

四硼酸锂在高频窄带滤波器上的应用探讨

杨丽萍, 万飞, 杨思川, 黄歆

(北京中科飞鸿科技有限公司, 北京 100095)

摘要:该文采用四硼酸锂晶片制作了高频(1.1 GHz)声表面波滤波器,插入损耗 3.7 dB,带宽 3.8 MHz,带外抑制大于 50 dB。阐述了器件的设计及工艺过程,对晶片表面处理、器件制作、SiO₂ 保护膜、器件的温度特性等进行了实验分析,并讨论了在器件设计中需考虑的因素。实验结果表明,采用干法刻蚀工艺能获得良好的叉指电极形貌。在器件表面加镀 SiO₂ 保护膜能提高器件可靠性及温度稳定性。

关键词:四硼酸锂;声表面波滤波器;干法刻蚀;SiO₂;温度特性

中图分类号:TN384

文献标识码:A

Discussion on Application of LBO for High-frequency and Narrow-band Filters

YANG Liping, WAN Fei, YANG Sichuan, HUANG Xin

(Beijing Zhongke Feihong Science & Technology Co., LTD, Beijing 100095, China)

Abstract: The high-frequency (1.1 GHz) SAW filter with insertion loss of 3.7 dB, bandwidth of 3.8 MHz and the out-of-band rejection higher than 50 dB is fabricated on LBO (Li₂B₄O₇) substrate. This paper presents the design and process of device, analyses the surface treatment of substrate, device fabrication, SiO₂ protective film and temperature character by experiments, and discusses the consideration of design. The experimental results show that good interdigital electrode profile can be obtained by dry-etching process. It can improve device reliability and temperature stability by depositing SiO₂ protective film on device surface.

Key words: LBO; SAW filter; dry-etching; SiO₂; temperature character

0 引言

谐振类型声表面波(SAW)滤波器的相对带宽范围主要由材料的机电耦合系数决定,也与设计参数和工艺条件相关。四硼酸锂(Li₂B₄O₇, LBO)的机电耦合系数约为 1%,即约为石英晶体的 10 倍^[1]、温度特性较好(一阶温度系数为 0,二阶为 $-260 \times 10^{-9}/^{\circ}\text{C}^2$),铝条反射效率高(约为在 ST 石英上的 5 倍),适合于制作窄带,低损耗及小型化的器件,因此,一直受到设计人员的关注和青睐^[2-4]。

国内有不少文献讨论了 LBO 材料的特性^[5-7],但将 LBO 材料应用于具体的产品设计报道^[8]较少,特别是对频率较高的情形。本文采用 45°X 切 Z 传播的 LBO 作为基片,制作了频率约为 1.1 GHz 的 SAW 滤波器,对相关的工艺做了实验研究,可供声表工艺及设计人员参考。

1 器件的设计结构

器件采用 1-2 模式纵向耦合谐振结构,基本结

构如图 1 所示。耦合模方程分析的详细过程可参见文献^[9],即

1) 相比纵向耦合结构常用的材料铌酸锂和钽酸锂, LBO 的介电常数较低,若直接把输入、输出阻抗设计到 50 Ω,则换能器的孔径很大,结果是各种高阶横向模将会在通带产生较大的波纹。因此,为消除横向模的影响,这里孔径取为 $\varnothing 7.5\lambda$,通过外加匹配工作在 50 Ω 系统中。

2) 由文献^[3]可知,当膜厚波长比为 1% 时,声速随膜厚的变化出现拐点,此时声速变化缓慢,有利于器件的频率一致性。但对于 1.1 GHz 的器件而言,按 1% 的膜厚比计算得出的膜厚为 30 nm,工艺控制难,膜的欧姆电阻也较大,因此经过综合考虑,膜厚取为 60 nm,最细线宽为 0.76 μm。

3) 仔细调整 2 个换能器的指对数、换能器间距、反射栅和换能器的周期比等参数可获得较好的结果。另外通过一些技巧,如将两个通道的中心频

收稿日期:2013-03-07

作者简介:杨丽萍(1980-),女,山东人,工程师,硕士,主要从事声表面波器件工艺技术的研究。E-mail:ylpbqq@163.com。

率、反射栅和换能器的周期比设计的稍有不同,以消除或抑制高阶杂波。

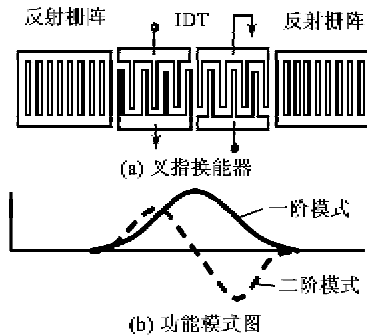


图1 纵向耦合谐振基本结构图

2 器件的性能

2.1 四硼酸锂所做器件的性能

本文采用 45°X 切 Z 传播的 LBO 为基片,采用 1-2 模式纵向耦合谐振设计结构,制作了频率约为 1.1 GHz 的 SAW 滤波器,图 2 为器件典型频响图。镀膜采用直流溅射方式,铝膜厚为 60 nm,采用干法刻蚀工艺去除金属层。刻蚀工艺的参数:屏极电压为 320~330 V,束流为 80~90 mA,转速 20 r/min,刻蚀时间为 2~3 min。金属化膜层完成后,在器件表面加镀厚为 20 nm 的 SiO₂ 作为保护层,以提高器件的可靠性和温度稳定性。

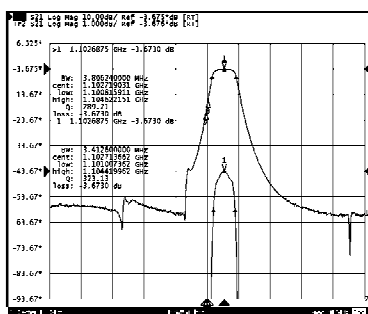


图2 LBO所做器件频响图

由图 2 可知,器件频率为 1.102 GHz,插入损耗为 3.67 dB,带内平坦,-3 dB 带宽在 3.8 MHz,带外抑制大于 50 dB。

2.2 钽酸锂晶片所做器件的性能

同样采用 1-2 模式纵向耦合谐振模式,以 112° 钽酸锂晶片为基片,铝膜厚度为 110 nm,采用传统的湿法腐蚀工艺进行制作。器件的典型频响图如图 3 所示。由图可知,器件频率为 1.097 GHz,插入损耗为 4.53 dB,-3 dB 带宽为 3.25 MHz,高频端带外抑制 38 dB。

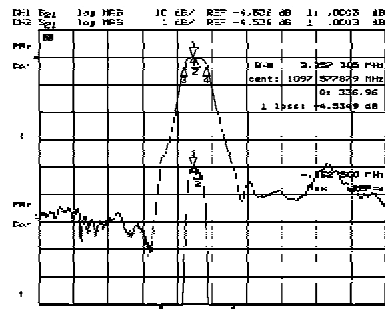


图3 112°钽酸锂所做器件频响图

对比 LBO 和钽酸锂晶片所做器件性能可知,LBO 所做器件带宽更宽,插入损耗更小及矩形度更高。同时,由于 LBO 晶片的一阶温度系数为 0,故能更好地满足工作温度的要求,器件性能更优异。

3 器件的工艺研究

3.1 晶片的表面处理

LBO 是强碱弱酸盐,水和酸性溶液都对晶片有一定的侵蚀作用,但几乎不溶于碱性溶液和有机溶剂^[10]。不同的 pH 值对 LBO 晶片有不同程度的溶解,有实验表明 LBO 晶片的溶解速度同溶液的 pH 值近似成反比关系^[11]。在清洗过程中需特别注意保持晶片的表面形态,尽量多采用汽油浸泡,丙酮、乙醇超声的方式清洗^[12]。

采用去离子水、磷酸、氢氧化钠溶液、汽油、丙酮、乙醇、光刻胶分别对晶片进行试验,验证各种溶液对晶片的影响。试验如下:

1) 采用 20 °C 去离子水。正常冲水 20 s,50 倍显微镜下观察有少量划痕;延长至 1 min 后观察划痕明显增加。

2) 50 °C 去离子水。1 min 冲水,吹干后 50 倍显微镜观察抛光面划痕严重。

3) 70 °C 磷酸溶液。1 min 后冲水,肉眼观察到抛光面不平整。

4) 浓度为 25% 的 NaOH 溶液。1 min 浸泡,冲水吹干后 50 倍显微镜观察有少量划痕。

5) 浓度为 7% 的 NaOH 溶液。浸泡 1 min 后正常冲水,吹干后 50 倍显微镜观察,较浓度为 25% 的 NaOH 溶液实验后晶片的划痕明显减少。

6) 汽油。24 h 浸泡后抛光面无明显变化。

7) 丙酮、乙醇溶液超声各 20 min。吹干后 50 倍显微镜观察,晶片的抛光面无明显变化。

8) 光刻胶。匀胶前烘后用丙酮、乙醇超声清洗,吹干后 50 倍显微镜观察,表面无划痕。

试验结果表明:

1) 汽油、光刻胶、丙酮、乙醇对晶片表面无影响。

2) 常温去离子水对晶片有一定影响;高温去离子水对晶片影响大,不能使用。

3) 碱性溶液对晶片表面有轻微影响。

4) 酸性溶液对晶片损伤严重。

本文通过反复试验,最终确定了 LBO 晶片的清洗工艺,清洗后晶片表面干净无划痕,过程如图 4 所示。

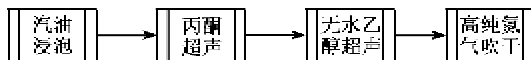


图 4 LBO 晶片的清洗过程

在晶片表面处理过程中需注意以下方面:

1) 清洗过程中不接触酸性溶液及去离子水。

2) 使用碱性溶液显影时需特别注意把握显影液的浓度和显影时间。

3) 显影后,使用常温去离子水冲水,尽量缩短冲水时间。

3.2 器件制作工艺

3.2.1 剥离工艺

剥离工艺比腐蚀工艺少了腐蚀及去胶步骤,采用有机溶剂进行超声剥离,对晶片表面的影响较轻。M. Ohmura 等采用剥离工艺制作了频率为 914 MHz 的器件,性能良好^[13]。本文在试验时首先选用剥离工艺试制。

采用加热烘烤镀膜剥离工艺及冷蒸镀膜剥离工艺两种方式剥离,但试验结果并不理想,具体情况如下:

1) 加热镀膜剥离效果不好,图形缺陷多,无法剥离出较完整的图形。

2) 冷蒸时剥离图形较好,但附着力差,无法实现良好键合。

经过多次试验,剥离工艺仍存在附着力差,剥离图形不完整,剥离后图形上有残胶等问题,合格器件不易实现,因此本文后续试验未采用剥离工艺。

3.2.2 腐蚀工艺

传统的湿法腐蚀工艺由于采用酸性腐蚀溶液,故不适用于 LBO 晶片。而文献^[13]的研究采用在晶片表面镀 SiO₂ 膜的方式能对晶片表面起保护作用,进而可采用湿法腐蚀工艺去除金属层^[13]。本文试验在晶片表面镀约 20 nm 的 SiO₂ 膜后采用常规腐蚀工艺进行器件制作,结果晶片表面仍损伤严重,器件插入损耗为 30~40 dB。

我们认为原因是 SiO₂ 没有形成致密的膜,较疏

松,未能完全保护住晶片表面。由于镀膜设备的限制,故后期试验未再对此工艺进行深入研究。

3.2.3 刻蚀工艺

干法刻蚀工艺采用离子束刻蚀法,其原理为采用具有一定能量的惰性气体原子轰击材料表面,使材料原子溅射,有选择性的将没有光刻胶掩蔽的金属层去除。由于刻蚀只在垂直于晶片表面的方向进行,因此能获得良好的叉指条形貌,片内均匀性高。由于采用惰性气体,不涉及酸性溶液,因此在保证获得高质量的叉指形貌的同时尽量避免了对晶片表面的损伤。

采用 LBO 晶片,基片清洗干净后直接使用直流溅射蒸镀铝膜,然后经匀胶、烘烤、曝光、中烘、显影、刻蚀、去胶等工艺后获得芯片图形。图 5 为采用离子束干法刻蚀工艺获得的器件叉指形貌图同掩模版图形的对比。从图中可看出,叉指形貌良好,指条均匀,边缘陡直无缺陷。

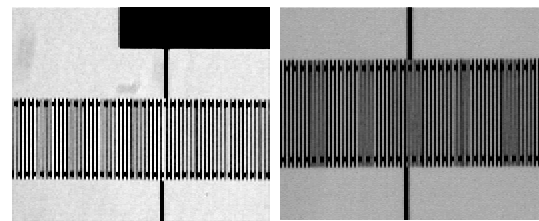


图 5 干法刻蚀工艺器件形貌图

通过反复试验验证,最终确定采用干法刻蚀工艺,并成功制作了性能优异的器件,频响图如图 2 所示。采用干法刻蚀工艺时需注意:

1) 刻蚀工艺中需准确把握刻蚀时间,过刻或刻的太欠都会造成器件损耗增大。

2) 适当的过刻蚀可实现调整器件频率的作用。

3.2.4 器件制作工艺总结

1) 采用剥离工艺所做器件存在缺陷多,附着力差及图形有残胶等问题,未能实现良好图形的剥离。

2) 由于膜层疏松,所镀 SiO₂ 未能保护住晶片表面,故腐蚀工艺出现晶片表面损伤严重的现象,无法使用。

3) 选用干法刻蚀工艺制作换能器,叉指形貌良好,边缘陡直无缺陷,所做器件性能良好。故最终确定采用干法刻蚀工艺制作器件。

3.3 SiO₂ 保护膜

采用干法刻蚀工艺制作器件,按照器件表面不镀 SiO₂ 和镀 SiO₂ 两种条件对器件表面镀 SiO₂ 膜的可靠性及温度特性进行摸索。

3.3.1 可靠性试验

采用不镀 SiO_2 所做的器件在空气中存放时,随着时间的增加,器件损耗不断增大,20 h 后器件损耗增大 5~7 dB;采用镀 SiO_2 所做器件,在空气中存放时,随着时间的增加,器件损耗也会增大,但速度稍慢,20 h 增大 2~3 dB。因此,器件表面镀 SiO_2 比不镀 SiO_2 可靠性稍好,在器件的存放过程中能起到隔离空气的作用,减慢损耗的增大速度。

3.3.2 温度特性试验

采用两种条件所做器件进行 $-55 \sim +85 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度试验,试验发现,镀 SiO_2 所做器件比不镀 SiO_2 所做器件温度稳定性好,尤其是低温状态,效果显著。

图 6 为不镀 SiO_2 和镀 SiO_2 所做的器件在常温、 $-55 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $+85 \text{ }^\circ\text{C}$ 下的器件性能图。由图可知,器件表面镀 SiO_2 后在 $+85 \text{ }^\circ\text{C}$ 高温条件下器件波动同不镀 SiO_2 的器件基本相同,仅减小了 0.1 dB,但波形较对称;在 $-55 \text{ }^\circ\text{C}$ 低温下的波动比不镀 SiO_2 的器件减小了近 2.5 dB,改善作用明显。因此,在器件表面镀 SiO_2 能有效改善器件波动的变化幅度,提高器件温度稳定性。

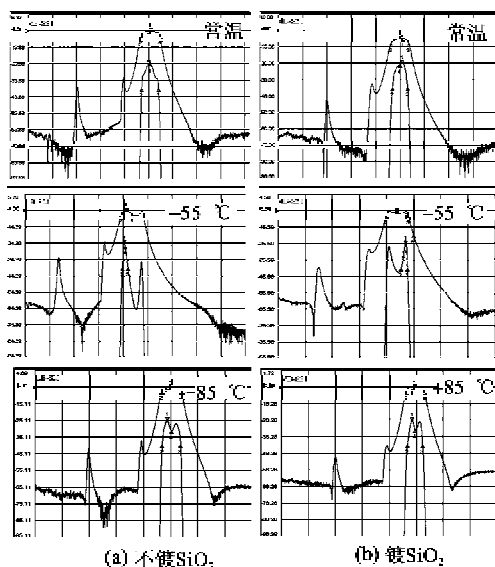


图 6 不镀 SiO_2 和镀 SiO_2 所做的器件三温性能图

在试验过程中还发现,器件在宽范围温度下波动变化范围较大,如在 $-55 \text{ }^\circ\text{C}$ (低温)及 $+85 \text{ }^\circ\text{C}$ (高温)时波动分别为 1.8 dB 和 0.6 dB。温度范围较窄时波动变化减小,如在 $-45 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-35 \text{ }^\circ\text{C}$ 及 $+65 \text{ }^\circ\text{C}$ 时波动分别为 1.4 dB、0.8 dB、0.3 dB,器件波形图如图 7 所示。

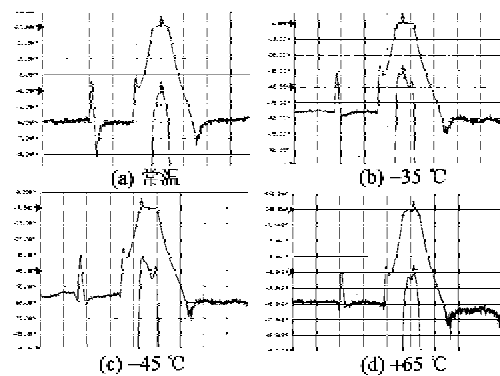


图 7 器件不同温度条件下的频响图

3.3.3 SiO_2 保护膜试验结果

器件表面加镀一层 SiO_2 膜,在固化时能较好地保护器件,在高低温试验时能有效改善器件波动的变化幅度,提高器件温度稳定性。因此,为提高器件的可靠性及温度稳定性,需在器件表面加镀一定厚度的 SiO_2 保护膜。

4 结论和讨论

1) 通过大量的工艺实验,基本掌握了基于 LBO 晶体的声表面波器件生产工艺,制作出了性能较好的器件,并摸索了它的温度特性,这些工艺条件和结论可供同行参考。同时,由于 LBO 材料的特殊性,其工艺难度较大,尤其在高频情况下,表面轻微的缺陷和划伤会对器件性能产生致命的影响。因此,若在产品中采用此材料,需较强的工艺控制能力。

2) 由于采用了窄孔径的设计,在高频时换能器阻抗很大,使器件频响对外部匹配元件很敏感。因此,将换能器设计到 50Ω 不需要外加匹配,而通过复杂的换能器加权来消除通带内的高阶模式是很有意义的工作^[14]。

3) 从器件的温度特性来看,在 $-55 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,频响变形较大,我们认为可能是在低温下材料的机电耦合系数下降导致。另外,它具有较大的二阶温度系数,因此它更适合应用在较窄的温度范围内,如 $-40 \sim +70 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

参考文献:

- [1] 李建立,刘景和,李艳红,等. $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 晶体生长与声表面波中应用[J]. 兵工学报,2001,22(4):516-519.
LI Jianli, LIU Jinghe, LI Yanhong, et al. A study on the piezoelectric property of LBO crystals[J]. Acta Armamentarii, 2001, 22(4): 516-519.
- [2] OHMURA M, ABE H, MIWA K, et al. A 900 MHz SAW resonator filter on $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ crystal[J]. Ultrasonics Symposium, 1990: 135-138.

- [3] MATSUMURA S, OMI T, YAMAJI N, et al. A 45° X cut $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ single crystal substrate for SAW resonators[C]//S. 1.; IEEE Ultrasonics Symposium, 1987; 247-252.
- [4] SOLUCH W. Application of synchronous two-port resonators for measurement of SAW parameters in piezoelectric crystals[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1998, 45(4): 1113-1116.
- [5] 徐家跃, 华王祥. 四英寸四硼酸锂压电晶体的生长研究[J]. 无机材料学报, 2002, 17(4): 857-861.
XU Jiayue, HUA Wangxiang. Bridgman growth of 4-inch-diameter $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ single crystals[J]. Journal of Inorganic Materials, 2002, 17(4): 857-861.
- [6] 潘志雷, 杨建春, 沈正红. 四硼酸锂晶体解理的形成机理[J]. 无机材料学报, 1994, 9(2): 209-213.
PAN Zhilei, YANG Jianchun, SHEN Zhenghong. Mechanism of lithium tetraborate crystal cleavage[J]. Journal of Inorganic Materials, 1994, 9(2): 209-213.
- [7] 曹莹, 孙晶, 朱忠丽, 等. $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 晶体在 SAW 技术中的应用研究[J]. 人工晶体学报, 2002, 31(6): 599-601.
CAO Ying, SUN Jing, ZHU Zhongli, et al. Study on the applications of crystal in the SAW technology[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2002, 31(6): 599-601.
- [8] 周亚栋, 何先莉. 以 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 为基片 150 MHz SAWF 的设计与研制[J]. 压电与声光, 1996, 18(4): 231-234.
ZHOU Yadong, HE Xianli. Design and fabrication of 150 MHz SAWF on $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ crystal substrate[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 1996, 18(4): 231-234.
- [9] HASHIMOTO K. Surface acoustic wave devices in telecommunications [M]. Germany: Springer-Verlag, 2000.
- [10] 徐家跃, 费一汀, 钱国兴, 等. 四硼酸锂晶体的声表面波应用[J]. 压电与声光, 1998, 20(5): 293-296.
XU Jiayue, FEI Yiting, QIAN Guoxing, et al. SAW applications of lithium tetraborate single crystals[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 1998, 20(5): 293-296.
- [11] ABE H, OHMURA M, SATOU H. SAW devices on lithium tetraborate ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$) [C]//S. 1.; Proc IEEE Freq Contr Symp, 1994: 289-295.
- [12] 徐家跃. 四硼酸锂晶体圆片的加工与表征[J]. 压电与声光, 1996, 18(6): 403-406.
XU Jiayue. Wafer processing and characterization of $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ crystals[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 1996, 18(6): 403-406.
- [13] ICHIKAWA S, EBATA Y, KOSHINO M, et al. Small-sized 71 MHz GSM-IF filter using SAW resonator on $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ substrate[C]//S. 1.; IEEE Ultrasonics Symposium, 1998: 43-46.
- [14] INOUE S. Low-loss SAW filter on $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ using novel-shape apodized structure for 1 GHz RF-ID system [C]//S. 1.; IEEE Ultrasonics Symposium, 2005: 1036-1041.

(上接第 26 页)

- [25] PAPROTNY I. Microfabricated air-microfluidic sensor for personal monitoring of airborne particulate matter: Design, fabrication, and experimental results[J]. Sensors and Actuators A, 2013, 201: 506-516.
- [26] TUKKINIEMI K, EUN SOK KIM. Fully integrated FBAR sensor matrix for mass detection[J]. Procedia Chemistry 1, 2009: 1051-1054.
- [27] 乔东海. 一种基于差频式薄膜体声波谐振器的微质量传感器: 中国专利, 200610098912. 2[P]. 2006.
- [28] 宋志堂. 一种应用于生物微质量检测的硅基压电薄膜传感器及其制作方法: 中国专利, 200710040418. 5 [P]. 2007.
- [29] 马绍宇, 韩雁, 董树荣, 等. 基于薄膜体声波谐振器的高灵敏度质量传感器[J]. 固体电子学研究进展, 2008, 28(2): 304-307.
MA Shaoyu, HAN Yan, DONG Shurong, et al. A mass sensor with high sensitivity based on thin film bulk acoustic resonators[J]. Research & Progress of SSE, 2008, 28(2): 304-307.
- [30] CHEN D. Nerve gas sensor using film bulk acoustic resonator coated with poly(vinylidene fluoride)[J]. Electronics Letters, 2010, 46(21): 1436-1437.
- [31] GREG ASHLEY. Thin film bulk acoustic wave resonators for continuous monitoring in the physical, chemical and biological realms[J]. Materials Research Society Symposium Proceedings, 2010, 1222: 63-68.
- [32] KUAN-HSUN CHIU. High-performance film bulk acoustic wave pressure and temperature sensors[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2007, 46(4A): 1392-1397.
- [33] 丁扣宝, 刘世洁, 何兴理. 密封空气型 FBAR 温度传感器[J]. 压电与声光, 2012, 34(5): 649-651.
DING Koubao, LIU Shijie, HE Xingli. FBAR temperature sensor with a sealed air room[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2012, 34(5): 649-651.
- [34] ZIYU WANG. Film bulk acoustic-wave resonator (FBAR) based infrared sensor[J]. Proceedings of the 2010 5th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, 2010: 824-827.
- [35] QIU Xiaotun. Experiment and theoretical analysis of relative humidity sensor based on film bulk acoustic-wave resonator[J]. Sensors and Actuators B, 2010, 147: 381-384.
- [36] QIU X. Film bulk acoustic-wave resonator based ultraviolet sensor [J]. Appl Phys Lett, 2009, 94: 151917.