硅酸镓镧单晶材料的声表面波标签研究

徐梦茹，肖 夏
(天津大学微电子学院，天津 300072)

摘要：声表面波射频识别标签在射频标签领域获得广泛关注，其中对标签基底材料的研究也成了研究热点。文章旨在研究使用硅酸镓镧单晶材料为压电基底的声表面波标签的标签特性。对使用硅酸镓镧单晶材料为压电基底的声表面波标签进行频域和时域分析，并结合有限元分析方法，对标签的特征频率、叉指换能器(Interdigital Transducer, IDT)的反射系数、叉指电极金属化比、金属电极厚度以及标签回波特性进行研究分析，提取了耦合模 COM(Coupled-mode)模型参数。分析结果表明了压电效应是声表面波的谐振与反谐振频率存在的根源，验证了脉冲幅度编码方式，并为使用硅酸镓镧材料作为压电基底的声表面波标签的制作提供了仿真实验依据。

关键词：声表面波标签；硅酸镓镧单晶；有限元方法
中图分类号：TN47 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-3630(2019)-01-0108-05
DOI 编码：10.16300/j.cnki.1000-3630.2019.01.018

The study of langasite based surface acoustic wave tag

XU Meng-ru, XIAO Xia
(*School of Microelectronics Tianjin University*, *Tianjin* 300072, *China*)

Abstract: Surface acoustic wave (SAW) radio frequency identification tags have attracted widely attention in the field of radio frequency tags, and the study of the tag substrate materials also becomes a hotspot. The purpose of this paper is to study the tag properties of surface acoustic wave tags using langasite (LGS) as piezoelectric substrate. The surface acoustic wave tag based on LGS (0°, 138.5°, 26.7°) is analyzed in frequency domain and time domain. The tag characteristic frequency, deposit ratio of interdigital electrode, metal electrode thickness and echo pulse characteristics are analyzed by the finite element analysis method. The analysis results show that the resonance and anti-resonance frequencies of surface acoustic wave are caused by the piezoelectric effect, and the pulse amplitude encoding mode is also verified. These results provide a basis for the fabrication of surface acoustic wave tags.
Key words: surface acoustic wave tag; langasite; finite element simulation

0 引 言

声表面波射频识别标签(Surface Acoustic Wave Radio Frequency Identification Tags, SAW RFID)与传统的集成电路(Integrated Circuit, IC)标签相比，具有可对运动物体进行识别、读取距离远、能在恶劣环境下工作以及对液体和金属的抗干扰能力强等特点，因此对 SAW RFID 的研究逐渐成为热点[1-5]。SAW 标签由压电基片、反射栅和沉积在压电基片上的叉指换能器(Interdigital Transducer, IDT)组成。目前对 SAW 标签的研究主要集中于标签结构设计[6]、编码方式的设计[7]以及标签的性能分析[8]。

压电单晶材料是最早应用于声表面波器件的压电材料，目前仍广泛应用于各类声表面波器件中。硅酸镓镧(Langasite, LGS)晶体是一种橙色透明的新型压电晶体，从 20 世纪 80 年代首次报道以来一直吸引着研究者的关注。LGS 具有比石英大 2～3 倍的机电耦合系数，与石英的温度稳定性相当，LGS 晶体从室温到 1 470℃都不发生相变，适合制作温度稳定性高的声表面波器件[9-13]。此外，LGS 晶体的声表面波传播速度低，适合器件的小型化[14]。这些优点让 LGS 材料备受国内外研究机构的关注。

本文针对使用欧拉角为(0°, 138.5°, 26.7°)的 LGS 晶体材料作为压电基片的 SAW 标签进行有限元研究分析，研究分析内容包括标签的特征频率、叉指电极金属化比、金属电极厚度以及标签回波特性。借助有限元仿真软件 COMSOL Multiphysics 完成研究内容。对 SAW 标签进行频率和时域特性的仿真分析，结果表明，SAW 标签中压电效应是谐振频率和反谐振频率存在的根源，电极尺寸会影响二者的具体数值大小。SAW 标签的表面波波速随着

收稿日期：2018-01-15; **修回日期：**2018-03-08
基金项目：国家自然科学基金资助项目(61571319)。
作者简介：徐梦茹(1994－)，女，安徽六安人，硕士研究生，研究方向为声表面波射频识别标签。
通讯作者：肖夏, E-mail: xiaxiao@tju.edu.cn

电极厚度与波长比的增大而减小。对标签的时域仿真分析验证了脉冲幅度编码方式。分析结果能够指导 SAW 标签的研究和制作。

1　SAW RFID 工作原理

如图 1 所示，SAW RFID 的具体工作过程为：阅读器发射出射频询问脉冲，当 SAW 标签进入查询范围时标签天线接收询问脉冲射频信号，与标签天线直接相连的IDT通过逆压电效应将接收到的电磁波转化为 SAW 并且沿着标签基片表面传播，传播过程中 SAW 遇到反射栅产生反射和透射，反射信号通过正压电效应由IDT转换成电磁波经由标签天线发射出去，由阅读器接收[15]。

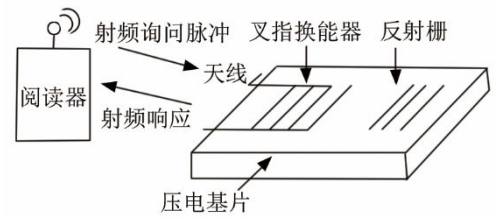


图 1　声表面波射频标签识别系统结构示意图
Fig.1　The structure diagram of SAW-RFID system

SAW RFID 系统中，阅读器发出的查询脉冲决定了查询脉冲射频信号的频率，压电基片材料和IDT 决定了标签的谐振频率。当查询脉冲射频信号的频率和标签的谐振频率相等时，SAW 的激发效率最高[16]，标签的插入损耗也最小。

2　有限元方法与结果分析

2.1　标签二维结构模型

通常 IDT 的对数在 10 对以上，所以在建模过程中采取周期性边界条件对模型进行简化[17]。SAW 只在压电基底材料的表面传播，在基底厚度方向呈现几何级数的衰减，因此，建模时模拟 8 倍波长的深度就可反映出 SAW 的特性。SAW 的传播方向垂直于电极声孔径方向，该方向的位移并没有耦合到波动方程中，故用二维结构模型对 SAW 标签进行研究分析。图 2 为简化之后的标签结构模型，其中，a 是电极宽度，h 是电极高度，p 是电极中心间距。Γ_L、Γ_R、Γ_B、Γ_T 为压电基底材料的边界。

根据简化之后的二维模型的参数，在有限元分析软件 COMSOL Multiphysics 中建立了与之对应的二维模型结构。

构建的二维几何结构的参数数值、模型的边界条件设置情况以及 LGS 单晶的弹性矩阵、压电常

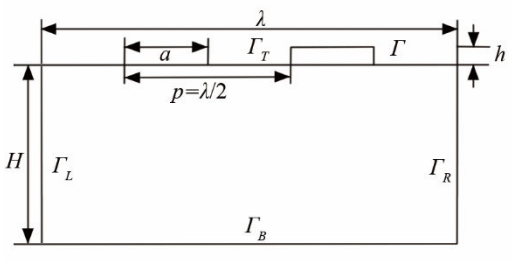


图 2　声表面波标签特征频率分析的简化二维结构模型
Fig.2　Simplified 2D structure model for SAW tag characteris tic frequency analysis

数[18]分别见表 1～4。LGS 单晶材料[19]的相对介电常数为 ε_{11}=18.96，ε_{33}=50.19，LGS 晶体的密度 ρ =5 746 kg·m^{-3}。常温下使用的 SAW 器件，一般采用金属铝作为制作电极的材料，但是它的熔点低，不能应用于高温 SAW 器件，目前发现的适合制作高温 SAW 器件电极的材料有金属铂、铑、铱等材料，在仿真中选用的电极材料是金属铂[20]。

表 1　声表面波标签二维几何结构参数(μm)
Table 1　The 2D geometric structure parameters of SAW tag(μm)

λ	p	a	h	H
10.0	5.0	2.5	0.1	80.0

表 2　声表面波标签二维几何结构边界条件
Table 2　The boundary conditions of the 2D geometric structure of SAW tag

边界	Γ_T	Γ_B	Γ_L, Γ_R
机械边界条件	自由	固定	自由
电学边界条件	零电荷	零电荷	周期性边界条件

表 3　LGS 单晶弹性矩阵弹性系数(10^{10} N·m^{-2})
Table 3　Elastic matrix of LGS single crystal(10^{10} N·m^{-2})

c_{11}	c_{12}	c_{13}	c_{14}	c_{22}	c_{23}
18.875	10.475	9.589	–1.412	18.875	9.589
c_{24}	c_{33}	c_{44}	c_{55}	c_{56}	c_{66}
1.412	2.614	5.35	5.35	–1.412	4.2

表 4　LGS 单晶压电常数(C·m^{-2})
Table 4　Piezoelectric coefficients of LGS single crystal(C·m^{-2})

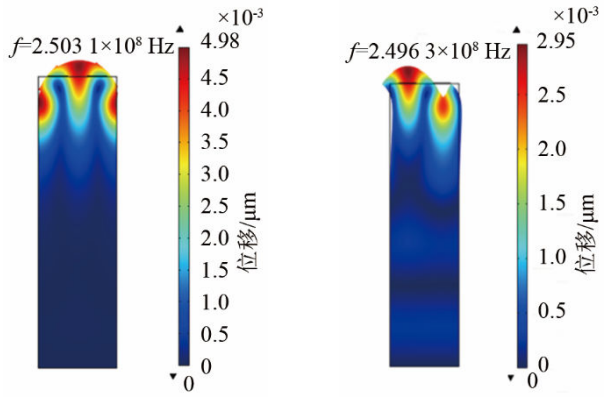
e_{11}	e_{12}	e_{13}	e_{14}	e_{15}	e_{16}
–0.44	0.44	0	–0.08	0	0
e_{21}	e_{22}	e_{23}	e_{24}	e_{26}	e_{66}
0	0	0	0	0.08	0.44
e_{31}	e_{32}	e_{33}	e_{34}	e_{35}	e_{36}
0	0	0	0	0	0

2.2　标签频域分析

2.2.1　标签 COM 模型参数

SAW 能量集中在基片表面 1～2 个波长内，随着基片深度的增加，SAW 的振幅呈指数衰减，因此

能够把 SAW 振型从各个不同的波动阵型中提取出来，从而获得特征频率。利用频率分析模块，提取出符合 SAW 特性的对称模态和反对称模态，如图 3 所示。



(a) 二维结构对称模态图 (b) 二维结构反对称模态图

图 3 对称模态和反对称模态图

Fig.3 Diagrams of 2D symmetric and antisymmetric modes

IDT 的电极效应会引起谐振频率 f_{sc+} 和反谐振频率 f_{sc-} 的出现[21]，而选用 LGS 单晶材料作为压电基片的 SAW 标签的特征频率为

$$f=(f_{sc+}+f_{sc-})/2 \tag{1}$$

由图 3 对称模态和反对称模态下的频率值计算出 SAW 标签的特征频率为 249.97 MHz。图 4 右侧的颜色柱表示了质点的振动幅度，可以看出质点的振动主要集中在 LGS 单晶表面 1～2 个波长范围，这说明SAW的大部分能量都集中在基底表面附近，符合 SAW 的传播特性[22]。根据式(2)计算出以 LGS 单晶为压电基片材料的 SAW 的相速度 V_{eff} =2 499.7 m·s^{-1}。

$$V_{\text{eff}}=\lambda\cdot(f_{sc+}+f_{sc-})/2 \tag{2}$$

可通过式(3)计算出标签 IDT 的反射系数：

$$k_{12}\lambda=2\pi\frac{f_{sc+}-f_{sc-}}{f_{sc+}+f_{sc-}} \tag{3}$$

反射系数的计算结果为 0.85%，对称模态和反对称模态下的频率可以用于分析 IDT 的二次效应。

在表面波器件的频率效应分析中，主要分析器件的输入导纳，导纳值的计算公式为

$$Y=\frac{\mathrm{j}\omega Q}{V} \tag{4}$$

其中，Y 表示导纳，ω 表示频率，Q 表示电荷，V 为激励电压的 2 倍。

通过频域仿真分析，可以获得导纳和频率的关系，如图 5 所示。图 5 中两个极点处，表示导纳无穷大，两极点对应的频率为标签的谐振频率。越靠近谐振频率附近，IDT 的导纳越大，距离较远则对应导纳越小。

可以通过有限元仿真提取用于分析 SAW 标签的 COM 模型参数，进行进一步的标签模型分析和计算。此外，对导纳的分析有助于对 SAW 器件的阻抗匹配进行研究。

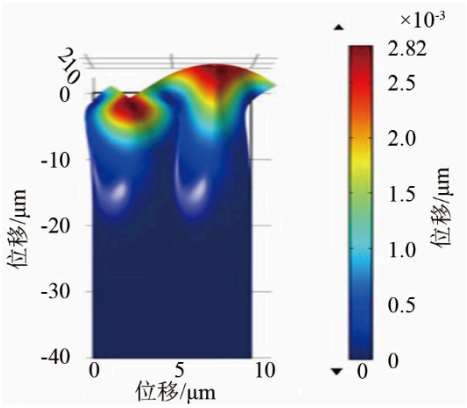


图 4 反对称模态下 SAW 振幅图

Fig.4 SAW amplitude diagram in the antisymmetric mode

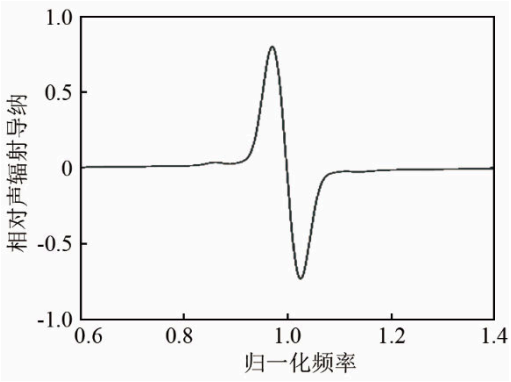


图 5 均匀 IDT 相对声辐射导纳

Fig.5 Relative sound radiation admittance of uniform IDT

2.2.2 叉指电极金属化比对 SAW 波速的影响

定义叉指电极金属化比 $r_{\text{M}}=a/p$。$r_{\text{M}}=0$ 即为基底表面无电极覆盖，此时基底上表面是自由边界，表面电荷密度 $\sigma=0$。$r_{\text{M}}=1$ 即为基底表面沉积一层金属电极，此时基底上表面为金属化边界，表面电势 $\Psi=0$。当 $0\leqslant r_{\text{M}}\leqslant 1$ 时，通过模态分析得到的 SAW 波速与 r_{M} 变化关系表如表 5 所示。

从表 5 可知，SAW 的波速是随着叉指电极金属化比的增大而减小的，SAW 在 IDT 上传播时会有一部分被散射成体波，对器件产生体波干扰，电极金属化比数值越大，电极的质量效应影响越显著。当压电基片的上表面边界条件为自由化边界条件和金属化边界条件时，即当 $r_{\text{M}}=0$ 或 $r_{\text{M}}=1$ 时，此时 IDT 的电极效应对表面波器件没有影响，压电效应是声表面波的谐振与反谐振频率存在的根源，电极尺寸会影响二者数值的大小。

表 5　SAW 波速随 *MR* 的变化
Table 5　Variation of SAW wave velocity with *MR*

r_M	谐振频率 f_{sc+}/MHz	反谐振频率 f_{sc-}/MHz	波速 v/(m·s^{-1})
0.0	254.30	254.30	2 543.0
0.1	253.64	252.73	2 531.9
0.2	252.87	251.71	2 522.9
0.3	252.02	250.88	2 514.5
0.4	251.12	250.15	2 506.4
0.5	250.31	249.63	2 499.7
0.6	249.27	248.97	2 491.2
0.7	248.35	248.48	2 484.2
0.8	247.49	248.01	2 477.5
0.9	246.82	247.67	2 472.5
1.0	246.60	246.60	2 466.0

2.2.3　金属电极厚度对 SAW 波速的影响

根据控制变量法原则，仿真时令 *MR*=0.5，使得频率不会受到 *MR* 的影响。改变电极厚度与波长比，使 h/λ 在 0.5%～3%范围内变化，获得对应的频率与波速。

SAW 波速随电极厚度与波长比的变化如表 6 所示。从表 6 可见，随着电极厚度与波长比的增大，SAW 器件的波速减小，进而 SAW 标签的中心频率减小。为了满足实际的应用需求，需要选择合适的 SAW 标签电极厚度与波长比。

表 6　SAW 波速随电极厚度与波长比的变化
Table 6　Variation of SAW wave velocity with electrode thickness to wavelength ratio

h/λ	f_{sc+}/MHz	f_{sc-}/MHz	v/(m·s^{-1})
0.5%	252.22	251.84	2 520.3
1.0%	250.31	249.63	2 499.7
1.5%	247.81	246.90	2 473.6
2.0%	245.03	244.03	2 445.3
2.5%	241.85	240.96	2 414.1
3.0%	238.23	237.72	2 379.8

2.3　标签的时域回波特性分析

SAW 标签利用固定位置反射栅的有无实现脉冲幅度编码，反射栅的有和无分别代表着编码 1 和 0。通过分析标签的回波特性获得标签的编码信息，这是研究 SAW 射频识别标签的关键。

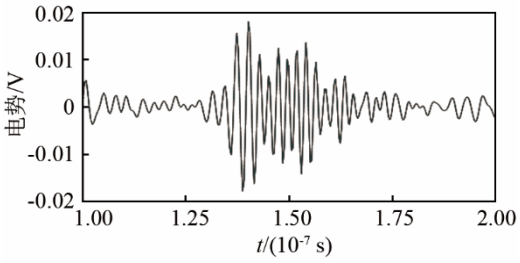
标签回波的仿真模型如图 6 所示。选用 5 个金属电极作为 IDT，在 IDT 上分别加载不同的电压激励模拟查询脉冲，模型中有 3 个等间距分布的反射栅。建立 111 和 110 两种标签编码用于仿真对应的回波特性。标签回波特性仿真的几何结构参数见表 7。压电基片选用 LGS 单晶材料，IDT 和反射栅的金属电极使用金属铂材料。标签回波特性仿真时域图如图 7 所示。从图 7(a)、7(b)中可以看出，时域上回波脉冲的波形和反射栅的有无存在对应关系。因此，通过设置反射栅的有无可以完成对标签的编码。对回波特性的时域仿真结果的分析证实了脉冲幅度编码的正确性。



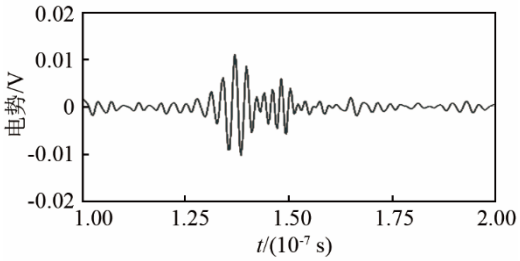
图 6　标签回波特性仿真结构图
Fig.6　Simulation structure of tag echo characteristics

表 7　标签回波特性仿真结构参数(μm)
Table 7　The simulation structure parameters of tag echo characteristics(μm)

基片深度	基片长度	IDT 宽度	IDT 高度	IDT 与最近反射栅间距	反射栅间距
60	350	2.5	0.2	200	40



(a) 编码为 111 时的时域图



(b) 编码为 110 时的时域图

图 7　两种编码的回波特性时域图
Fig.7　Echo characteristic diagrams of two encoding modes

3　结 论

本文对使用欧拉角为(0°, 138.5°, 26.7°)的硅酸镓镧单晶作为压电基底材料的声表面波标签进行研究分析，借助有限元仿真软件 COMSOL Multiphysics，计算不同叉指电极金属化比下标签的中心频率与波速，结果证明压电效应是声表面波的谐振与反谐振频率存在的根源，电极尺寸会影响二者数值的大小。对标签金属电极厚度的计算分析，说明了标签波速随着电极厚度与波长比的增大而减小，针对实际应用环境要选择合适的金属电极厚

度。在对标签的时域分析中，验证了脉冲幅度的编码方式。这些分析为使用 LGS 作为压电基片材料的声表面波标签的设计制作提供了指导。

在实际制作中，SAW 器件是三维器件，本文所进行的研究针对理想化的二维 SAW 器件，在计算中忽略了 IDT 周期对数对 SAW 激发效率的影响，以及 SAW 衰减、体波散射等对器件的影响，因此计算结果与实际测试结果存在误差，但仿真计算结果能够反映 SAW 器件的特性，并且能够用于分析 SAW 器件的编码方法，存在实际的应用价值。

参 考 文 献

[1] PLESSKY V P, REINDL L M. Review on SAW RFID Tags[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2010, **57**(3): 654

[2] PEREIRA DA CUNHA M. Wireless sensing in hostile environments[C]// IEEE Ultrasonics Symposium, 2013, 1337-1346.

[3] AUBERT T, ELMAZRIA O, ASSOUAR B, E. et al. Investigation on AlN/Sapphire piezoelectric bilayer structure for high-temperautre SAW applications[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2012, **59**(5): 999-1005.

[4] MAYER E, EISELE D, REINDL L, et al. SAW parameters for langasite at high temperatures[C]//IEEE Int'l Ultrason. Symp., 2001, 2069-2073.

[5] 张永刚. 声表面波换能器激励的有限元仿真[J]. 声学技术, 2009, **28**(5): 678-681.
ZHANG Yonggang. FEM simulation of SAW transducer excitation[J]. Technical Acoustics, 2009, **28**(5): 678-681.

[6] PLESSKY V P, KONDRATIEV S N, STIERLIN R. SAW tag: new ideas[C]//IEEE Ultrasonics Symposium, 1995: 117-120.

[7] SPRINGER A, WEIGEL R, POHL A, et al. Wireless identification and sensing using surface acoustic wave devices[J]. Mechatronics. 1999, **9**(7): 745-756.

[8] LEHTONEN S, PLESSKY V P, SALOMMA M M. Short reflectors operating at fundamental and secong harmonics on 128°$LiNbO_3$[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2004, **51**(3): 343-351.

[9] UDA S, BUZANOV O. Growth of a 3"langasite crystal with clear faceting[J]. Journal of Crystal Growth, 2000, **211**(1-4): 318-324.

[10] HORNSTEINER J, BORN E, FISCHERAUER G, et al. Surface acoustic wave sensors for high-temperature applications[C]//IEEE Int'l Freq. Cntrl. Symp., 1998: 615-620.

[11] 吉小军, 施文康, 李良儿, 等. 硅酸镓镧晶体温度、应力敏感特性及优化切向研究[J]. 声学学报, 2006, **31**(2): 179-186.
JI Xiaojun, SHI Wenkang, LI Liang'er, et al. Research on tem-perature and stress sensitive characteristics of piezoelectric crystal $La_3Ga_5SiO_{14}$ and optimal cuts[J]. Acta Acustica, 2006, **31**(2): 179-186.

[12] 徐方迁, 金步平. 一种计算声表面波在周期栅阵中传播特性的方法[J]. 声学技术, 2008, **27**(4): 612-615.
XU Fangqian, JIN Buping. A method for calculating the prop erties of surface acoustic waves propagation in periodic metal gratings[J]. Technical Acoustics, 2008, **27**(4): 612-615.

[13] 王文, 薛蓄峰, 邵秀婷, 等. 基于反射型延迟线结构的无线无源声表面波测温系统[J]. 声学学报, 2014, **39**(4): 473-478.
WANG Wen，XUE Xufeng, SHAO Xiuting, et al. Development of a SAW wireless and passive temperature sensor incorporating reflective delay line[J]. Acta Acusitca, 2014, **39**(4): 473-478.

[14] PEIREIRA DA CUNHA M, R J LAD, MOONLIGHT T, et al. High temperature stability of langasite surface acoustic wave devices[C]//IEEE Ultrasonics Symposium, 2008: 205-208.

[15] YANG Y, ZHU D Z. A Y type SAW mass sensor with metal array reflectors[J]. Sensors & Actuators B Chemical, 2005, **109**(2): 244-248

[16] HASHIMOTO K. Surface acoustic wave devices in telecommunications modelling and simulation[M]. Germany: Springer, 2000: 50-51.

[17] SALIM Z T, HASHIM U, ARSHAD M K M, et al. Simulation, fabrication and validation of surface acoustic wave layered sensor based on ZnO/IDT/128° YX $LiNbO_3$[J]. International Journal of Applied Engineering Research, 2016, **11**(15): 8785-8790

[18] ZHANG H F, KOSINSKI J A. Analysis of contributions of nonlinear material constants to stress-induces velocity shifts of quartz and langasite surface acoustic wave resonators[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency control, 2013: 975-985.

[19] 潘峰. 声表面波材料与器件[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 58- 59.
PAN Feng. Surface acoustic wave materials and devices[M]. BeiJing: Science Press, 2012: 58-59.

[20] BRUCKNER G, NICOLAY P, BARDONG J, et al. Investigation of platinum based periodic gratings on langasite[C]//IEEE Ultrasonics Symposium, 2014: 2043-2046.

[21] KANG A, ZHANG C, JI X, et al. SAW-RFID enabled temperature sensor[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2013, **201**(5): 105-113.

[22] NAUMENKO N, NICOLAY P, BARDONG J. Theoretical and experimental investigation of spurious modes in a SAW delay line based on langasite[C]//IEEE Ultrasonics Symposium, 2015.