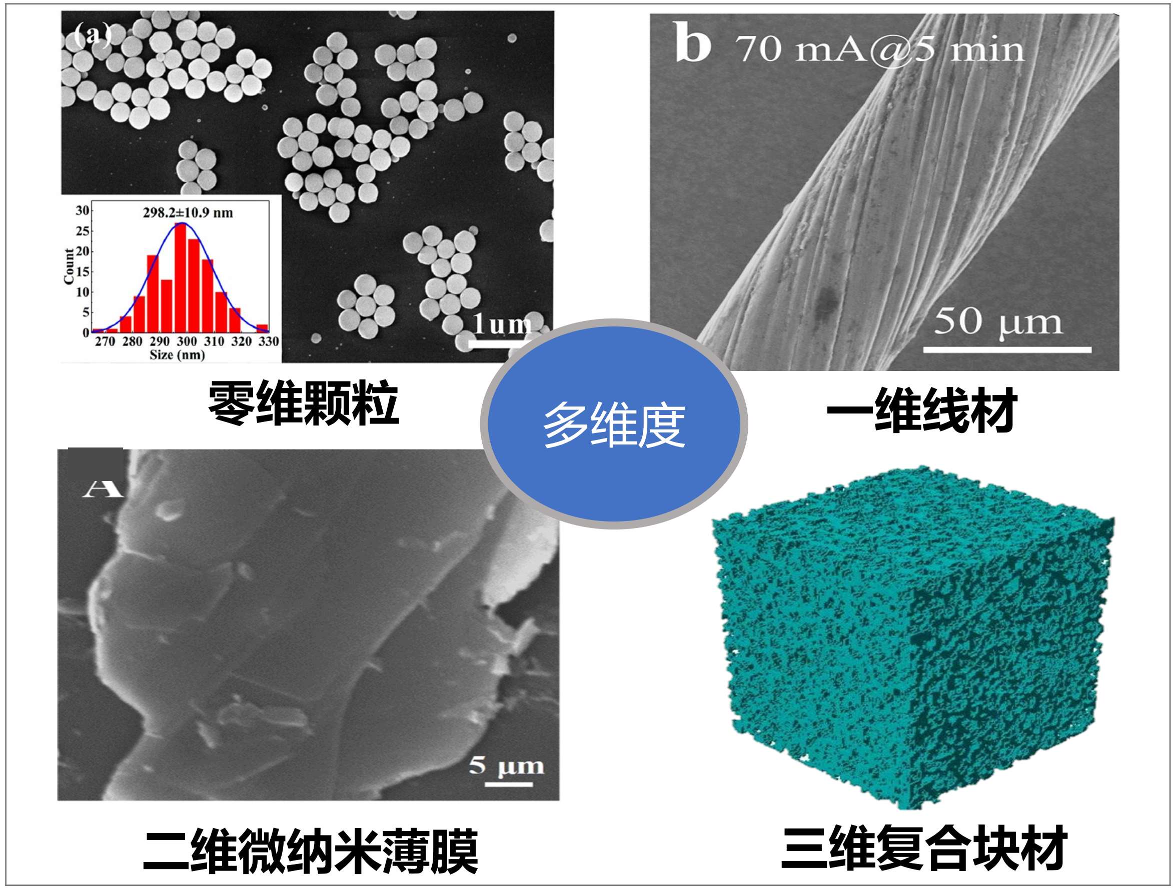
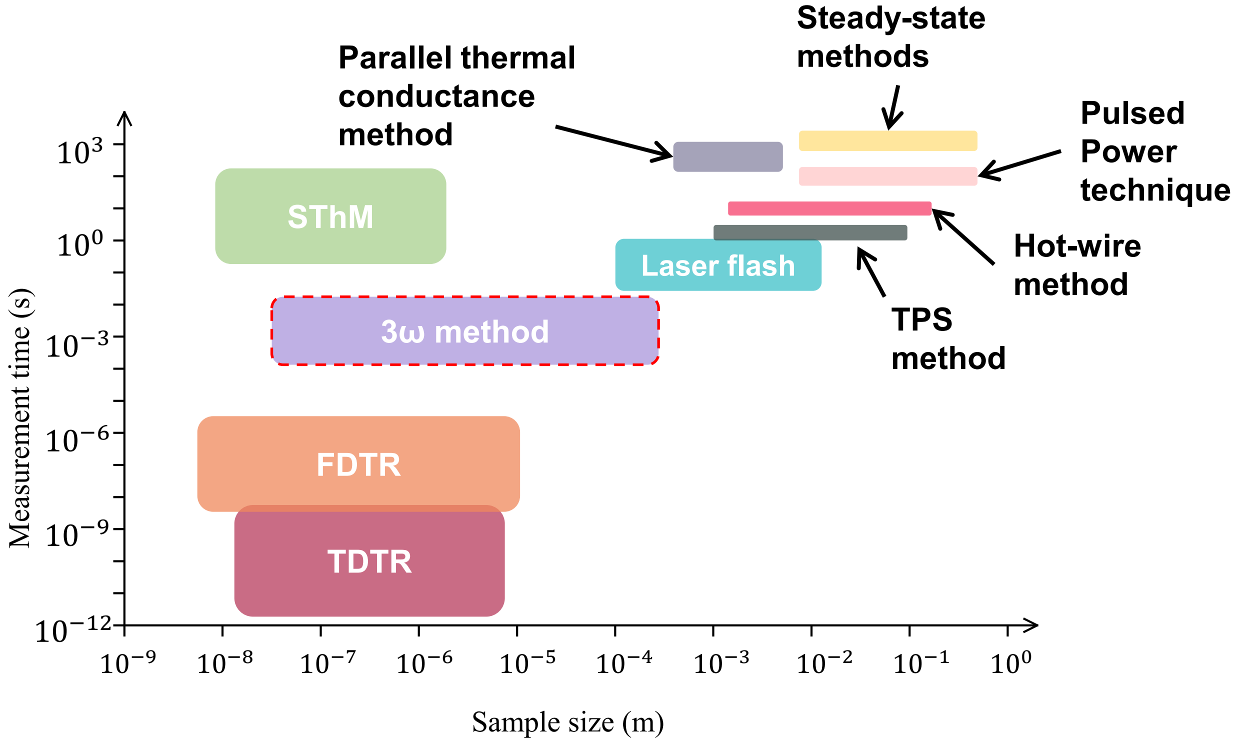
材料热测量技术



材料维度分类



各种热物性表征技术的测量时间与适用尺度

- 3ω谐波热物性测量技术具备较广的测量尺度范围，可适配更多材料。

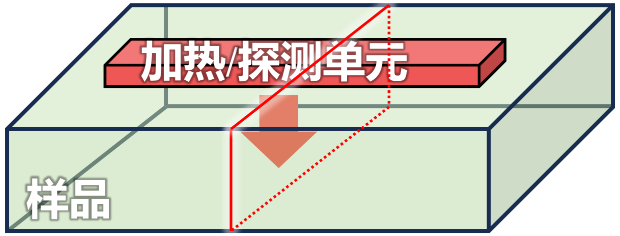
材料热测量技术

公司	行业覆盖	材型覆盖	定制化即样品损伤性
本团队	高校科研 建筑材料 新能源 半导体 医学	致密块体、粉末、薄膜、块体、液体、**多孔材料、接触热阻、生物组织**	仅需更换探头；极少测试样品损坏。
NETZSCH Proven Excellence. TA Instruments Rigaku Hot Disk® 海外头部厂商	高校科研 半导体 新能源	致密块体、粉末、薄膜、块体、液体	更换探头或整个仪器；大部分测试样品损坏。
SAWLANG 赛威朗 天津赛威朗仪器设备有限公司 TIANJIN SAIWEILANG INSTRUMENT EQUIPMENT CO., LTD. 湘仪仪器 XIANGYI HESON 和晟仪器科技 HESHENG INSTRUMENT TECHNOLOGY 国内友商	高校科研 建筑材料 半导体	致密块体、粉末、薄膜、块体、液体	更换探头或整个仪器；大部分测试样品损坏。

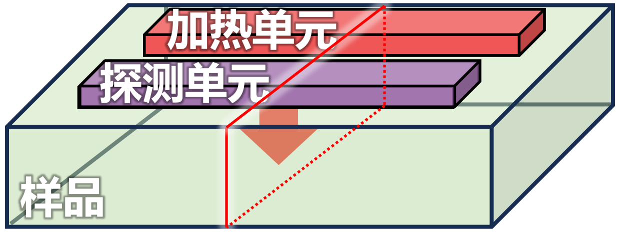
- **3ω谐波热物性测量技术具备较广的测量尺度范围，可适配更多材料。**

谐波法电热信号转换

测量技术



三次谐波技术



二次谐波技术

输入 (0ω 1ω)

$$I(t) = I_0 e^{i\omega t}$$

加热 (2ω)

$$P(t) = I_0^{\ 2} R_0 e^{i2\omega t}$$

测温 (2ω)

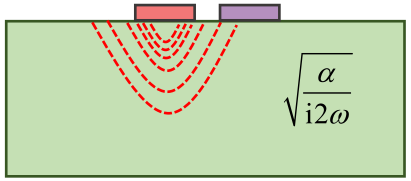
$$\Delta T(t) = \frac{1}{2} \Delta T_{\text{peak}} e^{i2\omega t}$$

输出 (0ω 1ω 2ω 3ω)

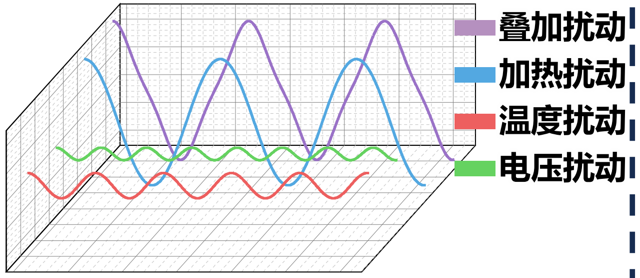
$$U(t) = U_{0\omega,\text{peak}} + U_{1\omega,\text{peak}} \cdot e^{i\omega t} + U_{2\omega,\text{peak}} \cdot e^{i2\omega t} + U_{3\omega,\text{peak}} \cdot e^{i3\omega t}$$

热扩散理论

温度扰动变化



受到热物性、频率影响

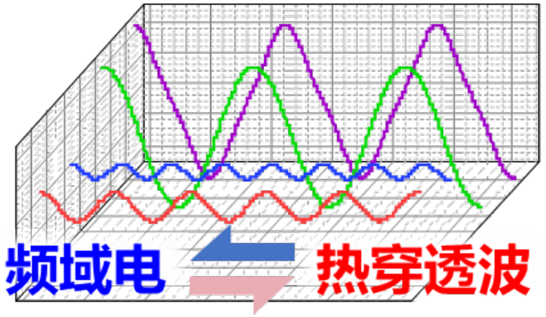


谐波波形

- 谐波热量在可控频率下，在样品内实现可控热穿透深度的扩散。

谐波法技术原理

谐波法电热信号转换



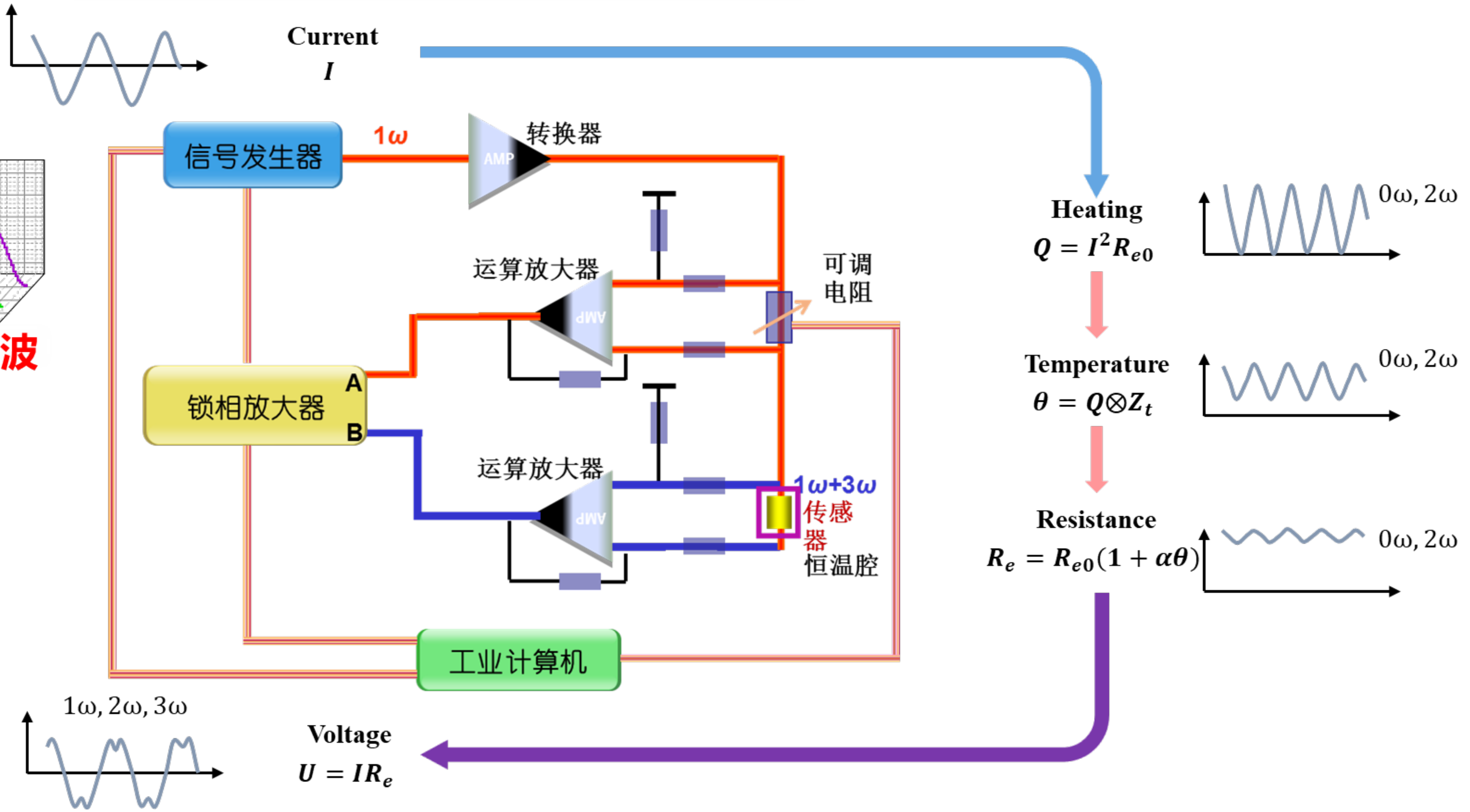
3ω/ 2ω技术

3ω技术:

$$\Delta T_{\text{peak}} = \frac{2U_{3\omega,\text{peak}}}{U_{\text{AC}}\alpha_{\text{CR}}}$$

2ω技术:

$$\Delta T_{\text{peak}} = \frac{U_{2\omega,\text{peak}}}{U_{\text{DC}}\alpha_{\text{CR}}}$$



谐波法技术原理

谐波法测试系统

程序控制

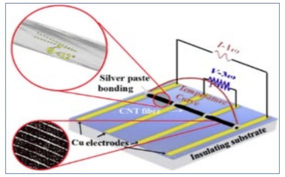
外场设置

自动采集

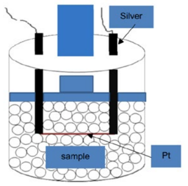
模型反演

单丝加热传感器

纤维



流体/粉体

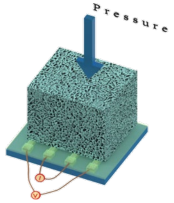


$$U_{3\omega} = \frac{4I_{1\omega}^3 R^2 \alpha_{CR} l}{\pi^4 k S} \frac{1}{\sqrt{1+\tan^2\varphi}}$$

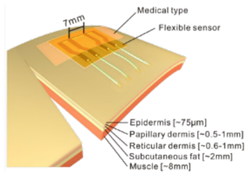
$$k = -\frac{\alpha_{CR} U_{1\omega}^3}{8\pi l R_T} \frac{d\ln\omega}{dU_{3\omega}}$$

独立传感器

块体材料



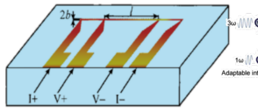
生物组织



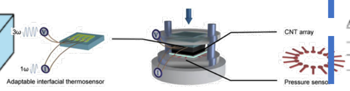
$$\Delta T = -\frac{P}{2\pi l k_{y,f}} \int_0^\infty \frac{1}{A_f B_f} \frac{\sin^2(b\lambda)}{(b\lambda)^2} d\lambda$$

沉积传感器

超薄薄膜



接触热阻

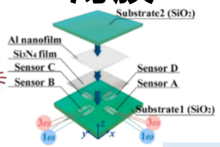


$$k + k_g = -\frac{P}{2\pi l} \frac{d\ln\omega}{d\Delta T}$$

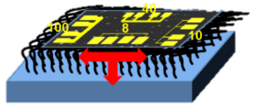
$$\Delta T = \frac{P_l}{\pi\sqrt{k_y k_z}} \left[0.5\ln\frac{k_y}{Cb^2} - 0.5\ln(2\omega) + \eta\right] - i\left(\frac{P_l}{4\sqrt{k_y k_z}}\right)$$

阵列传感器

薄膜



各向异性



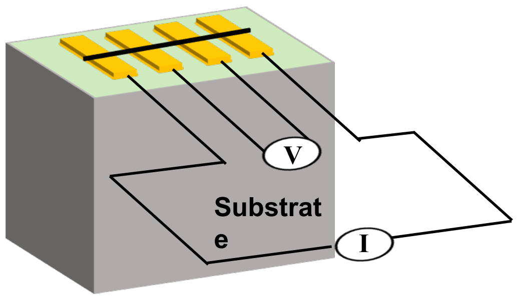
$$\Delta T - \Delta T^* = \frac{p d_2}{4 b l k_{y,2}}$$

$$Z(i,1) = \frac{1}{\frac{1}{k_{CNT}} + \frac{1}{Z_{PMMA}(i,1)} + \frac{1}{1/R_{CNT} + Z_{Glass}(i,1)} + j \times 2 \times \pi \times \Delta T(i) \times C_{CNT}}$$

- 自主设计的谐波法测量系统，实现谐波加热-采集-分析的自动化流程；
- 配合多种传感器，实现多种材型的测量。

谐波法热扩散原理

导电纤维/纳米管:



$$U_{3\omega} \approx \frac{4I^3LRR'}{\pi^4\kappa S\sqrt{1+(\tan\theta)^2}}$$

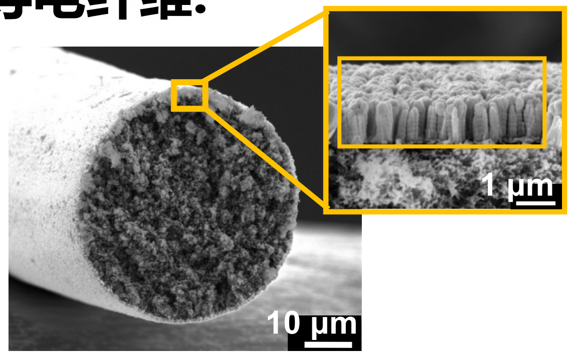
$$\kappa_{ap} = \kappa(1+g\gamma) = \kappa + \frac{16\grave{o}\sigma T_0^3 L^2}{\pi^2 D}$$

⬇

热导率、热扩散系数

Carbon 145:650-657 (2019).
Carbon 105:248-259 (2016).
Carbon 51:265-273 (2013).
……

不导电纤维:



$$\kappa_{\text{fiber}} = \frac{\kappa_{\text{tot}} - \beta\kappa_{\text{film}}}{1-\beta}$$

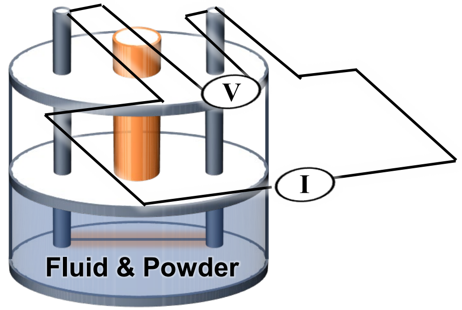
$$\beta = \frac{\pi D\delta}{\pi D^2/4}$$

⬇

热导率、热扩散系数

Rev. Sci. Instrum. 89(9): 096112 (2018).

粉体/流体:



$$\kappa = -\frac{U_{1\omega}^2}{4\pi dBR_0}$$

$$\alpha = r_1^2 \exp\left(2\gamma - \ln 2 - \frac{A}{B}\right)$$

⬇

热导率、热扩散系数

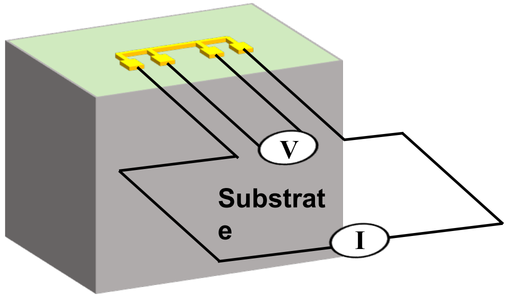
Mod. Phys. Lett. B 30 (25): 1650322 (2016).
Int. J. Thermophys. 34(12): 2261-2275 (2013).
……

□ **基于自发热单丝，实现多尺度纤维、粉体和流体的测量。**

谐波法技术原理

谐波法热扩散原理

绝缘块体/薄膜:



$$\Delta T_{peak}(k) = \frac{P}{\pi l \kappa}\int_0^\infty \frac{\sin^2(kb)}{(kb)^2(k^2+\psi^2)^{1/2}}\,dk$$

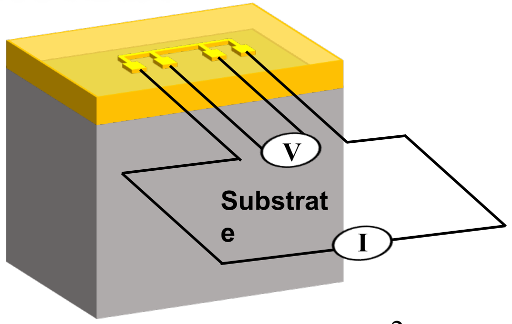
$$\kappa = -\frac{P_0}{2\pi l}\frac{d\ln\omega}{d\Delta T}$$

热导率、热扩散系数、体积热容

Rev. Sci. Instrum. 82(4): 045106 (2011).

……

导电块体/薄膜:



$$\Delta T = -\frac{P}{2\pi l k_{z,PI}}\int_0^\infty \frac{1}{A_{PI}B_{PI}}\frac{\sin^2(bk)}{(bk)^2}\,dk$$

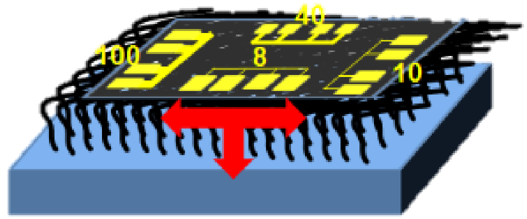
$$A_{PI} = -\frac{\dfrac{\kappa_{z,film}B_{film}}{\kappa_{z,PI}B_{PI}} + \tanh(\eta_{PI})}{1+\dfrac{\kappa_{z,film}B_{film}}{\kappa_{z,PI}B_{PI}}\tanh(\eta_{PI})}$$

热导率、热扩散系数、体积热容

Int. J. Thermophys. 36(10): 2523-2534 (2015).

……

各向异性:



$$\Delta T = \frac{P_l}{\pi\sqrt{k_y k_z}}\left[0.5\ln\frac{k_y}{Cb^2} - 0.5\ln(2\omega)+\eta\right] - i\left(\frac{P_l}{4\sqrt{k_y k_z}}\right)$$

热导率、热扩散系数

Sci. Rep. 6: 21014 (2016).

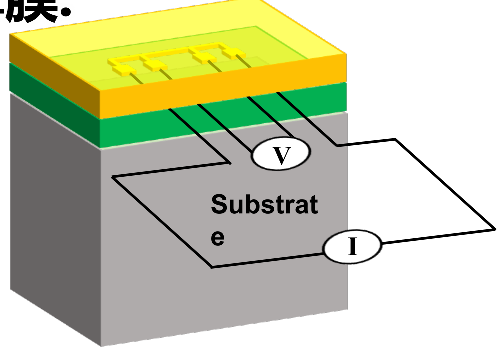
Sensors 21(23): 7968 (2021).

……

- **基于表面金属图案沉积技术，实现块体材料和各向异性的测量。**

谐波法热扩散原理

块体/薄膜:



$$Z_j(f)=R_{Cj,j+1}+1/\left[\left(R_j+Z_{j+1}(f)\right)^{-1}+\mathrm{i}4\pi fC_j\right]$$

$$R_j=\sqrt{\alpha_j/(2\pi f\kappa_j^2)}$$

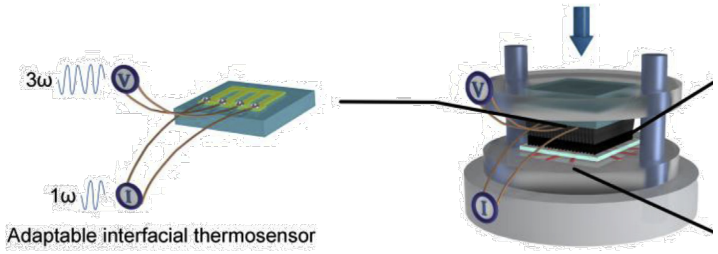
$$C_j=\sqrt{\kappa_j^2/(8\pi f\alpha_j)}$$

⬇

热导率、热扩散系数、体积热容

iScience 25(8): 104825 (2022).
Int. J. Therm. Sci. 162: 106781 (2021).
……

材料界面:



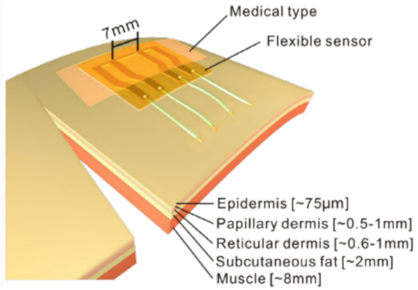
$$\vartheta_j=\frac{\left[\frac{1}{\kappa_{z,j}\varpi_j}-R_{Cj,j+1}\tanh(\eta_j)\right]\kappa_{z,j+1}\varpi_{j+1}\vartheta_{j+1}-\tanh(\eta_j)}{1-\left[\frac{1}{\kappa_{z,j}\varpi_j}\tanh(\eta_j)-R_{Cj,j+1}\right]\kappa_{z,j+1}\varpi_{j+1}\vartheta_{j+1}}$$

⬇

接触热阻

Carbon 145: 725-733 (2019).
Surf. Coat. Technol. 345: 105-112 (2018).
……

皮肤组织:



$$\varpi_j=\left(k^2+\frac{\mathrm{i}2\omega}{\alpha_{j,z}}-\frac{\rho_\mathrm{b}W_\mathrm{b}c_\mathrm{b}}{\kappa_{j,z}}\right)^{1/2}$$

⬇

含水量、灌注率、温度分布

Nano Res. 17(5): 4420-4427 (2024).
Int. J. Heat Mass Transf. 197: 123328 (2022).
……

- 基于封装传感器技术，实现薄膜、界面，以及皮肤组织的无损测量。

论文发表与专利申请

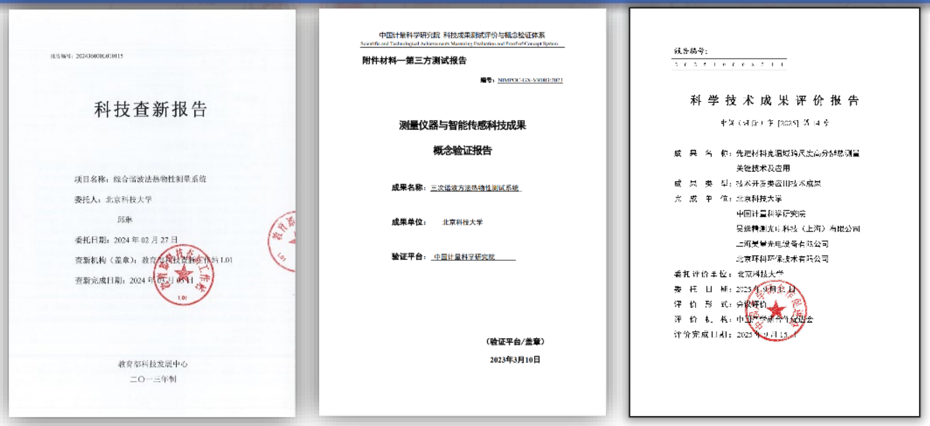
在国际期刊上发表学术论文40余篇

在 Carbon(Q1)、ACS Sensors(Q1)、Nano Research(Q1)、Renewable Energy (Q1)、Energy(Q1)、Composites Communications (Q1)、International Journal of Heat and Mass Transfer(Q1)等国际期刊发表SCI论文40余篇

获批专利15项、软著2项

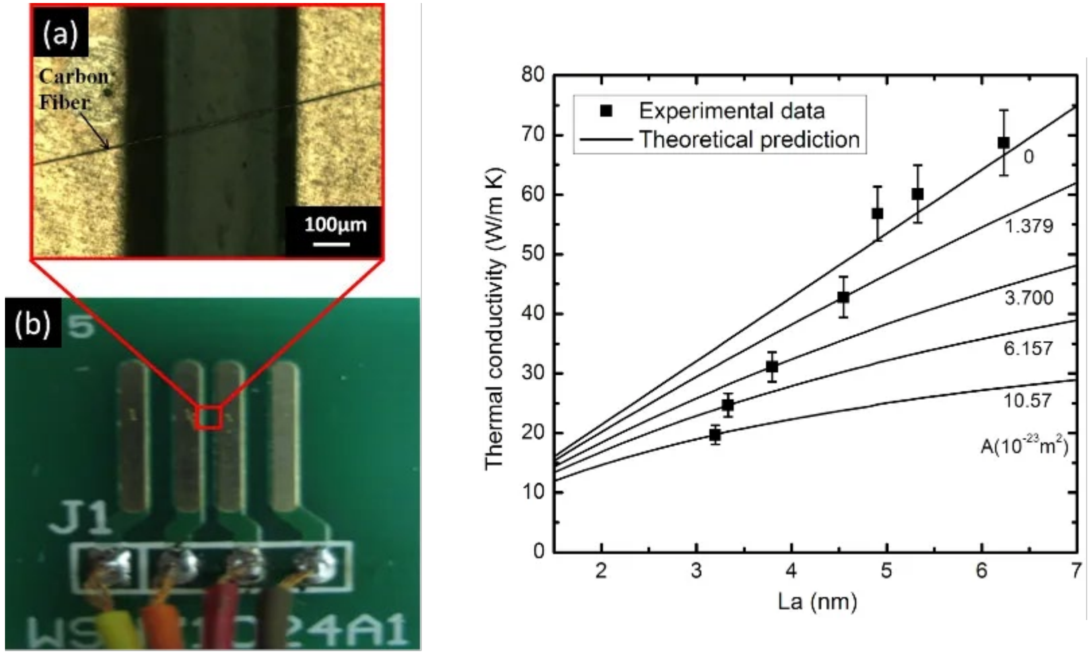
- 12 发明专利， 3 实用新型专利
- 2 软件著作权

教育部工作站科技查新与第三方测试报告



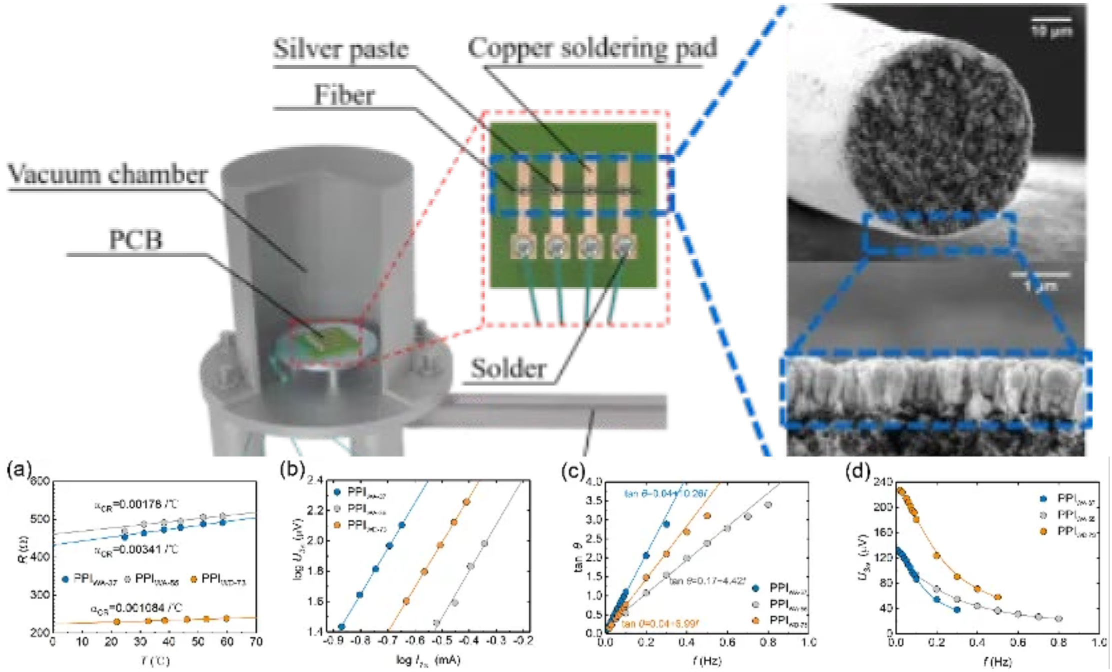
测量纤维热导率

单根聚丙烯腈基碳纤维晶格热导率:



不同热处理温度下纤维的热导率与长度的关系

测量单根多孔聚酰亚胺纤维的热导率:



导电涂层处理下的不导电纤维的热导率测量

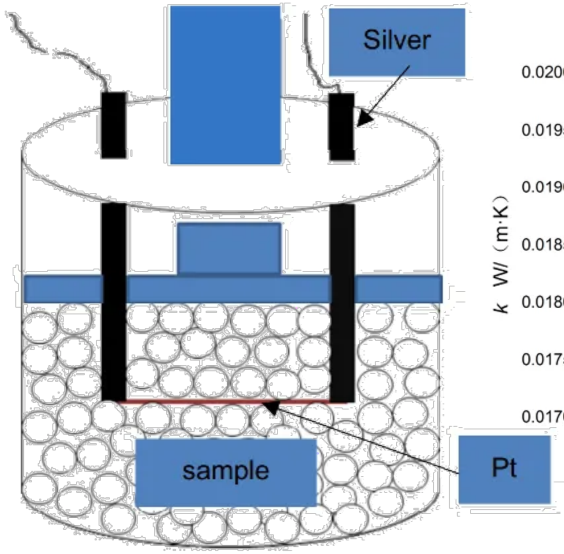
Carbon, 2013, 51, 265-273.

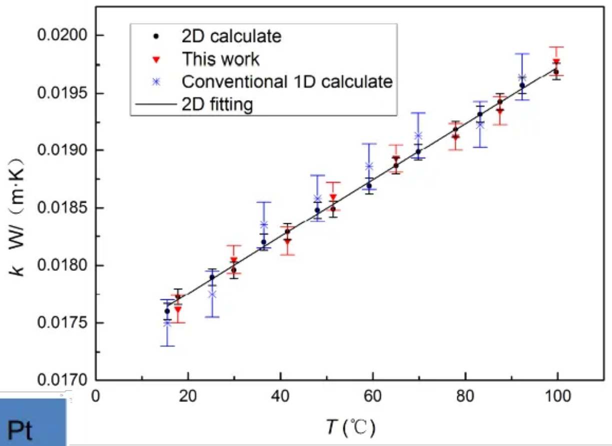
Rev. Sci. Instrum. 89(9): 096112 (2018).

□ 通过定制样品座固定纤维样品，采用测试系统测量长径比大于10的纤维热导率。

测量粉末、流体热导率

3ω斜率比较法测量流体和粉末热导率:

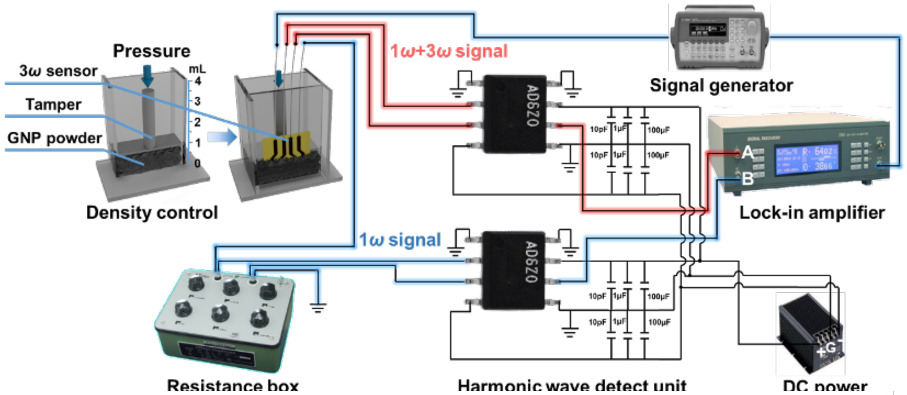


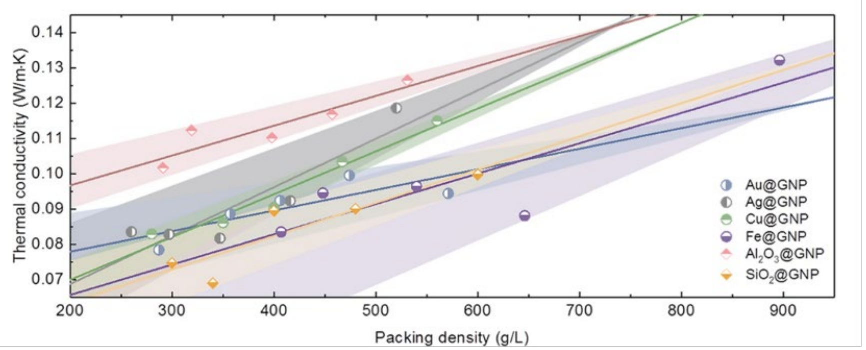


相对简单、快速的斜率比较方法，消除了探测器参数测量带来的误差，该方法的测量精度高于传统的一维模型

Modern Physics Letters B, 2016, 30(25), 1650322.

测量石墨烯纳米片粉末的热导率:





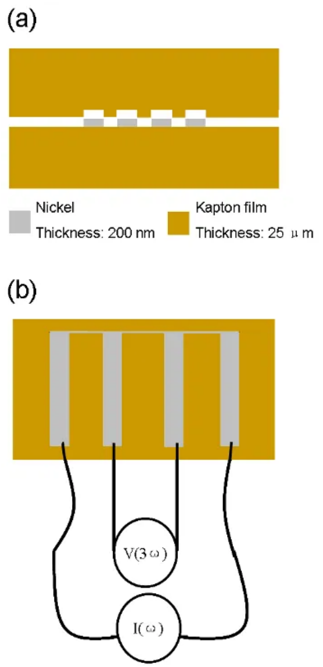
通过实验结果表明，纳米粒子分布均匀、粒径小有利于堆积石墨烯纳米片的热输运。

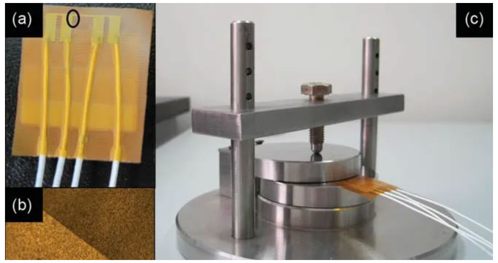
ES Energy and Environment, 2018, 2, 66-72.

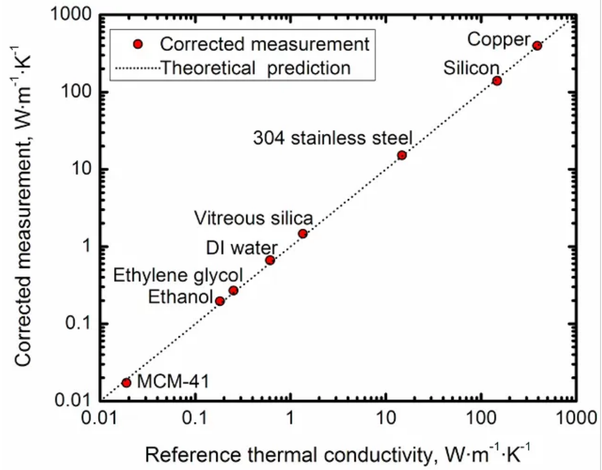
- 通过单丝传感器和独立传感器，测试导电和不导电的粉末/流体样品。

测量块体热导率

独立传感器无损测量多种材料:



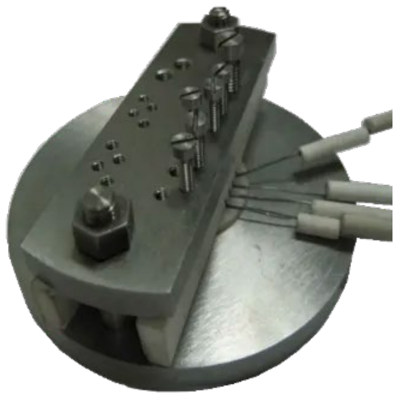


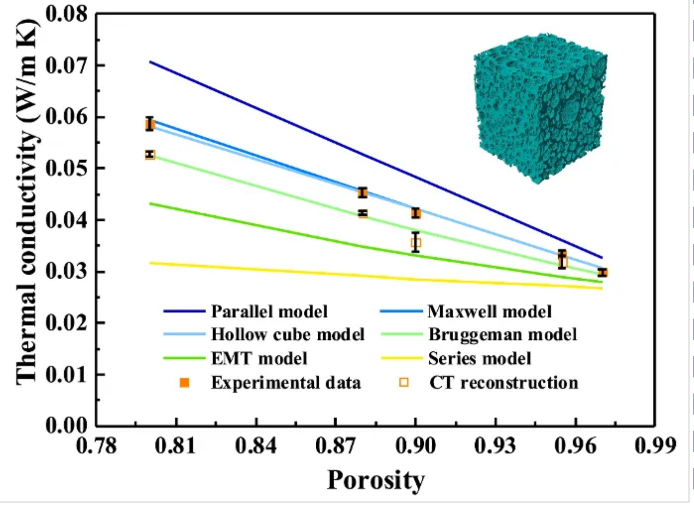


用于固体、液体和纳米粉末热导率测量的独立传感器的设计与应用

Rev. Sci. Instrum., 2011, 82(4), 045106.

测量多孔材料的热导率:





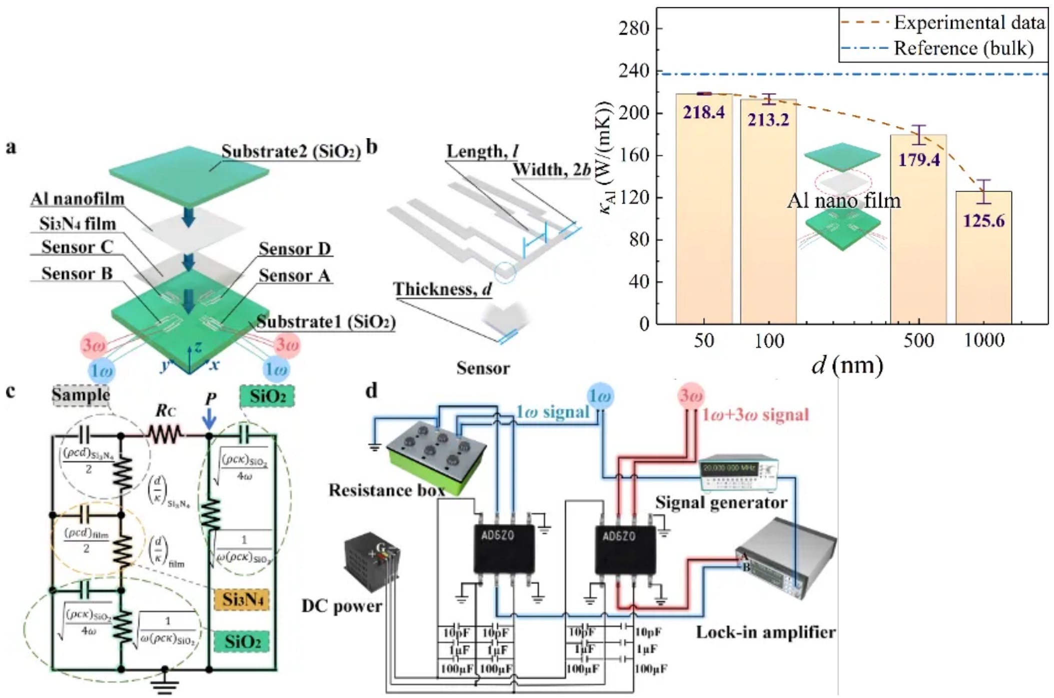
基于RS泡沫均匀和非均匀传热模型的热导率孔隙率依赖性的实验结果

Appl. Therm. Eng., 2018, 30, 1004-1011.

- 适用于3ω法热物性测量技术的独立式传感器。得益于Kapton薄膜的保护，与传统的3ω法传感器相比，新传感器的机械强度和适用性大大提升。

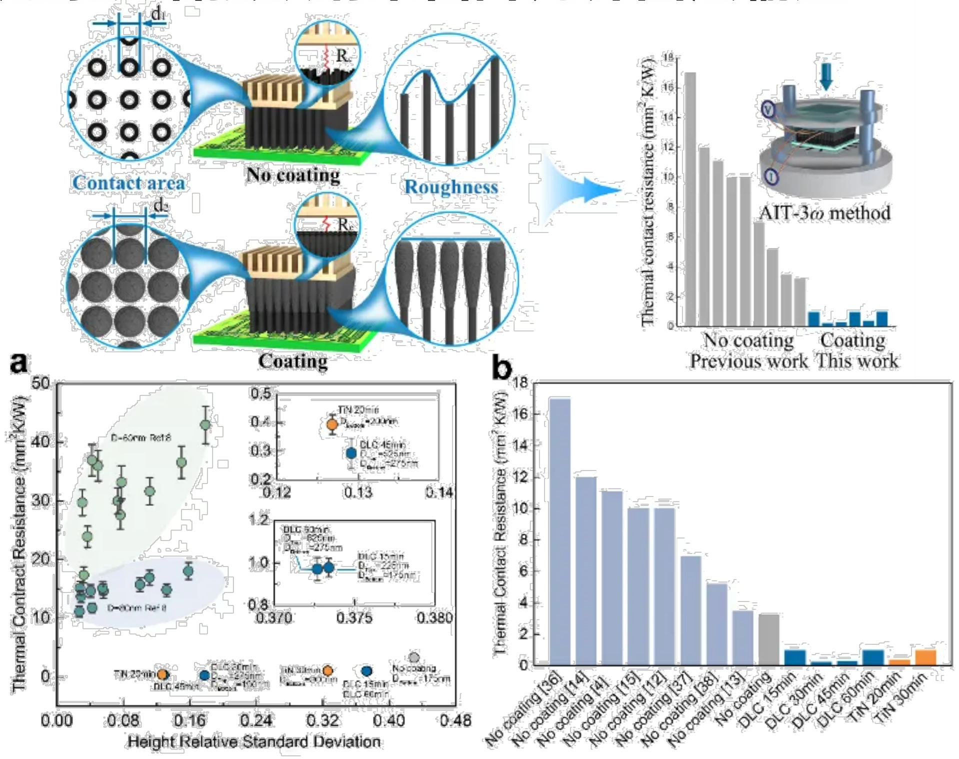
测量薄膜热导率

厚度变化下铝纳米膜的内部孔道热障效应:



采用磁控溅射将金属传感器沉积在纳米薄膜上进行热导率测量

利用涂层增强碳纳米管阵列界面热输运:



柔性CNT阵列的面内热导率增加7倍，接触热阻降低4倍

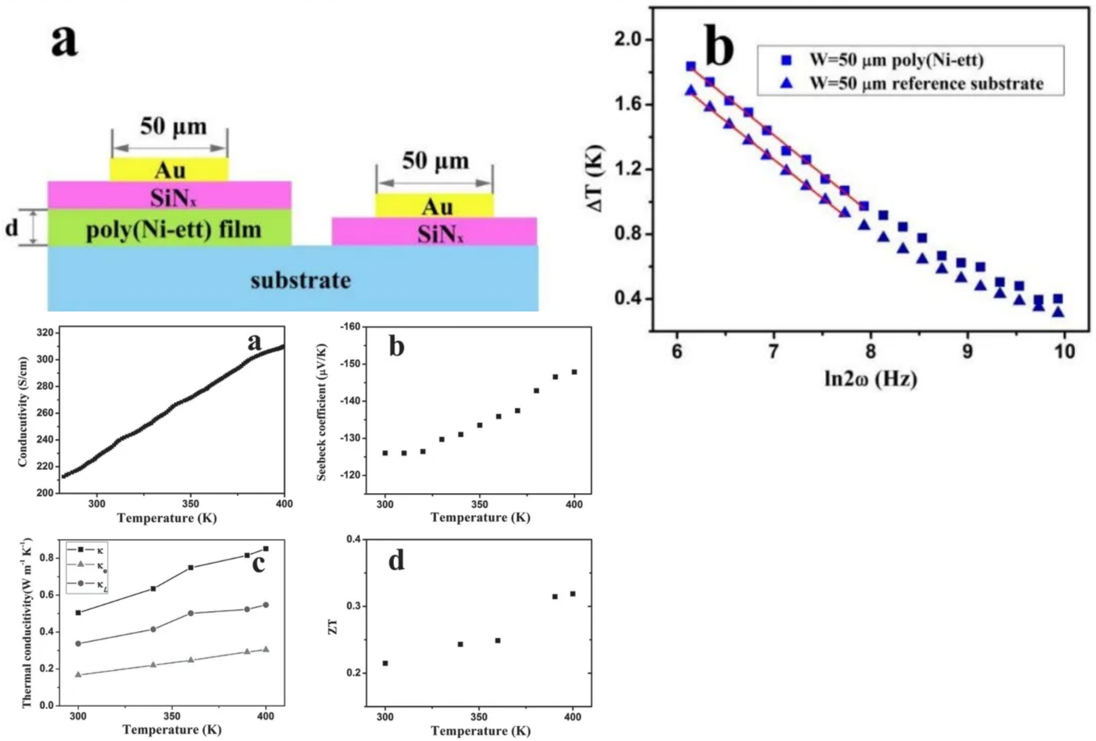
Int. J. Heat Mass Tran., 2021, 162, 106781.

Carbon, 2019, 145, 725-733.

- **传统沉积金属传感器。得益于绝缘薄膜的保护，结合热阻抗网络图，测量超薄薄膜的法向热导率。**

测量热电性能、各向异性

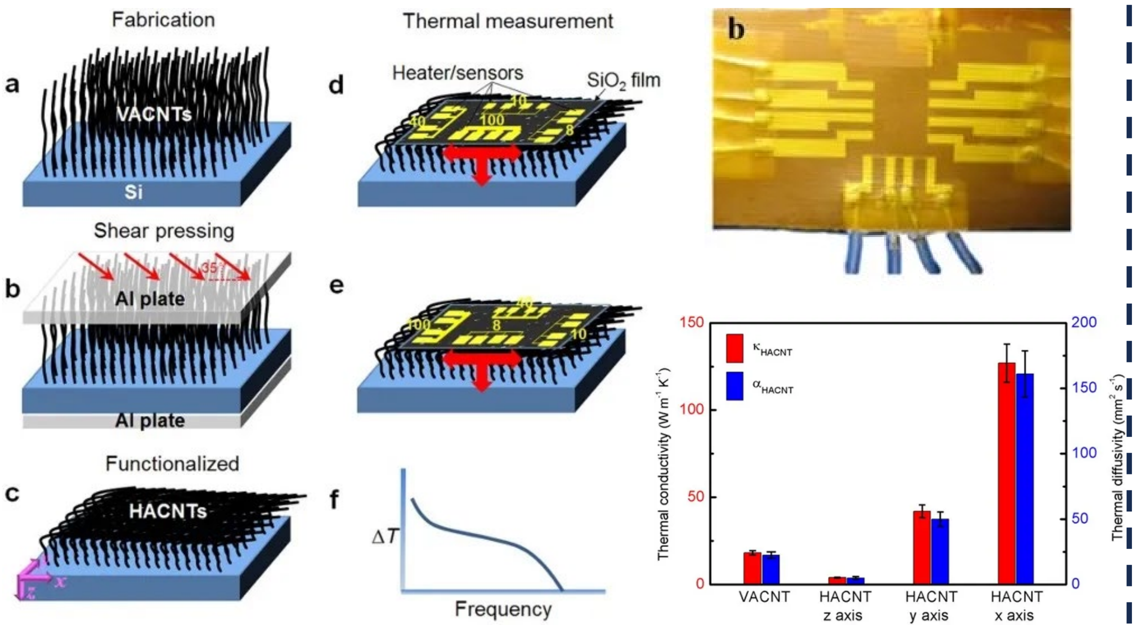
高性能热电薄膜的窄带隙半导体行为:



采用磁控溅射将金属传感器沉积在纳米薄膜上
和基底上进行塞贝克系数测量

Adv Mater., 2016, 28(17), 3351-3358.

碳纳米管阵列膜各向异性热运输:



利用多传感器布局排布测量薄膜
各向异性热导率

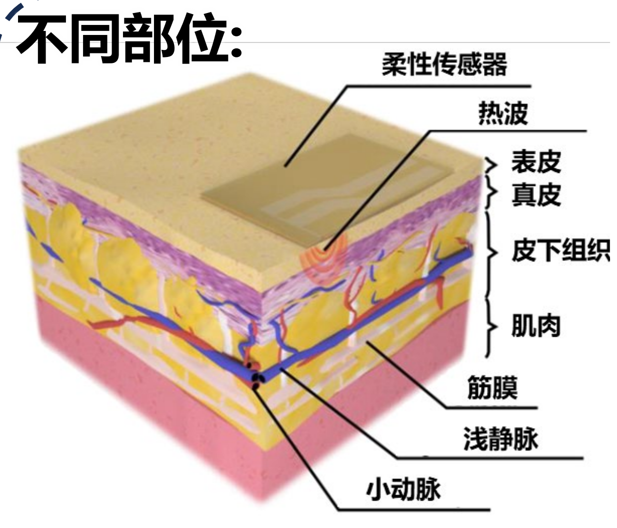
Sci. Rep., 2016, 6, 21014.

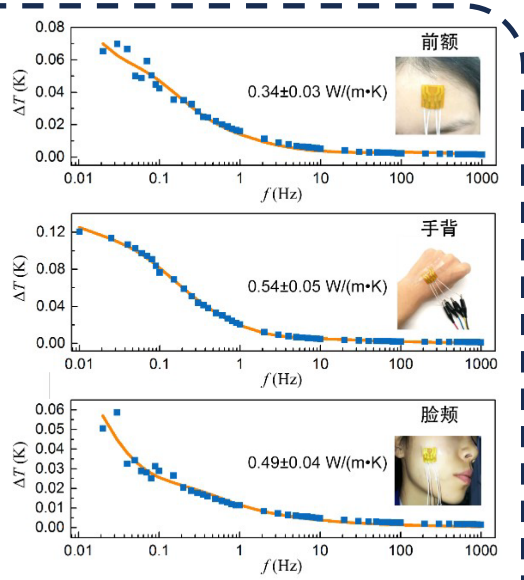
- 拓宽反演模型复杂度，拓宽塞贝克系数和各向异性热导率的测量。

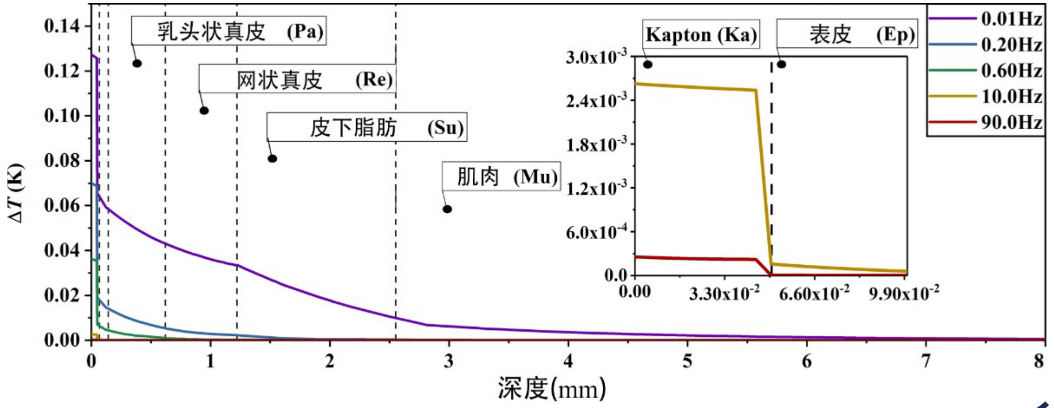
应用案例

测量皮肤热导率、含水量

不同部位:

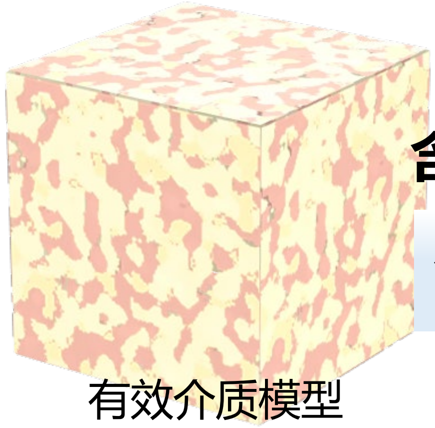






Int. J. Heat Mass Tran., 2020, 163, 120550.

皮肤含水量提取:

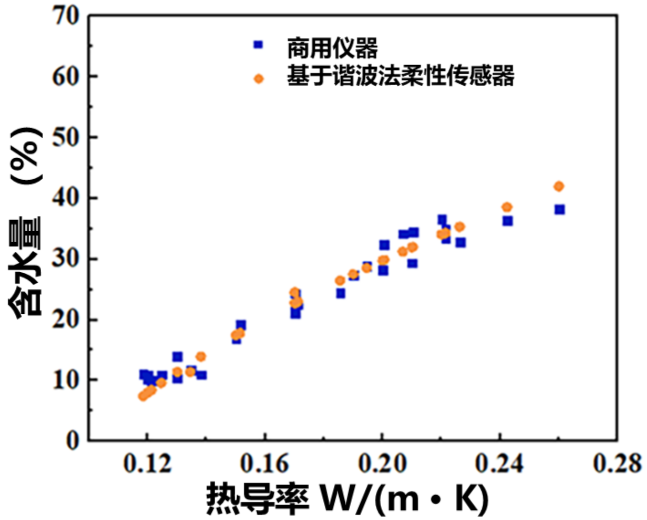


有效介质模型

含水量计算:

$$\nu_2=1.36\lambda_e -0.04\frac{1}{\lambda_e} +0.265$$

- **商用仪器:**
  皮下10-35μm
- **柔性传感器:**
  ~2mm 且可控

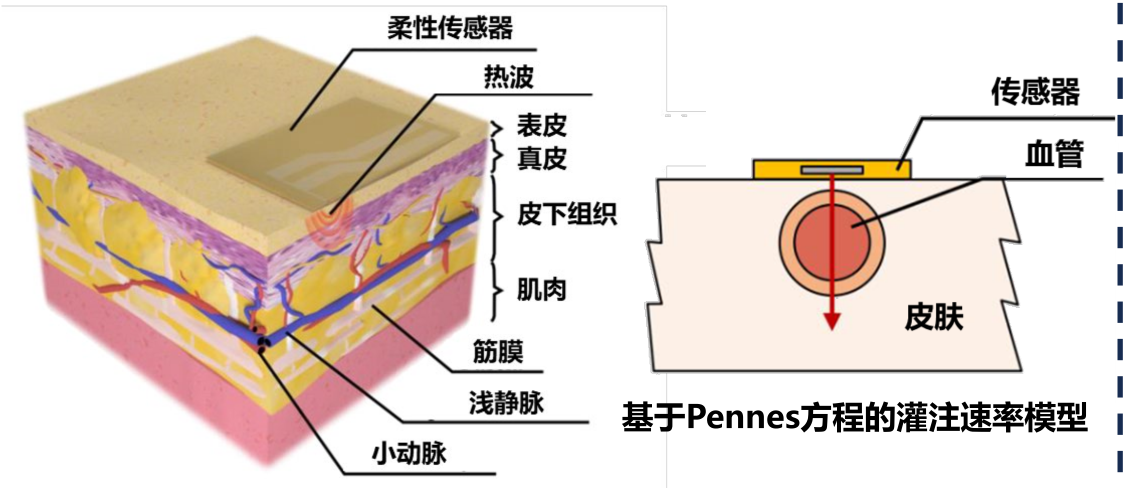


Int. J. Heat Mass Tran., 2022, 197, 123328.

- 通过热穿透深度与频率的分析模拟，能提取不同生物组织的热导率。
- 在含水量 10 - 40% 的范围内，和商用仪器测量结果一致。

测量血液灌注率、深度学习模型

生物热模型耦合：



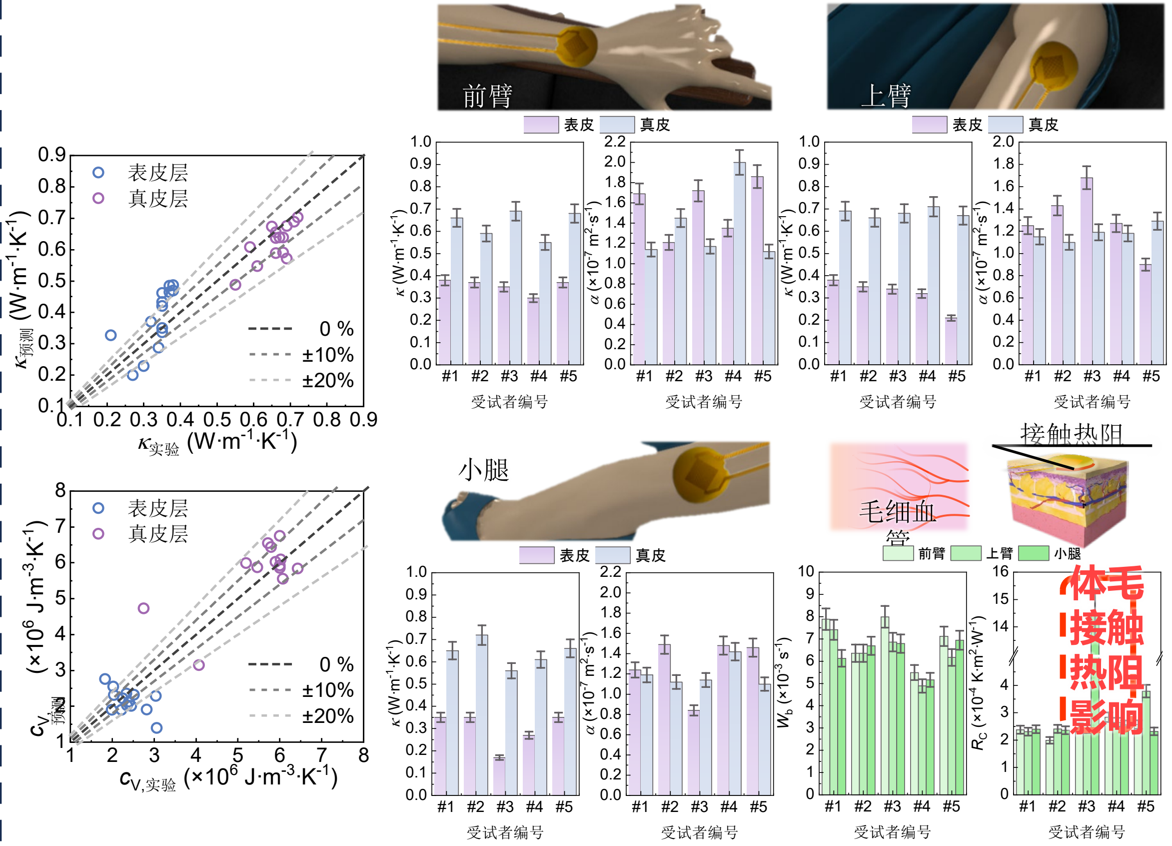
基于Pennes方程的灌注速率模型

$$\Delta T(r) = \left(q^2 - \frac{\rho_b c_b W_b}{\lambda_{z,t}}\right)^{-1}\left(\frac{d\Delta T(r)}{dr} + \frac{1}{r}\frac{d^2\Delta T(r)}{dr^2}\right)$$

t : 组织　b : 血液

Nano Res., 2024, 17(5), 4420-4427.

皮肤热物性测量：



深度学习模型

不同皮肤部位的测量效果

ACS Sens., 2025, 10, 7679-7689

- 基于生物热模型耦合的谐波法技术，实现皮下灌注率测量。