

文章编号 1004-924X(2018)09-2133-06

## 双通道 MEMS 微波功率传感器的匹配特性

魏良栋, 戴瑞萍, 陆颢瓚, 王德波\*

(南京邮电大学 电子与光学工程学院, 江苏 南京 210023)

**摘要:** 为了降低双通道 MEMS 微波功率传感器的回波损耗, 提高传感器的测量精度, 对 MEMS 悬臂梁的匹配特性进行了研究。首先, 通过双通道 MEMS 微波功率传感器结构构建 S 参数的理论解析模型, 分析了双通道 MEMS 微波功率传感器的匹配特性, 得到了 MEMS 悬臂梁的间距和回波损耗系数  $S_{11}$  的关系; 接着利用有限元软件 HFSS 进行仿真, 并和理论结果比较; 然后, 设计并制作了双通道微波功率传感器; 最后, 对该传感器的匹配特性进行了测试和分析。实验结果表明: 当 MEMS 悬臂梁的间距为  $1.6 \mu\text{m}$  时, 该传感器在测量  $8\sim 12 \text{ GHz}$  频率内的微波信号时, 回波损耗小于  $-19 \text{ dB}$ 。理论和仿真结果较为相符, 因此 S 参数的理论解析模型可以较好地反映双通道 MEMS 微波功率传感器的匹配特性, 对双通道 MEMS 微波功率传感器的设计具有一定的指导意义。

**关键词:** 微机电系统; 功率传感器; 双通道; 悬臂梁; 匹配特性; 回波损耗

**中图分类号:** TN62; TP212.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182609.2133

## Impedance matching of MEMS double-channel microwave power sensor

WEI Liang-dong, DAI Rui-ping, LU Hao-zan, WANG De-bo\*

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

\* Corresponding author, E-mail: wdb@njupt.edu.cn

**Abstract:** To reduce the reflection loss of Micro-Electro-Mechanical System (MEMS) double-channel microwave power sensors and improve their measurement accuracy, it is necessary to investigate the impedance matching of MEMS cantilever beams. First, an analytical model of the S-parameters was constructed using the structure of the MEMS double-channel microwave power sensor. The impedance matching of the MEMS double-channel microwave power sensor was analyzed, and the relationship between the spacing of the MEMS cantilever beams and return loss  $S_{11}$  was obtained. The simulation was performed using a finite element software-high frequency structure simulator (HFSS)-and the simulation results were compared with the corresponding analytical results. Next, a double-channel microwave power sensor was designed and fabricated. Finally, the impedance matching of the sensor was tested and analyzed. The experimental results reveal that for a microwave signal in the frequency range  $8\text{--}12 \text{ GHz}$ , when the distance between the MEMS cantilever beam is  $1.6 \mu\text{m}$ , the sensor has a return loss of less than  $-19 \text{ dB}$ . The analytical and simulation results are in good agreement,

**收稿日期:** 2018-05-29; **修订日期:** 2018-07-02.

**基金项目:** 国家青年自然科学基金资助项目 (No. 61704086); 江苏省青年自然科学基金资助项目 (No. BK20140890); 南京邮电大学国自基金孵化资助项目 (No. NY215139, No. NY217039); 中国博士后科学基金资助项目 (No. 2017M621692); 江苏省博士后基金资助项目 (No. 1701131B)。

confirming that the analytical model of the S-parameters can reflect the impedance matching of MEMS double-channel microwave power sensors. Thus, the analytical model can be used as a guide for the design of MEMS double-channel microwave power sensors.

**Key words:** Micro-Electro-Mechanical System (MEMS); power sensor; double-channel; cantilever; impedance matching; return loss

## 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,在微波信号的产生、传输及接收等各个环节的研究中是必不可少的,它已成为电磁测量的重要组成部分<sup>[1]</sup>。MEMS 微波功率传感器具有低功耗和抗干扰的特点,已广泛应用于雷达系统和现代个人通信系统。近年来,随着 MEMS 工艺技术的发展<sup>[2-5]</sup>,基于 MEMS 梁的双通道微波功率检测系统被广泛应用于微波功率测量器件中。

双通道 MEMS 微波功率检测系统由热电式<sup>[6]</sup>和电容式<sup>[7]</sup> MEMS 微波功率传感器组成。该传感器提高了微波信号的功率检测范围,但是悬臂梁结构降低了传感器的匹配特性,影响了该传感器的测量精度。2016 年, Yi 等人提出双通道型级联式 MEMS 微波功率传感器<sup>[8]</sup>,引入悬臂梁结构对大功率微波信号进行检测,在一定程度上提高了检测系统的抗过载能力,但是没有解决固支梁结构带来的匹配特性劣化问题,在 8~12 GHz 的频带上测量的回波损耗小于 -20 dB。2017 年,他们又对双通道型级联式 MEMS 微波功率传感器进行改进,提出基于 MIM 结构的电容耦合和终端型热电式级联的 MEMS 微波功率传感器<sup>[9]</sup>。该结构增强了传感器的稳定性,在 8~12 GHz 的频带上测量的回波损耗小于 -21 dB。2017 年, Chu 提出一种基于 MEMS 悬臂梁结构的双通道 MEMS 微波功率传感器<sup>[10]</sup>。该传感器利用悬臂梁耦合出一定比例的微波功率来测量,使得超高动态范围功率检测得以实现,在 3 GHz 时测量的回波损耗低于 -15 dB,传感器的微波特性比较差。

从目前已经报道的研究中不难发现,双通道 MEMS 微波功率传感器检测系统的灵敏度依赖于输出电容的变化,大的电容变化会导致回波损耗系数增大,从而导致微波性能劣化,使得系统的线性度较差,影响系统的检测精度。因此双通道 MEMS 微波功率传感器的悬臂梁结构会影响传感器的匹配特性,但是现有研究普遍忽略了

MEMS 悬臂梁影响传感器匹配特性的理论研究。针对上述不足,本文建立双通道 MEMS 微波功率传感器回波损耗的理论解析模型,分析了在 MEMS 悬臂梁和下拉电极板的间距不同时的回波损耗,从而更好地设计双通道 MEMS 微波功率传感器检测系统的匹配特性。

## 2 基本工作原理

双通道 MEMS 微波功率传感器的结构如图 1 所示。它由两个部分组成,一部分是热电式 MEMS 微波功率传感器,该部分用来测量小功率微波信号,由共面波导传输线、两个负载电阻、几个热电偶和直流电压输出端组成。负载电阻传输共面波导传输线馈送的微波功率,并把微波功率转换成热量,使热电堆两端产生温差,由于存在 Seebeck 效应<sup>[11]</sup>,会在输出端产生直流电压差,从而测量微波功率。另一部分是由 MEMS 悬臂梁和电容测试电极输出端组成的电容式 MEMS 微波功率传感器,这部分用来测量高功率微波信号。当有高功率微波通过传输线时,在悬臂梁和射频信号线之间产生等效的静电力,悬臂梁被拉下来,产生一个小的位移,改变了悬臂梁和下拉电极板之间的电容值,因此可以通过测试电容的改变量来实现对微波功率的检测<sup>[12]</sup>。

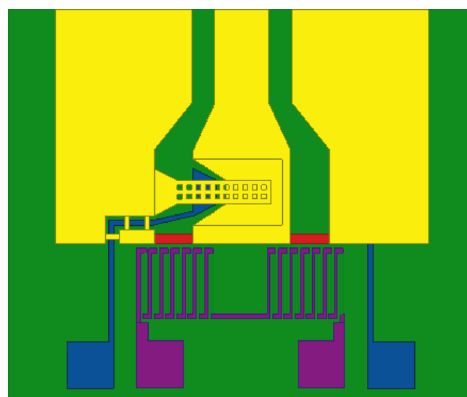


图 1 双通道 MEMS 微波功率传感器结构

Fig. 1 Structure diagram of MEMS double-channel microwave power sensor

在信号完整性领域, S 参数又被称为行为模型,因为它可以作为描述线性、无源互连行为的一种通用手段。一般而言,信号作为激励作用于互连时,互连的行为会产生一个响应信号。当一个微波信号输入到互连时,它可以从互连散射回去,也可以散射到互连的其它连接处。S 参数就是散射参数,它是微波传输过程中的一个重要考量参数。共面波导(Coplanar Waveguide, CPW)是一种平面传输线,其信号线、地线处于同一平面,被广泛应用于 MEMS 微波功率传感器中,CPW 传输线如图 2 所示。

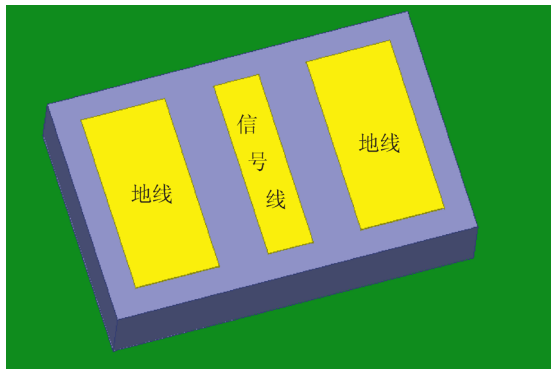


图 2 CPW 传输线结构图

Fig. 2 Schematic diagram of CPW transmission line

在热电式 MEMS 微波功率传感器中,CPW 传输线被用来传输微波信号,实现了终端电阻的并联。在 CPW 传输波的时候,会发生介质损耗、导体损耗和辐射损耗。当 CPW 厚度很小、相对介电常数较大时,波的主要损耗就是导体损耗。根据微波传输理论<sup>[13]</sup>将 CPW 当作双端口网络来处理,如图 3 所示,  $a_1$  为端口 1 处入射波,  $b_1$  为反射波。  $a_2$  和  $b_2$  为端口 2 的入射波和反射波。

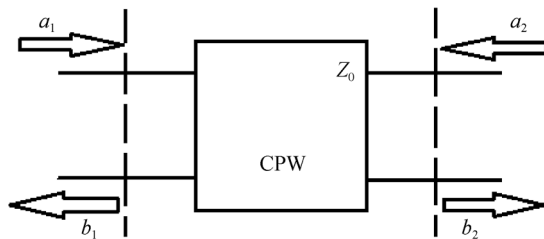


图 3 CPW 的二端口网络

Fig. 3 Two-port network of CPW

回波损耗  $S_{11}$  表示端口 2 匹配时,端口 1 的反射系数:

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1} (a_2 = 0). \quad (1)$$

在端口 2 接负载电阻  $Z_L$ ,当负载电阻  $Z_L$  与 CPW 的特征阻抗  $Z_0$  不相等时,就会发生反射。设  $V_0^+$  为负载入射电压,  $V_0^-$  为反射电压,则 CPW 与负载的反射系数为:

$$\Gamma = \frac{V_0^-}{V_0^+} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}. \quad (2)$$

理想情况下,负载电阻和特征阻抗完全匹配,  $Z_L = Z_0$ ,回波损耗为零,  $S_{11}$  无穷小。

### 3 建模与仿真

根据 RF MEMS 微波理论<sup>[14]</sup>,双通道 MEMS 微波功率传感器的回波损耗可以表示为:

$$S_{11} = -\frac{Z_0}{2Z_0 - j(2/\omega C)}. \quad (3)$$

本文中双通道 MEMS 微波功率传感器的悬臂梁起着电容式微波功率传感器的作用,通过力学分析可以得到电容  $C$  的表达式<sup>[15]</sup>:

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{g_0 + g_1/\epsilon_r} \cdot \left[ 1 + \frac{\epsilon_0 A}{2k(g_0 + g_1/\epsilon_r)^3} \cdot Z_0 \cdot P_{in} \right], \quad (4)$$

式中:  $A$  为平板电容的面积,  $\epsilon_0$  为真空的相介电常数,  $k$  为悬臂梁的弹性系数,  $g_0$  为梁的初始间隙,  $g_1$  为介质层的厚度,  $\epsilon_r$  为介质层的相对介电常数,  $Z_0$  是共面波导的特征阻抗。

由式(3)和式(4)可得:

$$S_{11} = -\frac{Z_0}{2Z_0 - j \left[ 1 / \left( \frac{\pi f \epsilon_0 A}{g_0 + g_1/\epsilon_r} + \frac{\pi f \epsilon_0 2A^2 Z_0 P_{in}}{2k(g_0 + g_1/\epsilon_r)^4} \right) \right]}, \quad (5)$$

式中  $f$  是微波信号的频率。

$S_{11}$  主要与悬臂梁与下拉电极板的间距  $g_0$  以及微波信号的频率  $f$  有关,通过 MATLAB 软件计算得出回波损耗在 10 GHz 条件下随着悬臂梁间距的变化曲线如图 4 所示。结合实际情况选取几个悬臂梁间距,得到回波损耗在 8~12 GHz 频率内的关系曲线,如图 5 所示。由图 5 可以看出,回波损耗  $S_{11}$  与微波信号的频率是正线性相关的,与悬臂梁和下拉电极间距是负相关的。结合理论计算设计出双通道 MEMS 微波功率传感器的结构,通过有限元软件 HFSS 仿真,得到的仿真结

果如图 6 所示。可以看出,理论计算结果和 HFSS 仿真结果比较吻合,误差在 1 dB 以内,这表明本文所建立的 S 参数模型能够较好地反映出双通道传感器的匹配特性。

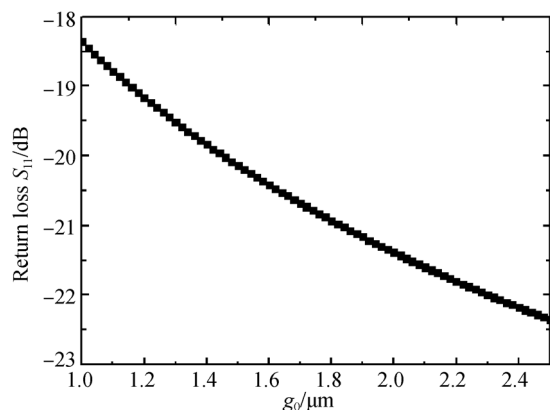


图 4 在不同悬臂梁间距下回波损耗的理论结果  
Fig. 4 Theoretical results of return loss at different cantilever spacings

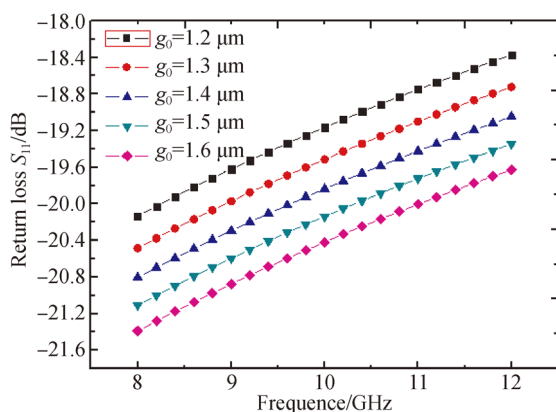


图 5 在不同频率、不同悬臂梁间距下的回波损耗理论结果  
Fig. 5 Theoretical results of return loss at different frequencies and different cantilever spacings

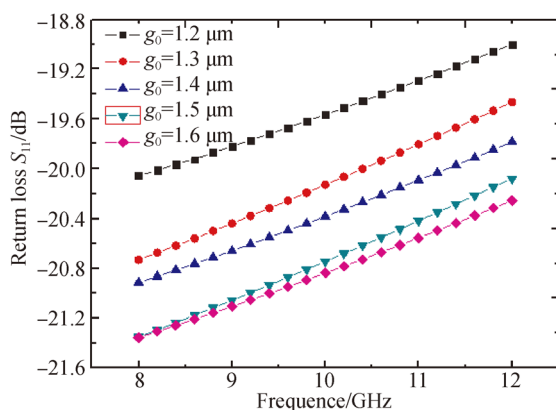


图 6 在不同频率、不同悬臂梁间距下的回波损耗仿真结果  
Fig. 6 Simulation results of return loss at different frequencies and different cantilever spacings

## 4 测量实验与结果

MEMS 悬臂梁和下拉电极板的间距设为  $1.6\ \mu\text{m}$ , 制作完成的双通道 MEMS 微波功率传感器的 SEM 图如图 7 所示。

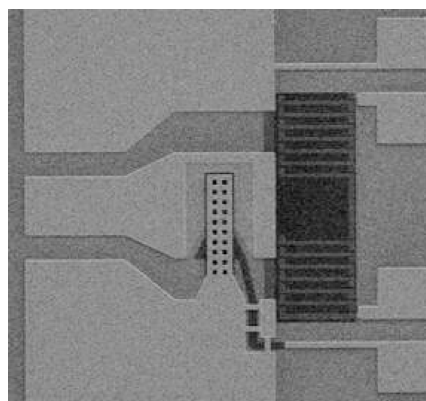


图 7 双通道 MEMS 微波功率传感器的 SEM

Fig. 7 SEM image of a MEMS double-channel microwave power sensor

双通道 MEMS 微波功率传感器的测试图如图 8 所示,采用微波探针台 Cascade Microtech 1200 和一台安捷伦网络分析仪来测试双通道 MEMS 微波功率传感器的回波损耗。结合建立的 S 参数解析模型得到的仿真结果,比较实验测试结果如图 9 所示。从图 9 可以看出,微波功率在  $8\sim 12\ \text{GHz}$  频率内,回波损耗总体小于  $-19\ \text{dB}$ ,和理论仿真结果相比,误差在 1 dB 以内,基本符合理论仿真结果。

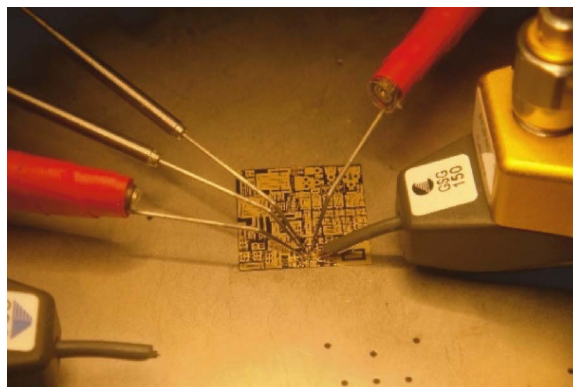


图 8 双通道 MEMS 微波功率传感器的测试图

Fig. 8 Test pattern of MEMS double-channel microwave power sensor

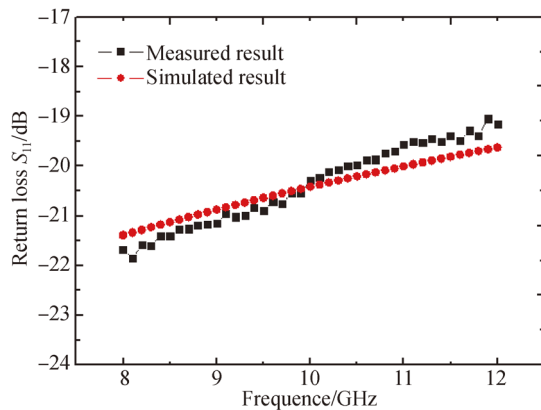


图9 回波损耗测试结果

Fig. 9 Measured results of return loss

## 5 结 论

为了减少双通道 MEMS 微波功率传感器的悬臂梁结构对共面波导的特征阻抗与终端负载电

阻匹配的影响,降低传感器的回波损耗,提高传感器的测量精度,本文对 S 参数进行了详细的分析与研究,构建了双通道 S 参数理论解析模型,推导出微波回波损耗的表达式,得到了 MEMS 悬臂梁的间距和回波损耗系数  $S_{11}$  的关系,有限元软件 HFSS 仿真结果和理论结果吻合。基于上述研究,设计并制作了双通道 MEMS 微波功率传感器,并对该传感器进行了回波损耗测试。测试结果表明,该传感器的回波损耗小于  $-19$  dB,和理论仿真结果相比,误差在 1 dB 以内。误差主要来源于共面波导的欧姆损耗、工艺制作过程中的误差、测量误差以及在测量微波信号时悬臂梁和下拉电极板的间距变化等因素,这是在设计双通道 MEMS 微波功率传感器时必需考虑的因素。因此,所建立的 S 参数理论解析模型可以作为设计双通道 MEMS 微波功率传感器的理论基础。

### 参考文献:

- [1] 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 C F, YAN T T, SONG G R, *et al.*. Design and optimization of a strain sensor based on rectangular microstrip patch antenna [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(2): 361-367. (in Chinese)
- [2] 庄须叶, 喻磊, 王新龙, 等. MEMS 硅半球陀螺球面电极成形工艺[J]. 光学精密工程, 2016, 24(11): 2746-2752.  
ZHUANG X Y, YU L, WANG X L, *et al.*. Development of spherical capacitive electrodes of MEMS silicon hemispherical gyros [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(11): 2746-2752. (in Chinese)
- [3] 施云芬, 施云波, 刘月华, 等. 基于 MEMS 叠层微结构  $\text{SO}_2$  毒气传感器的研究[J]. 光学精密工程, 2008, 16(6): 1075-1081.  
SHI Y F, SHI Y B, LIU Y H, *et al.*. Sulfur dioxide poison gas sensor based on MEMS laminated microstructure [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(6): 1075-1081. (in Chinese)
- [4] 魏新国, 江洁, 温志明, 等. 基于 MEMS 的数字式太阳传感器光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2008, 16(18): 1361-1366.  
WEI X G, JIANG J, WEN ZH M, *et al.*. Optical system design for MEMS based digital sun sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(18): 1361-1366. (in Chinese)
- [5] 丁汛, 赵跃进, 丁玉奎. 基于多图像融合的 MEMS 显微三维形貌重构[J]. 光学精密工程, 2018, 26(5): 1275-1285.  
DING X, ZHAO Y J, DING Y K. Three-dimensional microscopic reconstruction of MEMS based on multi image fusion [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(5): 1275-1285. (in Chinese)
- [6] DEHE A, KROZER V, FRICKE K. Integrated microwave power sensor [J]. *Electronics Letters*, 1995, 31(25): 2187-2188.
- [7] FERNANDEZ L J, WIEGERINK R J, FLOKSTRA J. A capacitive RF power sensor based on technology [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2006, 16(7): 1099-1107.
- [8] YI Z X, LIAO X P. A cascaded terminating-type and capacitive-type power sensor for  $-10$ - to  $22$ -dBm Application [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2016, 37(4): 489-491.
- [9] YI Z X, LIAO X P. Reliability improvement of the cascaded power sensor based on MIM capacitor [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2017, 27(3): 272-274.
- [10] CHU C L, LIAO X P, CHEN C. Improved dynamic range of microwave power sensor by MEMS cantilever beam [J]. *Journal of Microelectromechanics*



- chanical Systems*, 2017, 26(6): 1183-1185.
- [11] 孙怀远, 宋来全, 杨丽英, 等. 热电偶温度检测系统设计与应用[J]. 电子测量技术, 2014, 37(12): 86-89.  
SUN H Y, SONG L Q, YANG L Y, *et al.*. Application and design of thermocouple temperature detection system [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2014, 37(12):86-89. (in Chinese)
- [12] YAN H, LIAO X P, YI Z X. High-power handling capacity and output response of a capacitive microwave power sensor [J]. *IEEE Electron Devices Society*, 2017, 64(4):1728-1734.
- [13] JACKSON R W. Considerations in the use of coplanar waveguide for millimeter-wave integrated circuits [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1986, 34 (12): 1450-1456.
- [14] ZHANG Z Q, GUO Y, LI F, *et al.*. A sandwich-type thermoelectric microwave power sensor for GaAs MMIC-Compatible applications [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2016, 37 (12): 1639-1641.
- [15] 王德波, 白文娟, 郭艳艳, 等. 双通道 MEMS 微波功率传感器的悬臂梁设计[J]. 微电子学, 2015, 45(3) : 408-412.  
WANG D B, BAI W J, GUO Y Y, *et al.*. Design of cantilever for dual-channel MEMS microwave power sensor [J]. *Microelectronics*, 2015, 45(3): 408-412. (in Chinese)

#### 作者简介:



魏良栋(1994—),男,江苏宿迁人,2017年于南京邮电大学通达学院获得学士学位,主要从事 MEMS 微波功率传感器及其检测系统的研究。E-mail: weild9410@163.com

#### 导师简介:



王德波(1983—),男,山东泰安人,博士,副教授,2012年于东南大学获得博士学位,主要从事 MEMS 微波功率传感器和声学 MEMS 器件方面的研究。E-mail:wdb@njupt.edu.cn