

热电式微波功率传感器的优化设计^{*}

韩 磊 黄庆安[†] 廖小平

(东南大学 MEMS 教育部重点实验室, 南京 210096)

摘要: 提出了一种热电式微波功率传感器的二维热分布解析模型, 通过分析传感器的各种结构参数对热分布的影响, 给出了热电式微波功率传感器的优化设计. 为了获得高灵敏度, 给出了设计膜的厚度、匹配电阻与热电堆热端的距离、热电堆悬浮部分的长度等结构参数的原则, 并利用 Ansys 模拟结果和解析结果进行对比验证, 结果显示两者吻合较好, 说明了解析模型的适用性, 可在设计该类传感器时参考.

关键词: 热电式; 微波功率; 解析模型; 二维热分布

EEACC: 2575; 8460

中图分类号: TN377; TN405

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2008)04-0789-05

1 引言

在微波技术研究中, 微波功率是表征微波信号特征的一个重要参数, 它在微波和毫米波无线应用和测量技术中占有重要的地位. 这些应用要求功率传感器具有小体积、良好的微波特性并且能够与 GaAs 工艺或 Si 工艺相兼容. 基于热电偶的功率传感器是广泛应用的微波功率测量方法之一. 这种功率传感器的原理是将待测微波功率通过匹配电阻转化为热量, 导致电阻周围温度的变化, 再利用放置在电阻附近的热电堆探测温度的变化, 并输出热电势实现微波功率的测量. 最近, 提出了基于 MEMS 技术的热电式微波功率传感器. 这些功率传感器可以通过标准 CMOS^[1,2] 或 GaAs MMIC^[3,4] 工艺加上衬底掏空的后处理工艺加以制作. 这种功率传感器的最重要性能是灵敏度, 它等于输出热电势与输入待测微波功率之比. 因此, 该传感器的设计重点在于获得尽可能高的灵敏度. 本文的主要目标是得出灵敏度与结构参数(包括膜的厚度、匹配电阻与热电堆热端的距离、热电堆悬浮部分的长度等)的关系, 从而达到优化结构的目的. 为此, 需要得到传感器的二维热分布解析表达式, 以预测不同结构参数下的灵敏度.

为了优化结构, Kozlov^[5,6] 研究了一种类似于微波功率传感器的热电辐射传感器结构, 并提出了一维解析表达式. 但是, 一维模型因为过于简单而导致对传感器热分布的计算不准确. Swart 等人^[7] 和 Milanovic 等人^[8] 提出了将传感器结构分为很多小的单元, 每个单元都等效为电路模型, 并用一个电路模拟器加以解决的方法. 利用这种方法得出的功率传感器的二维温度分布需要利用电路模拟器得出计算结果, 较为复杂; 并且由于是利用模拟器输出结果, 因此其物理意义不明确, 且不利于结构的优化. 本文提出了一种简单、准确的计算传

感器二维热分布的方法, 该方法无需借助电路模拟器, 计算方便快捷, 并且各个结构参数在模型中的意义明确, 便于优化结构参数以提高器件的灵敏度. 计算结果与 Ansys 模拟结果符合得很好, 因此可在设计传感器时参考.

2 热学模型

典型的热电式微波功率传感器的结构如图 1 所示. 传感器由匹配电阻和热电堆组成, 在匹配电阻和热电堆

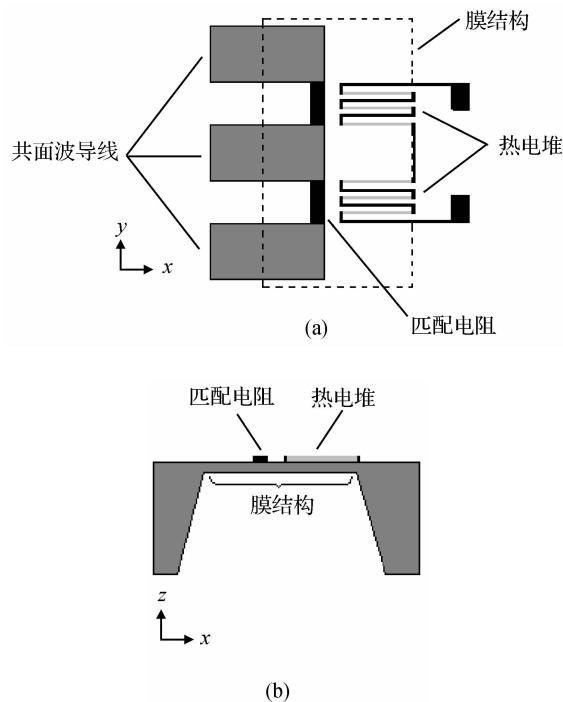


图 1 热电式微波功率传感器典型结构 (a) 俯视图; (b) 剖面图
Fig.1 Schematic view of a typical thermoelectric microwave power sensor (a) Top view; (b) Cross section view

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 60676043)和装备预先研究资助项目

[†] 通信作者. Email: hqa@seu.edu.cn

2007-09-17 收到, 2007-10-08 定稿

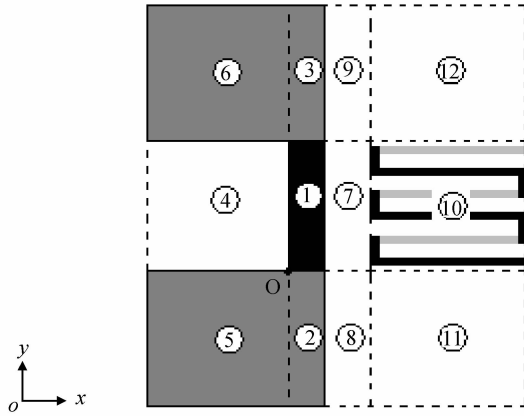


图 2 热电式微波功率传感器结构区域划分图

Fig.2 Division of 12 zones of the structure of the thermoelectric microwave power sensor

热端下方的衬底被掏空并形成膜结构,热电堆冷端放置在未掏空的衬底上,衬底因具有高的热导率和热容可以近似为热沉.衬底的温度近似与环境温度 T_0 相等.由于膜结构的厚度大大小于整个器件的尺寸,因此可认为温度分布在器件的任意横截面上是均匀的,热学模型是二维的.

由于是对称结构,因此只需要考虑一半的结构即可.将该结构划分成如图 2 所示的 12 个区域,每个区域的结构尺寸分别为:长度 L_i ,宽度 W_i ,厚度 t_i ($i=1\sim 12$),坐标系的选取如图 2 所示.对于不同的区域,有些结构尺寸是相同的:

$$L_1 = L_2 = L_3, L_4 = L_5 = L_6, \\ L_7 = L_8 = L_9, L_{10} = L_{11} = L_{12} \quad (1)$$

$$W_1 = W_4 = W_7 = W_{10}, W_2 = W_5 = W_8 = W_{11}, \\ W_3 = W_6 = W_9 = W_{12} \quad (2)$$

$$t_2 = t_3 = t_5 = t_6, t_4 = t_7 = t_8 = t_9 = t_{11} = t_{12} \quad (3)$$

其中 厚度 t_i 又表示为

$$t_1 = t_s + t_r, t_2 = t_3 = t_5 = t_6 = t_s + t_m, \\ t_4 = t_7 = t_8 = t_9 = t_{11} = t_{12} = t_s, t_{10} = t_s + t_c \quad (4)$$

$$R' = \frac{\frac{L_4}{2 \times \lambda_4 \times t_4 \times dy} \times \left(\frac{L_7 + L_1}{2 \times \lambda_7 \times t_7 \times dy} + \frac{L_{10}}{2 \times \lambda_{10} \times t_{10} \times dy} \right)}{\frac{L_4}{2 \times \lambda_4 \times t_4 \times dy} + \frac{L_7 + L_1}{2 \times \lambda_7 \times t_7 \times dy} + \frac{L_{10}}{2 \times \lambda_{10} \times t_{10} \times dy}} \quad (11)$$

(10)式的边界条件为

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} \Big|_{y=0} = -q_{12}, -\lambda_1 \frac{\partial (T_1 - T_0)}{\partial y} \Big|_{y=W_1} = q_{13} \quad (12)$$

式中 q_{12} 和 q_{13} 分别是区域 1 和区域 2、区域 1 和区域 3 之间的热流密度.

根据边界条件(12)式,可得到区域 1 的温度分布表达式.式中的热流密度 q_{12} 和 q_{13} 为未知量,其值需要通过联立区域 1 与区域 2 以及区域 1 与区域 3 的边界条件获得.

式中 t_s 是膜的厚度; t_r 是匹配电阻的厚度; t_m 是共面波导线金属层的厚度; t_c 是热电堆的等效厚度,可表示为

$$t_c = \beta \frac{t_p + t_n}{2} \quad (5)$$

式中 t_p 和 t_n 分别是热电偶的金属热偶臂和半导体热偶臂的厚度; β 是热电堆的热偶臂宽度占整个热电堆宽度之比.

为了方便建模,模型的各个区域的材料热学参数都取等效平均值,则等效的热导率 λ_i 为

$$\lambda_1 = \frac{\lambda_s t_s + \lambda_r t_r}{t_1} \quad (6)$$

$$\lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_5 = \lambda_6 = \frac{\lambda_s t_s + \lambda_m t_m}{t_2} \quad (7)$$

$$\lambda_4 = \lambda_7 = \lambda_8 = \lambda_9 = \lambda_{11} = \lambda_{12} = \frac{\lambda_s t_s}{t_4} \quad (8)$$

$$\lambda_{10} = \frac{\lambda_s t_s + \frac{\lambda_p + \lambda_n}{2} t_c}{t_{10}} \quad (9)$$

式中 $\lambda_s, \lambda_r, \lambda_m, \lambda_p$ 和 λ_n 分别是膜、电阻、金属层、热电偶正导体材料和负导体材料的热导率.

为了优化传感器结构,需要获得二维热分布的解析表达式.借鉴 Kozlov^[5,6] 提出的一维模型的方法,我们首先对 y 方向上利用一维模型求解,而 x 方向的影响则利用微分集总热阻加以联系.这样,我们便可以求出匹配电阻上的一维热分布.随后,将此一维热分布作为边界条件,求解二维导热微分方程,最终得到整个器件的二维热分布.这种方法将一维模型和二维导热微分方程结合起来,在提高了准确性的同时避免了计算的过于复杂.为了得到 y 方向的温度分布,首先需要对区域 1,2 和 3 加以考虑.区域 1 的稳态傅里叶热方程为

$$-\lambda_1 L_1 t_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} dy + h_1 L_1 (T_1 - T_0) dy \\ = q_v t_r L_1 dy - \frac{(T_1 - T_0)}{R'} \quad (10)$$

式中 T_1 是区域 1 的温度分布; T_0 是环境温度; h_1 是区域 1 的对流换热系数; q_v 是区域 1 的发热率; R' 是 x 方向总的微分热阻,可表示为^[9]

区域 2 和区域 3 的稳态傅里叶热方程为

$$-\lambda_2 L_2 t_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} dy + h_2 L_2 (T_2 - T_0) dy = -\frac{(T_2 - T_0)}{R''} \quad (13)$$

$$-\lambda_3 L_3 t_3 \frac{\partial^2 T_3}{\partial y^2} dy + h_3 L_3 (T_3 - T_0) dy = -\frac{(T_3 - T_0)}{R'''} \quad (14)$$

式中 T_2 和 T_3 分别为区域 2 和区域 3 的温度分布; h_2 和 h_3 分别为区域 2 和区域 3 的对流换热系数; R'' 和 R''' 分别为区域 2 和区域 3 在 x 方向总的微分热阻,表示为^[9]

$$R'' = \frac{\frac{L_5}{2 \times \lambda_5 \times t_5 \times dy} \times \left(\frac{L_8 + L_2}{2 \times \lambda_8 \times t_8 \times dy} + \frac{L_{11}}{2 \times \lambda_{11} \times t_{11} \times dy} \right)}{\frac{L_5}{2 \times \lambda_5 \times t_5 \times dy} + \frac{L_8 + L_2}{2 \times \lambda_8 \times t_8 \times dy} + \frac{L_{11}}{2 \times \lambda_{11} \times t_{11} \times dy}}$$

$$R''' = \frac{\frac{L_6}{2 \times \lambda_6 \times t_6 \times dy} \times \left(\frac{L_9 + L_3}{2 \times \lambda_9 \times t_9 \times dy} + \frac{L_{12}}{2 \times \lambda_{12} \times t_{12} \times dy} \right)}{\frac{L_6}{2 \times \lambda_6 \times t_6 \times dy} + \frac{L_9 + L_3}{2 \times \lambda_9 \times t_9 \times dy} + \frac{L_{12}}{2 \times \lambda_{12} \times t_{12} \times dy}} \quad (15)$$

(13)和(14)式的边界条件分别为

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} \Big|_{y=0} = -q_{12}, \quad \frac{\partial T_2}{\partial y} \Big|_{y=-w_2} = 0 \quad (16)$$

$$-\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} \Big|_{y=w_1} = q_{13}, \quad T_3 \Big|_{y=w_1+w_3} = T_0 \quad (17)$$

根据边界条件(16)和(17)式,可得到区域2和3的温度分布表达式.区域1和2的边界 $y=0$ 处以及区域1和3的边界 $y=w_1$ 处需满足条件

$$T_1 \Big|_{y=0} = T_2 \Big|_{y=0}, T_1 \Big|_{y=w_1} = T_3 \Big|_{y=w_1} \quad (18)$$

利用边界条件(18)式,就可得到 q_{12} 和 q_{13} 的表达式,进而得到沿 y 方向的温度分布.以此温度分布为边界条件,可得包含有热电堆的长度为 $L_1 + L_7 + L_{10}$,宽度为 $W_1 + W_2 + W_3$ 的矩形区域的二维导热微分方程

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (19)$$

此矩形区域的边界条件为

$$\begin{cases} T \Big|_{y=w_1+w_3} = T_0 \\ \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=-w_2} = 0 \end{cases}, \quad \left\{ T \right\}_{x=0} = \begin{cases} T_3 & W_1 < y < W_1 + W_3 \\ T_1 & 0 < y < W_1 \\ T_2 & -W_2 < y < 0 \end{cases} \quad (20)$$

$$T \Big|_{x=L_1+L_7+L_{10}} = T_0$$

求解此简单边界条件下的二维导热微分方程,最终就可得到功率传感器的二维温度分布,由此,则可以得出热电偶的冷端和热端的温度差 ΔT 、热电堆输出热电势和传感器的灵敏度分别为

$$\Delta T = T_7 \Big|_{x=L_1+L_7} - T_0 \quad (21)$$

$$V_{\text{out}} = \alpha \sum_{j=1}^N (T_j \Big|_{x=L_1+L_7} - T_0) \quad (22)$$

$$S = \frac{V_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \quad (23)$$

式中 $T_i \Big|_{x=x_i}$ 是热电偶热端的温度; T_0 是热电偶冷端温度,它与环境温度相等; α 是 Seebeck 系数; N 是组成热电堆的热电偶对数; P_{in} 是输入的微波功率.

传感器的功率测量下限由噪声大小决定,其噪声电压功率谱密度和信噪比分别为

$$V_n = (4NkTRB)^{1/2} \quad (24)$$

$$\text{SNR} = \frac{S}{V_n} \quad (25)$$

式中 k 是玻耳兹曼常数; R 是单个热电偶电阻; B 是带宽; T 是热电偶的平均温度.单个热电偶电阻 R 和热

电偶的平均温度分别表示为

$$R = R_{\square} \times \frac{L}{W} \quad (26)$$

$$T = \frac{T_h + T_0}{2} \quad (27)$$

式中 $R_{\square}$ 是热电偶的方块电阻; L 和 W 是单个热电偶的长度和宽度; T_h 是热电偶热端的温度.

3 优化结果与分析

为了设计出具有优良特性的终端式微波功率传感器,需要尽可能地提高灵敏度 S ,这就需要针对不同结构参数的热分布进行比较分析,找出最优化的结构.

由以上对终端式微波功率传感器的分析可以看出,要增大灵敏度 S ,就需要使热电堆的热端温度尽可能高,而热端温度是与膜的厚度 t_s 、匹配电阻与热电堆热端的距离 L_7 以及热电堆悬浮部分的长度 L_{10} 有关.由于这些相互关系,就需要对每个结构参数进行分析,权衡其对传感器整体性能的影响.

为了对传感器结构进行分析计算,取传感器各部分的材料参数和结构参数如下:

终端式微波功率传感器通常制作在 GaAs 衬底上, GaAs 衬底作为热沉的热导率为 $\lambda = 46 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$. 其上为 AlGaAs 层构成的膜结构,热导率为 $\lambda_s = 10 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$. 构成热电偶的正负导体材料及相关参数为:正导体材料为金,其热导率为 $\lambda_p = 315 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,厚度为 $t_p = 0.3 \mu\text{m}$;负导体材料为 n 型 GaAs,其热导率为 $\lambda_n = 46 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,厚度为 $t_n = 0.3 \mu\text{m}$. 构成共面波导线的金属材料也为金,其热导率为 $\lambda_m = 315 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,厚度为 $t_m = 2.3 \mu\text{m}$, $\beta = 4/9$. 构成匹配电阻的材料为 TaN,其热导率为 $\lambda_r = 34.7 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,厚度为 $t_r = 1.0 \mu\text{m}$. 区域 1 的宽度为 $58 \mu\text{m}$,区域 2,5,8 和 11 的宽度为 $50 \mu\text{m}$,区域 3,6,9 和 12 的宽度为 $100 \mu\text{m}$,区域 1,2 和 3 的长度为 $14.5 \mu\text{m}$ (此长度为区域 1 宽度的 $1/4$,用于构成阻值为 50Ω 的匹配电阻),区域 4,5 和 6 的长度为 $30 \mu\text{m}$,其他结构参数为用于优化设计的可变参数.取环境温度 T_0 为 300 K .

首先分析膜的厚度的改变对温度分布的影响,膜的厚度的减小会导致热阻增加,它一方面会使得匹配电阻上的温度增加,从而有利于提高灵敏度;另一方面则会增大电阻到热电堆热端的温度差,使灵敏度下降.因此,这两方面因素的相互制约会对灵敏度产生很大影响.图 3 为膜的厚度分别是 $0.5, 1.0$ 和 $1.5 \mu\text{m}$ 时,匹配电阻上

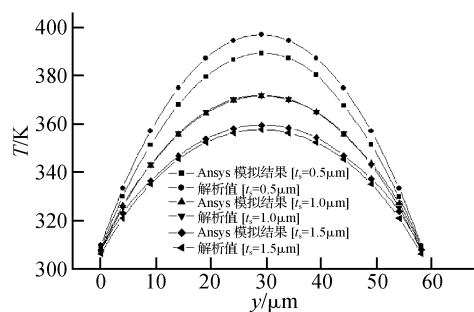


图3 膜厚度分别为0.5,1.0和1.5 μm 时,匹配电阻上温度分布的Ansys模拟值和解析值

Fig.3 Temperature distribution across one termination resistor with different membrane thicknesses of 0.5, 1.0 and 1.5 μm for Ansys simulative and analytical results

温度分布的 Ansys 模拟值和解析值. 图4 为在 0.5~1.5 μm 厚度下的热电堆热端最高温度的 Ansys 模拟值和解析值.

由图3和图4可见,在通常膜厚度的设计范围(0.5~1.5 μm)内,匹配电阻上的温度随着膜厚度的减小而升高,与此同时,热电堆热端会随着厚度的减小而升高,这说明膜厚度的降低能够提高整个器件的灵敏度,在设计时应该尽可能的减小膜厚度.对于减小膜厚度产生的屈曲问题,根据屈曲理论,在膜厚度较大时(1.0~1.5 μm)不会发生屈曲,而在膜厚度较小时(0.5~1.0 μm)其挠度小于2.5 μm .由于本器件是基于热分布而非热变形/应变原理工作的,因此这样小的挠度不会对器件的工作原理及性能造成显著影响,又由于器件的工作温度相对较低,其结构中的应力强度也不足以导致常见的可靠性问题.

其次分析匹配电阻与热电堆热端的距离改变对温度分布的影响,匹配电阻与热电堆热端的距离的减小会导致热阻的减小,它会使得匹配电阻上的温度降低,不利于提高灵敏度,但与此同时,它也会降低电阻到热电堆热端的温度差,使灵敏度增加.因此,两者之间的关系会对灵敏度产生很大影响.图5为匹配电阻与热电堆热端的距离分别是5,10和15 μm 时,匹配电阻上温度分

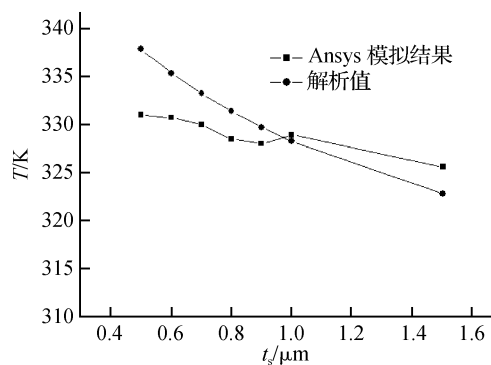


图4 不同膜厚度下的热电堆热端最高温度的 Ansys 模拟值和解析值
Fig.4 Highest temperature of the hot junctions of the thermopile at different membrane thicknesses for Ansys simulative and analytical results

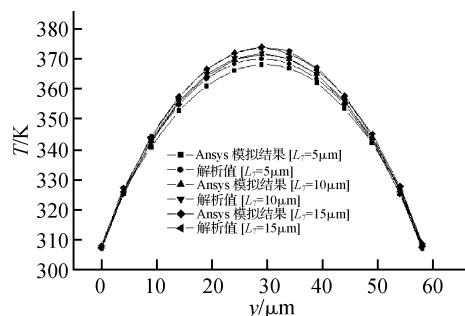


图5 匹配电阻与热电堆热端的距离分别为5,10和15 μm 时,匹配电阻上温度分布的Ansys模拟值和解析值

Fig.5 Temperature distribution across one termination resistor with different distances between the resistor and the hot junctions of the thermopile of 5,10 and 15 μm for Ansys simulative and analytical results

布的 Ansys 模拟值和解析值. 图6 为在 5~15 μm 距离下的热电堆热端最高温度的 Ansys 模拟值和解析值.

由图5和图6可见,随着匹配电阻与热电堆热端距离的减小,会导致匹配电阻上温度的降低,但它不足以抵消热电堆热端由于靠近热源而引起的温度升高,因此,在设计结构时,可以通过减小匹配电阻与热电堆热端距离以提高灵敏度.

最后分析热电堆悬浮长度的改变对温度分布的影响.由于衬底可以看作是热沉,因此热电堆悬浮长度的增加使得热源与热沉间的热阻变大,这会使得匹配电阻上的温度升高.同时,由于悬浮长度的增加使得热电堆热端与热沉之间的热阻变大,而匹配电阻与热电堆热端之间的热阻不变,这就使得热电堆热端的温度升高,有利于灵敏度的提高.图7为热电堆悬浮长度分别是20,50和80 μm 时,匹配电阻上温度分布的 Ansys 模拟值和解析值.图8为在20~80 μm 厚度下的热电堆热端最高温度的 Ansys 模拟值和解析值.

由图7和图8可见,匹配电阻上的温度随着热电堆悬浮长度的增加而升高,但变化并不是很大,同时热电堆热端的最高温度也随着悬浮长度的增加而升高,但趋向于一个极限值.由此可见,增加热电堆的悬浮长度有

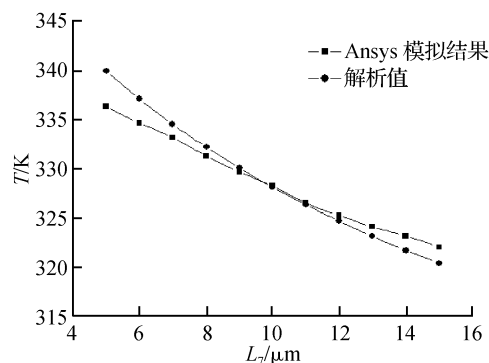


图6 不同距离下的热电堆热端最高温度的 Ansys 模拟值和解析值
Fig.6 Highest temperature of the hot junctions of the thermopile at different distances between the resistor and the hot junctions of the thermopile for Ansys simulative and analytical results

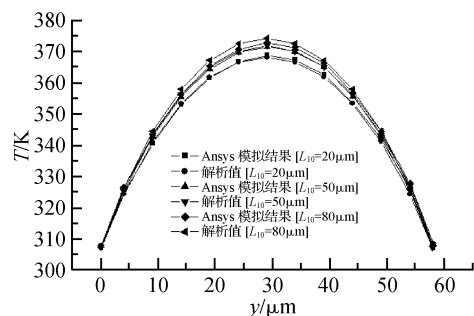


图7 热电堆悬浮长度分别为20,50和80 μm 时,匹配电阻上温度分布的Ansys模拟值和解析值

Fig.7 Temperature distribution across one termination resistor with different suspended lengths of the thermopile of 20,50 and 80 μm for Ansys simulative and analytical results

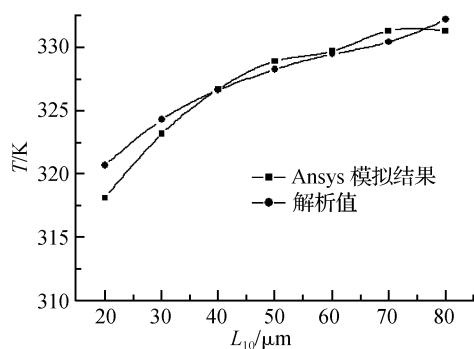


图8 不同悬浮长度下的热电堆热端最高温度的Ansys模拟值和解析值

Fig.8 Highest temperature of the hot junctions of the thermopile at different suspended lengths of the thermopile for Ansys simulative and analytical results

利于提高灵敏度.但是,热电堆的悬浮长度到一定程度后,温度升高十分有限,且悬浮长度的增加会增大热电堆电阻,由(24)和(25)式可知这将导致噪声的增加,从而减小信噪比,因此热电堆的悬浮长度不应取得过大.

4 结论

本文提出了热电式微波功率传感器的二维热分布解析模型,分析了传感器的各种结构参数对热分布的影响,给出了传感器结构优化的方法.通过分析可知,膜的厚度、匹配电阻与热电堆热端的距离、热电堆悬浮长度等设计参数对灵敏度的影响很大,因此需要利用解析模型对这些设计参数进行优化以得到理想的性能.Ansys模拟结果与解析值的对比,说明了本文中解析模型的适用性.

参考文献

- [1] Milanovic V, Gaitan M, Bowen E D, et al. Thermoelectric power sensor for microwave applications by commercial CMOS fabrication. *IEEE Electron Device Lett*, 1997, 18(9): 450
- [2] Milanovic V, Gaitan M, Bowen E D, et al. Implementation of thermoelectric microwave power sensors in CMOS technology. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 1997: 2753
- [3] Dehe A, Krozer V, Chen B, et al. High-sensitivity microwave power sensor for GaAs-MMIC implementation. *Electron Lett*, 1996, 32(23): 2149
- [4] Mutamba K, Beilenhoff K, Megej A, et al. Micromachined 60GHz GaAs power sensor with integrated received antenna. *Proceedings of IEEE MTT-S Symposium*, 2001: 2235
- [5] Kozlov A G. Optimization of thin-film thermoelectric radiation sensor with comb thermoelectric transducer. *Sensors and Actuators A*, 1999, 75: 139
- [6] Kozlov A G. Optimization of thin-film thermoelectric radiation sensor with separate disposition of absorbing layer and comb thermoelectric transducer. *Sensors and Actuators A*, 2000, 84: 259
- [7] Swart N R, Nathan A. Flow-rate microsensor modeling and optimization using SPICE. *Sensors and Actuators A*, 1992, 34: 109
- [8] Milanovic V, Hopcroft M, Zincke C A, et al. Optimization of CMOS MEMS microwave power sensors. *ISCAS'99*, 1999: 144
- [9] Shen G P, Qin M, Huang Q A. SPICE model with lumped circuits for a thermal flow sensor. *IEEE Sensors Conf*, 2006: 1444

Optimization of a Thermoelectric Microwave Power Sensor*

Han Lei, Huang Qing'an[†], and Liao Xiaoping

(Key Laboratory of MEMS of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: A 2D analytical model of the thermal distribution of a thermoelectric microwave power sensor is presented. In order to optimize the size of the sensor, the influences of various structure parameters on the thermal distribution are analyzed. The paper presents the design principle of the parameters, including the membrane thickness, the distance between the matched resistor and the hot junctions of the thermopile, and the suspended length of the thermopile, to achieve high sensitivity. The analytical results agree well with the Ansys simulative results.

Key words: thermoelectric; microwave power; analytical model; 2D thermal distribution

EEACC: 2575; 8460

Article ID: 0253-4177(2008)04-0789-05

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 60676043) and the Defence Advanced Research Program

[†] Corresponding author. Email: hqa@seu.edu.cn

Received 17 September 2007, revised manuscript received 8 October 2007