

文章编号: 1672-8785(2021)04-0001-08

单通道与补偿型 PIMNT 热释电红外探测器的性能比较

朱荣峰^{1,2} 赵 静^{1,2} 张梦圆^{1,3} 冯培贵^{1,4}
陈建伟^{1*} 焦 杰¹ 罗豪甦^{1,2*}

- (1. 中国科学院上海硅酸盐研究所, 上海 201800;
2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 上海师范大学, 上海 200234;
4. 南昌大学, 江西 南昌 330031)

摘 要: 建立和完善了电流模式 $\text{Pb}(\text{In}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3\text{-Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ (PIMNT) 热释电红外探测器的理论模型(单通道和并联补偿型)以及微音噪声模型。利用理论模型进行了仿真模拟, 然后设计和制备了一种单通道和两种补偿型(灵敏元分隔型和一体型)PIMNT 热释电红外探测器。测试并比较了这三种探测器的响应率 R_V 、噪声 u_n 、比探测率 D^* 以及微音噪声 u_{vib} 。结果表明, 与单通道 PIMNT 红外探测器相比, 补偿型红外探测器的探测能力虽然略有下降, 但抗干扰能力却得到了极大提高。

关键词: PIMNT 热释电红外探测器; 抗干扰能力; 单通道; 补偿型; 微音效应

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2021.04.001

Performance Comparison of Single-Channel and Compensated PIMNT Pyroelectric Infrared Detectors

ZHU Rong-feng^{1,2}, ZHAO Jing^{1,2}, ZHANG Meng-yuan^{1,3}, FENG Pei-gui^{1,4},
CHEN Jian-wei^{1*}, JIAO Jie¹, LUO Hao-su^{1,2*}

- (1. Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China;
4. Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: The theoretical model (single-channel and parallel compensation type) and the microphonic noise model of the $\text{Pb}(\text{In}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3\text{-Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ (PIMNT) pyroelectric infrared detectors with current mode are established and improved. The theoretical model is used for simulation, and a single-channel and two

收稿日期: 2020-12-18

基金项目: 上海市青年科技英才扬帆计划项目(20YF1455700); 国家自然科学基金项目(61634007)

作者简介: 朱荣峰(1993-), 男, 江苏泰州人, 博士研究生, 主要从事压电材料、热释电红外材料和红外探测器方面的研究。

*通讯作者: E-mail: chenjw@mail.sic.ac.cn(陈建伟); hsluo@mail.sic.ac.cn(罗豪甦)

compensated (sensitive element separated and integrated) PIMNT pyroelectric infrared detectors are designed and prepared. The responsivity (R_V), noise (u_n), specific detectivity (D^*) and microphonic noise (u_{vib}) of these three detectors are tested and compared. The results show that, compared with the single-channel PIMNT infrared detectors, the detection ability of the compensated infrared detectors is slightly reduced, but the anti-jamming ability has been greatly improved.

Key words: PIMNT pyroelectric infrared detector; anti-jamming ability; single-channel; compensated; microphonic effect

0 引言

随着人类文明的不断进步和科学技术的迅猛发展, 红外探测技术越来越受到人们的重视, 各式各样的红外探测器在军事、工业、医疗、安防、农业等领域都已得到广泛应用^[1-5]。与其他红外探测器相比, 热释电红外探测器具有响应速度快、光谱响应范围宽、无需偏置电压及制冷装置、结构紧凑、成本低等特点, 是当前非制冷红外探测技术研究和应用的重点之一^[6-8]。

弛豫铁电单晶 $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3-PbTiO_3$ (PMN-PT或PMNT)、 $Pb(In_{1/2}Nb_{1/2})O_3-Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3-PbTiO_3$ (PIN-PMN-PT或PIMNT) 具有优异的热释电性能和极低的介电损耗, 有望成为新一代热释电材料^[9-12]。与 PMNT 相比, PIMNT 虽然热释电系数略低, 但有着相对更高的相变温度和居里温度 (三方相 PIMNT 的相变温度比三方相 PMNT 高 30 °C 左右), 因此在实际应用中具有更高的热稳定性和温度使用范围^[13-15]。

在热释电红外探测器的性能指标中, 除了响应率 R_V 、噪声 u_n 和比探测率 D^* 是需要关注的重点之外, 抗干扰能力也是不可或缺的^[16-18]。该探测器所用元件的性能会随温度变化, 导致探测器在外界环境的变化下产生信号及噪声偏移。稳态的温度变化可以通过温度系数来弥补, 但瞬态的温度变化尤其是温度的骤升骤降会导致探测器输出信号的波动或不稳定^[19-20]。另外, 热释电灵敏元本身也是压电材料。在外界振动的情况下, 它会对信号产生干扰。因此, 为了提高 PIMNT

热释电红外探测器在实际环境中使用的稳定性, 设计并制备补偿型探测器具有十分重要的意义^[21-22]。

本文根据单通道和补偿型 PIMNT 热释电红外探测器的理论模型, 通过仿真模拟对比了这两种探测器的噪声 u_n 和比探测率 D^* 。然后设计与制备了一种单通道和两种补偿型 (灵敏元分隔型和灵敏元一体型) PIMNT 热释电红外探测器, 并比较了以上三种探测器的响应率 R_V 、噪声 u_n 、比探测率 D^* 以及微音噪声 u_{vib} 。

1 单通道与补偿型 PIMNT 红外探测器

1.1 PIMNT 红外探测器的仿真模拟

图 1 为单通道与并联补偿型 PIMNT 热释电红外探测器的电流模式电路图。补偿型热释电探测器可分为串联补偿型和并联补偿型两种。相比于串联补偿型, 并联补偿型探测器的电连接方式更方便。因此, 我们选择图 1(b) 所示的并联补偿。与单通道探测器相比, 补偿型红外探测器多了一个与灵敏元极性相反且不接收红外辐射的补偿元。当外界发生瞬态的温度变化或振动时, 补偿元会产生与灵敏元极性相反的电荷, 相互抵消后能提高探测器对外界的抗干扰能力。

图 2 为单通道与并联补偿型 PIMNT 热释电红外探测器的等效电路对比图。可以看出, 由于电流模式的信号是通过运算放大器放大的, 而且补偿元的红外辐射会被屏蔽掉, 因此与单通道探测器相比, 补偿型探测器的信号响应率 R_V 不变, 仍为

$$R_V = \frac{A_s p w \alpha}{G_T} \frac{R_f}{\sqrt{1 + (\omega\tau_T)^2} \sqrt{1 + (\omega\tau_E)^2}} \quad (1)$$

但补偿元的等效电容和等效电阻也会对电路产生影响, 因此探测器的总噪声 u_n 会发生改变, 进而导致比探测率 D^* 的变化。表 1 列出了单通道与补偿型 PIMNT 热释电红外探测器的不同噪声源的变化数据。其中,

$$Z_i = \frac{R_f}{\sqrt{1 + (\omega\tau_E)^2}} \quad (2)$$

$$Z_0 = \frac{R_0}{\sqrt{1 + (\omega R_0 C_e)^2}} \quad (3)$$

$$Z'_0 = \frac{R'_0}{\sqrt{1 + (2\omega R'_0 C_e)^2}} \quad (4)$$

$$R_0 = R_e // \frac{1}{\omega C_e \tan\delta} \quad (5)$$

$$R'_0 = \frac{R_c}{2} // \frac{1}{2\omega C_c \tan\delta} = \frac{R_0}{2} \quad (6)$$

因此, $Z'_0 = Z_0/2$ 。与单通道探测器相比, 补偿型探测器的温度噪声和运算放大器的电流噪声

不会发生改变, 但介电损耗噪声、电阻热噪声以及运算放大器的电压噪声由于补偿元的等效电容和等效电阻的加入而发生改变, 从而导致比探测率 D^* 的变化。比探测率 D^* 的公式如下:

$$D^* = \frac{\sqrt{A_s \Delta f} R_V}{u_n} \quad (7)$$

根据以上公式以及表 2 列出的模拟所用参数, 我们利用 Matlab 软件对单通道与补偿型 PIMNT 热释电探测器的噪声和比探测率随频率的变化进行了仿真模拟(结果见图 3)。从图 3 中可以看出, 补偿型 PIMNT 探测器的总噪声 u_n 在低频时基本没有多大影响, 中频时逐渐变大, 高频时越来越大; 比探测率 D^* 的变化情况正好相反。10 Hz 时, 噪声 u_n 增加了 $10 \mu\text{V} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$, 比探测率降低了 $0.24 \times 10^9 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 。

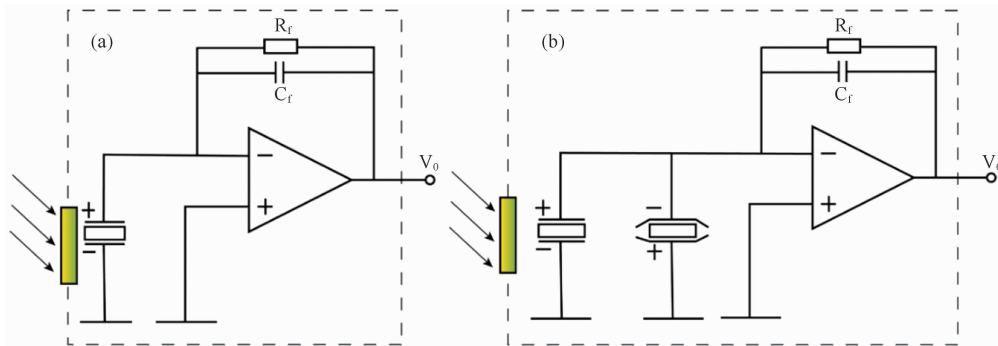


图 1 PIMNT 热释电红外探测器的电流模式电路图: (a)单通道; (b)并联补偿型

表 1 PIMNT 热释电红外探测器的噪声来源

噪声源	单通道	补偿型
温度噪声	$u_{nT} = \frac{R_V}{\alpha} \sqrt{4kT^2 G_T}$	$u'_{nT} = \frac{R_V}{\alpha} \sqrt{4kT^2 G_T} = u_{nT}$
介电损耗噪声	$u_{nD} = \sqrt{4kT\omega C_e \tan\delta} \frac{R_f}{\sqrt{1 + (\omega\tau_E)^2}}$	$u'_{nD} = \sqrt{8kT\omega C_e \tan\delta} \frac{R_f}{\sqrt{1 + (\omega\tau_E)^2}} = \sqrt{2} u_{nD}$
电阻热噪声	$u_{nR'} = \sqrt{u_{nR}^2 + u_{nf}^2}$ $= \sqrt{\frac{4kT}{R_e} + \frac{4kT}{R_f}} \frac{R_f}{\sqrt{1 + (\omega\tau_E)^2}}$	$u'_{nR'} = \sqrt{u_{nR}^2 + u_{nf}^2}$ $= \sqrt{\frac{8kT}{R_e} + \frac{4kT}{R_f}} \frac{R_f}{\sqrt{1 + (\omega\tau_E)^2}}$
运算放大器的电流噪声	$u_{ni} = i_{nA} \frac{R_f}{\sqrt{1 + (\omega\tau_E)^2}}$	$u'_{ni} = i_{nA} \frac{R_f}{\sqrt{1 + (\omega\tau_E)^2}} = u_{ni}$
运算放大器的电压噪声	$u_m = A_n u_{nA} = (1 + \frac{Z_f}{Z_0}) u_{nA}$	$u'_m = A'_n u_{nA} = (1 + \frac{Z'_f}{Z'_0}) u_{nA}$
总噪声	$u_n = \sqrt{u_{nT}^2 + u_{nD}^2 + u_{nR'}^2 + u_{ni}^2 + u_m^2}$	$u'_n = \sqrt{u_{nT}^2 + u_{nD}^2 + u_{nR'}^2 + u_{ni}^2 + u_m^2}$

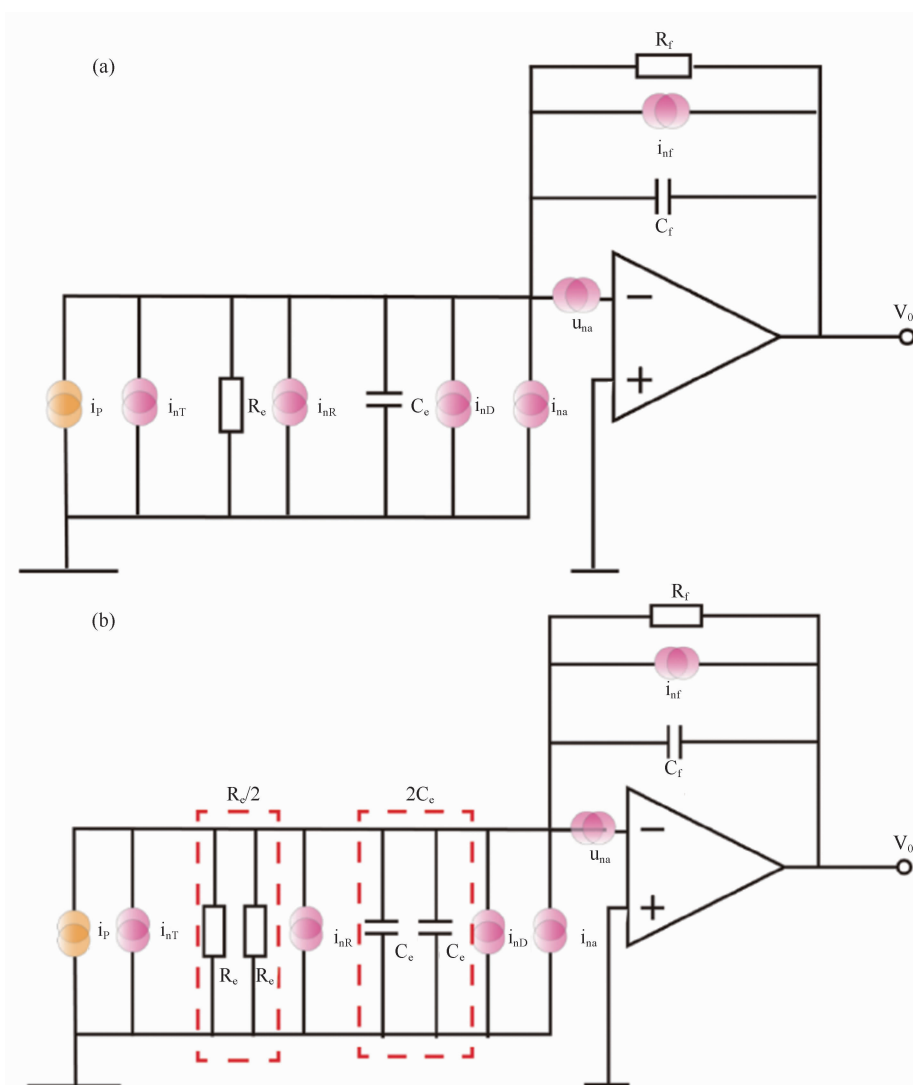


图 2 PIMNT 热释电红外探测器的放大电路的等效电路图：(a)单通道；(b)并联补偿型

表 2 PIMNT 热释电红外探测器仿真模拟所用参数

物理量名称	符号	数值及单位
灵敏元面积	A_s	$1.6 \times 1.6 \text{ mm}^2$
灵敏元厚度	d	$20 \text{ } \mu\text{m}$
吸收率	α	0.99
热释电系数	p	$10 \times 10^{-4} \text{ C}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
介电常数	ϵ_r	660
介电损耗	$\tan\delta$	0.002
比热容	C_V	$2.5 \times 10^6 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
热导率	κ	$1.1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
反馈电阻	R_f	$20 \text{ G}\Omega$
反馈电容	C_f	0.2 pF
放大器电流噪声(1 kHz)	i_{na0}	$0.8 \text{ fA} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$
放大器电压噪声(1 kHz)	u_{na0}	$5.1 \text{ nV} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$

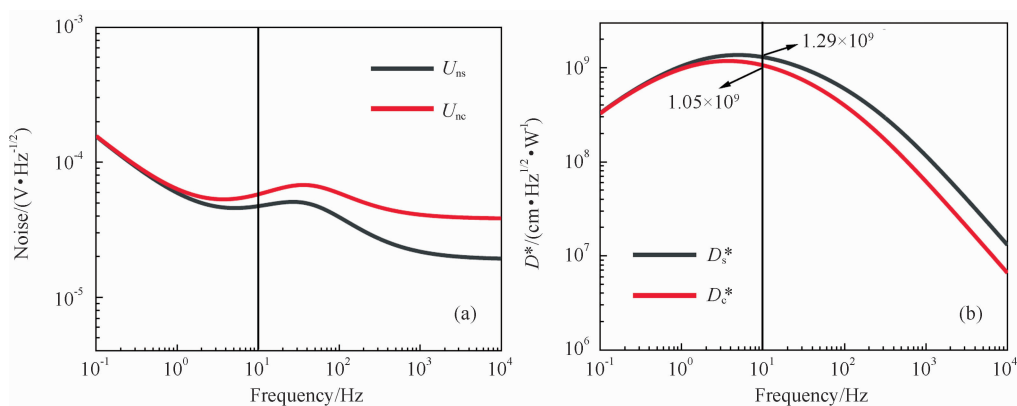


图 3 单通道与补偿型 PIMNT 热释电红外探测器的噪声 u_n (a) 和比探测率 D^* (b) 随频率的变化(模拟)

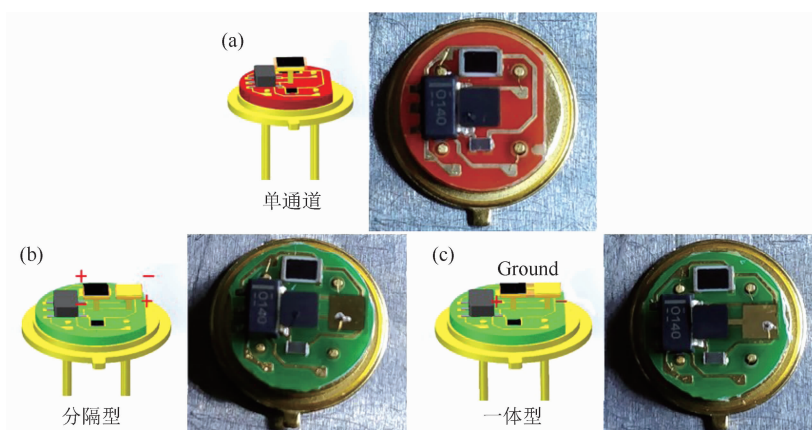


图 4 单通道(a)、分隔型补偿(b)和一体型补偿(c)的 PIMNT 热释电红外探测器

1.2 三种 PIMNT 红外探测器的性能比较

根据理论模型, 我们设计并制备了两种 PIMNT 补偿型探测器——灵敏元分隔型和灵敏元一体型。图 4 为单通道与两种补偿型探头的示意图。图 5 所示为三种 PIMNT 热释电红外探测器的实测信号与噪声。表 3 列出了算得的 10 Hz 时的响应率 R_V 和比探测率 D^* 。与模拟数据相比, 实际制备的探测器的比探测率在数量级上相当。补偿型红外探测器的比探测率也比单通道探测器略低, 而一体型比分隔型的更低一些, 分别为 $1.19 \times 10^9 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 和 $1.56 \times 10^9 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 。这可能跟一体型的灵敏元与补偿元之间发生热传导有关, 也可能与电阻和电容的偏差有关。

2 PIMNT 红外探测器的微音噪声

2.1 PIMNT 红外探测器微音噪声的理论模型

振动对热释电红外探测器产生干扰的原因

是, 热释电灵敏元本身也是压电材料, 夹持状态下的灵敏元在外部振动作用下会产生应力, 从而输出微音噪声。纵向和横向的振动分别会由于 33 模式和 31 模式而产生微音噪声, 其理论模型如图 6 所示。

在给一端固定的灵敏元施加一个加速度 \bar{a} 时(见图 6), 它会受到一个拉力 F :

$$F = ma = \rho b^2 h \bar{a} \quad (8)$$

假设加速度以正弦形式变化, 即

$$\bar{a} = a_0 e^{i\omega t} \quad (9)$$

则当加速度分别与灵敏元表面垂直或平行时, 压电响应在纵向振动和横向振动下所产生的电流分别为

$$\begin{aligned} i_{\text{vib,L}} &= \frac{dQ}{dt} = \frac{d(A_s D)}{dt} = \frac{d(A_s d_{33} \bar{X})}{dt} \\ &= \frac{b^2 d_{33}}{2b^2} \frac{dF}{dt} = \frac{1}{2} \omega d_{33} \rho b^2 h \bar{a} \end{aligned} \quad (10)$$

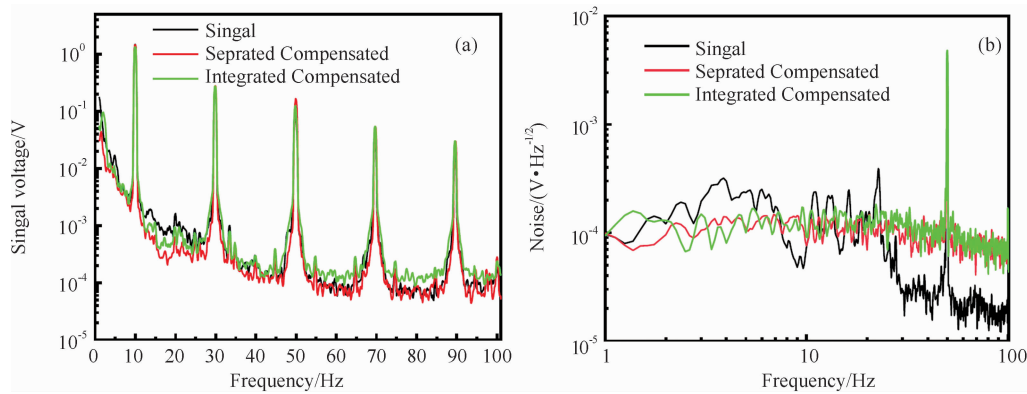


图5 三种 PIMNT 热释电红外探测器的信号(a)和噪声(b)随频率的变化(实测)

表3 三种 PIMNT 热释电红外探测器的性能比较

性能	单通道	补偿型	
		分隔型	一体型
信号 @10 Hz (mV)	1474.0	1453.3	1321.8
噪声 @10 Hz ($\mu\text{V}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$)	73.6	76.0	82.1
响应率 V/W	6.01×10^5	5.93×10^5	5.39×10^5
比探测率 $\text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{W}^{-1}$	1.63×10^9	1.56×10^9	1.19×10^9

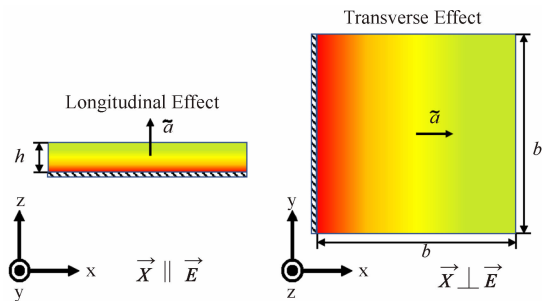


图6 纵向和横向微音噪声的理论模型

$$\begin{aligned}
 i_{\text{vib}_T} &= \frac{dQ}{dt} = \frac{d(A_s D)}{dt} = \frac{d(A_s d_{31} \vec{X})}{dt} \\
 &= \frac{b^2 d_{31}}{2bh} \frac{dF}{dt} = \frac{1}{2} \omega d_{31} \rho b^3 \vec{a} \quad (11)
 \end{aligned}$$

由于灵敏元的固定端应力最大，另一边的自由端应力为零，因此计算平均应力时取最大应力的一半。图7为纵向和横向微音噪声的放大电路等效电路图。

与响应率放大电路的计算类似，纵向和横向微音噪声的最终推导公式分别为

$$\begin{aligned}
 u_{\text{vib}_L} &= i_{\text{vib}_L} \frac{R_f}{\sqrt{1 + (\omega R_f C_f)^2}} \\
 &= \frac{d_{33} \rho b^2 h \vec{a}}{2} \frac{\omega R_f}{\sqrt{1 + (\omega R_f C_f)^2}} \quad (12)
 \end{aligned}$$

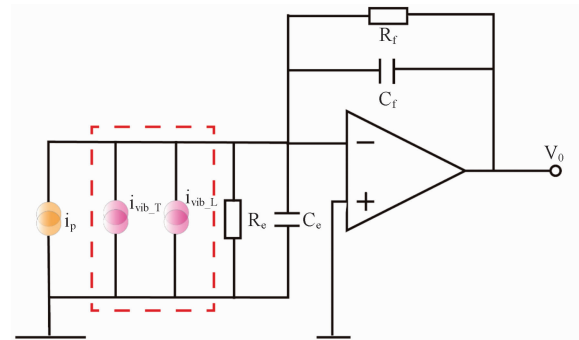


图7 纵向和横向微音噪声的放大电路等效电路图

$$\begin{aligned}
 u_{\text{vib}_T} &= i_{\text{vib}_T} \frac{R_f}{\sqrt{1 + (\omega R_f C_f)^2}} \\
 &= \frac{d_{31} \rho b^3 \vec{a}}{2} \frac{\omega R_f}{\sqrt{1 + (\omega R_f C_f)^2}} \quad (13)
 \end{aligned}$$

根据以上公式以及表4列出的模拟所用参数，我们利用 Matlab 软件对 PIMNT 热释电红外探测器的纵向微音噪声随频率的变化进行了仿真模拟(结果见图8)。从图8中可以看出，低频时，纵向微音噪声随着频率的增大而增大，达到一定的值后趋于不变。这是因为当 $\omega R_f C_f \gg 1$ 时，可将微音噪声作进一步简化：

$$u_{\text{vib}_L} \approx \frac{1}{2} d_{33} \rho b^2 h \vec{a} \frac{1}{C_f} \quad (14)$$

$$u_{\text{vib}_T} \approx \frac{1}{2} d_{31} \rho b^3 a \frac{1}{C_f} \quad (15)$$

此时微音噪声与频率的变化无关。图 8 中, 10 Hz 时 PIMNT 热释电红外探测器的纵向微音噪声为 0.36 mV。但实际情况下的纵向微音噪声要更高些。这是由于为了降低灵敏元热传导所造成的热损失, 我们通过悬空的支撑柱结构来制备热释电红外探测器, 因此并没有达到一端固定的状态。

表 4 PIMNT 热释电红外探测器微音噪声模拟所用参数

热释电材料	符号	[111]-oriented Mn-PIMNT (15/55/30)
灵敏元边长	b	2 mm
灵敏元厚度	h	20 μm
密度	ρ	8.3 g/cm ³
压电常数	d_{33}	90 pC/N
加速度	a	9.81 m/s ²
反馈电阻	R_f	20 G Ω
反馈电容	C_f	0.2 pF

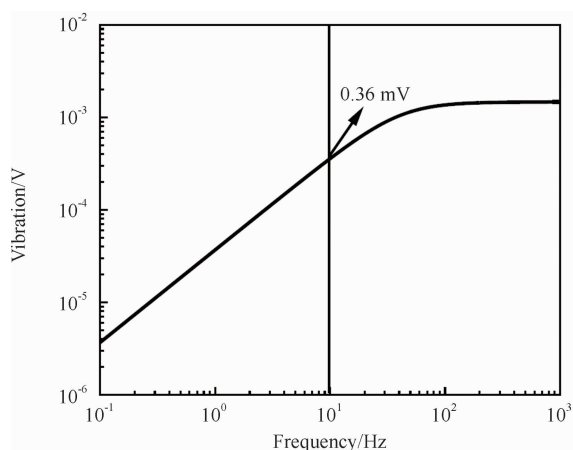


图 8 PIMNT 热释电红外探测器的纵向微音噪声随频率的变化(模拟)

2.2 三种 PIMNT 红外探测器的微音噪声对比

为了对热释电红外探测器的微音噪声进行量化测试, 我们利用振动台、加速度计和信号

放大器等仪器搭建了一套测试系统, 并用其测试了 10 Hz 时三种探测器在 1g 加速度 (9.81 m/s²) 下的微音噪声 (结果见表 5)。从表 5 中可以看出, 与单通道 PIMNT 热释电红外探测器相比, 补偿型探测器在 10 Hz 处的纵向微音噪声和横向微音噪声都得到了极大的降低, 即从 4~5 mV 降到了 1~2 mV。而相比于分隔型补偿探测器, 一体型补偿探测器的抗振动干扰能力更强, 尤其是其纵向微音噪声仅为 0.31 mV。

3 总结

本文根据单通道和并联补偿型电流模式 PIMNT 热释电红外探测器的理论模型, 利用 Matlab 软件仿真模拟了两种探测器的噪声 u_n 和比探测率 D^* 随频率的变化。在单通道 PIMNT 热释电红外探测器的基础上, 设计并制备了灵敏元分隔型和灵敏元一体型这两种补偿型 PIMNT 红外探测器, 然后比较了以上三种探测器的响应率 R_V 、噪声 u_n 和比探测率 D^* 。另外还建立并完善了 PIMNT 红外探测器的微音噪声模型, 最后对比了这三种探测器的抗干扰能力。具体结论如下:

(1) 与单通道 PIMNT 热释电红外探测器相比, 补偿型探测器的响应率 R_V 不变, 噪声 u_n 由于补偿元的等效电容和等效电阻的加入而增大, 从而导致比探测率略有下降。

(2) 与单通道 PIMNT 热释电红外探测器相比, 实际制备的补偿型探测器的比探测率也略低, 但都能达到 10⁹ 量级。其中一体型比分隔型的更低一些, 分别为 $1.19 \times 10^9 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 和 $1.56 \times 10^9 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 。这可能跟一体型的灵敏元与补偿元之间发生热传导有关, 也可能与电阻和电容的偏差有关。

(3) 与单通道 PIMNT 热释电红外探测器相比, 补偿型探测器在 10 Hz 处的微音噪声

表 5 PIMNT 热释电红外探测器的微音噪声

微音噪声		单通道	补偿型	
			分隔型	一体型
纵向	@10 Hz (mV)	4.06	1.21	0.31
横向	@10 Hz (mV)	5.46	2.21	1.60

从 4~5 mV 降低到了 1~2 mV。而一体型补偿 PIMNT 热释电红外探测器的抗振动干扰能力更优于分隔型补偿探测器, 尤其是其纵向微音噪声可以降到 0.31 mV。

参考文献

- [1] Rogalski A. Infrared Detectors: Status and Trends [J]. *Prog Quantum Electron*, 2003, **27**(2): 59–210.
- [2] Rogalski A. Infrared Detectors: An Overview [J]. *Infrared Phys Technol*, 2002, **43**(3): 187–210.
- [3] 刘普霖, 褚君浩. 现代红外物理和技术的发展 [J]. *科学*, 1996, **48**(6): 27–30.
- [4] Rogalski A. History of Infrared Detectors [J]. *Opto-Electron Rev*, 2012, **20**(3): 279–308.
- [5] 王吉有. 红外物理和红外技术 [J]. *现代物理知识*, 1996, **8**(S1): 152–154.
- [6] 董显林, 毛朝梁, 姚春华, 等. 非制冷红外探测器用热释电陶瓷材料研究进展 [J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(1): 37–41.
- [7] Aggarwal M D, Batra A K, Guggilla P, et al. Pyroelectric Materials for Uncooled Infrared Detectors: Processing, Properties, and Applications [M]. Huntsville: Marshall Space Flight Center, 2010.
- [8] Rogalski A. Material Considerations for Third Generation Infrared Photon Detectors [J]. *Infrared Phys Technol*, 2007, **50**(2): 240–252.
- [9] 李龙, 许晴, 赵祥永, 等. 新型热释电材料性能及其在红外探测器中的应用 [J]. *硅酸盐学报*, 2014, **42**(4): 423–431.
- [10] Tang Y, Zhao X, Wan X, et al. Composition, DC Bias and Temperature Dependence of Pyroelectric Properties of $\langle 111 \rangle$ -oriented $(1-x)\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-x\text{PbTiO}_3$ [J]. *Mater Sci Eng B*, 2005, **119**(1): 71–74.
- [11] Liu L, Li X, Wu X, et al. Dielectric, Ferroelectric, and Pyroelectric Characterization of Mn-doped $0.74\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-0.26\text{PbTiO}_3$ Crystals for Infrared Detection Applications [J]. *Appl Phys Lett*, 2009, **95**(19): 192903.
- [12] Tang Y, Luo H. Investigation of the Electrical Properties of $(1-x)\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-x\text{PbTiO}_3$ Single Crystals with Special Reference to Pyroelectric Detection [J]. *J Phys Appl Phys*, 2009, **42**(7): 075406.
- [13] Liu L, Wu X, Wang S, et al. Growth and Pyroelectric Properties of Rhombohedral $0.21\text{Pb}(\text{In}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3-0.49\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-0.3\text{PbTiO}_3$ Ternary Single Crystals [J]. *J Cryst Growth*, 2011, **318**(1): 856–859.
- [14] Yu P, Wang F, Zhou D, et al. Growth and Pyroelectric Properties of High Curie Temperature Relaxor-based Ferroelectric $\text{Pb}(\text{In}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3-\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-\text{PbTiO}_3$ Ternary Single Crystal [J]. *Appl Phys Lett*, 2008, **92**(25): 252907.
- [15] Yang L, Li L, Zhao X, et al. Enhanced Pyroelectric Properties and Application of Tetragonal Mn-doped $0.29\text{Pb}(\text{In}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3-0.31\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-0.40\text{PbTiO}_3$ Ternary Single Crystals [J]. *J Alloys Comp*, 2017, **695**: 760–764.
- [16] Li L, Zhao X, Li X, et al. Scale Effects of Low-dimensional Relaxor Ferroelectric Single Crystals and Their Application in Novel Pyroelectric Infrared Detectors [J]. *Adv Mater*, 2014, **26**(16): 2580–2585.
- [17] Zhao X, Wu X, Liu L, et al. Pyroelectric Performances of Relaxor-based Ferroelectric Single Crystals and Related Infrared Detectors [J]. *Phys Status Solidi A*, 2011, **208**(5): 1061–1067.
- [18] Liang Z, Li S, Liu Z, et al. High Responsivity of Pyroelectric Infrared Detector Based on Ultra-thin (10 μm) LiTaO_3 [J]. *J Mater Sci Mater Electron*, 2015, **26**(7): 5400–5404.
- [19] Putley E H. The Possibility of Background Limited Pyroelectric Detectors [J]. *Infrared Physics*, 1980, **20**(3): 149–156.
- [20] Van der Ziel A. Noise in Solid-state Devices and Lasers [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1970, **58**(8): 1178–1206.

(下转第 34 页)

lytical Chemistry, 1972, **44**(11): 1733-1738.

- [3] Zief M, Mitchell J W. Contamination control in trace element analysis [J]. *Environmental Pollution*, 1978, **15**(4): 312.
- [4] 郑鹤鸣. 高压釜 [J]. *分析化学*, 1978, **7**(3): 244.

(上接第 8 页)

- [21] Xu Q, Zhao X, Di W, et al. Noise Mechanisms Investigation in Pyroelectric Infrared Detectors Based on Mn-doped $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ -0.27 PbTiO_3 vs. LiTaO_3 Single Crystals [J]. *Infrared Phys Technol*, 2014, **67**: 350-353.
- [22] Xu Q, Zhao X, Li X, et al. 3D-printing of Inverted Pyramid Suspending Architecture for Pyroelectric Infrared Detectors with Inhibited Microphonic Effect [J]. *Infrared Phys Technol*, 2016, **76**: 111-115.

(上接第 24 页)

参考文献

- [1] 李进武. 红外焦平面探测器快速启动的影响因素分析 [J]. *红外*, 2017, **38**(12): 13-16.
- [2] 牟宏山, 陈静, 乔育花. 快速制冷型红外焦平面成像制导系统设计 [J]. *红外与毫米波学报*, 2016, **35**(3): 310-316.
- [3] 周赞熙. 实现红外探测器快速制冷的设计考虑 [J]. *红外与激光技术*, 1989, **18**(4): 21-22.
- [4] 林国画, 孟令伟. 杜瓦热耗的影响因素分子 [J]. *激光与红外*, 2017, **47**(2): 195-197.
- [5] 于小兵. 微型杜瓦绝热与真空保持的分析 [J]. *激光与红外*, 2004, **34**(4): 275-278.