光电探测与调制技术专栏

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2024032401

基于谐波测试法的光导探测器阻抗非线性研究

胡　玥[1,2]，杨晓阳[1]，李向阳[1*]

（1. 中国科学院上海技术物理研究所，上海 200083；2. 中国科学院大学，北京 100049）

摘　要： 随着红外技术的发展，红外探测器响应非线性现象及其表征逐渐成为国内外研究的新热点。然而，传统的测试方法无法有效区分线性响应与非线性响应，使得非线性的测试精度受到限制。文章利用谐波信号表征光导探测器的阻抗非线性，通过提取非线性分量排除线性信号的干扰，增加测试的精度。使用该谐波法测试了两个不同材料与结构的探测器，发现所测试的利用液相外延材料制备的探测器由于阻抗非线性产生的谐波信号约是体材料探测器的100倍，这可能是热激发在不同探测器上的效果不一致，导致非线性程度的不同。结合实验和数学分析，证明了该谐波法在光导探测器阻抗非线性测试中的可行性。

关键词： 碲镉汞光导探测器；谐波信号测试法；阻抗非线性测试

中图分类号： TN215　**文章编号：** 1001－5868(2024)05－0681－06

Photoconductive Impedance Nonlinearity Testing Using the Harmonic Method

HU Yue[1,2], YANG Xiaoyang[1], LI Xiangyang[1]

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, CHN;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN)

Abstract: With the development of infrared technology, characterizing the response nonlinearity of infrared detectors has become a key focus for domestic and international research. However, traditional test methods cannot effectively distinguish between linear and nonlinear responses, making the accuracy of nonlinear testing limited. By using harmonic signals to characterize the impedance nonlinearity of photoconductive detectors and extract their nonlinear components, the interference of linear signals can be excluded and the accuracy of the tests can be increased. In this study, two detectors of different materials and structures were tested using the harmonic method. The results show that the harmonic signals due to the impedance nonlinearity of the detector prepared from the liquid-phase epitaxial material are approximately 100 times higher than those of the bulk-material detector. This may be due to the inconsistent effect of thermal excitation on different detectors, resulting in different degrees of nonlinearity. The feasibility of the harmonic method in impedance nonlinearity testing of photoconductive detectors is demonstrated by a combination of experimental and mathematical analyses.

Key words: HgCdTe photoconductive detectors; harmonic signal test method; impedance nonlinearity test

收稿日期：2024－03－24.

基金项目：国家重点研发计划项目(2023YFB3905400).

* **通信作者：**李向阳

0 引言

碲镉汞光导探测器具有良好的响应性能，在气象卫星和其他航天红外遥感等领域有着广泛的应用[1]。碲镉汞光导器件本质上是一个光敏电阻，当红外辐射被碲镉汞吸收后引起光导器件阻值的下降。当器件工作于恒定偏流模式下，电阻变化会导致器件两端的电压改变。通过对这一电压变化的测量可以获得红外辐射的信息，通常来说，这一变化与红外辐射功率应该是线性的。风云三号高光谱大气探测仪载荷在轨数据的反演精度与响应非线性的定量化表征密切相关[2]，故从探测器的响应非线性度研究入手，提高探测器对入射功率的响应线性度变得至关重要。

与光伏型探测器类似，引起光导探测器响应非线性的原因主要是入射光子数的增加和少数载流子寿命的降低[3]。对于探测器的非线性测试，目前辐射计量以低温绝对辐射计为标准，但其工作温度极低，成本巨大，在实验室不易使用[4]。且依据普朗克定律的黑体辐射法，黑体的可调温度范围小。国际上测试探测器非线性度的方法有：交直流双黑体法[5]、对称斩波黑体法[6]、交流单波长双孔径法[7-8]等。这些方法都受到测量精度的限制，而谐波测试法可以不受此限制。任何周期性波形均可分解为一个基频正弦波加上许多谐波频率的正弦波，谐波频率是基频的整倍数。谐波问题常出现在配电网领域，由非线性负荷引起，表现为电压或电流的畸变[9]，通过检测谐波信号的大小可以表征电力系统的质量。在光导探测器的使用过程中，即便在入射辐射较小的情况下，仍会出现响应的非线性现象，这可能是由于阻抗的变化受到了红外辐射以外的影响。基于此现象，本文将谐波测试法引入光导探测器的非线性度研究中，从暗室条件下测试电阻随偏压的变化关系入手，对两种不同材料与结构的碲镉汞探测器所产生的谐波信号进行对比分析。

1 基本原理

对于处于暗室的光导探测器，其偏压与偏流遵循欧姆定律。在探测器工作过程中，不同的结构和工艺会造成器件的传热性能差异，这种差异进而引起热量的积累，从而改变器件的电阻。同时，产生的热量与通过电路的电流大小有关。故对温度比较敏感的探测器的电阻会受外加偏压的影响，表现为电压与电流不遵循欧姆定律，并将这种现象称为阻抗非线性。使用电导 $G(V)$ 来对探测器进行表征，$G(V)$ 是电压 V 的函数。根据电流-电压关系：

$$I(V)=V\cdot G(V) \tag{1}$$

式中，I 是流过探测器的电流，V 是在探测器两端施加的偏压。

对线性电阻器件施加正弦交流信号时，会有正弦电流通过。而阻抗非线性探测器相当于一个非线性负荷，可以观察到由阻抗非线性导致的谐波电流分量。

2 测试方法

2.1 测试系统

未加光照时，光导探测器可以等效为串联电阻 R_d，电导的非线性测试仪器框图如图 1 所示。

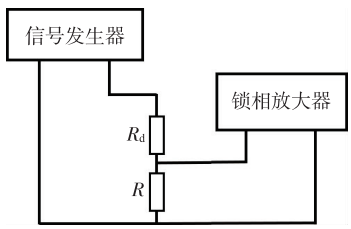


图 1 暗室中的光导探测器阻抗非线性测试系统框图

对待测探测器同时施加交流和直流信号，即：

$$V=V_0+V_m\cdot\sin(wt) \tag{2}$$

式中，V_0 为直流信号，$V_m\cdot\sin(wt)$ 是幅值为 V_m 的交流信号。

将函数 $G(V)$ 在 V_0 附近泰勒展开，此处仅展开至三阶阻抗非线性项 G_3，可以得到 $G(V)$ 的表达式为：

$$G(V)=G_0+G_1(V-V_0)+G_2(V-V_0)^2+G_3(V-V_0)^3 \tag{3}$$

$$G(V)=G_0+G_1\cdot V_m\cdot\sin(wt)+G_2\cdot V_m^2\cdot\sin^2(wt)+G_3\cdot V_m^3\cdot\sin^3(wt)+G_4\cdot V_m^4\cdot\sin^4(wt) \tag{4}$$

电流表达式为：

$$I(V)=V_0G_0+(G_1V_0V_m+G_0V_m)\sin(wt)+(G_2V_0V_m^2+G_1V_m^2)\sin^2(wt)+(G_3V_0V_m^3+G_2V_m^3)\sin^3(wt)+G_3V_m^4\sin^4(wt) \tag{5}$$

使用倍角公式整理后，分别得到在基频和谐波频率下的电流的数学表达式：

直流项：

$$i_0=\left(G_0+\frac{1}{2}G_2V_m^2\right)V_0+\left(\frac{1}{2}G_1V_m^2+\frac{3}{8}G_3V_m^4\right) \tag{6}$$

$f=w$ 项：

$$i_1=\left[\left(G_1V_m+\frac{3}{4}G_3V_m^3\right)V_0+G_0V_m+\frac{3}{4}G_2V_m^3\right]\cdot\sin(wt)-\left(\frac{1}{2}G_2V_m^2\cdot V_0+\frac{1}{2}G_1V_m^2\right)\cos(wt) \tag{7}$$

$f=2w$ 项：

$$i_2=-\left(\frac{1}{2}G_2V_m^2\cdot V_0+\frac{1}{2}G_1V_m^2+\frac{1}{2}G_3V_m^4\right)\cdot\cos(2wt) \tag{8}$$

$f=3w$ 项：

$$i_3=-\left[\left(\frac{1}{4}G_3V_m^3\right)V_0+\frac{1}{4}G_2V_m^3\right]\sin(3wt) \tag{9}$$

$f=4w$ 项：

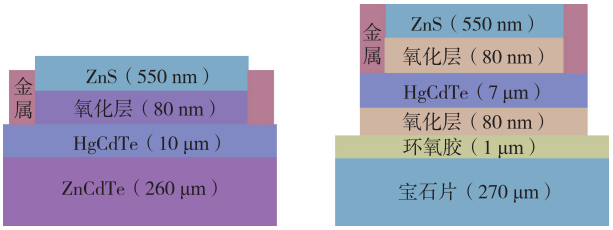
$$i_4=\frac{1}{8}G_3V_m^4\cos(4wt) \tag{10}$$

如果探测器阻抗是非线性的，则会在谐波项上产生与直流信号 V_0、交流信号幅值 V_m 相关的谐波电流信号。

根据上述公式推导，本文采用以下两种方法进行测试：(1)固定 $V_0=0$，改变 V_m，测试谐波电流大小的变化；(2)固定 V_m(不为 0)作为表征信号，变化的 V_0 作为激励信号，测试谐波电流大小的变化。

比较待测光导探测器非线性项——谐波电流的大小可以得到偏压对探测器电阻影响的程度。

文章分别测试了液相外延生长的碲镉汞材料制成的八元探测器(光敏面尺寸：150 μm×150 μm)和体材料碲镉汞探测器(光敏面尺寸：800 μm×800 μm)，两种探测器均安装在杜瓦中进行测试，其结构示意图如图 2 所示。



（a）液相外延生长的碲镉汞材料探测器　　（b）体材料碲镉汞探测器

图 2　两种探测器的结构示意图

测试系统为自动控制，通过 LAN 接口和 GPIB 接口在 PC 端控制信号发生器和锁相放大器，使用 NI 公司的 LABVIEW 编程软件编写控制程序，测试结果可通过波形图显示，并保存为电子表格文件。同时，为避免噪声干扰，对实验系统进行了噪声屏蔽处理，图 3 是测试界面图。

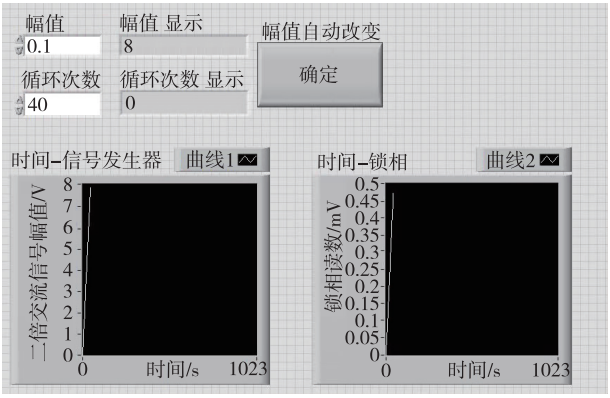


图 3　自动测试程序界面图

2.2　对比实验

为排除系统本身和所加小阻值电阻的阻抗非线性，本文设计了对比实验。将图 1 系统中的探测器换为与电阻 R 同种类型的大功率固定电阻 R_0，其阻值接近待测探测器阻值，对其同样施加幅值变化的交流信号。当施加的幅值为 0～4 V 时，谐波电流均保持在基频电流精度的 0.002%以内，为了保证实验结构的准确性，以下实验结果均为减去系统谐波电流后的修正结果。修正公式为：

$$i_{An}=i_{An0}-\alpha\cdot i_{A1} \tag{11}$$

式中，i_{An} 是在条件 A(例如：$V_0=0$，$V_m=1$ V)下修正后的 n 次谐波电流值，α 是对比实验系统中替代电阻的 n 次谐波电流值与基频电流的比值，i_{An0} 是测得的待测探测器的谐波电流值。

3　实验结果

3.1　直流信号为 0，改变交流信号幅值

为避免交流电频率 50 Hz 的干扰，实验中交流频率和锁相频率皆避开 50 Hz 的整数倍，此处选用 998 Hz 为基频频率。实验首先测试了利用液相外延材料制作的八元光导探测器件，八个像元由于材料和结构相同，所表现出的伏安特性基本类似。

首先，使锁相放大器的锁相频率与输出交流信号的频率一致，即为 998 Hz。如图 4 所示，所测得的 I-V 曲线为明显的近线性关系，并对其进行微分处理，得到微分电导与施加交流信号幅值的关系如图 5。

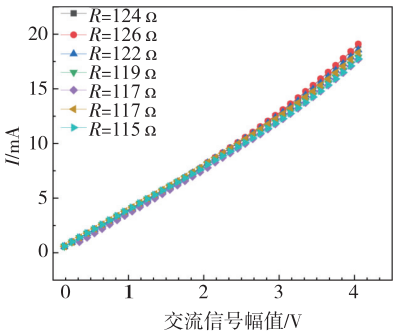


图 4 基频电流大小与交流信号幅值的关系

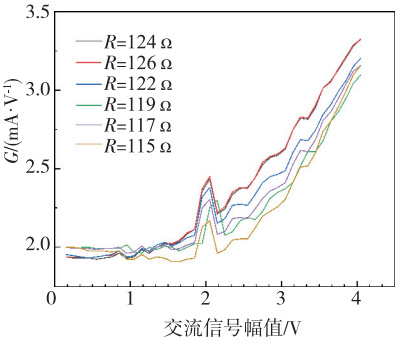


图 5 基频电流的微分电导与施加交流信号幅值的关系

在图 5 中，针对当交流信号幅值为 2 V 时出现的起伏现象，通过将探测器更换为相近阻值且散热性能好的电阻进行验证，发现这是 DG4602 信号发生器自带的缺陷跳跃所导致的。如图 6 所示为替代电阻的微分电导，剔除异常点后的微分电导如图 7 所示。由图可以看出，在 0～2 V 电压下，电导基本不变。但随着偏压的增大，六个器件均呈现电导增大趋势，即电阻减小，且原电阻越大的器件，电阻减小得越多。公式(7)可以解释此现象，当锁相为一倍频时，得到的电流值会受到高阶项电导的影响。导致电导增大的原因可能是：在常温下，碲镉汞作为窄禁带半导体，其阻值易受温度影响，呈负温度效应。外加电压增大后，材料发生热激发效应，所以出现了电阻减小、电导增大的现象。而这种现象对探测器的使用形成了严重的干扰。

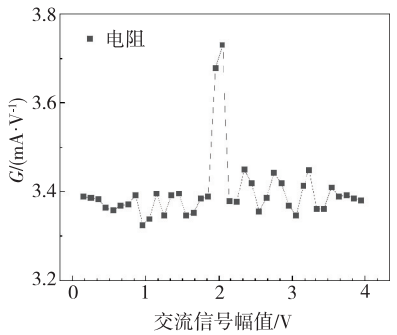


图 6 使用 DG4602 信号发生器加压后替代电阻的微分电导变化情况

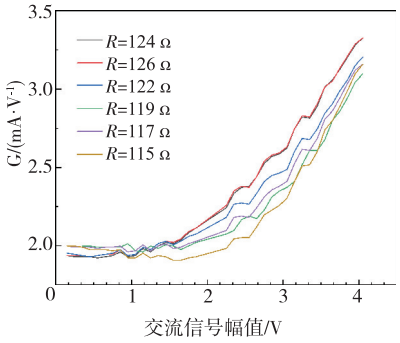
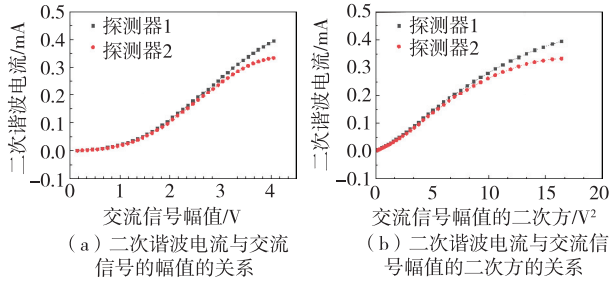


图 7 修正后的微分电导与施加交流信号幅值的关系

随机选取待测八元探测器的其中两个探测器(探测器 1、探测器 2)进行高阶非线性分析，通过测试发现，谐波电流主要出现在二倍频率和三倍频率情况下，此后谐波电流小于二次、三次谐波电流的 1%，因此，实验主要对二次谐波和三次谐波电流进行分析。

图 8 所示为所选取的两个探测器的二次谐波电流与交流信号幅值的变化关系。如图 8(b)所示，探测器 1 和探测器 2 的二次谐波电流与交流信号幅值的二次方基本符合线性关系，符合公式(8)推导的项：$\frac{1}{2}G_1V_m^2$，对其曲线进行线性拟合后的曲线斜率分别为 0.112 28 和 0.100 56，相关系数分别为 0.959 66 和 0.963 63，计算得到一阶非线性项 G_1 分别为 0.224 56 和 0.201 12。该曲线的非线性偏差是由于高阶项 G_3 等引起的。



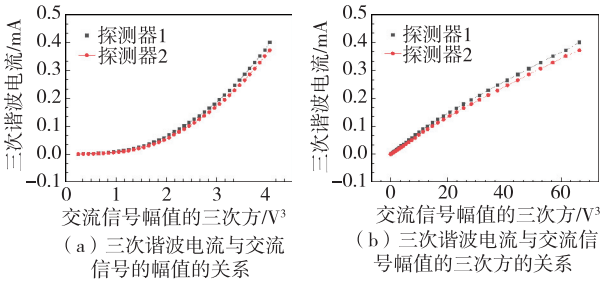
(a) 二次谐波电流与交流信号的幅值的关系　(b) 二次谐波电流与交流信号幅值的二次方的关系

图 8 探测器 1、2 的二次谐波电流与交流信号幅值的变化关系

图 9 是探测器 1、2 的三次谐波电流与交流信号幅值的关系。交流信号幅值的三次方与三次谐波电流的线性关系符合公式(10)中的 $\frac{1}{4}G_2V_m^3$ 项。其线性拟合后的曲线斜率分别为 0.006 15 和 0.005 78，相关系数分别为 0.994 54 和 0.995 99，计算得到二阶非线性项 G_2 分别为 0.024 6 和 0.023 12。

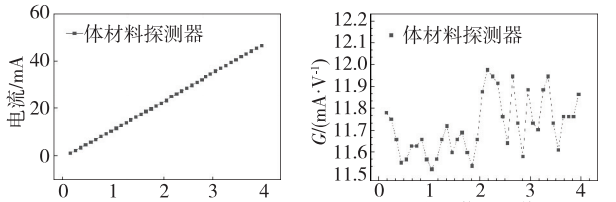
接下来，对实验室制备的体材料碲镉汞光导探

测器进行测试。图 10 为基频电流及其微分电导与交流信号幅值的关系，微分电导的变化相对于液相外延材料探测器来说比较小，图 10(b)中电导波动及交流信号幅值为 2 V 时出现的突变现象是仪器本身造成的，在图 6 中，也出现了类似的现象。



（a）三次谐波电流与交流信号的幅值的关系　（b）三次谐波电流与交流信号幅值的三次方的关系

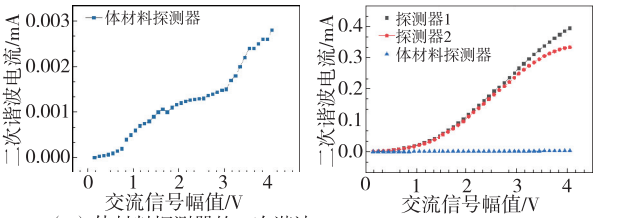
图 9　探测器 1、2 的三次谐波电流与交流信号幅值的关系



（a）基频电流与交流信号幅值的关系　（b）剔除异常点后的微分电导与与交流信号幅值的关系

图 10　体材料生长的探测器基频电流及其微分电导与交流信号幅值的关系

体材料探测器的二次谐波电流与交流信号幅值的关系与液相外延法制备的探测器 1、2 的二次谐波电流对比结果如图 11 所示。由图可见，体材料探测器的谐波电流随交流信号幅值增加而增加，但整体远小于探测器 1、2。该体材料探测器的三次谐波电流也均在 0.001 mA 之内，并且考虑到系统本身的噪声，其电导非线性程度约为探测器 1、2 的 1%。这说明电导对温度变化的敏感性较小，可能是由于探测器结构或者材料本身所引起。



（a）体材料探测器的二次谐波电流与交流信号幅值的关系　（b）体材料探测器与探测器 1、2二次谐波电流的对比

图 11　体材料探测器的二次谐波电流变化关系与探测器 1、2 的二次谐波电流对比

3.2　固定交流信号，改变直流信号

固定交流信号幅值 V_m，改变直流信号 V_0 的方法与第一种方法的原理一致，但由于改变 V_m 相当于改变总信号 $[V_0+V_m\cdot\sin(\omega t)]$ 的一阶量，而改变 V_0 为改变零阶量，所以体现在谐波上的变化会比较小。

图 12 是固定 $V_m=0.5$ V，V_0 在 0～2 V 之间改变得到的探测器 1、2 和体材料探测器的基频电流变化情况，探测器 1、2 基频电流基本一致，并且其幅值对其影响相较于图 4 小很多。由公式(7)可知，基频电流随直流信号的变化主要是受到了电导非线性项的影响，由于体材料探测器的非线性项并不明显，此时电流不随直流信号变化。

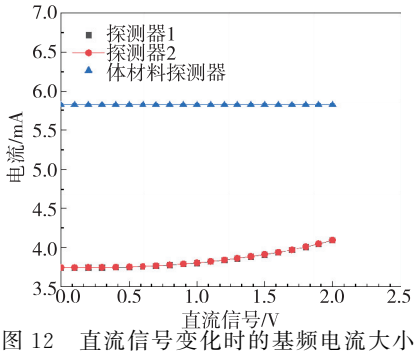
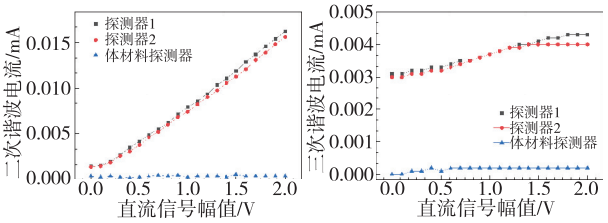


图 12　直流信号变化时的基频电流大小

图 13(a)呈现了探测器 1、2 和体材料探测器的二次谐波电流和直流信号的关系，谐波电流与直流信号的大小呈正线性相关，探测器 1、2 线性拟合后的曲线斜率分别为 0.007 69 和 0.007 38，相关系数分别为 0.995 29 和 0.994 28，其斜率即公式(9)中的 $\frac{1}{2}G_2V_m^2$ 项，计算得到探测器 1、2 的二阶电导 G_2 的数值分别是 0.061 52 和 0.059 04。测得的三次谐波电流在变化范围内有小幅度的上升，并最终分别稳定在 0.004 和 0.004 5 mA 附近，代入求得的二阶电导 G_2，三次谐波电流与公式(9)中的 $\frac{1}{4}G_2V_m^3$ 处于同一数量级，所以可以将三阶电导 G_3 近似认为是 0。计算得到探测器 1、2 的一阶电导 G_1 的数值分别是 0.12 和 0.112，所以使用固定交流信号幅值 V_m，改变直流信号 V_0 的方法求得的探测器 1、2 的电导分别为：$G(V)=G_0+0.112V+0.061\,52V^2$ 和 $G(V)=G_0+0.12V+0.059\,04V^2$。增加了直流信号使结果与方法一有较小误差，但仍可以看出探测器 2 的非线性情况略好于探测器 1。

对于体材料探测器，固定 $V_m=0.5$ V，改变 V_0，考虑到系统本身噪声，测试得到的二次谐波电流和三次谐波电流分别稳定在 0.000 4 和 0.000 2 mA 处，均远小于液相外延法制作的探测器。对以上两

种测试方法的特点进行对比，如表 1 所示。



（a）V_m=0.5 V，直流信号变化时的二次谐波电流　（b）V_m=0.5 V，直流信号变化时的三次谐波电流

图 13　V_m=0.5 V 时探测器 1、2 和体材料探测器的谐波电流和直流信号的关系

表 1　两种谐波法测试光导探测器非线性的对比

方法	特点	应用
方法一：固定 V_0，改变 V_m	V_m 作为一阶信号，信号变化对谐波电流的影响大	1. 测量精度高，适合测量非线性程度相近的探测器；2. 在光响应的测试中，作为经过调制的信号的电学表征
方法二：固定 V_m，改变 V_0	V_0 作为零阶信号，信号变化对谐波电流的影响较小，但与实际探测器使用贴合，可以用来选取最佳偏置电压	1. 测量精度相对较低，可以测试不同种类的探测器；2. 在光响应的测试中，作为未经调制的背景辐照的电学表征

4　总结

本文采用谐波测试法对两种探测器的阻抗非线性特性进行了研究。对器件施加交流信号，将不易观察到的非线性量提取出来，发现两种探测器的阻抗均与施加电压有关，且非线性的程度相差较大。这种差异可能源于探测器的面积不同所导致的对温度敏感性不同，但具体原因需要进一步实验分析。本文结合理论分析，对阻抗非线性明显的探测器 1、探测器 2 的电导进行了表征。在此基础上，可以使用谐波法测试不同结构和工艺的探测器，如改变液相外延层的厚度等，分析非线性产生的机理，以期为探测器结构和制备工艺的优化提供参考。

参考文献：

[1] 乔　辉，王妮丽，贾　嘉，等. 碲镉汞光导器件在风云气象卫星中的应用[J]. 激光与红外，2023，53(10)：1534-1544.
Qiao Hui，Wang Nili，Jia Jia，et al. HgCdTe photoconductive detectors for the Fengyun meteorological satellites[J]. Laser & Infrared，2023，53(10)：1534-1544.

[2] 漆成莉，顾明剑，胡秀清，等. 风云三号卫星红外高光谱探测技术及潜在应用[J]. 气象科技进展，2016，6(1)：88-93.
Qi Chengli，Gu Mingjian，Hu Xiuqing，et al. FY-3 satellite infrared high spectral sounding technique and potential application [J]. Advances in Meteorological Science and Technology，2016，6(1)：88-93.

[3] 查　诚，乔　辉，顾明剑. 光伏探测器响应非线性的机理分析[J]. 半导体光电，2023，44(2)：193-198.
Zha Cheng，Qiao Hui，Gu Mingjian. Mechanism analysis of photovoltaic detector response nonlinearity[J]. Semiconductor Optoelectronics，2023，44(2)：193-198.

[4] Köhler R，Goebel R，Pello R. Experimental procedures for the comparison of cryogenic radiometers at the highest accuracy[J]. Metrologia，1996，33(6)：549.

[5] Martineau R J，Hu K，Manthripragada S，et al. HgCdTe detector technology and performance for the composite infrared spectrometer (CIRS)/Cassini mission[J]. Proc. of SPIE，1996，2803：178-186.

[6] Krueger E E，Lee D，Miller C R，et al. HgCdTe photodiodes with cutoff wavelengths of 17 μm at 70 K for use in high-resolution interferometers for remote sensing[J]. Proc. of SPIE，1997，3122：355-372.

[7] Theocharous E，Ishii J，Fox N P. Absolute linearity measurements on HgCdTe detectors in the infrared region[J]. Appl. Opt.，2004，43(21)：4182-4188.

[8] Theocharous E. Absolute linearity measurements on a PV HgCdTe detector in the infrared[J]. Metrologia，2012，49(2)：S99.

[9] 曹　勖. 电网谐波污染及电力系统的谐波电流检测研究[D]. 北京：华北电力大学，2013.
Cao Xu. Harmonic pollution and power system harmonic ccurrent detection[D]. Beijing：North China Electric Power University，2013.

作者简介：

胡　玥(2000—)，女，安徽省蚌埠市人，硕士研究生，主要从事碲镉汞探测器的响应非线性方面的研究；

李向阳(1969—)，男，博士，研究员，博士生导师，主要从事窄禁带半导体红外光电探测器和宽禁带紫外探测器研究。