

声表面波标签的设计、制作和测试

卢 旭¹, 陈智军^{1,2}, 黄 鑫¹, 陈 涛¹, 陈培秋³, 徐海林³

(1. 南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016; 2. 南京大学 近代声学教育部重点实验室, 江苏 南京 210093;

3. 南京电子器件研究所, 江苏 南京 210038)

摘 要:与 IC 标签相比, 声表面波标签有其独特的优势。在仿真研究的基础上, 对声表面波标签进行了设计、制作和测试。标签设计主要体现在压电基片材料选择、叉指换能器设计、反射栅设计 3 个方面; 实际制作了 6 组结构各不相同的标签并进行了封装; 通过网络分析仪对设计制作的标签进行了测试, 包括特征频率测试、反射栅编码测试、叉指换能器激发效率测试 3 个部分。测试结果表明, 标签特征频率与设计一致; 通过对回波脉冲幅值的判别可实现对标签编码的识别; 叉指换能器对数增多和孔径增大都会增加其激发效率。

关键词:声表面波标签; 压电基片; 叉指换能器; 反射栅; 网络分析仪; 特征频率

中图分类号:TN65

文献标识码:A

Design, Fabrication and Testing of Surface Acoustic Wave Tag

LU Xu¹, CHEN Zhijun^{1,2}, HUANG Xin¹, CHEN Tao¹, CHEN Peiqiu³, XU Hailin³

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Ministry of Education Key Lab. on Modern Acoustics, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

3. Nanjing Electronic Devices Institute, Nanjing 210038, China)

Abstract: Compared with IC tag, surface acoustic wave tag has its unique advantages. Based on the simulation research, the design, fabrication and testing of SAW tag are performed. The SAW tag design includes the piezoelectric substrate material selection, the inter-digital transducers design and the reflectors design. Six groups of SAW tags are fabricated and packaged. The characteristic frequency, reflector encoding and IDT excitation efficiency are experimentally tested through the network analyzer. The testing conclusions are as follows: The characteristic frequency is consistent with the design requirement; the code can be read out by analyzing the amplitude of the echo pulse; the excitation efficiency can be improved by increasing inter-digital transducers pairs and aperture.

Key words: surface acoustic wave tag; piezoelectric substrate; inter-digital transducer; reflector; network analyzer; characteristic frequency

0 引言

物联网是最新一轮信息产业发展的标志。在物联网体系中, 射频识别是最关键的环节之一, 射频识别系统的基本组成包括标签和阅读器两部分。声表面波(SAW)射频识别技术具有无源, 识别距离远, 可实现对高速移动物体的识别和能适应恶劣环境等优点而成为射频识别领域的研究热点^[1]。

SAW 标签由压电基片、沉积在基片上的叉指换能器(IDT)和反射栅组成。SAW 射频识别系统

的工作原理为阅读器发射的射频查询脉冲经标签天线接收进入 IDT, 通过逆压电效应将电信号转换为 SAW 信号, SAW 在沿基片传播的过程中遇到反射栅产生反射和透射, 反射信号由 IDT 经正压电效应转换为脉冲回波信号经天线发射回阅读器。由于反射栅排列的不同, 阅读器得到的回波脉冲串也各不相同, 由此可通过反射栅编码来阅读标签信息^[2]。

SAW 标签是 SAW 射频识别系统的核心环节, 决定了整个系统的性能^[3]。与传统 IC 标签相比,

收稿日期: 2012-02-14

基金项目: 江苏省科技支撑计划工业基金资助项目(BE2011180); 国家自然科学基金资助项目(51005121); 航空科学基金资助项目(2010ZD52045); 南京航空航天大学研究生创新基金资助项目(KFJJ20110116); 江苏高校优势学科建设工程基金资助项目

作者简介: 卢旭(1988-), 男, 安徽滁州人, 硕士生, 主要从事声表面波传感与识别技术的研究。E-mail: luxuzidane@126.com。陈智军, E-mail: zjchen@nuaa.edu.cn。

SAW 标签的研究起步较晚。美国的 Hartmann^[4] 在上世纪 80 年代首先指出 SAW 技术可用于射频识别领域,从而开启了 SAW 标签研究的历史。目前对 SAW 标签的研究集中在标签的结构设计^[5]、编码方案^[6]、性能分析^[7]等方面。

本文是在基于 COMSOL 的 SAW 标签仿真研究^[8]的基础上展开的后续研究,该论文通过仿真研究表明,可通过频率特性仿真来设计标签以获得所需特征频率;通过对回波脉冲幅值的判断可得到反射栅的编码方式,从而实现对标签的识别;IDT 对数增多和孔径增大都会增加其激发效率。

本文包括 SAW 标签的设计、制作和测试 3 个环节。实际设计制作了 6 组结构各不相同的标签,通过网络分析仪进行了测试。测试结果与仿真分析一致,基本符合设计要求,并得到了一些有意义的结论。

1 标签设计

1.1 压电基片材料选择

压电基片的材料决定了 SAW 的波速和激励 SAW 振幅的大小。SAW 传播速度、机电耦合系数、温度稳定性等因素是选择压电基片材料的关键。

选择 SAW 标签的压电基片材料时,主要考虑以下条件:

- 1) 沉积 IDT 的基片表面要有良好的平整度,表面平整度在微米级以下。
- 2) 机电耦合系数高,从而提高电声转换效率、降低器件插损。一般机电耦合系数在 2% 以上。
- 3) 温度系数小,以防止温度变化对传播速度影响过大。温度系数一般在 $200 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 以内。
- 4) 传输损耗小,以减小器件插损。

常用的压电材料包括压电单晶、压电陶瓷和压电薄膜。压电单晶的声波传播损耗小,温度稳定性好,重复性好,可靠性高,是目前高频 SAW 器件最常用的压电材料。压电陶瓷的机电耦合系数大,价格低,但结构呈颗粒状、有孔隙,且表面均匀度差,因此高频衰减大,稳定性和一致性不好,一般适用于低频器件。压电薄膜通常沉积在非压电基片上,性能接近压电单晶,但制作误差大,质量不稳定。与压电陶瓷和压电薄膜相比,压电单晶更适于制作 SAW 标签。

常用的压电单晶材料性能如表 1 所示^[9]。

表 1 常用的压电单晶材料性能

压电单晶材料	切向	波速/(m/s)	机电耦合系数/%	温度系数/ $(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	传输损耗/(dB/cm)
石英	YX	3 159	0.22	-24	0.8(1 GHz)
	ST-X	3 159	0.16	0	0.9(1 GHz)
LiTaO ₃	YZ	3 230	0.66	-35	0.3(1 GHz)
	YZ	3 485	4.30	-85	0.3(1 GHz)
LiNbO ₃	128°YZ	3 896	6.00	-75	0.2(1 GHz)
	ZX	3 789	4.50	-78	0.3(1 GHz)
	127.86°	3 953	5.60	-78	1.0(1 GHz)
	YX				
	131°YX	4 000	5.50	-74	0.2(1 GHz)

选择材料时希望机电耦合系数高,温度系数和传输损耗小,但实际上很难做到所有性能都优秀。因此考虑多个性能原因,最后选择 128°YZ-LiNbO₃。其机电耦合系数最大(达 6.0%);传输损耗很小(为 0.2 dB/cm(1 GHz));温度系数为 $-75 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,在可接受范围内。该材料性能良好,在 SAW 器件中是最常用的材料之一。

1.2 IDT 设计

IDT 起激励和接收 SAW 的作用。其结构决定器件的特征频率、频带宽度和激发 SAW 的强度,是 SAW 标签的核心部分。

选择均匀等叉指 IDT,其结构如图 1 所示。每一个周期 P 包括两个指条,其叉指宽度 a 与叉指间距 b 相等,孔径 w 相等。选择的压电基片材料为 128°YZ-LiNbO₃,其自由化波速(v)为 3 896 m/s,沉积 IDT 后 v 减小为 3 837.68 m/s。当特征频率 $f=433$ MHz 时,由 $f=v/\lambda=v/P$ 可算出波长 λ 为 8.863 μm , $P=8.863 \mu\text{m}$, $a=b=2.216 \mu\text{m}$ 。IDT

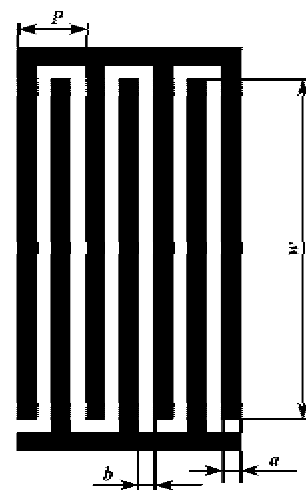


图 1 均匀等叉指的 IDT 结构

材料选择铝,电极厚度设计为 $0.5\ \mu\text{m}$,汇流条宽度根据经验值设计为 $50\ \mu\text{m}$ 。

IDT 的周期对数 N 越大, IDT 激发 SAW 的强度也越大,但 N 的增大会减小 IDT 的工作带宽 $\Delta f^{[10]}$ 。设计 $\Delta f \approx 5\ \text{MHz}$, 则 N 最多为 40 对。 $\Delta f = 5\ \text{MHz}$ 的射频脉冲信号对应的脉冲宽度 $t_0 = 200\ \text{ns}$ 。为了分析 N 对激励 SAW 效率的影响,分别设计了 N 为 20 和 40 的标签;为了分析 w 对激励 SAW 效率的影响,分别设计了 IDT 的 w 为 100λ 和 60λ 的标签。

1.3 反射栅设计

设计了 6 个可能放置反射栅的位置。每个反射栅由 4 根反射条组成,反射条宽度为 $2.216\ \mu\text{m}$,即 $\lambda/4$ 。

设计的射频查询脉冲与第一个回波脉冲间隔 ΔT 为 $1\ 500\ \text{ns}$, v 为 $3\ 837.68\ \text{m/s}$, 则第一条反射栅到 IDT 的距离 L 为

$$L = \frac{\Delta T \cdot v}{2} \quad (1)$$

由式(1)可得 $L = 2\ 878\ \mu\text{m}$ 。

发射 t_0 为 $200\ \text{ns}$, 反射栅间的间隔应大于半个脉冲宽度内的 SAW 传播距离。考虑到脉冲可能产生约 1 倍的展宽, 因此反射栅间隔 ΔL 为一个脉冲宽度, 即

$$\Delta L = t_0 \cdot v \quad (2)$$

由式(2)可得, ΔL 为 $767.5\ \mu\text{m}$ 。

为研究反射栅编码对回波脉冲特性的影响。设计了两种反射栅编码 111111 和 101101。

综合上述 3 个方面的设计要点, 为验证仿真分析的正确性, 同时研究反射栅编码对回波脉冲特性的影响及 IDT 对数和孔径长度对激发 SAW 效率的影响, 设计了结构各不相同的 SAW 标签, 表现为标签的反射栅编码, N 和 w 均不同。实际制作过程中, 压电基片均为正方体。考虑充分利用材料, 一共设计了 6 组标签, 标签参数如表 2 所示。

表 2 6 组标签的设计参数

	标签 1	标签 2	标签 3
N	40	20	40
w	100λ	100λ	60λ
编码	111111	111111	101101
	标签 4	标签 5	标签 6
N	20	40	20
w	60λ	60λ	60λ
编码	101101	111111	111111

2 标签制作

标签的制作过程是在压电基片上沉积 IDT 和反射栅金属电极的过程, 因此需绘制出金属电极在压电基片上的分布。利用集成电路设计工具 LEdit 绘制的 6 组标签中的标签 1 结构如图 2 所示。利用 LEdit 绘制的标签整体结构如图 3 所示, 6 组标签的 IDT 和反射栅沉积在同一个压电基片上。实际制作时是一次性在整个压电基片上沉积所有金属电极, 然后再分别切割开以得到 6 个标签。

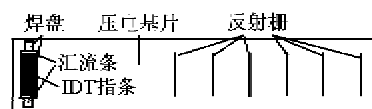


图 2 标签结构

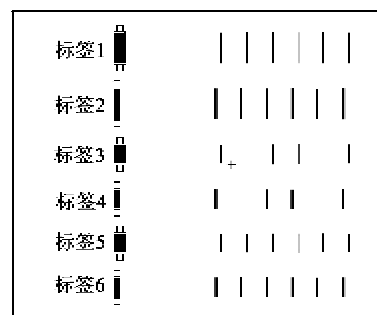


图 3 一块压电基片上的标签整体结构

标签的制作流程如图 4 所示, 包括基片制作、叉指和反射栅图形的制作及其复制。

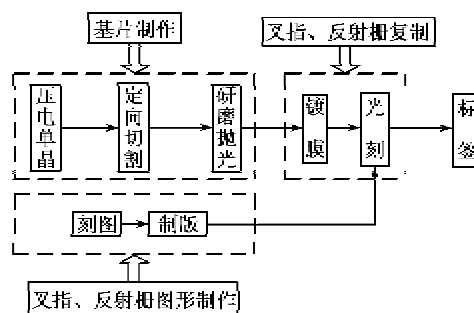


图 4 标签制作流程

标签所用的压电基片材料为 128°YZ 铌酸锂。为了减小 SAW 传输时不必要的损耗, 需在基片表面进行研磨、清洗和抛光, 以保证平整度和光洁度。

在叉指和反射栅图形制作时, 首先根据 IDT 周期、指条宽度、指条间隙、声孔径、叉指对数, 反射栅指条宽度、指条间隙、孔径、排列方式等, 采用坐标绘图机完成描图过程; 然后采用图形发生器来制作图形所对应的掩膜, 使用电子束或光束形成叉指图形的方法, 即可直接得到所需尺寸的掩模板。

在进行叉指和反射栅复制时, 首先在基片表面

附上一层均匀、导电性好且足够薄的铝膜,本实验通过真空蒸镀法形成厚为 $0.5\ \mu\text{m}$ 的铝膜;在铝膜上涂光刻胶,再覆盖上制作的掩模板,随后进行曝光、显影、漂洗、坚膜,腐蚀后去胶,得到沉积在压电基片表面的 IDT 和反射栅金属电极。

SAW 标签是 MEMS 器件, IDT 和反射栅的尺寸在微米级,其金属电极易受到外界污染和损坏。因此,在标签制作完成后须对其进行合适的封装。封装时主要考虑以下因素:

- 1) 保护标签不受外界环境干扰。
- 2) 不影响标签天线接收射频信号。
- 3) 选择合适的引脚和管壳,便于焊接标签天线。

图 5 为封装好的标签,封装尺寸为 $13.3\ \text{mm} \times 6.5\ \text{mm}$ 。使用金属管壳把标签保护起来,防止裸露的 IDT 和反射栅电极受损。背面有多个引脚可与 PCB 板焊接,用于连接天线。

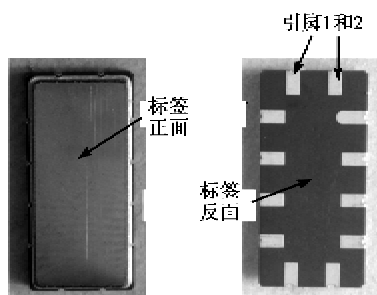


图 5 标签封装实物图

3 标签测试

在实验测试中利用网络分析仪代替阅读器,以实现射频查询脉冲的发射与回波脉冲的接收。标签与网络分析仪的连接如图 6 所示。将封装好的标签固定在射频底座上,射频底座通过 2 个射频头分别接 2 根射频线连接到网络分析仪。射频底座和射频线都是阻抗匹配到 $50\ \Omega$ 。

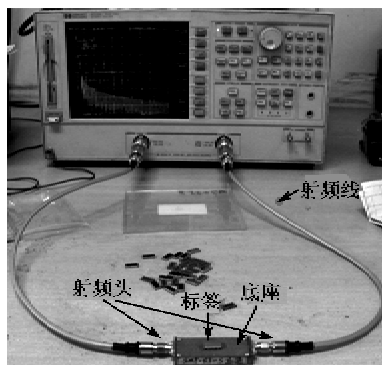


图 6 利用网络分析仪测试标签

3.1 特征频率测试

在 SAW 射频识别中,阅读器和标签间通过固定频率的射频信号实现通信,当这个固定频率等于标签的特征频率时, IDT 转换效率最高,标签的插损最小。因此,标签测试时首先需确定其特征频率。

利用网络分析仪的扫频功能,可测试标签在一定频率范围内的频谱特性如图 7 所示。扫频范围为 $400 \sim 460\ \text{MHz}$, 标签插损最小的频率点即为特征频率。测试结果表明,插损最小为 $-10.004\ \text{dB}$, 此时的频率 $435.774\ \text{MHz}$ 即为特征频率,基本符合 $433\ \text{MHz}$ 的设计要求。

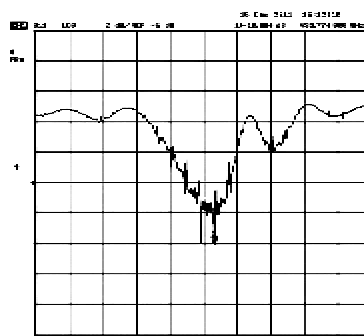


图 7 标签的频谱特性

3.2 反射栅编码测试

在如表 2 所示的 6 组标签中,选取标签 6(编码为 111111)和标签 4(编码为 101101)进行测试。2 个标签的 IDT 结构完全相同,周期为 20 对,孔径为 60λ 。利用网络分析仪发射 $435.774\ \text{MHz}$ 的高频信号来模拟阅读器发射的查询脉冲载波,通过观察标签的回波响应以实现反射栅编码的测试。标签 6、4 的回波响应如图 8 所示。

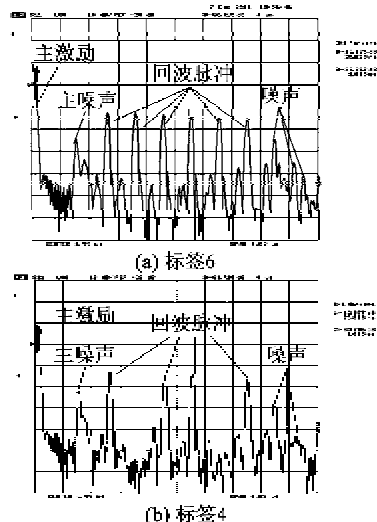


图 8 标签的回波响应

图 8 中的主激励为 IDT 激发信号;在主激励和

回波脉冲间的主噪声是由于 IDT 激发的 SAW 双向传播,是标签左边缘反射造成的,可通过设计单向 IDT 或在左边缘涂吸声材料来减小主噪声;其余比主噪声小的噪声是由于反射栅间的多次反射、声电再生效应及右边缘反射等造成的。

图 8(a)的回波响应有 6 个反射回波,回波脉冲幅值基本一致,每个脉冲宽度约为 200 ns,脉冲间距约为 400 ns,与设计要求相符。回波脉冲幅值约为 -32 dB,主噪声幅值为 -44 dB,回波脉冲与主噪声有 10 dB 以上的幅值差,可很好地从回波信号从噪声中提取出来。回波响应可很好的反映标签 6 的 111111 编码。

由于反射栅排列方式不同而导致回波脉冲不同,图 8(b)中只有 4 个反射回波,第 2、5 位置没有回波,即对应位置无反射栅。可通过回波响应得到标签 4 的编码为 101101,很好地验证了设计要求。由于标签 6、4 的 IDT 结构相同,因此主激励幅值是一致的。

通过对标签 6、4 的测试可看到标签的回波脉冲一致性很好,通过对回波脉冲幅值的判别可得到对应位置反射栅的有无,从而实现对标签编码的识别。

3.3 IDT 激发效率测试

为研究 N 和 w 对激发 SAW 效率的影响,在如表 2 所示的 6 组标签中,选取标签 1、5、2、6 进行主激励大小的对比测试。测试结果如图 9 所示。4 种标签的 N 、 w 和其对应的主激励如表 3 所示。

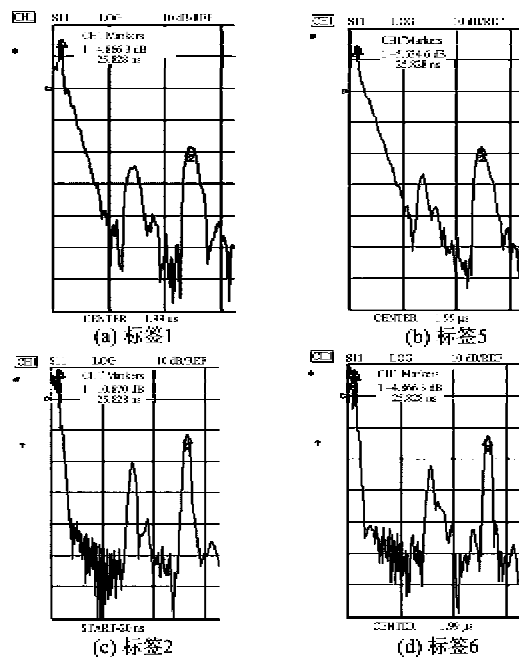


图 9 标签主激励大小的对比测试

表 3 标签 IDT 结构及其对应的主激励大小

标签	1	5	2	6
N	40	40	20	20
w	100λ	60λ	100λ	60λ
主激励/dB	-4.866 3	-5.634 6	-10.870 0	-12.577 0

分别对比标签 1 和标签 5、标签 2 和标签 6,测试结果表明,在 N 相同的情况下,当 w 从 60λ 变为 100λ 时,激励的功率分别增加了 0.768 3 dB 和 1.707 dB,因此,随着 w 的增大,IDT 激发 SAW 的效率增加。

分别对比标签 1 和标签 2、标签 5 和标签 6,测试结果表明,在 w 均相同的情况下,当 N 从 20 对增加到 40 对时,激励分别增加了 6.003 7 dB 和 6.942 4 dB。因此随着 N 的增多,IDT 激发 SAW 的效率增加。

4 结束语

本文在 SAW 标签仿真研究的基础上展开的后续应用研究,包括 SAW 标签的设计、制作和测试 3 个环节。设计制作了反射栅编码不同、IDT 对数不同、IDT 孔径长度不同的 6 组标签,利用网络分析仪代替阅读器进行了测试。通过对标签的频谱特性进行扫频测试,表明其特征频率符合 433 MHz 的设计要求;通过观察标签的回波响应对反射栅编码进行测试,表明回波脉冲一致性很好,其幅值明显大于噪声,基于对回波脉冲幅值的判别可判断对应位置反射栅的有无,从而实现对标签编码的识别;通过对标签主激励大小的对比测试表明,叉指换能器对数增多和孔径增大都会增加其激发效率。

参考文献:

- [1] 王玉林,曹金荣,前锋,等.声表面波射频识别无源电子标签[J].固体电子学研究与进展,2007,27(1):109-114.
WANG Yulin,CAO Jingrong,QIAN Feng,et al. SAW RFID passive tags[J]. Research & Progress of SSE, 2007,27(1):109-114.
- [2] 韩韬,水永安.声表面波射频标签的研究进展[J].声学技术,2006,25(4):33-35.
HAN Tao,SHUI Yong'an. State-of-the-art of surface acoustic wave based RFID[J]. Technical Acoustics, 2006, 25(4):33-35.
- [3] PLESSKY V P,REINDL L M. Review on SAW RFID tags[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control,2010,57(3):654-668.

-
- [4] HARTMAN C S. Future high volume applications of SAW devices[J]. Proceeding of the IEEE Ultrasonics Symposium, 1985, 1(1): 64-73.
- [5] PLESSKY V P, KONDRATIEV S N, STIERLIN R. SAW tag; New ideas[J]. Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium, 1995, 1(2): 117-120.
- [6] SPRINGER A, WEIGEL R, POHL A, et al. Wireless identification and sensing using surface acoustic wave devices[J]. Mechatronics, 1999, 9(7): 745-756.
- [7] LEHTONEN S, PLESSKY V P, SALOMMA M M. Short reflectors operating at fundamental and second harmonics on 128°LiNbO_3 [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2004, 54(3): 343-351.
- [8] 卢旭, 陈智军, 黄鑫, 等. 基于 COMSOL 的声表面波标签仿真[J]. 压电与声光, 2012, 34(4): 494-497.
LU Xu, CHEN ZHijun, HUANG Xin, et al. Simulation of surface acoustic wave tag based on COMSOL [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2012, 34(4): 494-497.
- [9] 王斐. 声表面波无源电子标签研究以及射频识别阅读器设计[D]. 天津: 南开大学, 2009.
WANG Fei. Surface acoustic wave passive electronic tag and RFID reader design research[D]. Tianjin: Nankai University, 2009.
- [10] HASHIMOTO K. 声表面波器件模拟与仿真[M]. 王景山, 刘天飞, 孙玮, 译. 北京: 国防工业出版社, 2002: 50-51.
-

(上接第 3 页)

参考文献:

- [1] REBEIZ G M. RF MEMS, theory, design, and technology[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2003: 1-3.
- [2] 张慧金, 董树荣, 金浩, 等. FBAR 建模及用于 MIMO 终端的滤波器设计[J]. 压电与声光, 2010, 32(4): 528-531.
ZHANG Huijin, DONG Shurong, JIN Hao, et al. FBAR modeling and design of FBAR RF filters for MIMO[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2010, 32(4): 528-531.
- [3] THIELE J A, Pereira da Cunha M. High temperature LGS SAW gas sensor[J]. Sensors and Actuators B, 2006, 113(4): 816-822.
- [4] WANG W S, WU T T, CHOU T H, et al. A ZnO nanorod-based SAW oscillatorsystem for ultraviolet detection[J]. Nanotechnology, 2009, 20(13): 135-138.
- [5] 章安良, 朱大中. S 型双声路声表面波质量传感器[J]. 压电与声光, 2005, 27(1): 7-9.
ZHANG Anliang, ZHU Dazhong. S-type surface acoustic wave mass sensor[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2005, 27(1): 7-9.
- [6] CHUNG G S, PHAN D T. Finite element modeling of surface acoustic waves in piezoelectric thin films[J]. Journal of the Korean Physical Society, 2010, 57(3): 446-450.
- [7] 郑泽渔, 汤劲松, 朱昌安, 等. ZnO 压电薄膜双面共溅生长技术[J]. 压电与声光, 2010, 32(4): 629-631.
ZHENG Zeyu, TANG Jinsong, ZHU Chang'an, et al. Technique for fabricating ZnO piezoelectric thin films on the two ends of the YAG rod simultaneously DC reactive magnetron sputtering [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2010, 32(4): 629-631.
- [8] DU X Y, FU Y Q, TAN S C, et al. ZnO film thickness effect on surface acoustic wave modes and acoustic streaming[J]. Applied Physics Letters, 2008, 93(9): 105-107.