

文章编号: 1672-8785(2023)01-0039-08

太赫兹功率测试研究与实现

谭景甲 徐玉华 吕振川 赵 鑫

(中电科思仪科技股份有限公司, 山东 青岛 266000)

摘 要: 为了给太赫兹源、太赫兹探测器等太赫兹仪器的研制和生产提供测试保障, 研制了一种基于锁相放大原理的太赫兹功率测试仪器。目前, 许多商用锁相放大器价格高、体积大且结构和功能比较复杂, 不适合一些便携式检测系统。该仪器主要采用基于 AD630 的锁相放大方案来实现对微弱信号的检测。这种锁相放大器成本低、设计结构简单、灵活性强且集成度高。当标准太赫兹功率计测试到的太赫兹功率为 96.8 mW 和 2.98 μ W 时, 采用本文方案研制的太赫兹功率测试仪器测试到的功率分别为 97.9 mW 和 3 μ W, 误差范围在 $\pm 5\%$ 以内。基于 CD552-R3 弱信号锁相放大方案只能提取到毫伏级信号, 而本文方案则可提取到微伏级信号。因此, 采用本文方案探测太赫兹功率时, 量程更宽且稳定性更高。

关键词: 太赫兹波; 太赫兹功率; 太赫兹能量; 锁相放大; AD630

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2023.01.006

Research and Implementation of Terahertz Power Measurement

TAN Jing-jia, XU Yu-hua, LYU Zhen-chuan, ZHAO Xin

(Ceyear Technologies Co., Ltd., Qingdao 266000, China)

Abstract: In order to provide testing support for the development and production of terahertz instruments such as terahertz source and terahertz detector, a terahertz power measuring instrument based on phase-locked amplification principle is developed. At present, many commercial phase-locked amplifiers are expensive, bulky and complex in structure and function, which are not suitable for some portable detection systems. The instrument mainly uses a phase-locked amplification scheme based on AD630 to monitor weak signals. AD630 phase-locked amplifier has low cost, simple design structure, strong flexibility and high integration. When the terahertz power measured by the standard terahertz power meter is 96.8 mW and 2.98 μ W, the power measured by the terahertz power measuring instrument developed in this paper is 97.9 mW and 3 μ W respectively, and the error range is within $\pm 5\%$. The phase-locked amplification scheme based on CD552-R3 weak signal can only extract millivolt level signals, while the scheme in this paper can extract microvolt level signals. Therefore, the proposed scheme is used to detect terahertz power with a wider range and higher stability.

Key words: terahertz wave; terahertz power; terahertz energy; phase-locked amplification; AD630

收稿日期: 2022-10-23

作者简介: 谭景甲(1992-), 男, 山东聊城人, 硕士, 主要从事 FPGA 硬件开发、微弱信号检测以及光通信测试仪器等方面的研究。E-mail: 1131841611@qq.com

0 引言

目前国外研制太赫兹功率^[1-3]测试仪的公司主要包括以色列 Ophir 公司、加拿大 Gentec-EO 公司和英国 TK 公司。其中, Ophir 公司、Gentec-EO 公司开展了基于热释电探测技术的太赫兹功率测试仪(频率涵盖 0.1~30 THz)研制工作。Ophir 公司研制的 RM9-THz 太赫兹功率测试仪的测试功率范围为 100 nW~100 mW; Gentec-EO 公司研制的 THz9D-20mS-BL 太赫兹功率测试仪的最大测试功率只有 25 mW, 其性能远低于 RM9-THz 太赫兹功率测试仪。

RM9-THz 太赫兹功率测试仪基于手持式结构, 将热释电探测器^[4-5]作为太赫兹探测单元, 利用锁相放大技术监测微弱电信号, 在热释电探测器前配置 18 Hz 固定斩波频率的斩波器, 响应连续或准连续太赫兹辐射。它采用分体式结构设计, 包括探头、主机、锁相处理模块和斩波器。其中采用的斩波器为 Ophir 公司自研的 RMC1 斩波器(斩波频率为 18 Hz)或它能够提供 18 Hz 斩波频率的斩波器。

经调研发现, 国外研制的太赫兹功率能量测试仪主要采用热释电探测器或光声探测器实现光电信号的转换, 通过对探测器输出的信号进行处理来完成功率或能量测试。由于光声探测器基于空气室的压力变化测试太赫兹脉冲辐射信号, 而空气室的压力对振动比较敏感, 所以光声探测器对抗振动冲击设计的要求较高。探头设计的尺寸和重量一般较大, 而且光声探测器对密封性具有一定的要求, 因此需要在探头入口处设计一个太赫兹透射窗进行封装, 增加了探头的成本。由于热释电探测器具有体积小、重量轻、价格便宜的优势, 所以本文采用热释电探测器对太赫兹辐射进行测试。

1 基本原理

通过理论计算可知, 探测器组件的电压响应率约为几十伏/瓦。当入射太赫兹脉冲辐射

功率为 100 nW 时, 探测器组件输出的电压约为微伏量级, 信号比较微弱, 容易被毫伏量级的噪声淹没, 所以很难从时域内观察到信号的规律性。热释电探测器输出的待测信号通常都具有周期性, 而噪声却是随机的, 因此本文采用锁相放大技术^[6-7]解决微伏量级电压测试难题。锁相放大技术是在相关检测技术的基础上发展起来的, 利用了信号与噪声之间不相关的特点, 实现了微弱信号检测。

锁相放大技术包括互相关检测技术与自相关检测技术。互相关是两个时间序列在任意两个不同时刻取值之间的相关程度, 自相关是同一个时间序列在任意两个不同时刻取值之间的相关程度。在测试太赫兹连续辐射时, 需用斩波器将太赫兹连续辐射调制为太赫兹脉冲辐射。斩波器能够为互相关检测技术提供外部参考信号。在测试太赫兹脉冲辐射时, 不需要使用斩波器, 也就无法为互相关检测技术提供外部参考信号。因此, 为了测试太赫兹连续辐射与脉冲辐射产生的微弱电信号, 在测试太赫兹连续辐射时, 使用互相关检测技术解决微伏量级电压测试难题; 在测试太赫兹脉冲辐射时, 使用自相关检测技术解决微伏量级电压测试难题。

互相关检测主要由信号通道、参考通道、相敏检波器、移相器、低通滤波器构成(见图 1)。其中, 信号通道由前置放大器和带通滤波器组成, 用于对待测信号进行预处理, 滤除通频带以外的部分噪声, 从而提高锁相放大电路的测量范围和测量精度。移相器用于调节待测信号与参考信号之间的相位差。相敏检波器是一个乘法器, 用于计算待测信号与参考信号之间的乘积。

互相关检测技术原理如下: 假设待测信号为 $x(t)=s(t)+n(t)$ (其中 $s(t)$ 为有效信号, $n(t)$ 为噪声), 参考信号为 $y(t)$, 移相之后的参考信号为 $y(t-\tau)$, 则相敏检波器的输出信号为

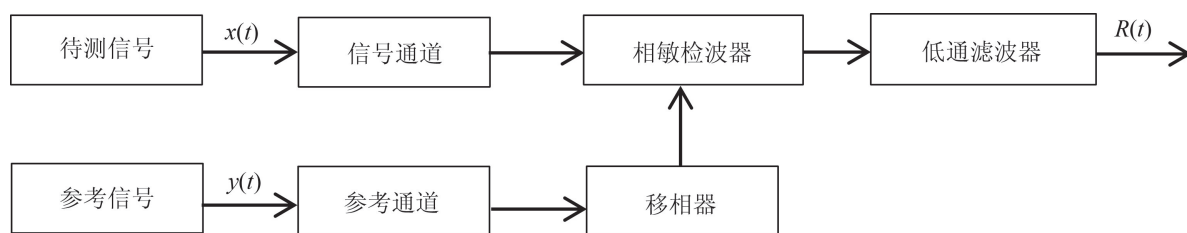


图 1 互相关检测技术的原理示意图

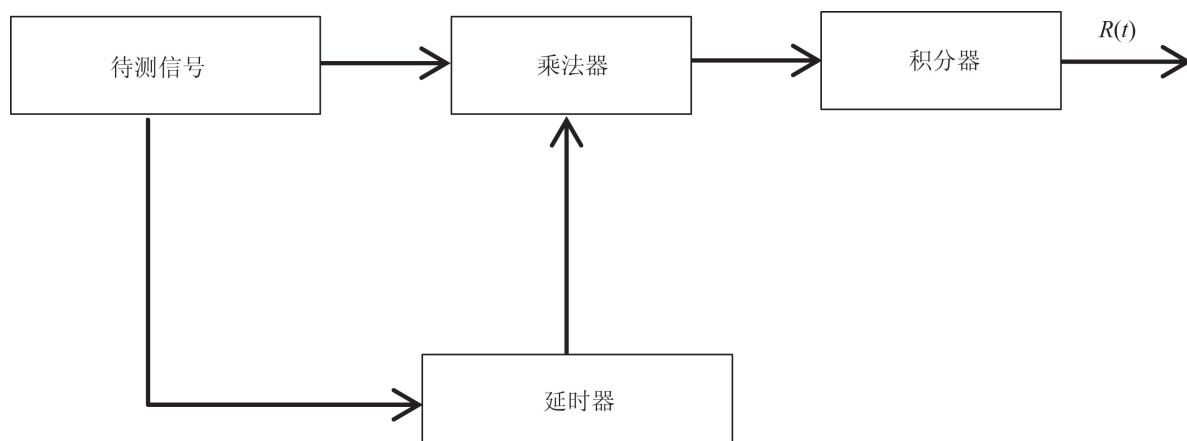


图 2 自相关检测技术的原理示意图

$$R(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t)y(t-\tau)dt \quad (1)$$

自相关检测技术利用周期函数的自相关函数仍具有周期性,而噪声的自相关函数在零点处有较大值(零点以外的值非常小)的特点,检测被噪声淹没的微弱信号。图 2 为自相关检测技术的原理示意图。待测信号分为两个通道,其中一个通道将待测信号直接送入到乘法器中,另一个通道将待测信号延时一段时间后再送入到乘法器中。两路信号经乘法器运算之后进入积分器,实现信号的输出。

综上所述,本文主要采用互相关检测技术来解决太赫兹脉冲辐射到探测器组件之后产生的微弱电信号的检测问题。

2 硬件方案

2.1 斩波器设计方案

本文利用热释电探测器实现对太赫兹辐射的测试。热释电探测器只能响应太赫兹脉冲辐射,因此在测试太赫兹连续辐射时,需要在太赫兹源与热释电探测器之间加入一个斩波器,使入射到热释电探测器上的信号为调制信号。

斩波器主要由斩波片、电机、光电编码器和控制电路构成。其中,光电编码器由分别位于斩波片两侧的一个发光二极管和一个光敏晶体管组成。斩波频率的准确性与稳定性主要由电机转速的大小和稳定性决定,因此设计高精度的电机控制电路能够提高斩波器的性能。本文通过 FPGA 控制脉冲宽度调制(Pulse Wide Modulator, PWM)的驱动电压,使得直流无刷电机转速稳定。电机带动斩波片转动,因此光电编码器产生了一个固定频率的方波,后者通过 FPGA 处理后输出。

2.2 锁相放大系统设计方案

本文采用基于 AD630 模块^[8-9]的锁相放大系统。该模块的内部结构如图 3 所示。两个平行的放大器 A 和 B 通过比较器实现开关选择。将它们分别接入最后一级放大器中,然后由外部连接负反馈,实现分时增益。比较器高电平期间,整个电路实现 2 倍放大,而低电平期间则实现-2 倍放大。锁相放大器的核心动作是实现方波与待测信号相乘。

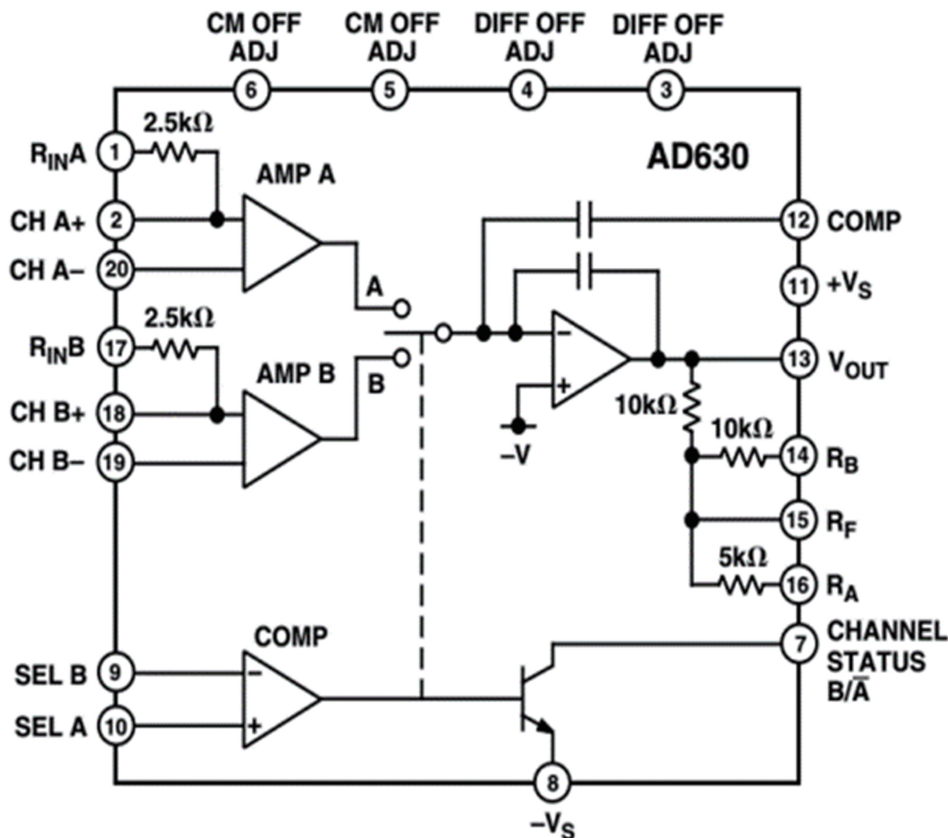


图 3 AD630 模块的内部结构

为了消除电源对信号的干扰,在信号接入到 AD630 锁相模块之前加入 50 Hz 陷波电路(见图 4)。通过 FPGA 处理后的方波信号需要变换为电压为 $\pm 5\text{ V}$ 的方波信号,这部分电路如图 5 所示。

将同频同相的待测信号和参考信号接入到 AD630 模块进行处理,结果会输出一个含有直流分量的两倍频正弦波(直流分量与待测信号的幅度成正比)。然后通过低通滤波器滤除两倍频信号来保留直流分量,就可得到一个正比于待测信号幅度的直流量。

2.3 主机设计方案

待测信号经过锁相放大模块处理后,接入到主机模块电路。将待测信号放大,然后经过单端转差分电路,将待测信号接入差分 AD7691 模数转换电路。通过 FPGA 对 AD7691 进行驱动控制,将采集到的数据进行累加取平均,最后通过 SPI 接口将其传到上位机。AD7691 控制电路如图 6 所示。

主机还包括显示模块、通信模块、温度补偿模块、E2ROM 存储模块、电池电量检测模块和电源模块。主机 CPU 运行 Linux 系统;上位机软件采用 Qt 开发,主要完成控制 SPI 接口驱动,与 FPGA 进行通信。通过串口通信方式控制斩波器的输出频率。整体的硬件设计方案如图 7 所示。

3 实验结果分析

3.1 数据标定

数据标定包括表头校准和探头校准两部分。表头校准采用直流稳压源接入主机模块,记录此时 AD7691 采集到的电压值。表头校准包括 4 个档位的校准。0 档校准时,直流稳压源分别输出 -2.0 V 、 -1.5 V 、 -1 V 、 -0.5 V 、 0 V 、 0.5 V 、 1.0 V 、 1.5 V 、 2.0 V ,分别对应记录此时 AD7691 采集到的电压值。利用 MATLAB 软件计算这两组数据之间的线性关系,得出斜率和截距的具体数值。1 档校准时,直流稳压源分别输出 -0.4 V 、 -0.3 V 、

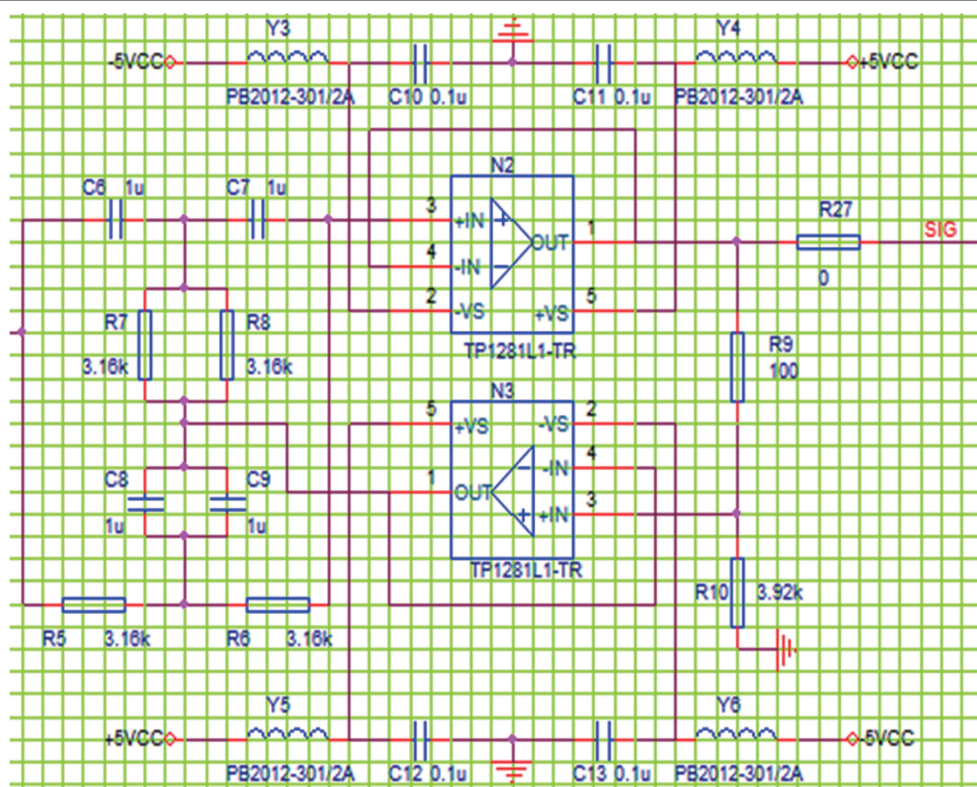


图 4 50 Hz 陷波电路

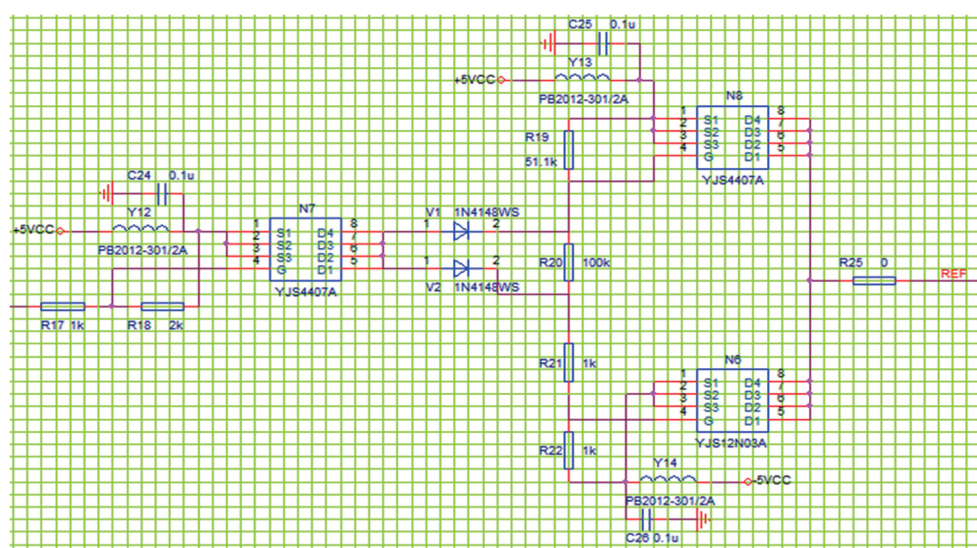


图 5 方波信号处理电路

—0.2 V、—0.1 V、0V、0.1 V、0.2 V、0.3 V、0.4 V。2 档校准时, 直流稳压源分别输出—40 mV、—30 mV、—20 mV、—10 mV、0 mV、10 mV、20 mV、30 mV、40 mV。3 档校准时, 直流稳压源分别输出—4 mV、—3 mV、—2 mV、—1 mV、0 mV、1 mV、2 mV、3 mV、4 mV。按照 0 档数据处

理方式, 分别对 1 档、2 档、3 档数据进行处理。将数据结果作为每个档位的校准因子, 并将其写入 E2ROM 中。

然后进行探头校准, 分 4 个量程对数据进行处理。第一个量程可以测试的太赫兹功率范围为 10~100 mW。控制激光器的输出功率分别为 95 mW、85 mW、75 mW、65 mW、55 mW、45

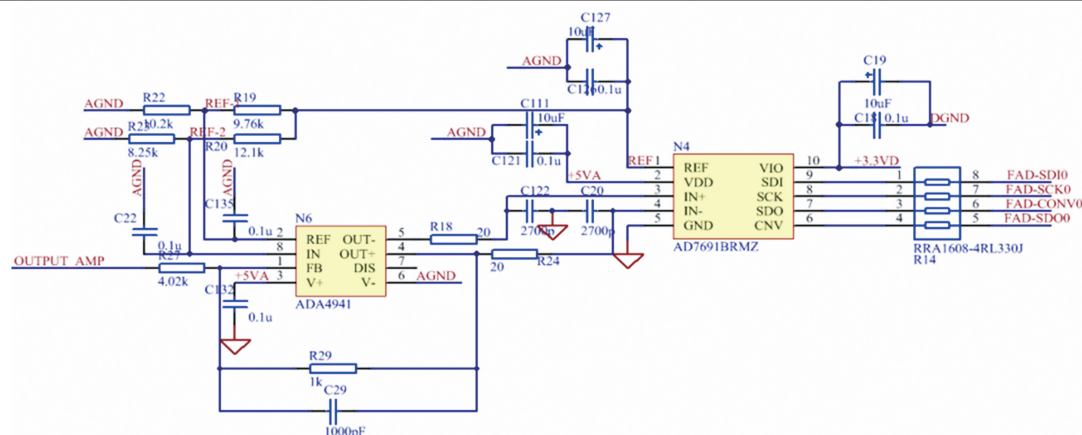


图 6 AD7691 控制电路

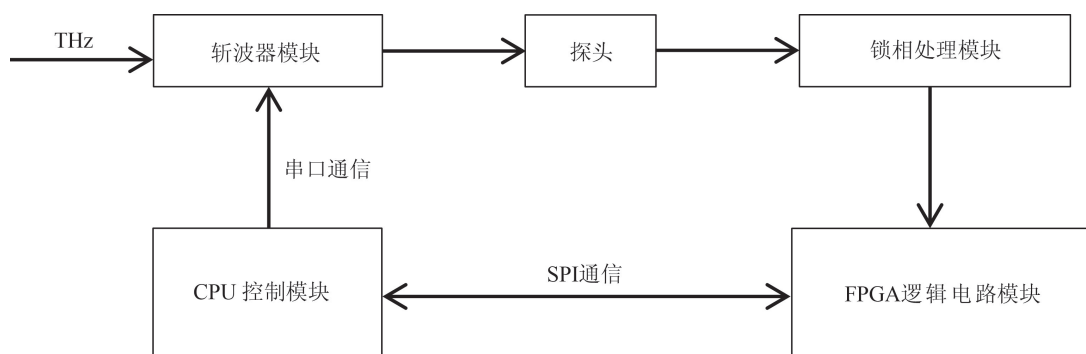


图 7 硬件设计方案

mW、35 mW、25 mW 和 15 mW，并分别记录不同功率值下的探头电压值。对这两组数据进行线性拟合，将得出的斜率和截距作为第一个量程的校准因子。第二个量程可以测试的太赫兹功率范围为 1~10 mW。控制激光器的输出功率分别为 1.5 mW、2.5 mW、3.5 mW、4.5 mW、5.5 mW、6.5 mW、7.5 mW、8.5 mW 和 9.5 mW，并分别记录不同功率值下的探头电压值。对这两组数据进行线性拟合，将得出的斜率和截距作为第二个量程的校准因子。第三个量程可以测试的太赫兹功率范围为 100 μ W~1 mW。控制激光器的输出功率分别为 150 μ W、250 μ W、350 μ W、450 μ W、550 μ W、650 μ W、750 μ W、850 μ W 和 950 μ W，并分别记录不同功率值下的探头电压值。对这两组数据进行线性拟合，将得出的斜率和截距作为第三个量程的校准因子。第四个量程可以测试的太赫兹功率范围为 3~100 μ W。控制激光器的输出功率分别为 3 μ W、15 μ W、25 μ W、35 μ W、45 μ W、55 μ W、65 μ W、75 μ W、

85 μ W 和 95 μ W，并分别记录不同功率值下的探头电压值。对这两组数据进行线性拟合，将得出的斜率和截距作为第四个量程的校准因子。

3.2 结果分析

经过数据校准后，进入实测阶段。当标准功率为 96.8 mW 时，本文研发的太赫兹功率测试仪的测试功率为 97.9 mW (见图 8 和图 9)。当标准功率为 43.6 mW 时，本文研发的太赫兹功率测试仪的测试功率为 44 mW (见图 10 和图 11)。当标准功率为 139 μ W 时，本文研发的太赫兹功率测试仪的测试功率为 134.8 μ W (见图 12 和图 13)。当标准功率为 2.98 μ W 时，本文研发的太赫兹功率测试仪的测试功率为 3 μ W (见图 14 和图 15)。

通过分析以上结果可知，本文研制的太赫兹功率测试仪能测试到的功率范围为 3 μ W~100 mW，功率测试值稳定，误差范围在 5% 以内。



图 8 标准功率

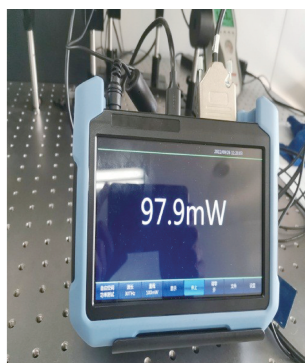


图 9 测试功率

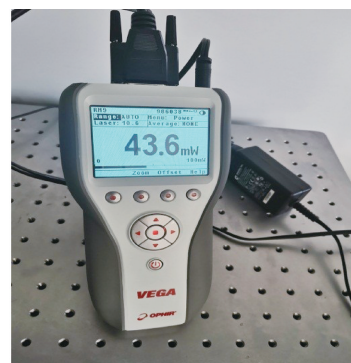


图 10 标准功率



图 11 测试功率



图 12 标准功率



图 13 测试功率



图 14 标准功率



图 15 测试功率

4 结束语

本文采用基于 AD630 的锁相放大方案, 研制出一款实用的太赫兹功率测试仪器。采用这种方案可将微伏级的太赫兹电压信号从毫伏级的噪声电压信号中检测出来。该仪器能测试到的功率范围为 $3\ \mu\text{W} \sim 100\ \text{mW}$ 。与 THz9D-20mS-BL 太赫兹功率测试仪相比, 此仪器具有性能高、测试量程更宽的优点。相比于 Ophir 公司研制的 RM9-THz 太赫兹功率测试仪, 该仪器还需要进一步提高测试量程。此仪器对太

赫兹源、太赫兹探测器等太赫兹仪器的研制和生产具有重要意义, 但在测试 $3\ \mu\text{W}$ 以下的太赫兹功率时存在测试值波动较大、不稳定的问题。下一步需重点解决的难题是使该仪器的测试功率最低达到 $100\ \text{nW}$, 误差在 10% 以内。因此项目组将从优化测试环境着手, 进一步优化电路。

参考文献

- [1] 贾婉丽, 赵立, 侯磊, 等. 碳纳米管光混频器产生太赫兹功率的理论分析 [J]. 物理学报,

- 2014, **63**(7): 077201.
- [2] 赵旋, 董新科, 李欢, 等. 太赫兹功率探测器高灵敏度调制解调系统设计 [J]. *光学仪器*, 2022, **44**(2): 15–21.
- [3] 范国清, 赵爱英, 刘金现, 等. 基于肖特基二极管的太赫兹功率探头研究 [J]. *微波学报*, 2015, **36**(S1): 65–68.
- [4] 董航荣, 曹乾涛, 张鹏, 等. 基于钽酸锂晶片的太赫兹热释电探测器 [J]. *红外*, 2020, **41**(4): 14–19.
- [5] 朱荣峰, 赵静, 张梦圆, 等. 单通道与补偿型 PIMNT 热释电红外探测器的性能比较 [J]. *红外*, 2021, **42**(4): 1–8.
- [6] 曲秋红. 实用太赫光谱仪信号锁相放大新技术研究 [D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [7] 胡朋兵, 潘孙强, 崔晨晨, 等. 激光锁相放大技术在顶空分析中的应用 [J]. *激光与红外*, 2019, **49**(11): 1317–1322.
- [8] 陈希. 基于 AD630 锁相放大器的研究设计及其在光纤气体传感检测系统中的应用 [D]. 济南: 山东大学, 2017.
- [9] 郭亮, 陈宝明, 董有尔, 等. 基于 AD630 实现蓄电池内阻在线测量 [J]. *现代电子技术*, 2011, **34**(1): 128–132.
- (上接第 38 页)
- [26] Wang Y X, Cui W, Ma H Q, et al. Outstanding slow-light effect for graphene metasurface in terahertz [J]. *Results in Physics*, 2021, **23**: 104022.
- [27] Li C, Li W L, Duan S Y, et al. Electrically tunable electromagnetically induced transparency in superconducting terahertz metamaterials [J]. *Applied Physics Letters*, 2021, **119**(5): 052602.
- [28] Zhou J H, Zhang C X, Liu Q R, et al. Controllable all-optical modulation speed in hybrid silicon-germanium devices utilizing the electromagnetically induced transparency effect [J]. *Nanophotonics*, 2020, **9**(9): 2797–2807.
- [29] Hu Y Z, Jiang T, Zhou J H, et al. Ultrafast Terahertz Transmission/Group Delay Switching in Photoactive WSe₂-Functionalized Metaphotonic Devices [J]. *Nano Energy*, 2020, **68**: 104280.