

文章编号:1005-4642(2025)06-0053-06

学
生
园
地



热释电红外传感器的性能研究

陈鲁豪[†], 汪炜杰[†], 王宇祥, 张 成

(复旦大学 物理学系, 上海 200433)

摘 要:热释电材料具有优良的电学特性和较高灵敏度的温度响应,因而被广泛应用于红外光探测.为探究热释电红外传感器的性能,采用直流和交流锁相等电学测量技术对热释电红外传感器进行器件性能的表征和研究.通过测量传感器在单次激发下的波形,拟合得到传感器的时间常量.随热源距离增大,传感器获得的信号强度逐渐衰减,其衰减行为可通过热辐射的理论建模来描述.基于锁相放大技术开展了变频交流探测,利用交流电加热电阻,测量了传感器的频率响应特性和交流时间常量.单次信号激发与幅频特性得到的时间常量一致.

关键词:热释电红外传感器;时间常量;红外信号强度;频率响应特性

中图分类号:TN21

文献标识码:A

DOI:10.19655/j.cnki.1005-4642.2025.06.008

热释电效应是指材料的极化强度能响应温度的变化,其宏观表现为随着温度的上升或下降,一些极性介电材料上产生热释电电压或电流.热释电材料具有优良的电学特性,在热能收集、紫外和红外光探测、火灾或入侵警报、热成像以及跟踪和识别^[1]等方面具有应用潜力.目前,大学物理和物理实验教学缺乏热释电原理的相关介绍.热释电红外传感器对温度的变化响应灵敏,可以用于人体运动传感;因基本结构简单,用其开展实验便于学生理解热释电的物理原理.

本文利用热释电红外探测器设计并开展系列实验,研究了传感器的单次激发波形、信号强度随热源距离的变化规律以及传感器的频率响应特性.该实验对仪器要求不高,大多数高校的物理实验教学中心能满足设备需求.同时,实验操作简单,大部分实验数据通过人体部位的运动即可测得.该系列实验直观地展现了热释电效应的性质,同时也为相关的大学物理实验提供参考.

1 实验原理

1.1 热释电效应的基本原理

热释电材料(Pyroelectric material)是利用温

度随时间的波动 $\frac{dT}{dt}$ 将热能转化为电能而输出电压或电流的材料.热释电材料具有自发极化,且极化强度随温度的变化而变化.温度变化时,材料内部的应变使得内部正负电荷中心产生相对位移^[2],材料的极化强度发生变化,在与极化强度方向垂直的表面上产生热释电电荷.由于极化对温度变化的响应速度很快,材料从外部吸引的自由电荷来不及对热释电电荷进行补偿,于是材料在空间中形成电场^[3].当外接电路时,电路中产生热释电电流.

对于均匀的热释电材料(任意时刻材料各处温度 T 相等),其极化强度的热释电系数为 $p = \frac{dP_s}{dT}$.由 $dQ = AdP_s$ 可得热释电电流的表达式为

$$I_p = \frac{dQ}{dt} = Ap \frac{dT}{dt}, \quad (1)$$

其中, A 为材料与极化强度方向垂直表面的面积.

一般地,材料的极化强度随温度升高而减小,即 $\Delta P_s < 0$;随温度降低而增大^[4].如果外接电路,在温度不变、温度上升、温度降低3种情况下的热释电电流示意图如图1所示.图1(a)显示热

收稿日期:2024-07-04;修改日期:2025-01-10

基金项目:上海市教育委员会曙光计划(No. 22SG01)

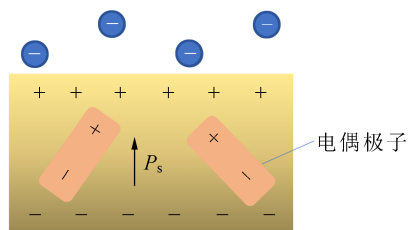
作者简介:陈鲁豪(2002—),男,福建建阳人,复旦大学物理学系2021级本科生. E-mail:21307110151@m.fudan.edu.cn

汪炜杰(2003—),男,湖南岳阳人,复旦大学物理学系2021级本科生. E-mail:21300190014@m.fudan.edu.cn

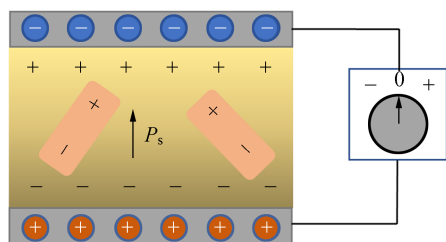
通信作者:张 成(1993—),男,江西上饶人,复旦大学物理学系研究员,博士,从事量子材料研究和物理实验教学. E-mail:zhangcheng@fudan.edu.cn

[†]:共同第一作者,对本文贡献相同.

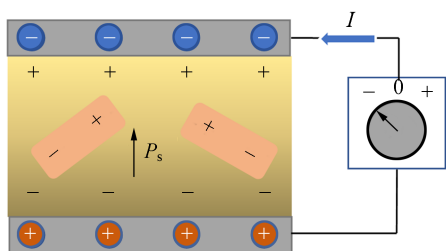
释电材料自发极化在材料与极化强度垂直的表面产生热释电电荷,吸引自由电荷;图 1(b)显示外接测量电路时,自发极化形成的电场在金属板上产生电荷;图 1(c)显示环境温度上升,材料内部应变使极化强度减弱,电路中产生热释电电流;图 1(d)显示环境温度降低,电路中产生相反方向的热释电电流。



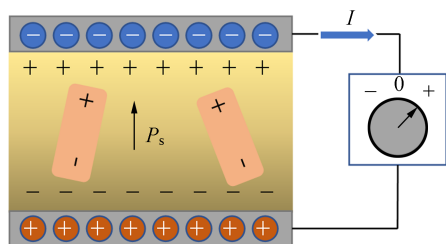
(a) 温度不变, 无外接电路



(b) 温度不变, 有外接电路



(c) 温度上升, 有外接电路



(d) 温度降低, 有外接电路

图 1 热释电效应的原理

1.2 红外热辐射

红外光是指波长介于微波与可见光之间的电磁波,其波长范围为 $760 \sim 1\,000\text{ nm}$ ^[5]。室温下常见物体的热辐射能量主要集中在红外波段。物体热辐射功率满足斯特藩-玻尔兹曼定律:

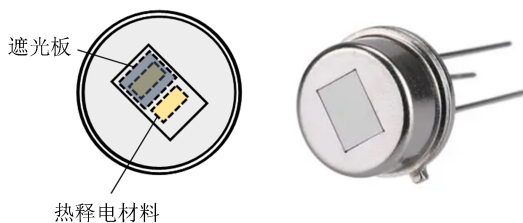
$$P = \epsilon \sigma A T^4, \quad (2)$$

其中, ϵ 为辐射系数, $\epsilon = 0 \sim 1$; σ 为斯特藩-玻尔兹曼常量。

1.3 热释电红外传感器的原理

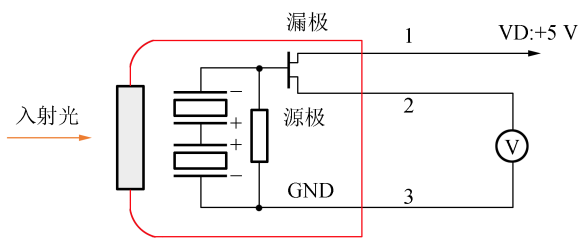
不同材料对不同波段的电磁波的透射率不同,因此采用特定材料作为红外传感器的透光窗口可以实现对红外光的选择性透过。

热释电红外传感器的基本组成单元为透光窗口、2 块热释电材料以及放大电路。图 2(a)为实验采用的热释电红外传感器的俯视图,图 2(b)为实物图,图 2(c)为红外传感器的电路。



(a) 俯视图示意图

(b) 实物图



(c) 电路图

图 2 热释电传感器的结构示意图

2 块热释电材料在电路中按相反的极化方向串联,置于电容中与外电路相连。2 块热释电材料处于相同的温度变化中,由于极化强度等大反向,因此极板感应电荷相互抵消,不会产生净的热释电电流。2 块热释电材料在电路中反向串联的目的是抑制环境扰动对输出电压的影响。例如,底板向材料传递热量,导致 2 块材料温度同时升高,不会产生电流。同理,当红外光均匀地照射在

整个器件上时,2块材料产生的信号也相互抵消.因此要通过遮挡,使红外光只照射在其中1块热释电材料上[见图2(a)],从而获得热释电信号,并有效抑制环境温度扰动.热释电材料产生的原始热释电电压正比于温度变化率.一般热释电材料的热释电系数为 $\text{nC}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$ 量级^[6],原始信号很小.实验室环境下,常见热源可实现的温度变化率约为 0.1 K/s ,产生热释电电压的量级为 0.1 mV .这个量级的小电压难以被直接测量,因此传感器电路中采用了温度稳定性较好的场效应管对信号进行放大^[7].工作时,热释电红外传感器1号引脚接电源,2号引脚接电压表(输出信号),3号引脚接地.

2 传感器的单次激发波形

连接电路,并将电压表的通讯端口与计算机连接.实验过程中,借助LabVIEW程序读取信号强度随时间的变化数据.当传感器的温度恒定时,将电压置零,开始采集数据.此时,将手掌心迅速移动至热释电传感器探头正前方约 3.5 cm 处后保持静止,持续采集数据,直至信号强度稳定后,停止记录并保存文件.将采集到的数据导入作图软件,做单次信号激发的传感器信号波形,即信号强度随时间的变化曲线,如图3(a)所示.信号波形的变化趋势经历稳定、上升、下降、稳定4个阶段.根据式(1)再结合热释电信号的大小,可反推热释电材料的温度变化率 $\frac{dT}{dt}$.

1)初始的稳定阶段:没有红外辐射源,热释电材料的温度变化率 $\frac{dT}{dt}=0$,因此无热释电信号.

2)上升阶段:由于突然将手掌心移动到传感器前,热释电材料瞬间被加热, $\frac{dT}{dt}$ 迅速从0增大,因此信号强度迅速增大至峰值.理论上,如果手掌以足够快的速度移动到传感器前,温度变化率会产生跃变.如果不考虑传感器在升温后的散热,上升阶段的信号也应该呈现“阶跃”.实际上,上升阶段的信号有一定的时间宽度.根据图3(a),定义上升时间为信号 $10\% \sim 90\%$ 变化对应区间,得到上升时间为 0.985 s .导致这一延迟的原因可能为热释电材料内部达到热平衡的弛豫时间以及放大电路造成的响应延迟.

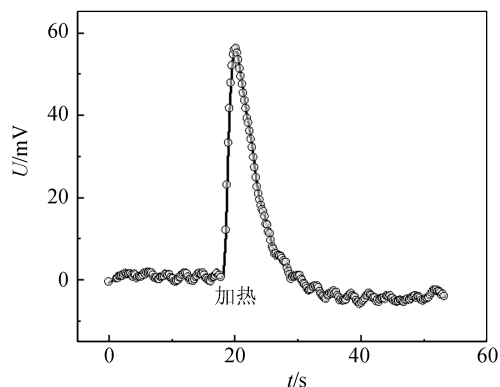
3)下降阶段:热释电材料仍在被加热, $\frac{dT}{dt} > 0$,由于吸热不变,而与环境的温差增大,根据热传导的傅里叶定律,材料向环境的热传导加剧, $\frac{dT}{dt}$ 减小,热释电信号强度逐渐减小.

4)最后的稳定阶段:被辐照的热释电材料的温度已经趋于稳定,即 $\frac{dT}{dt}=0$,并且经过热传导,串联的另一个热释电材料也已经达到相同的温度,二者都只存在自发极化,热释电信号将相互抵消.

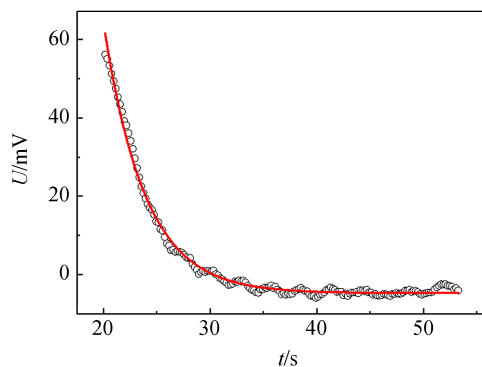
根据对图3(a)曲线下降阶段的分析,可以理论推导得到热释电信号电压 $U(t)$ 的衰减规律满足^[8]

$$U(t) = B + Ce^{-t/\tau_0}, \quad (3)$$

其中 B, C 和 τ_0 为常量, B 为本底信号值, τ_0 为时间常量(主要反映了热释电红外传感器系统的热弛豫时间).用式(3)拟合图3(a)下降阶段的数据,如图3(b)所示,可得 $\tau_0 = (3.85 \pm 0.05) \text{ s}$.



(a) 单次信号激发的传感器信号波形图



(b) 信号波形下降阶段拟合图

图3 单次信号激发的传感器信号波形

3 信号强度和热源距离的关系

选取手掌心作为发热体进行测试,发热体与传感器之间的距离分别为:2,4,6,⋯,18,20 cm.实验时用量尺标定手掌心到传感器的距离,之后快速移动手掌心至传感器前的特定距离并静止,保持手掌面与传感器的工作面平行,记录数据直至信号强度趋于稳定.计算不同距离下的信号强度峰值,并绘制峰值随距离的变化关系曲线.

为探究信号强度随距离衰减的函数关系,需要进行理论建模.如图4所示,将手掌心简化为均匀辐射的二维圆面,圆面上的辐射可以看作是无穷多个小点源辐射的集合,且每个点源的辐射各向同性.发热体圆面的半径为 R ,轴向垂直于传感器表面且正对传感器中心,距离为 x ,传感器面积为 A ,且 $A \ll \pi R^2$.

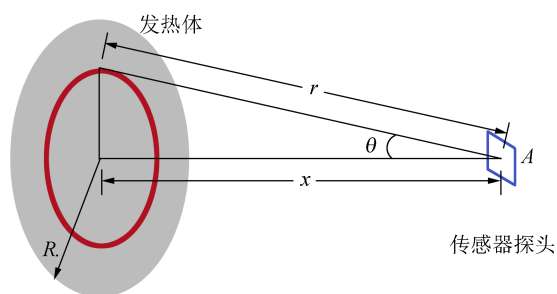


图4 理论建模图示

根据能量守恒可推知点源辐射能流密度 $S \propto \frac{1}{r^2}$,其中 r 为传感器到点源的距离.图4中与圆面同心的红色薄圆环上,每个点源辐射到探测器的功率 $P_i \propto S \cdot A \propto \frac{A \cos \theta}{r^2}$.对整个圆面积分,可得发热体对传感器的辐射功率 P 满足:

$$P \propto 1 - \frac{x}{\sqrt{x^2 + R^2}}.$$

信号强度响应正比于发热体对传感器的辐射功率 P ,根据积分结果,可选用

$$U = a \left(1 - \frac{x}{\sqrt{x^2 + R^2}} \right) \quad (4)$$

拟合信号强度峰值 U .其中, a 和 R 为拟合参量.非线性函数拟合结果如图5所示,拟合结果 $R = (8.9 \pm 0.4)$ cm,相关系数为0.991.由拟合参量算得圆面热源的面积为 248 cm^2 ,和实验者手掌

面积(约 200 cm^2)较为接近,有效证明了理论建模的合理性.热源对热释电电压的影响主要体现在热源距离和面积.

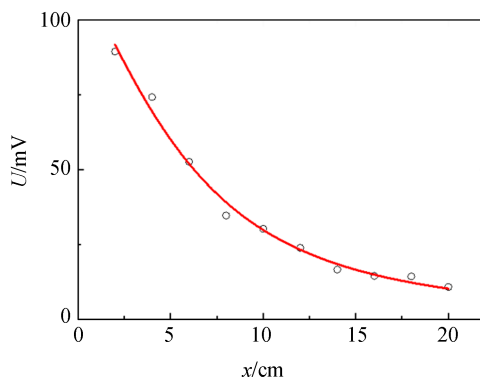


图5 信号强度峰值随距离的变化

4 传感器对交流发热源的频率响应

为探究传感器的交流响应特性,用频率为 ω 的正弦交流电加热纯电阻,实验装置示意图如图6所示.

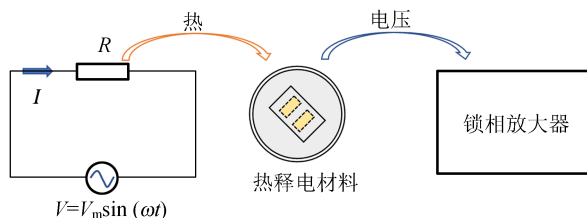


图6 测量热释电传感器的频率响应实验装置示意图

用频率为 ω 的正弦交流电加热电阻,电阻焦耳热功率的频率为 2ω .电流发热产生的红外辐射辐照到热释电传感器,同样产生 2ω 的传感信号.因此,可利用锁相放大器测量频率为 2ω 的信号^[9],获得信号幅值随频率的变化,如表1所示.根据表1,随着交流电频率的升高,信号强度幅值降低.

表1 信号强度幅值随交流电频率的变化

ω/Hz	V/mV	ω/Hz	V/mV
0.011 7	100.020	1.253	0.436
0.051 3	77.469	2.111	0.346
0.121 7	27.556	4.233	0.150
0.252 7	8.113	6.667	0.117
0.543 0	1.634	>100	0.002

注: $\omega > 100 \text{ Hz}$, $V = 0.002 \text{ mV}$ 为噪声.

由于信号特性与探测电路特性卷积的结果,一阶传感器的幅频特性满足^[10]:

$$V = \frac{V_0}{\sqrt{1 + (2\pi f\tau)^2}}, \quad (5)$$

其中, V_0 为零频率下的信号强度的幅值, τ 为时间常量, f 为信号源的频率.

将 V_0 看作拟合常量的原因是: 对于交流电 $I(t) = I_0 \sin(2\pi ft)$, 电阻 R 的瞬时功率为 $P(t) = I^2(t)R$, 在 1 个周期内, 电流的有效加热功率为 $P_{\text{eff}} = \frac{1}{2} I_0^2 R$, 即当固定正弦交流电的幅值 I_0 时, 可在 1 个周期的时间尺度内认为交流电对电阻的加热功率恒定, 不随频率变化, 因此作为热源的定义电阻的辐射功率也恒定, 不随频率变化, 从而可以认为 V_0 是与频率无关的常量, 仅取决于热释电传感器本身的物理特性.

用式(5)对表 1 的数据进行拟合, 拟合结果如图 7 所示. 由图 7 可以得到: $\tau = (3.9 \pm 0.6) \text{ s}$, 和 $\tau_0 = (3.85 \pm 0.05) \text{ s}$ 较为一致, 表明 2 种测试方法合理. 传感器的延迟主要来自 2 方面: 一是热释电材料内部热平衡的弛豫, 二是放大电路对热释电材料极化的响应延迟.

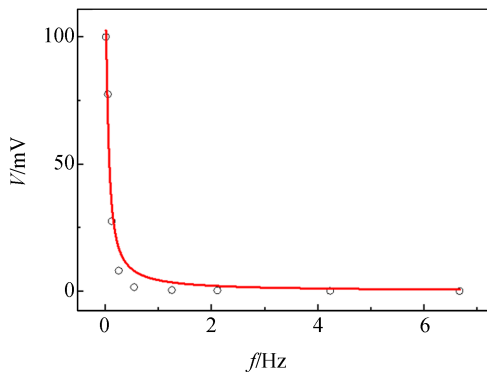


图 7 信号强度峰值随频率变化的非线性拟合

本实验通过人手移动和电阻加热变温 2 种方式, 简单可行, 实现了对热释电传感器响应时间的研究. 实验误差主要包括实验操作人员的体温、手掌形状、手移动速度和每次放置位置等因素不同, 以及环境温度对传感器性能的影响.

5 结 论

1) 对单次信号激发, 热释电传感器的信号响应有延迟, 对应的时间常量 $\tau_0 = (3.85 \pm 0.05) \text{ s}$.

2) 环境条件以及发热体的温度和面积恒定时, 热释电传感器的信号强度随发热体距离的增大而减小, 且传感器的信号强度随距离变小的趋势近似为 $U \sim \left(1 - \frac{x}{\sqrt{x^2 + R^2}}\right)$.

3) 根据热释电传感器的幅频特性, 得到 $\tau = (3.9 \pm 0.6) \text{ s}$, 与 τ_0 较为吻合.

致谢: 感谢复旦大学乐永康教授在论文撰写过程给予的指导!

参考文献:

- [1] 程卫东, 董永贵. 利用热释电红外传感器探测人体运动特征[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(5): 1020-1023.
- [2] 郭少波, 闫世光, 曹菲, 等. 红外探测用无铅铁电陶瓷的热释电特性研究进展[J]. 物理学报, 2020, 69(12): 127708.
- [3] 赵宁, 乔双, 马雯, 等. 热释电材料性能及应用研究进展[J]. 稀有金属, 2022, 46(9): 1225-1234.
- [4] ZHANG D, WU H T, BOWEN C R, et al. Recent advances in pyroelectric materials and applications [J]. Small, 2021, 17(51): 2103960.
- [5] 熊建国, 朱白桦. 被动式(热释电)红外传感实验[J]. 物理实验, 2002, 22(8): 9-11.
- [6] YANG Y, GUO W X, PRADEL K C, et al. Pyroelectric nanogenerators for harvesting thermoelectric energy [J]. Nano Letters, 2012, 12(6): 2833-2838.
- [7] 童诗白, 华成英. 模拟电子技术基础[M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2015: 33.
- [8] FRADEN J. Handbook of modern sensors physics, designs, and applications [M]. Fifth edition. Cham: Springer, 2015: 49-51.
- [9] 王力, 施芸城, 杨忠杰, 等. 基于 LabVIEW 的锁相放大器的设计与测量[J]. 物理实验, 2015, 35(9): 33-36.
- [10] 苑会娟. 传感器原理及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017: 15-16.

Device characterization of pyroelectric infrared sensors

CHEN Luhao[†], WANG Weijie[†], WANG Yuxiang, ZHANG Cheng

(Department of Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: Pyroelectric materials have excellent electrical properties and highly sensitive temperature response, therefore widely used in infrared light detection. A pyroelectric infrared sensor was employed to conduct a series of device performance characterization and research using the DC and AC lock-in technique. The signal waveform of the sensor upon single excitation was measured, and the time constant of the sensor was acquired through curve fitting. As the distance from the heat source increased, the signal intensity of the sensor gradually decreased, and the attenuation behavior agreed well with the theoretical thermal radiation model. Moreover, the frequency conversion AC detection was conducted based on lock-in technique. By heating a resistance by AC, the frequency response of the sensor and AC time constant were explored. The time constant obtained from a single signal excitation was consistent with the amplitude-frequency characteristics.

Key words: pyroelectric infrared sensor; time constant; infrared signal intensity; frequency response characteristics

[编辑:任德香]

(上接 52 页)

First-principles lens simulation and its teaching application

JIA Xiaowen, FAN Haiying, YIN Lin

(Fundamentals Department, Army Military Transportation University, Tianjin 300161, China)

Abstract: The measurement of lens focal length, the assembly of microscopes and telescopes, spectrometers, grating diffraction, prism diffraction, the determination of Young's modulus by the optical lever method, the Millikan oil drop experiment, Newton's rings and other experiments all involved the use of lenses. Most of the lenses used in teaching were regarded as ideal lenses, but real lenses had such problems as a certain thickness, aberrations, the non-coincidence between principal points and principal planes, and the light rays' deviation from the paraxial condition. All above led to deviations between the measurement results and the ideal results. Simulation technology could be used to visually demonstrate the influence of these factors on lens imaging. The specific algorithm based on first-principle lens imaging simulation was presented. The thin lens imaging was simulated, as well the influence of the base point and base surface parameters were calculated by numerical simulation algorithm. The performance and application of Fermat's principle in lens imaging were verified. The influence of aberration and off-axis light were also studied. The problems and precautions encountered in the measurement of lens focal length were discussed in combination with the simulation results.

Key words: lens; aberration; First-principles

[编辑:郭 伟]