

湿度传感器技术展望

侯国华¹, 殷景志², 李万成², 高福斌², 马 艳², 陈信琦³

(1. 吉林广播电视大学, 吉林长春 130012;

2. 集成光电子学国家重点联合实验室吉林大学实验区, 吉林大学电子科学与工程学院, 吉林长春 130012;

3. 中国电子科技集团公司第四十九研究所, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘要: 随着工业的发展, 湿度监测已广泛地应用在仪器仪表、自动控制系统、农业、气候和环境等各个领域。文中以近十几年的文献资料为基础, 介绍了目前利用电学、声学 and 光学各种不同原理制作的湿度传感器, 比较了采用陶瓷、半导体、聚合物和纳米等敏感材料制备的湿度传感器对其灵敏度、湿滞、恢复和响应时间等的影响, 给出了一些市场上流行的湿度传感器性能指标。并对未来湿度传感器产品应用、制造材料、工艺的趋势做了展望。

关键词: 湿度传感器; 电子; 声学; 光学; 响应时间; 湿滞

中图分类号: TP273 文献标识码: A 文章编号: 1002-1841(2016)04-0001-04

Outlook of Technology in Humidity Sensor

HOU Guo-hua¹, YIN Jing-zhi², LI Wan-cheng², GAO Fu-bin², MA Yan², CHEN Xin-qi³

(1. Jilin Radio and TV University, Changchun 130012, China; 2. State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China;

3. Forty-ninth Research Institute of China Electronic Technology Group Corporation, Harbin 150001, China)

Abstract: With industrial development, humidity monitoring has been widely used in various fields such as instrumentation, automatic control systems, agriculture, climate and environment. Based on papers published in the past ten years, humidity sensors designed with the electrical, acoustic, and optical principles were introduced in this paper. The sensitivity, hysteresis, recovery and response time were compared for different humidity sensors made by ceramics, semiconductors, polymers, and nano-structured materials. The performance specifications of market main stream humidity sensor were presented. Trends of humidity sensor's application, material, and manufacture technology were described.

Key words: humidity sensor; electronic; acoustic; optical; response time; hysteresis

0 引言

湿度是指水蒸气在空气中的浓度。随着社会的进步, 对湿度的检测和控制愈来愈重要。湿度传感器是能将水蒸气的量转换成可以测量量的传感器, 它已被广泛地应用在图书和档案管理、气候监测、精密仪器的使用和保护、物品储藏和工业生产等领域^[1-7]。研究人员已根据不同工作原理制备了相应的湿度传感器, 但对于一个理想的湿度传感器来说它应该具有高的灵敏度、长期稳定性、响应时间短、低的价格及能在宽的湿度和温度范围内工作。本文对当前湿度传感领域的最新研究进展进行综述, 首先介绍湿度传感器的相关知识, 之后介绍目前国际上采用电学、声学 and 光学原理制作的新型湿度传感器及各类传感器使用的材料, 比较了采用陶瓷、半导体和聚合物等敏感材料制备技术的湿度传感器对其湿滞、恢复和响应时间等关键特性的影响, 给出了各类湿度传感器的技术指标, 并对未来湿度传感器的发展趋势进行了展望。

1 湿度

众所周知, 水依据周围不同的温度和压力可有 3 种不同的相, 即冰、液和气态相, 表 1 给出了水分子的一些性质。周围的

空气总是含有一定的水汽, 空气中水汽的存在导致了湿度。湿度是涉及气态形式中的水, 而水分是指液体形式中的水, 因此湿度服从气体定律。由于具有湿度的蒸汽中含有高度极性的分子, 当周围温度有微小变化时就可以使物质表面发生凝聚和蒸发, 从而使物质的性质发生变化, 而这高的极性是由于 H、O 原子之间存在负电差。在日常生活中, 如何测量和控制湿度就显得非常重要^[8-9]。

表 1 水分子性质^[10]

性质	值
H-O-H 角	104.5°
OH 键长	0.095 7 nm
Molar 质量	18.015 28
分子半径	1.45 Å
OH 离解能	498 kJ/mol (5.18 eV)
偶极矩	6.1×10^{-30} A·s·m (1.83-D)

2 湿度传感器的分类及参数

按照制作原理通常可将湿度传感器分成如下三大类: 电子、声学 and 光学传感器。第一类传感器是利用敏感材料的电子

收稿日期: 2015-07-19

和机械特性与湿度的关系制备的传感器,而在这一类传感器中又主要以电容湿度传感器和电阻湿度传感器为主^[11];第二类传感器是根据声学信号随湿度的变化而发生变化的性质制作的传感器,目前主要是利用表面波、石英晶体微天平和体声波特性^[12];第三类光学湿度传感器,它是根据湿度的变化会引起媒介层性质的变化,进而使光传播性质(吸收、反射系数、频率等)变化而制作的传感器,研究比较多的主要有光纤湿度传感器和干涉测量湿度传感器^[13]。表2给出了表征湿度传感器特性的常用参数。

表2 湿度传感器常用参数

参数	描述
相对湿度	空气中实际水汽含量(绝对湿度)与同温度下的饱和湿度(最大水汽含量)的百分比值
灵敏度	输出信号与输入信号之比
精度	相对参考信号的偏差
响应时间	湿度发生跃变时,输出达到稳定变化量的一定比例所需要的时间
漂移	测试条件不变的情况下,传感器输出随时间的变化
重复性	相同测试条件下,输入量做全程多次测量,所得曲线间的一致性
温度依赖	一定湿度下,传感器输出随温度的变化
湿滞	传感器在正向和反向行程过程中,其输出与输入特性的不重合性

3 电子湿度传感器

这类传感器的主要优点是设计简单和价格低,不足是:需要定期校准、测试<5% RH的湿度困难、不好的线性和相对长的响应时间,而且不易在极端环境、遥远地区、有电磁干扰区域中使用。

在过去几十年中,人们的研究主要致力于促进电子湿度传感器的性能。目前市场上可获得的该类湿度传感器典型的价格低于\$ 10,而且它们的大多数是直接与微处理机连接,不需要额外的放大器或数字转换器。此外,一个外部微处理器能够直接给出露点和水蒸气的浓度。不过这些市场上使用的器件也存在着如下不足之处:

- (1) 在某些应用中响应时间长;
- (2) 精度低,接近±2%,特别是在低湿度和高湿度时;
- (3) 宽的湿滞和不好的线性;
- (4) 工作温度范围有限和稳定性低。

这类传感器的典型响应时间在5~60 s,虽然对许多应用它是适合的,但对其他领域(如做呼吸传感器),这个响应时间就太长。此外,它的精度仅有百分之几RH,当在相对湿度0%~10%和90%~100%极端范围内使用,精度会更低。器件还存在宽的湿滞现象,会使器件的输出受湿度是在增加还是减小过程影响明显。最高工作温度通常在80~120℃之间,它不能满足一些工业烘干方面的应用要求。市场上可获得的一些电子湿度传感器性能见表3。

表3 市场上电子湿度传感器性能^[14]

传感器	类型	响应时间/s		范围/% RH (相对湿度)		湿滞/%
		上升	下降	最小	最大	
SHT15 Polymer	电容	8	8	0	100	2
DHT22	电容	—	—	0	100	2
HR202	电阻	10	10	20	95	1
DHT11	电阻	10	10	20	90	4
HMT330	电子	8	17	0	100	1
HMT330	电子	20	50	0	100	1
HMT330	电子	40	60	0	100	1
HC2-C	电子	15	—	0	100	—
Fluke 971	电子	60	—	5	95	—

3.1 电容湿度传感器

电容型湿度传感器是利用了平行板电容器的电容值与其介质的性质有关的特性,采用敏感材料做介质层。因此电容湿度传感器的特性主要取决于材料的吸湿性和电极的几何形状。通常使用的敏感层材料有聚苯乙烯、聚酰亚胺、酯酸醋酸纤维等高分子材料,电极为叉指电极,这可增加水蒸气与敏感层表面的相互作用。电容传感器具有响应快、线性度高、湿滞低以及长期稳定性好等特点^[15-21]。Ahmad等利用有机与无机材料的合成制成了检测环境的湿度传感器^[22];Bi等研究了石墨烯氧化物对湿度敏感特性的影响^[23];Chen等则利用多壁碳纳米管(MWCNTs)制成了电容湿度传感器^[24]。表4中列出了不同敏感层电容传感器的性能。

近来依赖于CMOS-MEMS、纳米技术和电容技术的新一代湿度传感器已有报道^[25-26],新的器件具有更短的反应时间,与通常使用的器件相比其反应时间大约减少9/10以上。表4为用不同材料制备的电容湿度传感器特性值。

表4 电容湿度传感器特性^[14]

传感器	类型	响应时间/s		范围/% RH		湿滞/%
		上升	下降	最小	最大	
Composite (PEPC + NiPe + Cu ₂ O)	电容	13	15	40	100	13
Graphene oxide film	电容	10.5	41	15	95	5
MWCNTs	电容	45	15	11	97	—
Polyimide film	电容	1	1	30	90	2
3 μm polyimide film on parylene on silicon	电容	1	1	30	90	2
Polyimide film	电容	1.7	2.3	30	100	—
Standard CMOS polymer film	电容	70	70	10	95	5.5
Standard CMOS polymer film	电容	70	70	10	95	3.1
Capacitive-dependent crystal	电容	0.1	0.1	20	98	0.3

3.2 电阻湿度传感器

与电容传感器相比,目前对电阻传感器的研究主要集中在促进它的敏感性、响应时间、线性和湿滞性质方面。Arshaka等研究采用热沉积In₂O₃和锰锌铁氧体烧结膏来获得低的湿滞和

好的线性关系的电阻湿度传感器^[27-28]; Kuang 等考察了单根 SnO₂ 纳米线制作电阻湿度传感器^[29], 单根纳米线的使用可使传感器的尺寸减小, 响应速度提高; 在生长过程中由于引入了高的氧空位浓度, 这将使纳米线表面对空气中的氧和水蒸气特别敏感。该器件的性质显示其可重复的线性响应在响应和恢复阶段分别为 120 ~ 170 s 和 20 ~ 60 s; Lee 等研究了通过射频 (RF) 溅射沉积纳米结构 CN_x 膜的性质^[30], 认为 CN_x 键可与氢和羟基发生可逆反应从而产生亲水性表面, 可以吸收和释放水分子。表 5 为不同敏感材料制作的电阻湿度传感器性能值。

表 5 电阻湿度传感器的性质^[14]

传感器	类型	响应时间		范围		湿滞 1%
		/s		1% RH		
		上升	下降	最小	最大	
In ₂ O ₃ /SiO	电阻	—	—	40	90	—
MnZn Ferrite	电阻	17	25	30	90	0.97
Fe-Al-polyaniline on CMOS	电阻	—	—	32	55	—
SnO ₂ nanowire	电阻	120 ~ 17020 ~ 60		5	85	—
CNx deposited by RF sputtering	电阻	150	175	5	95	3
Sulfonated Polycarbonate	电阻	—	—	11	90	4
Polyaniline/PVA	电阻	—	—	25	85	—
MWCNT/polyimide composite film	电阻	—	—	10	95	—

4 声湿度传感器

采用声学方法测量湿度可归于机械方法, 它是根据当水分子吸附在亲水材料上面时其机械性质会发生变化。由于材料吸收周围水蒸气会引起其密度的变化, 而材料密度的变化又会使通过它的声波频率发生变化。Sauerbrey 等很早就从理论上分析了当吸收了质量为 m 的水后其振荡器频率的改变量^[31]。Sheng 等利用合成的 MWCNT/Nafion 材料作为对湿度敏感的材料^[32], 通过静电纺丝沉积在表面波振荡器 (SAWR) 表面, 并制备了相应的传感器。图 1 为其设计的用于湿度探测的 SAWR 结构单元, 其中 IDT 是叉指电极; Qiu 等利用 ZnO 基薄膜声波谐振器实现了湿度测试^[33]; Wang 等通过将纳米纤维膜涂覆在石英晶体微天平上制备了高灵敏度的湿度传感器^[34], 表 6 给出了不同材料制作的声学湿度传感器的性能值。

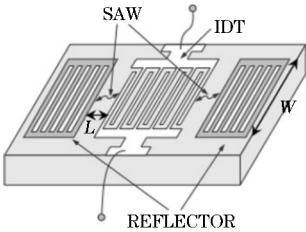


图 2 湿度探测的 SAWR 结构单元

5 光学湿度传感器

光学湿度传感器具有体积小、响应快、抗电磁干扰等优点。这些优点使光学湿度传感器应用在电化学传感器和声学湿度传感器不能应用或不适合应用的场合, 如光纤传感器应用在微波炉内部, 用来检测温度和湿度参数。由于光学传感器不需要电力, 因此可用来检测易燃的液体和气体, 并且可在恶劣的环境下 (如腐蚀性物质中) 使用。目前能够在市场上获得的光学湿度传感器的性能值列在表 7 中。

表 6 声湿度传感器的性能^[14]

传感器	频率 /MHz	灵敏度 / (ppm/% RH)	响应时间 /s	% RH	
				最小	最大
MWCNT/Nafion nano-fiber film	~ 500	885.2	10	10	80
APTS-P	433	15	10	10	100
PVA-coated dual resonator	~ 468	11 ~ 395	1 800	20	80
Nafion layer	~ 302	2.75	≤ 20	10	100
NPF-LSAW	60 ~ 110	0 ~ 6	0.25	10	90
Nanofibrous membrane	5	0.1 ~ 10	80 ~ 150	20	95
ZnO nano-tetrapods	10	0 ~ 3.3	—	30	90
Carbon nano-tube film	25	≤ 4	60/70	5	97
ZnO nanostructure film	25	0.26	90/120	5	97
Nanostructured ZnO	10	≤ 1	—	20	90
ZnO on silicon base	35/86	400/16	≤ 25	20	92
ZnO-FBAR	1 430	1.4	—	25	85

表 7 市场上的光学湿度传感器的性能^[14]

传感器	精度	响应时间 /s	% HR	
			最小	最大
Nanosonic Inc.	6% at 20 °C	0.1	0	100
O-eland FBG-based	4.5%	fast	10	100

目前, 光学湿度传感器可以利用不同技术和方法制作, 如有光谱法、改变表面反射率、Bragg 和长周期光栅、干涉仪、碳纳米管等, 特别是近年来又出现了光子晶体制备的光学湿度传感器。大多数光纤光学湿度传感器要求光纤含吸湿材料, 它通常沉积在光纤的某个区域或光纤的尖端处。Aneesh 等研究了用氧化锌纳米粒子掺杂纳米溶胶-凝胶纤维作为敏感部分的湿度传感器^[35]; Wong 等利用聚乙烯醇涂覆光子晶体光纤制作了相应的湿度传感器^[36]。一些光学湿度传感器的主要性质列在表 8 中。

表 8 光学湿度传感器的性质^[14]

传感器	灵敏度	响应时间 /s		% RH	
		上升	下降	最小	最大
ZnO nanoparticles in solgel	0.010 3 dB/% RH	0.86	0.54	5	95
SiO ₂ Nanoparticles	0.3 dB/% RH	0.15	0.1	40	98
Polyimide coated FBG	5.6 pm/% RH	2 700	—	20	98
PVA	0.60 nm/% RH	3 × 10 ⁻⁴	5 × 10 ⁻⁴	30	90
FBG in a polymer fibre	35.2 pm/% RH	1 800	—	50	95
Luminescent Ru(II) complex	—	< 90	—	4	100
SiO ₂ nanospheres	0.2 nm/% RH	< 0.02	—	20	80

6 结束语

文中对当前电子、声学和光学湿度传感器的研究进行了全面综述, 给出了用不同敏感材料制备的传感器性能。目前低价格的湿度传感器仍是以电容湿度传感器和电阻湿度传感器为

主 在过去十多年研究中,电子类湿度器件的性能已有了很大提高 特别是在开发一些与 Si 技术兼容的传感器方面有了很大进步 这有望实现其与温度及其他传感器的集成。在不同类型湿度传感器中 通过厚膜和薄膜沉积技术制备的半导体金属氧化物和金属氧化物/聚合物基传感器是引入关注的,与聚合物基薄膜或厚膜湿度传感器比较,陶瓷的合成过程简单,并且它们具有响应时间短的特性,但与聚合物材料相比由其制备的湿度传感器成本效高。近年来的研究结果显示通过纳米技术获得的湿度传感器在精度、重复性和经济效益等方面都具有优势,然而将其应用在实际环境下,如何提高传感器性能仍具有挑战。纵观湿度传感器的设计过程,纳米复合陶瓷和陶瓷/聚合物将是最有前途的材料之一,并且在愈来愈多的应用场合下,由光子晶体制作的湿度传感器将取代或补充电子湿度传感器。

参考文献:

- [1] WU S G, YAN G F, LIAN Z G, et al. An open-cavity Fabry-Perot interferometer with PVA coating for simultaneous measurement of relative humidity and temperature[J]. *Sensors and Actuators B*, 2016, 225: 509 – 56.
- [2] PREVIATI M, CANONE D, BEVILACQUA I, et al. Evaluation of wood degradation for timber check dams using time domain reflectometry water content measurements [J]. *Ecological Engineering*, 2012, 44: 2599 – 268.
- [3] TOMER V K, DUHAN S. A facile nanocasting synthesis of mesoporous Ag-doped SnO₂ nanostructures with enhanced humidity sensing performance [J]. *Sensors and Actuators B*, 2016, 223: 750 – 760.
- [4] WANG S R, KANG Y F, WANG L W, et al. Organic/inorganic hybrid sensors: A review [J]. *Sensors and Actuators B*, 2013, 182: 467 – 481.
- [5] TRIPATHY A, PRAMANIK S, CHO J, et al. Role of Morphological Structure, Doping, and Coating of Different Materials in the Sensing Characteristics of Humidity Sensors [J]. *Sensors*, 2014(14): 16343 – 16422.
- [6] FARAHANI H, WAGIRAN R, HAMIDON M N. Humidity Sensors Principle, Mechanism, and Fabrication Technologies: A Comprehensive Review [J]. *Sensors*, 2014(14): 7881 – 7939.
- [7] DESSLER A E, SHERWOOD S C. A matter of humidity [J]. *Science*, 2009, 323: 1020 – 1021.
- [8] SCHÖNBERG J N, KONDRASHOV V, PROKHOROV A, et al. Capacitive humidity and dew-point sensing: Influence of wetting of surface-attached polymer monolayers on the sensor response [J]. *Sensors and Actuators B*, 2016, 222: 87 – 94.
- [9] SRIVASTAVA R, VERMA N B C, YADAV B C. Nanostructured zinc ferrite as electrical and optoelectronic humidity sensors [J]. *Adv. Sci. Lett.*, 2014(20): 917 – 922.
- [10] SIKARWAR S, YADAV B C. Opto-electronic humidity sensor: A review [J]. *Sensors and Actuators A*, 2015, 233: 54 – 70.
- [11] GUO R, TANG W, SHEN C T, et al. High sensitivity and fast response graphene oxide capacitive humidity sensor with computer-aided design [J]. *Computational Materials Science*, 2016, 111: 289 – 293.
- [12] LIU Y, HUANG H, WANG L L, et al. Electrospun CeO₂ nanoparticles/PVP nanofibers based high-frequency surface acoustic wave humidity sensor [J]. *Sensors and Actuators B*, 2016, 223: 730 – 737.
- [13] WANG X P, SANG M H, YUAN W, et al. Optical Relative Humidity Sensing Based on Oscillating Wave-Enhanced Goos – Hänchen Shift [J]. *IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS*, 2016, 28 (3): 13 – 14.
- [14] KOLPAKOV S A, GORDON N T, MOU C, et al. Toward a New Generation of Photonic Humidity Sensors [J]. *Sensors*, 2014(14): 3986 – 4013.
- [15] WEI J, YUE C, VELDEN M, et al. Design, fabrication and characterization of a femto-farad capacitive sensor for pico-liter liquid monitoring [J]. *Sens. Actuators A Phys*, 2010, 162: 406 – 417.
- [16] CARMINATI M, FERRARI G, GUAGLIARDO F, et al. ZeptoFarad capacitance detection with a miniaturized CMOS current front-end for nanoscale sensor [J]. *Sens. Actuators A Phys*, 2011, 172: 117 – 123.
- [17] MATKO V, DONLAGIĆ D. Sensor for high-air-humidity measurement [J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1996, 45: 561 – 563.
- [18] WALLS F L, VIG J R. Fundamental limits on the frequency stabilities of crystal oscillators [J]. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 1995: 576 – 589.
- [19] FILLER R L, VIG J R. Long-term aging of the oscillators. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 1992, 39: 241 – 249.
- [20] MATKO V, KOPRIVNIKAR J. Quartz sensor for water absorption measurement in glass fiber resins [J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1998, 47: 1159 – 1162.
- [21] MATKO V. Next generation AT-cut quartz crystal sensing devices [J]. *Sensors*, 2011(5): 4474 – 4482.
- [22] AHMAD Z, ZAFAR Q, SULAIMAN K, et al. A humidity sensing organic-inorganic composite for environmental monitoring [J]. *Sensors*, 2013(13): 3615 – 3624.
- [23] BI H, YIN K, XIE X, et al. Ultrahigh humidity sensitivity of graphene oxide [J]. *Sci. Rep.*, 2013(10): 1038.
- [24] CHEN W P, ZHAO Z G, LIU X W, et al. A capacitive humidity sensor based on multi-wall carbon nanotubes (MWCNTs) [J]. *Sensors*, 2009(9): 7431 – 7444.
- [25] CHUNG V P J, YIP M C, FANG W. Resorcinol-formaldehyde aerogels for CMOS-MEMS capacitive humidity sensor [J]. *SENSORS AND ACTUATORS B-CHEMICAL*, 2015, 214: 181 – 188.
- [26] ZHANG D Z, CHANG H Y, LI P, et al. Fabrication and characterization of an ultrasensitive humidity sensor based on metal oxide/graphene hybrid nanocomposite [J]. *Sensors and Actuators B*, 2016, 225: 233 – 240.
- [27] ARSHAKA K, TWOMEY K. Thin films of In₂O₃/SiO for humidity sensing applications [J]. *Sensors*, 2002(2): 205 – 218.
- [28] ARSHAKA K, TWOMEY K, EGAN D. A ceramic thick film humidity sensor based on MnZn ferrite [J]. *Sensors*, 2002(2): 50 – 61.
- [29] KUANG Q, LAO C, WANG Z L, et al. High-sensitivity humidity sensor based on a single SnO₂ nanowire [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2007, 129: 6070 – 6071.

(下转第 10 页)

式中: A_i 为幅值; θ_i 为相位; f_i 为振荡频率; Δt 为采样时间; α_i 为衰减因子(即 τ)。

$$\varepsilon = \sum_{n=0}^{N-1} |x(n) - \hat{x}(n)|^2 \quad (5)$$

若使 ε 取得最小值,即可求出幅值、相位、振荡频率和衰减因子。

$$\begin{cases} A_i = |b_i| \\ \theta_i = \arctan [\operatorname{Im}(b_i) / \operatorname{Re}(b_i)] / (2\pi\Delta t) \\ \alpha_i = \ln |z_i| / \Delta t \\ f_i = \arctan [\operatorname{Im}(z_i) / \operatorname{Re}(z_i)] / (2\pi\Delta t) \end{cases} \quad (6)$$

4 整机试验

经验证荧光余辉时间常数 τ 与输入电流有较好的线性关系,因此将不同电流输入后的 τ 值与输入电流相互标定,再将数据输入计算机中,使用积分比值法计算出拟合后的 τ 值,即能保证对输入大电流的实时测量。

搭建实验平台,通过大直流电源产生 10~100 A 直流信号重复测量取平均值。连接好实验系统,每隔 10 A 记录下用 PC 端采集及处理程序求得的 τ 值,为确保实验数据的稳定性,每个电流下采集 10 组 τ 值,并求出均值作为标定参考值。记录数据如表 1 所示。

表 1 不同电流时的 τ 值

输入电流/A	平均 τ 值/ μ s	输入电流/A	平均 τ 值/ μ s
10	628.292	60	618.737
20	627.714	70	600.816
30	626.875	80	566.496
40	625.317	90	517.474
50	622.834	100	477.734

将平均值变化绘成曲线,如图 5 所示。 τ 的变化是单调的,在输入 50~100 A 时线性关系比较好,满足系统要求,该系统测量直流大电流是可行的,但在 0~50 A 时, τ 值分辨率不高,可能会对系统精度造成影响。

5 结束语

本文提出了一种无源光纤电流传感器关键技术分析,对主要传感单元薄膜电阻进行 ANSYS 分析,选择合适的数据处理算法,搭建并完善系统,在实验室条件下进行性能试验,证明该方案在精度上得到改善。

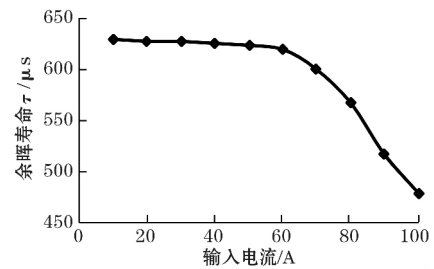


图 5 τ 值变化曲线

参考文献:

- [1] 陈阜东. 我国智能电网技术的现状和发展趋势[J]. 电气开关, 2014, 51(5): 4-6.
 - [2] 梁旭明, 张平, 常勇. 高压直流输电技术现状及发展前景[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 1-9.
 - [3] 费烨, 王晓琪, 罗纯坚. 1000kV 特高压直流电流互感器选型及结构设计[J]. 高压电器, 2012, 48(1): 7-12.
 - [4] 刘晔, 王锋, 韦兆碧. 光纤电流传感器传感头的结构与原理[J]. 仪表技术与传感器, 2002(11): 3-5.
 - [5] 张庆凌, 贾春荣, 邱志刚. 电子式电流互感器高压端信号处理电路[J]. 仪表技术与传感器, 2008(7): 17-18.
 - [6] 贾丹平, 伞宏力, 苑玮琦, 等. 基于光纤测温法的电流互感器[J]. 电工技术学报, 2008, 23(10): 47-52.
 - [7] 刘奎, 苑伟政, 邓进军, 等. 微型热敏传感器的薄膜电阻设计研究[J]. 中国机械工程, 2005(16): 202-204.
 - [8] 杨世铭, 陶文柱. 传热学[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
 - [9] 王阳. 测温式光纤直流电流测量技术的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2012.
 - [10] 贾丹平, 林乐乐, 苑玮琦, 等. 高精度光纤测温法的稳定性研究[J]. 计量学报, 2008, 29(2): 129-133.
 - [11] 朴昌浩, 王陵, 苏岭. 调制解调型电流传感器设计研究[J]. 仪表技术与传感器, 2013(11): 11-13.
 - [12] 陈田, 程武山. 高压开关柜电流在线测量[J]. 仪表技术与传感器, 2014(3): 85-88.
 - [13] 贾丹平. 荧光光纤温度测量技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- 作者简介: 贾丹平(1968—), 副教授, 博士, 主要从事光纤温度测量和光纤电流传感器的研究. E-mail: winnerjia@sohu.com

(上接第 4 页)

- [30] LEE S P. Synthesis and characterization of carbon nitride films for micro humidity sensors[J]. Sensors, 2008(8): 1508-1518.
- [31] SAUERBREY G. The use of quartz oscillators for weighing thin layers and for microweighing (In German) [J]. Zeitschrift für Physik, 1959, 155: 155-206.
- [32] SHENG L, CHEN D, CHEN Y. A surface acoustic wave humidity sensor with high sensitivity based on electrospun MWCNT/Nafion nanofiber films[J]. Nanotechnology, 2011, 22: 265504.
- [33] QIU X, WANG Z, ZHU J, et al. The effects of relative humidity and reducing gases on the temperature coefficient of resonant frequency of ZnO

based film bulk acoustic wave resonator[J]. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control, 2010, 57: 1902-1905.

- [34] WANG X, DING B, YU J, et al. A highly sensitive humidity sensor based on a nanofibrous membrane coated quartz crystal microbalance[J]. Nanotechnology, 2010, 21: 055502.
- [35] ANEESH R, KHIJWANIA S K. Zinc oxide nanoparticle-doped nanoporous sol-gel fiber as a humidity sensor with enhanced sensitivity and large linear dynamic range[J]. Appl. Opt., 2013, 52: 5493-5499.
- [36] WONG W C, CHAN C C, CHEN L H, et al. Polyvinyl alcohol coated photonic crystal optical fiber sensor for humidity measurement[J]. Sens. Actuators B Chem., 2012, 174: 563-569.