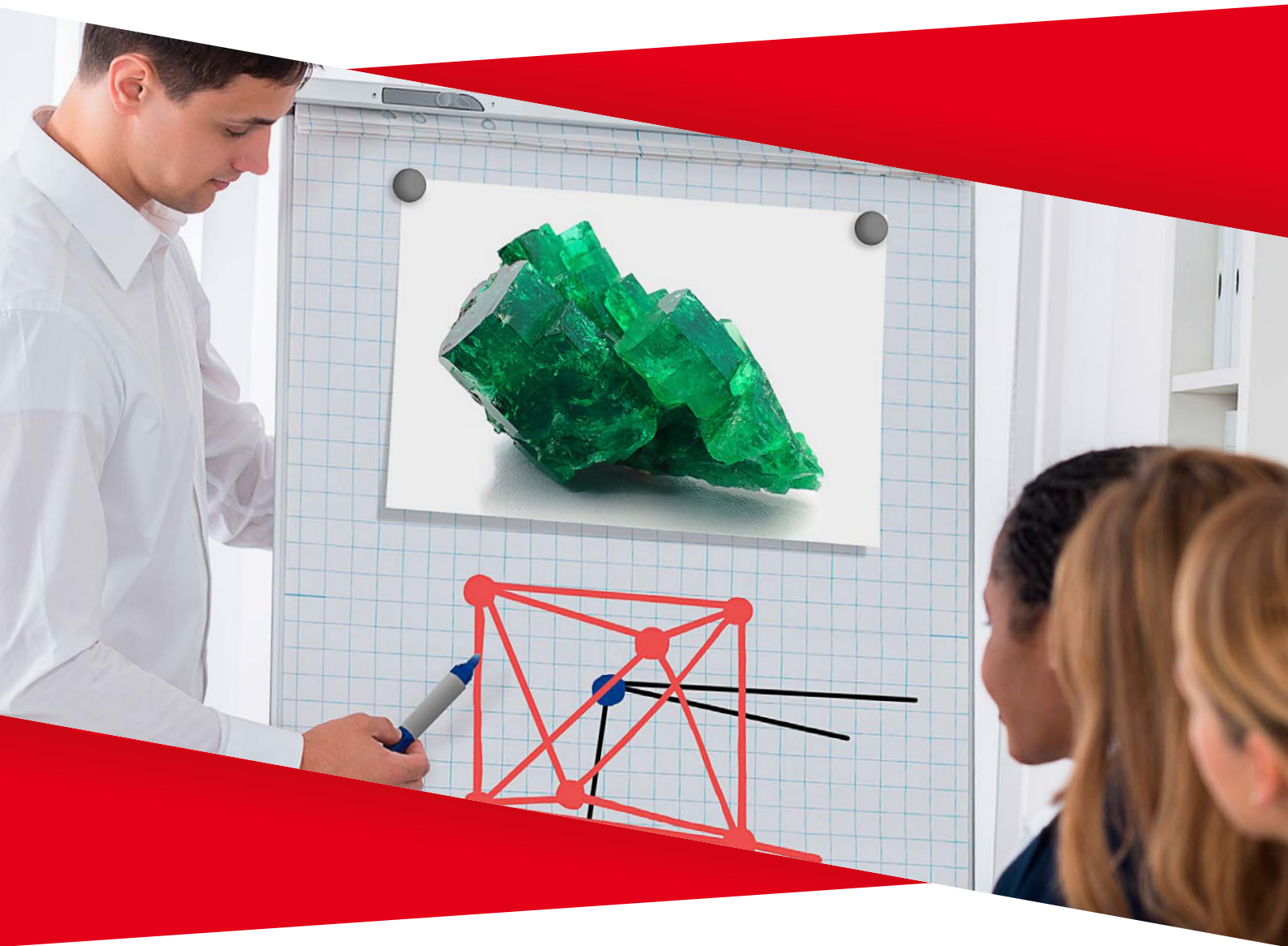


# 基础理论

热释电探测器的转换原理与参数释义



---

## 基础理论

---

热释电效应很早就为人们所知道（公元前 4 世纪由 Eresos 的 Theophrastos 发现）。第一次使用今天所熟知的“热释电”这个名字则是在 1824 年，由苏格兰物理学家 David Brewster（1781 – 1868）提出，光学领域著名的布鲁斯特角（Brewster-angle）也是以他的名字命名。

热释电效应在传感器技术上的广泛应用始于 1970 年。现今，热释电探测器因其构造简单，坚固耐用以及性能优异成为深受欢迎的热学红外探测器。

热释电探测器的核心部件是热释电芯片，它是一种特殊性能的单晶材料。此单晶是由带反向电荷的单元组成，例如，规律排列的带电离子，也就是所谓的晶格。在描述晶体的 32 种点群中有 10 种具有极性，即负电荷中心和正电荷中心不重合，此类晶体具有自发极化现象并且存在晶轴。由于自发极化强度和温度有关，故此类晶体具有热释电效应，传感器技术也正是应用了此效应。热释电单晶（热释电材料）需要减薄并且在垂直于晶轴方向的表面镀上电极，上表面电极还需要镀上一层吸收层（黑化层）才能使用。当红外辐射到达这一吸收层，热释电材料升温，表面电荷形成；如果辐射消失，反向极化电荷产生。但是这一电荷非常小，我们利用极低噪声、低漏导场效应管（JFET）或者是运算放大器（OpAmp）在电荷被晶体内部电阻形成的回路中和之前，转化成电压信号。

我们将通过逐一分析能量转化的步骤，系统地解释热释电探测器的工作原理：

- 光-热转换，即，从红外辐射变化到温度变化。
- 热-电转换，即，从温度变化到电荷的产生。
- 电荷通过应用电路转换成电流或者电压，也就是探测器的输出信号。

# 基础理论

## 1.1 光-热转换

到达探测器窗口的辐射通量 $\Phi$ 以透过率 $T_F$ 通过光学滤光部件，随后入射到热释电芯片上。这一辐射引起热释电芯片温度的升高为 $\Delta\vartheta_p$ ，此参数与光学吸收 $A_p$ 成正比，与芯片热容 $H_p$ 成反比。与此同时，此热量又会通过环境（特别是芯片支架）耗散，此时温度为 $\vartheta_0$ ，这一过程也可用热导率 $G_p$ 来表征。这两个过程是对立的（由热沉现象加热和由热导现象冷却），我们可以在热导方程中用热传导率参数来描述。此方程是有边界条件和初始条件的偏微分方程。

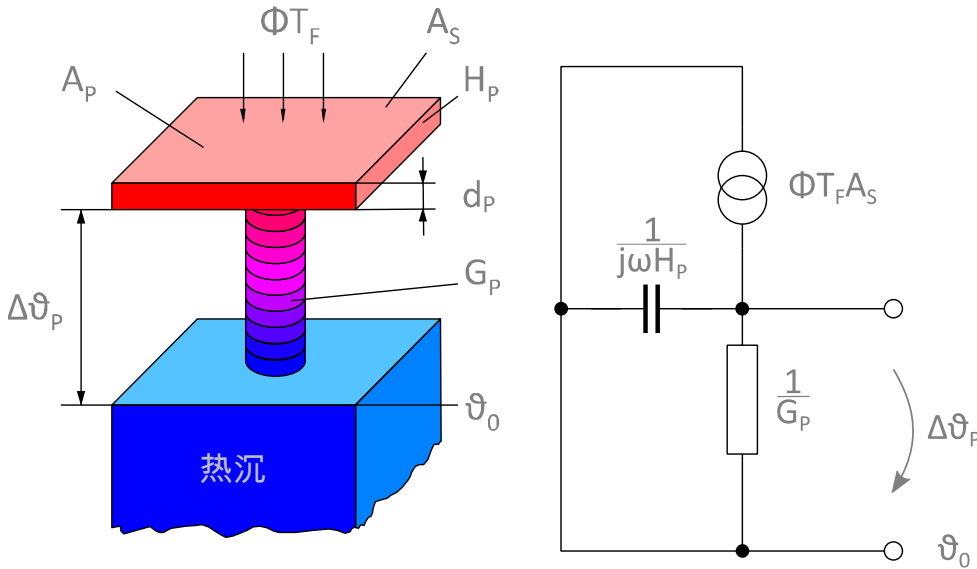


图 1: 热学模型

图 2: 等效电路

我们从另外的角度来分析此方程，从实际应用考虑，分析稳态条件下的响应即已足够。可以将每一周期的信号看成正弦信号一个周期内的总和。采用类似于谐振电路的分析方法画出热等效回路，我们可以通过时间常数的定义来获得简易的处理方式，由此得出热释电芯片上温度的升高为：

$$\Delta\vartheta_p = \frac{A_s T_F \tilde{\Phi}}{G_p \sqrt{1 + \omega^2 \tau_{th}^2}} \quad (1)$$

热时间常数为

$$\tau_{th} = \frac{H_p}{G_p} \quad (2)$$

热容 $H_p$ 是由以下两种材料常数，比热容 $c_p$ 和热释电材料的密度 $\rho_p$ 计算而得，并需知道热释电芯片的体积，即表面积 $A_p$ 和厚度 $d_p$ 。

$$H_p = c_p \rho_p A_p d_p \quad (3)$$

---

## 基础理论

---

要得到足够大的信号，即非常好的信噪比，温度变化需要越大越好。从探测器角度考虑，也就是说热释电芯片的吸热性要好，以及带宽滤光片的透过率要高。从热导率参数来说，由于热导率降低会使温度差异变大但热时间常数也会变大，所以需要做一个权衡。我们通常设定比较合适的热时间常数为 $\approx 150 \text{ ms}$ ，所以热释电芯片的热容不能太低，也就是说需要控制合理的芯片厚度 $d_p$ 。

至此，我们可以从辐射通量在低频和高频两个不同的条件下简化温差公式。

频率为几个 mHz，（ $\omega^2 \tau_{th}^2 \ll 1$ ）

$$\Delta \tilde{\theta}_p = \frac{A_S T_F \tilde{\Phi}}{G_p} \quad (4)$$

温度变化和频率无关并且为常数，辐射变化非常的缓慢，整个热学过程可以进行完整。

频率高于 10 Hz（ $\omega^2 \tau_{th}^2 \gg 1$ ）

$$\Delta \tilde{\theta}_p = \frac{A_S T_F \tilde{\Phi}}{G_p \tau_{th}} \cdot \frac{1}{\omega} \quad (5)$$

温度变化随着频率升高而降低，热学转换过程随着辐射变化速度的加快而逐渐跟不上。

# 基础理论

## 1.2 热-电转换

热释电灵敏元的温度变化 $\Delta\theta_p$ 在其电极表面产生电荷，表面电荷的量 $Q$ 与面积 $A_p$ 成正比，也与热释电效应的强度成正比，也就是热释电系数 $p$ 。无论是升温还是降温都可以产生相等的效应，产生电荷大小只与以下参数有关。

$$Q = p A_p \Delta\theta_p \quad (6)$$

电荷在闭合回路中放电，并且变化中的电荷形成电流。

$$i_p = p A_p \frac{d\Delta\theta_p}{dt} \quad (7)$$

在稳态下，使用正弦信号激励，我们从式（1）可以得到：

$$\tilde{i}_p = \omega p A_p \frac{A_s T_F \tilde{\Phi}}{G_p \sqrt{1 + \omega^2 \tau_{th}^2}} \quad (8)$$

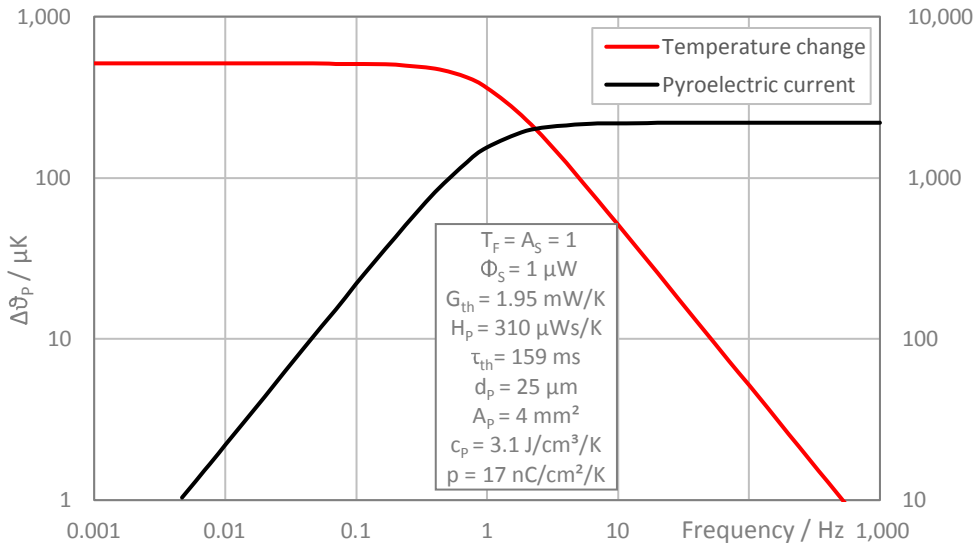


图 3: 温度变化值和热释电灵敏元的短路电流随频率的变化

我们分别讨论两个极端的情况：辐射变化在低频或者高频区间内。

频率为几个 mHz ( $\omega^2 \tau_{th}^2 \ll 1$ )

$$\tilde{i}_p = \omega p A_p \frac{A_s T_F \tilde{\Phi}}{G_p} \quad (9)$$

热释电电流随着频率线性升高。温度变化非常缓慢时，也就是在类似环境温度变化的情况下，得到的信号是非常小的。

---

## 基础理论

---

频率高于 10 Hz ( $\omega^2 \tau_{th}^2 \gg 1$ )

$$\tilde{i}_p = p A_p \frac{A_S T_F \tilde{\Phi}}{G_p \tau_{th}} \quad (10)$$

热释电电流和频率无关，为恒定量并且达到峰值。这段频率也正是热释电探测器理想的工作点。

图 3 为温度变化值随频率的变化，以及一个典型的热释电探测器的短路电流随频率的变化。温度变化随频率的响应呈现出典型的低通特性，热拐点频率 $f_{th}$ 可以从热时间常数计算得出：

$$f_{th} = \frac{1}{2 \pi \tau_{th}} \quad (11)$$

图 3 所示的拐点频率为 1Hz，在此频率下温度的变化值达到饱和的 513  $\mu$ K。在此频率以下，热释电电流一直升高并且在此拐点达到饱和的 2.2 pA。

# 基础理论

## 1.3 几个重要参数

这里我们表征热释电探测器的几个重要参数：响应率，噪声，以及两者的比值。为了比较不同的探测器之间的性能高低，学术界引入了比探测率这一参数。InfraTec 公司在每一种探测器的数据手册中都会列出响应率、噪声以及比探测率的数值。

### 1.3.1 响应率

响应率  $R$  通常被定义为输出信号和输入信号的比值。对于热释电探测器，输入信号即正弦调制的辐射到达灵敏芯片上的有效值  $\tilde{\Phi}$ 。输出信号则是信号电压基波的有效值  $\tilde{u}_S$ 。

$$R_V = \frac{\tilde{u}_S}{\tilde{\Phi}} \quad (12)$$

由于热释电转换过程和放大器元件都和激发频率有关，所以响应率也是频率相关的。图 4 所示为响应率与频率的关系，我们用了 LME-336 作为例子。

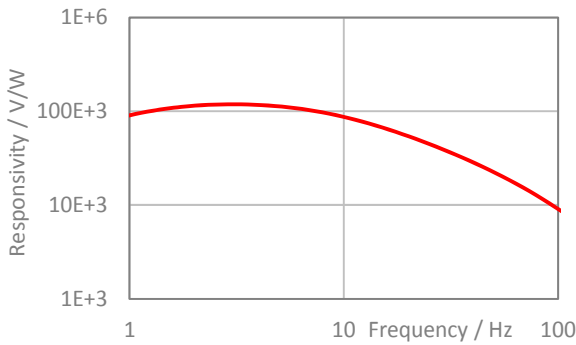


图 4：电流模式探测器典型的响应率和频率的关系。采用单通道单电源的 LME-336 探测器

### 1.3.2 噪声

噪声被定义为一种宽频范围内无规律的信号，它会改变测量信号数值，且不包含有用的信息。定义噪声时，我们通常使用的是噪声电压  $u_N(t)$  的瞬时均方值与被测带宽  $\Delta f$  的比值，称之为噪声密度  $N$ 。

$$N = \frac{\sqrt{u_N(t)^2}}{\Delta f} \quad (13)$$

如果噪声密度和频率无关，类比于可见光，我们可称之为白噪声。但是热释电探测器中并不能用此定义，所以每一个型号的探测器数据手册上我们都会给出噪声密度和频率的典型响应图。

由于噪声是随机分布的，我们无法准确地测出其幅值，我们可采用方程 (14) 来计算噪声电压的有效值  $\tilde{u}_N$ 。在一定频率范围内噪声幅值分布符合高斯分布模型，噪声电压的有效值  $\tilde{u}_N$  等价于这一随机信号的标准差。  $f_1$  和  $f_h$  分别是主要噪声区间内的最低频率和最高频率。

## 基础理论

$$\tilde{u}_N = \sqrt{\int_{f_1}^{f_h} N^2 df} \quad (14)$$

| 幅值与噪声有效值的倍数关系           | 噪声电压低于某幅值的概率 |
|-------------------------|--------------|
| $\tilde{u}_N$           | 68.3 %       |
| $2 \cdot \tilde{u}_N$   | 95.4 %       |
| $3 \cdot \tilde{u}_N$   | 99.7 %       |
| $3.3 \cdot \tilde{u}_N$ | 99.9 %       |

表 1: 噪声幅值与实际噪声低于该幅值的概率对应表

所有热释电探测器上产生的噪声在统计学上都是独立的，所以它们可以独立分析。它们对于探测器输出的综合影响可以采用所有噪声电压的平方值，再求其总和的平方根值来计算。

如果我们仅在热环境中观察热释电芯片，那么芯片和环境的热交换以及介电损耗是噪声的主要来源。

| 噪声源                         | 噪声密度  |
|-----------------------------|---|
| 温度噪声                        | $N_T = \sqrt{4k_B T^2 G_{th}}$ (15)                     |
| 热释电芯片的介电损耗噪声 $\tan(\delta)$ | $N_\delta = \sqrt{4k_B T \omega C_p \tan(\delta)}$ (16) |

这些参数都可以用统计物理学求得。T是（绝对）温度， $k_B$ 是玻尔兹曼常数， $\tan(\delta)$ 是热释电芯片的介电损耗因子。后续“噪声”章节我们将详细讨论探测器上前置运放中的噪声部件以及电压模式和电流模式下影响输出信号的各种噪声源。



---

## 基础理论

---

### 1.3.3 比探测率

比探测率  $D^*$  是对不同探测器的评判基准，它是在噪声带宽  $\Delta f$ ，芯片面积  $A_p$  和辐射强度  $\Phi$  归一化条件下的信噪比。

$$D^* = \frac{\sqrt{A_p} R_V}{N} = \frac{\sqrt{A_p \Delta f}}{\Phi} \cdot \frac{\tilde{u}_S}{\tilde{u}_N} \quad (17)$$

通过噪声分析和探测率定义，我们可以得到比探测率值的最大极限为

$$D^*_{\max} = \frac{1}{\sqrt{16 k_B T^5 \sigma}} \quad (18)$$

如果我们假设温度噪声是唯一不可避免的噪声源， $\sigma$  是斯蒂芬-玻尔兹曼常数。在 25 °C 温度下理论极限值为

$$D^*_{\max, 25^\circ\text{C}} = 1.8 \cdot 10^{10} \frac{\text{cm}\sqrt{\text{Hz}}}{\text{W}}.$$

### 1.3.4 等效噪声功率

等效噪声功率 NEP 也经常被用来比较不同的探测器性能。它被定义为需要达到信噪比为 1 时，必须要照射到探测器上的辐射功率。

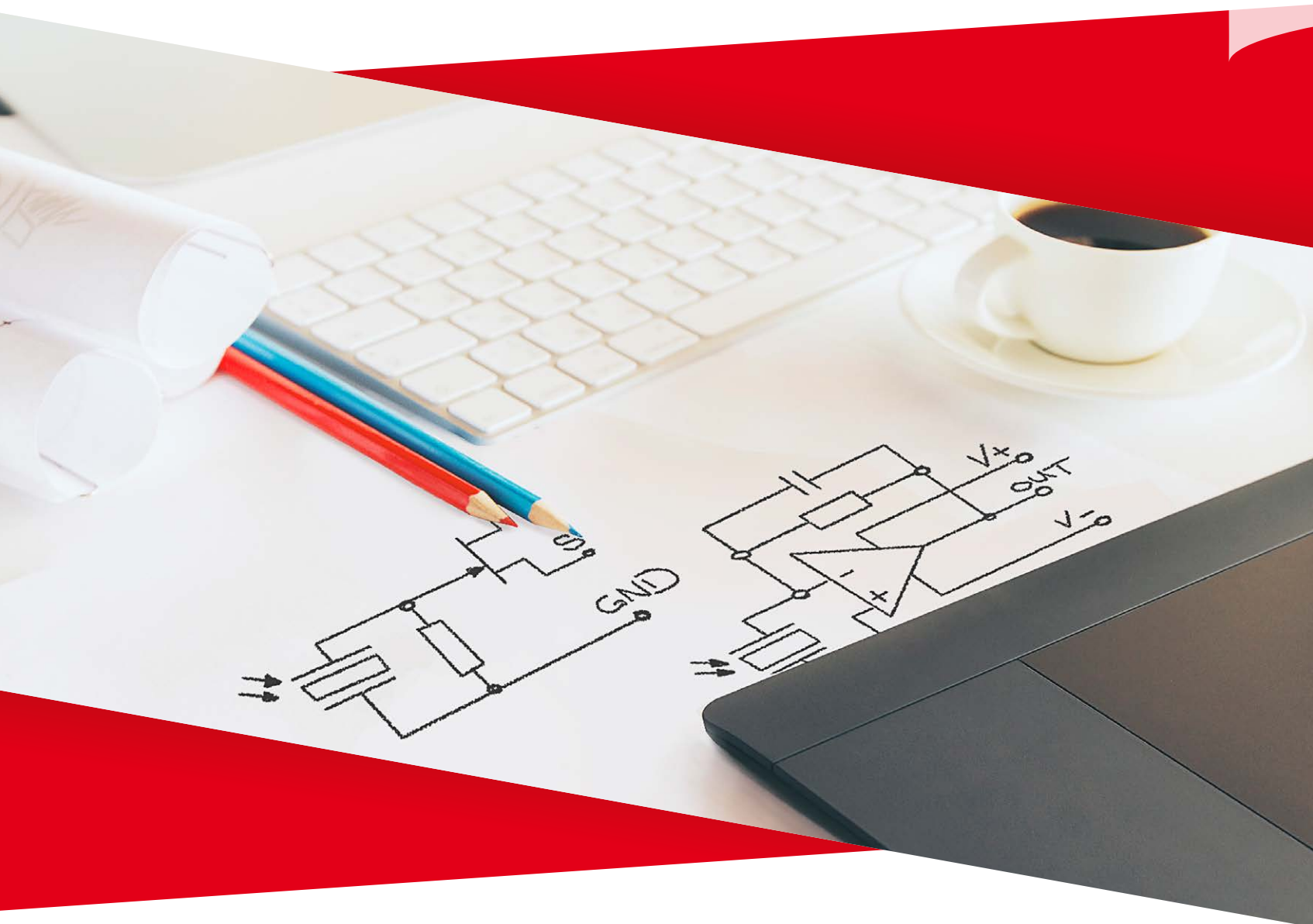
$$\text{NEP} = \frac{N}{R_V} \quad (19)$$

等效噪声功率和比探测率的关系可以用下式表达，即将 (17) 带入 (19)：

$$\text{NEP} = \frac{\sqrt{A_p}}{D^*} \quad (20)$$

# 集成前置放大器

电流模式或者电压模式探测器的功能和特性



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](mailto:sensor@InfraTec.de)  
官网 [www.InfraTec.de](http://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](mailto:sensor@InfraTec-infrared.com)  
官网 [www.InfraTec-infrared.com](http://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](mailto:sensor@InfraTec.co.uk)  
官网 [www.InfraTec.co.uk](http://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](mailto:sensors@InfraTec.cn)  
官网 [www.InfraTec.cn](http://www.InfraTec.cn)



Latest information on the internet.