

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209467

耦合式 MEMS 微波功率传感器的研究^{*}

靳雷生, 辛泽辉, 王德波

(南京邮电大学集成电路科学与工程学院 南京 210023)

摘 要:为了从根本上解决在线式微波功率传感器灵敏度、动态范围和微波性能之间的矛盾,本文创新性地设计出一种耦合在线式 MEMS 微波功率传感器,将微波功率的提取和检测两个过程相互独立。根据理论解析模型,得到了灵敏度特性与耦合度的关系,分析对比了耦合度分别为 10% 和 20% 时的微波特性及灵敏度特性差异。实验结果表明:两种耦合式 MEMS 微波功率传感器的反射损耗均小于 -20 dB,说明具有良好的反射性能;两种耦合式 MEMS 微波功率传感器的插入损耗均大于 -1.5 dB,说明具有良好的传输性能。耦合度 10% 的系统灵敏度为 1.2 mV/W @ 9 GHz、1.4 mV/W @ 10 GHz 和 0.8 mV/W @ 11 GHz,耦合度 20% 的系统灵敏度为 2.4 mV/W @ 9 GHz、2.4 mV/W @ 10 GHz 和 1.3 mV/W @ 11 GHz,并具有良好的线性度。本文对于 MEMS 微波功率传感器研究具有一定的参考价值。

关键词: MEMS 功率传感器;悬臂梁;灵敏度;动态范围;耦合度

中图分类号: TH89 TN62 TP212.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.3030

Study of the coupled MEMS microwave power sensor

Jin Leisheng, Xin Zehui, Wang Debo

(College of Integrated Circuit Science and Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: To solve the contradiction among the sensitivity, the dynamic range and the microwave performance of the on-line microwave power sensor fundamentally, a coupled on-line MEMS microwave power sensor is designed creatively in this article. It makes the extraction and detection of microwave power independent of each other. According to the theoretical analysis model, the relationship of the sensitivity characteristics with the coupling degree is obtained, and the differences are analyzed and compared in microwave characteristics and sensitivity characteristics when the coupling degree are 10% and 20%, respectively. Experimental results show that the reflection loss values of the two kinds of coupled MEMS microwave power sensors are both smaller than -20 dB, indicating that they have good reflection performance. The insertion loss of the two kinds of coupled MEMS microwave power sensors is larger than -1.5 dB, indicating that they have good transmission performance. The sensitivity of the system with 10% coupling degree is 1.2 mV/W@ 9 GHz, 1.4 mV/W@ 10 GHz and 0.8 mV/W@ 11 GHz. And the sensitivity of the system with 20% coupling degree is 2.4 mV/W @ 9 GHz, 2.4 mV/W@ 10 GHz and 1.3 mV/W@ 11 GHz, and they have good linearity. This article has a certain reference value for MEMS microwave power sensors.

Keywords: MEMS power sensor; cantilever; sensitivity; dynamic range; coupling degree

0 引 言

微波功率作为微波信号的一个重要参数,广泛地应用在射频领域,因此实现微波功率的检测显得尤为重要^[1-3]。经济的发展和科技的进步对微波功率传感器的

灵敏度、动态范围、响应时间等提出了更高的要求^[4-5]。

目前,微波功率传感器按照检测原理的不同分为热电式和电容式两种。Dehe 等^[6]在 1995 年首先设计出一种基于 AlGaAs 的插入式微波功率传感器,地线下方热电偶实现热电转换,使其能够在测量 10 GHz 微波信号功率时获得 1.1 V/W 的灵敏度,使得热电式微波功率传感器

的推广应用成为可能。2016 年 Yan 等^[7]提出了一种间接加热式微波功率传感器的等效模型,来分析不同参数下的响应时间特性。2019 年 Chu 等^[8]设计了一种基于 MEMS 热电功率传感器的微波集成探测器,可以用来实现宽频带的微波信号(功率、频率、相位)的综合检测。Li 等^[9]2020 年提出了一种基于热敏电阻的惠斯通全桥结构微波功率传感器,该传感器在 10 GHz 时可达 0.22 mV/mW 的灵敏度且具有不错的阻抗匹配稳定性。Liu 等^[10]2022 年提出一种具有终端负载在线自检测功能的热电式微波功率传感器,其灵敏度在几十 $\mu\text{V}/\text{mW}$ 级别。热电式微波功率检测系统的突出优点是无需偏置、灵敏度高、线性度好,但在应用中存在过载水平过低的缺点,并且无法实现在线检测。

为了解决过载水平低的问题同时实现在线检测, Fernandez 等^[11]首先提出了电容式微波功率传感器的设计理念。Yan 等^[12]于 2018 年研究了电容式微波功率传感器的高功率处理能力,对所设计的固支梁结构的传感器高功率下的非线性做了理论研究。Li 等^[13-14]依次于 2020 年和 2021 年设计了一种基于悬臂梁的电容式微波功率传感器和一种基于双层热电偶的高灵敏度微波功率传感器。但只在 0~1 W 的范围内具有较好的线性输出,并且 MEMS 梁过大的形变会恶化系统的微波性能。后者将线性动态范围提高到 500 mW,灵敏度为 124.3 $\mu\text{V}/\text{mW}$,但动态范围比前者小很多。不难发现,目前,灵敏度和微波性能之间存在的矛盾成为继拓宽动态范围之后电容式微波功率传感器面临的又一难题。其根本原因在于微波信号功率的提取与检测是同时进行的,然而二者相互制约。由于梁的下拉使得输出电容减小,通过优化梁的位移随微波功率的变化率可以在一定程度上提高灵敏度,但由此带来的负面影响是反射损耗的恶化,而无法获得相对优异的微波性能。

针对目前微波功率传感器所面临的困境,本文创新性地提出一种耦合在线式 MEMS 微波功率传感器。与传统微波功率传感器不同的是,该结构将微波功率的提取和检测分离,从信号线上提取固定比例微波功率分量,采用热电堆结构检测提取到的微波功率,这样就从根本上解决了灵敏度、动态范围、微波性能之间的矛盾,同时实现了在线功率检测。系统灵敏度、动态范围和微波特性这 3 个性能可以分别进行优化设计。动态范围可以通过耦合度来调整;灵敏度可以通过热电堆的组数来调整;微波特性可以通过系统结构的优化(阻抗匹配法)来调整。采用 GaAs MMIC 工艺和 MEMS 工艺制备了耦合度为 10% 和 20% 的耦合式微波功率传感器,并对样品进行测试。

1 工作原理

耦合式 MEMS 微波功率传感器结构如图 1 所示,它由共面波导(CPW)、两个 MEMS 悬臂梁、端接梁的 CPW、负载电阻和热电堆构成。其中,双悬臂梁结构耦合一定微波功率分量由一侧的 CPW 传输线传输到负载电阻和热电堆构成的终端,从而在热电堆处通过热电转换完成微波功率的测量。设计耦合器时,将两个并联梁架于 CPW 信号线的悬臂梁锚区连接到一侧的两个 CPW 支路,并联的两组匹配负载连接到这两个 CPW 的终端,其附近放置串联的热电堆。

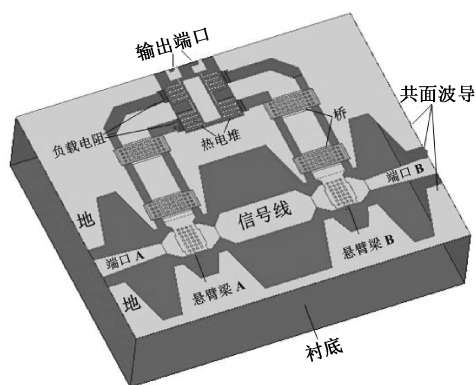


图 1 耦合式 MEMS 微波功率传感器结构

Fig. 1 Structure of the coupled MEMS microwave power sensor

该传感器工作原理为:当微波功率经由 CPW 信号线传输时,用作耦合器的 MEMS 悬臂梁会将微波功率进行耦合,完成功率的提取步骤;然后被提取得功率会经过 CPW 传输给负载电阻,负载电阻通过电热转换,使得热电堆冷热端温度分布不同,根据 Seebeck 效应在输出端口产生直流电压,该直流输出电压与输入微波功率成线性关系,完成功率的检测步骤。与电容式微波功率传感器不同的是其悬臂梁作为耦合器,故形变量小,可以在一定程度上优化微波性能。同时根据设计要求调整用于检测的功率分量占比以弥补热电式微波功率传感器动态范围不足的缺点。

2 建模与仿真

2.1 微波特性

该传感器系统在设计上采用了对称式结构,因而两个悬臂梁耦合的功率大小相同,耦合度 C 可由式(1)计算得到。

$$C = 1 - S_{11} - S_{21} \quad (1)$$

仿真得到耦合度为 10% 和 20% 的两种耦合式 MEMS 微波功率传感器的反射损耗 S_{11} 如图 2 所示, 10% 耦合度传感器 S_{11} 在 -36 dB 左右, 20% 耦合度传感器 S_{11} 在 -30 dB 左右。根据 10 GHz 时反射损耗 S_{11} 利用式(1) 计算两种耦合度下插入损耗 S_{21} 的修正值, 为了达到合适的耦合度, 对悬臂梁的尺寸参数进行优化使得插入损耗 S_{21} 不断逼近目标值, S_{21} 仿真结果如图 3 所示, 与修正值相对误差小于 5%, 满足设计需要。

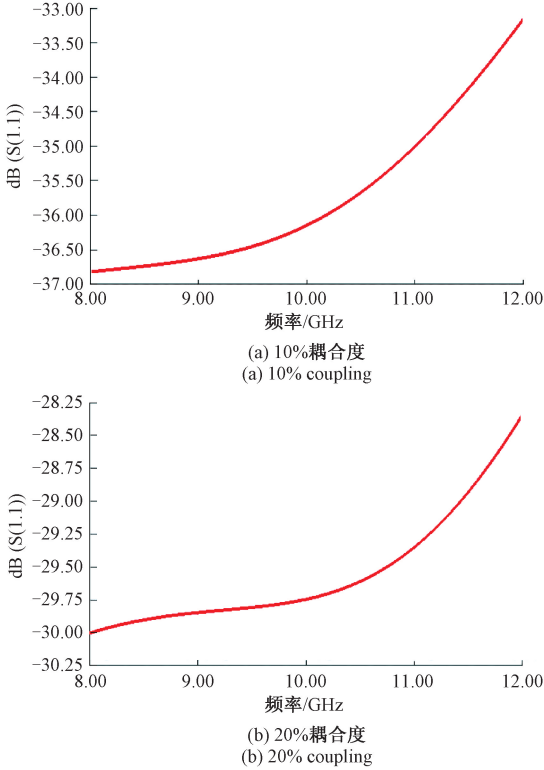


图 2 反射损耗 S_{11} 仿真结果

Fig. 2 Reflection loss S_{11} simulation results

2.2 灵敏度

灵敏度是衡量传感器性能的重要指标之一, 将影响检测精度。其中, 微波功率检测部分的结构如图 4 所示, 它由共面波导传输线、负载电阻、热电堆、输出焊盘和衬底减薄结构 5 部分构成。耦合式 MEMS 微波功率传感器的灵敏度 S 由耦合度 C 和热电式功率检测部分的灵敏度 S_1 共同决定。

$$S = CS_1 = \frac{CV_o}{P} \quad (2)$$

式中: V_o 为输出电压, P 为输入微波信号功率。

为简化灵敏度模型, 各部分结构的材料热学参数取等效值, 例如热电堆的等效厚度 d_e 为:

$$d_e = d_s + \frac{1}{2}d_c \quad (3)$$

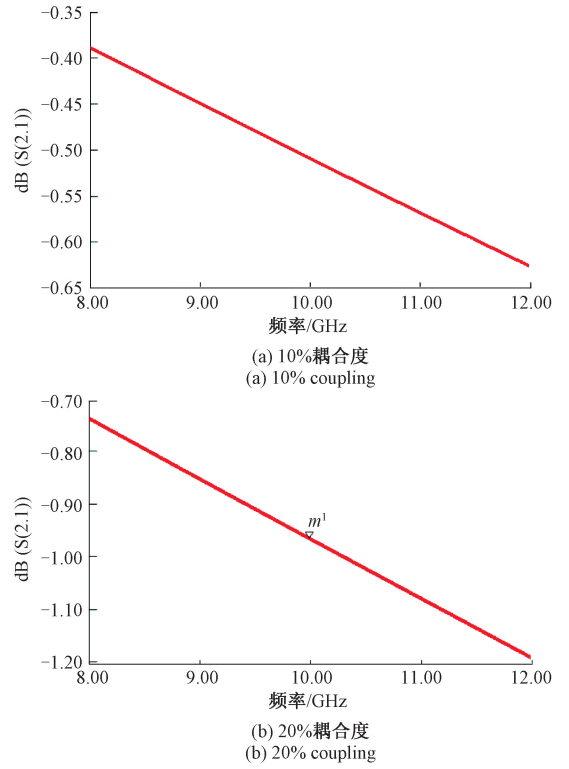


图 3 插入损耗 S_{21} 仿真结果

Fig. 3 Insertion loss S_{21} simulation results

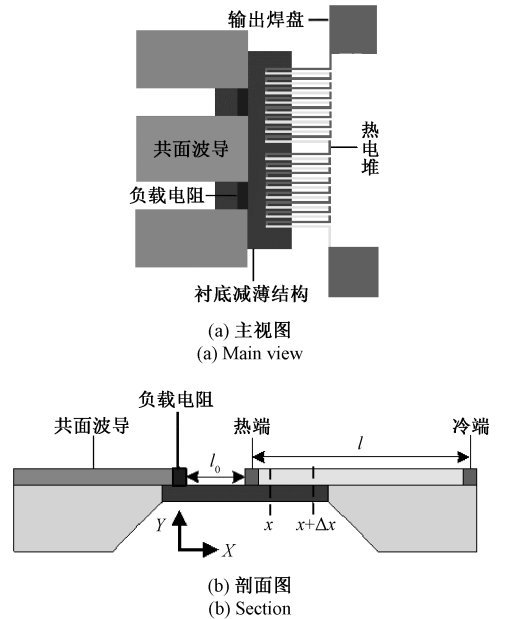


图 4 功率检测部分结构图

Fig. 4 Structure diagram of power detection part

其中, d_s 和 d_c 分别为衬底和热电偶的厚度。

以热端为 x 轴起点建立直角坐标系, 如图 4 所示。在 x 到 $x+dx$ 的微分段内, 由热传导传递的热量 Q_1 如式(4)所示。

$$Q_1 = dQ_{out} - dQ_{in} = A \frac{\partial q_x}{\partial x} dx = -\lambda_e w d_e \frac{d^2 T}{dx^2} dx \quad (4)$$

式中: q_x 为热流密度, A 为热电偶的截面积, λ_e 为等效热导率, w 为热电偶宽度, T 为热电偶上某点的温度。

在该微分段内, 由热对流传递的热量 Q_2 、热辐射传递的热量 Q_3 为:

$$Q_2 = 2hw(T - T_0) dx \quad (5)$$

$$Q_3 = w\sigma_b(\varepsilon_e + \varepsilon_s)(T^4 - T_0^4) dx \quad (6)$$

式中: h 为对流系数, T_0 为环境温度, σ_b 为 Stefan-Boltzmanm 常数, ε_e 、 ε_s 分别为平均黑度和衬底的辐射系数。

联立式(4)~(6), 得到热电偶的傅里叶热稳态方程为:

$$-\lambda_e d_e \frac{d^2 T}{dx^2} + 2h(T - T_0) + \sigma_b(\varepsilon_e + \varepsilon_s)(T^4 - T_0^4) = 0 \quad (7)$$

由于求解热端温度 T_h 时, $T_h - T_0 \ll T_0$, 方程可以进一步简化^[15]:

$$-\lambda_e d_e \frac{d^2 T}{dx^2} + H(T - T_0) = 0 \quad (8)$$

传感器表面等效总热损失系数 H 为:

$$H = 2h + 4\sigma_b(\varepsilon_e + \varepsilon_s)T_0^3 \quad (9)$$

式(8)的边界条件为:

$$q_x = q|_{x=0} = -\lambda_e \frac{dT}{dx}|_{x=0} = \beta q_{in} \quad (10)$$

$$T|_{x=l} = T_0 \quad (11)$$

其中, β 为热电堆总传输系数, q_{in} 为负载电阻流向热电堆的热流密度。

将边界条件代入式(9), 得到热电偶温度分布解析式:

$$T = T_0 + \frac{q_{in}}{\lambda_e p} \frac{\sinh[p(l-x)]}{\cosh(pl)} \quad (0 \leq x \leq l) \quad (12)$$

$$p = \sqrt{\frac{H}{\lambda_e d_e}} \quad (13)$$

进而热电偶热端温度 T_h 、冷端温度 T_c 分别为:

$$T_h = T_0 + \frac{q_{in}}{\lambda_e p} \tanh(pl) \quad (14)$$

$$T_c = T|_{x=l} = T_0 \quad (15)$$

热电堆的输出电压可以表示为:

$$V_o = \alpha \sum_i^N (T_h - T_c) \quad (16)$$

其中, α 为 Seebeck 系数, N 为热电偶组数。

热流密度 q_{in} 表示为:

$$q_{in} = \frac{1}{2} \frac{Q}{A} = \frac{1}{2} \frac{\beta P}{W d_e} \quad (17)$$

式中: β 为热电堆的总传输效率。

联立式(2), (14)~(17), 得到耦合式 MEMS 微波功率传感器灵敏度的解析式:

$$S = C \frac{V_o}{q_{in}} \frac{q_{in}}{P} = \frac{C(\alpha_n - \alpha_p)\beta N \tanh(pl)}{2\lambda_e p W d_e} \quad (18)$$

式中: α_n 、 α_p 分别为 GaAs 和 Au 的 Seebeck 系数。

根据式(18), 可以发现增加耦合度、Seebeck 系数差以及热电偶组数可以提高灵敏度。对于本文中传感器的设计, 热电偶组数的增加受制于负载电阻的尺寸, 为实现阻抗匹配, 负载电阻的尺寸根据共面波导的设计确定为 $58 \mu\text{m} \times 14.5 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$, 热电偶的宽度设计为 $10 \mu\text{m}$ 。因此, 每组热电偶最大组数限制为 4; 热电偶长度和热电偶热端与负载间距根据灵敏度、噪声系数和时间常数折中考虑确定为 80 和 $10 \mu\text{m}$ 。耦合式 MEMS 微波功率传感器结构参数如表 1 所示, 根据传感器结构参数计算得到 10 GHz 下耦合度为 10% 和 20% 的传感器灵敏度理论值分别为 1.41 mV/W 和 2.83 mV/W。

表 1 耦合式 MEMS 微波功率传感器结构参数

Table 1 Structural parameters of the coupled MEMS

microwave power sensor

名称	参数符号	参数值
热导率(Au)/(W/(m·K))	λ_1	315
热导率(n+GaAs)/(W/(m·K))	λ_2	46
热导率(衬底)/(W/(m·K))	λ_s	46
辐射系数(Au)	ε_p	0.02
辐射系数(n+GaAs)	ε_n	0.3
辐射系数(衬底)	ε_s	0.3
Seebeck 系数(Au)/(μV/K)	α_p	1.7
Seebeck 系数(n+GaAs)/(μV/K)	α_n	100
热电堆的厚度/μm	d_c	2
衬底厚度/μm	d_s	300
Stefan-Boltzmanm 常数/(W/(m ² ·K ⁴))	σ_b	5.67×10^{-8}
热对流系数/(W/(m ² ·K))	h	1
热流量 q_{in} 有效宽度/μm	W	366
环境温度/K	T_0	300
热电偶组数	N	16
总系数效率	β	0.46

3 制 备

由于 GaAs 具有高的电子迁移率, 故衬底材料选择未掺杂的砷化镓(GaAs), 厚度为 $600 \mu\text{m}$ 。耦合式 MEMS

微波功率传感器为双悬臂梁对称结构, GaAs MMIC 工艺和 MEMS 技术兼容^[16]。Au 和 n+ GaAs 作为两种热偶臂, TaN 作为负载电阻, 共面波导和地线采用 Au。工艺步骤流程如图 5 所示, 制备完成的两种耦合度微波功率传感器的 SEM 图如图 6 所示。

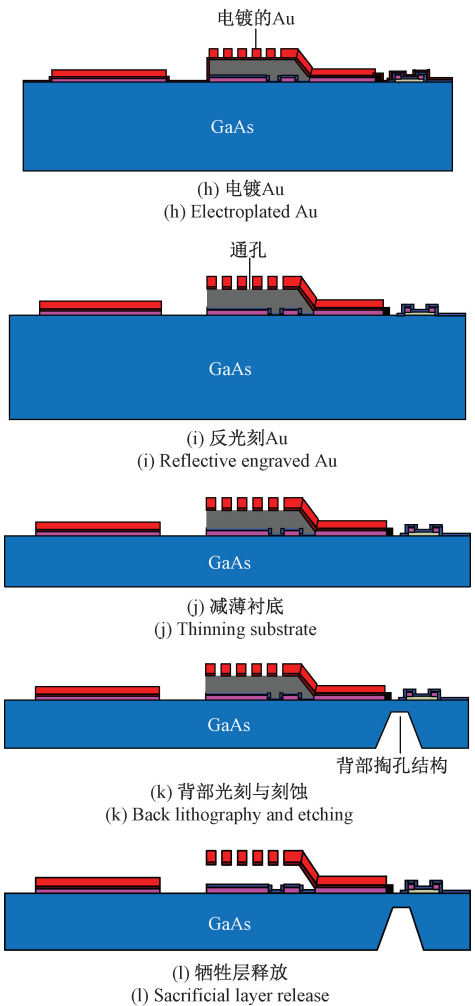
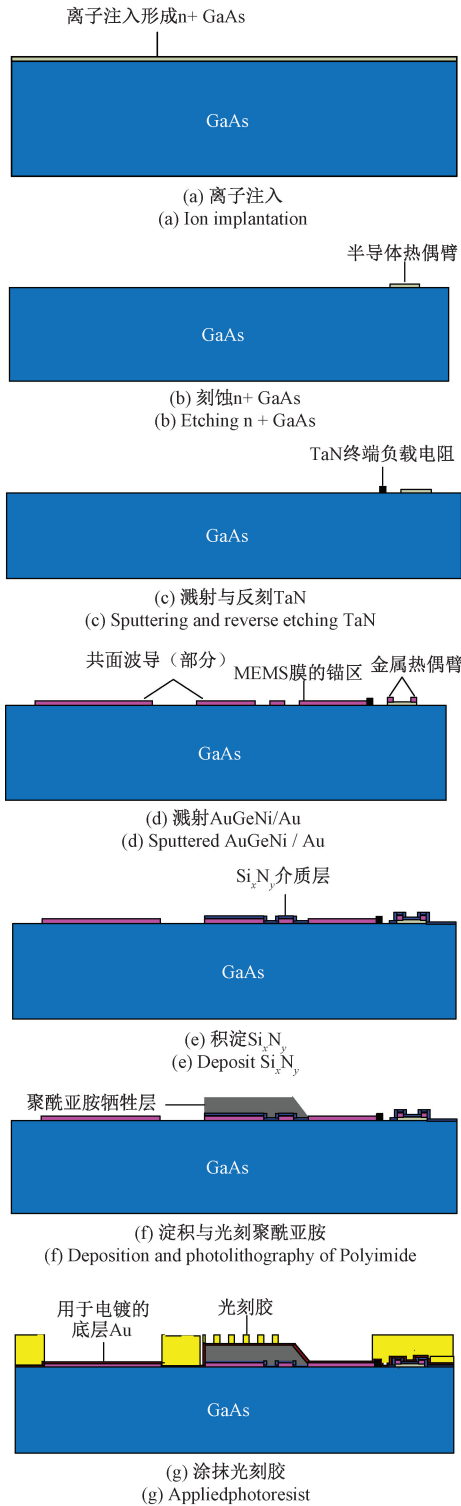
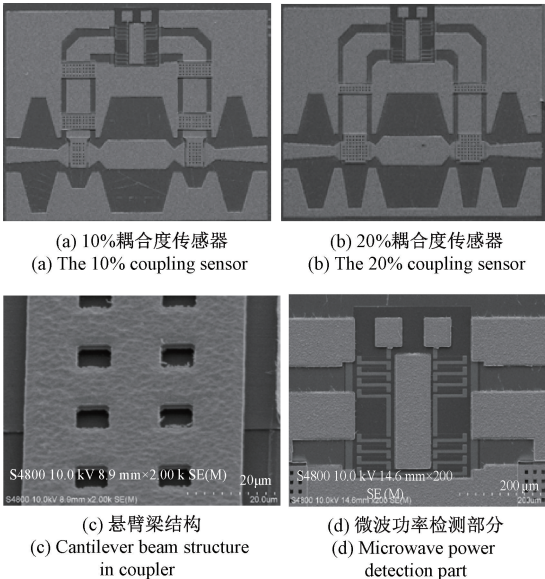


图 5 耦合式 MEMS 微波功率传感器的工艺流程示意图
Fig. 5 Process flow diagram of the coupled MEMS microwave power sensor



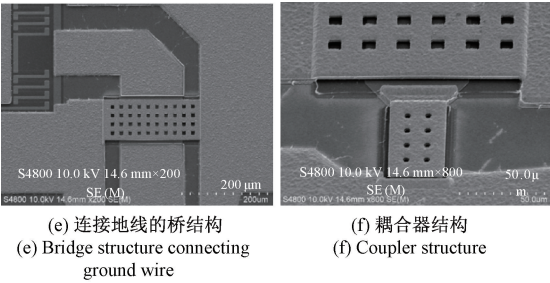


图 6 耦合式 MEMS 微波功率传感器的 SEM 图
Fig. 6 SEM image of the coupled MEMS microwave power sensor

4 测试实验与结果

4.1 微波性能测试

采用 HP8510C 矢量网络分析仪和级联 Microtech1200 探头对耦合度为 10% 和 20% 的耦合式 MEMS 微波功率传感器的微波性能进行测试。测试结果如图 7 所示,结果表明,保证耦合式 MEMS 微波功率传感器优良微波性能的频带较窄,中心频率在 10 GHz 附近。

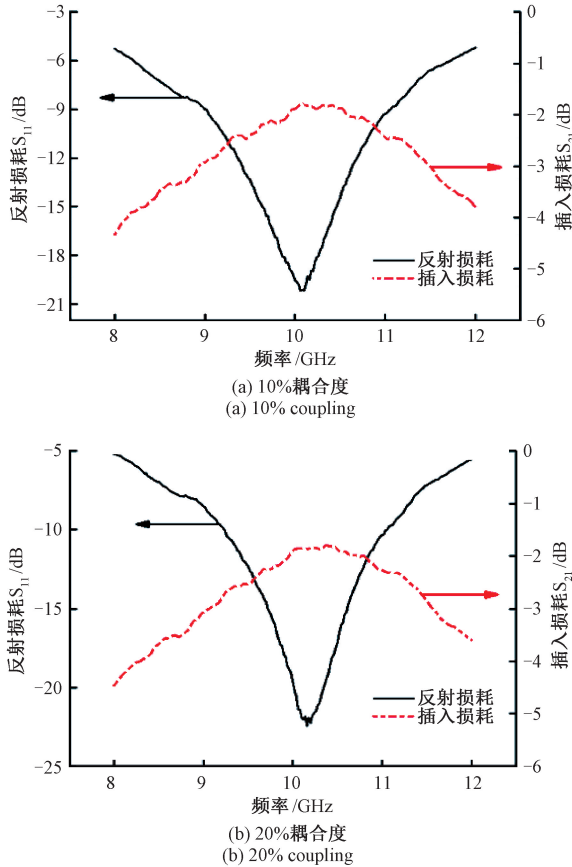


图 7 耦合式 MEMS 微波功率传感器 S 参数测试结果
Fig. 7 Test results of S parameters of coupled MEMS microwave power sensor

微波器件的微波性能都可以通过阻抗匹配的方法进行优化设计,反射损耗一般要求小于-10 dB。在 10 GHz 处,10% 耦合度的传感器反射损耗 S_{11} 为-21 dB,20% 耦合度的传感器反射损耗 S_{11} 为-22.5 dB,两种双悬臂梁结构的耦合在线式 MEMS 微波功率传感器的反射损耗均小于-20 dB,说明双悬臂梁结构的耦合在线式 MEMS 微波功率传感器具有良好的反射性能。

插入损耗一般要求大于-3 dB。在 10GHz 处,10% 耦合度的传感器插入损耗 S_{21} 为-1.5 dB,20% 耦合度的传感器插入损耗 S_{21} 为-1.8 dB,两种双悬臂梁结构的耦合在线式 MEMS 微波功率传感器的插入损耗均大于-1.5 dB,说明双悬臂梁结构的耦合在线式 MEMS 微波功率传感器具有良好的传输性能。

4.2 灵敏度性能测试

选取 8、9、10、11 和 12 GHz 5 个频率点对传感器的输出性能进行测试,结果显示,当测试信号频率为 8 和 12 GHz 时,两种不同耦合度的传感器均没有电压输出,原因为传感器的微波性能恶化严重,致使过低的功率水平使热电堆无法检测。灵敏度测试结果如图 8 所示,结果表明,耦合式微波功率传感器在 9、10 和 11 GHz 处均

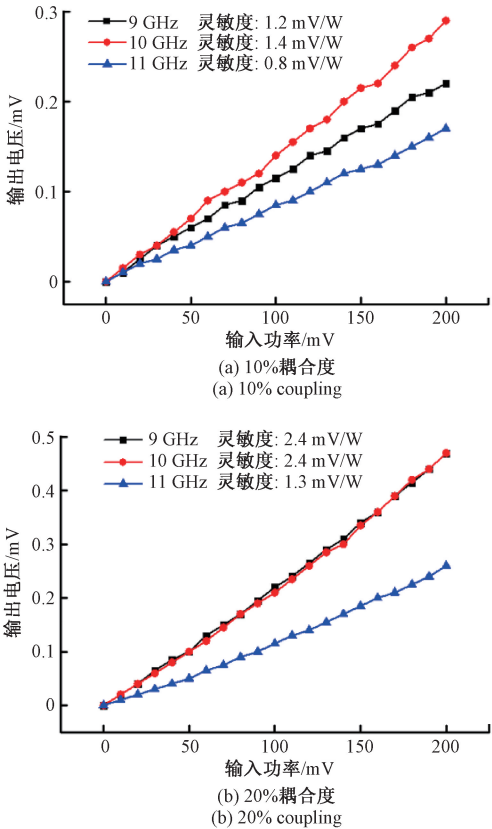


图 8 耦合式 MEMS 微波传感器灵敏度测试结果
Fig. 8 Sensitivity test results of the coupled MEMS microwave sensor

有不错的线性度,微波功率传感器的灵敏度在 10 GHz 时达到最高。耦合度为 10% 的传感器在不同频率下的灵敏度分别为 1.2 mV/W @ 9 GHz、1.4 mV/W @ 10 GHz 和 0.8 mV/W @ 11 GHz。耦合度为 20% 的传感器在不同频率下的灵敏度分别为 2.4 mV/W @ 9 GHz、2.4 mV/W @ 10 GHz 和 1.3 mV/W @ 11 GHz。10 GHz 下耦合度为 10% 和 20% 的传感器灵敏度理论值分别为 1.41 mV/W 和 2.83 mV/W。相对误差分别为 0.7% 和 15.2%。将器件测量结果导入仿真软件,进行仿真验证,发现 10% 耦合度与 20% 耦合度的传感器悬臂梁宽度误差分别为 2.8 和 2.4 μm , GaAs MMIC 工艺特征尺寸为 2 μm , 这表明由于加工引入的误差权重接近 71%。另外,仿真过程未考虑器件的介质损耗和导体损耗,这是造成误差的另一个原因。

5 结 论

为了解决微波功率传感器灵敏度、动态范围、微波性能之间存在的矛盾,本文提出了一种耦合式 MEMS 微波功率传感器。设计了两种不同耦合度的耦合式 MEMS 微波功率传感器,对比了两种传感器的微波特性和灵敏度差异。10% 耦合度传感器的动态范围扩大了 10 倍, 20% 耦合度传感器的动态范围扩大了 5 倍。结果表明,所设计的 20% 耦合度传感器较 10% 耦合度传感器拥有更优的微波特性; 10% 耦合度传感器在 10 GHz 时灵敏度为 1.4 mV/W, 20% 耦合度传感器在 10 GHz 时灵敏度为 2.4 mV/W, 这说明耦合度的提高可以明显改善微波功率传感器的灵敏度。本文对耦合式 MEMS 微波功率传感器灵敏度的研究有一定参考价值。

参考文献

[1] 陈伟民, 李存龙. 基于微波雷达的位移/距离测量技术[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(9): 1251-1265.

CHEN W M, LI CH L. Radar-Based displacement/distance measuring techniques[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(9): 1251-1265.

[2] 赵友全, 刘潇, 陈玉榜, 等. 微型涡流电导率测量传感器的优化设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(4): 598-603.

ZHAO Y Q, LIU X, CHEN Y B, et al. Optimizing design for miniature eddy current conductivity measurement sensor [J]. Journal of Electronic

Measurement and Instrumentation, 2015, 29(4): 598-603.

[3] 张焕卿, 白雪婧, 王德波. 热电式 MEMS 微波功率传感器模型的研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(1): 110-117.

ZHANG H Q, BAI X J, WANG D B. Study on the model of thermoelectric MEMS microwave power sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(1): 110-117.

[4] 汤晓君, 刘君华. 多传感器技术的现状与展望[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(12): 1309-1313.

TANG X J, LIU J H. The actuality and vista about multi-sensor technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(12): 1309-1313.

[5] 何存富, 闫天婷, 宋国荣, 等. 微带贴片天线应变传感器优化设计研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(2): 361-367.

HE CH F, YAN T T, SONG G R, et al. Design and optimization of a strain sensor based on rectangular micro-strip patch antenna [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(2): 361-367.

[6] DEHE A, KROZER V, FRICKE K, et al. Integrated microwave power sensor [J]. Electronics Letters, 1995, 31(25): 2187-2188.

[7] YAN J B, LIAO X P. Research on the response time of indirect-heating microwave power sensor [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(13): 5270-5276.

[8] CHU C L, LIAO X P. X-band monolithic microwave integrated detector based on MEMS thermoelectric power sensor [J]. IEEE Sensors Letters, 2019, 3(12): 1-4.

[9] LI J H, LIAO X, CHU C L. A novel thermistor-based RF power sensor with wheatstone bridge fabricating on MEMS membrane [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2020, 29(5): 1314-1321.

[10] LIU J Q, HONG Y, WANG J T, et al. A thermoelectric MEMS microwave power sensor with inline self-detection function [J]. Micromachines, 2022, 13(2): 239.

[11] FERNANDEZ L J, WIEGERINK R J, FLOKSTRA J, et al. A capacitive RF power sensor based on MEMS technology [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2006, 16: 1099-1107.

[12] YAN H, LIAO X P, CHEN C, et al. High-power

- handling analysis of a capacitive MEMS power sensor at X-band[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(13): 5272-5277.
- [13] LI J H, LIAO X P. High-power electro-mechanical behavior of a capacitive microwave power sensor with warped cantilever beam [J]. Solid-State Electronics, 2020, 172(4): 107877.
- [14] LI J H, LIAO X P, CHU C L. A new RF MEMS power sensor based on double-deck thermocouples with high sensitivity and large dynamic range[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2021, 31(8): 1023-1026.
- [15] 张焕卿, 戴瑞萍, 陆颖瓚, 等. MEMS 微波功率传感器拉格朗日模型的研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(8): 110-117.
- ZHANG H Q, DAI R P, LU H Z, et al. Study on lagrange model of MEMS microwave power sensor [J]. Journal of Instrumentation, 2018, 39(8): 110-117.
- [16] 魏良栋. 基于 GaAs MMIC 工艺的耦合式微波功率传感器的设计[D]. 南京:南京邮电大学, 2020.
- WEI L D. Design of coupled microwave power sensor based on GaAs MMIC process [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2020.

作者简介



靳雷生, 2009 年于唐山师范学院获得学士学位, 2012 年于兰州大学获得硕士学位, 2015 年于英国斯旺西大学获得博士学位, 现为南京邮电大学副教授, 主要研究方向为 MEMS 传感器技术。

E-mail: jinls@njupt.edu.cn.

Jin Leisheng received his B.Sc. degree from Tangshan Normal University in 2009, his M.Sc. degree from Lanzhou University in 2012, and his Ph.D. degree from Swansea University in 2015. He is currently an associate professor at Nanjing University of Posts and Telecommunications. His main research interest is MEMS sensor technology.



王德波 (通信作者), 2007 年于河北科技大学获得学士学位, 2010 年和 2012 年于东南大学获得硕士学位和博士学位, 现为南京邮电大学副教授, 主要研究方向为 RF MEMS, 传感器与执行器。

E-mail: wdb@njupt.edu.cn.

Wang Debo (Corresponding author) received his B.Sc. degree from the Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang in 2007, and received his M.Sc. and Ph.D. degrees both from Southeast University in 2010 and 2012, respectively. He is currently an associate professor at Nanjing University of Posts and Telecommunications. The discipline of his research focuses on RF MEMS, sensors and actuators.