

集成 AlGaIn/GaN HEMT 混频探测器的太赫兹矢量测量系统

刘一霆^{1,2,3}, 丁青峰^{2,3,4}, 冯 伟^{1,2,3}, 朱一帆^{1,2,3}, 秦 华^{1,2,3,4*}, 孙建东^{1,2,3*}, 程 凯⁵

1. 中国科学技术大学 纳米技术与纳米仿生学院, 安徽 合肥 230026;
2. 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所 纳米器件与应用重点实验室, 江苏 苏州 215123;
 3. 江苏省纳米器件重点实验室, 江苏 苏州 215123;
 4. 上海科技大学 物质科学与技术学院, 上海 201210;
 5. 苏州晶湛半导体有限公司, 江苏 苏州 215000)

摘要: 矢量测量是表征太赫兹波段天线与准光系统波束特性的主流技术。该文介绍了一种基于 AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管 (High-electron-mobility transistor, HEMT) 混频探测器的太赫兹矢量测量系统。该系统核心器件为以准光-波导为耦合方式的高灵敏度太赫兹混频探测器, 在 340 GHz 频率外差模式下, 其噪声等效功率达 -113 dBm/Hz。为了抑制系统相位噪声, 搭建了基于二次下变频原理的硬件电路。通过对固定位置天线的长时间测量, 表明系统相位稳定度优于 4° , 系统最小可测功率达到 119 nW。基于相干 AlGaIn/GaN HEMT 混频探测器实现了太赫兹连续波幅度和相位分布测量, 该工作为后续阵列化太赫兹矢量测量提供了基础。

关键词: 矢量测量; 太赫兹探测器; 相干探测; 高电子迁移率晶体管; 氮化镓

中图分类号: TL814; TN386.3; TN382 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220278

Terahertz vector measurement system based on AlGaIn/GaN HEMT terahertz mixer

Liu Yiting^{1,2,3}, Ding Qingfeng^{2,3,4}, Feng Wei^{1,2,3}, Zhu Yifan^{1,2,3}, Qin Hua^{1,2,3,4*}, Sun Jiandong^{1,2,3*}, Cheng Kai⁵

1. School of Nano-Tech and Nano-Bionics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;
2. Key Laboratory of Nanodevices and Applications, Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215123, China;
3. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Nano Devices, Suzhou 215123, China;
4. School of Physical Science and Technology, Shanghai Tech University, Shanghai 201210, China;
5. Enkris Semiconductor, Inc., Suzhou 215000, China)

Abstract: Vector measurement is an important technology for beam testing of antennas and quasi-optical systems in terahertz band. This paper introduces a terahertz vector measurement system based on a high-sensitivity AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistor (HEMT) terahertz detector integrated with a quasi-optical lens and waveguide together, which reached the noise equivalent power of -113 dBm/Hz in heterodyne mode at 340 GHz. A hardware circuit is established based on the double frequency-down-conversion technique to

收稿日期:2022-04-15; 修订日期:2022-05-10

基金项目:中国科学院青年创新促进会 (Y2021089); 国家自然科学基金 (61771466, 61775231); 江苏省重点研发计划 (BE2018005)

作者简介:刘一霆,男,硕士生,主要研究方向为太赫兹雷达。

导师(通讯作者)简介:孙建东,男,研究员,博士,主要研究方向为太赫兹探测器及其应用。

通讯作者:秦华,男,研究员,博士,主要研究方向为固态太赫兹器件及其系统应用。

suppress phase noise in the system. The experimental results indicate that the minimum measurable power is 119 nW and the phase stability is better than 4° of the system. Measurement of the distribution of both terahertz amplitude and phase has been achieved based on this coherent AlGaIn/GaN HEMT detector. An arrayed terahertz vector measurement system could be developed based on this work.

Key words: vector measurement; terahertz detector; coherent detection; HEMT; GaN

0 引言

随着人们对高速大容量无线通信系统需求的日益增加,无线通信系统向着太赫兹频段演进。近年来,学界报道了在 IEEE 802.15.3 d 标准下的无线传输实验^[1]。天线作为无线通信系统的关键组成部分,迫切需要在 0.1~1 THz 对其辐射模式建立表征技术^[2-5]。天线辐射模式表征技术可以大致分为三种:远场测量、紧缩场天线测试和近场矢量测试^[6]。对于太赫兹波段的高增益天线来说,远场测量需要巨大而难以实现的空间^[7]。紧缩场虽然可以缩小测量场地,但随着频率的升高,系统需要极高的部件制造精度与复杂的后期公差处理^[8]。近场矢量测量是在太赫兹波段中最为适配的天线测量方法。在近场矢量测量中,使用矢量测量探头对天线近场的幅度和相位分布进行采样,然后通过近远变换推知天线的远场分布情况,其效力等同于远场测量^[9]。近场矢量测试可以十分紧凑,也很好避免了紧缩场的缺点。2014 年,中国科学院紫金山天文台报道了一套基于低温超导探测器的 850 GHz 天线近场测量系统,该系统通过特制的准光探针实现了高空间分辨率,拥有较高的相位稳定性与动态范围^[10]。2021 年,日本岐阜大学研制了一套基于光子学的近场矢量测试系统,该系统将太赫兹波上变频至光域 (1 550 nm) 并通过光电传感器进行探测,通过近-远变换实验验证了其可行性^[11]。

接收机是太赫兹波段矢量测量系统的核心部分。由于太赫兹波频率较高,缺少射频前端低噪声放大器,被测信号很难直接放大,因此常用混频探测器接收后直接下变频至中频频段进行采集处理,这样的系统简单,但对系统的灵敏度带来不利影响。为了提高空间分辨能力,减少对被测场的扰动,常用光阑等小孔径准光系统对接收信号进行空间限制。在室温接收前端中,肖特基势垒二极管因高响应度与低噪声,常作为前端相干混频探测器,已在太赫兹雷达与通信系统中有较为广泛的应用^[12]。除肖特基势垒二

极管外,采用片上天线耦合的 AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管 (High-electron-mobility transistor, HEMT) 也可以实现对太赫兹波的相干混频探测^[13-14]。与肖特基势垒二极管相比,AlGaIn/GaN HEMT 在矢量测量领域有如下两个优点:(1) 工作频率可以高于 1 THz,对于更高频段的天线与准光系统表征有很好的适应性;由于受到寄生参数的影响,肖特基势垒二极管的灵敏度在 1 THz 以上时快速下降。(2) 目前天线的表征往往为逐点扫描模式,其效率低,时间长,这使得整体系统受到相位漂移的影响而精确度下降。应用阵列化接收机将大幅提高效率,增强相位稳定性。AlGaIn/GaN HEMT 太赫兹探测器采用了全平面化的半导体工艺制造,一致性好,适合制造大规模阵列接收系统^[15]。肖特基二极管通常需要采用复杂的空气桥结构,工艺难度高,难以实现阵列化集成。

为了验证 AlGaIn/GaN HEMT 混频探测器在太赫兹天线矢量测量领域的应用,文中搭建了一套基于该探测器的 340 GHz 太赫兹波段矢量测量系统,表征了其各项性能。实验结果表明该系统有低最小可探测功率,高相位稳定性与空间分辨能力。该工作为后续实现阵列化的太赫兹矢量测量系统提供了技术支撑。

1 340 GHz AlGaIn/GaN HEMT 探测混频器

AlGaIn/GaN HEMT 太赫兹混频探测器结构如图 1(a) 与图 1(b) 所示。作为相干探测器,AlGaIn/GaN HEMT 在该系统中工作在外差混频模式下。当两束频率分别为 f_1 和 f_2 的太赫兹波被探测器接收后,探测器将输出频率为二者之差 $|f_1 - f_2|$ 的中频信号。为了实现高带宽且易于制造的准光探头,在探测器芯片正面加装 2 mm 直径的半球形硅透镜将来自被测天线的射频信号 f_1 耦合至专门设计的非对称偶极片上太赫兹天线。本振信号 f_2 直接经 WR2.8 金属波导馈入芯片上天线^[16]。通过这种准光-波导的集成方式来规避复杂外差光路,也同比两端波导耦合的集成方式提高

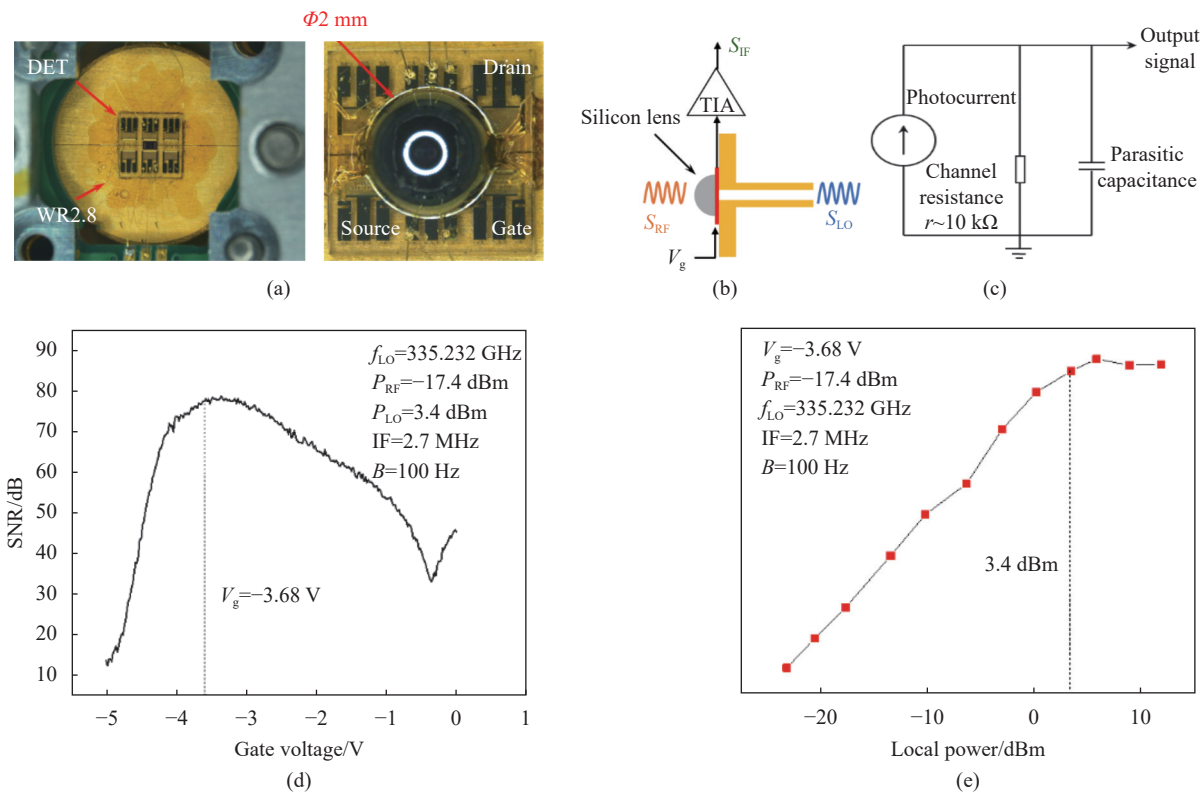


图 1 AlGaIn/GaN HEMT 太赫兹混频探测器与其响应特性。(a) WR2.8 波导与 2 mm 硅透镜集成封装探测器实物图; (b) 信号接收结构示意图; (c) 等效电路图; (d) 中频信号信噪比与栅压的关系; (e) 中频信号信噪比与本振功率的关系

Fig.1 AlGaIn/GaN HEMT terahertz detector and response characteristics. (a) Microscope image of the detector integrated with a WR2.8 waveguide and a 2 mm silicon lens; (b) Schematic of the input and output signal routes ; (c) Equivalent circuit; (d) SNR of IF signal as a function of the gate voltage; (e) SNR of IF signal as a function of the local power

了空间分辨能力。

HEMT 是一种受栅极电压调控的非线性器件, 基本原理为通过加载在栅极的负栅压 V_g 来调控 AlGaIn/GaN 异质结的势阱深度, 进而控制沟道二维电子气浓度。太赫兹波通过片上天线耦合至沟道中, 控制沟道中二维电子气的速度和浓度分布, 从而产生光响应信号。AlGaIn/GaN HEMT 太赫兹探测器的等效电路如图 1(c) 所示, 将光响应电流等效为电流源, 电流源内阻为沟道电阻 $r \approx 10 \text{ k}\Omega$, 小于 1 pF 的寄生电容并联在电路中。探测器的噪声主要包括热噪声、 $1/f$ 噪声和散粒噪声。在外差模式下, 由于输出中频信号频率较高, 远高于 $1/f$ 噪声的转角频率, 同时探测器偏置电流为零, 散粒噪声也较小, 因此探测器输出噪声主要为探测器内阻引起的热噪声 ($\sim 1.28 \text{ pA/Hz}^{1/2}$)。由于输出阻抗较高, 因此采用电流放大器对输出中频信号进行放大。该电流放大器等效输入噪声电流 ($\sim 3.8 \text{ pA/Hz}^{1/2}$) 大于探测器输出噪声, 因此接收机中主要噪声来源为

电流前置放大器。

AlGaIn/GaN HEMT 混频探测器的光响应特性如图 1(d)、(e) 所示。在栅极电压为 -3.68 V 时输出中频信号的信噪比最高, 探测器处于最佳工作状态。在最佳栅压下, 探测器在本振信号为 3.4 dBm 时趋近于饱和, 信噪比不再随本振信号的提高而线性升高, 此时噪声等效功率 (Noise equivalent power, NEP) 为 -113 dBm/Hz , 体现出了较高的灵敏度。鉴于后期将开发阵列化的矢量探测系统, 本振功率不足有可能成为制约系统可行性的一大障碍。得益于 AlGaIn/GaN HEMT 混频探测器的高响应度, 本振功率大于 0.15 mW , 即满足需要^[17]。商用肖特基势垒二极管倍频器的输出功率可达 30 mW , 足以供给阵列化探测器的本振功率需要。

2 系统硬件结构与探测原理

在太赫兹矢量测量中, 相位噪声是干扰系统相位准确度的一大因素。因此设计搭建了一套硬件电路

系统,以抵消链路中的相位噪声。分别在 2.1 节与 2.2 节中阐述系统的硬件链路结构与信号的传输形式。

2.1 系统硬件结构

太赫兹矢量测量系统硬件链路系统结构如图 2 所示:包括发射前端、接收前端与中频处理链路三部分。

发射前端由微波信号发生器、太赫兹倍频放大电路 (Amplifier multiplier chain, AMC) 与被测天线组成。两路微波信号 S_1 与 S_2 分别由两台罗德-史瓦兹 SMR 11 频率综合器生成,其频率分别为 $f_1 = 13.902$ GHz 与 $f_2 = 13.900$ GHz,功率均为 0 dBm,二者通过 10 MHz 的参考信号锁定在一起。两路微波信号经过 1:1 功

分器分别再输出两路信号。其中,频率为 f_1 的信号输入太赫兹倍频链路 1 中,经 $N=24$ 倍频后输出 $f_{RF} = 333.648$ GHz 的太赫兹信号 S_{RF} ,作为射频测试信号馈入到被测天线中。

接收前端的核为 AlGaIn/GaN HEMT 准光-波导耦合的太赫兹混频探测器;此外还包括了太赫兹倍频放大链路 2 与中频放大器。微波源 2 发射的信号 S_2 经太赫兹倍频链路 $N=24$ 倍频至 $f_{LO} = 333.600$ GHz 通过波导馈入到探测器中成为混频探测器的本振信号 S_{LO} 。混频探测器将 S_{LO} 与来自被测天线的 S_{RF} 下变频为 $f_{IF} = 48$ MHz 的中频信号 S_{IF} 。 S_{IF} 经过低噪声放大器 (Low noise amplifier, LNA) 放大后进入中频处理系统。

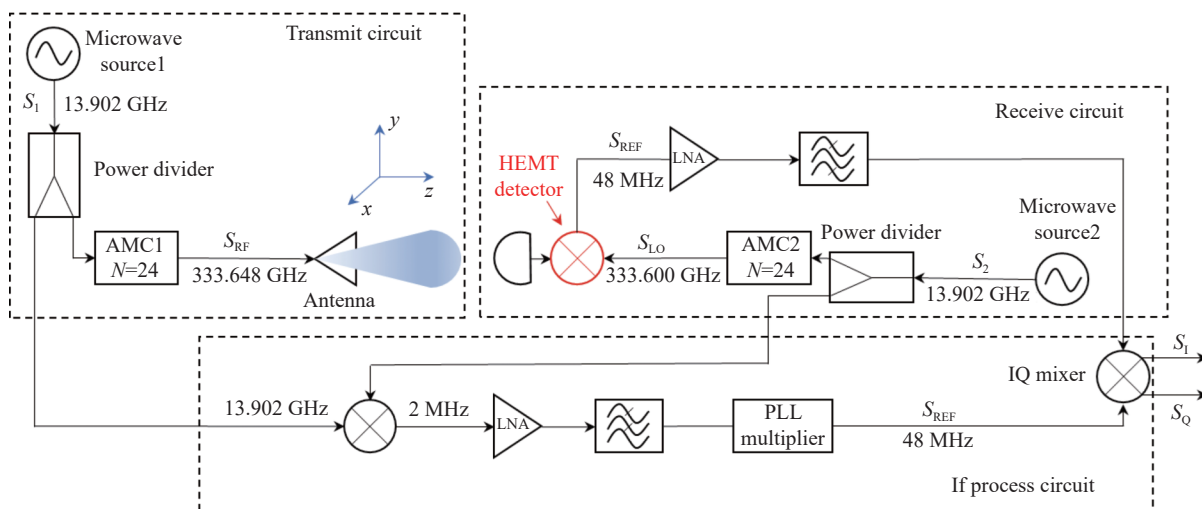


图 2 太赫兹矢量测试系统硬件电路图

Fig.2 Circuit diagram of THz vector test system

中频处理系统作用为将来自微波源的相位噪声引入中频信号中,进而抑制中频信号中的共模相位噪声;主要由微波混频器、锁相倍频链路与 IQ 混频器组成。 S_1 与 S_2 经功分后进入微波混频器中下变频为 2 MHz 的参考中频信号。随后该参考中频信号滤波放大后经锁相环 (Phase lock-loop, PLL) 倍频链路实现 N 倍倍乘。倍乘为 $f_{REF} = N(f_1 - f_2) = 48$ MHz 的参考信号 S_{REF} 输入至 IQ 混频器的本振端口。为了滤除噪声与杂散信号, S_{IF} 经通频带为 45~51 MHz 的带通滤波器输入 IQ 混频器的射频端口,与 S_{REF} 进行二次下变频。IQ 混频器将输出 S_1 与 S_0 两路直流信号。 S_1 与 S_0 由数字万用表采集,数字万用表设置了 200 Hz 的滤波器以滤除高频噪声。

2.2 相位探测原理

微波源发出的信号 S_1 与 S_2 可以由公式 (1) 表示,由于二者被 10 MHz 的同步信号锁定在一起,因此二者相位差为恒定值 ϕ 。由于二者功率相等,因此此处归一化了其信号幅度。

$$\begin{aligned} S_1 &= \cos(2\pi f_1 t) \\ S_2 &= \cos(2\pi f_2 t + \phi) \end{aligned} \quad (1)$$

参考信号 S_{REF} 由 S_1 与 S_2 经下变频后倍频而来,其形式如公式 (2) 所示:

$$S_{REF} = A_{REF} \cos(2\pi f_{IF} t + N\phi) \quad (2)$$

式中: A_{REF} 为其幅度。

S_1 与 S_2 经功分器功分后分别倍频至太赫兹波段成为 S_{RF} 与 S_{LO} , 其形式如公式 (3) 所示:

$$\begin{aligned} S_{LO} &= \cos(2\pi f_{LO}t) \\ S_{RF} &= \cos(2\pi f_{RF}t + N\phi) \end{aligned} \quad (3)$$

S_{RF} 经被测天线辐射后被太赫兹探测器接收,在采集点处相位为 ϕ' ,幅度为 A ;探测器将其与 S_{LO} 混频,下变频后输出中频信号 S_{IF} ,其频率同样为 f_{IF} ,形式如公式(4)所示,混频器混频损耗(Conversion loss, CL)也在式中呈现:

$$S_{IF} = ACL \cos(2\pi f_{IF}t + N\phi + \phi') \quad (4)$$

S_{IF} 经过滤波放大后馈入 IQ 混频器射频端口,作为本振信号的 S_{REF} 混频得到 I 路与 Q 路两路信号。其表达式如公式(5)所示:

$$\begin{aligned} S_I &= ACLG \cos(\phi') \\ S_Q &= ACLG \sin(\phi') \end{aligned} \quad (5)$$

式中: G 为中频放大器增益与 IQ 混频器变频损耗带来的信号幅度变化。

两路信号采集后经如公式(6)所示的运算即可得到 IQ 混频器输出信号的幅度 A' 与相位 ϕ' , A' 与该处信号的幅度 A 成正比。通过逐点连续扫描即可实现对空间中太赫兹场幅度相位的分布测量。

$$\begin{aligned} A' &= \sqrt{S_I^2 + S_Q^2} \sim A \\ \phi' &= \arctan\left(\frac{S_I}{S_Q}\right) \end{aligned} \quad (6)$$

3 系统分析与实测

为了论证该系统在太赫兹矢量测量技术中的应用可行性,针对矢量测量技术中核心指标最小可测功率与幅相时间稳定性展开测试,并将该系统应用在实际的准光系统矢量测量中以其进行评估。

3.1 系统最小可测功率与时间稳定性

系统的最小可测功率可以由公式(7)表示:

$$P_{\min} = \frac{P_{RF}}{V_{IF}} \times \sigma_{V-IF} \quad (7)$$

式中: P_{\min} 为系统最小可测功率; P_{RF} 为探测器接收到的被测太赫兹信号功率; V_{IF} 为 IQ 混频器输出的信号幅度; σ_{V-IF} 为系统输出噪声电压的均方根。

测得探测器接收到的太赫兹信号功率为 $P_{RF} = 0.242 \text{ mW}$ 。并测试系统输出信号幅度和相位,设置读取间隔为 1.5 s,读取次数为 400 次,共计测量 600 s。测试结果见图 3。图中,输出信号幅度的平均值 $V_{IF} =$

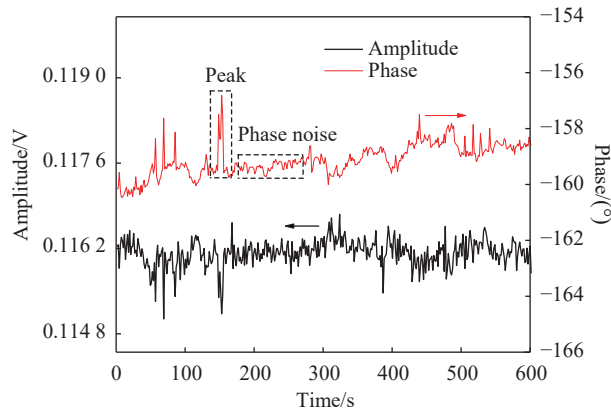


图 3 系统幅相稳定性与时间的关系

Fig.3 System stability of amplitude and phase vs time

116 mV, 读出带宽为 200 Hz 时,系统的输出噪声为 0.056 9 mV,因此系统最小可测功率为 119 nW。

P_{\min} 为系统接收前端的核心参数之一,描述了系统对于微弱信号的探测能力。在针对较远距离的天线与损耗较大的系统进行测试时,太赫兹信号变得微弱,系统信噪比下降;不仅如此,当信噪比降低到一定程度时,原本仅影响幅度精度的白噪声将对相位测量精度产生影响^[18]。影响 P_{\min} 的主要因素为接收前端对于太赫兹信号的转化能力与链路噪声,其关键在于接收前端核心的 AlGaIn/GaN HEMT 太赫兹混频探测器。在太赫兹信号的转化能力的优化方面,现有半球形 2 mm 直径硅透镜耦合效率较差,后续可以通过优化透镜形状进而提高耦合效率。在降低噪声方面,通过前面的分析可知,系统噪声的主要来源为前置电流放大器。因此,后续可以通过改进设计与工艺以降低探测器的输出阻抗,使其与更低噪声的电压前置放大器实现匹配进而降低系统噪声。

基于图 3 对系统的相位稳定性展开分析。图中展现了两种不同性质的相位不稳定性:一种为平缓波动的随机噪声,在图中体现为细微的时间抖动(图中标注的 Phase noise 部分),其波动小于 0.5°,这部分噪声为来自微波源的相位噪声;另一种为幅度与相位同时抖动的尖峰状波动(图中标注的 Peak 部分),其范围约为 4°,该部分经验证是系统链路中部分芯片裸露在外,电磁屏蔽性较差,存在随机干扰信号耦合至系统中所致。综上所述,该系统的相位稳定性优于 4°。后续采用相位噪声更低的微波源并对链路进行有效封装屏蔽来加以改进,提高系统相位稳定性。

3.2 准光系统表征

为进一步验证系统可行性,应用该系统对聚焦光学系统的相位与幅度进行测试。系统光路图和实物图如图 4(a)和图 4(b)所示。太赫兹倍频放大链路

产生的被测太赫兹波,经角锥喇叭天线发射后,耦合至准直透镜,之后再由聚焦透镜汇聚。针对平行于光轴的 y-z 平面进行扫描,其结果如图 4(c)和图 4(e)所示。

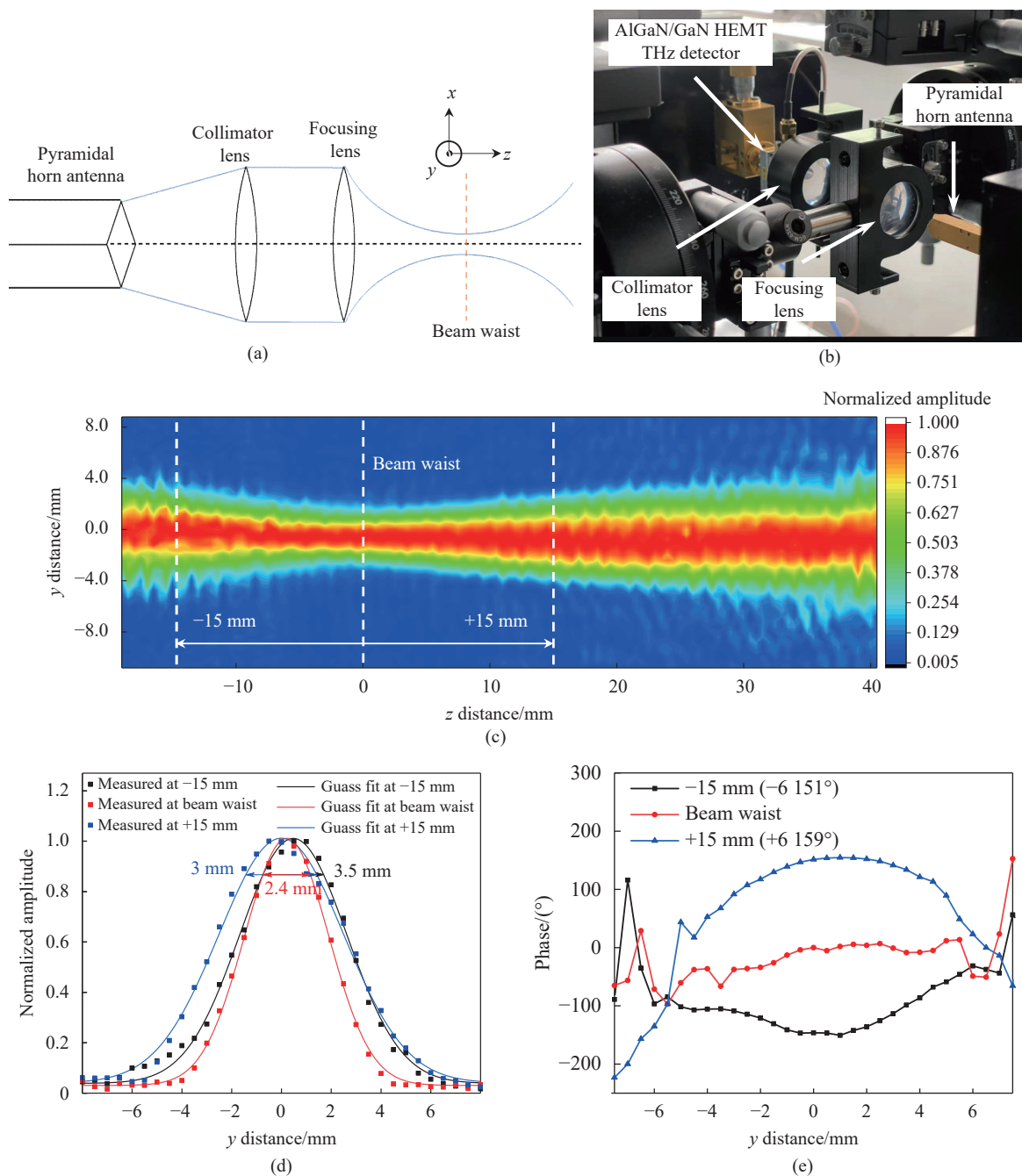


图 4 准光系统和空间分布测试结果。(a) 系统示意图;(b) 系统实物图;(c) 归一化的 y-z 平面光强分布图;(d) 聚焦束腰处与其前后 15 mm 处垂直传播方向归一化幅度分布与高斯函数拟合;(e) 相位分布

Fig.4 Test result of quasi-optical system and space distribution. (a) Structure of system; (b) Photo of system; (c) Normalized amplitude distribution of y-z section; (d) Normalized amplitude distribution to the perpendicular propagation direction at 15 mm of the spot & fit by Gaussian function; (e) Phase distribution

从图 4 (c) 分析可知,束腰位于距离透镜 20 mm 处。在图 4(d) 中,除了展现光束束腰处、束腰前 15 mm 与束腰后 15 mm 沿 y 轴的幅度分布情况,也应用高斯函数对图中幅度分布进行拟合。对于高斯分布来说,其光束半径被定义为振幅下降了 1/e 时对应的光束半径。从拟合结果可知束腰位置处光束半径为 2.4 mm,束腰前 15 mm 处光斑半径为 3.5 mm,束腰后光斑半高宽为 3 mm。从图中可以注意到三条曲线最大值在不同的位置,这是由于准光系统光轴与扫描 y 轴不垂直造成的。为进一步提高空间分辨率,后续可以通过加装光阑或者去除 2 mm 硅透镜直接采用片上太赫兹天线进行耦合等方式改进测量系统。

在相位分布图 4 (e) 中,将束腰光斑的中心点定义为相位零点。对测量结果进行了相位解缠绕并对

束腰前与束腰后的相位进行校正。可以很清晰地发现在束腰前,光斑中心处相位滞后于光斑边缘处相位;在束腰处,光斑不同位置相位基本相等;在束腰后光斑中心处相位超前于光斑边缘处相位。这一测试结果与理论相符,印证了该测量系统的可行性。为了进一步说明问题,对上述三个位置进行 x-y 平面进行二维扫描,其结果如图 5 所示。可以看出随着成像位置远离聚焦透镜,光斑大小由大变小,至束腰处最小后再变大。相位也与前述分布情况相同,佐证了该测量系统的有效性。在图像边缘部分,由于偏离太赫兹场区,被测太赫兹信号较弱,导致测量系统的信噪比较低,难以获取准确的相位值,表现为随机的相位跳变,因此在边缘测量的准确性和稳定性不佳。

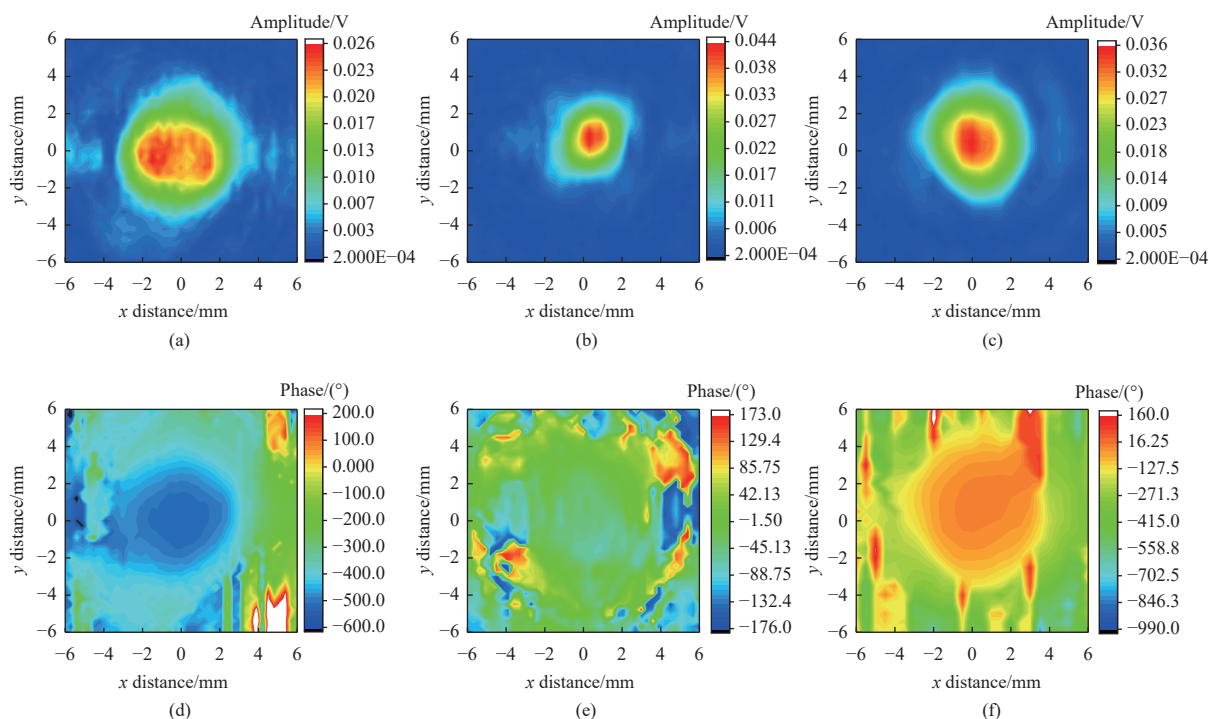


图 5 准光系统 x-y 平面幅度与相位测试结果。(a)、(d) 束腰前 15 mm 幅度与相位;(b)、(e) 束腰处幅度与相位;(c)、(f) 束腰后 15 mm 幅度与相位
Fig.5 Amplitude and phase distribution of quasi-optical system at x-y plane. (a), (d) Amplitude and phase of 15 mm before waist; (b), (e) Amplitude and phase at waist; (c), (f) Amplitude and phase of 15 mm after waist

4 结论与展望

文中设计搭建了一套基于 AlGaIn/GaN HEMT 太赫兹混频探测器的太赫兹波段矢量测量系统。该系统接收前端核心探测器灵敏度达 -113 dBm/Hz。读出带宽为 200 Hz 时,系统最小可测功率为 119 nW, 相位

稳定性优于 4°, 实现了高灵敏度高相位稳定性的太赫兹矢量测量系统, 为阵列化的太赫兹天线表征系统提供了技术支撑。

对于后续系统的改进提升, 将从如下几个方面展开: (1) 现有用于接收半球形 2 mm 硅透镜耦合效率不

高,影响了系统对于太赫兹信号的探测能力;后续将优化透镜结构以提升太赫兹波耦合效率;(2)受探测器的 10 k Ω 沟道电阻影响,接收链路中采用了噪声较大的电流前置放大器,后续可以通过进一步改进探测器设计与制造工艺,降低输出阻抗以实现与低噪声电压放大器的阻抗匹配,进而降低接收系统的噪声;(3)为降低系统的相位不稳定性,提高相位分辨率,后续采用更低噪声的微波信号源并对链路进行有效封装与电磁屏蔽。

参考文献:

- [1] IEEE802.15.3d-2017. IEEE standard for high data rate wireless multi-media networks – amendment 2: 100 Gb/s wireless switched point-to-point physical layer (IEEE Computer Society)[S]. New York: IEEE, 2017.
- [2] Pan Wu, Zeng Wei, Zhang Jun, et al. Design of multilayer stacked terahertz communication lens antenna [J]. *Optical Precision Engineering*, 2017, 25(1): 65-72. (in Chinese)
- [3] Wang H, Dong X, Min Y, et al. Terahertz high-gain offset reflector antennas using SiC and CFRP material [J]. *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, 2017, 65(9): 4443-4451.
- [4] Alibakhshikenari M, Virdee B S, Khalily M, et al. High-gain on-chip antenna design on silicon layer with aperture excitation for terahertz applications [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2020, 19(9): 1576-1580.
- [5] Tajima T, Song H J, Ajito K, et al. 300-GHz step-profiled corrugated horn antennas integrated in LTCC [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(11): 5437-5444.
- [6] Tuovinen J. Method for testing reflector antennas at THz frequencies [J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2002, 35(6): 7-13.
- [7] Wang C, Lu B, in C, et al. 0.34-THz wireless link based on high-order modulation for future wireless local area network applications [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology*, 2014, 4(1): 75-85.
- [8] Gregson S F, Parini C G. Examination of the effect of common CATR quiet zone specifications on antenna pattern measurement uncertainties[C]//Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC 2017). IET, 2017: 1-5.
- [9] Balanis C A. Antenna theory: Analysis and design [J]. *IEEE Antennas & Propagation Society Newsletter*, 2003, 24(6): 28-29.
- [10] Lou Z, Hu J, Zhou K M, et al. A quasi-optical vector near-field measurement system at terahertz band [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(6): 373-379.
- [11] Tanka Y, Ducournau G, Kanno A, et al. Photonics-based near-field measurement and far-field characterization for 300-GHz band antenna testing [J]. *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, 2022, 4(1): 24-31.
- [12] Hillger P, Grzyb J, Jain R, et al. Terahertz imaging and sensing applications with silicon-based technologies [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2019, 9(1): 1-19.
- [13] Lian Yuxuan, Feng Wei, Ding Qingfeng, et al. 340 GHz wireless communication receiving front-ends based on AlGaIn/GaN HEMT terahertz detectors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(5): 20210202. (in Chinese)
- [14] Qin Hua, Huang Yongdan, Sun Jiandong, et al. Terahertz-wave devices based on plasmons in two-dimensional electron gas [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(1): 51-67,150. (in Chinese)
- [15] Luo Muchang, Sun Jiandong, Zhang Zhipeng, et al. Terahertz focal plane imaging array sensor based on AlGaIn/GaN field effect transistors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 48(3): 0320001. (in Chinese)
- [16] Li X, Sun J, Zhang Z, et al. Integration of a field-effect-transistor terahertz detector with a diagonal horn antenna [J]. *Chinese Physics B*, 2018, 27(6): 068506.
- [17] Zhu Kaiqiang, Wei Feng, Zhu Yifan, et al. Heterodyne terahertz detection based on antenna-coupled AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistor [J]. *Applied Physics Letters*, 2022, 121(8): 081101.
- [18] Merrill I. Skolnik. Radar Handbook[M]. New York: McGraw-Hill, 2010.