



文章编号:1671-251X(2018)10-0019-05

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2018030024

矿用 MEMS 甲烷传感器硅微加热器功率优化设计

王丽影^{1,2}, 秦顺利^{1,2}, 马洪宇^{1,2}

(1. 矿山互联网应用技术国家地方联合工程实验室, 江苏 徐州 221008;

2. 中国矿业大学 物联网(感知矿山)研究中心, 江苏 徐州 221008)

摘要:在 ANSYS 有限元分析软件中对矿用微机电系统(MEMS)甲烷传感器硅微加热器功率进行了优化设计。首先建立了基于已知掺杂浓度求解一定温度范围内硅电阻率的计算模型;然后根据计算结果,利用 ANSYS 软件对 U 型双悬臂梁式硅微加热器进行了以掺杂浓度、两悬臂间距、悬臂梁宽度为影响因素的正交试验,研究了不同因素对硅微加热器功率的影响。试验结果表明:悬臂梁宽度和掺杂浓度为硅微加热器功率的主要影响因素,两悬臂间距影响较小;硅微加热器功率随悬臂梁宽度的减小而减小,随掺杂浓度的升高先增大后减小;温度为 600 °C 时,选取悬臂梁宽度为 25 μm 、掺杂浓度为 10^{19} cm^{-3} 、两悬臂间距为 10 μm 可使硅微加热器功率最优。

关键词:煤矿安全; MEMS 甲烷传感器; 硅微加热器; 功率优化; 掺杂浓度; 有限元分析; 正交试验
中图分类号:TD712 文献标志码:A

网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20180914.0954.004.html>

Power optimization design of silicon microheater of mine-used MEMS methane sensor

WANG Liying^{1,2}, QIN Shunli^{1,2}, MA Hongyu^{1,2}

(1. State-Province United Engineering Laboratory on Mine Internet Application Technology,

Xuzhou 221008, China; 2. Internet of Things(Perception Mine) Research Center,

China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: Power optimization design of silicon microheater of mine-used MEMS methane sensor was carried out by use of ANSYS finite element software. Firstly, a calculation model of silicon resistivity within certain temperature range was built on basis of known doping concentration. Then an orthogonal test for duple-cantilever type silicon microheater with U shape was carried out according to the calculated resistivity results in ANSYS software, which took doping concentration, distance between two cantilevers and cantilever width as influence factors, so as to research influence of different factors on power of silicon microheater. The test results show that cantilever width and doping concentration are main factors influencing the power of silicon microheater, while distance between two cantilevers has little influence. The power of silicon microheater decreases with decrease of cantilever width, and increases first then decreases with increase of doping concentration. Power of silicon microheater can achieve the optimal value

收稿日期:2018-03-07;修回日期:2018-09-03;责任编辑:李明。

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC0804403);江苏省自然科学基金资助项目(BK20161186)。

作者简介:王丽影(1985—),女,吉林四平人,硕士研究生,主要研究方向为 MEMS 微加热器,E-mail:wangliying@cumt.edu.cn。

引用格式:王丽影,秦顺利,马洪宇. 矿用 MEMS 甲烷传感器硅微加热器功率优化设计[J]. 工矿自动化,2018,44(10):19-23.

WANG Liying, QIN Shunli, MA Hongyu. Power optimization design of silicon microheater of mine-used MEMS methane sensor[J].

Industry and Mine Automation, 2018, 44(10): 19-23.

when cantilever width is 25 μm , doping concentration is 10^{19} cm^{-3} and distance between two cantilevers is 10 μm at 600 $^{\circ}\text{C}$.

Key words: coal mine safety; MEMS methane sensor; silicon microheater; power optimization; doping concentration; finite element analysis; orthogonal test

0 引言

甲烷传感器是煤矿防治瓦斯灾害必不可少的设备。现有基于能谱、质谱或色谱的瓦斯检测设备大多只能在线下使用,且体积庞大,难以实现井下在线检测和随身携带。MEMS(Microelectro Mechanical Systems,微机电系统)气体传感器是基于微机械、微电子及薄膜技术的气敏元件,具有体积小、功耗低、成本低、灵敏度高、响应速度快、寿命长、易集成等优点^[1-2]。研制矿用 MEMS 甲烷传感器具有现实意义。

矿用 MEMS 甲烷传感器中,硅微加热器的体积、功耗与温度性能制约着传感器向小体积、低功耗方向发展^[3-5]。因此,有必要对硅微加热器进行功率优化。为了避免实物加工造成的高成本^[6],本文采用 ANSYS 有限元分析软件^[7-9],建立了矿用 MEMS 甲烷传感器悬臂梁式硅微加热器仿真模型,研究了掺杂浓度对硅微加热器功率的影响,并以掺杂浓度、两悬臂间距、悬臂梁宽度为影响因素进行正交设计,研究了不同因素对硅微加热器功率的影响,根据正交试验结果对硅微加热器功率进行了优化设计。

1 硅微加热器结构

悬臂梁式硅微加热器利用 4 根悬臂梁支撑工作区^[9],由于将硅微加热器与衬底悬吊隔离,降低了因热传导损失的热量,极大降低了传感器功耗,提高了响应速度^[10-11]。本文中矿用 MEMS 甲烷传感器采用双悬臂梁支撑工作区的 U 型结构,如图 1 所示。与四悬臂结构相比,该结构进一步减少了衬底与工作区之间的热传导。悬臂梁材料为掺杂单晶硅,悬臂梁底端固定在衬底上。整个硅微加热器总长度为

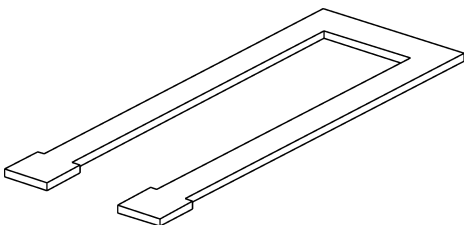


图 1 双悬臂梁式硅微加热器结构

Fig. 1 Structure of silicon microheater with dule-cantilever

1 300 μm ,厚度为 10 μm 。当金属电极接通电源时,电流流过硅微加热器,使其升温。

2 硅微加热器的电阻率计算

为研究掺杂浓度对硅微加热器功率的影响,需要计算不同掺杂浓度下硅的电阻率。N 型硅电阻率 ρ_N 与 P 型硅电阻率 ρ_P 分别为^[12]

$$\rho_N = \frac{1}{nq\mu_N} \quad (1)$$

$$\rho_P = \frac{1}{pq\mu_P} \quad (2)$$

式中: n 为电子浓度; q 为单电子电量,本文取 $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$; μ_N 为电子迁移率; p 为空穴浓度; μ_P 为空穴迁移率。

半导体内的载流子在室温(300 K)以上时即进入饱和区。单一类型硅处于饱和区和本征激发态之间时,电子浓度 n 和空穴浓度 p 分别为^[12]

$$n = \frac{N_N + (N_N^2 + 4n_i^2)^{1/2}}{2} \quad (3)$$

$$p = \frac{N_P + (N_P^2 + 4n_i^2)^{1/2}}{2} \quad (4)$$

式中: N_N 为 N 型硅掺杂浓度; n_i 为本征载流子浓度^[13]; N_P 为 P 型硅掺杂浓度。

$$n_i = 9.15 \times 10^{19} \left(\frac{T}{300} \right)^2 \exp(-0.5928/(kT)) \quad (5)$$

式中: T 为温度; k 为玻尔兹曼常数, $k = 8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$ 。

将 k 值代入式(5),得

$$n_i = 9.15 \times 10^{19} \left(\frac{T}{300} \right)^2 \exp\left(-\frac{6880}{T}\right) \quad (6)$$

$T=300 \text{ K}$ 时,由式(6)得 $n_i = 1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$,与实际测量数据^[14] 非常接近。将式(6)与式(3)、式(4)联立,即可求解单一类型硅中电子浓度或空穴浓度。

电子迁移率 μ_N 和空穴迁移率 μ_P 可由 D. J. Roulston 提出的公式计算^[15]:

$$\begin{aligned} \mu_N &= 88T_n^{-0.57} + \frac{7.4 \times 10^8 T^{-2.33}}{1 + [N_N/(1.26 \times 10^{17} T_n^{2.4})]0.88T_n^{-0.146}} \\ \mu_P &= 54.3T_n^{-0.57} + \end{aligned} \quad (7)$$

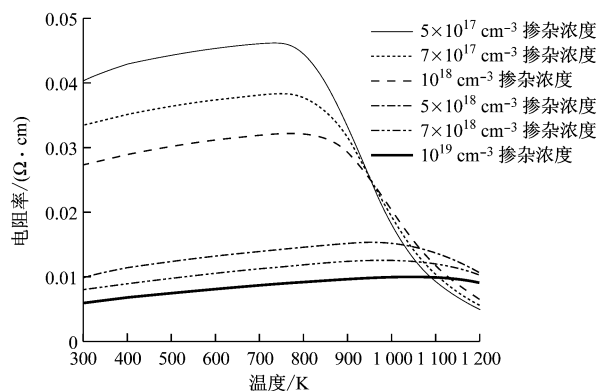
$$\frac{1.36 \times 10^8 T^{-2.33}}{1 + [N_P / (2.35 \times 10^{17} T_n^{2.4})] 0.88 T_n^{-0.146}} \quad (8)$$

式中 $T_n = T/300$ 。

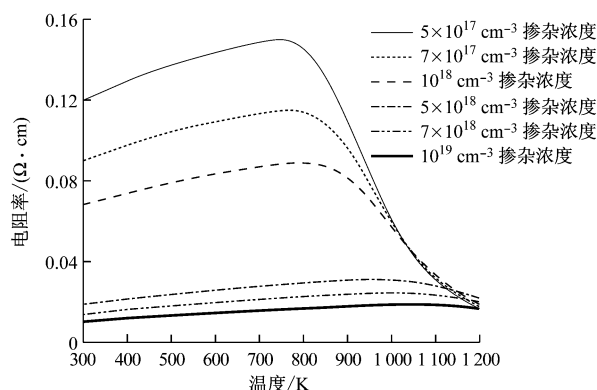
采用式(7)、式(8)计算所得数值与 G. L. Pearson 等^[16]及 F. J. Morin 等^[17]的实验结果很接近。

根据式(3)一式(8)计算出 n, p, μ_N, μ_P 并代入式(1)、式(2),即可求出不同温度下 N 型硅、P 型硅电阻率。

在 Matlab 软件中对上述计算过程编程,求解掺杂浓度为 $5 \times 10^{17}, 7 \times 10^{17}, 10^{18}, 5 \times 10^{18}, 7 \times 10^{18}, 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 时不同温度下 N 型硅、P 型硅的电阻率,计算结果如图 2 所示。该结果与文献[12]中的一般半导体电阻率变化趋势一致,且 300 K 时电阻率与 GB/T 13389—2014《掺砷掺磷掺砷硅单晶电阻率与掺杂剂浓度换算规程》^[18]非常吻合。



(a) N 型硅



(b) P 型硅

图 2 硅电阻率计算结果

Fig. 2 Calculated results of silicon resistivity

3 仿真试验

3.1 试验设置

采用 ANSYS 软件对矿用 MEMS 甲烷传感器硅微加热器进行仿真。在设置材料属性时,选择各

项同性热导率与各项同性电阻率,电阻率采用第 2 节所述方法求解。

在 ANSYS Workbench 中建立热电耦合项目,对硅微加热器进行参数化建模分析,如图 3 所示。设置 U 型双悬臂梁式硅微加热器总长度为 $1\,300 \mu\text{m}$,厚度为 $10 \mu\text{m}$,两悬臂间距与悬臂梁宽度为变量。

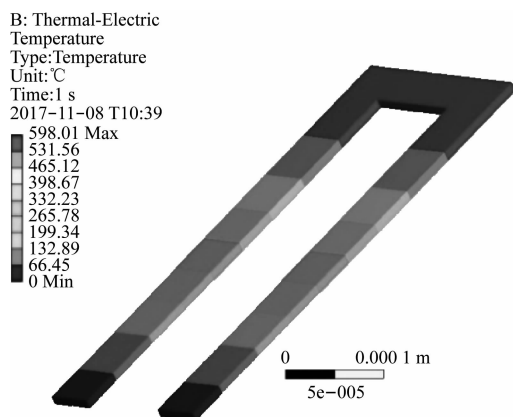


图 3 硅微加热器仿真模型

Fig. 3 Simulation model of silicon microheater

因硅的导热性能优良,在硅微加热器的热损耗中,很大一部分是通过衬底热传导流失的^[19],硅微加热器与衬底的接触面积越小,其热损耗越小。构建仿真模型时,在硅微加热器模型外部建立一个完全将加热器包裹的立方体空气模型,来模拟硅微加热器与空气之间的热传导,空气热导率设置为 $0.024\,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

3.2 掺杂浓度对硅微加热器功率的影响分析

为研究掺杂浓度对硅微加热器功率的影响,在确定悬臂梁宽度和两悬臂间距的条件下改变掺杂浓度,记录不同掺杂浓度下硅微加热器在不同温度下的功率。

创建悬臂梁宽度为 $5 \mu\text{m}$ 、两悬臂间距为 $100 \mu\text{m}$ 的硅微加热器仿真模型,选取 N 型硅进行仿真,掺杂浓度分别为 $7 \times 10^{17}, 10^{18}, 5 \times 10^{18}, 10^{19} \text{ cm}^{-3}$,温度由 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 升至 $800 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上,试验结果如图 4 所示。可看出温度在 $250 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下时,掺杂浓度对硅微加热器功率的影响不明显; $250 \sim 600 \text{ }^\circ\text{C}$ 情况下,掺杂浓度为 $7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 时硅微加热器功率较小;温度高于 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 情况下,掺杂浓度为 10^{19} cm^{-3} 时硅微加热器功率较小。

3.3 正交试验及结果分析

正交设计是研究多因素、多水平对试验性能指标影响的设计方法,具有试验次数少、效果好、方法简单、使用方便、效率高等优点^[20]。

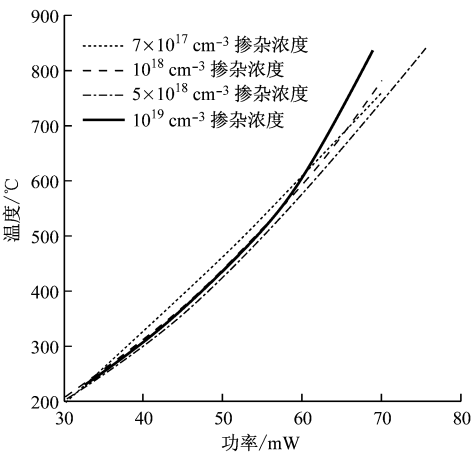


图 4 硅微加热器功率仿真结果

Fig. 4 Power simulation results of silicon microheater

对于硅微加热器,掺杂浓度会改变硅的电阻率,从而对功率产生影响;在给定电流条件下,悬臂梁宽度会改变电流密度,从而影响功率。经综合考虑,以 N 型硅材料的硅微加热器为研究对象,选取掺杂浓度、两悬臂间距、悬臂梁宽度 3 个因素进行 4 个水平的正交试验,见表 1。

表 1 硅微加热器正交试验因素及水平
Table 1 Factors and levels of orthogonal test of silicon microheater

水平	因素		
	掺杂浓度/ cm ⁻³	两悬臂 间距/ μm	悬臂梁 宽度/ μm
1	7×10^{17}	2	25
2	10^{18}	5	30
3	5×10^{18}	10	40
4	10^{19}	20	50

实际测量的硅微加热器电阻与电流关系如图 5 所示^[21],740~760℃时电阻最大,超出该温度范围后单晶硅进入本征区,电阻随电流增大而减小,硅性能不稳定,响应时间变慢,效率降低。为避免该问题,将硅微加热器温度设为 600℃。

对所建的硅微加热器仿真模型按表 1 进行正交试验,控制输入电流使硅微加热器温度达到 600℃(误差为±1.12%),记录硅微加热器功率与最高加热温度。

以仿真得到的硅微加热器电势差与输入电流为依据,计算硅微加热器功率并对其进行极差分析,得出水平 1—4 下功率的平均值 k_1 — k_4 和各因素的极差,结果见表 2。比较各因素的极差,确定主次要影响因素,并最终确定最佳因素取值。

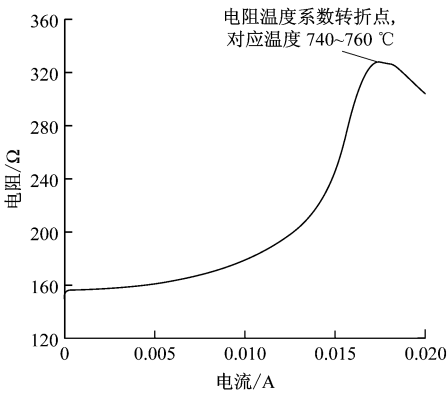


图 5 硅微加热器电阻与电流关系

Fig. 5 Relationship between resistance of silicon microheater and current

表 2 硅微加热器正交试验结果

Table 2 Orthogonal test results of silicon microheater

因素	掺杂浓度	两悬臂间距	悬臂梁宽度
功率/ mW	k_1	89.939 54	90.969 18
	k_2	90.965 58	90.683 79
	k_3	92.769 79	90.556 33
	k_4	89.582 23	91.047 85
极差	3.188	0.492	67.784

从表 2 可看出,根据各功率极差,各因素对硅微加热器功率的影响由大到小依次为悬臂梁宽度、掺杂浓度、两悬臂间距;两悬臂间距对硅微加热器功率影响较小;悬臂梁宽度越小,硅微加热器功率越小;随着掺杂浓度的升高,硅微加热器功率先增大后减小;当悬臂梁宽度为 25 μm 、掺杂浓度为 10^{19} cm^{-3} 、两悬臂间距为 10 μm 时,硅微加热器取得最优功率。

4 结论

采用有限元分析和正交设计方法,研究了 U 型双悬臂梁式硅微加热器中掺杂浓度、两悬臂间距、悬臂梁宽度对硅微加热器功率的影响,得出结论:

(1) 悬臂梁宽度、掺杂浓度、两悬臂间距对硅微加热器功率的影响程度依次减小。悬臂梁宽度和掺杂浓度为硅微加热器功率的主要影响因素,两悬臂间距影响较小。

(2) 硅微加热器功率随悬臂梁宽度的减小而减小,随掺杂浓度的升高先增大后减小。当温度为 600℃时,选取悬臂梁宽度为 25 μm 、掺杂浓度为 10^{19} cm^{-3} 、两悬臂间距为 10 μm 可使硅微加热器功率最优。

参考文献(References):

- [1] 王振强,杨明庆,贺军辉,等. 不同种类敏感膜修饰的 QCM 气体传感器研究现状[J]. 化学进展,2015,27(增刊1):251-266.
WANG Zhenqiang, YANG Mingqing, HE Junhui, et al. Progress of different sensing materials modified QCM gas sensors[J]. Progress in Chemistry,2015,27(S1):251-266.
- [2] DAS S, JAYARAMAN V. SnO_2 : a comprehensive review on structures and gas sensors[J]. Progress in Materials Science,2014,66(23):112-255.
- [3] ANDIO M A, BROWNING P N, MORRIS P A, et al. Comparison of gas sensor performance of SnO_2 nanostructures on microhotplate platforms[J]. Sensors and Actuators B: Chemical,2012,165(1):13-18.
- [4] MOON S E, LEE H K, CHOI N J, et al. Low power consumption micro $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ gas sensor based on micro-heater and ink jetting technique[J]. Sensors and Actuators B: Chemical,2015,217(8):146-150.
- [5] 刘泽文,田昊,刘冲. 微加热器热传导试验与计算[J]. 光学精密工程,2011,19(3):612-619.
LIU Zewen, TIAN Hao, LIU Chong. Experiment and thermal calculation of micro heater[J]. Optics and Precision Engineering,2011,19(3):612-619.
- [6] ZHU Y, BAZAEI A, MOHEIMANI S O R, et al. Design, modeling, and control of a micromachined nanopositioner with integrated electrothermal actuation and sensing [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2011, 20(3): 711-719.
- [7] 杜媛婷. Si 基微结构 CO 气体传感器微系统的设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2013.
- [8] 罗伟栋. PCR 扩增芯片中微加热器结构优化分析[J]. 传感技术学报,2005,18(3):627-630.
LUO Weidong. Analysis and optimization to the structure of micro-heater in PCR chip[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2005, 18(3): 627-630.
- [9] PRIBOROTSKAYA N L, KING W P. Silicon microcantilever hotplates with high temperature uniformity[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2009,152(2):160-167.
- [10] 曲鲁,兰怀迎,刘文利,等. 悬挂式气敏元件的热功耗和超低热功耗元件探讨[J]. 郑州轻工业学院学报,2000,15(4):34-36.
QU Lu, LAN Huaiying, LIU Wenli, et al. Discussion on thermal-power consumption of suspended gas sensors and ultralow thermal-power consumption device[J]. Journal of Zhengzhou Institute of Light Industry,2000,15(4):34-36.
- [11] 汪家奇,唐祯安. 一种与 CMOS 工艺兼容的钨微热板[J]. 传感技术学报,2009,22(1):42-44.
WANG Jiaqi, TANG Zhen'an. CMOS compatible tungsten micro-hotplate [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators,2009,22(1):42-44.
- [12] 刘恩科. 半导体物理学[M]. 7 版. 北京:电子工业出版社,2008.
- [13] ANDERSON B L, ANDERSON R L. 半导体器件基础[M]. 邓宁,田立林,任敏,译. 北京:电子工业出版社,2004.
- [14] 施敏,伍国珏. 半导体器件物理[M]. 3 版. 耿莉,张睿智,译. 西安:西安交通大学出版社,2008.
- [15] ROULSTON D J. Bipolar semiconductor devices[M]. New York: McGraw-Hill,1990.
- [16] PEARSON G L, BARDEEN J B. Electrical properties of silicon[J]. Physics Review,1949,75(5):865-883.
- [17] MORIN F J, MATIA J P. Electrical properties of silicon[J]. Physics Review,1954,96(1):28-35.
- [18] GB/T 13389—2014 掺硼掺磷掺砷硅单晶电阻率与掺杂剂浓度换算规程[S].
- [19] TSAI J R H, LIN L. Transient thermal bubble formation on polysilicon micro-resistors[J]. Journal of Heat Transfer,2002,124(22):375-382.
- [20] 马洪芳,马芳,刘志宝,等. Al/Ga 共掺杂 ZnO 透明导电薄膜的正交优化[J]. 太阳能学报,2015,36(7):1550-1555.
MA Hongfang, MA Fang, LIU Zhibao, et al. Orthogonal optimization of Al/Ga co-doped ZnO transparent conducting thin film[J]. Acta Energeiae Solaris Sinica,2015,36(7):1550-1555.
- [21] MA Hongyu. Cantilever-type microheater fabricated with thick silicon[J]. Microsystem Technology,2015,21:801-807.