文章编号:1004-2474(2025)02-0203-06 **DOI**:10.11977/j.issn.1004-2474.2025.02.001

基于二氧化钒的可重构声表面波谐振器

宫 傲[1],何 伟[1,3],郭乙龙[1],白 焱[1],黄秋钦[3],黄 文[1,2]
(1. 合肥工业大学 微电子学院,安徽 合肥 230601;2. 复旦大学 义乌研究院,浙江 义乌 322000;
3. 深圳信息通信研究院,广东 深圳 518048)

摘 要:仿真设计了一款新颖的可重构声表面波(SAW)谐振器。该设计将相变材料二氧化钒(VO_2)与谐振器集成在同一芯片上,实现了紧凑的可重构谐振器。利用VO_2的相变特性,以VO_2替代SAW谐振器的部分电极。通过温度控制SAW谐振器中VO_2电极的工作状态,实现SAW谐振器频率在两种不同状态之间的调谐。设计的电极宽度为1.15 μm(理论波长λ为4.6 μm)的可重构谐振器,仿真结果显示其频率可在472 MHz和774 MHz两种状态下进行调谐,机电耦合系数分别为7.1%和5.6%,同时调谐范围高达302 MHz。为使设计的可重构谐振器具有更优的性能,对可重构谐振器的电极厚度进行参数化仿真,当电极厚度为0.12λ时,SAW谐振器的机电耦合系数最高,为后续可重构SAW滤波器提供了更大的带宽。同时还提出了基于VO_2的可重构SAW谐振器的工艺流程思路,这为设计应用于实际提供了指导。

关键词:声表面波谐振器;二氧化钒;频率调谐;电极厚度;机电耦合系数
中图分类号:TN65;TN75 **文献标识码**:A

Tunable Surface Acoustic Wave Resonators Based on Vanadium Dioxide

GONG Ao[1], HE Wei[1,3], GUO Yilong[1], BAI Yan[1], HUANG Qiuqin[3], HUANG Wen[1,2]
(1. School of Microelectronics, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China;
2. Yiwu Research Institute, Fudan University, Yiwu 322000, China;
3. Shenzhen Academy of Information and Communication Technology, Shenzhen 518048, China)

Abstract: A novel reconfigurable surface acoustic wave (SAW) resonator has been designed through simulation. The design integrates vanadium dioxide (VO_2), a phase-change material, with the resonator on a single chip to achieve a compact reconfigurable resonator. By utilizing the phase-change properties of VO_2, portions of the SAW resonator's electrodes are replaced with VO_2. The operating state of these VO_2 electrodes is thermally controlled, enabling frequency tuning between two different states. With an electrode width of 1.15 μm (corresponding to a theoretical wavelength λ of 4.6 μm), simulation results demonstrate that the reconfigurable resonator's frequency can be tuned to 472 MHz and 774 MHz, exhibiting electromechanical coupling coefficients of 7.1% and 5.6%, respectively, and the tuning range of the resonator peaks at 302 MHz. Parametric simulations of electrode thickness reveal that the SAW resonator attains its highest electromechanical coupling coefficient at 0.12λ, which facilitates broader bandwidth for subsequent reconfigurable SAW filters. Additionally, we propose a fabrication process for VO_2-based reconfigurable SAW resonators, offering practical design guidance.

Key words: surface acoustic wave resonator; vanadium dioxide; frequency tuning; electrode thickness; electromechanical coupling coefficient

0 引言

无线通信的快速发展使对有限频谱资源的竞争加剧。通信系统逐渐向宽带化和高速率发展,其设计趋于高集成度、小型化与功能一体化。作为射频前端的关键部件,声表面波器件的高集成度和多功能化一直是备受关注的课题。传统的射频前端模块由众多声表面波谐振器与滤波器组成,其中每个滤波器都用于处理特定的频带,若每个频带都使用单独的滤波

收稿日期:2024-11-14
基金项目:复旦大学义乌研究院新材料新器件新装备高精尖缺制造中心预研项目(YSXM03020230014)
作者简介:宫傲(1998-),男,安徽省淮南市人,硕士生。

器，则会增加射频前端模块的尺寸与成本，不利于射频前端的高集成度与多功能化的发展趋势。因此，为了符合未来射频前端发展趋势，有必要研究可以工作在不同频带的可重构谐振器和滤波器。

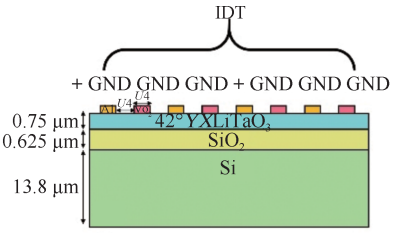
文献[1]提出通过使用PIN二极管控制射频信号路径实现带通到带阻的可重构滤波器设计。虽然该设计实现了单个滤波器的多功能化特性，但是无法满足小尺寸的需求。文献[2-4]是利用电容或电感对声表面波谐振器的谐振频率和反谐振频率的影响，通过对可变电容二极管与SAW谐振器的集成来实现可调谐。这种可调谐声表面波谐振器实现了多功能化，但是在射频前端模块的有限空间内，电容的增加无法实现小型化。文献[5-8]报道了利用二氧化钒（VO_2）的开关特性，将VO_2开关与某些可调谐电极集成，通过控制VO_2电极的通断实现谐振器频率的调谐。此设计实现了小型化与多功能的特性，但是调谐范围过小，无法满足拥挤的频谱。

本文提出了一种新颖的可重构声表面波谐振器设计，利用VO_2在一定温度（相变温度68 ℃）下具有的相变特性，通过温度控制VO_2电极的工作状态，实现了SAW谐振器的频率大范围可调谐功能。虽然可重构谐振器中VO_2温控单元的增加带来了额外损耗，但是实现了单个谐振器在不同频段工作的功能，减少了射频前端模块对滤波器的用量，实现了射频前端的高集成度和滤波器的多功能化。

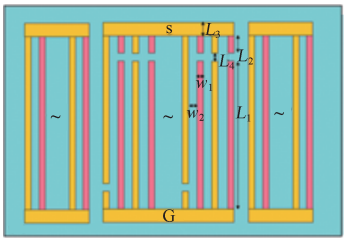
1 可重构谐振器设计

传统SAW谐振器的谐振频率主要取决于叉指换能器（IDT）之间的间距，即声表面波波长λ。SAW谐振器的叉指电极一般为金属材料，通过光刻图案化与薄膜沉积技术在压电材料上进行沉积。一旦确定沉积的金属，则谐振器的工作频率将难以改变[9]，虽然在同一压电材料上可以集成多个不同频率的谐振器，但是难以实现单个谐振器的不同功能利用。本文介绍了一种新颖的频率调谐方式，其思路来源于VO_2材料在一定温度下的相变特性[10]（低于相变温度，VO_2表现为绝缘体特性；高于相变温度，VO_2表现为导体特性）以及SAW谐振器的工作原理。通过温度控制谐振器不同电极的工作状态，实现单个谐振器的可调谐功能。

图1为所提出的可重构谐振器的截面图和俯视图，它由$LiTaO_3/SiO_2/Si$多层堆叠衬底（POI）、铝电极和二氧化钒电极组成，其中POI衬底因存在温度补偿层而避免了相变温度对器件本身频率偏移的影响，同时POI衬底能将声能约束在压电层中，提高了谐振器整体的品质因数（Q）值，并达到改善SAW谐振器性能的作用[11-13]。电极结构未采用传统的交指结构，而是采用1个铝（Al）电极接收射频信号和3个电极接地（电极材料依次为VO_2、Al和VO_2）的周期性结构，虽然此设计会减小可重构谐振器的机电耦合系数，但是可以通过温度控制调谐电极VO_2的工作状态，进而改变工作状态下电极的间距，实现了单个谐振器的可调谐功能。根据VO_2的相变特性，当调谐电极处于工作状态时，可重构谐振器的电极全部工作，谐振器工作在一个相对较高的工作频率，且谐振频率取决于接收射频信号的Al电极与其相邻接地信号的VO_2电极之间的距离。当调谐电极处于非工作状态时，谐振器工作在一个相对较低的工作频率，此时Al电极处于工作状态，VO_2电极表现为绝缘体状态，谐振器的谐振频率取决于相邻的Al电极之间的距离。可重构谐振器的关键参数如表1所示。



（a）可重构谐振器截面图



（b）可重构谐振器俯视图

图1 可重构谐振器结构示意图

表1 可重构谐振器的关键参数

参数	数值
波长λ/μm	4.6
孔径长度L_1/μm	184
假指长度L_2/μm	4.6
汇流条宽度L_3/μm	5.75
间隙长度L_4/μm	1.15
电极宽度w_1/μm	1.15
金属化率	0.5

图 2 为可重构谐振器的潜在制造加工步骤。通过直流磁控溅射在 POI 衬底上生长高相变比的 VO_2 薄膜[14-17](见图 2(a)),然后通过光刻图案化和 RIE 蚀刻技术在衬底上实现 VO_2 电极制备(见图 2(b)、(c)),再通过负性套刻、电子束沉积金属 Al 薄膜和 lift-off 工艺实现铝电极制备(见图 2(d)-(f))。

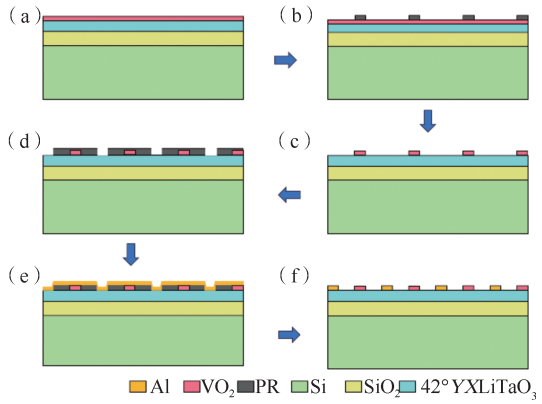


图 2　可重构谐振器的工艺流程图

2　仿真验证与讨论

为了验证设计的可重构谐振器的调谐特性,使用 COMSOL 软件对所提出的结构进行建模与有限元仿真。COMSOL 切片模型如图 3 所示。使用 COMSOL 软件中的传导损耗来调节二氧化钒的电导率,进而展现出二氧化钒的相变特性。

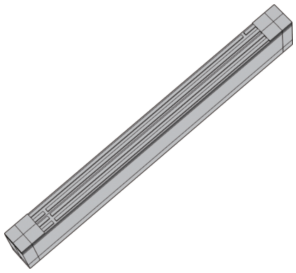


图 3　可重构 SAW 谐振器 COMSOL 切片模型

图 4 为可重构 SAW 谐振器的仿真结果。由图可见,当 VO_2 电极处于工作状态时,谐振器的谐振频率(f_r)和反谐振频率(f_a)分别为 774 MHz 和 792 MHz,有效机电耦合系数为 5.6%;当 VO_2 电极处于非工作状态时,谐振器的谐振频率和反谐振频率分别为 472 MHz 和 486 MHz,有效机电耦合系数为 7.1%。通过温度控制 VO_2 电极的工作状态,可重构 SAW 谐振器的调谐范围为 302 MHz。同时 SAW 谐振器的谐振频率取决于 IDT 电极的金属宽度和间隙,因此,通过设计尺寸更小的电极和间隙可实现更高的调谐范围。

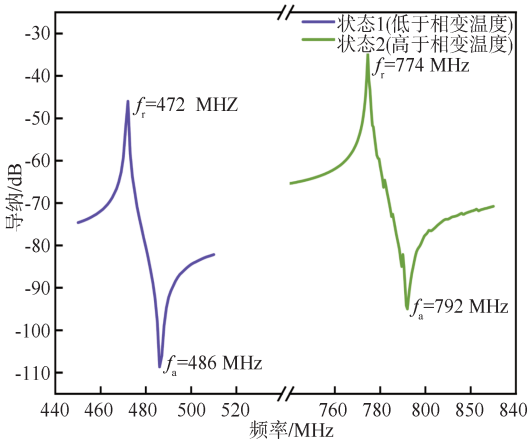


图 4　可重构 SAW 谐振器仿真结果

尽管所设计的谐振器实现了可调谐功能,但其机电耦合系数有所下降。为了分析其原因,将所设计的可重构谐振器与同尺寸的传统结构的 SAW 谐振器进行了仿真结果的对比分析。

当可重构谐振器的调谐电极处于工作状态时,所设计的可重构谐振器的谐振频率与传统结构谐振器相同(见图 5),但是反谐振频率低于传统结构谐振器,其原因为施加的电边界条件使声表面波反射增强,压电效应减弱,机电耦合系数降低,反谐振频率向低频偏移。通过采用高机电耦合系数的铌酸锂压电衬底可改善此不足。

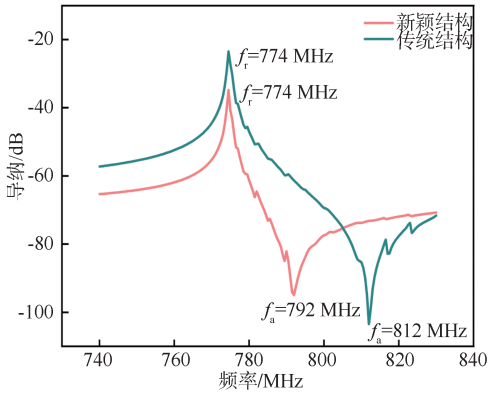


图 5　可重构谐振器的调谐电极处于工作状态和传统结构谐振器仿真对比图

当可重构谐振器的调谐电极处于非工作状态时,VO_2 电极表现出绝缘体特性,虽然可重构谐振器可在相对较低的频率下工作,但是 IDT 的金属化率降低,因此设计了与之相匹配的金属化率结构的传

统结构谐振器，其中 VO_2 电极部分不设置指条。由图 6 可见，两种结构的机电耦合系数基本相同，但与传统金属化率为 0.5 的谐振器相比，所设计的谐振器的金属化率减小导致其机电耦合系数相对较小。

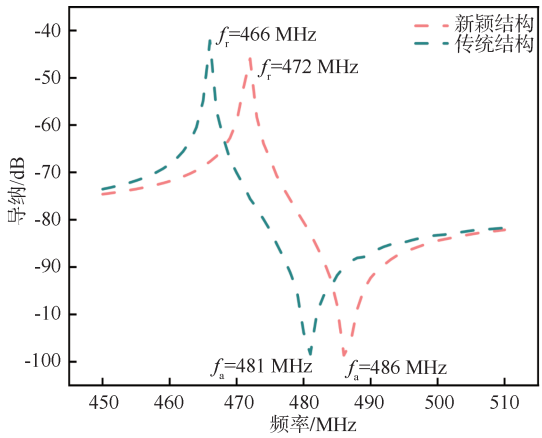


图 6 可重构谐振器的调谐电极处于非工作状态和传统结构谐振器仿真对比图

由于所设计的可重构声表面波谐振器在不同状态下 IDT 的间距不同，导致其对应的理论声表面波波长不同。当电极尺寸和间距相同时，SAW 谐振器的机电耦合系数与电极厚度相关。为使设计的 SAW 谐振器具有最佳性能，对电极的厚度进行了优化。图 7、8 分别为可重构谐振器的调谐电极处于工作状态时不同电极厚度的仿真结果。由图可见，谐振器的谐振频率和反谐振频率随着电极厚度的增加而减小，机电耦合系数随着电极厚度的增加出现先增大后减小的趋势，当电极厚度为 0.12λ 时，机电耦合系数接近最大，其中 λ 以可重构谐振器的较高频率所对应的理论波长作为依据。

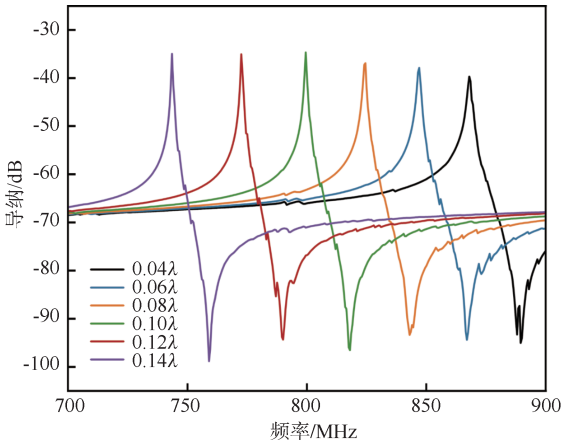


图 7 调谐电极处于工作状态时不同电极厚度的仿真结果

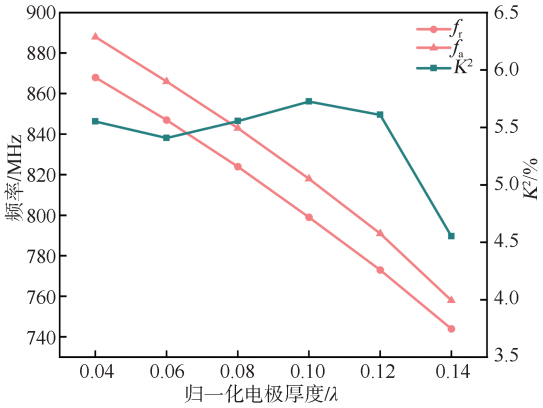


图 8 调谐电极处于工作状态时不同电极厚度的机电耦合系数曲线

图 9、10 分别为可重构谐振器的调谐电极处于非工作状态时不同电极厚度的仿真结果。由图可见，谐振器的谐振频率和反谐振频率随着电极厚度的增加而减小，机电耦合系数随着电极厚度的增加出现先减小后增大再减小的趋势，当电极厚度为 0.12λ 时，机电耦合系数最大。

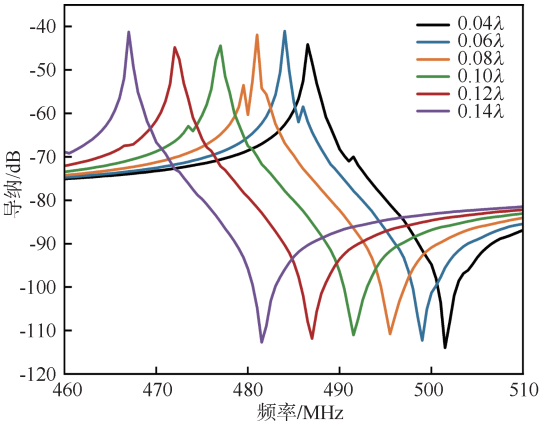


图 9 调谐电极处于非工作状态时不同电极厚度的仿真结果

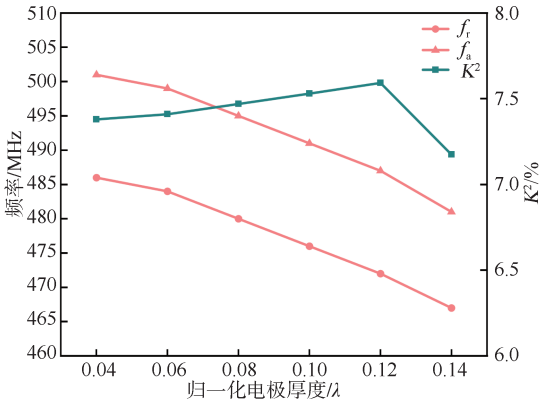


图 10 调谐电极处于非工作状态时不同电极厚度的机电耦合系数曲线

综上所述,当电极厚度为0.12λ时,所设计的可重构谐振器在两个状态下机电耦合系数都接近最大。

电极Al是低弹性材料,对振动有很大的阻尼作用,质量负载效应较为突出,导致传统Al电极谐振器的谐振频率随着电极厚度的增加而偏低。由于可重构谐振器VO_2电极和Al电极在制备过程中,其膜厚可能存在较大差异,故而分析了膜厚存在差异时谐振器的工作性能,如图11、12所示。由图可见,当VO_2电极处于非工作状态时,VO_2电极厚度低于或高于Al电极厚度40 nm时,膜厚的差异对谐振器的影响很小;当VO_2电极处于工作状态时,膜厚的差异对谐振器的影响很大。其原因是两种电极因厚度差异导致声表面波的波速不同,进而使波阵面畸变,影响器件性能。

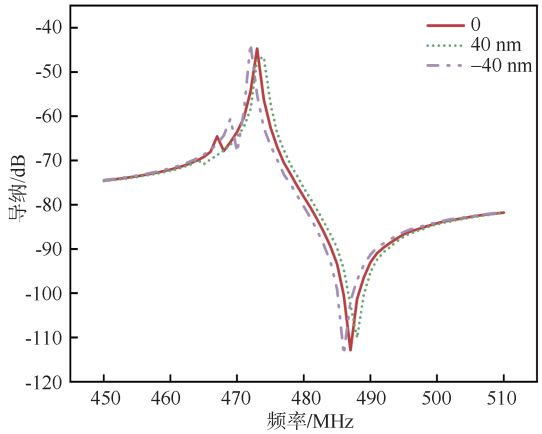


图11　调谐电极处于非工作状态时,VO_2电极和Al电极厚度差异仿真结果

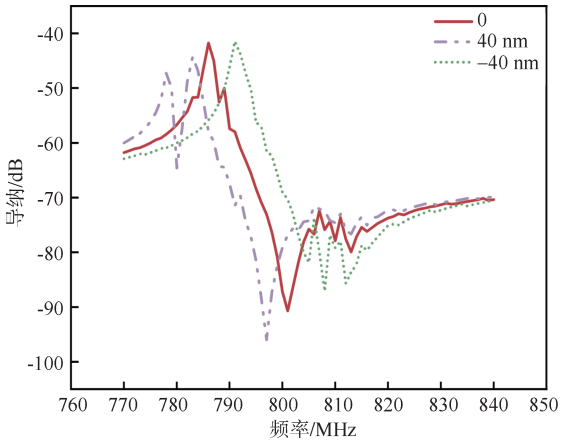


图12　调谐电极处于工作状态时,VO_2电极和Al电极厚度差异仿真结果

3　结束语

基于相变材料VO_2与SAW谐振器的工作原理,提出了一种新型的可重构SAW谐振器结构。通常传统的可重构谐振器在电极宽度为1.15 μm时,其频率调谐范围为20～60 MHz,而该设计在相同电极宽度下实现了302 MHz的频率调谐,因此,该结构在调谐范围方面具有显著优势。同时谐振器可以单片集成,为未来RF前端的小型化和多功能性提供了新的解决方案。

参考文献:

[1] CHEN Ruixuan, ZHANG Qingyuan, ZHOU Lingyun, et al. Reconfigurable dual-band bandpass-to-bandstop filter using SAW resonators and lumped elements [C]//Nanjing, China: 2021 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS),2021:1-3.

[2] KONNO A, HIRANO H, INABA M, et al. Tunable surface acoustic wave filter using integrated micro-electro-mechanical-system based varactors made of electroplated gold [J]. Japanese Journal of Applied Physics,2013,52(7S):07HD13.

[3] HASHIMOTO K Y, KIMURA T, MATSUMURA T, et al. Moving tunable filters forward: a "Heterointegration" research project for tunable filters combining MEMS and RF SAW/BAW technologies[J]. IEEE Microwave Magazine,2015,16(7):89-97.

[4] KOMATSU T, HASHIMOTO K Y, OMORI T, et al. Tunable radio-frequency filters using acoustic wave resonators and variable capacitors[J]. Japanese Journal of Applied Physics,2010,49(7S):07HD24.

[5] FOULADI AZARNAMINY A, MANSOUR R R. Reconfigurable SAW resonators and tunable filters using monolithically integrated VO_2 switches[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory Techniques,2023,71(1):181-192.

[6] AZARNAMINY A F, SULEIMAN A O, CHAKER M, et al. A reconfigurable SAW resonator using monolithically integrated switches [C]//Denver, CO, USA: 2022 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium-IMS 2022,2022:806-808.

[7] AZARNAMINY A F, JIANG Junwen, MANSOUR R R. Switched dual-band SAW filter using vanadium oxide switches [C]//Atlanta, GA, USA: 2021 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), 2021:677-680.

[8] AZARNAMINY A F, MANSOUR R R. Switched dual-band SAW filters using hybrid and monolithically integrated vanadium oxide switches [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2021,70(1):876-885.

[9] 潘峰. 声表面波材料与器件[M]. 北京:科学出版社, 2012.

[10] MORIN F J. Oxides which show a metal-to-insulator transition at the neel temperature[J]. Physical Review Letters,1959,3(1):34-36.

[11] TAKAMINE Y, TAKAI T, IWAMOTO H, et al. A novel 3.5 GHz low-loss bandpass filter using I. H. P. SAW resonators[C]//Kyoto, Japan: 2018 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC),2018:1342-1344.

[12] BUTAUD E, TAVEL B, BALLANDRAS S, et al. Smart Cut™ Piezo On Insulator (POI) substrates for high performances SAW components[C]//Las Vegas, NV, USA: 2020 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS),2020:1-4.

[13] TAKAI T, IWAMOTO H, TAKAMINE Y, et al. High-performance SAW resonator on new multilayered substrate using $LiTaO_3$ crystal [J]. IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control,2017,64(9):1382-1389.

[14] FULS E N, HENSLER D H, ROSS A R. Reactively sputtered vanadium dioxide thin films [J]. Applied Physics Letters,1967,10(7):199-201.

[15] JIANG Meng, CAO Xun, BAO Shanhu, et al. Regulation of the phase transition temperature of VO_2 thin films deposited by reactive magnetron sputtering without doping [J]. Thin Solid Films, 2014, 562: 314-318.

[16] YU Qian, LI Wenwu, LIANG Jiran, et al. Oxygen pressure manipulations on the metal - insulator transition characteristics of highly (0 1 1)-oriented vanadium dioxide films grown by magnetron sputtering [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2013, 46 (5):055310.

[17] VU T D, CHEN Zhang, ZENG Xianting, et al. Physical vapour deposition of vanadium dioxide for thermochromic smart window applications[J]. Journal of Materials Chemistry C,2019,7(8):2121-2145.