

基于 ScAlN/FeGa 结构的磁电声表面波谐振器

姜建利, 杨雪梅, 刘 婉, 白飞明

(电子科技大学 电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 四川 成都 610054)

摘 要:该文研究基于磁致伸缩 FeGa 合金衬底的磁电声表面波(SAW)谐振器。首先,在 FeGa 磁致伸缩衬底上溅射沉积了 ScAlN 压电薄膜,完成了单端口声表面波谐振器的制备;其次,采用 X 线衍射仪(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)、原子力显微镜(AFM)等手段对 ScAlN 薄膜进行结构分析;最后,采用矢量网络分析仪和微波探针台测试 S 参数和群时延。结果表明,ScAlN 薄膜晶粒呈柱状生长且具有高度(002)取向,薄膜表面粗糙度在 2.36 nm 左右;当 ScAlN 压电薄膜厚为 0.7 μm ,波长为 15.74 μm 时,SAW 谐振器的谐振频率为 218.75 MHz,相速度为 3 443 m/s,机电耦合系数为 0.06%,与 COMSOL 仿真计算结果较吻合。

关键词:FeGa 合金衬底;磁致伸缩效应;ScAlN 薄膜;磁电效应;声表面波谐振器

中图分类号:TN65;TN384;TM930 **文献标识码:**A **DOI:**10.11977/j.issn.1004-2474.2019.01.002

Magnetoelectric Surface Acoustic Wave Resonator Based on ScAlN/FeGa Structure

JIANG Jianli, YANG Xuemei, LIU Wan, BAI Feiming

(State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: A magnetoelectric surface acoustic wave (SAW) resonator based on FeGa alloy magnetostrictive substrate has been investigated in this paper. First, the ScAlN piezoelectric film was deposited by RF reactive magnetron sputtering on FeGa alloy magnetostrictive substrate and the one-port SAW resonator was fabricated. Then the structure analysis of ScAlN thin films was carried out by XRD, SEM and AFM. Finally, the S_{11} parameter and group delay were measured by the vector network analyzer and microwave probe station. The results show that the ScAlN thin film has a columnar growth and a high (002) orientation, and the film surface roughness (RMS) is about 2.36 nm. When the thickness of the ScAlN piezoelectric film is 0.7 μm and the wavelength is 15.74 μm , the resonant frequency of SAW resonance is 218.75 MHz, the phase velocity is 3 443 m/s, and the electromechanical coupling is 0.06%, which is in good agreement with the COMSOL simulation results.

Key words: galferol alloys substrate; magnetostrictive effect; ScAlN thin film; magnetoelectric effect; surface acoustic wave resonator

0 引言

近年来,层状磁电(ME)复合材料因其丰富的界面物理场效应备受关注^[1-4],在弱磁场传感器^[5-6]、自旋电子器件^[7-9]、射频/微波器件^[10-11]等领域有着广泛的应用。经典 ME 效应为磁场诱导的电极化变化或电场诱导的磁矩变化,随着射频/微波器件应用的发展,高频磁电效应和逆磁电效应被提出^[12-13]。高频逆磁电效应是指使磁场引起的声共

振频率偏移,现已作为一种调谐声表面波(SAW)或体声波(BAW)器件的手段^[14-16]。声波器件中 SAW 或 BAW 的传播特性不仅与压电层相关,也依赖于磁致伸缩衬底的磁弹性属性,如巨杨氏模量效应(ΔE 效应),即在磁场小应变范围杨氏模量发生很大改变(减小)的效应^[17]。本课题组提出了基于 ZnO/FeSiB 多层结构的磁电 SAW 磁场传感器^[14],其中 ZnO 压电薄膜制备于具有巨杨氏模量的 FeSiB 带材之上,由于磁致伸缩衬底选用 FeSiB 非

收稿日期:2018-11-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61871081)

作者简介:姜建利(1990-),男,甘肃定西人,硕士生,主要从事磁电声表面波谐振器的相关研究。白飞明(1975-),男,内蒙古鄂尔多斯人,教授,博士生导师,主要从事磁电材料和片上集成磁电子器件的研究。E-mail: fmbai@uestc.edu.cn。

晶带材料,与微机电系统(MEMS)工艺结合较难。FeGa 合金 ($\text{Fe}_{1-x}\text{Ga}_x$, $0.12 < x < 0.33$) 合金晶体材料在 $12 \sim 20 \text{ kA/m}$ 的低驱动场下,具有高达 400×10^{-6} 的超磁致伸缩系数^[18-20],且其杨氏模量效应高达 25%。另外,Morito Akiyama^[21]等制备出了一种 Sc 元素掺杂 AlN 压电材料(六方晶系(6mm)),其压电系数高达 27.6 pC^{-1} ,比纯 AlN 压电体提高了 400%,并且具有高弹性系数、低介电常数 ϵ_r 值($\epsilon_r \approx 10$)、高声速(可达 $6\,000 \text{ m/s}$)等优异性能,使 ScAlN 薄膜成为压电薄膜研究的热点。将 FeGa 块材作为基底材料,ScAlN 薄膜取代 ZnO 薄膜作为压电层,不仅可以解决磁电 SAW 器件的集成问题,且对于更稳定、可靠的磁电 SAW 器件具有积极意义。

本文一方面制备了一种基于 ScAlN/FeGa 异质结构的磁电 SAW 谐振器,对器件性能进行了测试分析;另一方面通过多层结构 SAW 传播特性有限元仿真计算探究 ScAlN/FeGa 多层结构中瑞利波的传播特性,从理论上解释了高声表面相速度和谐振频率出现的机理。该类器件将在磁场调谐射频/微波谐振器、小型化 NEMS 天线、超灵敏磁场传感器等中具有良好的应用前景。

1 实验

1.1 ScAlN 压电薄膜制备

我们首先采用沈阳科学仪器公司 JPG560 双室磁控溅射系统在 N 型 Si(100) 基片上反应溅射沉积了 ScAlN 压电薄膜。靶材选用直径为 $\varnothing 75 \text{ mm}$ 的 Al 靶(99.999%)和直径为 $\varnothing 8 \text{ mm}$ 的 Sc 片(99.999%),反应气体选用高纯 N_2 气体。已有研究发现^[21]在适当高功率、低气压、富氩气的条件下可制备得到高度 c 轴取向的 ScAlN 薄膜,同时选取适当的直流(DC)偏压和靶基距,可以优化薄膜的表面形貌与取向度。经过优化的 ScAlN 薄膜(Sc 掺杂相对原子数分数为 14.5%)的溅射沉积条件为:溅射气压 0.11 Pa ,射频功率 265 W ,Ar 流量 $16 \text{ cm}^3/\text{min}$ 、 N_2 流量 $4.0 \text{ cm}^3/\text{min}$ (N_2 与 Ar 的流量比为 $1:4$),偏压为 -40 V 。

磁致伸缩衬底采用由定向凝固法^[19-20]生长的 $\text{Fe}_{81.3}\text{Ga}_{18.7}$ 多晶材料,所选衬底呈 $[110](001)$ 取向,其样品尺寸为 $30 \text{ mm} \times 9 \text{ mm} \times 0.3 \text{ mm}$ 。用 1 200 目的砂纸将 FeGa 合金样品(001)面表面的机械加工层磨至光滑,依次用 $7 \text{ }\mu\text{m}$ 、 $3 \text{ }\mu\text{m}$ 、 $0.25 \text{ }\mu\text{m}$ 金刚石抛光膏、粒径为 $\varnothing 50 \text{ nm}$ 的 SiO_2 抛光液进行表面抛光处理。然后采用直流磁控溅射在 $\text{Fe}_{81.3}\text{Ga}_{18.7}$ 衬底

上沉积厚为 50 nm 的金属 Ti 附着层,再用射频磁控反应溅射法在 $\text{Ti/Fe}_{81.7}\text{Ga}_{18.3}$ 上沉积所需厚度的 ScAlN 压电薄膜,溅射条件:射频功率 280 W 、溅射气压 0.11 Pa 、 N_2 与 Ar 的流量比为 $1:4$,DC 偏压 -40 V 。ScAlN 压电薄膜的结构通过 X 线衍射仪(XRD,DX-2700)分析,断面形貌采用扫描电子显微镜(SEM,Inspect F50)分析。采用原子力显微镜(AFM,Seiko Instrument SPA-300HV)分析薄膜表面粗糙度。

1.2 ScAlN/FeGa 结构 SAW 谐振器制备

在 ScAlN/Ti/FeGa 结构上利用反转胶剥离光刻工艺制备 SAW 谐振器的叉指换能器(IDT)和反射栅。叉指电极采用采用直流磁控溅射沉积的金属 Al 电极,厚为 100 nm ,设计叉指电极对数为 40 对,叉指电极线宽为 $4 \text{ }\mu\text{m}$,反射栅 500 条,具体制备器件参数如表 1 所示。

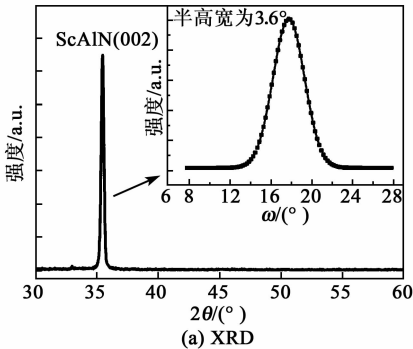
表 1 磁电 SAW 谐振器的器件参数

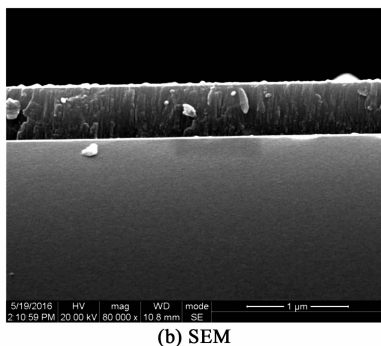
ScAlN 薄膜厚度 $h_{\text{ScAlN}}/\mu\text{m}$	0.7
叉指线宽、间距/ μm	4.0
IDT 叉指对数 N	40
孔径/叉指周期	50
反射栅级数量	500
反射栅与 IDT 间距/ μm	0.375
Al 电极厚度 h_{Al}/nm	100

2 实验结果和分析

2.1 ScAlN 压电薄膜表征

对制备 ScAlN 压电薄膜进行表征测试,从图 1(a)中仅可见 ScAlN(002)衍射峰,未见其他衍射峰,图 1(a)中插图(002)晶面的摇摆曲线,半高宽为 3.6° ,表明 ScAlN 薄膜具有良好的择优取向生长。由图 1(b)可知,ScAlN 薄膜垂直衬底呈柱状生长,即具有(002)取向的纤维织构状,薄膜质量良好,其高度 c 轴取向生长的压电薄膜是 SAW 器件制备的关键。



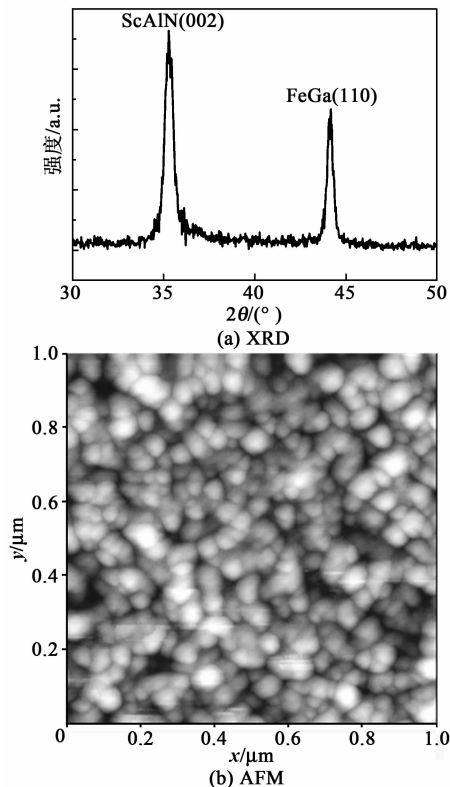


(b) SEM

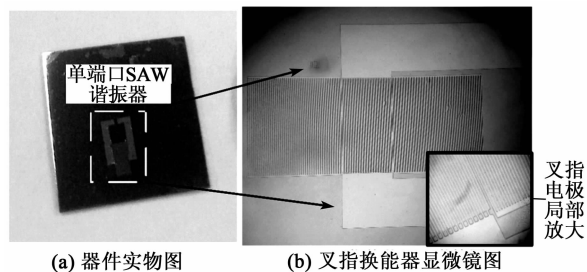
图1 ScAlN 压电薄膜/Si(100)的 XRD 和 SEM 测试结果

2.2 ScAlN/FeGa 结构的性能表征

图2为 $\text{Sc}_{14.5}\text{Al}_{85.5}\text{N}/\text{Fe}_{81.3}\text{Ga}_{18.7}$ 的XRD和AFM测试结果。由图2(a)可知,通过台阶仪测得薄膜厚为 $0.7\text{ }\mu\text{m}$,图2(a)还显示,ScAlN薄膜呈 c 轴取向,(002)衍射峰对应的衍射角 2θ 为 35.29° 。FeGa磁致伸缩衬底为各向异性介质,我们所选FeGa合金为 $[110]$ 取向多晶体,在衍射图谱中 44° 左右存在FeGa(110)衍射峰,确定所用FeGa合金基底具有 $[110]$ 取向。从图2(b)中可看出,薄膜表面均方根表面粗糙度(RMS)为 2.36 nm ,可以满足器件制备的要求。

图2 $\text{Sc}_{14.5}\text{Al}_{85.5}\text{N}/\text{Fe}_{81.3}\text{Ga}_{18.7}$ 的 XRD 和 AFM 测试结果

可知,器件表面电极边缘界限清晰平整、光滑、无明显缺陷,有良好的图形化效果,平均 IDT 周期为 $15.74\text{ }\mu\text{m}$ 。



(a) 器件实物图

(b) 叉指换能器显微镜图

图3 单端口 SAW 谐振器示意图

2.3 SAW 谐振器测试与仿真

采用安捷伦矢量网络分析仪和微波探针台对单端口磁电 SAW 谐振器进行测试。图4为 SAW 谐振器测试结果。由图4(a)可知,单端口 SAW 谐振器参数 S_{11} 测试结果显示中心频率为 218.75 MHz , SAW 相速度 $v_p = \lambda \cdot f_0$ (λ 为波长, f_0 为谐振频率),其中叉指线宽为 $4\text{ }\mu\text{m}$, $\lambda = 15.74\text{ }\mu\text{m}$,得到 SAW 器件的瑞利波波速为 3443 m/s 。相对应的群时延结果如图4(b)所示,该 SAW 谐振器的相位在 218.75 MHz 处有明显变化。

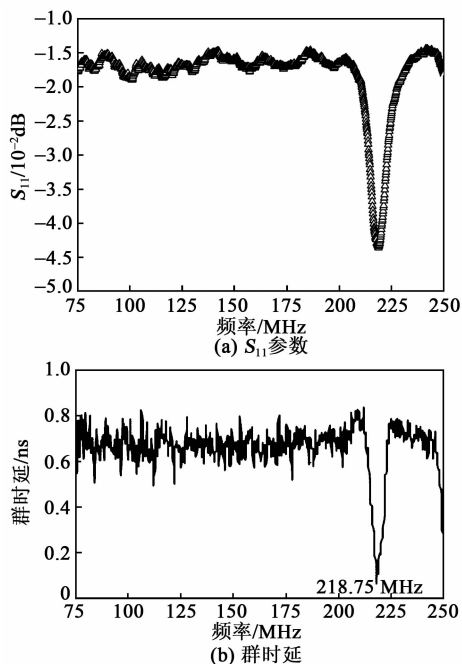


图4 SAW 谐振器测试结果

在上述多层结构 SAW 谐振器中,由于波长远大于压电薄膜的厚度,SAW 能量将进入到 FeGa 合金衬底中,因此,ScAlN 压电薄膜和 FeGa 合金衬底会同时影响 SAW 谐振器的瑞利波声速和机电耦合

图3为单端口 SAW 谐振器示意图。由图3(b)

系数。为了理解高 SAW 相速度的起源及机电能量的耦合关系,我们利用 COMSOL Multiphysics 有限元仿真软件进一步计算了 $\text{Sc}_{40}\text{Al}_{60}\text{N}/\text{Fe}_{81.3}\text{Ga}_{18.7}$ 多层结构瑞利波的传播特性,结果如图 5 所示。其中 $\text{Fe}_{81.3}\text{Ga}_{18.7}$ 的材料参数参见文献[18]; $\text{Sc}_{40}\text{Al}_{60}\text{N}$ 压电薄膜的厚为 $0.7\text{ }\mu\text{m}$,材料参数参见文献[22],简化分析只抽取 SAW 谐振器的单个波长范围,并仅考虑瑞利波模式。

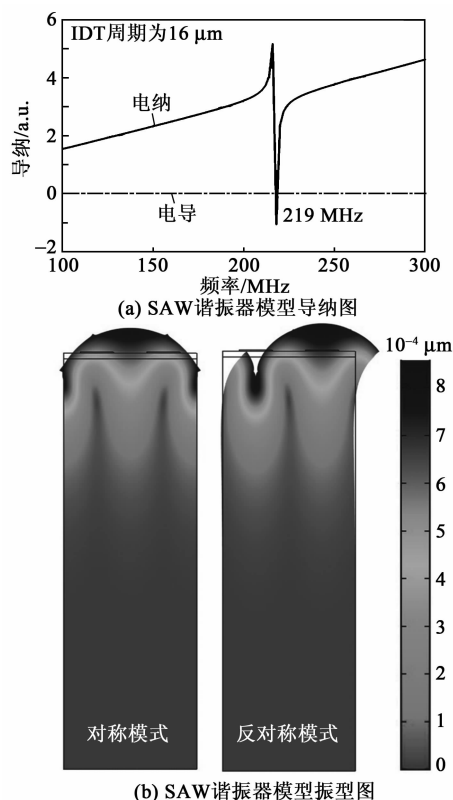


图5 SAW 谐振器器件仿真结果

由图 5(a)可知,瑞利波谐振频率为 219 MHz,在更高的频率范围内不存在瑞利波。图 5(b)为在 $\text{Sc}_{40}\text{Al}_{60}\text{N}/\text{Fe}_{81.3}\text{Ga}_{18.7}$ 多层结构中传播的瑞利波模式振型图,则瑞利波的相速度为 $3\,504\text{ m/s}$,机电耦合系数 k^2 与波速之间满足 $k^2 = 2(v_{\text{free}} - v_{\text{metal}})/v_{\text{free}}$ (其中, v_{free} 为自由表面波速, v_{metal} 为金属表面波速),仿真计算得到 $k^2 = 0.33\%$ 。SAW 谐振器的 k^2 也可通过矢网分析测试计算得到,其计算公式为^[23]

$$k^2 = \frac{\pi G_m(f_r)}{4NB_s(f_r)} \quad (1)$$

式中: f_r 为谐振频率; $G_m(f_r)$ 和 $B_s(f_r)$ 分别为 SAW 器件在 f_r 处的动态电导和静态电纳。经计算可得 $k^2 = 0.06\%$ 。SAW 谐振器测试相速度与仿真结果基本一致,器件测试机电耦合系数与仿真结果存在

一定的偏差,其主要原因为:

1) 在 SAW 谐振器的各个制备工艺中表面粗糙度不能达到理想状态。

2) 叉指换能器的金属铝电极均匀性问题。

3) 在仿真计算中将 FeGa 磁致伸缩衬底按单晶处理,材料参数采用单晶的材料参数,而实际器件制备中所用衬底为 FeGa 多晶块材。

3 结束语

本文在 FeGa 合金磁致伸缩衬底上采用射频反应磁控溅射沉积 ScAlN 压电薄膜,X 线衍射和扫描电镜分析显示,ScAlN 压电薄膜具有优良的(002)择优取向,晶粒呈柱状垂直生长于衬底上,原子力显微镜分析表明薄膜表面粗糙度满足器件制备要求。另外,我们制备了单端口 SAW 谐振器,SAW 谐振器的设计波长为 $16\text{ }\mu\text{m}$,实测谐振频率为 218.75 MHz,相速度 v_p 为 $3\,443\text{ m/s}$ 。COMSOL 仿真和实验结果较吻合。随着制备工艺的改善和机电耦合系数的提高,基于 ScAlN/ FeGa 多层膜结构的磁电声表面波谐振器将有望用于高灵敏度弱磁场探测应用中。

参考文献:

- [1] MARUYAMA T, SHIOTA Y, SUZUKIE Y, et al. Large voltage-induced magnetic anisotropy change in a few atomic layers of iron[J]. Nature Nanotechnology, 2009, 4(3): 158-161.
- [2] WANG Yao, HU Jiamian, NAN Cewen, et al. Multiferroic magnetoelectric composite nanostructures [J]. NPG Asia Mater, 2010, 2(2): 61-68.
- [3] MATSUKURA F, TOKURA Y, OHNO H. Control of magnetism by electric fields[J]. Nature Nanotechnology, 2015, 10(3): 209-220.
- [4] HU Jiamian, CHEN L Q, NAN Cewen. Multiferroic heterostructures integrating ferroelectric and magnetic materials[J]. Advanced Materials, 2016, 28(1): 15-39.
- [5] WANG Yaojin, GRAY D, BERRY D, et al. An extremely low equivalent magnetic noise magnetoelectric sensor[J]. Advanced Materials, 2011, 23(35): 4111-4114.
- [6] LAGE E, KIRCHHOF C, HRKAC V, et al. Exchange biasing of magnetoelectric composites[J]. Nature Materials, 2012, 11(6): 523-529.
- [7] HU Jiamian, LI Zheng, NAN Cewen, et al. High-density magnetoresistive random access memory operating at ultralow voltage at room temperature[J]. Nature

- Communications, 2011, 2(1):553-560.
- [8] YANG Shengwei, PENG Renci, NAN Cewen, et al. Non-volatile 180° magnetization reversal by an electric field in multiferroic heterostructures [J]. Advanced Materials, 2014, 26(41):7091-7095.
- [9] LI Peisen, CHEN Aitian, HAN Xiufeng, et al. Electric field manipulation of magnetization rotation and tunneling magnetoresistance of magnetic tunnel junctions at room temperature [J]. Advanced Materials, 2014, 26(25):4320-4325.
- [10] LIU Ming, OBI O, LOU Jing, et al. Giant electric field tuning of magnetic properties in multiferroic ferrite/ferroelectric heterostructures [J]. Adv Funct Mater, 2009, 19(11):1826-1831.
- [11] SUBRAMANYAM G, COLE M W, KALKUR T S, et al. Challenges and opportunities for multi-functional oxide thin films for voltage tunable radio frequency/microwave components [J]. J Appl Phys, 2013, 114(19):1301-1335.
- [12] NAN Cewen, BICHURIN M I, DONG Shuxiang, et al. Multiferroic magnetoelectric composites: historical perspective, status, and future directions [J]. J Appl Phys, 2008, 103(3): 031101.
- [13] SRINIVASAN G. Magnetoelectric composites [J]. Annu Rev Mater Res, 2010, 40(1):153-178.
- [14] HUANG Liang, ZHANG Huaiwu, BAI Feiming, et al. Theoretical investigation of magnetoelectric surface acoustic wave characteristics of ZnO/Metglas layered composite [J]. Aip Advances, 2016, 6(1):759-765.
- [15] LI Menghui, MATYUSHOV A, DONG Cunzheng, et al. Ultra-sensitive NEMS magnetoelectric sensor for picotesla DC magnetic field detection [J]. Appl Phys Lett, 2017, 110(14):14351.
- [16] NAN Tianxiang, LIN Hwaider, SUN Nianxiang, et al. Acoustically actuated ultra-compact NEMS magnetoelectric antennas [J]. Nature Communications, 2017, 8(1):296.
- [17] LUDWIG A, QUANDT E. Optimization of the ΔE effect in thin films and multilayers by magnetic field annealing [J]. IEEE T Magn, 2002, 38(5):2829-2831.
- [18] CLARK A E, HATHAWAY K B, WUNFOHLE M, et al. Extraordinary magnetoelasticity and lattice softening in bcc Fe-Ga alloys [J]. J Appl Phys, 2003, 93(10):8621-8623.
- [19] DONG Shuxiang, ZHAI Junyi, BAI Feiming, et al. Magnetostrictive and magnetoelectric behavior of Fe-Ga/Pb(Zr, Ti)O₃ laminates [J]. J Appl Phys, 2005, 97(10):103902.
- [20] BAI Feiming, ZHANG Huaiwu, VIEHLAND D, et al. Magnetic force microscopy investigation of the static magnetic domain structure and domain rotation in Fe-xat. %Ga alloys [J]. J Appl Phys, 2009, 95(15):152511.
- [21] AKIYAMA M, KAMOHARA T, KANO K, et al. Enhancement of piezoelectric response in scandium aluminum nitride alloy thin films prepared by dual reactive cosputtering [J]. Advanced Materials, 2009, 21(5):593-596.
- [22] HASHIMOTO K Y, SATO S, KANO K, et al. High-performance surface acoustic wave resonators in the 1 to 3 GHz range using a ScAlN/6H-SiC structure [J]. IEEE T Ultrason Ferr, 2013, 60(3):637-642.
- [23] ZHOU Changjian, YANG Yi, CAI Hualin, et al. Temperature-compensated high-frequency surface acoustic wave device [J]. IEEE Electr Device L, 2013, 34(12):1572-1574.

《压电与声光》广告免费咨询卡

姓名:_____ 职务:_____ 职称:_____ 单位:_____

地址:_____ 邮编:_____ 电话:_____

您对本刊_____年_____期的 ☐彩色 ☐黑白 ☐刊花广告

_____公司(厂家)_____产品/技术感兴趣

希望:☐索取公司资料 ☐索取产品资料 ☐询问价格 ☐建立业务联系 ☐其他_____

请将卡片寄往(或传真):《压电与声光》编辑部 读者服务部

通讯地址:重庆南坪 2513 信箱(400060) 电话:023-62919570 传真:023-62803425

复印有效