



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
MEMS Sensors—Article

基于LiNbO₃/SiO₂/SiC异质结构实现44 GHz超高频声表面波谐振器

周剑^a, 张定红^a, 刘炀辉^a, 卓凤玲^a, 钱莉荣^{b,*}, 李红浪^c, 傅永庆^d, 段辉高^{a,*}

^a College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China

^b Tianjin Key Laboratory of Film Electronic and Communication Devices, School of Integrated Circuit Science and Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 30084, China

^c CAS Center for Excellence in Nanoscience, National Center for Nanoscience and Technology, Beijing 100190, China

^d Faculty of Engineering and Environment, Northumbria University, Newcastle upon Tyne NE1 8ST, UK

ARTICLE INFO

Article history:

Received 13 November 2021

Revised 6 March 2022

Accepted 5 May 2022

Available online 23 May 2022

关键词

超高频

声表面波

高阶声波模态

高灵敏度

摘要

声表面波(SAW)技术广泛应用于无线通信、传感器、微流体、光子与量子信息通信等领域。然而,受限于制造技术的发展,SAW器件的频率通常在几个吉赫(GHz)以内,严重限制了SAW器件在5G通信、高精度传感、光子与量子控制中的应用。针对上述关键问题,本文提出将极端纳米制造技术与LiNbO₃/SiO₂/SiC异质结构衬底相结合的策略,成功制备出波长为160 nm的超高频SAW器件,其高阶模态谐振频率高达约44 GHz,获得的机电耦合系数高达15.7%。基于LiNbO₃/SiO₂/SiC异质结构衬底的超高频SAW呈现出多种模态,理论仿真分析确定了高阶声波模态的波模态。进行了超高频SAW微质量传感应用研究,其最高质量灵敏度高达33151.9 MHz·mm²·μg⁻¹,比频率为978 MHz的传统SAW器件质量灵敏度高4000倍,是传统石英微天平(QCM)器件质量灵敏度的10¹¹倍。

© 2022 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

声表面波(SAW)技术广泛应用于物理、化学和生物传感器[1],光子[2]与量子声学,通信、信号处理[3]以及芯片实验室[4]等领域。传统SAW器件的工作频率通常在几个吉赫(GHz)以内,难以满足未来高频电子和通信需求。发展超高频SAW器件(频率高于3 GHz)对SAW高精度传感[5]、5G通信、量子操控[6]以及集成微波光子信号处理[7]等领域至关重要。

SAW器件的谐振频率(f)取决于SAW波速(v)和波长(λ),表达式为 $f = v/\lambda$ 。因此,提高SAW器件的频

率主要有两种方法。最常用的方法是采用纳米制造技术[8]提高SAW叉指换能器(IDT)光刻图案的分辨率,从而减小器件波长 λ 。例如,Büyükköse等[9]采用纳米压印技术,在ZnO/SiO₂/Si衬底上制备了频率高达16.1 GHz的SAW器件。Mohammad等[10]采用电子束光刻技术(EBL)在铌酸锂衬底上制备了频率为14.2 GHz、波长为200 nm的SAW器件。近期,本课题组通过优化EBL工艺,成功在低声速铌酸锂衬底上制备出频率高达30 GHz的SAW器件[11]。另一种方法是通过在高声速衬底上沉积低声速的压电薄膜形成“slow-on-fast”层状结构作为SAW器件的衬底,如ZnO/SiC [12]、AlN/SiC [13]、ZnO/

* Corresponding authors.

E-mail addresses: lirongqian83@email.tjut.edu.cn (L. Qian), duanhg@hnu.edu.cn (H. Duan).

2095-8099/© 2022 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

英文原文: *Engineering* 2023, 20(1): 112–119

引用本文: Jian Zhou, Dinghong Zhang, Yanghui Liu, Fengling Zhuo, Lirong Qian, Honglang Li, Yong-Qing Fu, Huigao Duan. Record-Breaking Frequency of 44 GHz Based on the Higher Order Mode of Surface Acoustic Waves with LiNbO₃/SiO₂/SiC Heterostructures. *Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2022.05.003>

金刚石 [14]、AlN/金刚石 [15]、AlN/Pt/金刚石/Si [16]等结构，从而大幅提升 SAW 波速 v 。本课题组前期报道了利用 EBL 技术在 AlScN/金刚石/Si 和 AlN/金刚石/Si 衬底上制备 SAW 器件的成果，分别获得了 33.7 GHz [17]和 17.7 GHz [18]的高频 SAW 器件。

然而，在超高频 SAW 器件领域，目前仍然存在几个关键问题亟需解决。其一，为了减小波长 λ ，大多数研究着重于在压电单晶衬底（如铌酸锂）上优化减小叉指换能器线宽的工艺方法，因为压电单晶衬底具有光滑的表面和较高的机电耦合系数 (K^2)。但压电单晶衬底通常声速较低且难以与互补金属氧化物半导体 (CMOS) 工艺兼容。其二，对于“slow-on-fast”的层状结构设计，通常采用的压电材料是机电耦合系数较低的 ZnO 或 AlN 薄膜材料，这严重限制了器件性能提升。最近，基于 SiC 的单晶压电薄膜层状结构材料，如 LiNbO₃/SiC [19]和 LiNbO₃/SiO₂/SiC [20]，开始用于制备超高频 SAW 器件，特别是 SAW 滤波器。然而，以往的研究主要集中在工作频率低于 5 GHz 的 SAW 器件，对于更高频率及其高阶声波模态在超高频领域的潜在应用研究较少。

为解决上述挑战，本文提出一种融合极端纳米制造工艺和“slow-on-fast”异质结构材料体系的策略，成功突破了当前 SAW 器件的频率纪录。基于该创新点，本文采用 LiNbO₃/SiO₂/SiC 异质结构材料作为衬底，并采用优化算法校正了电子束曝光时的邻近效应，优化了超高频 SAW 叉指换能器的电子束曝光参数，在异质结构衬底材料上成功制备出最小指宽为 35 nm、波长为 160 nm 的叉指电极，获得了频率为 5~44 GHz 的超高频 SAW 器件。制备的超高频 SAW 呈现出多种模态，采用有限元仿真分析方法确认了基于 LiNbO₃/SiO₂/SiC 异质结构材料的超高频 SAW 器件的波模态。进行了超高频 SAW 微质量传感应用研究，实现了超高质量灵敏度探测，证明了其优越的传感性能和在超高频 SAW 平台上的潜在应用。

2. 实验

图 1 (a) 为 LiNbO₃/SiO₂/SiC 异质结构衬底上的单端口超高频 SAW 谐振器的整体结构示意图。该 LiNbO₃/SiO₂/SiC 异质结构衬底的制备工艺是采用典型的离子注入切割工艺，其工艺流程如附录 A 中的图 S1 所示。采用 4 英寸正 X 切向（绕 X 轴旋转与 Y 轴夹角为 34°方向）为传播方向的 LiNbO₃ 单晶薄膜作为压电层，因该压电层具有较高的 K^2 值和极小的表面粗糙度，有利于器件的制备和性能提升。采用 SiC 作为衬底是因为 SiC 具有较大的剪切体

波速度 (7100 m·s⁻¹) 和纵体波速度 (12500 m·s⁻¹) [21]、较小的传播损耗、较高的热导率等优点；此外，SiC 作为第三代半导体材料之一，具备将微电子器件与 SAW 器件集成的能力[22]。在该层状材料体系设计中，SiO₂ 充当温度补偿层。附录 A 中的图 S2 展示了制备超高频 SAW 器件纳米级叉指换能器中的 EBL 和剥离 (lift-off) 工艺流程图。其中，应用于 EBL 的邻近效应校正优化算法在本课题组以前的工作[11]中有详细介绍。本文制备了波长为 160~800 nm 的超高频 SAW 器件，其叉指电极对数为 50 对，孔径 (L) 为 20 倍波长，反射栅与叉指电极之间的间距为 0.25 倍波长，详细几何参数信息汇总于附录 A 中的表 S1。

通过扫描电子显微镜 (SEM; Carl-Zeiss Sigma HD, Germany) 观察了叉指电极表面形貌和 LiNbO₃/SiO₂/SiC 异质结构衬底的截面形貌；采用 X 射线衍射仪 (XRD; D8 ADVANCE, Germany) 表征了薄膜晶体结构；采用原子力显微镜 (AFM; SPI-3800N, Seiko Co., Japan) 研究了 LiNbO₃/SiO₂/SiC 异质结构衬底的表面形貌，表征其表面粗糙度。采用 R&S@ZVA 矢量网络分析仪 (最大频率可达 67 GHz)、MPI 200 mm 自动探针测试系统 (MPI TS2000-SE) 和 GSG 射频探针测试系统对器件性能进行测试。在对 SAW 器件进行 S 参数测试之前，通过标准校准芯片进行开路、短路和负载校准，以减少射频电缆和探针测试系统的寄生信号影响。

微质量传感应用验证采用的敏感机制是基于之前报道的 SAW 叉指电极上质量敏感方式[23]。分别采用不同 Au 叉指电极厚度对 SAW 器件进行不同质量加载，其中 20 nm 厚度 Au 电极定义为初始状态，即 0 质量负载；25 nm 厚度 Au 电极则为 5 nm 厚度质量负载，其质量负载密度约为 0.0966 $\mu\text{g}\cdot\text{mm}^{-2}$ 。测试质量负载下的超高频 SAW 频率偏移。本研究工作中选择 Au 作为叉指电极材料是因为 Au 的导电性优于传统的 Al 电极，并且在 lift-off 工艺过程中，采用 Au 制备的叉指电极材料缺陷和器件失效较少。

采用网络分析仪、探针测试系统和 LabVIEW 程序测试了温度对超高频 SAW 器件的影响。采用的 MPI 探针系统带有一个集成的加热卡盘 (20~300 °C)，且带有触屏显示器，放置于操作员的前面，方便快速操作与即时反馈。在测试过程中，SAW 样品被放置在探针系统的加载卡盘上，GSG 探针用于连接 SAW 叉指电极与网络分析仪。操控触屏显示器可以调节温度，加热设备内部的加载卡盘，将温度调节到设定值，然后网络分析仪记录频率信号的变化。

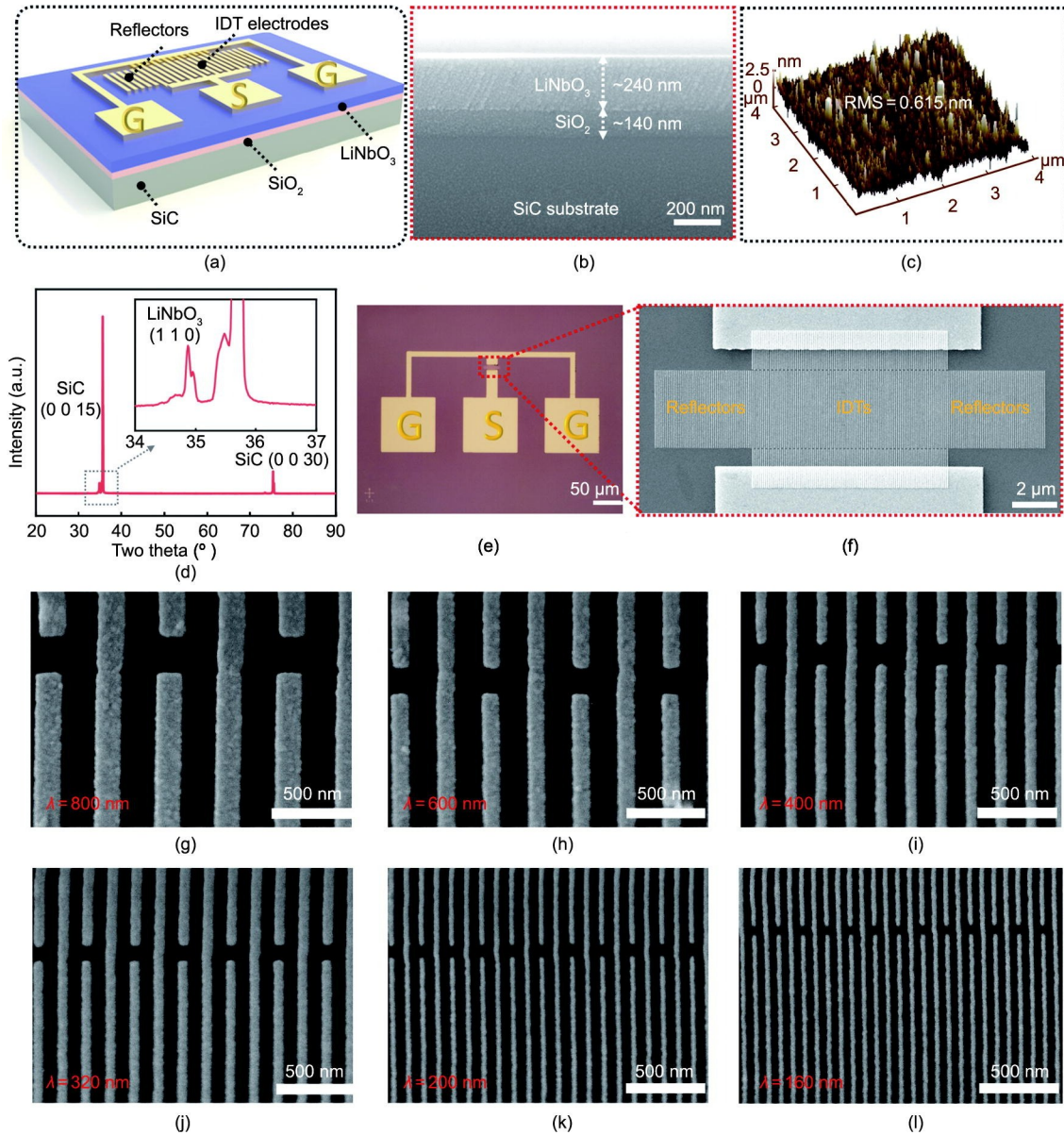


图 1. (a) 基于 $\text{LiNbO}_3/\text{SiO}_2/\text{SiC}$ 异质结构的单端口 SAW 器件示意图；(b) $\text{LiNbO}_3/\text{SiO}_2/\text{SiC}$ 异质结构的截面形貌；(c) $\text{LiNbO}_3/\text{SiO}_2/\text{SiC}$ 衬底表面的 AFM 图；(d) $\text{LiNbO}_3/\text{SiO}_2/\text{SiC}$ 衬底材料的 X 射线衍射仪 (XRD) 图；(e) 波长为 160 nm 的 SAW 器件光学显微镜图；(f) ~ (i) 叉指电极对数和反射栅条均为 50，波长分别为 800 nm、600 nm、400 nm、320 nm、200 nm 和 160 nm 器件叉指换能器的扫描电镜图。

3. 结果与讨论

图 1 (b) 是基于 $\text{LiNbO}_3/\text{SiO}_2/\text{SiC}$ 异质结构衬底的超高频 SAW 器件截面 SEM 图，结果表明单晶 LiNbO_3 薄膜无缝键合于 SiO_2/SiC 衬底上， SiC 衬底上的 LiNbO_3 薄膜和 SiO_2 薄膜的厚度分别约为 220 nm 和 140 nm。图 1 (c) 为采用 AFM 测试的超高频 SAW 器件的衬底表面形貌图。实验结果表明， LiNbO_3 薄膜的表面粗糙度值约为 0.615 nm (均方根或 RMS 值)，远小于文献[12–16]中报道的 AlN 或 ZnO 薄膜层状结构材料的表面粗糙度。光滑的衬底表面有利于采用极端纳米制造技术提高图案分辨率，可减小

SAW 叉指电极线宽，以推动频率至超高频极限。图 1 (d) 为 SiC 衬底上 LiNbO_3 薄膜的 XRD 图谱，在 2θ 约为 34° 处仅有一个衍射峰，表明 LiNbO_3 薄膜具有 (110) 取向。图 1 (e) 为制备的超高频 SAW 器件的光学显微镜照片，图 1 (f) 展示其完整的叉指电极结构，表明使用优化的 EBL 工艺方法可以成功制备纳米级的 SAW 叉指电极。图 1 (g) ~ (l) 展示了波长为 800 nm、600 nm、400 nm、320 nm、200 nm 和 160 nm 的超高频 SAW 器件叉指电极的 SEM 图。结果表明，成功制备了最小波长为 160 nm、线宽约 35 nm (见附录 A 中的图 S3) 超高频 SAW 器件，这是目前所报道的层状结构衬底材料上波长最小的超高频 SAW 器件。

所制备的超高频SAW器件导纳 (Y_{11}) 曲线如图2所示, 反射参数信号 (S_{11}) 如附录A中的图S4所示。结果表明, 所有超高频SAW器件都存在多种模式, 且随着波长从800 nm减少到160 nm, 谐振频率的范围从4~15 GHz增加到10~42 GHz。随着超高频SAW器件波长的减小, 器件信号幅值略有下降。一方面, 这是由于更细的叉指电极使电极阻抗增加, 影响器件性能。另一方面, 线宽越细, 制备出的SAW叉指均匀性越差, 从而导致器件信号相对较弱。尽管如此, 本文仍然在制备的波长为160 nm超高频SAW器件中探测到了约为41.5 GHz的高频信号。为了验证所获得的高频信号不是寄生响应或噪声, 进一步制作了4个波长为160 nm的超高频SAW器件, 结果如附录A中的图S5所示, 均出现了该频率段的强信号, 验证了该频率信号为SAW诱导产生。

采用有限元分析方法 (COMSOL 软件) 对超高频SAW器件进行了仿真, 获得了不同波长的超高频SAW器件导纳曲线, 如图2所示, 所有器件的仿真结果与测试实验结果吻合较好。

为了进一步确认超高频SAW器件呈现出的模式类型, 采用特征频率分析研究了质点的振动模式。图3 (a) 显示了超高频SAW器件各模式的质点振动模式。结果表明, 模式1对应于水平剪切 (SH) 波模式, 其质点位移和声波

振动主要沿水平孔径方向[20], 如附录A中的图S6 (a) 所示。模式2是标准的瑞利波[11], 模式3是纵表面波与金属厚度谐波模式的耦合[24], 模式4为纵表面波[25], 模式5为高阶SH波, 其他所有模式均为在SiC衬底附近传播的高阶SAW [26]。值得注意的是, 如图3 (a) 所示, 随着SAW波长的减小, 更多的声学模式被激发出来, 这主要是由超高频SAW器件的层状结构属性、亚微米厚度压电薄膜特性, 以及随着SAW波长的减小而增强的界面反射效应引起。例如, 只有当波长小于320 nm时, 才能观测到瑞利波 (模式2); 而模式10和模式11仅在波长低于200 nm时才被激励出来; 当波长小于层厚时, 将产生更多的高阶SAW模式[27]。

超高频SAW不同波模式的相速度随归一化厚度 kH ($2\pi H/\lambda$, 其中 H 为 LiNbO_3 的厚度, k 为波数) 的变化如图3 (b) 所示。结果表明, 所有模式的相速度都随着 kH 的增加而减小, 主要原因是随着 kH 增加, 更多的声能能量被限制在 LiNbO_3 压电层内, 而 LiNbO_3 的声速远小于SiC衬底声速。

SAW谐振器的Bode质量因子 (Q) [28]可通过以下方法计算:

$$Q = \frac{\omega |S_{11}| \text{group_delay}(S_{11})}{1 - |S_{11}|^2} \quad (1)$$

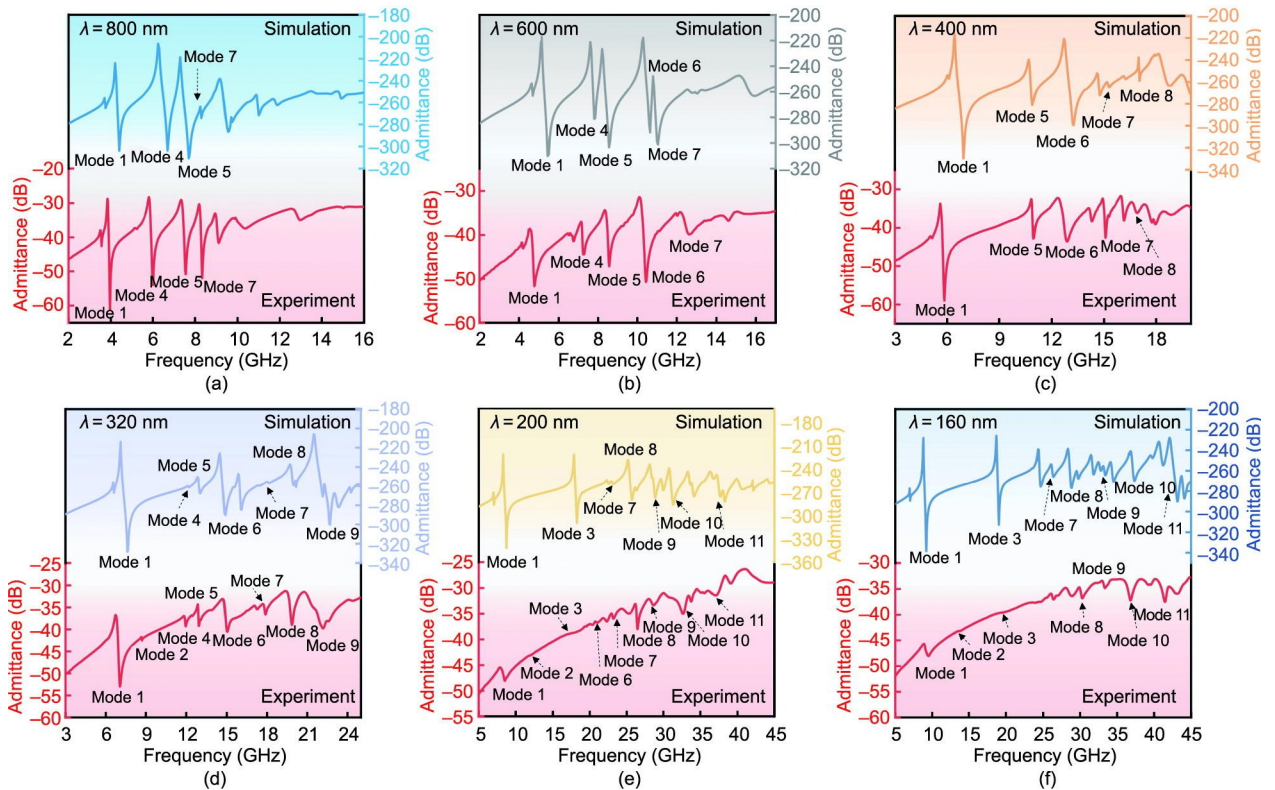


图2. 波长分别为800 nm、600 nm、400 nm、320 nm、200 nm和160 nm的SAW器件导纳和谐振频率特性, 其中红色曲线为SAW器件实验所测导纳, 各图上部曲线为有限元仿真的导纳。

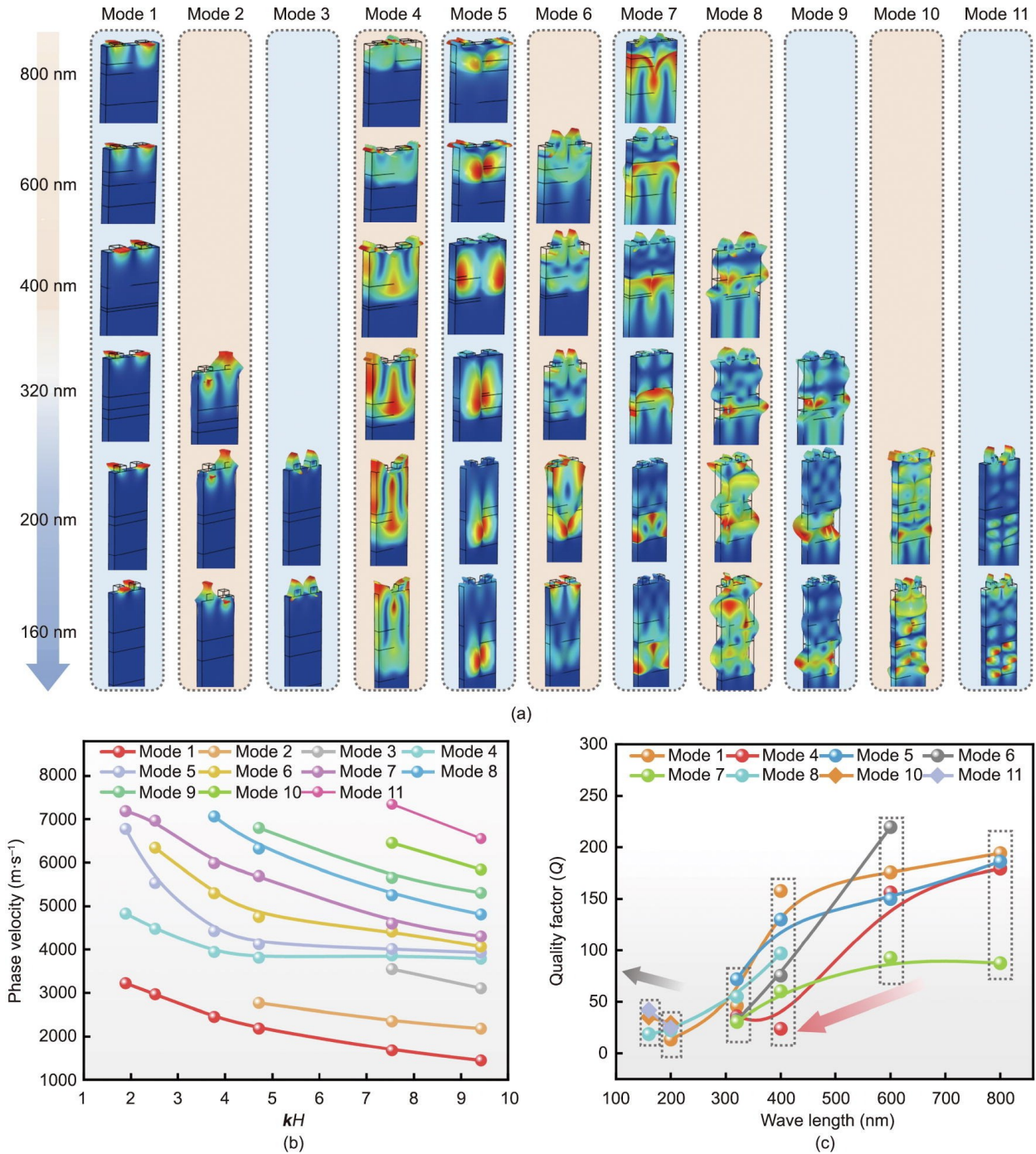


图3. (a) 波长为800~160 nm的SAW多种模式的质点位移；(b) LiNbO₃/SiO₂/SiC结构上的SAW相速度与归一化膜厚(kH)的关系，其中 H 为LiNbO₃厚度；(c) Q 值随波长的变化，波长范围为800~160 nm。

式中， $\text{group_delay}(S_{11})$ 为 S_{11} 参数的群时延， ω 为角频率。实验制备的超高频SAW谐振器的实测Bode- Q 曲线如附录A中的图S7所示，各模式的 Q 值汇总于表S2和图3(c)中。随着SAW波长的增加，除模式10和模式11外，各模式的 Q 值均呈增加趋势，如图3(c)所示。 Q 值随波长减小而下降的原因主要是极窄叉指电极线宽导致电极阻抗增大，超高频SAW较高的声损耗以及极窄叉指电极线宽不

均匀性。当SAW器件波长缩小至200 nm和160 nm时才产生高阶模式10和模式11。这是因为当 λ 小于LiNbO₃的厚度时，SiC衬底界面反射波产生的干涉效应显著增强[27]，较小的波长有利于超高频SAW器件产生高阶模式[18]。模式10和模式11的 Q 值随着SAW波长的减小(从200 nm减小到160 nm)而增大，这可能是由于衬底反射声波的干涉效应随波长的减小而增强导致的。

SAW 谐振器机电耦合系数 (k_{eff}^2) 的计算方法为:

$$k_{\text{eff}}^2 = \frac{(\pi/2) \cdot (f_s/f_p)}{\tan((\pi/2) \cdot (f_s/f_p))} \quad (2)$$

式中, f_p 和 f_s 分别为 SAW 谐振器导纳曲线的反谐振频率和谐振频率。附录 A 中的表 S3 总结了所有超高频 SAW 器件的 k_{eff}^2 值, 结果表明, 模态 1 (SH 波) 的 k_{eff}^2 值高于其他高阶模态, 这与理论仿真结果一致 (见附录 A 中的表 S3)。对于波长为 160 nm 的 SAW 器件, SH 波频率约为 10 GHz, k_{eff}^2 高达 15.7%; 模态 11 的频率高达 41.5 GHz, k_{eff}^2 为 7.3%。由于 SH 波具有较大的 k_{eff}^2 , 在高频领域具有较大应用潜力。对 SH 波模态进行更加详细的性能分析, 如附录 A 中的图 S6 所示。

为了验证超高频 SAW 器件的应用潜力, 在超高频 SAW 器件的叉指电极上进行了质量负载传感实验[23]。通过制备不同厚度叉指电极作为不同的电极质量负载: 假定 20 nm 叉指电极厚度为无任何质量加载的原始状态, 25 nm 电极厚度则对应于叉指电极质量载荷为 $0.0966 \mu\text{g} \cdot \text{mm}^{-2}$ 。

图 4 (a)、(b) 及附录 A 中的图 S8 分别展示了波长为 320 nm、200 nm 和 160 nm 超高频 SAW 器件的质量传感结果。实验表明, 随着叉指电极上负载质量的增加, 所有不同波长超高频 SAW 器件的谐振频率值都呈现降低趋势。SAW 器件的质量灵敏度 S 可由频率的变化量除以每个传感区域的质量变化量表示[29], 计算公式如下:

$$S = \Delta f / (\Delta m/A) \quad (3)$$

式中, Δf 为质量负载引起的频率偏移; Δm 为质量载荷; S 为质量灵敏度; A 为敏感区面积。附录 A 中的表 S4 总结了不同波长超高频 SAW 器件各模态的质量灵敏度值。结果表明, 工作频率较高、波长较小的超高频 SAW 器件具有较大的质量传感灵敏度。例如, 当器件波长从 320 nm 减小到 160 nm 时, SH 波频率偏移量从 648.9 MHz 增大到 1527.9 MHz, 如图 4 (c) 所示; 波长为 320 nm、200 nm 和 160 nm 的 SAW 质量灵敏度分别为 6717.1 、 10183.9 和 $15817.5 \text{ MHz} \cdot \text{mm}^2 \cdot \mu\text{g}^{-1}$, 表明 SH 波模态的质量灵敏度值随着频率增大而显著增加。

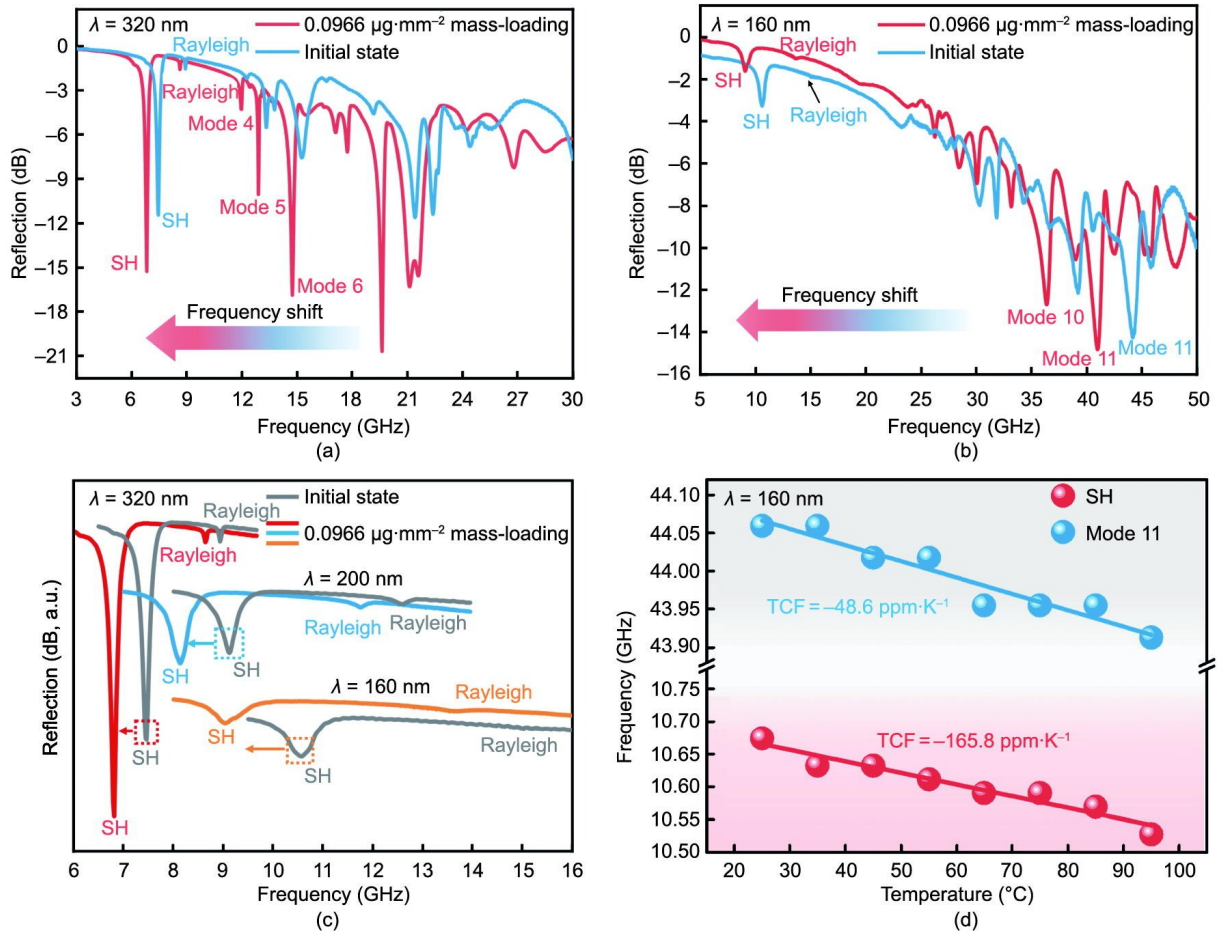


图 4. λ 为 320 nm (a) 和 160 nm (b)、电极质量负载为 $0.0966 \mu\text{g} \cdot \text{mm}^{-2}$ 的超高频 SAW 器件频率偏移; (c) 电极质量负载为 $0.0966 \mu\text{g} \cdot \text{mm}^{-2}$ 、波长为 320~160 nm 范围内的超高频 SAW 器件的 SH 模态和 Rayleigh 模态的频率响应图; (d) λ 为 160 nm 的超高频 SAW 器件的 SH 模态和模态 11 的谐振频率随温度变化图。

对于同一波长的超高频SAW器件，不同声波模态也具有不同的质量灵敏度。如图4(c)所示，在相同质量载荷下，所有波长器件的SH波模态和瑞利波模态的频移存在较大差异。虽然SH波频率较低，但其灵敏度远高于瑞利波。这是因为SH波的波速对电极上的质量载荷更敏感，特别是对于密度较大的重金属薄膜[30]。

计算所有超高频SAW器件各模态的质量灵敏度值，如附录A中的表S4所示。结果表明，与其他模态相比，模态11具有更高的灵敏度。在测试的所有SAW器件中，波长为160 nm的超高频SAW器件的最高工作频率高达44.2 GHz，具有最高的质量灵敏度，约为 $33151.9 \text{ MHz} \cdot \text{mm}^2 \cdot \mu\text{g}^{-1}$ （模态11）。该频率值为当今电声激励SAW器件的最高频率值，其质量灵敏度与表1文献中报道的传统石英晶体微天平（QCM）和频率为978 MHz的SAW器件的质量灵敏度相比较，灵敏度分别高出了约 10^{11} 倍和4000倍。

SAW器件的温度特性是应用的另一个重要参数，其频率温度系数（TCF）通过下列方法计算：

$$\text{TCF} = \frac{1}{f_0} \frac{\Delta f}{\Delta T} \quad (4)$$

式中， f_0 为室温下SAW器件的谐振频率； Δf 为频率变化量； ΔT 为温度变化量。测试了波长为160 nm和200 nm的超高频SAW器件的TCF值，如图4(d)和附录A中的图S9所示。由于SH波模态的器件性能最好、模态11的质量灵敏度值最高，所以对这两个模态的TCF结果进行了分析。超高频SAW谐振频率偏移随温度变化呈线性变化，趋势如图4(d)所示。对于这两个波长的超高频SAW器件，SH模态的TCF值分别为 $-165.8 \text{ ppm} \cdot \text{K}^{-1}$ 和 $-229.0 \text{ ppm} \cdot \text{K}^{-1}$ ，模态11的TCF值分别为 $-48.6 \text{ ppm} \cdot \text{K}^{-1}$ 和 $-55.2 \text{ ppm} \cdot \text{K}^{-1}$ ，表明模态11对温度变化的敏感性稍低。为了验证实验测试TCF值的准确性，仿真计算了 λ 为160 nm的超高频SAW器件的SH模态的温度效应。得到的TCF值约为 $154.4 \text{ ppm} \cdot \text{K}^{-1}$ （见附录A中的图S10），与实验得到的结果（ $-165.8 \text{ ppm} \cdot \text{K}^{-1}$ ）接近。

表1 SAW和QCM器件质量灵敏度比较

Sensor	Working frequency (GHz)	Mass sensitivity	Year	Ref.
SAW	0.978	$8.230 \text{ MHz} \cdot \text{mm}^2 \cdot \mu\text{g}^{-1}$	2010	[31]
SAW	0.385	$155.800 \text{ KHz} \cdot \mu\text{g}^{-1}$	2016	[32]
SAW	0.122	$9.000 \text{ KHz} \cdot \mu\text{g}^{-1}$	2017	[33]
QCM	0.010	$1573.000 \text{ Hz} \cdot \mu\text{g}^{-1}$	2017	[34]
QCM	0.010	$7940.000 \text{ Hz} \cdot \mu\text{g}^{-1}$	2018	[35]
QCM	0.010	$1346.000 \text{ Hz} \cdot \mu\text{g}^{-1}$	2020	[36]
SAW sensor	44.164	$33151.915 \text{ MHz} \cdot \text{mm}^2 \cdot \mu\text{g}^{-1} (2.590 \times 10^6 \text{ GHz} \cdot \mu\text{g}^{-1})$	2021	This work

4. 结论

本文提出了一种融合极端纳米制造技术和LiNbO₃/SiO₂/SiC异质结构衬底材料体系（“slow-on-fast”）的策略以提高超高频SAW器件工作频率。实验获得了频率为5~44 GHz的超高频SAW器件，且具有较大的机电耦合系数。基于LiNbO₃/SiO₂/SiC异质结构的超高频SAW具有多种声学模态，采用有限元分析方法对这些高阶模态进行了理论仿真分析和识别确认。系统研究了这些波模态的质量灵敏度特性，发现超高频SAW的SH波具有最好的声波谐振特性，并且对质量负载非常敏感，表明其在高频传感应用中具有很大的潜力；模态11具有比其他模态更高的质量灵敏度，且显示出相对较低的TCF值。采用该模态获得了约 $33151.9 \text{ MHz} \cdot \text{mm}^2 \cdot \mu\text{g}^{-1}$ 的超高质量灵敏度，分别比传统QCM器件和频率为978 MHz的SAW器件高约 10^{11} 倍和4000倍。

致谢

本研究得到国家自然科学基金(52075162)、湖南省高新技术产业创新引领计划(2020GK2015、2021GK4014)、湖南省自然科学基金优秀青年基金(2021JJ20018)、广东省重点项目(2020B0101040002)、装备预研教育部联合基金(青年人才)、长沙市自然科学基金(kq2007026)、天津市企业科技专员项目(19JCTPJC56200)和英国工程物理与科学研究理事会(EPSRC EP/p01898/1)的资助。

Compliance with ethics guidelines

Jian Zhou, Dinghong Zhang, Yanghui Liu, Fengling Zhuo, Lirong Qian, Honglang Li, Yong-Qing Fu, and Huigao Duan declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.eng.2022.05.003>.

References

- [1] Collins DJ, Morahan B, Garcia-Bustos J, Doerig C, Plebanski M, Neild A. Two-dimensional single-cell patterning with one cell per well driven by surface acoustic waves. *Nat Commun* 2015;6:8686.
- [2] Hernández-Minguez A, Möller M, Breuer S, Pfüller C, Somaschini C, Lazić S, et al. Acoustically driven photon antibunching in nanowires. *Nano Lett* 2012; 12(1):252–8.
- [3] Hackett L, Miller M, Brimigion F, Dominguez D, Peake G, Tauke-Pedretti A, et al. Towards single-chip radiofrequency signal processing via acoustoelectric electron–phonon interactions. *Nat Commun* 2021;12:2769.
- [4] Tao R, McHale G, Reboud J, Cooper JM, Torun H, Luo JT, et al. Hierarchical nanotexturing enables acoustofluidics on slippery yet sticky, flexible surfaces. *Nano Lett* 2020;20(5):3263–70.
- [5] Wenzel SW, White RM. Analytic comparison of the sensitivities of bulk-wave, surface-wave, and flexural plate-wave ultrasonic gravimetric sensors. *Appl Phys Lett* 1989;54(20):1976–8.
- [6] Satzinger KJ, Zhong YP, Chang HS, Peairs GA, Bienfait A, Chou MH, et al. Quantum control of surface acoustic-wave phonons. *Nature* 2018; 563(7733): 661–5.
- [7] Munk D, Katzman M, Hen M, Priel M, Feldberg M, Sharabani T, et al. Surface acoustic wave photonic devices in silicon on insulator. *Nat Commun* 2019; 10(1):4214.
- [8] Chen Y, Shu Z, Zhang S, Zeng P, Liang H, Zheng M, et al. Sub-10 nm fabrication: methods and applications. *Int J Extrem Manuf* 2021;3(3):032002.
- [9] Büyükköse S, Vratzov B, Ataç D, van der Veen J, Santos PV, van der Wiel WG. Ultrahigh-frequency surface acoustic wave transducers on ZnO/SiO₂/Si using nanoimprint lithography. *Nanotechnology* 2012;23(31):315303.
- [10] Mohammad MA, Chen X, Xie QY, Liu B, Conway J, Tian H, et al. Super high frequency lithium niobate surface acoustic wave transducers up to 14 GHz. In: *Proceedings of 2015 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*; 2015 Dec 7–9; Washington, DC, USA. IEEE; 2015. p. 18.6.1–4.
- [11] Zheng J, Zhou J, Zeng P, Liu Y, Shen Y, Yao W, et al. 30 GHz surface acoustic wave transducers with extremely high mass sensitivity. *Appl Phys Lett* 2020; 116(12):123502.
- [12] Fu S, Wang W, Qian L, Li Q, Lu Z, Shen J, et al. High-frequency surface acoustic wave devices based on ZnO/SiC layered structure. *IEEE Electron Device Lett* 2019;40(1):103–6.
- [13] Hashimoto K, Sato S, Teshigahara A, Nakamura T, Kano K. High-performance surface acoustic wave resonators in the 1 to 3 GHz range using a ScAlN/6H-SiC structure. *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control* 2013;60(3):637–42.
- [14] Luo JT, Zeng F, Pan F, Li HF, Niu JB, Jia R, et al. Filtering performance improvement in V-doped ZnO/diamond surface acoustic wave filters. *Appl Surf Sci* 2010;256(10):3081–5.
- [15] Rodriguez-Madrid JG, Iriarte GF, Pedros J, Williams OA, Brink D, Calle F. Super-high-frequency SAW resonators on AlN/Diamond. *IEEE Electron Device Lett* 2012;33(4):495–7.
- [16] Zhou C, Yang Y, Jin H, Feng B, Dong S, Luo J, et al. Surface acoustic wave resonators based on (002) AlN/Pt/diamond/silicon layered structure. *Thin Solid Films* 2013;548:425–8.
- [17] Wang L, Chen S, Zhang J, Zhou J, Yang C, Chen Y, et al. High performance 33.7 GHz surface acoustic wave nanotransducers based on AlScN/diamond/Si layered structures. *Appl Phys Lett* 2018;113(9):093503.
- [18] Wang L, Chen S, Zhang J, Xiao D, Han K, Ning X, et al. Enhanced performance of 17.7 GHz SAW devices based on AlN/diamond/Si layered structure with embedded nanotransducer. *Appl Phys Lett* 2017;111(25):253502.
- [19] Zhou H, Zhang S, Li Z, Huang K, Zheng P, Wu J, et al. Surface wave and lamb wave acoustic devices on heterogenous substrate for 5G front-ends. In: *Proceedings of 2020 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*; 2020 Dec 12–18; FranciscoSan, CA, USA. IEEE; 2020. p. 17.6.1–4.
- [20] Shen J, Fu S, Su R, Xu H, Lu Z, Xu Z, et al. High-performance surface acoustic wave devices using LiNbO₃/SiO₂/SiC multilayered substrates. *IEEE Trans Microw Theory Tech* 2021;69(8):3693–705.
- [21] Kamitani K, Grimsditch M, Nipko JC, Loong CK, Okada M, Kimura I. The elastic constants of silicon carbide: a Brillouin-scattering study of 4H and 6H SiC single crystals. *J Appl Phys* 1997;82(6):3152–4.
- [22] Cimalla V, Pezoldt J, Ambacher O. Group III nitride and SiC based MEMS and NEMS: materials properties, technology and applications. *J Phys D Appl Phys* 2007;40(20):6386.
- [23] Chen Z, Zhou J, Tang H, Liu Y, Shen Y, Yin X, et al. Ultrahigh-frequency surface acoustic wave sensors with giant mass-loading effects on electrodes. *ACS Sens* 2020;5(6):1657–64.
- [24] Solal M, Lardat R, Plessky VP, Makkonen T, Salomaa MM. Existence of harmonic metal thickness mode propagation for longitudinal leaky waves. In: *Proceedings of 2004 IEEE Ultrasonics Symposium*; 2004 Aug 23–27; Montreal, QC, Canada. IEEE; 2004. p. 1207–12.
- [25] Ma J, Qian L, Wang Y, Li C, Yang B, Tian Y, et al. Theoretical investigation of longitudinal surface acoustic waves in rotated Y-cut LiNbO₃/SiC heterostructures. In: *Proceedings of 2020 15th Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves and Device Applications (SPAWDA)*; 2021 Apr 16–19; Zhengzhou, China. IEEE; 2021. p. 570–4.
- [26] Kaletta UC, Wenger C. FEM simulation of Rayleigh waves for CMOS compatible SAW devices based on AlN/SiO₂/Si (100). *Ultrasonics* 2014;54(1): 291–5.
- [27] Takagaki Y, Santos PV, Wiebicke E, Brandt O, Schönherr HP, Ploog KH. Guided propagation of surface acoustic waves in AlN and GaN films grown on 4H-SiC (0001) substrates. *Phys Rev B* 2002;66(15):155439.
- [28] Feld DA, Parker R, Ruby R, Bradley P, Dong S. After 60 years: a new formula for computing quality factor is warranted. In: *Proceedings of 2008 IEEE Ultrasonics Symposium*; 2008 Nov 2–5; Beijing, China. IEEE; 2008. p.431–6.
- [29] Thomas S, Cole M, Villa-López FH, Gardner JW. High frequency surface acoustic wave resonator-based sensor for particulate matter detection. *Sens Actuators A* 2016;244:138–45.
- [30] Kadota M, Yoneda T, Fujimoto K, Nakao T, Takata E. Resonator filters using shear horizontal-type leaky surface acoustic wave consisting of heavy-metal electrode and quartz substrate. *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control* 2004;51(2):202–10.
- [31] Ou HC, Zaghoul M. Synchronous one-pole LiNbO₃ surface acoustic wave mass sensors. *IEEE Electron Device Lett* 2010;31(5):518–20.
- [32] Ten ST, Hashim U, Gopinath SCB, Liu WW, Foo KL, Sam ST, et al. Highly sensitive Escherichia coli shear horizontal surface acoustic wave biosensor with silicon dioxide nanostructures. *Biosens Bioelectron* 2017;93:146–54.
- [33] Kuo FY, Wei HL, Yao DJ. PM2.5 detection by cyclone separator combined with SH-SAW sensor. In: *Proceedings of 2017 IEEE 12th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS)*; 2017 Apr 9–12; Los Angeles, CA, USA. IEEE; 2017. p. 248–51.
- [34] Ma W, Tang S, Wei Y, Xie G. Simple biosensing method to detect DMMP based on QCM transducer and acetylcholine esterase sensitive film. *Micro Nano Lett* 2017;12(2):113–6.
- [35] Huang XH, Pan W, Hu JG, Bai QS. The exploration and confirmation of the maximum mass sensitivity of quartz crystal microbalance. *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control* 2018;65(10):1888–92.
- [36] Pan W, Huang X, Chen Q. Uniformization of mass sensitivity distribution of silver electrode QCM. *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control* 2020; 67(9):1953–6.