

超导边沿转变探测器吸收体热传导仿真

陈艳玲, 黎发军, 梁亚杰, 崔伟, 金海, 丁骄, 华心言, 黄瑞, 王国乐, 王思凡, 王焯儒, 张宇宁
天文系, 清华大学, 北京, 中国

简介: 本文通过模拟稳态下超导边沿转变探测器 (TES) 探测器的热传导, 旨在得到探测器的热分布, 研究不同支撑方案下吸收体传导到TES表面和基底的热通量, 找到最优支撑方案的参数范围, 为今后的器件设计和实验安排提供参考。

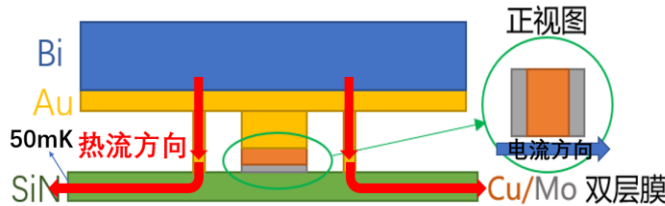


图 1. TES探测器几何结构及热路示意图

计算方法: 由于探测器处于低温真空系统下, 不存在对流, 又因为热辐射的影响很小, 故对辐射忽略不计, 只考虑热传导情况。

如上图1, Bi-Au双层膜是吸收体, 吸收体下方是Cu/Mo双层膜, 也就是TES, 它长在SiN基底上。TES和氮化硅基底之间沉积了一层Au, 吸收体和SiN之间也沉积了若干Au支撑柱。我们的设计目标是使由吸收体传导到TES上的热量是由支撑柱传导到SiN基底上的10倍及以上。

首先研究了Bi-Au双层膜的横向导热^[1], 给双层膜一端施加不同功率, 另一端保持50mK。根据P-T图计算得其横向热导约为 8×10^5 W/K, 由材料计算得到总热容约为 2.5×10^{-7} J/K, 由弛豫时间^[2]公式

$$\tau \sim C/G$$

得到吸收体横向热扩散时间约为 3.1×10^{-13} s, 由于典型Cu/Mo器件的响应时间在200 μ s - 1ms左右^[3], 因此吸收体横向热扩散时间远小于器件响应时间, 故可认为吸收体是等温的。

然后研究TES探测器整体的热分布, 如图2所示。在4根支撑柱的情况下, 由于探测器沿x, y轴是完全对称的, 因此可以只研究其1/4; 同理在2根支撑柱的情况下只用研究其1/2。考虑探测器接收光子饱和和能量为2keV, 并假设器件的响应时间为1ms, 若输入的热脉冲完全不重叠, 器件每秒接收的光子数约为1000个, 因此吸收体的接受的热功率约为 10^{-13} W量级。由此将吸收体作为一个体热源, 给吸收体施加一个恒定功率 1×10^{-13} W。将SiN基底外边缘设为50mK, 温度初始值设为50mK。

结果: 对4根和2根支撑柱时的情况进行了热分布模拟, 并对不同支撑柱半径和支撑柱位置进行扫描, 获得结果如下图3-5所示。由图3可得SiN基底的温度分布, 在TES和支撑柱附近有温度梯度, 这说明吸收体的热量主要由支撑柱和TES向SiN基底边缘传导。图4描述了在支撑柱距离SiN基底边缘为50 μ m时, 对支撑柱半径进行扫描, 得到支撑柱

半径更大且支撑柱越少时, 通过TES的热通量比更大。由图5, 当支撑柱半径为定值时, 对支撑柱与SiN基底边缘的距离进行扫描, 可得支撑柱越靠近中央, 且数量越少, 通过TES的热通量比越大。

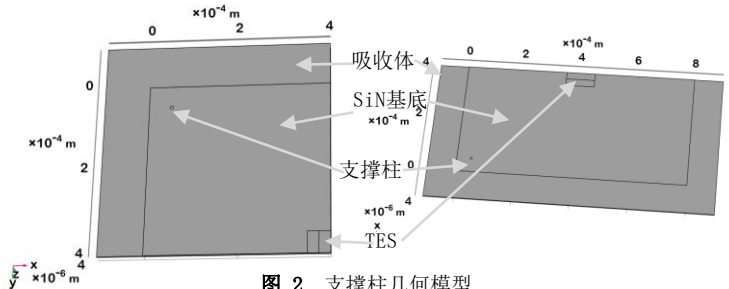


图 2. 支撑柱几何模型
(左: 四根支撑柱1/4构型, 右: 两根支撑柱1/2构型)

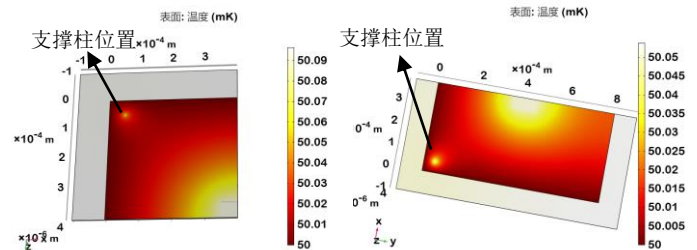


图 3. 稳态时探测器的温度分布 (左: 4根支撑柱, 右: 两根支撑柱)

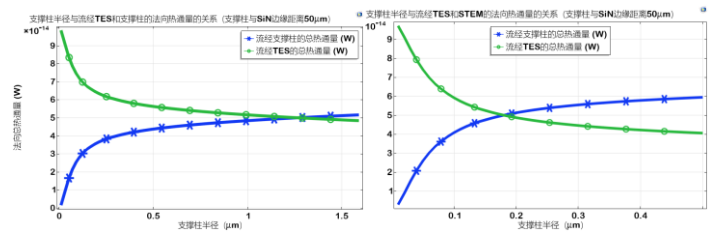


图 4. 热通量与支撑柱半径的关系 (左: 2根支撑柱, 右: 4根支撑柱)

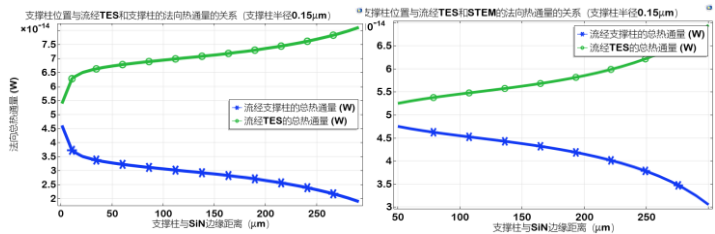


图 5. 热通量与支撑柱位置的关系 (左: 2根支撑柱, 右: 4根支撑柱)

结论:

- 1) 支撑柱数量越少, 通过TES的热通量比越大。
- 2) 支撑柱半径越大, 通过TES的热通量比越小。
- 3) 支撑柱位置越靠中间, 通过TES的热通量比越大。

参考文献:

1. X Wang, A finite element simulation of transition-edge sensor for measuring kinetic energy of fission fragments, EPJ Web of Conferences 239, 17022 (2020)
2. Irwin, K.D. and G.C. Hilton, Transition-edge sensors, in Cryogenic particle detection. 2005, Springer, p. 63-150.
3. A practical superconducting-microcalorimeter X-ray spectrometer for beamline and laboratory science. Rev Sci Instrum. 2017 May;88(5):053108. doi: 10.1063/1.4983316.