

文章编号: 1000-324X(2007)02-0273-04

新型压电晶体锗酸镓锗与硅酸镓镧声表面波传播特性的研究

辛长宇, 吉小军, 施文康

(上海交通大学 电信学院仪器工程系, 上海 200240)

摘要: 新型压电晶体 $\text{Sr}_3\text{Ga}_2\text{Ge}_4\text{O}_{14}$ (SGG) 在声表面波传感器方面有潜在的应用前景. 根据最新的关于锗酸镓锗的特性报道, 理论计算了 SGG 在 X 切、 Y 切和 Z 切上的声表面波 (SAW) 传播特性 (相速度、机电耦合系数、能流角). 与类质同构体 LGS 相比较, SGG 晶体表现出了更优异的机电特性.

关键词: SGG; 相速度; 机电耦合系数; 能流角

中图分类号: O426 **文献标识码:** A

SAW Properties of SGG and LGS Piezocrystals

XIN Chang-Yu, JI Xiao-Jun, SHI Wen-Kang

(Department of Instrumentation Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: A new piezoelectric crystal $\text{Sr}_3\text{Ga}_2\text{Ge}_4\text{O}_{14}$ (SGG) has potential applications in Surface Acoustic Wave (SAW) device. Based on the piezoelectric properties recently reported, the SAW properties of SGG crystal in some cuts were calculated by means of Christoffel Equation and boundary conditions for the first time. Compared with the well-known piezocrystal $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ (LGS), SGG crystal shows higher electromechanical properties.

Key words $\text{Sr}_3\text{Ga}_2\text{Ge}_4\text{O}_{14}$; phase velocity; electromechanical coupling factor; power flow angle

1 引言

近几年来, 随着航空航天、移动通讯、信息传感等技术的迅速发展, 对声表面波 (SAW) 器件的要求越来越高. 作为 SAW 器件的核心单元, 压电基片对 SAW 器件的性能起着决定性的作用. 近年来随着 SAW 技术应用领域和范围不断向广度和深度方向发展, 传统的 SAW 基片材料或是压电转换效率不够 (如石英) 或是温度稳定性不好 (如铌酸锂等). 传统的压电材料如石英、铌酸锂、钽酸锂、四硼酸锂等远远不能满足需求. 为寻找低成本、高性能的新型压电晶体, 具有 $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ (LGS) 结构的系列新型压电晶体成为压电领域近几年来的一个研究热点^[1,2]. LGS 晶体属于三方晶系, 空间点群为 $P321$. 该结构中有 4 种不同的阳离子晶格格点, 可以用通式 $\text{A}_3\text{BC}_3\text{D}_2\text{O}_{14}$ 来表示, 由于式中的 ABCD 格位可以被不同的离子分别占据, 还可以被性能近似的离子以多种方式相互代替, 因而可以构

成多种 LGS 类质同构的新型压电晶体. 其中, 锗酸镓锗 $\text{Sr}_3\text{Ga}_2\text{Ge}_4\text{O}_{14}$ (SGG)^[3] 晶体的综合压电性能优于 LGS 晶体, 原料成本也略低于 LGS, 有望成为新一代的重要候选基片材料.

目前, 俄、日等国的相关工作者已在 SGG 晶体的生长方法、材料常数的确定等方面进行了一些研究工作, 中国科学院上海硅酸盐研究所徐家跃、周娟等人也已成功利用坩埚下降法^[4] 生长出直径 50mm 的 SGG 晶体, 并对其材料常数、机械特性和熔点等进行了测试. 结果表明, SGG 晶体从室温到熔点 (1370°C) 无相变, 显示了在高温声表面波传感器方面的应用前景.

但从已公开的文献资料来看, 到目前为止, 国内外尚没有人对 SGG 的 SAW 特性进行过系统的理论分析, 而这些工作又是该晶体进入实用化的基础, 因此本文利用相关文献最新提供的材料常数, 从理论上分析了该晶体在 X 切、 Y 切和 Z 切的声

收稿日期: 2006-01-04, 收到修改稿日期: 2006-03-29

基金项目: 国家自然科学基金 (60274062)

作者简介: 辛长宇 (1970-), 男, 博士研究生. 通讯联系人: 吉小军. E-mail: jxj127@sjtu.edu.cn

表面波 (SAW) 特性, 并与相同切向的 LGS 晶体的特性进行了比较.

2 SGG、LGS 晶体声表面波特性理论分析

声表面波特性的理论分析就是根据给定的材料常数 (包括弹性常数、压电常数、介电常数、密度、热膨胀系数及其相应的一阶和二阶温度系数常数) 按 Christofel 方程和边界条件来计算某个切向条件下的声表面波速度 (包括自由化表面和金属化表面)、机电耦合系数 (K^2)、能流角 (PFA) 等特性参数. 下面对本文所用的理论分析算法过程作以简单说明.

2.1 材料常数选择与坐标变换

正确的材料常数是进行正确的理论分析的前提和基础. 对 LGS 晶体, 国外的不同研究小组给出了几套略有差别的材料常数, 也有许多学者对这些常数的可靠性进行了实验研究. 对 SGG 晶体, 由于合成时间不长, 所以完整的材料常数还鲜见报道,

表 1 LGS,SGG 两种类质同构晶体的材料常数
Table 1 Constants of LGS,SGG

Constants	LGS ^[6]	SGG
Elastic constants/ $10^{10}\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$		
c_{11}^E	18.849	-112.830
c_{12}^E	10.42	-119.161
c_{13}^E	9.688	-98.488
c_{14}^E	1.415	1.067
c_{33}^E	26.168	-70.832
c_{44}^E	5.371	5.111
c_{66}^E	4.221	3.1653
Piezoelectric constants/ $\text{C}\cdot^{-2}$		
e_{11}	-0.402	-0.3939
e_{14}	0.130	0.2022
Electric constants		
ε_{11}^T	19.620	13.61
ε_{33}^T	49.410	18.18
Thermal expansion coefficients/ 10^{-6}		
α_{11}	5.630	6.5
α_{33}	4.079	5.8
Density/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$		
ρ	5.7392	5.112

相比之下, 中国科学院上海硅酸盐研究所徐家跃等人所测定的材料常数比较完整可靠^[5]. 因此, 本文理论分析时分别选用与实验吻合较好的由文献^[6]给出的 LGS 材料常数和 中国上海硅酸盐研究所研究小组给出的 SGG 材料常数^[5], 如表 1 所示. 文献^[5]中给出的是材料顺度常数 s 与压电应变常数 d , 经转换后变为材料劲度常数 c 与压电应力常数 e .

需要指出, 一般文献中给出的材料常数都是基于晶轴的, 在对某个切向进行分析时, 首先要按着张量的坐标变换法则, 将材料常数变换到相应的坐标系中. X 切族、 Y 切族、 Z 切族相应的 Euler 角分别为 $(90^\circ, 90^\circ, 0^\circ \sim 180^\circ)$ 、 $(0^\circ, 90^\circ, 0^\circ \sim 180^\circ)$ 、 $(0^\circ \sim 180^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$, 下面理论分析时所用的材料常数都是按此 Euler 角转换而成的.

2.2 SAW 传播特性计算理论

压电基片上的 SAW 传播特性的计算可以归结为在半无限大晶体边界条件下 Christofel 方程的求解^[7]. 在晶体坐标系中 (图 1) 压电晶体的波动方程为:

$$\begin{aligned} c_{ijkl}^E u_{k,li} + e_{kji} \phi_{ki} - \rho \ddot{u}_j &= 0 \\ e_{kl} u_{k,ji} - \varepsilon_{ij} \phi_{ki} &= 0 \end{aligned}$$

其中: u_i 为质点的振动位移; ϕ 为电势; c_{ijkl}^E 、 e_{kji} 、 ε_{ij} 分别为晶体的弹性常数、压电常数和介电常数; ρ 为晶体的密度.

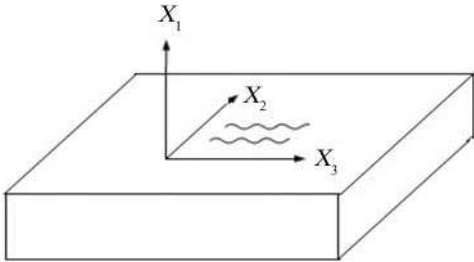


图 1 声表面波计算坐标系

Fig. 1 Calculation coordinate system for SAW

假设压电晶体中的声波和电磁波的平面解为:

$$\begin{aligned} u_i &= A_i \exp \left[jk \left(\sum_{i=1}^3 n_i x_i - \nu t \right) \right] \\ \phi &= A_4 \exp \left[jk \left(\sum_{i=1}^3 n_i x_i - \nu t \right) \right] \end{aligned}$$

式中, $i=1、2、3$; ν 为波的传播速度; k 为波数; n_i 为波传播方向的方向余弦; A_i 为振幅. 将平面波的解带入压电晶体波动方程, 可得到 Christofel 方程:

$$\begin{bmatrix} \Gamma_{11} - \rho\nu^2 & \Gamma_{12} & \Gamma_{13} & \Gamma_{14} \\ \Gamma_{21} & \Gamma_{22} - \rho\nu^2 & \Gamma_{23} & \Gamma_{24} \\ \Gamma_{13} & \Gamma_{23} & \Gamma_{33} - \rho\nu^2 & \Gamma_{34} \\ \Gamma_{14} & \Gamma_{24} & \Gamma_{34} & \Gamma_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \end{bmatrix} = 0$$

$\Gamma_{ik} = c_{ijkl}^E n_l n_m$, $\Gamma_{14} = e_{ejl} n_k n_l$, $\Gamma_{44} = \varepsilon_{ik} n_i n_k$
 $i, k = 1, 2, 3$

根据 SAW 边界条件, 通过对 Christoffel 求解, 可得到晶体自由化和金属化表面的相速度 ν_s 和 ν_m .

2.3 机电耦合系数 (K^2) 的计算

在压电应用中, 机电耦合系数是评价压电器件工作性能的重要参数, 它反映压电材料的机械能和电能之间相互耦合转化能力, 直接影响到声表面波器件的插损和工作带宽. 具体定义为:

$$K^2 = \frac{U_{\text{互}}^2}{U_{\text{弹}} \cdot U_{\text{介}}}$$

$U_{\text{互}}$ 为弹性与介电相互作用能密度, $U_{\text{弹}}$ 为弹性能密度, $U_{\text{介}}$ 为介电能密度. 外加电压所输入的电功率中一部分将转换成体波, 另一部分则转换为表面波, 因而在声表面波理论中, 机电耦合系数有更

直接的定义^[8]

$$K^2 \approx 2 \frac{\nu_2 - \nu_m}{\nu_2}$$

ν_s 为自由表面瑞利波的波速, ν_m 为金属化表面的波速. 这个定义的物理意义是很明显的, 如果瑞利波伴有很强的表面电势, 那么表面换能时必有强力的耦合, 而用金属膜将这电势短路所造成的影响也必然大, 即导致速度有较大的变化. 这样, 用自由表面和金属化表面的相对速度差来表征表面换能的耦合是合理的.

2.4 能流角 (PFA) 的计算

能流角又称束偏向角, 是指能流速度 (能流方向) 与相速度 (波传播方向) 之间的夹角, 它反映了声波能量衍射的大小. 假设相速度随方向 θ 的变化可以表示为 $\nu(\theta)$, 那么根据能流方向是慢度曲线的法线方向, 则能流角 ϕ 可由 $\tan \phi = \frac{1}{\nu} \frac{d\nu}{d\theta}$ 求出.

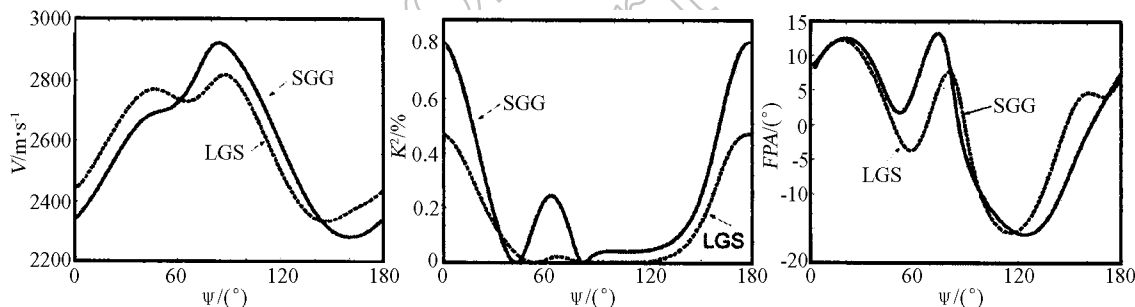


图2 LGS、SGG 晶体 X 切族 (90°, 90°, Ψ) 的声表面波特性

Fig. 2 SAW characteristics of LGS, SGG crystals in X-cuts (90°, 90°, Ψ)

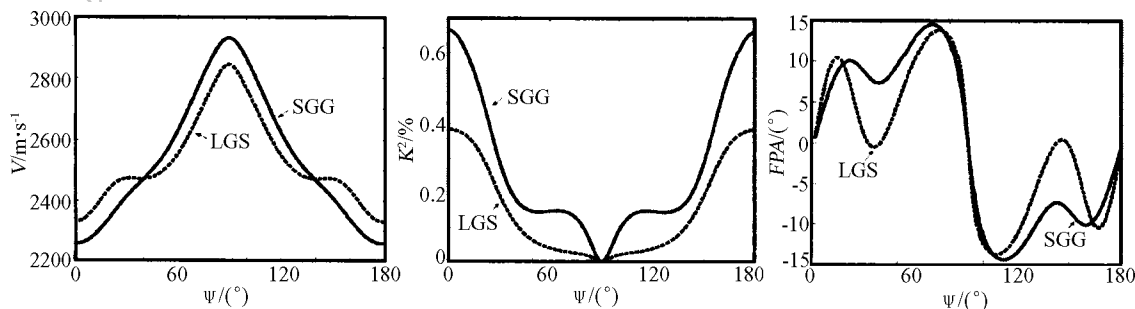


图3 LGS、SGG 晶体 Y 切族 (0°, 90°, Ψ) 的声表面波特性

Fig. 3 SAW characteristics of LGS, SGG crystal in Y-cuts (0°, 90°, Ψ)

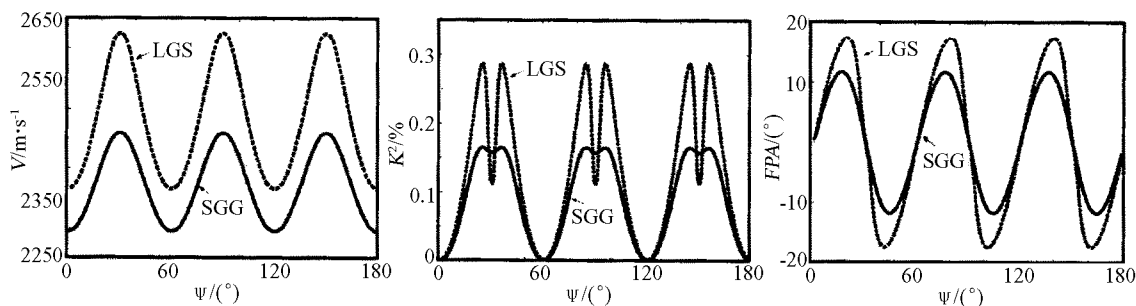


图4 LGS、SGG晶体Z切族($\Psi, 0^\circ, 0^\circ$)的声表面波特性

Fig. 4 SAW characteristics of LGS, SGG crystals in Z-cuts($\Psi, 0^\circ, 0^\circ$)

3 计算的结果与讨论

由于晶体材料具有各向异性,不同的切割与传播方向上的SAW特性差异比较大.要充分了解与利用晶体优良特性,就必须对晶体的各个切向进行计算分析,从而找到符合应用要求的切割与传播方向.本文参考了LGS等同类晶体的这些研究^[9],计算了SGG晶体在X切、Y切和Z切的声表面波(SAW)特性,并与相同切向的LGS晶体的特性进行了比较.如图2、3、4所示.

相速度的计算结果表明,在X切族与Y切族中,SGG与LGS的声表面波相速度相差不大,在 $\pm 150\text{m}$ 之间,而在Z切族可以看出,SGG的相速度均小于LGS晶体的相速度.速度差从60~150m,较低的相速度表明了将SAW器件进一步小型化的可能.

机电耦合系数的计算结果表明,Z切族SGG的机电耦合系数基本上比LGS小,但在X切族与Y切族,SGG晶体的机电耦合系数要远远大于LGS晶体.在(90,90,0)切向上SGG晶体的机电耦合系数达到了0.82%,远远大于LGS晶体(0.48%),说明了SGG晶体优良的机电转换性能.机电耦合系数高利于降低插指损耗,提高器件的工作带宽.

能流角反映了声波能量衍射的大小,很显然,这种现象对声表面波器件是不利的.计算表明,X切族与Y切族上,SGG晶体与LGS晶体的能流角基本近似,Z切族SGG晶体的能流角约为LGS晶体的60%左右,有利于提高声表面波器件的性

能.

同时,从计算中看出,Y切族和Z切族的SAW特性沿 90° 角镜像对称,利用这个特点,在优化时可以减小寻优范围,减小计算工作量.

4 结论

简要介绍了新型SGG压电晶体及其性能,并从理论上分析了其X切族、Y切族和Z切族的声表面波特性,并与LGS晶体进行了比较.证实了SGG压电性好、机电耦合系数高,是一种很有应用前景的新型压电晶体.本文的理论分析结果可以为该材料的器件化提供理论依据.

参考文献

- [1] Chai B, Lefaucheur J J. In *Proceedings IEEE International Frequency Control Symposium*, 1998. 748-758.
- [2] Fang H Y, Yang J S, Jiang Q. *International Journal of Solids Struct.*, 2000, **37** (36): 4933-4947.
- [3] Wu An-hua, Zhou Juan, XU Jia-yue. *Journal of Synthetic Crystals*, 2005, **34** (2): 654-658.
- [4] 张海斌, 沈定中, 任国浩, 等 (ZHANG Hai-Bin, et al). 无机材料学报 (Journal of Inorganic Materials), 2002, **17** (5): 910-914.
- [5] 周 娟. 中国科学院上海硅酸盐研究所硕士论文, 2003.
- [6] Malocha D C, da Cunha M P. *2000 IEEE/EIA International Frequency Control Symposium and Exhibition*, 2000. 200-205.
- [7] 水永安. 声表面波与声表面波器件 (讲义). 南京: 南京大学声学所, 1998. 22-32.
- [8] Ingebrigsten K A. *Appl. Phys.* 1969, **40**: 2681.
- [9] 吉小军, 韩 韬, 施文康, 等. 压电与声光, 2004, **26** (2): 135-138.