

基于 IDT/ZnO/AlN/Diamond 结构的混合 SAW/BAW 压力敏感元件特性研究

武庆鹏, 王地懋, 曾龙, 王艳

(南京邮电大学 电子与光学工程学院, 柔性电子(未来技术)学院, 江苏 南京 210009)

摘要: 利用有限元方法分析了基于 IDT/ZnO/AlN/Diamond 不同结构混合 SAW/BAW 器件的声学特性, 包括层状薄膜结构、ZnO 薄膜刻蚀结构和填充结构。结果表明, 当 $h_{\text{ZnO}}/\lambda=0.3$ 、 $h_{\text{AlN}}/\lambda=0.5$, 且 ZnO 被完全刻蚀 ($d/h_{\text{ZnO}}=1$) 时, 刻蚀结构混合 SAW/BAW (准西沙瓦波) 的机电耦合系数 (K^2) 取得最大值 6.54%, 比层状结构 ($d/h_{\text{ZnO}}=0$) 提升了近一倍。刻蚀结构中, SiO_2 和 Diamond 填充物的引入不仅提高了准西沙瓦波的 K^2 , 而且改善了其压力传感特性。当 $d/h_{\text{ZnO}}=1$ 时, SiO_2 和 Diamond 填充结构准西沙瓦波的压力频移分别为 81.2 kHz/MPa 和 207.4 kHz/MPa, 比刻蚀结构分别提高了 58.7% 和 300%; 同时, Diamond 填充物的引入使准西沙瓦波的频率压力系数 (PCF) 达到最大值 297×10^{-6} /MPa, 比 $d/h_{\text{ZnO}}=0$ 时提高了约 30%。由此可知, 通过引入不同的填充物可以开发不同的功能传感器, 在压力、温度和气敏等传感领域将具有极大的应用前景。

关键词: 声表面波; 准西沙瓦波; 刻蚀结构; 压力传感

中图分类号: TN65 **文献标识码:** A

Characteristics of Hybrid SAW/BAW Pressure Sensing Element Based on IDT/ZnO/AlN/Diamond Structure

WU Qingpeng, WANG Dimao, ZENG Long, WANG Yan

(College of Electronic and Optical Engineering & College of Flexible Electronics (Future Technology),
Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210009, China)

Abstract: The acoustic characteristics of hybrid SAW/BAW devices based on IDT/ZnO/AlN/Diamond with layered, etched, and filled structures are investigated using finite element methods. The results indicate that when $h_{\text{ZnO}}/\lambda=0.3$, $h_{\text{AlN}}/\lambda=0.5$, and the ZnO piezoelectric film is completely etched ($d/h_{\text{ZnO}}=1$), a maximum K^2 of 6.54% is obtained for the hybrid SAW/BAW (named quasi-Sezawa wave) excited in etched structure, which is nearly two times that of the layered SAW structure ($d/h_{\text{ZnO}}=0$). The K^2 and pressure sensing properties of the quasi-Sezawa devices are further improved by introducing SiO_2 and Diamond fillings. As $d/h_{\text{ZnO}}=1$, the pressure frequency shifts of the quasi-Sezawa device with SiO_2 and Diamond fillings are 81.2 kHz/MPa and 207.4 kHz/MPa, respectively, which are 58.7% and 300% higher than those of the etched structure. Meanwhile, the frequency pressure coefficient (PCF) of the quasi-Sezawa device with Diamond fillings is 297×10^{-6} /MPa, which is approximately 30% higher than that of the layered SAW structure. It can be concluded that different function sensors based on the hybrid SAW/BAW can be developed by introducing different fillings. This can have important application prospects in the fields of pressure, temperature and gas sensing sensors.

Key words: surface acoustic wave (SAW); quasi-Sezawa wave; etched structure; pressure sensing

0 引言

随着信息技术的迅速发展, 无线通信、射频标签、传感检测等领域对高性能传感器的需求日益增

加。声表面波 (SAW) 器件作为一种重要的传感器组件, 成为现代信息系统不可或缺的组成部分^[1-4]。

声表面波压力传感器具有损耗低、体积小和信

收稿日期: 2024-01-09

基金项目: 江苏省研究生科研创新计划 (KYCX21_0711); 南京邮电大学基金资助项目 (NY213038)

作者简介: 武庆鹏 (1998-), 男, 山东省德州市人, 硕士生。通信作者: 王艳 (1980-), 女, 山东省高密市人, 副教授。

号处理低延迟等优点,被广泛应用于航空航天、汽车发动机、石油钻井等恶劣环境^[5]。为了开发基于不同环境、高灵敏度的声表面波压力传感器,科研工作者做了大量的研究工作。Memon 等^[6]研究发现,当声表面波的传播方向与应变大的方向平行时,可以获得更高的灵敏度。Ma 等^[7]研究了 SAW 压力传感元件的结构参数对性能的影响,研究表明,当 AlN、叉指换能器(IDT)和 Mo 的厚度分别为 1.5λ 、 0.04λ 和 0.1λ (其中 λ 为器件结构周期)时,基于 IDT/AlN/Mo/Diamond 结构的 SAW 压力传感器的灵敏度最高约为 400 kHz/MPa。

此外,新型结构的混合 SAW/BAW 谐振器研究也备受关注^[8-9]。在此类器件中,刻蚀后留下的压电柱作为体声波(BAW)换能器代替 IDT 来激励衬底上的准声表面波,这样能极大地提高器件的机电耦合系数(K^2)^[10]。Liu 等^[11]在 AlN 薄膜上制备混合 SAW/BAW 谐振器,其 K^2 比传统的 AlN 声表面波器件提高了 9%。Liu 等^[12]基于 AlN/蓝宝石层状结构实现了准 SAW/BAW 混合谐振器,其 Sezawa 模式的工作频率大于 5 GHz, $K^2 > 6.5\%$, 阻抗比高达 98 dB。

本文结合不同材料的优点,构建了 IDT/ZnO/AlN/Diamond 结构的 SAW 器件。ZnO 和 AlN 是

常用的薄膜压电材料。ZnO 具有较高的 K^2 和较低的相速度,AlN 具有较低的 K^2 和相对较高的相速度^[13-14],而金刚石的 SAW 相速度($V_{\text{Dia}} = 11\ 000\ \text{m/s}$)是目前已知材料中最高的,但需要与压电薄膜结合激发 SAW。本文分析了 ZnO 薄膜材料的 3 种结构(层状、刻蚀和填充)对所激发 SAW 声学性能的影响,包括相速度 V_p 、机电耦合系数 K^2 和压力灵敏度。由结果可知,混合 SAW/BAW 结构所激发的准西沙瓦波的 V_p 与 K^2 明显优于层状结构,而填充 Diamond 的混合 SAW/BAW 结构的压力灵敏度也优于层状结构。同时,混合 SAW/BAW 谐振器在压力传感领域的研究尚无相关报道。因此,本文为混合 SAW/BAW 压力传感器的研制提供了理论依据。

1 模型和仿真

图 1 为基于 IDT/ZnO/AlN/Diamond 的不同结构模型。其中,所有结构的周期 λ 均为 $10\ \mu\text{m}$,单元模型中包含接地和信号两个叉指电极,每个电极的宽度及电极间距均为 $2.5\ \mu\text{m}$,Al 电极厚度为 $0.1\ \mu\text{m}$ 。图 1(b)结构是将图 1(a)电极之间的压电材料刻蚀后,在其刻蚀沟槽中填充其他物质。此外,ZnO 压电薄膜和 AlN 压电薄膜的厚度分别记为 h_{ZnO} 和 h_{AlN} 。

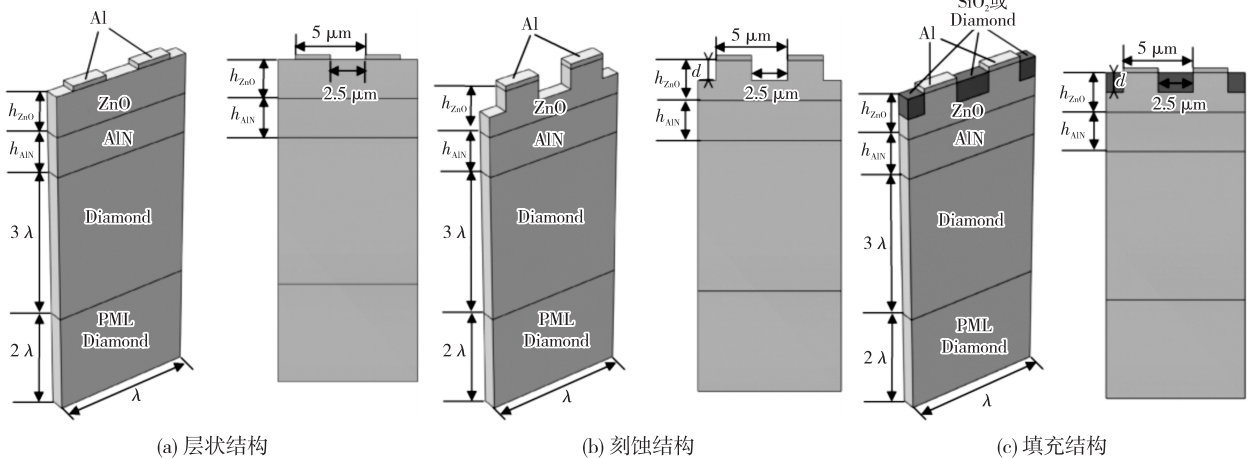


图 1 IDT/ZnO/AlN/Diamond 的不同结构模型示意图

灵敏度是声表面波压力传感器重要的性能指标,且与组成器件的各层材料厚度有关。本文主要研究不同结构器件的性能变化,故统一采用 5λ 的 Diamond 作为衬底。Diamond 最底部的 2λ 设为完美匹配层(PML),可以避免底部的边界反射。

为了减小仿真的自由度,计算中仅考虑 1 个周期单元模型。将其设置为无限延伸的周期性结构,即 x 轴、 y 轴方向为周期性边界条件,底部为固定边界条件,剩余的面均为自由表面。仿真中所用 AlN 及 ZnO 的材料参数如表 1 所示,Al、 SiO_2 和 Diamond 的材料参数如表 2 所示。

表1 仿真中所采用 AlN 及 ZnO 的材料参数

参数	符号	AlN ^[15]	ZnO ^[16]
弹性参数/ ($10^{11} \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$)	C_{11}	4.1	2.10
	C_{12}	1.49	1.21
	C_{13}	0.99	1.05
	C_{33}	3.89	2.11
	C_{44}	1.25	0.42
压电常数/($\text{C} \cdot \text{m}^{-2}$)	e_{15}	-0.48	-0.48
	e_{31}	-0.58	-0.57
	e_{33}	1.55	1.32
相对介电常数	ϵ_{11}	9	8.54
	ϵ_{33}	9	8.54
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	ρ	3 300	5 680

表2 计算所用 Al、SiO₂ 和 Diamond 的材料参数

材料	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	杨氏模量/GPa	泊松比
Al	2 700	70.3	0.345
SiO ₂	2 200	70	0.17
Diamond	3 515	105	0.1

SAW 器件的工作频率^[17]为

$$f = (f_s + f_{as})/2 \quad (1)$$

SAW 相速度(V_p)^[18]为

$$V_p = \lambda \cdot f \quad (2)$$

式中: f_s 和 f_{as} 分别为 SAW 的对称和反对称模式频率; λ 为声波波长,即叉指换能器的周期。

机电耦合系数(K^2)主要衡量了机械能和电磁能之间的相互转化效率^[19]。本文采用“速度差法”对其进行计算,即:

$$K^2 = 2(V_f - V_m)/V_f \quad (3)$$

式中 V_f, V_m 分别为声波在自由表面和金属化表面的相速度。

频率压力系数(PCF)反映了声表面波敏感元件的谐振频率随压力变化的敏感性。常用 PCF 代表器件的压力灵敏度^[7],有

$$PCF = \frac{1}{P} \cdot \frac{\Delta f}{f_r(0)} \quad (4)$$

式中 $\Delta f = f_r(P) - f_r(0)$ 为压强 P 负载前后的声波谐振频率变化, $f_r(P)$ 和 $f_r(0)$ 分别为器件表面有、无压强 P 负载时的声波谐振频率。

2 仿真结果与讨论

2.1 层状结构 SAW 器件的声学特性

图 2 为基于 IDT/ZnO/AlN/Diamond 层状结构声学器件的导纳曲线图,其中 ZnO 和 AlN 均为 (001) 晶体取向,厚度分别为 $3 \mu\text{m}$ 和 $5 \mu\text{m}$ 。根据其振动位移可知,此时所激发声波为西沙瓦波(R1 模式),频率为 547.88 MHz 。

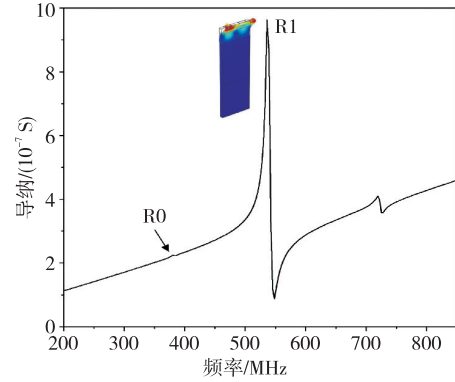


图2 IDT/ZnO/AlN/Diamond 层状结构声学器件的导纳图
进一步分析该结构中 ZnO 和 AlN 压电薄膜厚度对所激发西沙瓦波 V_p 和 K^2 的影响,结果如图 3 所示。

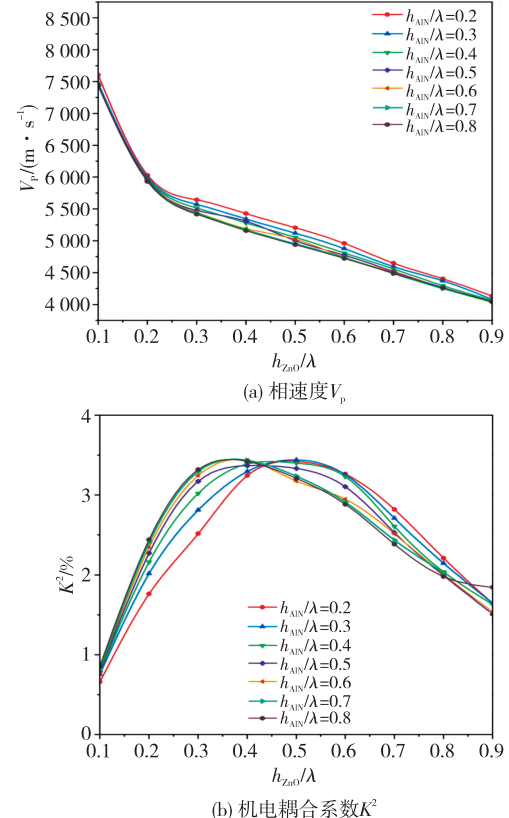


图3 IDT/ZnO/AlN/Diamond 层状结构中
西沙瓦波的传播特性

由图 3(a)可知,随着 h_{ZnO}/λ (ZnO 的归一化膜厚)的增加,西沙瓦波 V_p 迅速减小,这主要由 ZnO 较小的相速度所致。同样,随着 h_{AlN}/λ (AlN 的归一化膜厚)的增大,声波相速度 V_p 逐渐减小,且当 $h_{ZnO}/\lambda > 0.2$ 时,其影响越发明显。由图 3(b)可知,西沙瓦波的 K^2 随着 h_{ZnO}/λ 的增加而增大,当 K^2 到达最大值后, K^2 随着 h_{ZnO}/λ 的增加而减小。当 $h_{ZnO}/\lambda < 0.45$ 时, K^2 随着 h_{AlN}/λ 的增加而增大;当 $h_{ZnO}/\lambda > 0.45$ 时, K^2 随着 h_{AlN}/λ 的增加而减小。

2.2 刻蚀结构混合 SAW/BAW 器件的声学特性

为了进一步改善声学器件的性能,讨论了 ZnO 的刻蚀深度(d/h_{ZnO})对混合 SAW/BAW 结构的影响。图 4 为基于 IDT/ZnO/AlN/Diamond 刻蚀结构的导纳曲线图,其中 ZnO 和 AlN 的参数与图 2 相同。随着 d/h_{ZnO} 的增加,器件由层状 SAW 结构逐渐向混合 SAW/BAW 结构转变。由器件所激发声波的位移图可见,R1 振动模式发生了细微变化,由 SAW 向混合 SAW/BAW 转变。为了更好地进行比较,将混合 SAW/BAW 结构下的西沙瓦波命名为准西沙瓦波。在该模式下,刻蚀后留下的压电柱作为 BAW 换能器代替 IDT 来激发准西沙瓦波^[10]。

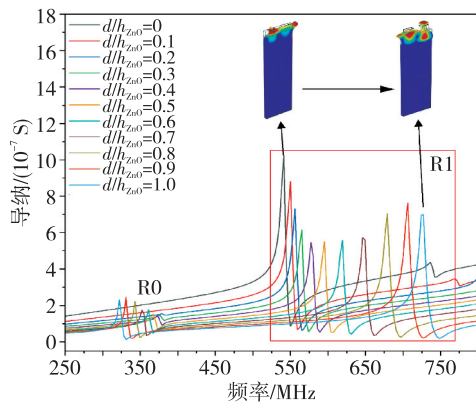


图 4 IDT/ZnO/AlN/Diamond 刻蚀结构声学器件的导纳图

图 5 为 IDT/ZnO/AlN/Diamond 结构所激发准西沙瓦波的 V_p 、 K^2 随 d/h_{ZnO} 的变化曲线。随着 d/h_{ZnO} 的增加,准西沙瓦波模式的 V_p 不断增加,这是因为随着刻蚀深度的增加,声能更接近具有高声速的基底;同时,表面质量负载的减小也对声速的提高有一定的贡献^[10]。准西沙瓦波的 K^2 先减小再增大,且在 $d/h_{ZnO} = 1$ (即 ZnO 被完全刻蚀)时达到最大值 6.54%,比层状结构时的西沙瓦波模式提升了近 1 倍。这主要是刻蚀后形成的 ZnO 柱作为

BAW 换能器有助于对准西沙瓦波的激发。

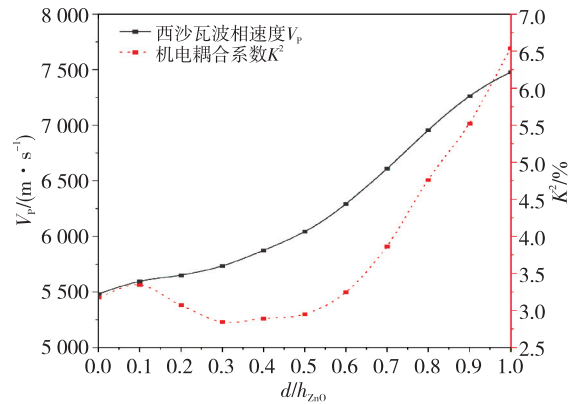
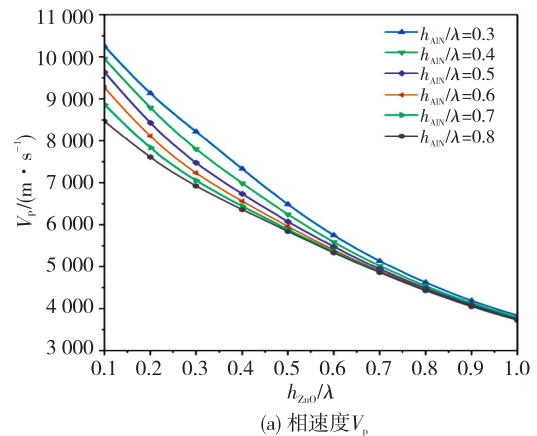
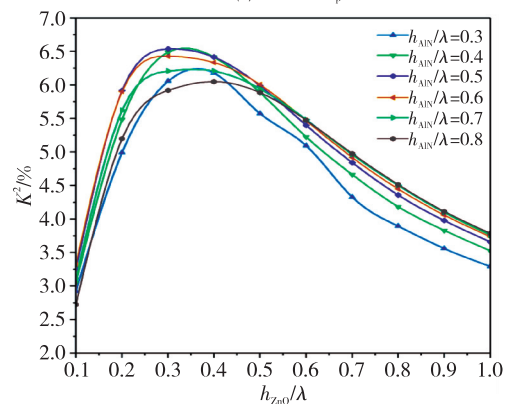


图 5 IDT/ZnO/AlN/Diamond 刻蚀结构所激发准西沙瓦波的 V_p 和 K^2 随 d/h_{ZnO} 的变化曲线

图 6 是当 $d/h_{ZnO} = 1$ 时, IDT/ZnO/AlN/Diamond 刻蚀结构激发准西沙瓦波的 V_p 、 K^2 随 h_{ZnO}/λ 和 h_{AlN}/λ 的变化曲线。由图可知,随着 h_{ZnO}/λ 和 h_{AlN}/λ 增加,准西沙瓦波的 V_p 逐渐减小, K^2 均呈先增大后减小趋势,且在 $h_{ZnO}/\lambda = 0.3$, $h_{AlN}/\lambda = 0.5$ 时, K^2 获得最大值 6.54%。因此,下述所有分析讨论均取 $h_{ZnO}/\lambda = 0.3$, $h_{AlN}/\lambda = 0.5$ 。



(a) 相速度 V_p



(b) 机电耦合系数 K^2

图 6 混合 SAW/BAW 刻蚀结构中准西沙瓦波的传播特性

2.3 填充结构混合 SAW/BAW 器件的声学特性

为了进一步改善混合 SAW/BAW 结构的性能,分别使用 SiO_2 和 Diamond 填充刻蚀后电极间存在的沟槽,填充后的结构示意图见图 1(c)。

图 7 为 IDT/ $\text{ZnO}/\text{AlN}/\text{Diamond}$ 填充结构所激发准西沙瓦波的 V_p 、 K^2 随 d/h_{ZnO} 的变化曲线,其中填充物为 SiO_2 和 Diamond。由图可见,填充结构中准西沙瓦波的 V_p 表现出良好的线性特性, K^2 逐渐增大,且在 $d/h_{\text{ZnO}} = 0.1 \sim 0.8$ 时,填充对 K^2 提升影响最大。

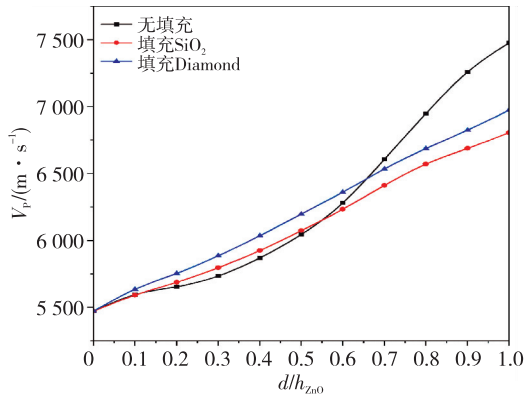
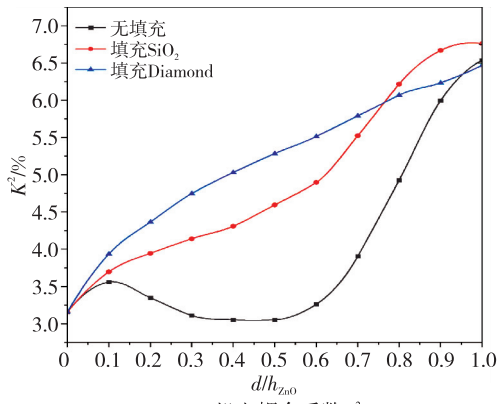
(a) 相速度 V_p (b) 机电耦合系数 K^2

图 7 混合 SAW/BAW 填充结构中准西沙瓦波的传播特性

2.4 不同结构 SAW/BAW 器件的压力传感特性

图 8 为基于 IDT/ $\text{ZnO}/\text{AlN}/\text{Diamond}$ 不同结构声学器件的频移 Δf 随压力的变化关系,其中 $d/h_{\text{ZnO}} = 1$ 。由图可见,当压力为 $0 \sim 0.5$ MPa 时,不同结构声学器件的频率偏移均呈现较好的线性关系。其中,层状 SAW 结构的压力频移约为 126.4 kHz/MPa,混合 SAW/BAW 刻蚀结构的压力频移约为 51.2 kHz/MPa。 SiO_2 和 Diamond 填充的混合 SAW/BAW 结构压力频移分别为 81.2 kHz/MPa 和 207.4 kHz/MPa,比无填充结构压力频移分别提高了 58.7% 和

300% 。此外,Diamond 填充的混合 SAW/BAW 结构压力频移比层状 SAW 结构提高了 64% 。

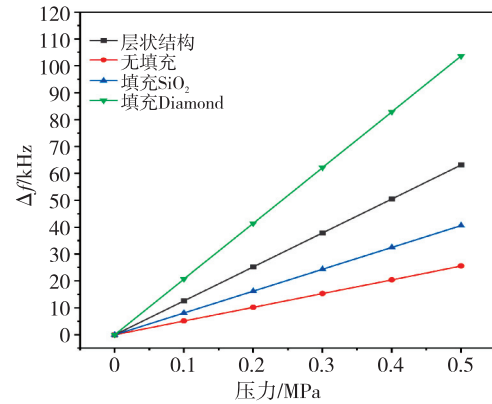
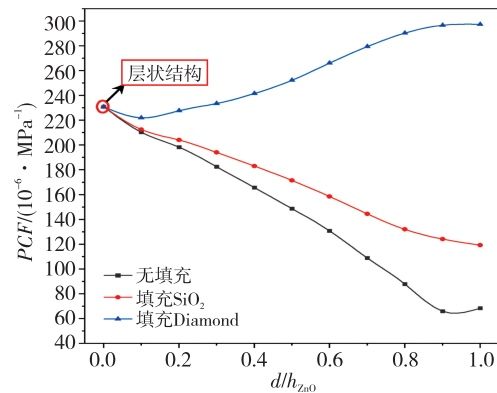
图 8 IDT/ $\text{ZnO}/\text{AlN}/\text{Diamond}$ 结构准西沙瓦波 Δf 随压力的变化曲线

图 9 为 IDT/ $\text{ZnO}/\text{AlN}/\text{Diamond}$ 填充结构准西沙瓦波器件的 PCF 随 d/h_{ZnO} 的变化曲线,其中填充物为 SiO_2 和 Diamond。由图可知,当无填充物(即刻蚀结构)时,随着 d/h_{ZnO} 的增大,PCF 逐渐减小; SiO_2 的填充对 PCF 起到一定的补偿作用,但未改变整体的变化趋势。当填充 Diamond 时,随着 d/h_{ZnO} 的增加,器件的 PCF 不断提高,当 $d/h_{\text{ZnO}} = 1$ 时,PCF 达到最大值 $297 \times 10^{-6}/\text{MPa}$,比同参数的层状结构(即 $d/h_{\text{ZnO}} = 0$)提高了约 30% 。

图 9 IDT/ $\text{ZnO}/\text{AlN}/\text{Diamond}$ 填充结构准西沙瓦波 PCF 随 d/h_{ZnO} 的变化曲线

填充物的引入提高了基于混合 SAW/BAW 结构的准西沙瓦波的压力传感灵敏度,这是因为在受到压力时,填充物提高了压电柱对压力的应变,进而影响了准西沙瓦波的激发,提高了压力灵敏度。

3 结束语

本文利用 FEM 方法仿真分析了基于 IDT/ $\text{ZnO}/\text{AlN}/\text{Diamond}$ 结构混合 SAW/BAW 器件的声学特性。结果表明,刻蚀结构明显提高了所激发

混合 SAW/BAW(准西沙瓦波)的 K^2 ,且在 ZnO 被完全刻蚀时, K^2 达到最大值 6.54%,比层状结构($d/h_{\text{ZnO}}=0$)提升了近一倍。在刻蚀结构中填充 Diamond 后,准西沙瓦波的性能得到进一步改进,包括 K^2 和 PCF。较高的 PCF 表明该结构可用于研制高灵敏度的压力传感器。具有更高 K^2 的混合 SAW/BAW 器件可以提供更宽的频带响应并降低插入损耗^[11],这将为高频声波谐振器和滤波器提供新的选择。根据此特性可以开发基于不同填充物的功能性传感器,在压力、温度和气敏等传感器领域具有极大的应用前景。

参考文献:

- [1] YANG S, AI Y, CHENG Z, et al. Method of the out-of-band rejection improvement of the AlN based surface acoustic wave filters[J]. Ultrasonics, 2018, 91:30-33.
- [2] WANG K, WEI Z, LIN Z, et al. Sorting of tumour cells in a microfluidic device by multi-stage surface acoustic waves[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2017, 258:1174-1183.
- [3] MA G M, WU Z, ZHOU H Y, et al. A wireless and passive on-line temperature monitoring system for gis based on surface acoustic wave sensor[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(3):1270-1280.
- [4] SATZINGER K J, ZHONG Y P, CHANG H S, et al. Quantum control of surface acoustic wave phonons [J]. Nature, 2018, 563: 661-665.
- [5] WANG W, LEE K, KIM T, et al. Pressure sensitivity evaluation of passive SAW microsensor integrated with pressure-temperature and ID tag on 41°-YX LiNbO₃ [C]//Lyon, France: 2007 International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference, 2007,1: 1935-1938.
- [6] MEMON M M, PAN S L, WAN J, et al. Highly sensitive thick diaphragm-based surface acoustic wave pressure sensor[J]. Sensors and Actuators A: Physical,2021:331.
- [7] MA X, XIAO Q, FAN Y, et al. Design and analysis of SAW pressure sensing element based on IDT/AlN/Mo/diamond multilayered structure[J]. Acta Acustica,2022,6:38.
- [8] MORITO A, KEIICHI U, ATSUSHI H, et al. Influence of scandium concentration on power generation figure of merit of scandium aluminum nitride thin films [J]. Applied Physics Letters,2013,102(2):021915-1-4.
- [9] UMEDA K, KAWAI H, HONDA A, et al. Piezoelectric properties of ScAlN thin films for piezo-MEMS devices[C]//Taipei, Taiwan, China: 2013 IEEE 26th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2013:733-736.
- [10] ZHANG Y, ZHOU J, XIE C L, et al. Dual-mode hybrid quasi-SAW/BAW resonators with high effective coupling coefficient[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2020, 67(9):1916-1921.
- [11] LIU K F, LIANG J R, WU T. AlN hybrid-coupled resonators with high acoustic velocity layer[C]//Las Vegas, NV, USA: IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS),2020:1-4.
- [12] LIU H L, ZHANG Q Z, SUN H. A novel modified AlN/Sapphire layered structure for spurious-free surface acoustic wave resonator with high coupling coefficient[C] //Montreal, Quebec, Canada: 2023 IEEE International Ultrasonics Symposium, 2023:1490-1493.
- [13] 潘峰.声表面波材料与器件[M].北京:科学出版社, 2012:96-128.
- [14] WANG Y, XIE Y C, ZHANG S Y, et al. Propagations of Rayleigh and Love waves in ZnO films/glass substrates analyzed by three-dimensional finite element method[J]. Chinese Physics B, 2017, 26(8):468-473.
- [15] HAN X, WANG F, ZHANG K, et al. Effect on coupling coefficient of diamond-based surface acoustic wave devices using two layers of piezoelectric materials of different widths[J]. Diamond and Related Materials,2022,125:109041.
- [16] WANG Y, XU J, JIA Z J, et al. Characteristics of surface acoustic waves based on (110)ZNO/(110)AlN/R-sapphire structure[C]//Chengdu, China: 2017 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications, 2017:103-106.
- [17] PLESSKY V, KOSKELA J. Coupling-of-modes analysis of SAW devices[J]. International Journal of High Speed Electronics & Systems, 2000,10:867.
- [18] LAN X D, ZHANG S Y, FAN L, et al. Simulation of SAW humidity sensors based on (11 $\bar{2}$ 0) ZnO/R-Sapphire structures[J]. Sensors, 2016, 16(11):1112.
- [19] FARNELL G W. Elastic wave propagation in thin layers[J]. Physical Acoustics, 1972:35-127.