DOI：10.19789/j.1004-9398.2026.05.002　　**Open Access**
文献引用：王奕凡，李照宇，王俊喃，等．辉光放电太赫兹外差探测器及成像研究[J]．首都师范大学学报（自然科学版），2026，47(5)：8-14. Wang Yifan，Li Zhaoyu，Wang Junnan，et al. Research on heterodyne detection and imaging of terahertz glow discharge detectors[J]. Journal of Capital Normal University（Natural Science Edition），2026，47(5)：8-14.

辉光放电太赫兹外差探测器及成像研究*

王奕凡，李照宇，王俊喃，侯　磊**

（西安理工大学光电科学与智能仪器学院，陕西 西安　710054）

摘要：辉光放电探测器（GDD）是一种具有潜力的室温太赫兹（THz）探测器，具有工作宽带宽、成本低、动态范围大及可在室温条件下工作等优势。本文以GDD作为非线性混频器，设计了工作在106 GHz的外差检测系统，实现了THz信号的外差探测，并开展THz成像实验研究。同时，系统对比分析GDD在外差探测与直接探测2种探测方式下的性能差异，包括最小可探测功率、噪声等效功率（NEP）以及成像质量等。实验结果表明，外差探测系统能够有效抑制低频噪声，获得更低的NEP，且图像具有更高的对比度和信噪比。相关结果验证了基于GDD的外差探测在THz信号探测与成像应用中的显著优势。本文对室温辉光放电外差探测器性能研究及其在THz探测与成像领域的应用具有一定的参考价值。

关键词：辉光放电探测器；太赫兹波；外差探测；太赫兹成像
中图分类号：O441.5　　**文献标志码**：A

Research on heterodyne detection and imaging of terahertz glow discharge detectors*

Wang Yifan，Li Zhaoyu，Wang Junnan，Hou Lei**

（College of Optoelectronic Engineering and Intelligent Instrumentation，
Xi'an University of Technology，Xi'an Shaanxi　710054）

Abstract：Glow discharge detector（GDD）is a promising room-temperature terahertz（THz）detector，which has the advantages of wide working bandwidth，low cost，large dynamic range and stable operation at room temperature. In this paper，the GDD is employed as a nonlinear mixer to develop a heterodyne detection system operating at 106 GHz，enabling heterodyne detection of THz signals. THz imaging experiments are further carried out based on this system. In addition，the detection performance differences of GDD-based in heterodyne detection is systematically compared with that of direct detection，including key performance metrics such as minimum detectable power，noise equivalent power（NEP）and imaging quality. The experimental results show that the heterodyne detection system can effectively suppress low-frequency noise and achieve a lower NEP. The obtained THz images exhibit higher contrast and signal-to-noise ratio compared with direct detection. These results verify the significant advantages of GDD-based heterodyne detection in THz signal detection

收稿日期：2026-02-08
*国家自然科学基金项目（62435015）；陕西省自然科学基金重点项目（2025SYS-SYSZD-022）；陕西省数物基础科学项目（23JSZ005）；西安理工大学优秀博士学位论文创新基金项目（119-252072401）
**通信作者：houleixaut@126.com

and imaging applications. This paper initially demonstrates the superiority of the room-temperature glow discharge heterodyne detectors and their applications in terahertz detection and imaging.

Keywords: glow discharge detector; terahertz wave; heterodyne detection; terahertz imaging

CLC: O441.5 **DC**: A

0 引 言

近年来,随着太赫兹(terahertz,THz)探测与成像技术在医学、通信、国土安全、材料科学和空间技术等领域的广泛应用[1-2],对THz探测器的灵敏度和带宽提出更高的要求。THz探测器主要分为电子学探测器和热探测器[3]。

电子学探测器是利用THz电场引起探测器中电子的输运特性变化实现对THz波的探测,该探测器具有响应速度快、室温工作等优点,但其频谱响应范围相对较窄,例如肖特基二极管、场效应晶体管(field-effect transistor,FET)等[4]。热探测器利用THz辐射在光敏感元件中的热效应,使元件温度产生变化,引起电阻、电压等电学参数的变化,实现将温度转换为电信号,最终实现对THz波的探测,该探测器具有在极宽光谱范围工作的优点,例如热释电探测器、高莱探测器等[5]。

辉光放电探测器(glow discharge detector,GDD)是一种新型的电子学探测器,其工作原理是气体辉光放电产生的等离子体中的电子从入射电磁辐射中获得能量,使部分电子与中性原子的碰撞激发转变为碰撞电离,产生新的电子,并在偏置电场下加速运动与气体原子发生碰撞电离,导致电子数量雪崩倍增,从而增加电极间的电流密度。该探测器可在室温条件下工作,具有高灵敏度、宽工作频段、大动态范围及低成本等优势[6-8],其探测方式可分为非相干(直接)探测和相干(外差)探测[5]。直接探测时,GDD在直流偏置电压下产生辉光放电,入射的THz辐射增强了气体的电离率,使得电极间增大的放电电流与入射THz波功率成正比。因此,通过探测放电电流的变化量实现对THz波的探测。由于在直接探测中,输出信号只与THz波功率有关,因此只能获取THz波的强度信息,无法获得相位信息。外差探测时,GDD中放电电流与外加电场间具有非线性关系,当待测THz信号场与THz本振(local oscillator,LO)场同时入射时,信号场与LO场在GDD内部发生混频,输出电流中产生中频(intermediate frequency,IF)分量,从而实现对THz信号的外差探测。在外差探测中,由于IF分量不仅保留了待测THz场与本振THz场的幅值信息,还包含了二者间的相对相位差信息,因此,外差探测可以获得THz场的强度与相位信息。2011年,Joseph等[9]证实了GDD可用于微波外差探测,并对比了其对频率为10 GHz微波场的直接探测和外差探测的性能。结果表明,直接探测的噪声等效功率(noise equivalent power,NEP)为3.78×10^{-10} W/Hz$^{1/2}$,而外差探测的NEP为4.46×10^{-12} W/Hz,表明外差探测的灵敏度显著优于直接探测。2013年,Kopeika研究团队利用GDD实现了对300 GHz电磁波的外差探测,实验测得直接探测的NEP为3.92×10^{-7} W/Hz$^{1/2}$,外差探测的NEP为1.27×10^{-10} W/Hz,进一步验证了外差探测在灵敏度方面的优势[10]。在此基础上,本文研究了影响GDD响应度的主要因素,包括GDD尺寸、荧光涂层和玻璃厚度,并对比了直接探测与外差探测的NEP,结果表明,直接探测和外差探测的NEP分别为1.44×10^{-9} W/Hz$^{1/2}$和1.07×10^{-14} W/Hz,外差探测表现出更高的灵敏度。此外,还开展了基于GDD的THz外差成像实验研究,验证了其在成像应用中的可行性。

1 GDD直接与外差探测的理论分析

GDD的探测机制是增强的级联电离[8,11-14],当THz波入射时,其电极间放电电流的变化量为

$$\Delta I(t)^2=\frac{G\cdot q^2\cdot v\cdot n}{v_i\cdot m}\cdot\left(\frac{\tau}{\tau_i}\right)\cdot\eta_0\cdot P_S\cdot\left(\frac{\upsilon}{\upsilon^2+\omega^2}\right)\cdot\left(1-\mathrm{e}^{\frac{t}{\tau}}\right),\tag{1}$$

式中:q是电子电荷;v是电子速度;n是电子密度;v_i是气体电离势;m是电子质量;τ是时间常数;τ_i是电离时间;η_0是自由空间阻抗;P_S是探测器接收到的辐射功率;G为内部信号增益;υ是电子碰撞频率;ω是电磁辐射频率。令式(1)中$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\upsilon}\left(\frac{\upsilon}{\upsilon^2+\omega^2}\right)=0$,得到$\upsilon=\omega$,此时响应达到峰值。

在外差探测中,LO场(E_{LO})和待测信号的电场(E_S)分别为:

$$E_{\mathrm{LO}} = A_{\mathrm{LO}} \cdot \cos(\omega_{\mathrm{LO}} t + \varphi_{\mathrm{LO}} - \beta_z z)\hat{a}_x, \quad (2)$$

$$E_{\mathrm{S}} = A_{\mathrm{S}} \cdot \cos(\omega_{\mathrm{S}} t + \varphi_{\mathrm{S}} - \beta_z z)\hat{a}_x, \quad (3)$$

式中:A_{LO}和ω_{LO}分别表示LO电场的振幅和频率;A_{S}和ω_{S}分别表示信号电场的振幅与频率;$\hat{a}_x$表示电场的方向。

探测器输出的瞬时电流为

$$i(t) = \Re \cdot G \cdot \frac{|E|^2}{\eta_0} \cdot A_{\mathrm{r}} = \frac{\Re \cdot G \cdot A_{\mathrm{r}}}{\eta_0} \cdot |E_{\mathrm{S}} + E_{\mathrm{LO}}|^2, \quad (4)$$

式中:A_{r}和η_0分别表示有效探测面积和自由空间阻抗;$\Re$表示探测器的响应度。

滤除THz高频分量,仅保留直流和IF项时,输出电流为

$$I(t) = \frac{\Re \cdot G \cdot A_{\mathrm{r}}}{2 \cdot \eta_0}\left[|E_{\mathrm{S}}|^2 + |E_{\mathrm{LO}}|^2 + 2E_{\mathrm{S}}E_{\mathrm{LO}}\cos(\omega_{\mathrm{IF}} t + \varphi_{\mathrm{IF}})\right] =$$

$$\Re \cdot [P_{\mathrm{S}} + P_{\mathrm{LO}} + 2\sqrt{P_{\mathrm{S}} \cdot P_{\mathrm{LO}}}\cos(\omega_{\mathrm{IF}} t + \varphi_{\mathrm{IF}})], \quad (5)$$

式中:P_{LO}表示LO源的功率;P_{S}表示待测信号源的功率;外差角频率和相位差分别为$\omega_{\mathrm{IF}} = \omega_{\mathrm{S}} - \omega_{\mathrm{LO}}$和$\phi_{\mathrm{IF}} = \phi_{\mathrm{S}} - \phi_{\mathrm{LO}}$。

由于式(5)同时包含了直流和差频分量,若仅对差频信号进行检测,则差频电流$I_{\mathrm{IF}}(t)$可表示为

$$I_{\mathrm{IF}}(t) = 2\Re \cdot \sqrt{P_{\mathrm{S}} \cdot P_{\mathrm{LO}}}\cos(\omega_{\mathrm{IF}} t + \varphi_{\mathrm{IF}})。 \quad (6)$$

外差探测的信噪比(signal-noise ratio,SNR)为

$$R_{\mathrm{SN}} = \frac{2 \cdot \Re^2 \cdot G^2 \cdot P_{\mathrm{S}} \cdot P_{\mathrm{LO}}}{2qB[\Re(P_{\mathrm{S}} + P_{\mathrm{LO}}) + i_{\mathrm{d}}] \cdot G^2 + \dfrac{4kT_{\mathrm{e}}B}{R_{\mathrm{L}}}}, \quad (7)$$

式中:T_{e}表示约翰逊噪声中的电子温度;B是探测器带宽;R_{L}为负载电阻;k为玻尔兹曼常数。

直接探测的SNR为

$$R_{\mathrm{SN}} = \frac{\left[K \cdot \Re \cdot G \cdot P_{\mathrm{S}}\right]^2}{\left\{2q^2\left[\Re(P_{\mathrm{S}})G^2 + i_{\mathrm{d}}G^2\right] + \dfrac{4KT_{\mathrm{e}}}{R_{\mathrm{L}}}\right\}B}。 \quad (8)$$

由式(8)可知,在直接探测中,R_{SN}与P_{S}的平方成正比,但在外差探测中,R_{SN}与P_{S}和P_{LO}的乘积成正比。因此,在外差探测中,利用较高的P_{LO}可以实现对较低P_{S}的探测[15]。

当R_{SN}=1时,直接探测和外差探测可探测到的最小功率分别为$P_{\mathrm{S\text{-}min\text{-}d}}$和$P_{\mathrm{S\text{-}min\text{-}h}}$。因此,得到直接探测和外差探测器的NEP分别为[10]:

$$P_{\mathrm{NEd}} = \frac{P_{\mathrm{S-min-d}}}{\sqrt{B}}, \quad (9)$$

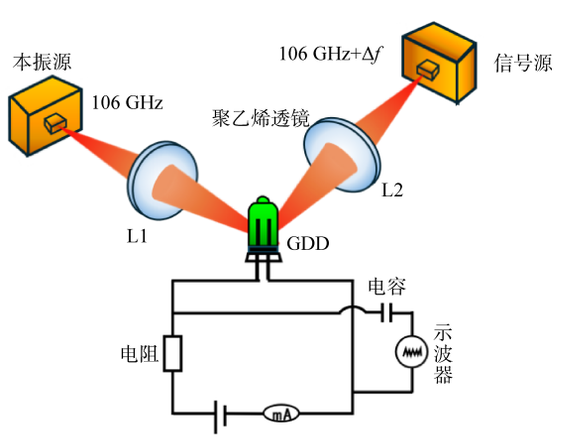
$$P_{\mathrm{NEh}} = \frac{P_{\mathrm{S-min-h}}}{B}。 \quad (10)$$

与直接探测相比,外差探测虽存在一定局限性,如要求信号源与LO源间具有相同的偏振,且2个光束间的相位差在探测体积上保持均匀等[15],但其在灵敏度、信噪比和动态范围方面具有明显优势,同时能够获取相位信息并具备较高的频率分辨率。因此,在弱THz信号探测及相位成像应用中,外差探测仍优于直接探测[16]。

2　实验装置与结果

2.1　GDD外差探测与直接探测对比

为了比较利用GDD对THz波进行外差探测与直接探测的性能,设计了图1所示的实验装置。外差探测时,信号源与LO源均为可调谐THz信号源,其频率范围均为99~114 GHz。如图2所示,当THz波频率为106 GHz时,GDD的响应率最高达到16.67 V/W,故在106 GHz下开展后续实验。在直接探测实验中,仅开启信号源,并在其前端放置斩波器,对入射THz波进行调制,调制频率为99 Hz。调制后的THz波通过聚乙烯透镜(L2)聚焦至GDD两极之间[17]。对于外差探测,LO源和信号源产生的THz波通过喇叭天线耦合到自由空间,分别通过L1和L2聚焦至GDD两极间的辉光放电区,GDD对2束THz波进行混频,产生的差频分量由后端电路提取和放大,最终输入示波器检测。



注:L1和L2为聚乙烯透镜;GDD表示辉光放电探测器;Δf为差频频率。

图1　GDD太赫兹外差探测实验装置示意

Figure 1　schematic of GDD THz heterodyne detection experimental setup

不同型号氖灯GDD对THz波的探测效果不同。为研究GDD的性能,以4种型号氖灯作为探测元件,其参数如表1所示。

外差探测实验中,设置LO源频率为106 000 MHz,

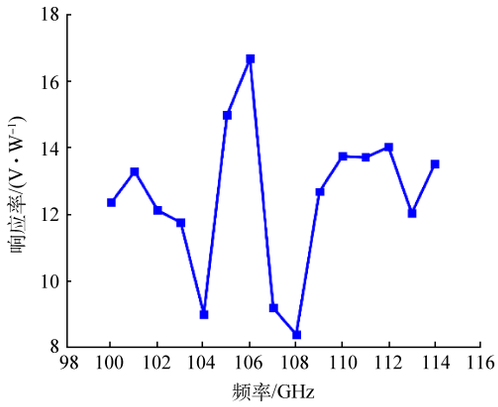


图2　不同THz频率下GDD的响应率

Figure 2　responsiveness of the GDD at different THz frequencies

表1　4种型号氖灯的参数

Table 1　parameters of the four kinds of neon lamps

型号	直径/mm	长度/mm	壁厚/mm	电极间距/mm	荧光层
NE-2	5	13	0.5	1.5	无
NE-2mini	4	10	0.3	1.0	无
NE-2G	5	13	0.5	1.5	有
NE-2Gmini	4	10	0.3	1.0	有

信号源频率为106 006 MHz,差频频率Δf为6 MHz。当供电电压为150 V时,4种型号氖灯GDD对THz波的响应曲线如图3所示。在相同条件下,NE-2Gmini响应最强,输出信号幅值可达2.5 mV,这是由于电场强度与电极间距成反比,较小的间距在相同偏置电压下可产生更强的局域电场,从而增强电子碰撞电离效率,输出信号幅值随之增大[18]。其次,由于氖灯玻璃对THz波具有显著的吸收和反射损耗,透射信号强度随玻璃壁厚度的增加呈指数衰减。荧光层在电子激发下产生光子,这些光子可被激发态原子吸收产生光致电离,从而实现信号的放大。因此,相同条件下带有荧光层的氖灯能够产生更高的电信号响应[19]。综上所述,具有荧光层、电极间距小、玻璃壁薄的氖灯能够输出更高的信号。由表1可知,NE-2Gmini氖灯具备以上特点,且已经表现出最佳性能,因此后续实验中使用该型号氖灯。

为探究在直接探测与外差探测下待测THz波功率与输出信号幅值的关系,在信号源光路放置偏振片,通过调节偏振片的角度来改变入射波的功率,采用热释电功率计(THZ6B-BL-DZ, Standa, USA)测量不同偏振角度对应的THz功率。考虑到氖灯GDD对入射THz波具有偏振敏感性,依据马吕斯定律计算氖灯GDD探测方向的有效入射功率。

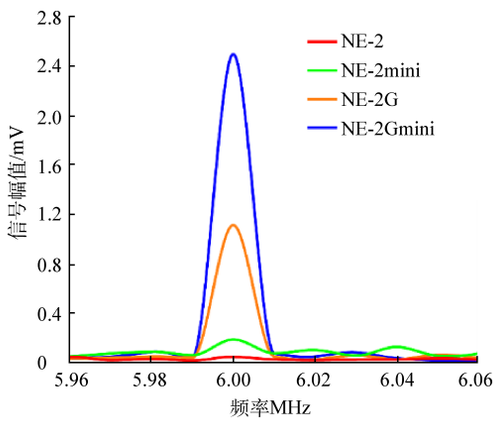


图3　不同型号的氖灯GDD对THz波的探测信号

Figure 3　THz detection signals of different neon lamps GDDs

在上述不同有效THz功率条件下,使用NE-2Gmini氖灯GDD进行直接探测和外差探测,结果如图4所示。外差探测过程中,LO源的功率恒定为1.8 mW。由图4可知,直接探测时,最小可探测信号幅值为150 μV,其对应的最小可探测功率为6.430 μW。外差探测时,最小可分辨信号幅值为150 μV,其对应的最小可探测功率为0.213 μW。在这2种探测中,受示波器探测能力的影响,当信号幅值<150 μV时,信号被噪声淹没而无法识别。根据式(9)与(10)可得,直接探测和外差探测的NEP分别为1.44×10^{-9} W/Hz$^{1/2}$和1.07×10^{-14} W/Hz。当入射THz波功率较低时,外差探测获得的差频信号幅值高于直接探测;当功率>12 μW,直接探测信号幅值逐渐大于外差探测。该现象由于2种探测方式对信号功率的响应机制不同。直接探测属于平方律探测,其

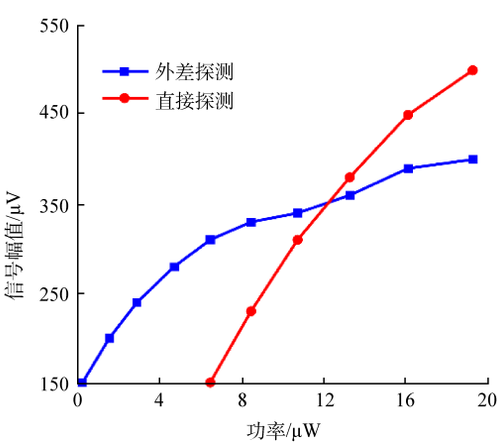


图4　不同THz功率下外差和直接探测的输出信号幅值

Figure 4　amplitude of output signals at different THz power by heterodyne and direct detection methods

输出信号幅值与入射THz波功率P_s近似成正比;外差探测中差频信号由信号场与LO场的差频项产生,其输出信号幅值与入射THz波功率$\sqrt{P_s}$近似成正比[20]。在高功率条件下,线性功率项增长速度快于差频项,从而导致直接探测信号幅值超过外差信号幅值。

然而,外差检测的优势并不在于信号幅值的增大,而在于其可降低NEP。外差方法能够有效抑制低频噪声源的影响,使得系统获得更高的检测灵敏度。因此,尽管外差信号幅值较弱,但外差探测在弱信号探测及噪声抑制方面仍具有显著优势[21]。

为探究差频对信号幅值的影响,实验中测量Δf分别为6、12和18 MHz时的信号幅值(图5)。实验结果表明,随着Δf的增加,外差信号幅值呈现明显衰减:6 MHz时为2 480 μV;12 MHz时降至360 μV;18 MHz时进一步减小至83 μV。主要原因是探测器本身的带宽限制。探测器对差频响应可近似为一阶低通滤波器,其幅值与频率的关系为

$$A(\Delta f)=\frac{A_0}{\sqrt{1+\left(\Delta f/f_c\right)^2}}, \tag{11}$$

式中:f_c为截止频率;A_0为差频远小于f_c时探测器能够输出的最大信号。

将图5中不同Δf下信号幅值代入式(11)中,可得探测器有效截止频率约为3 MHz。当Δf接近或超过该截止频率时,探测器对差频信号的响应迅速减弱,从而导致外差信号幅值随Δf增大而明显降低。

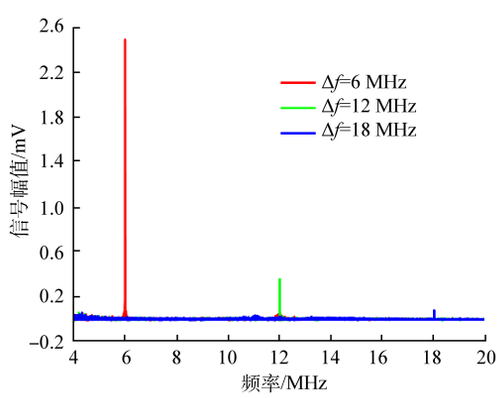


图5　外差探测输出信号幅值随Δf的变化关系

Figure 5　dependence of amplitude of output signal on the Δf in heterodyne detection

2.2　GDD外差成像与直接成像对比

上述实验确定了采用GDD开展THz波外差探测时,IF信号幅值达到最大值的工作条件,在此基础上,本文设计并搭建了基于GDD的太赫兹成像系统,实验装置如图6所示。

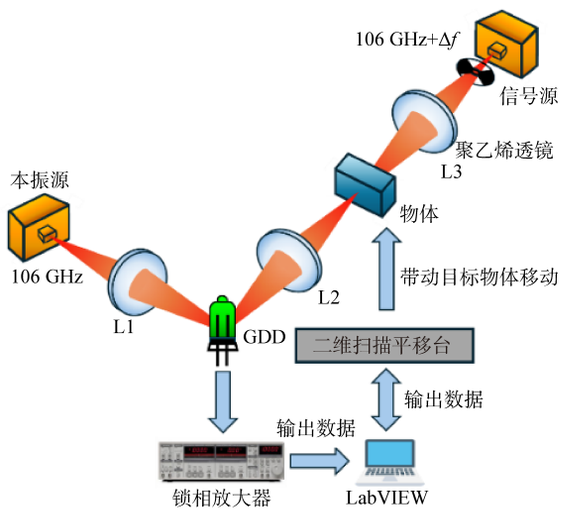


图6　外差成像实验装置

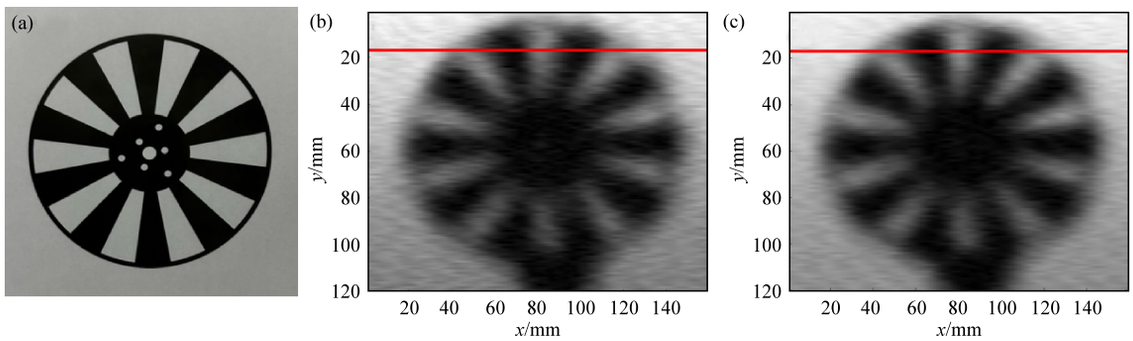
Figure 6　schematic of the heterodyne imaging experimental setup

信号源辐射的THz波通过喇叭天线耦合至自由空间,由于使用锁相放大器进行数据采集,因此在信号源前放置斩波器对THz波调制,调制频率为99 Hz。调制后的THz波经过L3聚焦至固定在二维扫描平移台上的待测物体,透射THz波与LO源输出的THz波分别通过L2和L1聚焦至GDD两极间的辉光区域。2束THz波进行混频,产生差频分量。控制二维扫描平移台对待测物体进行扫描,锁相放大器采集数据,完成对目标物体的成像。

THz成像原理是利用样品不同位置对THz波的透射率存在差异,探测器输出不同强度的信号,从而获得样品的灰度图像。由于系统噪声水平较高,原始探测信号难以直接用于成像。使用低功耗仪表放大器(AD8429)对原始信号进行放大,同时降低噪声影响,可获得清晰的成像结果。

待测样品及其成像结果如图7所示。图7(a)为斩波器叶片实物,叶片外径为100 mm,内圈直径为35 mm;内圈中大孔直径为6 mm,小孔直径为3 mm。分别采用直接探测与外差探测方式对其成像,电动平移台步长为1 mm,锁相放大器时间常数为100 ms,结果如图7(b、c)所示。

为对比2幅图像的对比度,分别提取图7(b、c)中直线上的数据并进行归一化处理,绘制得到THz波功率随位置变化的曲线,如图8所示。定义图像



注:红线为相同y坐标位置处的横向采样线。

图7　斩波器叶片光学照片及其THz成像结果

(a)斩波器叶片光学照片;(b)斩波器叶片直接成像;(c)斩波器叶片外差成像

Figure 7　photo and THz imaging results of the chopper blade

(a)photo of the chopper blade;(b)direct imaging of the chopper blade;(c)heterodyne imaging of the chopper blade

的迈克尔逊对比度为

$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \tag{12}$$

式中$I_{\max}$和$I_{\min}$分别表示成像区域内测得的最大和最小面积THz功率密度。由于功率密度与功率成正比,将归一化数据中$P_{\max}$和$P_{\min}$代入式(12)中,可得外差探测与直接探测所获得的图像对比度分别为0.993和0.868。

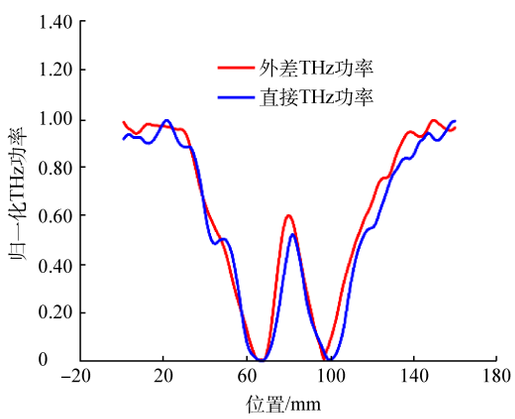


图8　太赫兹功率沿图7(b、c)上直线的变化曲线

Figure 8　THz power curves along the lines in figures 7(b、c)

进一步,对2幅图像进行高斯滤波平滑,由于成像结果为功率分布图,通过对功率图像进行高斯滤波以抑制高频噪声。在此基础上,分别统计信号区域与背景区域的平均功率,定义为等效信号功率(P_{S})和噪声功率(P_{n})。利用式(13)计算图像的SNR,得到外差探测与直接探测所获得图像的SNR分别为18.00和12.15 dB,其表达式为

$$R_{\mathrm{SN}} = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{P_{\mathrm{S}}}{P_{\mathrm{n}}}\right)。 \tag{13}$$

对上述成像结果进行计算,可得直接成像和外差成像的对比度分别为0.993和0.868,SNR分别为18.00和12.15 dB。由此可知,与直接探测相比,外差探测获得的图像具有更高的对比度和SNR。该结果表明,采用外差成像方式能够有效抑制噪声干扰并增强信号强度。因此,外差探测在THz成像方面表现出更好的性能。

3　结　论

本实验搭建了基于GDD的THz外差探测系统,并成功实现THz成像。在放电电压150 V、Δf=6 MHz条件下,测试对比不同氖灯的响应特性,同时标定外差探测与直接探测的最小可探测功率,计算得到外差探测和直接探测的NEP分别为1.07×10^{-14} W/Hz和1.44×10^{-9} W/Hz$^{1/2}$。此外,还对比不同Δf下信号幅值的变化,由于探测器本身带宽限制,外差信号幅值随Δf增大呈现先增强后减弱的趋势,当Δf=6 MHz时,外差信号幅值最大。搭建了外差成像系统,对比了2种探测方式对斩波片的成像效果。结果显示,当锁相放大器时间常数为100 ms时,外差探测和直接探测获得的THz图像对比度分别为0.993和0.868,这2种探测方式所对应的SNR分别为18.00和12.15 dB。

综上所述,外差探测灵敏度明显优于直接探测。若采用更高功率的LO源,在外差探测条件下可进一步提升探测灵敏度。同时,若减小LO源与信号源间的差频,则有望获得更高幅值的外差信号,从而进一步提升成像性能。

©The editorial department of Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition) 2026. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参 考 文 献

[1] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology[J]. Nature Photonics, 2007, 1: 97-105. DOI: 10.1038/nphoton.2007.3.

[2] Siegel P H. Terahertz technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(3): 910-928. DOI: 10.1109/22.989974.

[3] Sizov F. THz radiation sensors[J]. Opto-Electronics Review, 2010, 18(1): 10-36. DOI: 10.2478/s11772-009-0029-4.

[4] Lewis R A. A review of terahertz detectors[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2019, 52(43): 433001. DOI: 10.1088/1361-6463/ab31d5.

[5] Abramovich A, Kopeika N S, Rozban D, et al. Inexpensive detector for terahertz imaging[J]. Applied Optics, 2007, 46 (29): 7207. DOI: 10.1364/ao.46.007207.

[6] Kopeika N S, Galore B, Stempler D, et al. Commercial glow discharge tubes as detectors of X-band radiation [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1975, 23 (10): 843-846. DOI: 10.1109/tmtt.1975.1128697.

[7] Kopeika N S. Glow discharge detection of long wavelength electromagnetic radiation: cascade ionization process internal signal gain and temporal and spectral response properties[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1978, 6(2): 139-157. DOI: 10.1109/tps.1978.4317104.

[8] Kopeika N S, Farhat N H. Video detection of millimeter waves with glow discharge tubes: part I: physical description; part II: experimental results[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1975, 22(8): 534-548. DOI: 10.1109/t-ed.1975.18175.

[9] Joseph H, Kopeika N S, Abramovich A, et al. Heterodyne detection by miniature Neon indicator lamp glow discharge detectors[J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11 (9): 1879-1884. DOI: 10.1109/jsen.2010.2100094.

[10] Aharon Akram A, Rozban D, Kopeika N S, et al. Heterodyne detection at 300 GHz using neon indicator lamp glow discharge detector[J]. Applied Optics, 2013, 52(17): 4077. DOI: 10.1364/ao.52.004077.

[11] Rogalski A, Sizov F. Terahertz detectors and focal plane arrays[J]. Opto-Electronics Review, 2011, 19(3): 346-404. DOI: 10.2478/s11772-011-0033-3.

[12] Biondi M A. Microwave and optical techniques for gas discharge studies[J]. Applied Scientific Research, Section B, 1956, 5 (1): 157-166. DOI: 10.1007/BF02933280.

[13] Udelson B J. Effect of microwave signals incident upon different regions of a DC hydrogen glow discharge[J]. Journal of Applied Physics, 1957, 28 (3): 380-381. DOI: 10.1063/1.1722756.

[14] Severin P J W, van Nie A G. A simple and rugged wide-band gas discharge detector for millimeter waves[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1966, 14 (9): 431-436. DOI: 10.1109/tmtt.1966.1126292.

[15] Joseph H, Kopeika N S, Abramovich A, et al. Low-cost THz heterodyne detection by miniature neon indicator lamp glow discharge detector [C]//Millimetre Wave and Terahertz Sensors and Technology IV. Prague, Czech Republic. SPIE, 2011: 81880P. DOI: 10.1117/12.898035.

[16] Kopeika N S. Detection schemes in a system engineering approach to imaging [M]. Washington: SPIE Optical Engineering Press, 1998: 190-193.

[17] Hou L, Chai C Q, Wang Z Q, et al. Terahertz radiation detection using glow discharge detectors by electrical and optical modes[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2021, 68 (10): 5179-5183. DOI: 10.1109/ted.2021.3108119.

[18] Go D B, Pohlman D A. A mathematical model of the modified Paschen's curve for breakdown in microscale gaps[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 107(10): 103303. DOI: 10.1063/1.3380855.

[19] Chander H, Shanker V, Haranath D, et al. Characterization of ZnS: Cu, Br electroluminescent phosphor prepared by new route[J]. Materials Research Bulletin, 2003, 38(2): 279-288. DOI: 10.1016/s0025-5408(02)01027-9.

[20] DeLange O E. Optical heterodyne detection[J]. IEEE Spectrum, 1968, 5 (10): 77-85. DOI: 10.1109/mspec.1968.5215385.

[21] Jin M, Tang S J, Chen J H, et al. 1/*f*-noise-free optical sensing with an integrated heterodyne interferometer[J]. Nature Communications, 2021, 12: 1973. DOI: 10.1038/s41467-021-22271-4.

(责任编辑:兰丽丽)