功率较高。目前大部分平面肖特基二极管采用砷化镓制成,基于砷化镓工艺制造的平面肖特基二极管工作频段高达 600 GHz<sup>[20]</sup>。

#### 2) 二极管混频器

1971 年,Fleri 等<sup>[21]</sup>对肖特基势垒混频二极管的非线性特性进行了详细的理论推导和计算,建立起来肖特基势垒混频二极管的非线性特性模型。

1973 年,Araki 等<sup>[22]</sup>提出了集成平衡混频器的设计方案,介绍了砷化镓肖特基势垒二极管的电流特性:在 18 GHz~23 GHz 范围内混频损耗约为 4 dB,使用该类型肖特基二极管结合脊形波导制作了集成式的微波平衡混频器电路结构。

1977 年,McCull<sup>[23]</sup>为评价肖特基二极管混频器引入了一套完整的评价标准,涉及到而激光面积、材料参数、噪声温度和变频损耗等的可能因素,并且通过数值推导过程说明了各种因素产生影响所占比重大小。

1997年, Cooper等<sup>[24]</sup>考虑到当时用于设计高频肖特基倍频器的二极管等效电路模型的谐波电路模型无法准确预测 100 GHz 以上的高频电路的特性, 也不能对电子传输的物理原理进行分析。

2000年, 胡建凯等<sup>[25]</sup>设计处基于梁氏引线二极管组装压焊技术的 3 mm 鳍线二极管混频器, 混频器电路结构为单平衡电路结构, 变频损耗小于 10 dB, 该混频器在平衡电路结构中的变频损耗小于 5 dB, 并且这两种类型的混频器都被实际应用于 FM/CW 组件当中。2002年, 刘乾坤<sup>[26]</sup>研制出一种鳍线-共面线结构的平衡混频器, 混频器的共组带宽为 92~96 GHz, 变频损耗小于 15 dB, 端口隔离度能够大于 20 dB。

2003年, Champlin等<sup>[27]</sup>研制出了一种鳍线微波混频器。混频器的工作频率为 350 GHz, 噪声温度可以低于 90 K; 2005年, Kyo等<sup>[9]</sup>也研制出了一种平衡式鳍线-共面线结构微波混频器。该微波混频器的本振功率低至 6 dBm 左右, 变频损耗也可以达到 10 dB, 其端口信号隔离度大于 29 dB。2009年, Blaisdell等<sup>[28]</sup>研制出了一种分谐波镜像抑制混频器, 其工作频带范围为 320~340 GHz, 在上述工作频带条件下, 混频器的镜像串扰抑制高达 7.2~24.1 dB。

2009年, Siles等<sup>[29]</sup>认为以往的漂移-扩散模型在肖特基接触处的传统边界条件存在局限性, 不能正确预测肖特基二极管混频器的工作特性, 导致仿真与实测存在较大差异。因此使用蒙特卡罗仿真器对肖特基二极管在平带模式下的工作特性进行了研究, 改善了肖特基处的边界条件。

2011年, 田超等<sup>[30]</sup>研制出一种肖特基势垒变容二极管, 该二极管是在微电子制作平台上。使用平面结构的制作工艺制造而成, 可以被应用于多种微波射频电路当中。

2012年, Saber<sup>[31]</sup>基于自热效应对太赫兹肖特基二极管的热特性进行了详细研究。分析了不同物理尺寸下的二极管热分布, 包括最大结温、热阻和热时间常数等。

2013年, Yan等<sup>[32]</sup>基于阳极面积、欧姆接触面积、外延层和衬底层的掺杂分布、厚度、势垒高度、接触电阻和器件温度等物理参数, 提出了一个肖特基势垒二极管的物理基模型。

2014年, Pérez等<sup>[33]</sup>提出了物理基肖特基二极管数值电热模型, 可以表征自热效应对太赫兹变频器件和电路性能的影响。

2020年和2021年, Orfao等<sup>[34-35]</sup>采用二维集成蒙特卡罗仿真对 GaAs 和 GaN 肖特基势垒二极管的表面电荷效应和边缘电容效应进行了研究。探索太赫兹频段下的肖特基二极管物理机制, 建立精确的肖特基二极管模型, 进而指导肖特基二极管的制造和设计, 也为实现高性能的太赫兹倍频器和混频器打下坚实的基础。

## 2.2 CMOS 混频器

CMOS 混频器是一种具有低成本、高集成和高性能优

势特点的模块化电路, 因其优势明显, 便于集成, 成为射频集成电路设计领域的研究热点。人们对 CMOS 技术进行了大量研究。设计出许多成熟的 CMOS 混频器产品, 提出许多先进的设计方案。

1996年, 国外便开始了对高线性度混频器的研究。Toole等<sup>[36]</sup>设计一款高线性度的混频器, 这款混频器结构与现在常用的混频器不同, 它是一款亚采样混频器, 虽然其他性能不佳, 但是线性度非常高, 3阶交调分量信号功率高达 35 dBm, 且功耗低至 2 mW。

从1998年开始, 对 CMOS 混频器芯片各种性能指标的优化开始变多, 混频器设计开始多样化。

1998年, Giustolisi等<sup>[37]</sup>提出了一种低电源电压的混频器, 其所需的电源电压更低, 只需要 1 V 就可以正常工作, 最低功耗仅 0.14 mW。Li等<sup>[38]</sup>和 Terrovitis等<sup>[39]</sup>自1999年起, 便开始对混频器中的噪声进行了分析。

从2003年开始, CMOS 混频器的研究开始变得越来越多, 设计思路也越来越成熟, 可开始了混频器的集成化芯片设计<sup>[40]</sup>。池保勇等<sup>[41]</sup>在2003年用 0.18  $\mu\text{m}$  的 CMOS 工艺设计了一种工作在 2.4 GHz 频率的下变频混频器, 该混频器是一款有源混频器, 使用的是现在也最常用的双平衡结构。虽然其性能在现在看来偏低, 但是仍然很有学习价值<sup>[42]</sup>。

2003年 El-Shewekh等<sup>[43]</sup>提出了一种宽带混频器, 射频输入范围从 30 MHz 到 1 GHz, 在增益高达 19.1 dB 的情况下, 端口隔离功率高达 22.5 dBm。

2004年, 崔福良<sup>[44]</sup>使用 0.35 CMOS 工艺设计了两个工作在 2.4 GHz 的混频器, 分别为上变频混频器和下变频混频器。这两个混频器都是用的有源双平衡结构, 并在此基础上进行了改进, 同时, 这篇也揭示了未来混频器的发展趋势之一: 电源电压将越来越低。

2005年, 董怀玉<sup>[45]</sup>针对超宽带混频器提出一种新的设计结构, 射频输入范围在 3.1~5.15 GHz, 输出可接近 0~1 GHz, 其带宽非常宽, 未来混频器的发展趋势是带宽越来越宽。

2005年10月, 危长明等<sup>[46]</sup>在低电源电压的基础上, 对线性度进行了分析, 端口输出线性度达到了 7.4 dBm, 揭示了未来混频器将朝着线性度将越来越高的方向发展。

2006年, 唐守龙等<sup>[47]</sup>分析了有源混频器的噪声, 分析了有源混频器中噪声的来源, 并且对跨导级、开关管、本振信号大小等因素对噪声的影响进行了研究。低噪声的混频器也受到了关注和研究。在混频器的发展过程中, 还出现了一些特殊的混频器结构, 2010年袁帅军<sup>[48]</sup>提出了一款电流模式的混频器。不同于电压模式的混频器, 电流模式的混频器是将电流信号进行混频。相较于传统的电压模式混频器来说, 电流模式混频器更适合低压、高线性度的设计。

2012年开始, 低功耗混频器开始变多, 也是自2012年起, 低压混频器的电源电压开始低于 2 V<sup>[49]</sup>。2012年, 申

晶等<sup>[50]</sup>提出了一款用于航空航天领域的超低功耗混频器,功耗仅有 0.76 mW,电源电压仅有 0.6 V,这个功耗和电源电压在今天看来也非常低。

2013 年开始,由于工艺的进步,CMOS 混频器的工作频率也开始往上。与之前几个 GHz 不同,此时混频器的工作频率可以达到几十 GHz,甚至几百个 GHz。2013 年,王超<sup>[51]</sup>利用肖特基势垒二极管设计的混频器最高可工作在 340 GHz 的频率。Wegerif 等<sup>[52]</sup>在 2000 年对混频器线性度进行了分析。

### 3 混频电路结构

#### 3.1 单端结构

单端混频器是比较常用的一种混频电路,器电路基本结构如图 3 所示,除混频二极管之外,该电路结构还有低通滤波器和偏置电路等基本结构。混频二极管将信息信号和本振信号混频之后发出中频电流信号。

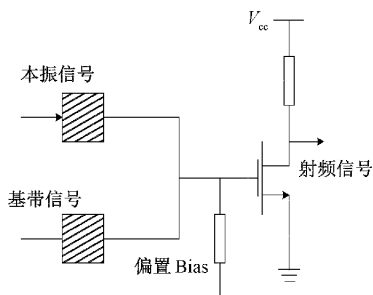


图 3 不平衡混频器<sup>[53]</sup>

不平衡混频器结构简单,具有很好的噪声性能,但是其输出信号端口隔离度较低<sup>[53]</sup>。

#### 3.2 单平衡结构

单平衡混频器中反向并联电路结构中最常用典型结构,反向并联结构根据并联方式不同又可以分为:微带支节型<sup>[54]</sup>、双工管对并联型和双工管对串联型<sup>[55]</sup>,结构分别如图 4 所示。

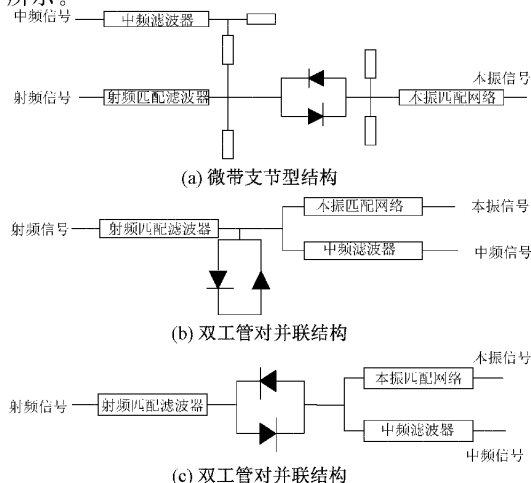


图 4 典型结构示意图<sup>[56]</sup>

如图 5 所示,单平衡混频器是由一个基带信号驱动的跨导器和本振信号驱动的差分对组成的。

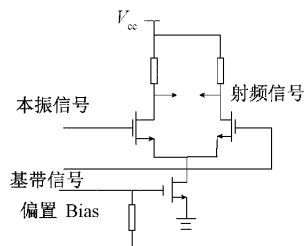


图 5 单平衡有源混频器的结构

#### 3.3 双平衡结构

吉尔伯特(Gilbert)双平衡混频器是一种最常见的双平衡混频器结构,吉尔伯特双平衡混频器主要具有如下优点:

- 1)集成度高,功耗低;
  - 2)具有较低的直流信号、本振信号和其他奇次谐波分量;
  - 3)本振功率信号较小;
  - 4)具有很高的端口的隔离度。
- 1982 年,Blaisdell 等<sup>[56]</sup>研制出一种新颖的宽带双平衡混频器,其工作频带范围为 18~40 GHz。该结构使用平衡槽线和分支平衡微带线将信号和本振信号耦合到二极管上,二极管是一种封装在星形结构中肖特基梁式引线二极管。

#### 3.4 三平衡结构

三平衡混频器因其具有高动态范围和三阶交调抑制等优势而被广泛用来制作更宽频带的混频器<sup>[57]</sup>。Ton 等<sup>[58]</sup>在 1990 年采用场效应晶体管(metal-semiconductor field effect transistor, MESFET)技术研制出 X 波段单片双双平衡混频器,该混频器使用 MESFET 工艺制造肖特基势垒二极管,且单片混频器可以达到混合混频器的性能标准,该混频器实现了 20 dBm 本地振荡驱动下 1 dB 压缩点的输出功率 3.6 dBm,在 7~10 GHz 范围,变频损耗仅为 10 dB,中频频率为 5 GHz。

1995 年, Bulcha 等<sup>[59]</sup>发明了一种新的平面双双平衡(monolithic microwave integrated circuit, MMIC)混频器结构。该结构采用槽线、共面波导和共面线相结合,实现 MMIC 双双平衡混频器,结构中所有电路都位于基板顶部,不需要通孔。混频器中频信号频率为 6~20 GHz,本振频率为 8~18 GHz,变频损耗为 6.2~9.8 dB,端口隔离度大于 20 dB。

### 4 混频器线性度

有源混频器不同导级之间的非线性效应直接影响混频器的线性度,因而针对跨导级间非线性效应问题的研究一时间成为热点。2002 年,何婷婷等<sup>[60]</sup>通过屏蔽尾电流的射频输入技术将混频器的线性度进一步提高,但是该技术的共模抑制比低,限制了其在实际电路中的应用。

在混频器线性化研究过程中,逐渐形成了 4 类比较成熟的线性化问题解决方案:



1) AB 类跨导级。2004 年, Wei 等<sup>[61]</sup>设计了一种 2.4 GHz ISM 频段的高线性度射频混频器, 改混频器由改进的 AB 类跨导级和共模反馈电路组成, 改进后的混频器的线性度大幅提升。但是其在改善线性度的同时增加了混频器的功耗, CMOS 工艺实现的电路结构需要至少 1.5 V 电源下的 3.73 mA 电流。

2) 分段线性技术。沈怿皓等<sup>[62]</sup>分析并且推导了两种非平衡差分结构差分输出电流和等效跨导公式, 给出了电路线性度最优时候多个补偿偏置结构的偏置电压表达式, 进而保证每个差分单元在输入范围上是线性的最后将多个差分单元的输入线性叠加之后为总输出, 因此总的输出信号具有一个较高的线性度。

3) 反馈技术。Aparin 等<sup>[63]</sup>研究了一种最佳栅极偏置射频二极管的反馈线性化技术, 通过研究发现跨导非线性栅极电压与直流理论预测的栅极电压出现的位置略有不同, 利用其对非线性电压进行抵消进而提高混频器的线性度。

4) 派生项叠加 DS(derivative superposition)技术和改进的派生项叠加技术。Webster 等<sup>[64]</sup>首先提出了 DS(derivative superposition)技术的概念, DS 技术是用两个分别工作在弱反型区和强反型区的晶体管的正三阶派生峰值和负的三阶派生峰值相互抵消是的三阶派生项接近 0, 从而大大改善混频器的线性度<sup>[65]</sup>。

文献[21]提出了一种改进的 DS 技术, 这种技术考虑了二阶非线性的影响, 使 LNA 的端口隔离度由无补偿前的 10.5 dBm 提高到了 17.2 dBm<sup>[66]</sup>。

5) 电流注入法。在增加本振电流的前提下, 注入电流以加大跨导级的直流电流, 大大提升可混频器的线性度。在保证共模抑制比的前提下获得了好的线性度和噪声特性<sup>[67]</sup>。

线性度作为混频器的关键技术指标, 对混频器的性能以及接受机的探测灵敏度有着不可忽略的影响, 除上述几种方法之外, 最新技术如下: 限幅本振放大器技术可以在大带宽范围内产生一种上升时间较快的高压方波, 不会导致直流电流上升, 稳定线性度; 第二种技术涉及一种调谐 RF 巴伦变压器结构的集成, 用来确保平衡的 RF 信号加载至 FET 混频器; 第三种技术是利用无源混频器的结构产生一种能使 IF 放大器提前压缩的复合信号。ADI 设计了一种可编程低通滤波器网络来提供适当的和频端(为 RF 和 LO 频率的函数), 由此降低了负载中无用边带的幅度, 提高了线性度。

## 5 光混频器

光混频器作为数字相干接收机的主要组成部分, 其性能直接决定相干接收端的信噪比和接收灵敏度, 进而影响整个相干光通信的通信质量, 因此对光混频器的研究称为提高数字相干接收机灵敏度的关键, 也是相干光通信领域

的一项关键研究。

光混频器除了在相干光通信领域广泛应用外, 在光子成像<sup>[68]</sup>、激光雷达<sup>[69]</sup>、生物医学传感<sup>[70]</sup>等领域也有诸多应用。

目前的光混频器根据其输出形式可以分为两大类: 2 路输出的 180°光混频器的 4 路输出的 90°光混频器。相干通信接收系统中大部分使用 90°光混频器, 90°光混频器是一种 6 端口器件, 其中两个端口输入, 4 个端口输出<sup>[71]</sup>。经过平衡探测器检测后, 可以得到对应四路输出电信号, 四路中频电流信号后续经过 DSP 之后, 即可提取出原始的信号和所需要传输的信息光混频器研究进展<sup>[72]</sup>。

## 6 研究进展和现状

光混频器主要可以分为 3 dB 耦合器型、多模干涉耦合器型(multimode interference coupler, MMI)、晶体折射型以及波导技术等几种重要类型的光混频器结构<sup>[73]</sup>, 根据耦合方式还可以将光混频器分为光纤耦合型和空间光耦合型<sup>[74]</sup>; 根据集成基底可以分为二氧化硅基底型和聚合物波导基地型<sup>[75]</sup>。接下来我们对不同耦合器类型和基地类型的光混频器进行介绍, 并讨论其在相干光通信领域中的应用。

### 6.1 3 dB 耦合器和移相器型

3 dB 耦合器和移相器型的组合是一种应用比较广泛的光混频器组合结构, 这种结构可以输出特定偏振态的混频光信号, 同时可以在铌酸锂材料和二氧化硅材料上集成制备, 具有输出相位差小, 性能稳定的优点。

1983 年, Yuen 等<sup>[76]</sup>首次提出使用偏振分光棱镜将两束相干光混合, 并且通过相干提取信息, 这是光混频器早期的概念雏形。随后, 1985 年 Abbas 等<sup>[77]</sup>在 Yuen 简单混频器结构基础上增加了滤波器和噪声放大器, 能够对本振光噪声过滤的同时还能够对微弱信号进行放大。

1987 年, Gimlett 等<sup>[78]</sup>设计了基于 3 dB 光纤耦合器的 90°光混频器, 如图 10 所示, 实现了速率为 2 Gbps 的频移键控通信(frequency-shift keying, FSK)。在误码率为  $10^{-9}$  的条件下, 相干接收机的灵敏度可以达到  $-36.7 \sim -39.2$  dBm, 同时分析了发射机内部混频器的非线性响应的影响, 以及鉴频器和激光相位噪声的影响。

2010 年, Inoue 等<sup>[79]</sup>利用定向耦合器代替 3 dB 耦合器完成光束耦合, 使用移相器产生固定频移之后完成干涉混频过程。混频器基于硅基二氧化硅制成, 在 C 波段内器件的插入损耗小于 10 dB, 偏振消光比超过 20 dB, 相位偏差小于 1°。

2019 年, 陈浩<sup>[80]</sup>使用 3dB 耦合器和 90°相移器组合设计出一种平面波导型光混频器, 该混频器使用高折射率差的二氧化硅作为基底材料, 将相移器的波导率提升到了长度差方案的 2.2~3.6 倍。实验中光混频器的相位误差小于 2°, 同相端损耗小于 1.18 dB, 整个光混频器的插入损耗

小于 1.22 dB。

基于 3 dB 耦合器和移相器结构制作的光混频器结构较为简单,制造工艺要求低且制造技术较为成熟,因此其具有相位偏差小,实际应用中环境的适应能力强,工作性能稳定等优势,在光纤通信和空间光通信中应用都比较广泛;但是其器件尺寸大,并且硅基平台和 3 dB 耦合器结构的特点也导致其不便于集成。

### 6.2 马赫曾德干涉型光混频器

#### 1) 马赫曾德干涉型光混频器原理

马赫曾德干涉结构的光混频器一般由 3 部分组成,通过对马赫曾德干涉结构干涉臂、参考臂以及其他部分长度进行调整可以实现不同波长下的任意相位信号输出<sup>[81]</sup>。

#### 2) 马赫曾德干涉型光混频器

2003 年, Dai 等<sup>[82]</sup>利用掺氟的高分子材料(聚酰亚胺)的波导耦合器实现了马赫曾德干涉光混频器,该混频器不受光束偏振特性影响,可以适应极端温度环境下的长时间工作,经过实验测量,在 160 nm 波长范围内的耦合效率波动不超过 1%。

2005 年, Tang 等<sup>[83]</sup>基于马赫曾德(Mach-Zehnder, MZI)结构,采用遗传算法,在二氧化硅波导中理论上实现了耦合比在 200 nm 的波长范围内保持在 5%±1.5%的光混频器结构。

2013 年和 2014 年, Inoue 等<sup>[84]</sup>对 MZI 结构进行了改善,通过混合等离子体波导结构对马赫曾德混频器中的相位失配进行补偿,利用(silicon-on-insulator, SOI)波导结构和马赫曾德干涉原理结合,制造出结构紧凑,工作频带宽的马赫曾德干涉型光混频器。

2010 年, Zhou 等<sup>[85]</sup>设计出用于自由空间光通信的 2×4 的 90°光混频器,并应用与零差干涉检测接收机,其基本结构如图 6 所示。非对称马赫曾德干涉将信号光分成两路并和本振光干涉调制,并对两路信号重新组合。平衡探测器接收混频光并转化为中频电流输出。干涉仪种地调制对比度或者信噪比取决于波前干涉过程而非波前质量,因此不需要波前补偿技术、也不需要频率锁定该方案可以有效消除波前畸变对相干检测过程的影响。

波导型光混频器、3 dB 耦合器型光混频器以及棱镜型光混频器等光混频器方案仅具有下变频功能,实际应用中要求光混频器要同时具有上下变频两种功能,因此根据马赫曾德干涉调制实现下变频原理<sup>[86]</sup>,设计出马赫曾德干涉调制光混频器。

2019 年, 张晓宇等<sup>[87]</sup>提出了一种双马赫曾德干涉调制器的光混频器设计方案,该方案中利用信号光和本振光在马赫曾德干涉器中实现本振光和信号光的单边带调制,调制马赫曾德干涉上下两臂之间的相位差,使得光载波相互抵消,输出光信号的中频信号或者上变频信号。该方案可以实现上下变频的功能,并且进一步精简了相干光通信系统的收发模块。

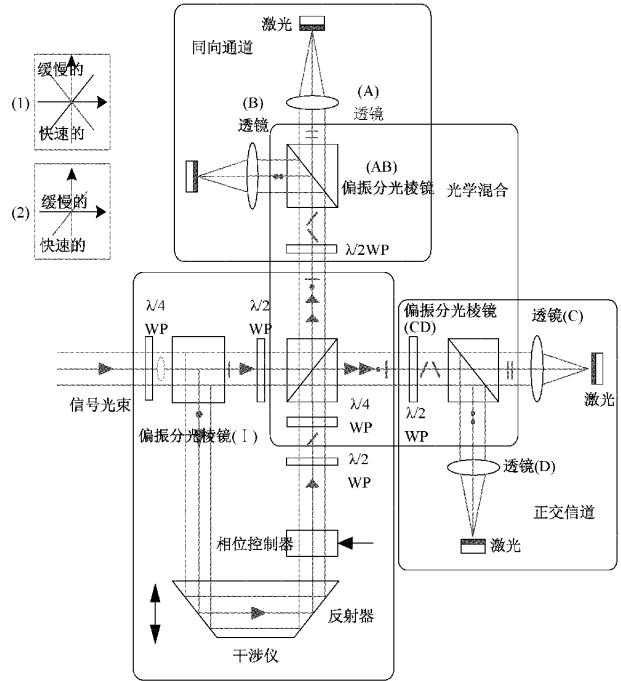


图 6 高精度 90°空间光混频器<sup>[85]</sup>

### 6.3 偏振型光混频器

#### 1) 光束偏振特性对混频效率的影响

Garreis<sup>[88]</sup>于上个 90 年代设计了具有块体结构的 90°空间光混频器,其原理如图 7 所示。

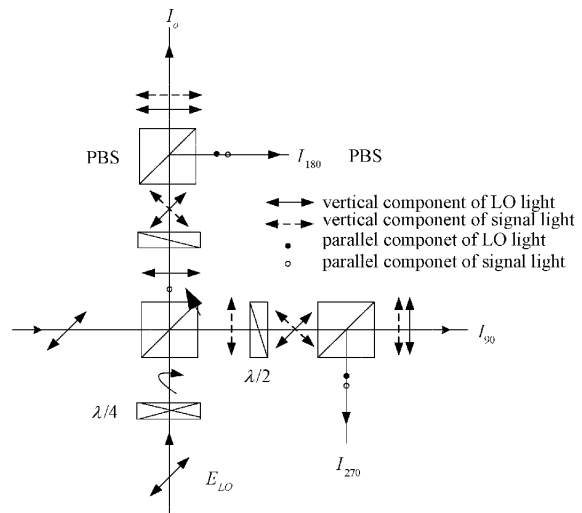


图 7 偏振光混频器原理<sup>[89]</sup>

激光器的噪声性能、传输信道特性、编码方式、大气传输信道湍流的变化以及工作环境的机械振动等都会改变信号光的偏振态。空间光混频器内部的光学元件的输出响应会受到输入光信号的偏振特性的影响<sup>[90]</sup>。

光的模式是受到其他因素影响进而随机变化的,这其中包括光束的偏振特性。偏振特性的改变导致工作模式和光纤输入的模式出现了兼容性问题<sup>[91]</sup>。

偏振分集<sup>[92]</sup>基本原理如下:信号光进入光混频器之后经过偏振分光棱镜(polarizing beam splitter, PBS)被分成两束相互正交的偏振态,即信号光的 P 分量和 S 分量;利用偏振旋转器将其中一束光的偏振态转换成其正交态,即和另外一束光的偏振态相同,然后分别输入到两个相同的硅基集成器件中;由于光的偏振态对混频器的混频效率影响和偏振分集技术优势的原因,出现了许多基于偏振分光棱镜对光束偏振态控制或者利用的光混频器设计方案和结构。

2) 偏振型光混频器研究进展

1969 年,贝尔实验室 Kleinman 等<sup>[93]</sup>利用偏振分光棱镜对选择波长光束起到透射、反射作用,进而实现光混频功能,该系统采用偏振分光棱镜、可见光激光器和光电倍增管来探测和频或差频产生的光信号。信号光和本振光经过经过偏振分光棱镜之后产生干涉混频,之后又平衡探测器接收转换成电信号。

1989 年,Langenhrost 等<sup>[94]</sup>设计出一种紧凑型块状光混频器,该混频器使用折射率在通光孔径上线性分布的光束整形透镜将输入光束为整形为准直光,输出光束整形为聚焦光束。偏振分光棱镜对信号光进行耦合,方解石晶体进行光束进行偏振态分离,该混频器的插入损耗仅为 2 dB,平均耦合效率可以达到 63%。

1991 年,Garreis 等<sup>[95]</sup>提出了由偏正分光棱镜和非偏振分光棱镜构成的六端口 90°空间光混频器,该混频器结构简单,稳定性高,易于加工,该结构多次被 TESAT 公司采用。

2016 年,王英伟等<sup>[96]</sup>设计了空间光通信系统偏振型 90°空间光混频器,混频器光路如图 8 所示,信号光入射之后与本振光干涉混频,混频之后的信号光分别经过不同单位的波片产生相位差为 90°的 4 束光信号。本振光采用保偏光纤输入,信号光为空间激光信号耦合。

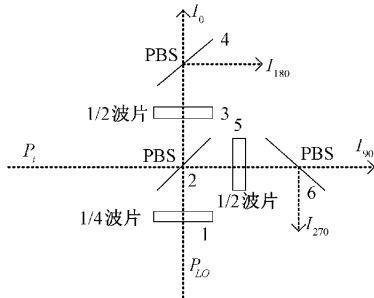


图 8 激光通信偏振型光混频器光路图<sup>[96]</sup>

2013 年,Inoue 等<sup>[97]</sup>基于偏振分集原理设计出一款基于偏振分光棱镜的空间光混频器,利用偏振分光棱镜与波片的组合完成信号光与本振光的相干叠加混频,保证输出信号之间的相位差为 90°,如图 9 所示。

除了波片结构外,还有偏振分束镜、马赫-曾德干涉调制器的应用,这些光学结构的光损耗小,干涉调制的对比反

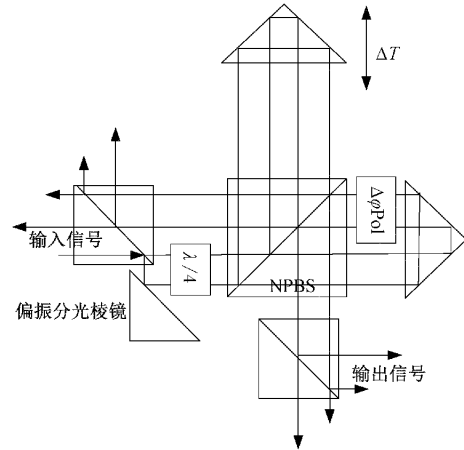


图 9 基于偏振分集原理的空间光混频器<sup>[97]</sup>

衬度较高,并且干涉技术基于相位差,而不是光束波前质量,因此大大降低了波前畸变对混频效率的影响。

6.4 晶体型光混频器

1) 晶体光混频器材料特性

晶体型光混频器利用单轴晶体的双折射效应、双反射效应或者电光效应等光学特性实现信号光与本振光的相干混频,通过电光效应产生相位偏移,常用的晶体材料主要有铌酸锂、聚合物、方解石、钽酸钪等<sup>[98]</sup>。

光混频器要求低插入损耗,高隔离度并且具有较高的共模抑制比和较小的偏振损耗。所以晶体型光混频器对晶体的光学质量有较高的要求:(1)晶体在通讯窗口波段的折射率差大于 0.1 以上,并且对温度的敏感性低,能够在高温区域和低温区域保持性能稳定性;(2)透过率高,光束能量损失小;(3)温度敏感性低,折射率分布不随温度变化发生变化,不潮解,硬度适中,适合加工;(4)容易生长,价格低廉<sup>[99]</sup>。

单轴晶体是制作光混频器的主要元件,常用于制作分光器件的单轴晶体材料有方解石、钽酸钪和铌酸锂等<sup>[100]</sup>,将集中材料的光学性能和加工工艺标准总结比较,结果如表 1 所示。钽酸钪晶体作为人工合成的正单轴晶体,具有透过率高,合成工艺简单成熟,硬度稳定适合流水线加工操作,大批量、规模化生产,镀膜技术发展先进<sup>[101]</sup>,切双折射角度大,效果明显<sup>[102]</sup>,可以在短距离内使得光束完全分离,可以进一步提高光混频器的集成度<sup>[103]</sup>。

表 1 光混频器晶体的性能比较

晶体材料	光学质量	透过率	双折射率	加工硬度	批量生产
钽酸钪	好	好	很好	适中	可以
铌酸锂	好	好	差	适中	可以
方解石	差	好	好	太软	困难
金红石	好	好	很好	太硬	很困难

## 2) 晶体光混频器

2003 年, Li 等<sup>[104]</sup>使用铌酸锂材料晶体制作了一个  $90^\circ$  光混频器, 光混频器结构如图 10 所示, 混频器拥有一个同相光路和一个正交光路, 移相器和马赫-曾德干涉仪将两路光进行振幅和相位调制, 波导两臂相位差为  $90^\circ$ 。铌酸锂材料晶体芯片的最大优点是内部高度集成, 大大缩小整个光混频器的尺寸, 最后将光混频器集成在了平衡探测芯片上。

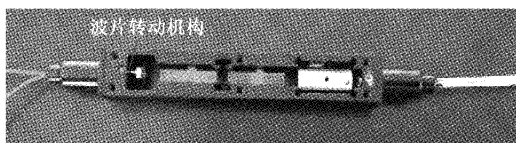


图 10  $2 \times 4$  的  $90^\circ$  的晶体形空间光混频器<sup>[109]</sup>

2010 年, 万玲玉等<sup>[105]</sup>提出了电控相移  $2 \times 4$   $90^\circ$  晶体空间光混频器, 混频器由相干混频晶体和电控相移板组成, 信号光和本振光通过晶体完成相干混频输出混频光信号, 电控相移板提供所需的相移。

2013 年, 柯昌剑等<sup>[106]</sup>设计了基于晶体双折射的  $90^\circ$  光混频器, 块状光混频器存在着结构松散、温度稳定性差等缺陷, 针对此问题使用偏振分束器、波片、钽酸钪晶体等器件, 设计了一款可以有效解决上述问题的光混频器, 该混频器结构严谨, 体积小并且由于晶体特性保有了温度适应能力高优势。

2015 年, 郑阳等<sup>[107]</sup>采用两块双折射晶体, 和不同相位差波片以及其他光学元器件设计了一种平铺性光混频器, 并且之后对其进行改进, 改进后的光路可以折叠, 缩小了混频器中光桥接器的尺寸, 但这种设计结构元件过多导致光束能量损失多, 并且存在半波损失。

2018 年, 宋哲等<sup>[108]</sup>使用电控双折射晶体和检偏双折射晶体设计出  $2 \times 4$  的  $90^\circ$  空间光混频器结构, 通过对电控双折射晶体的结构设计, 信号光和本振光在晶体内部发生 4 次双反射, 实现了光束的混频。该混频器可以控制晶体电压进而控制相位, 建构简单, 便于集成。

2020 年, 韩建露等<sup>[109]</sup>基于晶体的双折射效应设计出一种  $2 \times 4$  的  $90^\circ$  的晶体形空间光混频器, 实物如图 10 所示。作者在文中给出了该混频器的基本工作原理, 并且给出了混频器的基本参数。该混频器两端集成光纤和准直透镜, 提高了进入光混频器的光束质量, 波片具有转动机构可以控制, 最后测试回波损耗为 55 dB, 外形尺寸为  $99 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 。

## 6.5 其他类型光混频器

相干光通信系统最常用混频器除  $90^\circ$  光混频器以外, 还有  $45^\circ$  光混频器、 $60^\circ$  光混频器以及  $120^\circ$  光混频器。其中  $120^\circ$  光混频器的本质是  $3 \times 3$  对称光耦合器, 基于  $120^\circ$  光混频器的相干接收机不需要平衡探测模块, 在节约成本的同时还缩小了相干接收机的整体结构<sup>[110]</sup>。

1989 年, Nicholson 等<sup>[111]</sup>首次提出  $120^\circ$  光混频器, 其

基本结构如图 11 所示。在对其基本原理分析仿真和论证的基础上, 制作出  $120^\circ$  光混频器并将其用于差分相移键控相干光通信系统中。

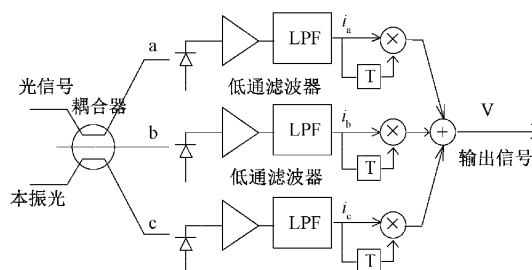


图 11  $120^\circ$  光混频器原理<sup>[111]</sup>

2014 年, Dong 等<sup>[112]</sup>设计一种基于偏振棱镜的  $120^\circ$  相干光通信光混频器, 混频器使用光纤与芯片集成的倒锥光耦合器, 偏振分光棱镜以及  $3 \times 3$  的 MMI  $120^\circ$  光混频结构。

## 6.6 多模干涉耦合器型光混频器

目前国内外已经报道的平面波导上实现光混频器方案主要有星型耦合器类<sup>[113]</sup>、阵列波导光栅类<sup>[114]</sup>以及多模干涉耦合器 (multimode interference coupler, MMI) 类<sup>[115]</sup>。星型耦合器类和阵列波导光栅类光混频器具有结构设计复杂, 器件尺寸较大以及传输效率差的缺点。因此, 国内外研究小组致力于利用多模干涉耦合器实现光混频的功能。而根据 MMI 耦合器的组合类型方式, 基于 MMI 耦合器型的光混频器分为 3 类基本结构:  $4 \times 4$  MMI 耦合器<sup>[116]</sup>、 $2 \times 2$  MMI 耦合器组合<sup>[117]</sup>和  $2 \times 4$  MMI 耦合器组合<sup>[118]</sup>。

### 1) $4 \times 4$ MMI 耦合器组合型

2009 年, 文献[116]报道了一种基于 InP 平台的  $4 \times 4$  MMI 耦合器型的  $90^\circ$  光混频器, 该器件尺寸为  $15 \times 497.5$ , 在 C 波段范围内的附加损耗小于 1 dB。

2011 年, Zimmermann 等<sup>[119]</sup>在 SOI (silicon on insulator) 平台上制备出纳米线波导  $90^\circ$  光混频器。该混频器的尺寸为  $10 \times 85$ , 混频损耗小于 0.5 dB, 相位偏差在 C 波段范围内小于  $5^\circ$ 。

2011 年, Fujitsu 公司<sup>[120]</sup>在 InP 平台上提出了一种楔形  $4 \times 4$  MMI 耦合器型的  $90^\circ$  光混频器, 该光混频器在  $1530 \text{ nm} \sim 1600 \text{ nm}$  的波长范围内, 附加损耗小于 1.4 dB, 相位偏差小于  $\pm 5.4^\circ$ 。

2018 年, Xu 等<sup>[121]</sup>报道了在 SOI 平台上设计的  $90^\circ$  光混频器, 利用了亚波长光栅调节波导中不同模式的有效折射率, 进而改变拍频以实现高效的自映像效应。

2018 年, Wang 等<sup>[122]</sup>首次提出了基于混合等离子体波导的  $90^\circ$  光混频器, 如图 13(d) 所示。在  $1550 \text{ nm}$  波长处的相位偏差小于  $0.7^\circ$ 。但是其附加损耗大, 只适合短距离相干光系统,

除了可以在 InP、SOI 这些相对折射率高的平台上实现  $90^\circ$  光混频器, 还可以在相对折射率低的聚合物平台上实现光混频器<sup>[123]</sup>, 这些器件往往成本较低, 且偏振解复用性



能良好,但由于聚合物的限制,器件的带宽和耐用性通常受到限制。同样利用中等折射率的氮化硅波导也有基于  $4 \times 4$  MMI 耦合器型光混频器的报道<sup>[124]</sup>。

#### 2) $2 \times 2$ MMI 耦合器组合型

2010年,日本 NTT 公司<sup>[117]</sup>提出了一种用于相干接收系统的紧凑型低损耗  $90^\circ$  光混频器,它被集成于绝缘硅平台上,该混频器使用了一种新型拓扑结构并且使用粒子群优化算法对混频器的几何结构进行了全面优化。所制作的混频器共模抑制比大于 30 dB,并且在一块晶圆上的十字结构 C 波段通信中相位误差小于  $3^\circ$ 。

2011年,NTT 公司<sup>[125]</sup>提出使用 Y 分支替代  $2 \times 2$  MMI 耦合器中的一个 MMI 耦合器,该方案使用 Y 分支结构完成了移相过程,减少了混频器中移相器的使用,同时该混频器结构在 C 波段和 L 波段范围的相位偏差小于  $3^\circ$ 。

2017年,Elenion Technologies 公司<sup>[118]</sup>在 SOI 平台上设计了一种最小长度为  $107 \mu\text{m}$  的超紧凑  $90^\circ$  光混频器。该混频器由一个楔形  $2 \times 4$  MMI 耦合器和一个纳米硅波导技术的  $2 \times 2$  MMI 耦合器链接而成。实验结果表明:该种类型的混频器具有高性能,共模抑制比大于 20 dB,相位偏差小于  $5^\circ$ 。

#### 3) MMI 耦合器不同相位解调型

为了获得更高的频谱效率,人们使用多进制相位调制格式。除了常见的光混频器之外,还有不同相位解调的光混频器。

2010年,Fujitsu 公司<sup>[126]</sup>报道了一种基于 InP 平台的  $45^\circ$  光混频器,该光混频器基于  $2 \times 8$  MMI 耦合器,3 对移相器和 3 个  $2 \times 2$  MMI 耦合器的组合。在 32 nm 的带宽内,相位偏差小于  $5^\circ$ 。与传统的 8 进制 DPSK 解调器相比,该光混频器的尺寸更小。

2011年,Fujitsu 公司<sup>[127]</sup>提出了一种基于 InP 平台的  $60^\circ$  光混频器,该光混频器基于  $2 \times 6$  MMI 耦合器,两对移相器和两个  $2 \times 2$  MMI 耦合器的组合,并将其与平衡光电探测器单片集成。在 40 nm 带宽内,器件的相位偏差小于  $5^\circ$ 。2017年,加拿大小组<sup>[128]</sup>报道了基于  $3 \times 3$  MMI 耦合器的  $120^\circ$  光混频器。该器件在 C 波段和 L 波段的波长范围内相位偏差小于  $10^\circ$ ,可应用于高速的无源光纤网络 (passive optical network, PON)。2019年,中科院半导体研究所<sup>[129]</sup>在 SOI 平台上基于  $2 \times 5$  MMI 耦合器非重叠映像的原理,设计了一种  $72^\circ$  光混频器,器件长度为  $89.5 \mu\text{m}$ ,宽度为  $8 \mu\text{m}$ 。

#### 4) MMI 光混频器的分类

由于输入光场的位置不同,会导致多模波导被激发出来的光场模式不同,根据输入光场位置和激发出来的光场模式将 MMI 耦合器分类,分为一般干涉型 (general interference) MMI 耦合器、配对干涉型 (paired interference) MMI 耦合器以及对称干涉型 (symmetric interference) MMI 耦合器<sup>[130]</sup>。

#### (1) 干涉耦合型 MMI 耦合器

干涉型 MMI 耦合器中的所有光场模式都会被激发出来,因此输入光场的位置不会对光混频器的混频效率和其他性能参数产生影响。当多模波导长度  $L = p(3L_x)$ ,  $p = 0, 1, 2, \dots$ , 此时多模波导中输出光场表达式为:

$$\phi(x, L) = \sum_{v=0}^{m-1} C_v \psi_v(x) \cdot (\pm 1) \quad (1)$$

式中:  $C_v$  表示为  $V$  阶模的场激励系数,  $\phi(x, L)$  为输出光场,  $\psi_v(x)$  为  $v$  阶模的模场分布。此时输出端口的光场分布为输入端口光场的复现或者映像。为了更加紧凑的设计,MMI 耦合器选则第一个自映像点,此时  $P=1$ ,利用傅里叶空间分解,可以得出输入光场经过长度  $L$  之后得到输出光场的形式:

$$\phi(x, L) = \sum_{v=0}^{\infty} C_v \psi_v(x) \exp(-j\beta_v L) \quad (2)$$

式中:  $C_v$  表示为  $V$  阶模的场激励系数,  $\phi(x, L)$  为输出光场模式,  $\psi_v(x)$  为  $v$  阶模的模场分布。

#### (2) 配对干涉型 MMI 耦合器

配对干涉型 MMI 耦合器只有导模阶数被 3 整除的时候才能激发光场模式,对于其他激励模式他的激励系数全部为 0。因此输入光场的位置会对光场激发产生影响。配对干涉型耦合器的长度只有  $1/3$  干涉型耦合器的  $1/3$ 。因此可以利用此原理缩小 MMI 耦合器的长度<sup>[131]</sup>。

#### (3) 对称干涉型 MMI 耦合器

对称干涉型 MMI 耦合器多有波导中只有偶数阶模式才能被激发,奇数阶模式的激励系数为 0。因此输入光场的位置必须位于波导中心,当多模波导的长度  $L = P(3L\pi/4)$  的时候,再输出端口就可以得到输入光场的复现或者镜像,可以发现当 MMI 耦合器宽度相同的时候,对称干涉型 MMI 耦合器的长度只有干涉型 MMI 耦合器的  $1/4$ 。通过以上分析,我们可以将不同干涉类型的 MMI 耦合器的成像规律总结如表 2 所示<sup>[132]</sup>。

### 6.7 阵列波导光栅结构光混频器

阵列波导光栅 (arrayed waveguide grating, AWG) 是基于空间光的干涉和衍射效应的平面光混频器件,使用平面光波导技术 (planar light-wave circuit, PLC) 进行制备,且工艺与互补金属氧化物半导体 (COMS) 工艺兼容<sup>[133]</sup>。同其他波分复用器件比较来讲,AWG 制备工艺简单、通道数目多、插入损耗低、器件尺寸小且易与光纤耦合。此外,AWG 还可与其他集成光子器件进行片上集成。AWG 不仅在通信领域得到应用<sup>[134]</sup>,在光纤传感中也得到广泛应用<sup>[135]</sup>。

#### 1) 阵列波导光栅基本原理

阵列波导光栅 (arrayed waveguide grating, AWG) 的基本组成结构有:输入/输出波导、两个聚焦平板区域和一个多通道波导相控阵,相控阵相邻波导之间具有恒定物理路径长度差  $\Delta L$ 。由于通过阵列波导传播的不同波长之间的光程会导致不同的相位差,因此不同波长的光将被输出到

表 2 不同干涉机制的 MMI 耦合器总结

干涉机制	一般干涉	配对干涉	对称干涉
输入波导×输出波导	$N \times N$	$2 \times N$	$1 \times N$
输入位置	任意位置	$y = \pm \frac{w_e}{6}$	$y = 0$
首个一重映像位置	$3L_\pi$	$L_\pi$	$(3L_\pi)/4$
首个 $N$ 重映像位置	$3L_\pi/N$	$L_\pi/N$	$(3L_\pi)/4N$
模式激励条件	无	$C_v = 0, v = 2, 5, 8, \dots$	$C_v = 0, v = 1, 3, 5, \dots$
多模区长度	$L = \frac{p}{N} 3L_\pi$	$L = \frac{p}{N} L_\pi$	$L = \frac{p}{N} \frac{3L_\pi}{4}$

不同的通道位置,并分别从不同的通道输出<sup>[136]</sup>。

## 2) 阵列波导光栅研究进展

1987年平面波导与平面光栅结合的概念被提出,Smit等<sup>[137]</sup>于1988年提出了阵列波导光栅的结构,此结构被看作是AWG结构的雏形。

1990年,Vellekoop等<sup>[138]</sup>实现第一个用在多波长的阵列波导光栅(AWG)元件。1992年,Zirngibl等<sup>[139]</sup>首次提出以InP为基底的元件,该元件使用较小的波导尺寸和弯曲半径进行设计,可与其他元件进行较好的整合。

2000年,Li等<sup>[140]</sup>提出将AWG平板波导部分的输入输出端加工成锥形口的设计,这样的设计可以使传输谱线更平坦化,降低了器件的耦合损耗,有效的控制温度与偏振对于波长漂移的影响,同年AWG已正式在密集波分复用系统中商用并发挥了较为出色的作用<sup>[141]</sup>。

2005年,Hill等<sup>[142]</sup>设计了一款中心波长为1550nm,信道间隔为2nm的4×4AWG。2009年,Ishii等<sup>[143]</sup>实现了信道数为8,信道间隔为0.84nm,3dB带宽为0.8nm。

2017年,Stanton等<sup>[144]</sup>提出并制备了8信道绝缘体上硅的阵列波导光栅,器件尺寸为3.7mm<sup>2</sup>,信道损耗为0.08~0.81dB,信道串扰为-30.2dB,是性能较好的器件。2017年,方青团队设计并制备了1×4级联AWG,该器件采用级联的方式抑制信道之间的串扰,对比单一AWG,级联AWG串扰提高到-33.2dB,器件尺寸为1.0mm×1.4mm<sup>[145]</sup>。

2018年,Stanton等<sup>[146]</sup>在2μm波长下实现了低损耗的阵列波导光栅,信道损耗为2.4dB,每个信道有一31dB串扰。同年,Pichler等<sup>[147]</sup>采用低成本、快速成型、无掩模的激光直写的方法制备了中心波长为850nm的AWG。

2019年,侯智培<sup>[148]</sup>基于氮化硅平台制备出了中心波长838nm的8信道AWG,测试后得到此器件的插入损耗为0.43dB,信道间串扰为-29.6dB。

由于使用氮化硅材料相比SOI的折射率对比低,器件需要更大的面积尺寸,为此,2020年Menard等<sup>[149]</sup>提出波导超晶格的概念,将基于氮化硅材料制备的AWG尺寸缩小两倍以上,同时达到3.4dB的插入损耗和-18dB的信

道串扰。2019年,Liu等<sup>[150]</sup>设计了插入损耗为2.5dB的4路硅基AWG器件。2020年,香港城市大学Zhang等<sup>[151]</sup>团队成功在氮化硅平台上制备出了中心波长860nm,40信道的AWG器件,该器件带宽超过60nm,中心信道插入损耗为1.3dB,此项工作证明了使用大规模(programmable logic controller, PLC)技术制备阵列波导光栅的可行性,可进一步提高集成度。

2021年,刘宏展等<sup>[152]</sup>在带有硅光子环路反射器的SOI晶圆上成功制备了15通道氮化硅,通过与环路反射器的组合减小了器件尺寸,实际测得插入损耗为5.46dB,通道串扰为17.2dB。2021年Taha等<sup>[153]</sup>基于MMI在硅光子平台上成功研制了紧凑型4通道Research Progress of Mixers器件,器件尺寸达到367×67μm<sup>2</sup>,插入损耗为9.6dB。

## 7 光电子器件材料特性对比

### 7.1 光混频器常用材料

在光通信领域,相干光通信系统的集成化和扁平化促进了光电子器件的集成化发展,包括光混频器在内的光接收和探测器件都向着可调谐、响应集中且窄线宽的方向发展。介质层内光波导的传输线性奠定了集成光学基础,此后为光波导为基础的光学混频器结构源源不断的涌出。被用于波导结构制作的材料主要有5种<sup>[154]</sup>:基于钽酸锂晶体的光波导、硅基二氧化硅波导、半导体光波导、光学玻璃波导和聚合物波导。钽酸锂晶体(LiNbO<sub>3</sub>)具有优良的电光、声光、非线性、光折变、光弹以及激光活性等物理特性<sup>[155]</sup>,因其独特光学特性在光电器件的领域中得到了广泛关注<sup>[156]</sup>。离子交换是玻璃光波最常采用的制造工艺,离子交换工艺简单并且成本较低<sup>[157]</sup>。

### 7.2 材料特性对比

波导类型光混频器相位偏差相对较大,因此采用高阶光模式干涉的办法来降低相位偏差。产生光的高阶模式对于基底材料的制作要求高,且制造技术复杂。不同材料中的波导混频器的性能大不相同,因此我们将不同波导材料加以对比,如表3所示。

表 3 不同波导材料性能对比

材料	传输损耗 (1 550 nm, dB/cm)	耦合损耗 (dB/端面)	芯层/包芯 相对折射率差	优缺点
铌酸锂	0.5	1	0%~0.5%	制作出来的器件尺寸较大,并且折射率差较小,属于弱折射率光波导
二氧化硅	0.05	0.25	0%~4%	传输损耗低,折射率匹配关系好,耦合损耗较低
聚合物	0.1	0.1	0%~35%	器件容易受到污染,老化导致性能不稳定,
硅	0.05	0.1	0%~0.5%	损耗低但制作工艺复杂,折射率分布不均,器件性能不稳定

## 8 混频误差分析

光混频器中使用了波片,偏振分光棱镜以及准直透镜组等分立的光学元件,这些光学元件自身的像差和性能会对混频器的混频性能产生较大影响。同时光纤结构光混频器的折射率分布、振动,温度等对器件的稳定性也会产生很大影响,因此对光混频器的各种误差进行理论分析。

### 8.1 相位误差

光混频器中使用了大量的光学元件,温度引起的元件热膨胀、装配误差以及光学元件自身存在的像差等都会导致通过的光线路程差不能严格相等,并且会随着激光波长的增加而逐渐扩大<sup>[158]</sup>。

在混频器的工作光路和工作过程中,波片镀膜误差和波片自身面形误差引入的额外相位差、偏振分光棱镜的相位延迟偏等都会对混频器的相位差产生较大影响。进而影响输出的中频信号质量。

### 8.2 插入损耗

插入损耗是指光混频器光路中的光学元件会导致经过其的光束产生能量衰减和相位偏差,进而导致混频过程的能量衰减,降低相干接收机的接收灵敏度。因此插入损耗是影响混频器工作性能的一个重要误差来源,对以下几种光学元件产生的插入损耗进行分析。

#### 1) 光纤准直镜

当光纤准直镜的透镜焦点和光纤纤芯重合的时候。耦合效率可以达到最大值,然而实际工作过程中的光纤多为单模光纤,其纤芯直径小于 10  $\mu\text{m}$ ,因此透镜焦点和光纤纤芯之间的对准吻合具有极大困难,也是后期保证相干探测灵敏度的一项关键技术。

#### 2) 偏振分光棱镜(PBS)和波片

偏振分光棱镜将入射光束电矢量可以分为相互垂直的  $P$  分量和  $S$  分量,信号光和本振光的  $P$  分量和  $S$  分量组合之后干涉混频,分别输出中频电流信号。但是偏振分光棱镜和波片的镀膜缺陷导致不同偏振态光束的反射率和透射率不同,进而导致光束插入损耗,根据经验和测量的实验数据,波片厚度只有一毫米,所以其对光束产生的能量损耗可以忽略不计,对于镀有增透膜的偏正分光棱镜来说, $P$  分量和  $S$  分量的透过率基本都为  $(1-R)^2$ 。

## 9 相干光通信系统中光混频器混频效率分析

### 9.1 光场模式匹配

相干光通信系统中经常会采用多种光场模式的光束进行信号或者信息传输,如空间光相干通信系统中经常会采用高斯光束,如果使用卡式光学天线传输信号,那么光束的光场为环状分布。而本振光光场模式一般多为均匀分布或者高斯分布,艾里分布等,信号光和本振光两者的光场振幅分布情况决定各自光场中的能量分布情况会直接影响混频器输出中频信号,并进一步影响整个相干探测系统的信噪比和灵敏度<sup>[159]</sup>。因此振幅分布匹配作为重要的相干前提,对信号、本振光能否实现高效率混频十分重要。

在相干光通信系统中,信号光和本振光通常有几种不同类型的光场分布类型。通常激光场分布可以分为艾里分布、均匀分布和高斯分布<sup>[160]</sup>。而不同光场类型会对混频器的混频效率产生影响<sup>[161]</sup>。几种类型光场分布分别为:高斯分布(Gauss)、艾里分布(Airy)、均匀分布(Uniform)。

当本振光为均匀分布的振幅分布为  $U_{L0}(r) = 1$ ,将本振光和信号光各自的光场分布考虑进混频效率公式当中,可以得到再本振光光场分布为均匀分布时候的混频效率公式:

$$\eta(r_0) = 4 \frac{[1 - J_0(\frac{\pi r_0}{F\lambda})]}{(\frac{\pi r_0}{F\lambda})^2} \quad (3)$$

当本征光为艾里分布的时候,将信号光和本振光的光场分布带入到混频效率公式当中去,得到本振光为艾里分布情况下的混频效率公式:

$$\eta_{AA}(r_0) = 1 - J_0^2(\frac{\pi r_0}{F\lambda}) - J_1^2(\frac{\pi r_0}{F\lambda}) \quad (4)$$

当本振光为高斯分布的时候,两光的光场振幅分布函数同样代入到前文整理的混频效率公式中,代入设定的参数,经计算得到本振光为高斯分布时候的混频效率公式,混频效率随探测器半径  $r_0$  变化的公式:

$$\eta_{AG}(r_0) = \frac{8 \left| \int_0^{r_0} J_1\left(\frac{\pi r}{F\lambda}\right) \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{\omega_0^2}\right) dr \right|^2}{\omega_0^2 \left[ 1 - \exp\left(-2\frac{r_0^2}{\omega_0^2}\right) \right]} \quad (5)$$

## 9.2 光斑大小匹配

根据研究,信号光与本振光的振幅、相位达到完全匹配时,干涉图样的衬比度最高,此时混频电流信号最高,相干探测灵敏度最高。信号光和本振光斑的大小与探测器半径之间的比率小一些,这样可以保证探测器可以将全部光束能量接收到;并且保证光混频器的接收靶面与高斯光束的束腰位置重合,束腰位置的能量更为集中,会更有利于信号光能量的接收,进而有助于实现更效率的混频。

当信号光光束对混频器混频效率的影响比较大,假设此时本振光被全部接收,此时的光混频器效率公式可以表示为:

$$\eta = \frac{8}{k^2} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{k^2}{4}\right) \right]^2 \quad (6)$$

## 9.3 波前质量

混频器通过将信号光与本振光的波前相干混频本质是信号光的本振光之间的干涉图样信息解调,由于干涉发生在纳米量级上,从而大大提高了相干探测灵敏度,而干涉发生的重要条件就是相位匹配,因此信号光和本振光之间的相位匹配情况直接影响混频器的混频效率。光束的波前质量会直接影响两光在相干过程中的相位变化,光波前相位畸变会降低干涉混频过程中的信噪比从而对混频效率产生了不可忽视的影响。影响波前质量的原因主要有两点:

1)相干接收终端的工作环境以及机械平台的振动会对内部传输的光信号波前产生影响,同时还对光斑之间的对准相位产生影响进而影响混频效率;同时内部光学元件自身的像差,色差,透镜表面曲率和厚度变化,甚至温度变化引起的厚度变化能都会导致额外的相位畸变;影响光场中的能量分布,进而影响干涉效果,降低混频效率。

2)空间相干光通信系统中的信号光在大气信道中传输,受温度随机变化影响,空气折射率在空间中的不均匀分布以及随着时间的随机变化起伏会导致光束发生光强起伏、相位畸变和到达角度起伏等多种光学湍流效应,这会导致光束在接收平面上的能力分布不均,相位随机变化,甚至导致探测器靶面接收到光斑的光场振幅分布的严重变形,导致干涉效果下降甚至混频不能发生,极大的影响了混频器的混频效率。

在倾斜像差、离焦像差、球差、彗差和像散等五种基本像差之中,倾斜像差对混频效率的影响最大,倾斜像差导致光束出现光束漂移和到达角起伏等现象,影响光束对准;像散的影响最小<sup>[162]</sup>。

## 9.4 振动及跟踪瞄准误差

光束在传输过程中受到大气湍流的影响会不断偏离光轴方向,并且围绕固定光轴方向随机变化,同时工作平台的振动也会使得光束不断发生随机抖动。大气湍流、平台振动以及APT(acquisition pointing tracking)分系统的环路噪声引起的视轴的晃动,直接影响了接收到两光束间

的同轴度,导致信号光和本振光的光斑重合面积减少即相干面积减少,两者之间的相干度下降,损失大量有用的光信息能量,因此,抖动、跟踪瞄准误差会对光混频器的混频效率产生不可忽略的衰减。

光束漂移和光束对准误差引起的混频效率衰减随着两个光斑光轴之间的距离增大而逐渐增大,相比较相位匹配、偏振特性匹配等因素造成的混频效率衰减,光束漂移引起的传输方向抖动造成的混频效率衰减是最大的。

## 9.5 偏振特性

光混频器实质是一个由偏振分光棱镜及波片组成的定用的偏振干涉仪,因此偏振匹配是重要的光束相干条件<sup>[163]</sup>。信号光在经过复杂的空间传输信道与光学传输系统后的偏振状态受到各种因素的影响而发生改变,信号光和本振光之间的偏振态特性会出现较大差异,进而影响干涉之后的条纹衬比度。因此,就信号光与本振光的偏振特性匹配对混频器混频效率的影响进行研究<sup>[164]</sup>。

### 1)线偏振信号光矢量方向对混频效率的影响

当信号光和本振光都处于线偏振的状态下,混频器内部的输出用于对调制信息还原的直流支路光电流及用于控制环路的正交支路光电流,从输出功率大小的角度考虑其对混频器性能的影响,将混频效率公式写成<sup>[165]</sup>:

$$\eta(\theta) = \frac{P_{\text{实际}}}{P_{\text{理想}}} \propto \frac{I_{\text{实际}}^2}{I_{\text{理想}}^2} = \frac{(\sqrt{2} \sin\theta + \sqrt{2} \cos\theta)^2}{4} = \frac{|1 + \sin 2\theta|}{2} \quad (7)$$

### 2)圆偏振态和椭圆偏振态对混频效率的影响

圆偏振及椭圆偏振光具有比线偏振光更好的稳定性,有利于提高通信光偏振态的确定性<sup>[166]</sup>。因此在相位差理想的情况下,考虑其对混频器性能的影响,将混频效率公式写成输出功率比形式:

$$\eta(\phi(t) - \psi, \theta) = \frac{I_{\text{实际}}^2}{I_{\text{理想}}^2} = \frac{[\cos(\phi(t) - \psi) + \sin(\phi(t) - \psi) \sin(2\theta)]^2}{2} \quad (8)$$

当进入到混频器的信号光为圆偏振光的时候,本振光也是圆偏振光,此时光混频器的输出功率为集中偏振态中最高;当信号光入射混频器的时候是椭圆偏振光,随着其快轴夹角 $\theta$ 的变化,混频效率有所下降

## 10 太赫兹混频器

混频器随着信号频段的不断拓展而不断向前发展,从最初的射频通信频段到光频段,其结构和材料以工作频段为中心不断发展。太赫兹技术在高灵敏度检测生物医学成像,高速率通信和天体物理传感中有着至关重要的作用而成为一项新的研究热点,混频器在太赫兹频段也得到了进一步改进和完善。

太赫兹外差检测技术将接收到的太赫兹信号和本地



震荡器提供的信号混合并输出中频电流信号,中频电流信号被现有的射频电子设备检测之后并进一步处理。在太赫兹频段常用的混频器有肖特基混频器、超导隧道结混频器和超导热电子混频器。

### 10.1 太赫兹肖特基混频器

肖特基二极管由具有能量势垒的金属半导体结构组成,非线性电流-电压特性如图 12 所示,是太赫兹混频器的基本工作机制。为了保证在太赫兹频段可以稳定工作,肖特基二极管应该具有足够小的尺寸以保证低结电容,此外还通过掺杂外延层保证低串联电阻,这是太赫兹频段二极管混频器与其他波段混频器的不同之处。

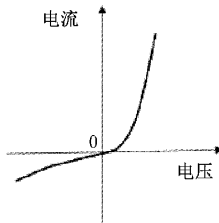


图 12 肖特基势垒二极管电压-电流曲线

GaAs 掺杂由于其高迁移率,大间隙能量和成熟的制造工艺已经称为太赫兹肖特基二极管混频器中应用比较广泛的半导体制造工艺。

1965 年提出的晶须接触肖特基二极管被广泛应用于太赫兹混频器当中<sup>[167]</sup>,到 20 世纪 90 年代,肖特基阳极阵列组成的蜂窝结构被提出,这种结构可以大大降低串联电阻和电容,进一步以高肖特基二极管混频器在太赫兹频段范围内的工作截止频率<sup>[168]</sup>。然而接触式肖特基太赫兹混频器的机械不稳定性、耦合效率低和集成难度大等缺陷,之后后的发展应用中逐渐被易于集成的平面肖特基半导体混频器取代<sup>[169]</sup>。

### 10.2 太赫兹超导隧道结混频器

超导隧道结构由两个被超薄绝缘体隔开的超导体组成,电子穿过隧道结的隧穿效应产生电流的电流-电压非线性过程是其混频过程的基本机制。为了区分不同的隧穿过程,将基于电子对的隧穿混频器称之为约瑟夫逊混频器;将基于粒子隧穿过程的混频器称之为 SIS 混频器,SIS 混频器的灵敏度要高于约瑟夫逊混频器<sup>[170]</sup>。

1979 年,第 1 个 SIS 混频器成功实现混频功能,混合量子理论对其物理过程进行了描述,并且预测其可以达到量子极限的灵敏度。SIS 结构的本质是一个平行板电容器,具有高度电容性,为了有效地提取中频电流信号,SIS 混频器需要电感调谐电路和匹配网络来补偿中频电流信号需要的寄生电容特性,这限制了其工作带宽。为了最小化欧姆损耗,调谐电路通常采用超导薄膜微带线的形式<sup>[171]</sup>。

SIS 混频器在 1.3 THz 频率以下可以提供接近量子噪声的灵敏度,并且可以检测极其微弱的太赫兹信号<sup>[172]</sup>。

此外驱动 SIS 混频器的本振信号通常小于 1 mW,其优越性远低于肖特基二极管混频器的要求。

### 10.3 太赫兹超导热电子混频器

热电子是描述半导体材料中的非平衡电子数目的参数指标,热电子辐射计是指利用半导体或者超导体中的晶格间相互作用来实现快速相应的辐射计量。当入射光子被器件的有源区吸收的时候,温度将升高,并测量电阻的变化<sup>[173]</sup>。如果使用热电子辐射计量技术作为太赫兹混频器首先要确定其有效中频带宽,半导体材料的中频带宽较小,而超导材料在提供超高灵敏度的同时还可以提高中等适用的带宽范围,因此被广泛应用于外差太赫兹测量系统<sup>[174]</sup>。

热电子太赫兹混频器的灵敏度逼近肖特基二极管混频器要好,略差于 SIS 混频器,其工作过程依赖低温环境以满足超导条件<sup>[175]</sup>。但是其对光子的吸收没有频率依赖性,因此可以在 1 THz 以上工作。此外,热电子混频器不需要外部磁场来抑制约瑟夫逊噪声电流,更低的本地震荡信号功率等都使得其收到了外差太赫兹技术应用的关注。

未来,热电子太赫兹混频器的发展方向包括更加精确的器件模型,不断改进的制造工艺以及提供更高灵敏度和更宽中频带宽的新材料<sup>[176]</sup>。

## 11 西安理工大学研究进展

西安理工大学柯熙政教授团队根据晶体双折射效应自主设计研发出一款晶体空间光混频器,并将其成功应用于光通信系统当中,该晶体光混频器具有良好的性能表现。

根据光混频器的功能和单轴晶体的光学性质,设计出晶体型 90°空间光混频器原理如图 13 所示。在图中, $E_s$  和  $E_L$  分别表示信号光束和本振光束,均沿  $z$  轴传播。沿光线传播方向依次是 1/4 波片、双折射晶体 1、第一 1/2 波片、第二 1/2 波片、双折射晶体 2 和检偏双折射晶体 3。 $I_3$ 、 $I_4$ 、 $I_5$ 、 $I_6$  为四路混合输出光束。

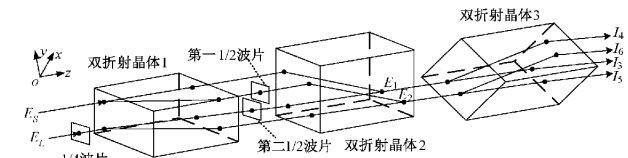


图 13 晶体型  $2 \times 4$  90°空间光混频器原理结构

本文在实验系统中对所设计的光混频器进行测试,示波器上出现两路正弦波如图 14、15 所示,旋转 1/4 波片进行调试,使得两路电信号之间的幅值大概在 1:1 之间,验证了该混频器能够将信号光和本振光进行合成,实现了混频的功能。此时两路信号的中频电压可以达到 130~145 mV 之间,由于探测器探测到的电压值正比于接收到的光功率,因此设计制作的光混频器插入损耗较小。

后将设计的光混频器应用到 BPSK 相干光通信系统

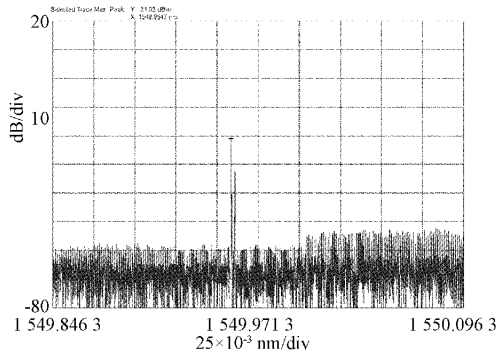


图14 输出中频信号光谱

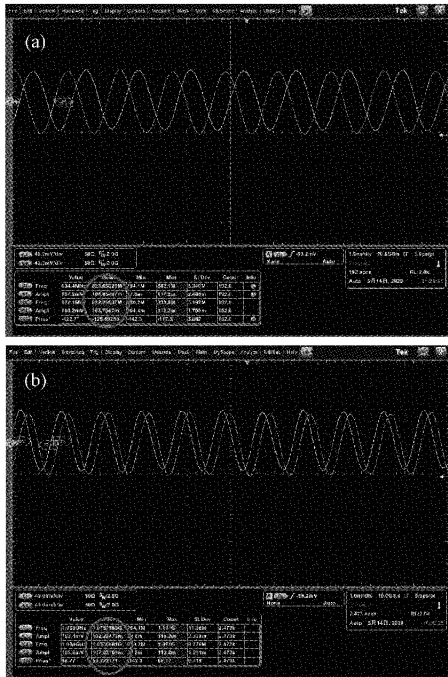


图15 晶体光混频器中频信号测试结果

中,光混频器将接收到的信号光与本振光进行混频后,得到的正交支路通过频率控制系统对本振光的频率进行控制,经过测试,该混频器能够正常应用于相干光通信系统中,且能够进行长时间稳定的通信,这进一步验证了该混频器的功能

## 12 结 论

本文系统到对光混频器的研究现状和进展,研究成果进行了介绍,对不同结构和类型之间的特点进行对比,优势和缺点进行阐述。高信噪比、小型化、集成化的高稳定度的光混频器仍然是未来科研人员追求的目标。也是光电子探测器件未来的发展趋势。

相干光通信需要不断满足信息化社会迅速正常的通信需求,不断拓展自身的通信容量和带宽,作为相干光通信系统的关键器件,光混频器的性能是必须解决的关键问

题。目前,相干光通信集中在C波段和L波段,因此寻找更多的通信波段成为下一代的研究热点。与之对应的光混频器也应该能够兼容更多波段,扩大其带宽,提高频谱利用率,这是迎合相干光通信发展的必然趋势。

传统光混频器多为块状和光学元件结构,不便于集成化发展。因此光混频器的集成化发展是一个必然趋势。尽管现在材料发展促进了光电子器件的集成化发展,但是仍存在许多挑战,适应新波段的高容量,以及和多种高阶调制格式的适用性等,因此光混频器的集成化发展对于新波段发展,实现紧凑型相干光接收端具有重要意义。

现存的光模块包括光混频器在内的多种发射接收光器件主要是基于硅光耦合工艺。但是其发展已经存在的诸多问题限制了通信容量,波导损耗大,插入损耗高等问题都是亟待解决的问题,因此提高硅基光混频器的性能是进一步提高通信容量,解决时下问题的有效办法。

未来随着光子集成度越来越高,材料科学和电子科学等基础学科的发展,无论是光混频器还是平衡探测器最终都将通过集成技术和更加复杂的制造工艺进行融合,建立起高性能光电探测平台。

## 参考文献

- [1] ARMSTRONG E H. The super-heterodyne-its origin, development, and some recent improvements [J]. Proceedings of the Institute of Radio Engineers, 1924, 12(5):539-552.
- [2] 谢金娟. 短波接收机前端高中频电路的设计与实现[D]. 武汉:武汉理工大学,2010.
- [3] 李春光,王佳,吴云,等. 中国超导电子学研究及应用进展[J]. 物理学报,2021,70(1):184-209.
- [4] WSCHOTTK Y. Uber super heterodyngedankens[J]. Elek. Nachrichtentech, 1925, 5(2): 48-54.
- [5] 宋牧襄. 超外差电路的发明人——爱德文·H·阿姆斯特朗[J]. 中国工程师, 1995(4):33-35.
- [6] EVANS H, BUCKLAND G, LEFER D. They made America: From the steam engine to the search engine: Two centuries of innovators[J]. New York: Little Brown, 2004:299-321.
- [7] 胡海帆, 赵自然, 马旭明,等. GaAs肖特基二极管的250 GHz二次谐波混频器研究[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(7):12-16.
- [8] WEN Z, DENG L, ZHAO X, et al. Improving voltage output with PZT beam array for MEMS-based vibration energy harvester: Theory and experiment [J]. Micro System Technologies,2015, 21(2):331-339.
- [9] KYO L, LIU J, HUANG Q Z, et al. High assembly tolerance and cost-effective 100-Gb/s TOSA with silica-PLC AWG multiplexer [J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(4): 1-9.

- [10] 何杰. 1THz 高次谐波混频器[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- [11] 何荣. 毫米波雷达接收机用混频器设计[D]. 北京: 北京信息科技大学, 2019.
- [12] 冯震宇. 基于平面肖特基势垒二极管的太赫兹固态混频器研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
- [13] THOMAS B, MAESTRINI A, BEAUDIN G. A low-noise fixed-tuned 300~360 GHz sub-harmonic mixer using planar Schottky diodes[J]. *Microwave Wireless Components Letters*, 2005, 15(12): 865-867.
- [14] ZHANG J, PIIRONEN P, MÖTTÖNEN V, et al. Wide-band equivalent circuit of quasi-vertical planar Schottky diode for 650 GHz subharmonic mixers[C]. *The 5th International Workshop on Terahertz Electronics*, Grenoble, September, 1997: 18-19.
- [15] HESLER J L. Planar Schottky diodes in submillimeter-wavelength waveguide receivers [J]. *Space THz Technology*, 1993, 13(2): 12-19.
- [16] HESLER J L. A fixed tuned 400 GHz subharmonic mixer using planar schottky diodes [J]. *Space THz Technology*, 1999, 78(1): 95-99.
- [17] SIEGEL P H, SMITH R P, GRAIDIS M C, et al. 2.5-THz GaAs monolithic membrane-diode mixer[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1999, 47(5): 596-604.
- [18] WANG H M. multi-gigahertz RF mixer core in 0.5/ $\mu\text{m}$  CMOS [C]. 1998 IEEE International Solid-State Circuits Conference, Digest of Technical Papers, ISSCC. First Edition (98CH36156), IEEE, San Francisco, CA, USA, 1998: 370-371.
- [19] BHAPKAR U V, LI Y, MATTAUCH R J. InGaAs/InP heteroepitaxial Schottky barrier diodes for Terahertz applications [J]. *International Symposium on Space THz Technology*, 1992, 32(1): 661-677.
- [20] PODEVIN F. Composants Schottky a heterostructures de semi-conducteurs en technologie InP pour le melange de frequences a 560 GHz[D]. Lille 1, 2001.
- [21] FLERI D A COHEN L D. Nonlinear analysis OFT the Schottky-barrier mixer diode[J]. *Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1973, 21(1): 39-43.
- [22] ARAKI T, HIRAYAMA M. A 20-GHz integrated balanced mixer [J]. *Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1971, 19(7): 638-643.
- [23] MCCOLL M. Conversion loss limitation on schottky-barrier mixers[J]. *Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1977, 25(1): 54-59.
- [24] COOPER K B, DENGLER R J, LLOMBART N, et al. THz imaging radar for standoff personnel screening[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2011, 1(1): 169-182.
- [25] 胡建凯, 黄振起, 李宝令, 等. 3 mmFM/CW 组件中鳍线混频器的研究[J]. *固体电子学研究与发展*, 2001, 21(1): 4-5.
- [26] 刘乾坤. 超宽带系统中 CMOS 直接下变频混频器的设计和研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007.
- [27] CHAMPLIN K S, EISENSTEIN G. Cutoff frequency of submillimeter Schottky-barrier diodes [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1978, 26(1): 31-34.
- [28] BLAISDELL A, GEO FFROY R, HOWE H. A novel broadband double balanced mixer for the 18~40 GHz range[J]. *MTT-S Digest*, 1982, 3(4): 33-35.
- [29] SILES J V, GRAJAL J, CARLO A D. Design of submillimeter Schottky mixers under flat-band conditions using an improved drift-diffusion model[J]. *Microwave and Wireless Components Letters*, 2009, 19(3): 167-169.
- [30] 田超, 杨浩, 董军荣, 等. 一种指数掺杂的砷化镓平面肖特基变容二极管的设计与制作[J]. *电子器件*, 2011, 21(1): 29-32.
- [31] SABER M A. Thermal characterization of THz planar Schottky diodes using simulations[D]. Finland: Aalto university, 2012.
- [32] YAN L, KROZER V, MICHAELSEN R, et al. Physical based Schottky barrier diode modeling for THz applications [C]. *IEEE International Wireless Symposium*, 2013: 1-4.
- [33] PÉREZ-MORENO C G, GRAJAL J. Physical electro-thermal model for the design of Schottky diode-based circuits [J]. *Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2014, 4(5): 597-604.
- [34] ORFAO B, VASALLO B G, MORO-MELGAR D, et al. Analysis of surface charge effects and edge fringing capacitance in planar GaAs and Ga/N Schottky barrier diodes [J]. *Transactions on Electron Devices*, 2020, 67(9): 3530-3535.
- [35] ORFAO B, VASALLO B G, PÉREZ S, et al. Dielectric passivation and edge effects in planar Ga/N Schottky barrier diodes [J]. *Transactions on Electron Devices*, 2021, 68(9): 4296-4301.
- [36] TOOLE W H, EL-MASRY E I, MANKU T. A novel highly linear 1 GHz switched-current sub-sampling mixer [C]. 1996 IEEE International

- Symposium on Circuits and Systems, Circuits and Systems Connecting the World, ISCAS 96. IEEE, 1996,1:203-206.
- [37] GIUSTOLISI G, PALMISANO G, PALUMBO G, et al. A novel 1.5-V CMOS mixer[C]. Proceedings of the 8th Great Lakes Symposium on VLSI (98TB100222). IEEE, Lafayette, LA, USA, 1998: 113-117.
- [38] LI L, GUO J, LI Z, et al. Substrate noise analysis for RF CMOS mixers based on state equation technique [C]. Proceedings of the Third International Workshop on Design of Mixed-Mode Integrated Circuits and Applications (99EX303). IEEE, Puerto Vallarta, Mexico, 1999: 94-97.
- [39] TERROVITIS M T, MEYER R G. Noise in current-commutating CMOS mixers[J]. Journal of Solid-State Circuits, 1999, 34(6): 772-783.
- [40] ERIKSSON P, TENHUNEN H. The noise figure of a sampling mixer: theory and measurement [C]. ICECS' 99. Proceedings of ICECS' 99. 6th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems(99EX357). IEEE, Paphos, Cyprus, 1999, 2: 899-902.
- [41] 池保勇, 石秉学. 用于 2.4 GHz 无线局域网收发机的 CMOS 混频器 [J]. 半导体学报, 2003, 12(5): 472-475.
- [42] 任乐宁, 朱樟明, 杨银堂. 一种基于准浮栅技术的 0.6 V, 2.4 GHz CMOS 混频器 [J]. 电路与系统学报, 2005, 6(1): 144-146.
- [43] EL-SHEWEKH E W, EL-SABA M H. Wide frequency range(30 M~1 GHz) low noise figure, low power, active CMOS mixer [C]. Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Fuzzy Systems (03CH37442). IEEE, Cairo, Egypt, 2003: 160-163.
- [44] 崔福良. 蓝牙收发机中混频器电路和镜像抑制电路的分析与设计[D]. 上海:复旦大学, 2004.
- [45] 董怀玉. CMOS 射频超宽带混频器的研究[D]. 西安:西安理工大学, 2005.
- [46] 危长明, 陈迪平, 陈弈星. 一种 900MHz CMOS 低压高线性度混频器的设计 [J]. 半导体技术, 2005, 56(10): 78-82.
- [47] 唐守龙, 吴建辉, 罗岚. 深亚微米工艺 CMOS Gilbert 混频器噪声分析 [J]. 应用科学学报, 2006, 6(4): 372-376.
- [48] 袁帅军. CMOS 电流模式射频混频器研究[D]. 长沙:湖南大学, 2010.
- [49] 张银行, 宋志国, 邓小飞. 低电压高增益下变频混频器设计 [J]. 微计算机信息, 2012, 28(9): 183-184.
- [50] 申晶, 张晓林. 基于衬底偏置的超低耗电复用混频器 [J]. 北京:北京航空航天大学学报, 2013, 39(4): 531-534.
- [51] 王超. 毫米波 CMOS 肖特基势垒二极管混频器设计[D]. 天津:天津大学, 2014.
- [52] WEGERIF S, REDMAN W W. An integrated CMOS image-rejection mixer system for low-jitter secondary frequency references [C]. 1993 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, IEEE, Chicago, IL, USA, 1993:1010-1013.
- [53] 田超, 杨浩, 董军荣, 等. 一种指数掺杂的砷化镓平面肖特基变容二极管的设计与制作 [J]. 电子器件, 2011, 21(1):29-32.
- [54] HOOMAN D, ASAD A. Noise in RF-CMOS Mixers: A simple physical model [J]. Transactions on Solid-State Circuits, 2013, 39(4):531-534.
- [55] NEDUNGADI A, VISWANATHAN T. Design of linear CMOS transconductance elements [J]. Circuits & Systems IEEE Transactions on, 1984, 31(10):891-894.
- [56] BLAISDELL A, GEOFFROY R, HOWE H. A novel broadband double balanced mixer for the 18~40 GHz range [J]. MTT-S Digest, 1982, 3(4):33-35.
- [57] EISENBERG J, PANELLI J, WEIMING O. A new planar double-double balanced MMIC mixer structure [J]. MTT-S Digest, 1991, 2(1):81-84.
- [58] TON T N, DOW G S. An X-band monolithic double double-balanced mixer for high dynamic receiver application [J]. MTT-S Digest, 1990, 6(1):197-200.
- [59] BULCHA B T, HESLER J L, DRAKINSKIY V, et al. Design and characterization of 1.8~3.2 THz Schottky-based harmonic mixers [J]. Transactions on Terahertz Science and Technology, 2016, 6(5): 737-746.
- [60] 何婷婷, 李少甫, MAHMUD N A L, 等. 肖特基二极管太赫兹混频器研究进展 [J]. 传感器与微系统, 2020, 39(5): 4-6.
- [61] WEI H C, WENG R M, HSIAO C L, et al. A 1.5 V 2.4 GHz CMOS mixer with high linearity [C]. The 2004 IEEE Asia-Pacific Conference on Circuits and Systems, 2004. Proceedings, IEEE, 2004, 1: 289-292.
- [62] 沈怿皓, 张润曦, 张炜杰, 等. 多双曲正切法则在高线性度 CMOS 混频器设计中的分析与应用 [J]. 电子器件, 2008(4):1150-1154.
- [63] APARIN V, BROWN G, LARSON L E. Linearization of CMOS LNA's via optimum gate biasing [C]. 2004 IEEE International Symposium on



- Circuits and Systems (IEEE Cat. No. 04CH37512), IEEE, 2004, 4: IV-748.
- [64] WEBSTER D R, HAIGH D G, SCOTT J B, et al. Derivative superposition-linearization technique for ultra-broadband systems [J]. Colloq. on Wideband Circ. Modeling Tech, 1996, 3(1): 12-14.
- [65] KIM T W, KIM B, LEE K. Highly linear receiver front-end adopting MOSFET transconductance linearization by multiple gated transistors [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2004, 39(1): 223-229.
- [66] APARIN V, LARSON L E. Modified derivative superposition method for linearizing FET low-noise amplifiers [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2005, 53(2): 571-581.
- [67] CUSMAI G, BRANDOLINI M, ROSSI P, et al. A 0.18- $\mu\text{m}$  CMOS selective receiver front-end for UWB applications [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2006, 41(8): 1764-1771.
- [68] BENISTY M, BERGER J, JOCOU L, et al. An integrated optics beam combiner for the second generation VLTI instruments [J]. Astronomy and Astrophysics, 2009, 498(2): 601-613.
- [69] DENG C, GONG W, HAN S. Pulse-compression Ghost imaging Lidar via coherent detection [J]. Optics Express, 2016, 24(23): 25983-25994.
- [70] YAN D, POPP J, PLETZ M, et al. Highly sensitive broadband raman sensing of antibiotics in step-index hollow-core photonic crystal fibers [J]. ACS Photonics, 2017, 4(1): 139-145.
- [71] 陈浩. 二氧化硅基 90 度光混频器的设计和优化 [D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [72] 罗玉婵. 适用于多维复用系统的硅基集成拉锥定向耦合器的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [73] CHEN B X, LU H L, ZHAO D X, et al. Optimized design of polarization-independent and temperature-insensitive broadband optical waveguide coupler by use of fluorinated polyimide [J]. Applied Optics, 2003, 42(20): 4196-4201.
- [74] WANG Q, HE S. Optimal design of planar wavelength circuits based on Mach-Zehnder Interferometers and their cascaded forms [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(3): 1284-1290.
- [75] ALAM M Z, CASPERS J N, AITCHISON J S, et al. Compact low loss and broadband hybrid plasmonic directional coupler [J]. Optics Express, 2013, 21(13): 16029-16034.
- [76] YUEN H P, CHAN V W. Noise in homodyne and heterodyne detection [J]. Optics Letters, 1983, 8(3): 177-179.
- [77] ABBAS G L, CHAN V W S, YEE T K. A dual-detector optical heterodyne receiver for local oscillator noise suppression [J]. Journal of Lightwave Technology, 1985, 3(5): 1110-1122.
- [78] GIMLETT J, VODHANEL R, CHOY M, et al. A 2-Gbit/s optical FSK heterodyne transmission experiment using a 1520-nm DFB laser transmitter [J]. Journal of Lightwave Technology, 1987, 5(9): 1315-1324.
- [79] INOUE T, NARA K. Ultrasmall PBS-integrated coherent mixer using 1.8 $\mu\text{m}$  silica-based planar light-wave circuit [J]. Optical Communication, 2010, 23(1): 23-26.
- [80] 陈浩. 二氧化硅基 90 度光混频器的设计和优化 [D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [81] 万玲玉, 孙建峰, 刘立人. 波片光轴偏差对偏振分光光束振幅和相位的影响研究 [J]. 光学技术, 2010, 21(36): 307-310.
- [82] DAI D, LIU L, GAO S, et al. Polarization management for silicon photonic integrated circuits [J]. Laser & Photonics Reviews, 2013, 7(3): 303-328.
- [83] TANG Z, ZHANG F, ZHU D X, et al. A photonic frequency down-converter based on a single dual-drive Mach-Zehnder modulator [J]. IEEE Topical Meeting Microw. Photon., 2013, 42(12): 150-153.
- [84] INOUE T, KAWASHIMA H, NARA K. Double-pass PBS-integrated coherent mixer using silica-based PLC [J]. Electronics Letters, 2010, 26(21): 1517-1519.
- [85] ZHOU Y, SUN J, YAN A, et al. Self-homodyne interferometric detection in  $2 \times 4$  optical hybrid for free-space optical communication [J]. Laser Communications, 2010, 26(2): 65-78.
- [86] 庄欣欣, 苏根博, 贺友平, 等. 双折射晶体——重要的光功能材料 [J]. 结构化学, 2001, 21(4): 291-293.
- [87] 张晓宇, 邱鑫静, 何瑞英, 等. 基于双平行马赫-曾德尔调制器的全光混频器 [J]. 光通信技术, 2019, 43(1): 47-50.
- [88] GARREIS R B. 90-degree optical hybrid for coherent receivers [J]. SPIE, 1991, 15(22): 210-219.
- [89] LI J, BILLAH M R, SCHINDLER P C, et al. Four-in-one interferometer for coherent and self-coherent detection [J]. Optics Express, 2013, 21(11): 13293-13304.
- [90] 赵意意. 空间相干光通信终端光学系统研究 [D]. 合肥: 中国科技大学, 2015.
- [91] BARWICZ T, WATTS M R, POPOVIĆ M A, et al. Polarization-transparent microphotonic devices in the

- strong confinement limit[J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(1): 57-60.
- [92] 南航,张鹏,佟首峰,等.空间光混频器分光性能的分析与优化[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(7): 1748-1756.
- [93] KLEINMAN D A, BOYD G D. Infrared detection by optical mixing[J]. *Journal of Applied Physics*, 1969, 40(2): 546-566.
- [94] LANGENHORST W. Compact bulk optical 90 degrees hybrid for balanced phase diversity receivers [J]. *Electronics Letters*, 1989, 25(22): 1518-1519.
- [95] GARREIS R B, ZEISS C. 90° optical hybrid for coherent receivers[J]. *Optics and Photonics*, 1991, 15(22): 210-219.
- [96] 王英伟,程灏波,刘景和. YVO<sub>4</sub>双折射晶体生长及完整性分析[J]. *人工晶体学报*, 2013, 32(1): 41-43.
- [97] INOUE T, KAWASHIMA H, NARA K. Double-pass PBS-integrated coherent mixer using silica-based PLC [J]. *Electronics Letters*, 2010, 26 ( 21 ): 1517-1519.
- [98] RYBAROMANOWSKI W. YVO<sub>4</sub> crystals puzzles and challenges[J]. *Crystal Research & Technology*, 2010, 38(3-5): 225-236.
- [99] XU L, WANG Y, PATEL D, et al. Ultra-broadband and ultra-compact optical 90 hybrid based on 2×4 MMI coupler with subwavelength gratings on silicon-on-insulator [C]. *Optical Fiber Communication Conference*, Optica Publishing Group, 2018: M3L.7.
- [100] JIAO Y, ZHU Y, HONG X, et al. An integrated optical mixer based on SU8 polymer for PDM—QPSK demodulation[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(20): 1490-1492.
- [101] YU J, MU J, CHEN K, et al. High-performance 90 hybrids based on MMI couplers in Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> technology[J]. *Optics Communications*, 2020, 46(5): 125-129.
- [102] NASU Y, MIZUNO T, KASAHARA R, et al. Temperature insensitive and ultrawide band silica-based dual polarization optical hybrid for coherent receiver with highly symmetrical interferometer design[J]. *Optics Express*, 2011, 19(26): B112-8.
- [103] JEONG S H, MORITO K. Optical 45 hybrid for demodulating 8-ary DPSK signal [J]. *Optics Express*, 2010, 18(8): 8482-8490.
- [104] LI J, BILLAH M R, SCHINDLER P C, et al. Four-in-one interferometer for coherent and self-coherent detection [J]. *Optics Express*, 2013, 21 ( 11 ): 13293-13304.
- [105] 万玲玉,孙建峰,刘立人.波片光轴偏差对偏振分光光束振幅和相位的影响研究[J]. *光学技术*, 2010, 21(36): 307-310.
- [106] 柯昌剑,钱路,万助军.一种相干接收机光混频器[P]: CN103166713A. 2013.
- [107] 郑阳,姜会林,佟首峰,等.基于相干激光通信空间光混频器数学模型的建立[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 149-154.
- [108] 宋哲,于伟行,宋佳,等. 2×4集成结构 90°空间光学桥接器[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(11): 438-443.
- [109] 韩建露. 晶体型 2×4 90°空间光混频器的设计与研究[D]. 西安:西安理工大学, 2020.
- [110] DOERR C R, GILL D M, GNAUCK A H, et al. Monolithic demodulator for 40•Gb/s DQPSK using a star coupler[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(1): 171-174.
- [111] NICHOLSON G, STEPHENS T D. Performance analysis of coherent optical phase-diversity receivers with DPSK modulation [J]. *Journal of Lightwave technology*, 1989, 7(2): 393-399.
- [112] DONG P, XIE C, BUHL L L. Monolithic polarization diversity coherent receiver based on 120-degree optical hybrids on silicon[J]. *Optics Express*, 2014, 22(2): 2119-2125.
- [113] DOERR C R, ZHANG L, WINZER P J. Monolithic InP multiwavelength coherent receiver using a chirped arrayed waveguide grating [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(4): 536-541.
- [114] JEONG S H, MORITO K. Compact optical 90 hybrid employing a tapered 2×4 MMI coupler serially connected by a 2×2 MMI coupler [J]. *Optics Express*, 2010, 18(5): 4275-4288.
- [115] SAKAMAKI Y, NASU Y, HASHIMOTO T, et al. Reduction of phase-difference deviation in 90 optical hybrid over wide wavelength range [J]. *IEICE Electronics Express*, 2010, 7(3): 216-221.
- [116] GUAN H, MA Y, SHI R, et al. Compact and low loss 90° optical hybrid on a silicon-on-insulator platform [J]. *Optics Express*, 2017, 25 ( 23 ): 28957-28968.
- [117] YANG W, YIN M, LI Y P, et al. Ultra-compact optical 90 hybrid based on a wedge-shaped 2×4 MMI coupler and a 2×2 MMI coupler in silicon-on-insulator [J]. *Optics Express*, 2013, 21 ( 23 ): 28423-2843.
- [118] YANG W, YIN M, LI Y P, et al. Ultra-compact optical 90 hybrid based on a wedge-shaped 2×4 MMI coupler and a 2×2 MMI coupler in silicon-on-insulator [J]. *Optics Express*, 2013, 21 ( 23 ):

- 28423-2843.
- [119] ZIMMERMANN L, VOIGT K, WINZER G, et al. C-Band optical 90 hybrids based on silicon-on-insulator  $4 \times 4$  waveguide couplers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 21(3): 143-145.
- [120] SABER M G, OSMAN M, PATEL D, et al. Demonstration of a 120 hybrid based simplified coherent receiver on SOI for high speed PON applications [J]. Optics Express, 2018, 26(24): 31222-31232.
- [121] XU L, WANG Y, PATEL D, et al. Ultra-broadband and ultra-compact optical  $90^\circ$  hybrid based on  $2 \times 4$  MMI coupler with subwavelength gratings on silicon-on-insulator[C]. 2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition(OFC), 2018: 1-3.
- [122] WANG Z, ZHAI Y, LU Y, et al. Compact optical 90 hybrid based on hybrid plasmonic multimode interferometer [J]. Optics Communications, 2018, 42(6): 99-104.
- [123] JIAO Y, ZHU Y, HONG X, et al. An integrated optical mixer based on SU8 polymer for PDM-QPSK demodulation[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(20): 1490-1492.
- [124] YU J, MU J, CHEN K, et al. High-performance 90 hybrids based on MMI couplers in Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> technology[J]. Optics Communications, 2020, 46(5): 125-129.
- [125] NASU Y, MIZUNO T, KASAHARA R, et al. Temperature insensitive and ultrawide band silica-based dual polarization optical hybrid for coherent receiver with highly symmetrical interferometer design[J]. Optics Express, 2011, 19(26): B112-8.
- [126] 王佳垚. 硅基光混频器的研究[D]. 合肥: 中国科学院大学, 2021.
- [127] SAH P, DAS B K. Photonic bandpass filter characteristics of multimode SOI waveguides integrated with submicron gratings [J]. Applied Optics, 2018, 57(9): 2277-2281.
- [128] PARK J, KWACK M J, JOO J, et al. Low-loss single-mode operation in silicon multi-mode arrayed waveguide grating with a double-etched inverse taper structure[J]. Journal of Optics, 2017, 19(8): 1-10.
- [129] HIRAKI T, AIHARA, NISHI H, et al. Deuterated SiN/SiON waveguides on Si platform and their application to C-band WDM filters [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(5): 1-7.
- [130] 杨志方. 基于聚合物波导平台的双层阵列波导光栅的设计与性能研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2022.
- [131] HILL M T, VRIES T D, DORREN H, et al. Integrated two-state AWG-based multiwavelength laser [J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 2005, 17(5): 956-958.
- [132] HECK M J R, LA PORTA A, LEIJTENS X J M, et al. Monolithic AWG-based discretely tunable laser diode with nanosecond switching speed [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 21(13): 905-907.
- [133] ISHII M, TAKAGI A, HIDA Y, et al. Low-loss fiber-pigtailed 256 channel arrayed-waveguide grating multiplexer using cascaded laterally-tapered waveguides[J]. Electronics Letters, 2001, 37(23): 1401-1402.
- [134] STANTON E J, VOLET N, BOWERS J. Low-loss arrayed waveguide grating at  $2.0 \mu\text{m}$  [J]. Optics Letters, 2017, 42(2): 1-2.
- [135] STANTON E J, NICOLAS V, BOWERS J E. Silicon arrayed waveguide gratings at  $2.0\text{-}\mu\text{m}$  wavelength characterized with an on-chip resonator [J]. Optics Letters, 2018, 43(5): 1135-1138.
- [136] PICHLER E, BETHMANN K, KELB C, et al. Rapid prototyping of all-polymer AWGs for FBG readout using direct laser lithography [J]. Optics Letters, 2018, 43(21): 5347-5350.
- [137] SMIT M K. New focusing and dispersive planar component based on an optical phased array [J]. Electronics Letters, 1988, 24(7): 385-386.
- [138] VELLEKOOP A R, SMIT M K. A small-size polarization splitter based on a planar optical phased array [J]. Journal of Lightwave Technology, 1990, 8(1): 118-124.
- [139] ZIRNGIBL M, DRAGONE C, JOYNER C. Demonstration of a  $15 \times 15$  sarrayed waveguide multiplexes on InP [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1992, 10(1): 1250-1253.
- [140] SABER M G, OSMAN M, PATEL D, et al. Demonstration of a 120 hybrid based simplified coherent receiver on SOI for high speed PON applications [J]. Optics Express, 2018, 26(24): 31222-31232.
- [141] LI Z, KUANG Y, GUAN H, et al. Compact low-loss optical 72 hybrid based on nonoverlapping. image multimode interference coupler in silicon-on-insulator [J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(6): 1-9.
- [142] HILL M T, VRIES T D, DORREN H, et al. Integrated two-state AWG-based multiwavelength laser [J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 2005, 17(5): 956-958.

- [143] ISHII M, TAKAGI A, HIDA Y, et al. Low-loss fiber-pigtailed 256 channel arrayed-waveguide grating multiplexer using cascaded laterally-tapered waveguides[J]. *Electronics Letters*, 2001, 37(23): 1401-1402.
- [144] STANTON E J, VOLET N, BOWERS J. Low-loss arrayed waveguide grating at 2.0  $\mu\text{m}$  [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(2): 1-2.
- [145] STANTON E J, NICOLAS V, BOWERS J E. Silicon arrayed waveguide gratings at 2.0- $\mu\text{m}$  wavelength characterized with an on-chip resonator [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(5): 1135-1138.
- [146] STANTON E J, NICOLAS V, BOWERS J E. Silicon arrayed waveguide gratings at 2.0- $\mu\text{m}$  wavelength characterized with an on-chip resonator [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(5): 1135-1138.
- [147] PICHLER E, BETHMANN K, KELB C, et al. Rapid prototyping of all-polymer AWGs for FBG readout using direct laser lithography [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(21): 5347-5350.
- [148] 侯智培. 外加电场和温度对铌酸锂器件光学性质的影响[D]. 天津:天津大学, 2014.
- [149] MENARD M, SHI W. Superlattice arrayed waveguide grating in silicon nitride [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(22): 1411-1414.
- [150] LIU J, HUANG Q, XIA J. High assembly tolerance and cost-effective 100-Gb/s TOSA with silica-PLC AWG multiplexer [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(4): 1-9.
- [151] ZHANG Z, WANG Y, TSANG H K. Ultracompact 40-Channel arrayed waveguide grating on silicon nitride platform at 860 nm [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2020, 56(1): 1-8.
- [152] 刘宏展, 纪越峰, 许楠, 等. 信号与本振光振幅分布对星间相干光通信系统混频效率的影响[J]. *光学学报*, 2011, 31(10): 1-6.
- [153] TAHA A M, CHANDRAN S, VIEGAS J, et al. Compact MMI-based AWGs in a scalable monolithic silicon photonics platform [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2021, 13(4): 1-6.
- [154] 南航, 张鹏, 佟首峰, 等. 光斑尺寸偏差和光轴偏转对空间光混频器混频效率的影响分析[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(4): 205-212.
- [155] 马婷婷. 外界因素对空间光混频器混频效率影响分析[D]. 长春:长春理工大学, 2017.
- [156] FINK D. Coherent detection signal-to-noise [J]. *Applied Optics*, 1975, 14(3): 689-690.
- [157] WANG C, JIANG L, DONG K, et al. Analysis of the polarization characteristic of a satellite-to-ground laser communication optical system [J]. *Lasers and Optoelectronics Progress*, 2015, 52(12): 120-122.
- [158] 裴爱华, 张舒仁. 相干光纤通信系统平衡探测器的研究 [J]. *长春光学精密机械学院学报*, 1993, 16(4): 12-16.
- [159] 谭振坤, 柯熙政. 相干探测系统中的混频效率 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(9): 100605.
- [160] 李敢生, 吴喜泉. 大尺寸优质钒酸钡(YVO<sub>4</sub>)双折射晶体生长 [J]. *人工晶体学报*, 1999, 28(1): 27-30.
- [161] 王英伟, 程灏波, 刘景和. YVO<sub>4</sub> 双折射晶体生长及完整性分析 [J]. *人工晶体学报*, 2013, 32(1): 41-43.
- [162] WU H, XU H, SU Q, et al. Size and shape tailored hydrothermal synthesis of YVO<sub>4</sub> crystals in ultra-wide pH range conditions [J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2003, 13(5): 1223-1228.
- [163] RYBAROMANOWSKI W. YVO<sub>4</sub> crystals puzzles and challenges [J]. *Crystal Research & Technology*, 2010, 38(3-5): 225-236.
- [164] 李敢生, 位民, 诸月梅, 等. 钒酸钡双折射晶体原料的去水合成 [J]. *人工晶体学报*, 1997(21): 220.
- [165] YOUNG D T, IRVIN J C. Millimeter frequency conversion using Au-n-type GaAs Schottky barrier epitaxial diodes with a novel contacting technique [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1965, 53(12): 2130-2131.
- [166] BARATH F T, CHAVEZ M C, COFIELD R E, et al. The upper atmosphere research satellite microwave limb sounder instrument [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1993, 98(D6): 10751-10762.
- [167] FRISK U, HAGSTRÖM M, ALA-LAURINAHO J, et al. The odin satellite-I Radiometer design and test [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2003, 402(3): 27-34.
- [168] TUCKER J R, FELDMAN M J. Quantum detection at millimeter wavelengths [J]. *Reviews of Modern Physics*, 1985, 57(4): 1055.
- [169] RICHARDS P L, SHEN T M, HARRIS R E, et al. Quasiparticle heterodyne mixing in SIS tunnel junctions [J]. *Applied Physics Letters*, 1979, 34(5): 345-347.
- [170] KOOI J W, CHAMBERLIN R A, MONJE R R, et al. Performance of the caltech submillimeter observatory dual-color 180~720 GHz balanced SIS receivers [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2014, 4(2): 149-164.
- [171] ALEXEI D S, GREGORY N G, ROMAN S. Hot-



- electron effect in superconductors and its applications for radiation sensors[J]. Superconductor Science & Technology, 2002, 15(4): R1-R16.
- [172] PHILLIPS T G, JEFFERTS K B. A low temperature bolometer heterodyne receiver for millimeterwave astronomy[J]. Review of Scientific Instruments, 1973, 44(8): 1009-1014.
- [173] IVAN T, SERGEY R, MATVEY F, et al. Low noise and wide bandwidth of NbN hot-electron bolometer mixers[J]. Applied Physics Letters, 2011, 98(3): 033507-1-033507-3.
- [174] PUTZ P, JACOBS K, JUSTEN M, et al. NbTiN hot electron bolometer waveguide mixers on Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> membranes at THz frequencies[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2010, 21(3): 636-639.
- [175] RICHARDS P L, SHEN T M, HARRIS R E, et al. Quasiparticle heterodyne mixing in SIS tunnel junctions[J]. Applied Physics Letters, 1979, 34(5): 345-347.
- [176] KOOI J W, CHAMBERLIN R A, MONJE R R, et al. Performance of the caltech submillimeter observatory dual-color 180 ~ 720 GHz balanced SIS receivers [J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2014, 4(2): 149-164.

#### 作者简介

梁静远, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为无线光通信系统基础理论以及调制解调技术。

E-mail: zqy799735858@163.com