

温度特性

影响探测器特性的温度效应根源和作用



温度特性

得益于钽酸锂材料的优异性能，我们的热释电探测器无需制冷或者温度稳定装置即可达到高响应率和高信噪比。钽酸锂单晶的居里温度为 $603\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，远高于热释电探测器使用时的温度。所以探测器的使用温度和保存温度是由内部元器件的参数及其封装方式决定的。但是即使在此温度范围内，探测器的性能随着温度还是会有微小的漂移，这是由内部电子元器件的温度特性决定的。当我们谈到“探测器的温度系数”时，我们要把它看成是一个复杂系统。探测器的温度特性不能用简单的，无源器件的模型来得到一个简单的系数。

3.1 产生原因

为完整地描述热释电探测器的温度特性，我们需要在准静态条件下考虑温度变化规律，同时也需要在变化的环境温度下考虑。

将整个探测器看成是一个系统，在热学上来说，每一个单独元器件的温度特性都会相互叠加，并且与接线方式以及应用时的调制频率有关。

环境温度随着时间的变化通常多在低频范围内，其效应会叠加在调制后的探测器信号上面，并产生不定量且无法稳定的偏置电压。之所以会产生此效果，是因为管壳内部温度的变化引起热释电芯片缓慢的温度变化，且此温度影响比辐射光源的效果要更大且持续时间更久。所以会产生一个增益较大的低频信号，并有可能致使探测器信号饱和。

可以采用热补偿的方式来消除因为温度扰动而引起的偏置电压。我们采用两个热释电芯片，补偿芯片具有与灵敏元芯片相同的尺寸，反向连接于灵敏元芯片旁，且与入射光无响应。有外部温度变化时，两个芯片上会产生大小相等，极性相反的电荷，因此而受到中和。所以，由外部温度变化引起的偏置电压变化能被降到最低。

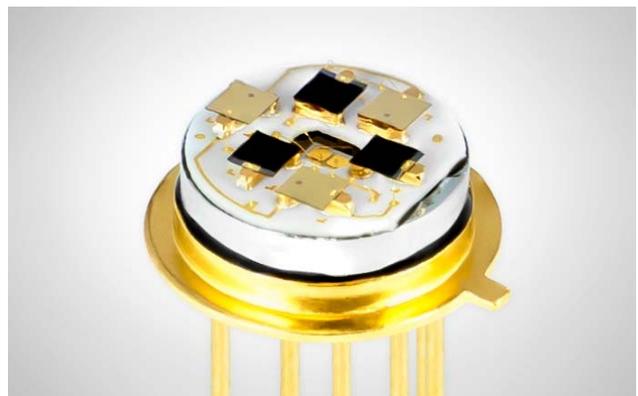


图 14: 作为热补偿的芯片（无黑色吸收涂层）

而稳态时的温度依赖性和由于温度变化产生的信号扰动是不一样的，必须分开考虑。两者需要采用不同的方式来抑制其影响。

温度特性

3.2 元器件

以下我们来分别讨论热释电探测器中的元器件，以及其对温度的依赖性。在此基础上，我们会选择出几种探测器，从实验角度来探讨其性能随温度的变化。图 15 所示为探测器中受温度影响较大的几种元件。

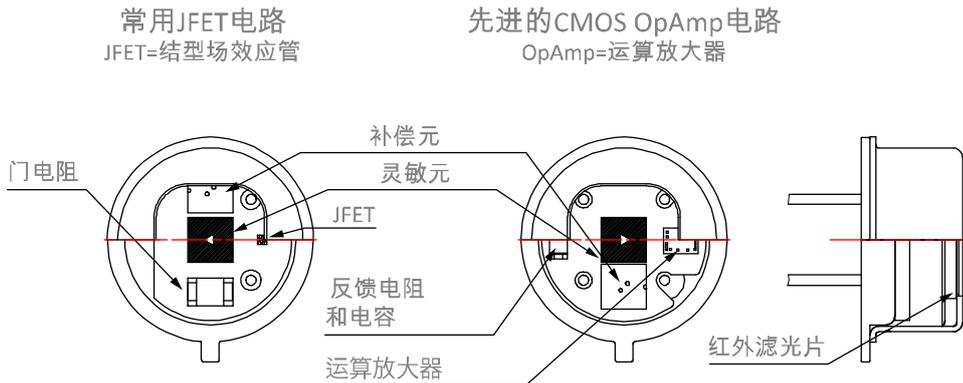


图 15: 热释电探测器中受温度影响的元器件

热释电材料

热释电材料的居里温度对于热释电转换来说是至关重要的参数。如果超过此温度，材料会发生相变，且自身的永久极化将消失。

InfraTec 公司使用的热释电材料是钽酸锂单晶，它具有低频区噪声小以及居里温度高（603 °C）的优势。所以，即使探测器高于额定工作温度运行，也不会有退极化的风险。

在探测器使用温度范围内，由热释电材料本质温度系数所产生的热释电电流差异对于探测器的温度性能影响很大。在-25 ... 85 °C 温度范围内，钽酸锂材料的温度系数大约为 3,800 ppm/K。

为了提高红外波段辐射能量到温度变化的转化率，热释电材料的上表面涂上所谓的“黑化层”。InfraTec 公司有两种黑化层技术。一种是金黑涂层，其转化效率在很宽的波长范围内都保持一致，但是当温度达到 60 °C 时，它会产生不可逆的破坏。所以此类探测器的工作和保存温度要比其他的探测器稍低一些。

在准静态温度场条件下，热释电芯片受到辐射照射而产生电荷。我们把稳定时间定义为辐照开始直到芯片的平均温度不再变化为止。稳定时间取决于热释电芯片的热容以及其和环境其他部件的连接和固定方式。此外，辐射能量的大小以及环境温度对稳定时间也有很大的影响。

温度特性

无源部件

电阻

门电阻或者反馈电阻采用高阻值的电阻器件，有非常大的负温度系数（TC）。一个100 GΩ电阻的典型温度系数 TC 为-2,000 ppm/K。对于不同运行模式，这一电阻变化量影响着探测器的性能，在 3.3 章节中详细叙述。

电容

根据所需的电容标称值，电流模式中的电容通常用的是印刷平行导电条或 NPO¹电容。这些元器件的温度系数非常小，也就意味着电容值随着温度的变化很小，对探测器的性能不会产生任何可被测出的实际影响。

有源部件

JFET 的转换性能主要是受到两种相反的温度效应影响（见图 16）：

- 首先，高温会使 p-n 结的耗尽层变窄，也就是说夹断电压下降（大概为-2 mV/K）。栅源电压保持恒定，漏极电流随着温度增加而增加。
- 其次，因为晶格振动加剧会阻碍电流流动，载流子的移动随着温度升高而下降（~0.7 ppm/K），所以漏极电流会下降。

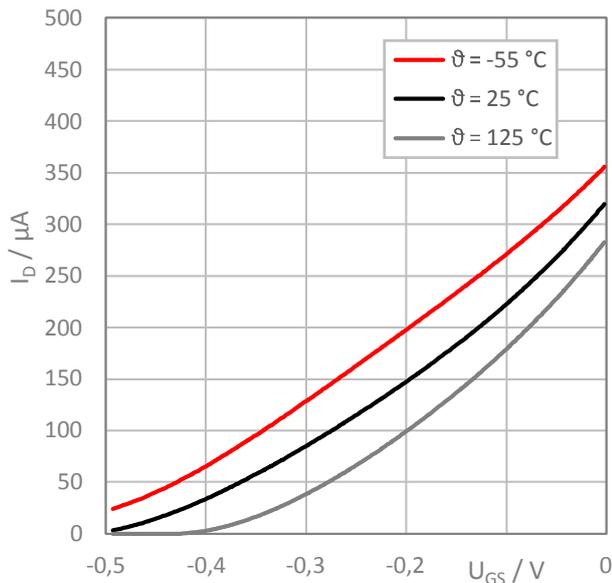


图 16: 不同温度下典型 JFET 的伏安特性

此外，栅漏电流和 JFET 的输入电流噪声随着温度增加呈指数增长。室温下典型的 JFET 漏电流为 1pA，而在 125 °C 时增加到高于 10 pA。

以上这些温度影响的方式以及降低其影响的可行性研究我们会在 3.3 章节详细讨论。

集成运算放大器

InfraTec 选择的集成运放 OpAmp 具有低输入偏置电流和低输入电压噪声密度的特性。与其他半导体元器件的规律一致，运算放大器的输入偏置电流随着温度的增加按不规则的方式增加。

¹ 陶瓷电容器的型号，温度系数为 0 ppm/K

温度特性

然而，输入偏置电流在整个热释电探测器的运行温度范围内还是非常低的，只是在 85 °C 时有一个明显的增加，见图 17 的规律。其他的参数类似于开环增益也会随着温度变化，但是由于有很强的负反馈电路，对于探测器的性能没有明显的影响。

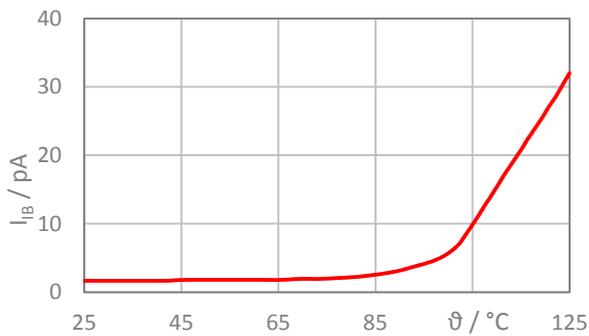


图 17: OpAmp 的输入偏置电流随环境温度的变化

光学滤光片

光学滤光片和窗片的温度特性会影响到探测器响应率的温度依赖性。红外滤光片的光谱特性随温度变化的规律以及相关参数我们会在 InfraTec 产品目录中“滤光片和窗口”这一章节中详细描述。

温度特性

3.3 探测器的性能

在大多数应用实例中，我们从探测器上所得到的信号并非是热释电效应产生的电流信号本身，而是成比例转换的电压信号。如第一章所述，根据运行模式的不同，电流会以不同的方式转换成电压信号。因此，不同模式下内部电路的热学特性以及热释电转换特性相互叠加，导致了探测器上不同的表现形式。

下面章节将会阐述使用一个简单测试装置所得到的测试结果。下文图中列出每个单独的探测器参数随着环境温度变化的趋势和变化率。此测试装置包括一个恒温控制的探测器支架和温度控制在 $T_{BB} = 500\text{ K}$ 的黑体光源。辐射源的调制采用机械斩波器。探测器在不同温度下受到恒温控制，而斩波器则是处于室温下。测试结果显示的是典型值，每一个探测器测试结果可能偏离此典型值。

3.3.1 带 JFET 的电压模式

响应率

如式（27）所示，响应率在足够高的调制频率（ $> 2\text{ Hz}$ ）下取决于材料的参数以及尺寸，并且以 $1/f$ 规律下降。在所有这些参数中，热释电系数 p ，比热容 c_p ，质量密度 ρ ，以及相对介电常数 ϵ_r 都与温度有关，对整个探测器的温度特性都有贡献。

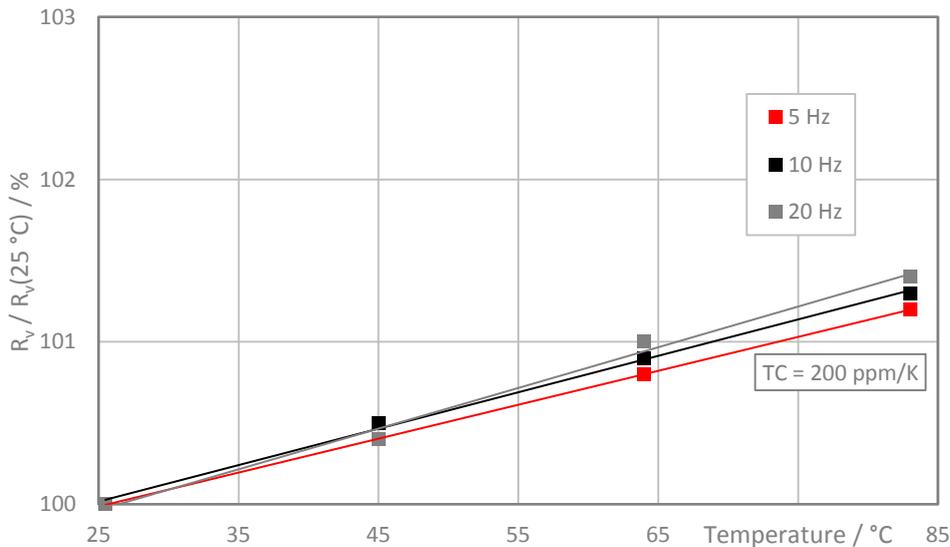


图 18: LME-302-61 的响应率随着温度和调制频率的变化

图 18 所示为无补偿的探测器 LME-302-61 在不同调制频率下，响应率随着温度的变化。

基于理论参数以及上述实际测试，并不考虑滤光片的情况下，电压模式的探测器温度系数大致在-1,000 ... 500 ppm/K 范围内。

噪声

JFET 的栅漏电流随着温度的升高急剧增加，见“有源部件”章节。根据式（30）由于栅漏电流和电流噪声密度直接成正比，电流噪声密度 N_I 也随着温度急剧增加。

因此，门电阻值很大的探测器，电流噪声密度对于整个探测器的噪声影响最大，而热噪声很低。噪声密度随着温度急剧上升。

温度特性

偏置电压

根据 3.2 章中的讨论，可以看出叠加在测试信号电压上的偏置电压随着温度也会变化。主要是因为温度上升时，夹断电压降低，门电阻降低以及栅漏电流上升。而其中漏电流的增加要比其他几个参数更为明显，所以电压模式探测器的偏置电压随着温度上升总是增加的。

环境温度随时间改变的同时，一个低频的随机噪声电压可能具有相当大的值，并且叠加到偏置电压上。这样导致的结果是输出电压可能会接近电源电压值而达到饱和。由于电压模式的电时间常数 τ_{el} 比较大，所以电压模式探测器的偏置电压需要非常长的时间才能重新到达稳态值。如果想要温度变化时被激发的电压幅度比较小，可以采用较小的门电阻，并且由于此时电时间常数小，输出信号的稳定时间也会变短。

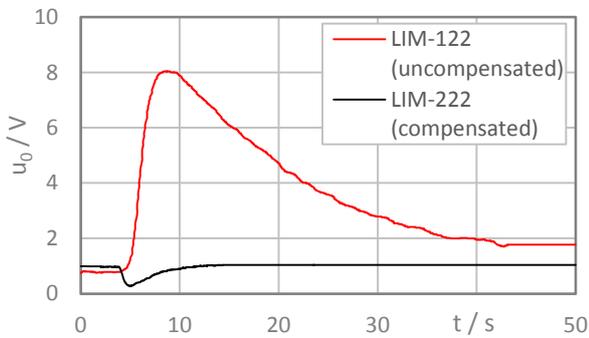


图 19：两种电压模式的探测器在快速增加的温度扰动下，偏置电压随时间的响应

降低温度变化对于偏置电压影响的另一种方法是加热补偿。正如 3.1 章节所述，即灵敏元旁边连接一片对辐射无响应的热释电芯片，环境温度变化所产生的热释电电流能够被补偿芯片所中和。

图 19 所示为热补偿对于偏置电压的影响。一个带补偿片的探测器和一个不带补偿片的探测器同时暴露在快速变化的环境温度下。很明显的看出带有热补偿的偏置电压受到温度变化的影响非常小，信号幅值变化很小并且稳定时间短。由于技术上的误差，一个完美的补偿片是不可能实现的。且偏置电压的变化可能是正向的也可能是反向的，这取决于灵敏元电荷变化量大还是补偿元电荷变化量大。

如表 6 所示，有两种方法连接灵敏元和补偿元芯片。在电压模式下，补偿元产生的额外电容对于探测器的电信号都有影响。

	无补偿	串联补偿	并联补偿
电路图			
信号	100 %	100 %	50 %
噪声	100 %	170 %	70 %

表 6：电压模式下不同的热补偿方式对于探测器参数的影响

温度特性

串联形式补偿相比于并联形式，输出信号是其两倍，但是工作点更不稳定，尤其是在长期的温度变化中。此外，对比于无补偿的探测器，信噪比只有 $1/170\% = 59\%$ ，比理论值 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 小了 15% 。因此，我们并不推荐使用串联形式。在温度快速变化 ($> 2\text{ K/min}$) 的情况下，并联补偿对于稳定的工作点有帮助，并且在长时间的加热或者冷却过程中信号漂移小，信噪比理论上达到 70% ，即使批量生产后的实际情况也是如此。

3.3.2 带运算放大器的电流模式

响应率

热释电芯片在电流模式中实质上是相当于短路连接，热释电电流流过反馈回路。因此，温度依赖性由热释电系数 p ，比热容 c_p ，质量密度 ρ 和反馈电阻 R_{fb} 决定。后者也会引起电时间常数 τ_{el} 的改变，所以电流模式探测器的温度系数也与频率有关。使用在远高于电拐点频率 f_{el} 的调制频率下，温度系数大约为 $2,000\text{ ppm/K}$ 。调制频率在拐点频率 f_{el} 以下，具有极大的负温度系数的反馈电阻影响会持续增加，因此温度系数随调制频率下降而减小。

探测器 LME-335 的电时间常数为 20 ms ，则电拐点频率为 $f_{el} \approx 8\text{ Hz}$ 。我们以此探测器为范例，图 20 为不同调制频率下响应率的温度系数的规律。

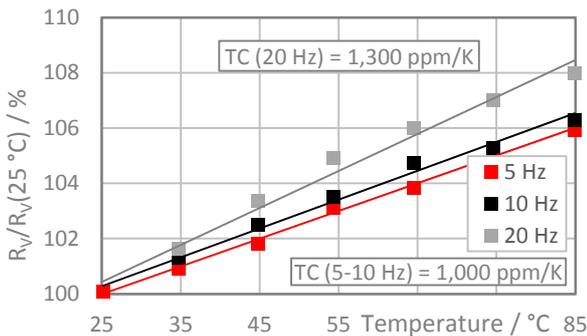


图 20: LME-335 响应率的温度系数

若不考虑光学滤光片的温度系数，电流模式探测器典型的温度系数为 $-500 \dots 2,000\text{ ppm/K}$ 。

噪声

电流模式探测器中温度对噪声的影响主要来源于输入偏置电流和反馈电阻。如图 21 所示，高反馈电阻以及低频下，噪声密度有很强的增长。

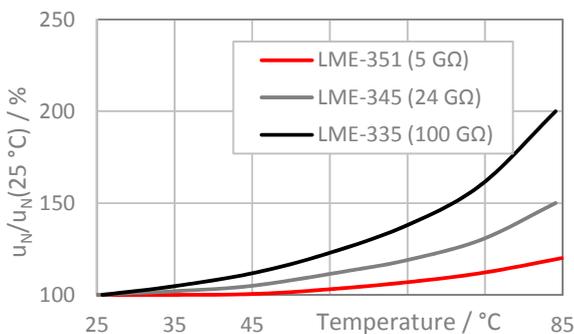


图 21: 电流模式探测器噪声密度随着温度的增长

温度特性

偏置电压

图 22 所示，带有运算放大器的探测器偏置电压由运算放大器本身的偏置电压 u_{OS} 和由于偏置电流 I_{IB} 流过反馈电阻 R_{fb} 产生的压降两者所构成。这两个参数都和温度有关，但由于反馈电阻非常大，偏置电流的影响占主导。因此，在高温下，具有高反馈电阻的探测器能产生大约几百毫伏的偏置电压。

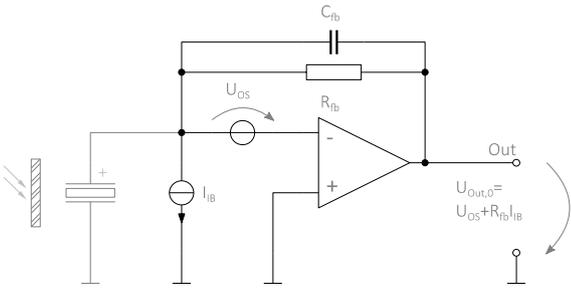


图 22: 带有 OpAmp 电流模式探测器中影响偏置电压的相关因素

图 23 所示为不同反馈电阻和温度对偏置电压的影响。

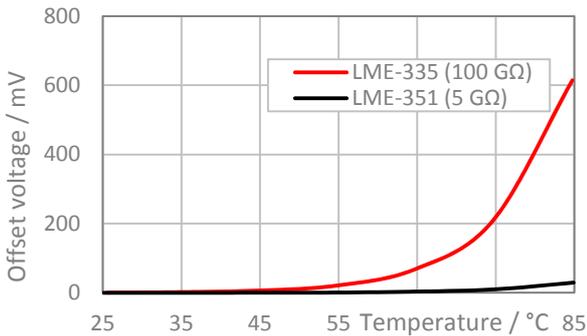


图 23: 带有不同反馈电阻的电流模式探测器，其各自偏置电压随温度的变化

电流模式的探测器处于变化的环境温度中，原本调制的测试信号也会叠加上低频但振幅很大的噪声信号。我们同样可以用热补偿的方式来最大程度消除这一信号。但是不同于电压模式，电流模式中我们只采用并联的方式放置热补偿芯片，这是由于运算放大器的输入电容的增加对探测器整个电学特性只有非常小的影响。

另外一个有效降低温度对于偏置电压影响的方式是大幅度地降低反馈电阻值。和温度有关的信号变化量由于放大系数被降低而减弱了。这个方式虽然可以改进温度特性，但是同时也使探测器的响应率降低了。我们以不同温度补偿和反馈电阻组合的三种探测器为例，让它们都处于快速变化的温度下，得到如图 24 所示的测试结果，看出两种方式可独立使用也可一起使用。

温度特性

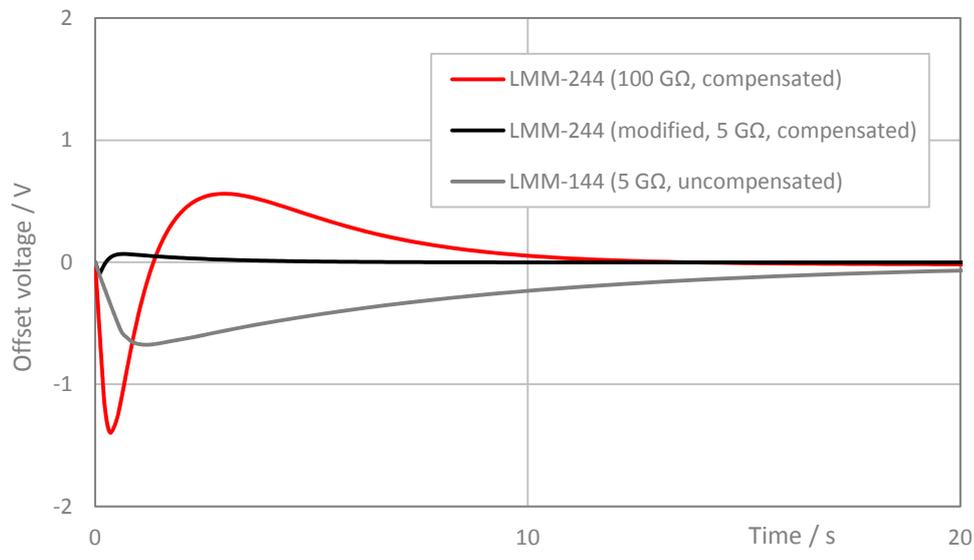


图 24: 偏置电压在快速变化的温度下的稳定特性

温度特性

3.4 总结和比较

我们在为不同的应用选择最优探测器时，温度特性是需要认真考虑的。下文分别就稳态条件下的温度特性和探测器在温度变化情况下的响应做了阐述。

无论是哪种运行模式下，放大部分的漏电流都会随着温度上升而快速上升，噪声和偏置电压也相应地随温度上升而增大。

响应率的温度系数在电压模式下具有很明显的负值（大约为-1,000 ppm/K），而在电流模式下多为正值（大约为 2,000 ppm/K）。并且，调制频率对响应率的温度系数影响很大，也就是其和电拐点频率的相对位置。

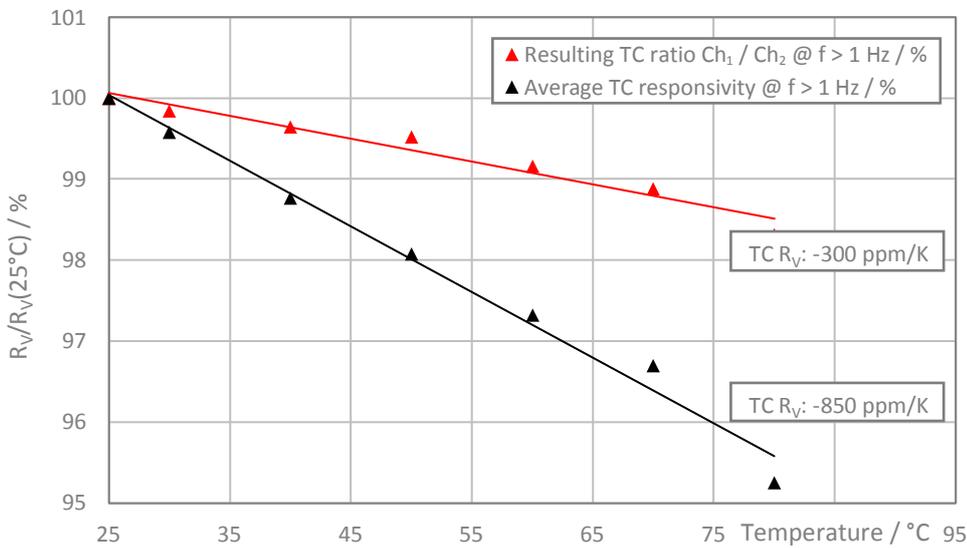


图 25: 双通道电压模式探测器 LIM-222-GH 的温度系数

通常增加掺比通道可以降低老化和污染对于光学通路带来的影响，且两个通道采用信号比值的方式。由于只受两个通道温度系数的差异影响，整个系统的温度系数相应降低。

图 25 和图 26 可以看出两个通道具有相似的温度系数能够相互补偿，这个方法对于电压模式和电流模式都适用。

温度特性

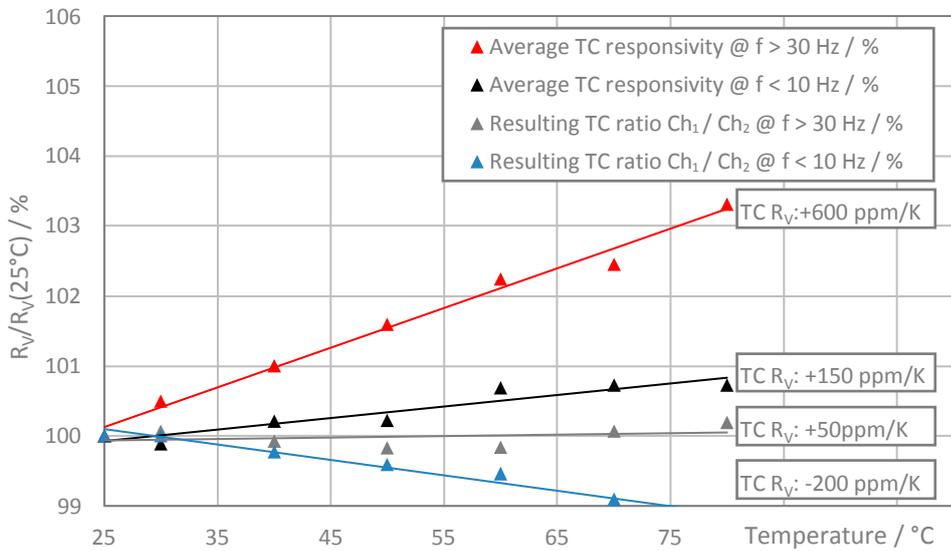


图 26: 双通道电流模式探测器 LIM-262-GH 的温度系数

以上所有的考虑和实验只针对热释电探测器本身，并假设所有其他影响因素恒定且独立于探测器之外。开发者在测试系统研发的过程中需要估算探测器与其他外部元件之间存在的相互作用。外部元件包括诸如红外光源，光学通道，支架和底座的热容等，这些都有可能影响到整个系统的温度特性。

总部

InfraTec GmbH
红外传感与测量

Gostritzer Str. 61 – 63

01217 Dresden / GERMANY

电话 +49 351 871-8625

传真 +49 351 871-8727

E-mail sensor@InfraTec.de

官网 www.InfraTec.de

美国分公司

InfraTec infrared LLC

Plano, TX / USA

电话 +1 877 797 6748

Fax +1 877 389 2668

E-mail sensor@InfraTec-infrared.com

官网 www.InfraTec-infrared.com

Chesterfield

总部
Dresden

上海

英国分公司

InfraTec infrared Ltd.

Chesterfield / UK

电话 +44 1246 267562

Fax +44 1246 269381

E-mail sensor@InfraTec.co.uk

官网 www.InfraTec.co.uk

中国办事处

InfraTec代表处

c/o 德中工商协会

大中华区

上海/中华人民共和国

电话 +8621 68758536 ext 1633

E-mail sensors@InfraTec.cn

官网 www.InfraTec.cn



Latest information on the internet.

图片版权

fotolia: © photoworld, © Andrey Popov, © VRD, © shamtor, © ff-fotodesign, © sabdesign85

istockphoto: © TonyTaylorStock, © Peshkova