

ZnO/蓝宝石结构声表面波滤波器试验研究

董加和,陈运祥,冷俊林,张显洪,张永川,王 岚,王 洁

(中国电子科技集团公司第二十六研究所,重庆 400060)

摘要:该文从理论上计算得到了 ZnO(*a*面)/蓝宝石(*r*面)结构的声表面波相速度和机电耦合系数色散曲线。依据该色散曲线设计了 ZnO(*a*面)/蓝宝石(*r*面)结构声表面波滤波器。采用在蓝宝石衬底上先制备 ZnO 薄膜然后再制作芯片结构的方案研制出了声表面波器件样品。研制过程中生长出了 *a* 面结构的 ZnO 薄膜,其中厚膜样品测试得到了 3 种声波模式,即模式 0、1 及 2,模式 0、1 和 2 的频率分别为 1 073.79 MHz,1 290.63 MHz 和 1 572.3 MHz,因此,间接测得了模式 0、1 和 2 的相速度分别为 3 865.67 m/s, 4 646.25 m/s 和 5 660.27 m/s。

关键词:声表面波滤波器;蓝宝石;相速度;机电耦合系数;ZnO 膜

中图分类号:TN65 **文献标识码:**A

An Experimental Study on SAW Filter with ZnO/Sapphire Structure

DONG Jiahe, CHEN Yunxiang, LENG Junlin, ZHANG Xianhong, ZHANG Yongchuan,

WANG Lan, WANG Jie

(26th Institute of China Electronic Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

Abstract: The dispersion curves (phase velocity and electromechanical coupling coefficient) of ZnO(*a* plane)/sapphire(*r* plane) structure are obtained by theoretical calculation. A SAW filter with ZnO/sapphire structure is designed based on the calculating results. The SAW filter prototype is fabricated by depositing ZnO film on sapphire substrate and then fabricating chip. In the process, the *a*-plane ZnO thin film has been grown. Three SAW modes of the thick film sample, named mode 0, mode 1 and mode 2, are measured. The measured center frequency of mode 0 and mode 1 and mode 2 is 1 073.79 MHz, 1 290.63 MHz and 1 572.3 MHz respectively. The measured phase velocity of mode 0 and mode 1 and mode 2 is 3 865.67 m/s, 4 646.25 m/s and 5 660.27 m/s respectively.

Key words: SAW filter; sapphire; phase velocity; electromechanical coupling coefficient; ZnO thin film

0 引言

蓝宝石又称为 α -Al₂O₃。蓝宝石晶体是在受控环境下生长而成,得到的是一个极纯的蓝宝石单晶。*r* 面蓝宝石不是在对称的晶轴上切割,而是沿着称作“*r* 面”的 60° 角切割。用晶面表示法这就是 (1 $\bar{1}$ 02) 面。蓝宝石 *r* 面和硅 (100) 面之间具有很好的结合性,这个优势使蓝宝石 *r* 面在半导体 IC 技术中具有重要应用,诞生了蓝宝石外延硅 (SOS) 技术^[1-2]。SOS 晶片已在半导体技术中获得商业应用。

在 *r* 面蓝宝石上可生长出 *a* 面的 ZnO 薄膜,这种薄膜晶格缺陷少,传播损耗小,相速度高,机电耦合系数也较大,适合研制高频、低损耗的声表面波 (SAW) 滤波器。本文对 ZnO(*a* 面)/蓝宝石(*r* 面)结构的声表面波频散特性从理论上进行了数值计

算。陈运祥等^[3-4]在本项目中研制出了成膜质量较好的 *a* 面 ZnO 压电晶体薄膜。本文研制了 IDT/ZnO(*a* 面)/蓝宝石(*r* 面)结构的 SAW 滤波器,并进行了测试,获得了相关测试结果。

1 频散特性数值计算

ZnO 和蓝宝石均属六方晶系,不同生长面的材料常数根据晶系的材料常数进行欧拉角旋转而得。机电耦合系数 $k^2 = 2 \times (v_0 - v_m) / v_0$ ^[5],其中 v_0 为自由表面的瑞利波相速度, v_m 为金属表面的瑞利波相速度。本文计算了 IDT/ZnO(*a* 面)/蓝宝石(*r* 面)结构的 SAW 自由表面相速度 v_p 色散曲线(见图 1)和 k^2 色散曲线(见图 2)。图中,0,1,2,3 表示 0,1,2,3 次模式波, h/λ 为 ZnO 膜厚和 SAW 器件设计波长之比。

收稿日期:2015-08-25

基金项目:总装预研基金资助项目(9140A23070312DZ3602)

作者简介:董加和(1978-),男,云南玉溪人,工程师,硕士,主要从事声表面波滤波器的设计及研究。

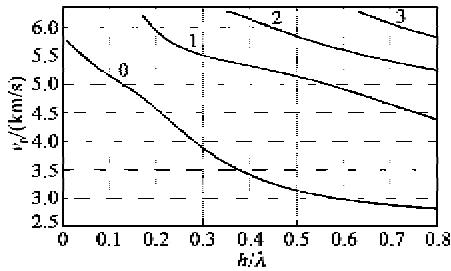


图 1 IDT/ZnO(a面)/蓝宝石(r面)结构 v_p 色散曲线

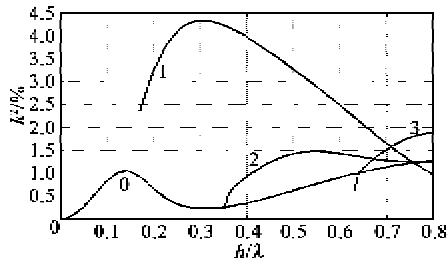


图 2 IDT/ZnO(a面)/蓝宝石(r面)结构 k^2 色散曲线

计算显示 IDT/ZnO(a面)/蓝宝石(r面)结构在 $h/\lambda=0.3$ 时,模式 1 的 k^2 最大值为 4.34%,理论相速度为 5 509 m/s。

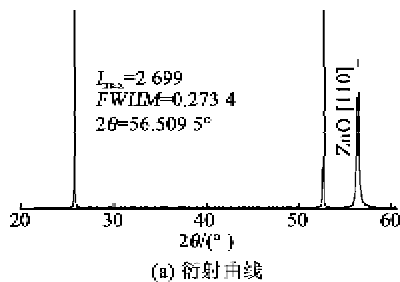
2 ZnO 薄膜制备

采用直流(DC)磁控反应性溅射锌靶沉积 ZnO 薄膜,实验获得 ZnO 薄膜的生长条件如表 1 所示。

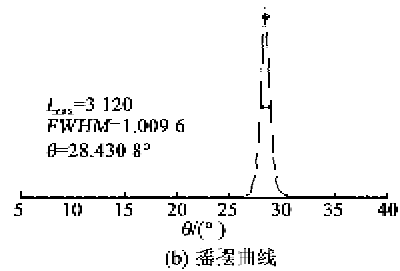
表 1 ZnO 薄膜的生长条件

靶材	高纯锌靶,纯度:99.999%
溅射气体	高纯氧气,纯度:99.999%
溅射气体压力/Pa	0.5~1.0
DC 溅射功率/W	70~150
基片	∅3"(∅7.62 cm)蓝宝石
基片温度/℃	200~300

制备出了 a 面择优取向生长 ZnO 压电薄膜。采用 D8 DISCOVER 型 X 线衍射(XRD)仪测试了 ZnO 薄膜的 XRD 曲线和摇摆曲线,如图 3 所示。由图可看出,ZnO 多晶薄膜衍射曲线衍射强度 $I_{max}=2 699$,衍射角 $2\theta=56.509 5^\circ$;摇摆曲线半峰宽(FWHM)达 1.009 6°。测试得到的 ZnO 薄膜晶向为[110],即六方晶系表示的 a 面结构。



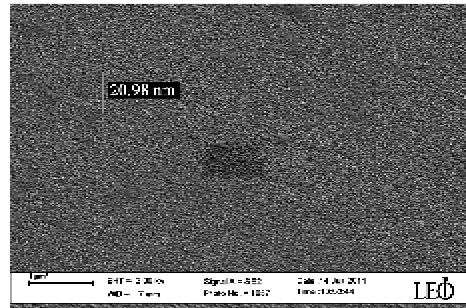
(a) 衍射曲线



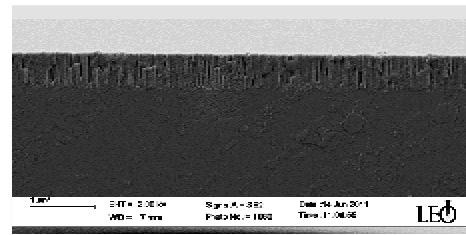
(b) 摇摆曲线

图 3 ZnO 多晶薄膜衍射曲线和摇摆曲线

图 4 为 r 面蓝宝石基 ZnO 薄膜表面及横断面形貌 SEM 图片。由图可看出,a 面生长的 ZnO 薄膜取向规则,成膜表面形貌致密细腻。



(a) 表面图



(b) 剖面图

图 4 a 面 ZnO 薄膜 SEM 形貌

3 SAW 滤波器设计及测试

采用了纵向耦合设计结构,指条线宽 $0.9 \mu\text{m}$,声波长 λ 为 $3.6 \mu\text{m}$,声孔径 W 为 $268.28 \mu\text{m}$,每个 IDT 指对数 N_1 (输入)=21 对; N_2 (输出)=34 对; N_3 (输入)=28 对; N_4 (输出)=31 对; N_5 (输入)=19 对。IDT 间距(两 IDT 最靠近的指条间距)取 $0.74 \mu\text{m}$,位于输入 IDT 外侧的反射器与 IDT 间距为 $3.6 \mu\text{m}$ 。反射器类型采取短路连接,反射器指条线宽 $0.9 \mu\text{m}$,每个反射器指条数 55 条。ZnO 厚度设计值为 $1.08 \mu\text{m}$ ($h/\lambda=0.3$)和 $2.16 \mu\text{m}$ ($h/\lambda=0.6$)。

样品采用 $3.8 \text{ mm} \times 3.8 \text{ mm}$ 表贴封装。薄 ZnO 膜设计的样品测试曲线如图 5 所示。图中有声波模式 0、1 两种。根据测试频率易计算出模式 0、1 的相速度分别为 $4 185.6 \text{ m/s}$ 和 $5 025.5 \text{ m/s}$ 。

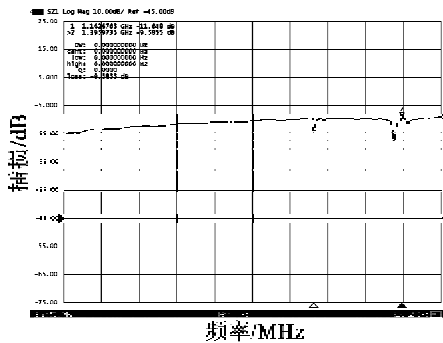


图5 样品测试(薄 ZnO 膜)

厚 ZnO 膜设计的样品测试曲线如图 6 所示。

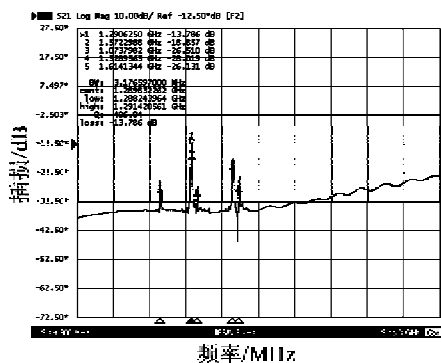


图6 样品测试(厚 ZnO 膜)

由图 6 的样品测试得到 3 种声波模式,即模式 0、1 及 2,模式 0、1 及 2 的频率分别为 1 073.79 MHz,1 290.63 MHz 和 1 572.3 MHz,因此,间接测得了模式 0、1 及 2 的相速度分别为 3 865.67 m/s, 4 646.25 m/s 和 5 660.27 m/s。

(上接第 953 页)

参考文献:

- [1] 张桂林,张承进,李康. 基于 PI 迟滞模型的压电驱动器自适应辨识与逆控制[J]. 纳米技术与精密工程, 2013,11(1):85-89.
ZHANG Guilin, ZHANG Chengjing, LI Kang. Adaptive identification and inverse control of piezoelectric actuators based on PI hysteresis model[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2013,11(1):85-89.
- [2] 李黎,刘向东,侯朝桢. 压电陶瓷执行器 Preisach 模型的分类排序实现[J]. 压电与声光, 2007, 29(5): 544-547.
LI Li, LIU Xiangdong, HOU Chaozhen. The sorting & taxis realization of Preisach model on piezoelectric ceramic actuator[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2007, 29(5): 544-547.

4 结束语

本文以 IDT/ZnO(*a* 面)/蓝宝石(*r* 面)结构的频散特性数值计算结果为指导,设计了薄 ZnO 膜和厚 ZnO 膜的纵向耦合结构的 SAW 滤波器。研制出器件样品,其中薄 ZnO 膜器件样品测试出 2 个声波模式,厚 ZnO 膜器件样品测试出了 3 个声波模式,样品测试与理论计算相符。本文研究表明, IDT/ZnO(*a* 面)/蓝宝石(*r* 面)结构可用于研制高频低损耗 SAW 滤波器。本文采用了 *r* 面蓝宝石衬底,而 *r* 面蓝宝石外延硅即 SOS 在半导体 IC 技术中有商业应用,因此,以 *r* 面蓝宝石为衬底的 SAW 滤波器与基于 SOS 技术的 IC 电路集成是值得探索的方向。

参考文献:

- [1] MANASEVIT H M, SIMPSON W J. Single-crystal silicon on a sapphire substrate[J]. J Appl Phys, 1964, 35: 1349.
- [2] RAPP A K, ROSS E C. Silicon-on-sapphire substrates overcome MOS limitations[J]. Electronics, 1972, 25: 113.
- [3] 陈运祥,秦廷辉,谭学斌,等. 高相速度 SAW 金刚石复合结构材料及器件研究[J]. 声学技术, 2008, 27(4): 69-71.
- [4] 陈运祥,谭学斌,唐代华,等. 高相速度 SAW 复合压电薄膜研究[J]. 声学技术, 2009, 28(4): 101-104.
- [5] INGEBRIGTSEN K A. Surface waves in piezoelectrics [J]. J Appl Phys, 1969, 40(7): 2681-2686.
- [3] 杨斌堂,赵寅,彭志科,等. 基于 Prandtl-Ishlinskii 模型的超磁致伸缩驱动器实时磁滞补偿控制研究[J]. 光学精密工程, 2013, 21(1): 124-130.
YANG Bingtang, ZHAO Yin, PENG Zhike, et al. Real-time compensation control of hysteresis based on Prandtl-Ishlinskii operator for GMA [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(1): 124-130.
- [4] KUHNEN K. Modeling, identification and compensation of complex hysteretic nonlinearities: A modified Prandtl-Ishlinskii approach [J]. European Journal of Control, 2003, 9: 407-418.
- [5] 王桂娟,徐红东,王佐勋,等. 基于 MATLAB 仿真的神经网络控制器的设计与实现 [J]. 系统仿真学报, 2005, 17(3): 742-745.
WANG Guijuan, XU Hongdong, WANG Zuoxun, et al. Design and implementation of neural network controller-based matlab simulink [J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(3): 742-745.