

一种新型的在线式微波功率传感器*

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: 提出了一种基于 MEMS 技术的在线式微波功率传感器结构, 并对该结构进行了理论分析、设计、制作和测量. 该结构通过测量由 MEMS 膜耦合出的一小部分微波功率实现功率的测量. 该结构制作工艺与 GaAs MMIC 工艺完全兼容. 测量结果显示, 在 12GHz 频率以内, 微波功率传感器的反射系数小于 -15dB, 插入损耗小于 2dB, 在 10GHz 中心频率下的灵敏度为 10.4 μ V/mW.

关键词: 微波功率; 功率传感器; 在线式; MEMS; GaAs MMIC 工艺

EEACC: 2575; 8460

中图分类号: TN377

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)07-1144-05

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. 现代个人通信系统和雷达系统要求功率传感器具有小体积、良好的微波特性、小的功率损耗并且能够与 GaAs 工艺或 Si 工艺相兼容. 目前测量微波功率的技术是基于利用热敏电阻、热电偶和二极管的方法. 这些方法是将待测的微波功率完全消耗加以测量, 因此使得微波信号经过测量之后无法再利用. 最近, 提出了两种基于 MEMS 技术的微波功率传感器结构. 第一种结构被称为插入式微波功率传感器, 它是利用热电堆测量微波功率, 将热电堆放置在共面波导的两侧, 共面波导上因欧姆损耗产生的热量会引起温度的变化, 热电堆感应这一温度变化并将之转化为热电势的输出, 从而实现微波功率的测量^[1~3]. 这种结构较为复杂, 由于其灵敏度依赖于传输线的损耗和共面波导地线与信号线的间距, 因此它的灵敏度与微波性能之间存在矛盾, 使得整个器件的反射系数和插入损耗较大, 且不能与 GaAs 或 Si 工艺相兼容; 第二种结构被称为电容式微波功率传感器, 它是利用电容变化测量微波功率, 在共面波导信号线上方放置 MEMS 膜, 它与放置在信号线两边的传感电极之间构成电容器, 在共面波导上传输的微波功率会对膜产生静电力, 导致膜位移, 进而改变 MEMS 膜与传感电极间的电容值, 通过测量电容值的改变量实现微波功率的测量^[4~8]. 这种结构的灵敏度严重依赖

于工艺条件, MEMS 膜在工艺中产生的残余应力对膜受静电力吸引而产生的位移影响很大, 同时, 由于其输出为电容的变化量, 因此需要加入一个测电容电路对其加以测量, 而此电路的分辨能力对灵敏度影响很大. 该结构依靠电容变化测量微波功率的原理会在有较大微波功率通过 MEMS 膜时使电容显著增大, 导致反射系数和插入损耗的增加. 电容式微波功率传感器能够与 Si 工艺相兼容. 这两种传感器结构因具有较小的尺寸、较低的损耗, 因此能够嵌入到单片微波集成电路中, 以实现微波功率的在线测量、增益控制、电路保护等用途.

本文提出了一种基于 MEMS 技术的新型在线式微波功率传感器结构, 并对该结构进行了理论分析、设计、制作和测量. 该结构是利用 MEMS 膜将在共面波导上传输的微波功率耦合出一小部分, 并将这一部分的微波功率通过终端匹配电阻转化为热量, 利用放置在匹配电阻附近的热电堆感应周围温度的变化, 从而实现微波功率的测量^[9]. 此结构具有固定的 MEMS 膜, 不需要考虑 MEMS 膜中的残余应力, 而且输出为热电势, 不需要加入额外的电路加以测量, 还可以通过改进结构提高灵敏度并改善微波特性; 同时, 该结构与 GaAs MMIC 工艺相兼容, 可以直接嵌入到 GaAs 单片微波集成电路中. 因此, 整个器件具有结构简单、尺寸微小、功率消耗低、工艺兼容等特点. 测量结果显示此传感器的反射系数和插入损耗在 12GHz 频率内分别小于 -15dB 和 2.0dB. 传感器的灵敏度在 10GHz 中心频率下为 10.4 μ V/mW.

* 国家自然科学基金(批准号:60676043)和装备预先研究基金(批准号:51308050202)资助项目

[†] 通信作者. Email: hqa@seu.edu.cn

2007-01-05 收到, 2007-03-02 定稿

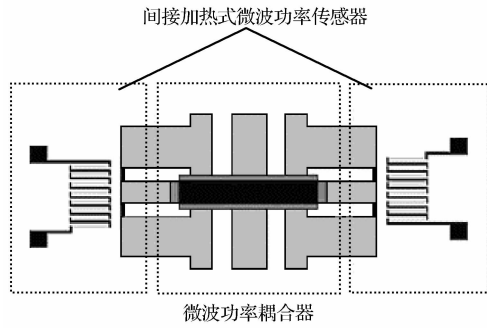


图 1 在线式微波功率传感器结构示意图

Fig.1 Schematic view of an inline-type microwave power sensor

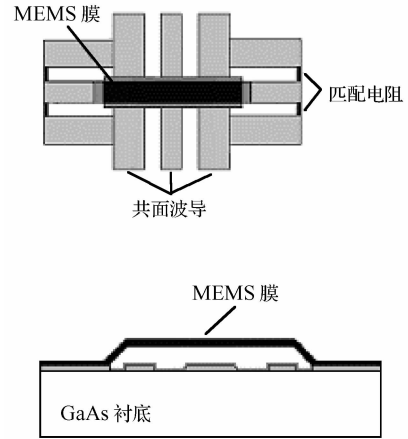


图 2 微波功率传感器结构示意图及其集总元件模型

Fig.2 Microwave power coupler and lumped element model

2 工作原理

在线式微波功率传感器是由微波功率耦合器和间接加热式微波功率传感器构成的,如图 1 所示.微波功率耦合器的结构类似于 MEMS 电容式开关,但 MEMS 膜的锚区不与共面波导地线相连,从膜的锚区接出的共面波导的终端为一对 100Ω 的并联匹配电阻.图 2 为微波功率耦合器的具体结构及其集总元件模型.当微波信号经过 MEMS 膜时,由 MEMS 膜与共面波导中心导体带构成的电容 C 会耦合出一小部分微波功率,该电容 C 的表达式为^[10]

$$C = \frac{\epsilon_0 bw}{g_0 + \frac{t_d}{\epsilon_r}} \quad (1)$$

其中 b 是 MEMS 膜的宽度; w 是共面波导中心导体带的宽度; g_0 是 MEMS 膜的高度; t_d 是绝缘层厚度; ϵ_0 和 ϵ_r 分别是自由空间和绝缘层的介电常数.

此时的微波功率传感器的 S 参数表达式为

$$S_{11} = -\frac{Z_0}{2Z_0 + 2R_s + j2\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)} \quad (2)$$

$$S_{21} = -\frac{Z_0 + 2R_s + j2\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}{2Z_0 + 2R_s + j2\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)} \quad (3)$$

$$S_{31} = S_{41} = \frac{Z_0}{2Z_0 + 2R_s + j2\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)} \quad (4)$$

其中 R_s 是 MEMS 膜的电阻; L 是 MEMS 膜的电感; Z_0 是共面波导传输线的特性阻抗.耦合出的微波功率随后被终端匹配电阻消耗并转化为热,引起电阻周围温度的升高,放置在电阻附近的热电堆会探测这种温度变化并将其转化为热电势的输出,从而实现微波功率的测量.图 3 为间接加热式微波

功率传感器的具体结构及其等效电路模型.等效电路模型中的热阻表示为

$$R_i = \frac{l}{\lambda A}, \quad i = 1, 2 \quad (5)$$

其中 λ 是热导率; A 是横截面面积; R_1 和 R_2 是不同的 λ 和 A 下的导热热阻. R_h 为匹配电阻表面与周围空气间的换热热阻,表示为 $R_h = \frac{1}{hA'}$,这里的 h 是对流换热系数, A' 为匹配电阻表面面积.等效电路表示为

$$\Phi = \frac{T - T_0}{R} \quad (6)$$

其中 Φ 是热流量; T 是匹配电阻的温度; T_0 是周围环境温度; R 是总热阻.热电堆的输出热电势和间接加热式微波功率传感器的灵敏度表示为^[11]

$$V_{out} = \alpha \sum_i^{N_i} (T_h - T_c) \quad (7)$$

$$S = V_{out} / P_{diss} \quad (8)$$

其中 α 是 Seebeck 系数; P_{diss} 是在匹配电阻上耗散的微波功率; T_h 和 T_c 分别是组成热电堆的每个热

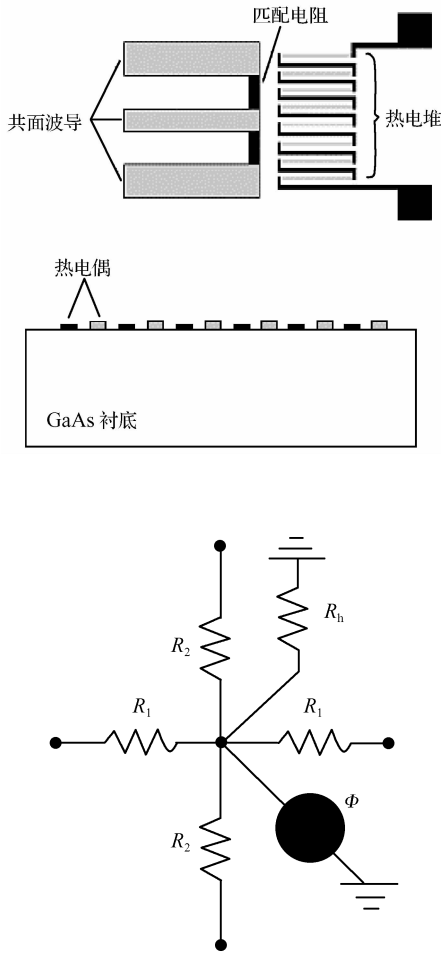


图 3 间接加热式微波功率传感器结构示意图及其等效电路模型

Fig. 3 Indirectly-heated type microwave power sensor and equivalent electrical circuit including convection, conduction, and heat generation

电偶热端和冷端的温度.由(8)式和微波功率耦合器的 S 参数我们可以得出在线式微波功率传感器的灵敏度为

$$S = V_{out} / P_{total} \quad (9)$$

其中 P_{total} 为在共面波导上传输的微波信号的总功率.由于微波功率耦合器的 S 参数在相同频率下不随输入功率变化,而输出热电势与耦合出的微波功率成正比,因此输入微波功率与输出热电势之间存在着线性关系.

3 设计与制作

由于 MEMS 膜与共面波导中心导体带之间存在电容 C ,因此该电容与耦合出功率的大小及反射损耗都有关系.为了达到两者的平衡,选取 MEMS 膜的宽度为 $100\mu\text{m}$,高度为 $1.6\mu\text{m}$.由计算可得此时的耦合电容值为 44fF ,在 10GHz 中心频率处耦合出的微波功率占总的输入微波功率的 2% ,由耦合电容产生的反射系数为 -21.48dB .基于灵敏度和工艺的设计要求,选取热电堆与匹配电阻的距离为 $10\mu\text{m}$.

在线式微波功率传感器的制作与 GaAs MMIC 工艺完全兼容.共面波导的特性阻抗设计为 50Ω .共面波导和 MEMS 膜通过电镀 $2\mu\text{m}$ 厚的金层得到, MEMS 膜与共面波导中心导体带的间距由聚酰亚胺牺牲层决定,为 $1.6\mu\text{m}$.热电堆由 Au 和 n^+ GaAs 组成,Au 由溅射工艺得到 $0.3\mu\text{m}$ 厚的 Au 层, n^+ GaAs 为 $0.25\mu\text{m}$ 厚的外延层.匹配电阻为淀积工艺得到的方块电阻为 $25\Omega/\square$ 的 TaN 电阻.图 4 示出了在线式微波功率传感器简单的制作工艺流程.图 5 为在线式微波功率传感器的 SEM 照片.

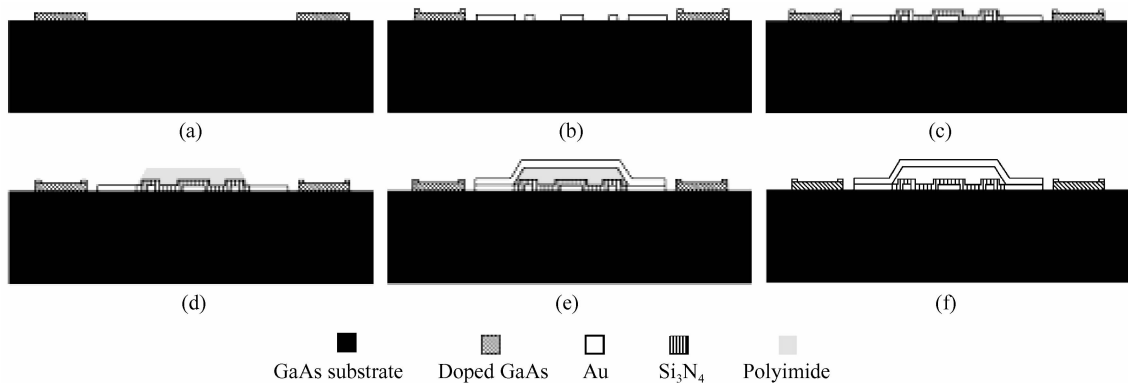


图 4 在线式微波功率传感器制作工艺流程

Fig. 4 Fabrication scheme of the inline-type microwave power sensor

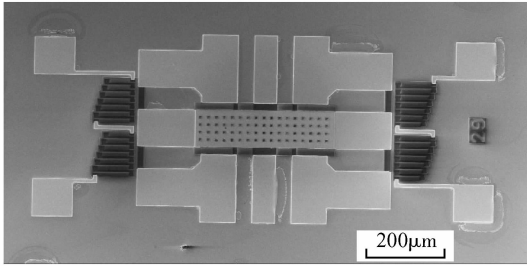


图 5 在线式微波功率传感器 SEM 照片

Fig. 5 SEM photo of the microwave power sensor

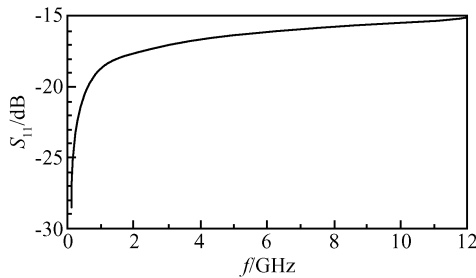


图 6 在线式微波功率传感器的 S₁₁ 测量结果

Fig. 6 Experimental results of the S₁₁ parameter of the sensor

4 测试结果

对在线式微波功率传感器的测试分为两个部分：微波特性的测量和灵敏度的测量。微波特性的测量包括反射损耗 S₁₁ 和插入损耗 S₂₁，灵敏度的测量是表征输出热电势与输入微波功率之间的关系。测试时的环境温度为 294K，相对湿度为 60%。

4.1 S 参数测量

在线式微波功率传感器的微波特性采用 HP8510C 矢量网络分析仪和 Cascade Microtech 1200 探针台测量。测量的频率范围为 0.1~12GHz。图 6 和图 7 示出了在线式微波功率传感器的反射系数和插入损耗。

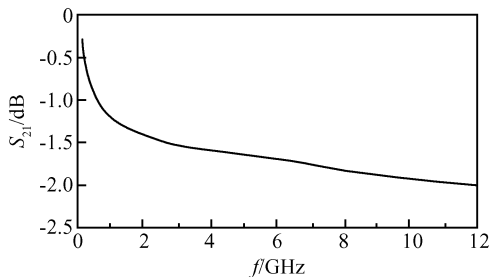


图 7 在线式微波功率传感器的 S₂₁ 测量结果

Fig. 7 Experimental results of the S₂₁ parameter of the sensor

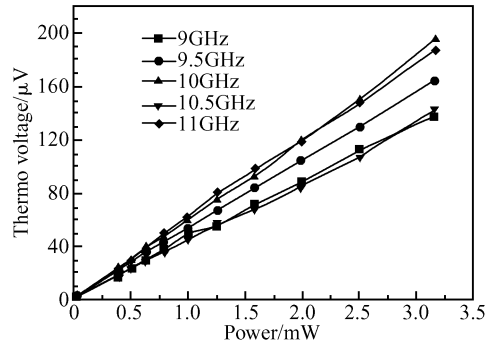


图 8 间接加热式微波功率传感器在不同频率下，不同输入功率的输出热电势测量结果

Fig. 8 Measurement of microwave response for the indirectly-heated type microwave power sensor at different frequencies

由图 6 和图 7 可知，在 12GHz 频率范围内，传感器的反射损耗 (S₁₁) 小于 -15dB，插入损耗 (S₂₁) 小于 2.0dB。插入损耗较理论值的增加主要是由于 MEMS 膜高度的降低、共面波导的欧姆损耗以及工艺的误差造成的。

4.2 灵敏度测量

图 8 示出了间接加热式微波功率传感器在不同频率下，不同输入功率的输出热电势测量曲线。测量结果显示了间接加热式微波功率传感器的输出热电势与输入功率良好的线性度，其灵敏度为 52.2µV/mW。匹配电阻的直流电阻值为 51.7Ω，其电压驻波比 (VSWR) 最大为 1.143，比理论值 1.034 稍大。热电堆的电阻值为 6.67kΩ，由计算可得信噪比为 5.0 × 10⁶/W。由间接加热式微波功率传感器的灵敏度和微波功率耦合器的 S 参数可得在线式微波功率耦合器的灵敏度在 10GHz 中心频率下为 10.4µV/mW。

5 结论

本文提出了一种新型的在线式微波功率传感器结构。该结构利用一个 MEMS 膜耦合出一小部分微波功率并加以测量。这个结构能够与 GaAs MMIC 工艺完全兼容。测得的 S 参数显示，直到 12GHz 频率下，其反射系数低于 -15dB，插入损耗小于 2.0dB，插入损耗的增加主要是由于 MEMS 膜高度的降低、共面波导的欧姆损耗以及工艺的误差造成的。间接加热式微波功率传感器的灵敏度为 52.2µV/mW，由此可得出在线式微波功率传感器的灵敏度在 10GHz 中心频率下为 10.4µV/mW。

致谢 本器件的制作是在南京电子器件研究所 GaAs 工艺线完成的. 在器件的制作中得到了朱健、蒋幼泉两位主任的指点, 在版图设计中得到了李辉工程师的帮助, 在器件的测试中得到了郑惟斌博士的帮助, 在此一并感谢.

参考文献

- [1] Dehe A, Krozer V, Fricke K, et al. Integrated microwave power sensor. *IEEE Trans Electron Devices*, 1995, 31: 2187
- [2] Dehe A, Klingbeil H, Krozer V, et al. GaAs monolithic integrated microwave power sensor in coplanar waveguide technology. *Proceedings of IEEE MTT-S Symposium*, 1996: 161
- [3] Dehe A, Fricke K, Krozer V. Broadband thermoelectric microwave power sensors using GaAs foundry process. *Proceedings of IEEE MTT-S Symposium*, 2002: 1829
- [4] Fernandez L J, Sese J, Flokstra J, et al. Capacitive MEMS application for high frequency power sensor. *Proceedings of Micromechanics Europe*, 2002
- [5] Fernandez L J, Visser E, Sese J, et al. Radio frequency power sensor based on MEMS technology. *Proceedings of IEEE Sensors Conference*, 2003: 549
- [6] Vaha-Heikkila T, Kyynarainen J, Oja A, et al. Capacitive mems power sensor. *Proceedings of 3rd Workshop on MEMS for Millimeter Wave Communications*, 2002
- [7] Vaha-Heikkila T, Kyynarainen J, Dekker J, et al. Capacitive RF MEMS power sensors. *Proceedings of 3rd ESA Workshop on Millimeter Wave Technology and Application: Circuits, System, and Measurement Techniques*, 2003: 503
- [8] Fernandez L J, Wiegink R J, Flokstra J, et al. A capacitive RF power sensor based on MEMS technology. *J Micro-mechan Microeng*, 2006, 16: 1099
- [9] Han Lei, Huang Qing'an, Liao Xiaoping. An inline-type microwave power sensor based on MEMS technology. *Proceedings of IEEE Sensors Conference*, 2006
- [10] Muldavin J B, Rebeiz G M. High-isolation CPW MEMS shunt switches-part1: modeling. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2000, 48(6): 1045
- [11] Milanovic V, Hopcroft M, Zincke C A, et al. Optimization of CMOS MEMS microwave power sensor. *Proceedings of IEEE ISCAS Conference*, 1999: 144

A Novel Inline Type Microwave Power Sensor*

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

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

Abstract: A novel structure of an inline type microwave power sensor is presented based on MEMS technology. The theory, design, fabrication, and measurements are given. The microwave power coupled from the CPW line is measured by the MEMS membrane. The fabrication process of this power sensor is fully compatible with a GaAs MMIC process. In this method the signal is available during power detection. The results show that the sensor has a reflection of less than -15dB and an insertion loss of less than 2.0dB up to 12GHz . The sensitivity of this power sensor is $10.4\mu\text{V}/\text{mW}$ at 10GHz .

Key words: microwave power; power sensor; inline type; MEMS; GaAs MMIC process

EEACC: 1350H; 7230

Article ID: 0253-4177(2007)07-1144-05

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 60676043) and the Defense Advanced Research Program of China (No. 51308050202)

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

Received 5 January 2007, revised manuscript received 2 March 2007

©2007 Chinese Institute of Electronics