

声表面波滤波器温度敏感性仿真研究

王吉芳¹, 郑露², 陈平静¹, 潘虹芝¹, 杜雪松¹, 董加和¹, 陆川¹, 陈正林^{1,3},
吴浩东⁴, 马晋毅^{1,3}

(1. 中国电子科技集团公司第二十六研究所, 重庆 400060;

2. 重庆医药高等专科学校, 重庆 401131; 3. 模拟集成电路国家重点实验室, 重庆 400060;

4. 南京大学声学科学与工程系教育部近代声学重点实验室, 江苏南京 210093)

摘要:针对不同温度场情况下任意复杂膜系结构和电路拓扑结构的声表面波(SAW)滤波器的温度敏感性精确计算问题, 首先将温度场以热应力、热应变的方式耦合声/电本征方程并考虑封装模型的电磁因素, 再结合分层级联算法和全波仿真技术, 计算任意复杂膜系结构和电路拓扑结构的 SAW 滤波器的温度敏感性, 实现不同温度作用下 SAW 滤波器频率响应曲线、频率温度系数(TCF)值、损耗、带宽及带外抑制等性能的综合分析。通过 41°Y-X LiNbO₃/SiO₂/Si_{poly}/Si(111)复合衬底 SAW 滤波器的优化设计与研制, 其设计优化结果与实验结果吻合较好, 验证了该方法的有效性和可行性。

关键词:温度敏感性; 声表面波(SAW)滤波器; 分层级联; 全波仿真

中图分类号: TN65 **文献标识码:** A

Research on Temperature Sensitivity of Surface Acoustic Wave Filter

WANG Jifang¹, ZHENG Lu², CHEN Pingjing¹, PAN Hongzhi¹, DU Xuesong¹,
DONG Jiahe¹, LU Chuan¹, CHEN Zhenglin^{1,3}, WU Haodong⁴, MA Jinyi^{1,3}

(1. The 26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China;

2. Chongqing Medical and Pharmaceutical College, Chongqing 401131, China;

3. Science and Technology on Analog Integrated Circuit Laboratory, Chongqing 400060, China;

4. Key Laboratory of Modern Acoustics, Ministry of Education, Department of Acoustic Science and Engineering, School of Physics, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: This study investigates the accurate temperature sensitivity calculation of surface acoustic wave (SAW) filters with arbitrary complex membrane structures and circuit topologies at different temperatures. The temperature field is coupled with the acoustic/electrical equation in the form of thermal stress and strain, considering the electromagnetic factor of the package model. Combining the hierarchical cascade algorithm and full-wave simulation technology, the temperature sensitivity of SAW filters in this specific context is calculated. In addition, the frequency response characteristic, TCF value, insertion loss, bandwidth and rejection of the SAW filter under different temperatures are comprehensively analyzed. Based on the design of a SAW filter with 41°Y-X LiNbO₃/SiO₂/Si_{poly}/Si(111), the results are in good agreement with the experimental results, and the effectiveness and feasibility of the proposed method are verified.

Key words: temperature sensitivity; SAW filters; hierarchical cascade; full-wave simulation

0 引言

声表面波(SAW)器件具有低插损、高矩形度、小体积及低成本等优良特性, 被广泛应用于雷达、通信和电子对抗等领域^[1-2]。随着射频通信技术的

快速发展, 对 SAW 器件的温度敏感性、频率温度系数(TCF)值、损耗、带宽和带外抑制等指标提出了越来越高的要求^[3]。在实际应用中, SAW 器件经常处于不同的温度环境中, 温度场的变化使 SAW

收稿日期: 2024-03-17

基金项目: 重庆市教委科学技术研究项目(KJQN202302803)

作者简介: 王吉芳(1990-), 女, 重庆市人, 高级工程师。通信作者: 郑露(1984-), 女, 重庆市人, 硕士, 讲师。

器件的工作频率、损耗、带宽及带外抑制等指标发生变化^[4-5]。无论是设计 SAW 器件还是改善其温度敏感性,均需要优化并抑制 SAW 器件对温度的敏感性,因此迫切需要发展能快速精准地分析不同温度场作用下 SAW 器件综合性能的计算模型。

目前已报道了较多的计算方法研究声表面波的温度敏感特性^[6-9]。早期研究阶段主要关注 SAW 器件中晶体切割和传播方向对温度的敏感性^[10-11]。Campbell 和 Jones^[12]提出一种通用方法,并考虑了电极质量负载。Yong 等^[13-14]通过建立压电拉格朗日方程,研究了石英的频率-温度行为,使用 SAW 结构的二维周期有限元法模型和三维有限元模型实现该方程。Pastureaud 等^[9]开发了有限元分析和边界积分法,并假设格林函数和谐波导纳是温度和无限周期结构的函数。Garcia 等^[15]基于周期结构的二维有限元分析,研究了有限元分析/边界元法 (FEA/BEM) 与材料系数扰动相结合。王为标等^[16]扩展了 FEM/BEM 方法,将具有温度依赖性的电极 Lamé 常数包括在内,但不包括质量载荷,数值结果与实验结果一致。虽然这些工作可以分析 SAW 器件的温度-频率特性,并通过分析结果给 SAW 滤波器设计和研制预留设计空间,但无法分析评估 SAW 滤波器频率响应曲线、TCF 值、损耗、带宽及带外抑制等综合性能。

本文从数学上严格分析推导了温度场作用下 SAW 器件温度敏感性的多物理场耦合有限元模型。通过热应力、热应变方式将温度场的作用耦合到压电方程中,并将弹性常数、压电应力常数、介电常数、密度以及电极的拉梅常数与温度之间的关系均考虑到有限元模型中,建立了用于精准分析 SAW 器件温度敏感性的有限元模型。结合分层级联算法,获得 SAW 器件在不同温度作用下的频率响应曲线、TCF 值、损耗、带宽及带外抑制等性能指标。最后通过 41°Y-X LiNbO₃/SiO₂/Si_{poly}/Si(111) 复合衬底,设计与研制了 SAW 滤波器。经验证,设计结果与实验结果吻合,验证了该方法的有效性和可行性。这为不同温度场作用下 SAW 器件综合性能评估提供了一定的理论指导和方法。

1 压电器件温度敏感模型

1.1 基础理论

压电体是各向异性的电介质,在外力作用下发

生形变时,物质结构变化引起介质电极化,称为压电效应。压电效应反映了力学量与电学量间的相互耦合作用。除弹性应变场和应力场外,还存在电场和电位移场,且其相互作用。本文将应变和电场强度作为自变量,根据胡克定律和电学关系得到应力和电位移的本构方程,并以四阶张量的形式^[17]表示为

$$T_{ij} = c_{ijkl} S_{kl} - e_{kij} E_k \quad (1)$$

$$D_i = e_{kij} S_{kl} + \epsilon_{ik} E_k \quad (2)$$

在温差作用下,压电体的热膨胀或收缩导致结构发生变形,图 1 为 SAW 器件单指结构热膨胀或收缩产生的变形示意图。如在高温作用下,金属电极和压电介质发生热膨胀效应,从室温状态 A1 膨胀为 A2 状态,应变 S 与位移 u 的关系^[13]为

$$s_{ij} = \frac{1}{2}(\alpha_{kj} u_{k,i} + \alpha_{ki} u_{k,j}) \quad (3)$$

式中 α 为热膨胀温度系数。

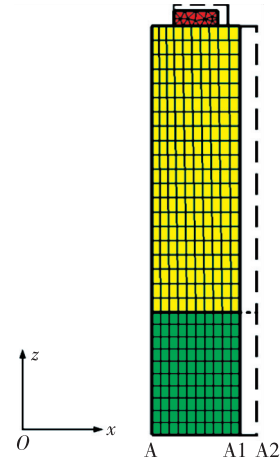


图 1 单指结构热膨胀变形示意图

压电体在不同的温度情况下,其材料性能参数与温度的关系^[14,17]为

$$c_{ijkl}^{\theta} = c_{ijkl} + c_{ijkl}^{(1)}\theta + c_{ijkl}^{(2)}\theta^2 + c_{ijkl}^{(3)}\theta^3 \quad (4)$$

$$e_{ijk}^{\theta} = e_{ijk} + e_{ijk}^{(1)}\theta + e_{ijk}^{(2)}\theta^2 + e_{ijk}^{(3)}\theta^3 \quad (5)$$

$$\epsilon_{ik}^{\theta} = \epsilon_{ik} + \epsilon_{ik}^{(1)}\theta + \epsilon_{ik}^{(2)}\theta^2 + \epsilon_{ik}^{(3)}\theta^3 \quad (6)$$

$$\alpha_{ik}^{\theta} = \alpha_{ik} + \alpha_{ik}^{(1)}\theta + \alpha_{ik}^{(2)}\theta^2 + \alpha_{ik}^{(3)}\theta^3 \quad (7)$$

$$\rho^{\theta} = \rho + \rho^{(1)}\theta + \rho^{(2)}\theta^2 + \rho^{(3)}\theta^3 \quad (8)$$

$$r^{\theta} = r + r^{(1)}\theta + r^{(2)}\theta^2 + r^{(3)}\theta^3 \quad (9)$$

$$g^{\theta} = g + g^{(1)}\theta + g^{(2)}\theta^2 + g^{(3)}\theta^3 \quad (10)$$

$$\theta = T - T_0 \quad (11)$$

式中: $c_{ijkl}^{(n)}$ 为弹性常数的 n 阶系数; $e_{ijk}^{(n)}$ 为压电应力常数的 n 阶系数; $\epsilon_{ik}^{(n)}$ 为介电常数的 n 阶系数; δ_{ik} 为 Kronecker 算子; $\alpha_{ik}^{(n)}$ 为 n 阶热膨胀温度系数; $\rho^{(n)}$ 为

密度的 n 阶系数; $r^{(n)}$ 和 $g^{(n)}$ 分别为金属电极第一和第二拉梅常数的 n 阶系数; T_0 为参考温度 ($T_0 = 25\text{ }^\circ\text{C}$); T 为压电体所处的温度环境; θ 为温差。

如果外力为 0, 根据牛顿第二定律、电学理论及热力学理论, 考虑热应力作用的压电体平衡方程^[18]可表示为

$$\nabla' T = \rho \ddot{u} \quad (12)$$

$$\nabla_d D = 0 \quad (13)$$

算子分别定义为

$$\nabla = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial x_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial x_3} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial x_3} & \frac{\partial}{\partial x_2} \\ \frac{\partial}{\partial x_3} & 0 & \frac{\partial}{\partial x_1} \\ \frac{\partial}{\partial x_2} & \frac{\partial}{\partial x_1} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\nabla_d = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x_1} & \frac{\partial}{\partial x_2} & \frac{\partial}{\partial x_3} \end{bmatrix} \quad (15)$$

通过对式(12)、(13)求解, 得到能够表征图 1 所示单指结构在不同温度作用下的系统矩阵。该系统矩阵包含了热应力产生的热应变, 以及不同温度下的材料参数变化。

1.2 分层级联理论

有限长 SAW 器件结构由具有周期性或非周期性的单指单元构成, 根据级联单元左右边界力学量和电学量的连续性原理, 将两个或两个以上的单指单元联成完整的 SAW 结构, 每次级联均以 2^n 的指数形式增加^[19]。

通过求解式(12)-(13)得到能够表征耦合温度场的分层级联单元(见图 1)的系统矩阵为

$$\begin{bmatrix} K_{LL} & K_{LI} & K_{LR} & K_{LV} \\ K_{IL} & K_{II} & K_{IR} & K_{IV} \\ K_{RL} & K_{RI} & K_{RR} & K_{RV} \\ K_{VL} & K_{VI} & K_{VR} & K_{VV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_L \\ X_I \\ X_R \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_A \\ R_I \\ R_B \\ -q \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中: X_L, X_I, X_R 分别为单指结构有限元模型的左边界自由度、内部自由度、右边界自由度(分别包括位移和电势自由度); v 为电极表面电势自由度; q 为电极表面电荷量。在无外力作用的情况下, $R_A = 0, R_I = 0, R_B = 0$, 整理式(16)^[20]可得:

$$\begin{bmatrix} A_{LL} & A_{LI} & 0 & A_{LV} \\ A_{IL} & A_{II} & A_{IR} & A_{IV} \\ 0 & A_{RI} & A_{RR} & A_{RV} \\ A_{VL} & A_{VI} & A_{VR} & A_{VV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_L \\ X_I \\ X_R \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -q \end{bmatrix} \quad (17)$$

采用有限元降阶技术和自由度压缩法来消除内部自由度 X_I , 有

$$X_I = -A_{II}^{-1} [A_{IL} \ A_{IR} \ A_{IV}] \begin{bmatrix} X_L \\ X_R \\ v \end{bmatrix} \quad (18)$$

消除内部自由度 X_I , 式(18)由 4×4 矩阵降维为 3×3 矩阵, 即

$$\left(\begin{bmatrix} A_{LL} & 0 & A_{LV} \\ 0 & A_{RR} & A_{RV} \\ A_{VL} & A_{VR} & A_{VV} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} A_{LI} \\ A_{RI} \\ A_{VI} \end{bmatrix} A_{II}^{-1} [A_{IL} \ A_{IR} \ A_{IV}] \right) \cdot \begin{bmatrix} X_L \\ X_R \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -q \end{bmatrix} \quad (19)$$

整理式(19), 得到能够表征 SAW 结构单指单元 B 矩阵, 即:

$$\begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_L \\ X_R \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -q \end{bmatrix} \quad (20)$$

式(20)只包含 X_L, X_R, v 自由度, 相较于式(17), 其减少了需要计算的自由度。根据式(20), 利用单指结构左右边界声学量和电学量连续性条件, 得到级联单元 A、B 的级联系统矩阵方程^[21]:

$$\begin{bmatrix} B_{11}^A & B_{12}^A & 0 & B_{13}^A \\ B_{21}^A & B_{22}^A + B_{11}^B & B_{12}^B & B_{23}^A + B_{13}^B \\ 0 & B_{21}^B & B_{22}^B & B_{23}^B \\ B_{31}^A & B_{32}^A + B_{31}^B & B_{32}^B & B_{33}^A + B_{33}^B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_L \\ X_c \\ X_R \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -Q \end{bmatrix} \quad (21)$$

式中: X_c 为 A 模块和 B 模块的相邻边界, 在式(21)中为内部自由度; v, Q 分别为 A 模块和 B 模块级联后的电压自由度, 即 $v = [v_A, v_B], Q = [q_A, q_B]$ 。

上述对单指单元结构到整个有限长器件结构

的级联算法,以及级联过程进行了详细阐述。由式(21)可见,分层级联的本质和 \mathbf{P} 矩阵级联类似,都是将声学参量串联,电学端并联。

2 全波仿真分析

基于自主研发的多物理场耦合全波仿真平台(SAW Design Platform),SAW器件以 41° Y-X LiNbO₃/SiO₂/Si_{poly}/Si(111)为压电基体,压电薄膜层LiNbO₃厚度为500 nm,温补层SiO₂厚度为400 nm,多晶硅Si厚度为1 000 nm,硅Si(111)衬底厚度为0.5 mm,铝电极厚度为190 nm,金属化比为0.5,指条倾角设为 7° ^[19],如图2(a)所示。图2(b)为SAW滤波器制作版图。封装结构对SAW器件的电学性能影响较大,尤其是针对更高频率和更小尺寸的器件。如图2(c)所示,采用尺寸为3.8 mm×3.8 mm的SMD封装结构,在整个设计过程中考虑封装的电磁效应。同时采用遗传优化算法对周期、指条数进行优化设计。为了提高优化效率,将串联谐振器和并联谐振器分别设置在合理的周期范围内,减少变量搜索S范围,同时启用Matlab并行遗传优化算法。

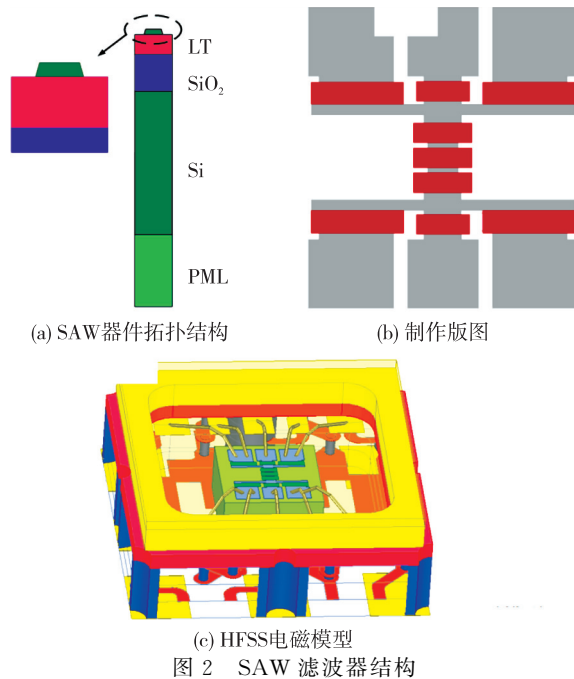
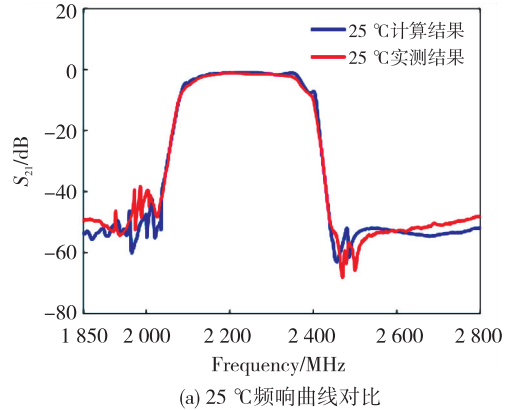


图2 SAW滤波器结构

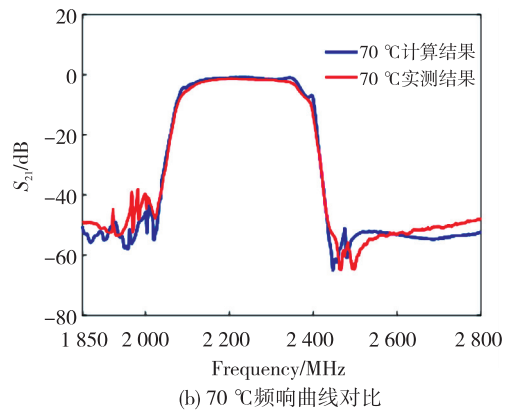
3 实验分析

根据图2的电路拓扑结构制作了相应的 41° Y-X LiNbO₃/SiO₂/Si_{poly}/Si(111)结构的声表面波滤波器。通过耦合温度场的分层级联计算方法分别仿真了25℃和70℃频响曲线,如图3所示。由图可见,

计算结果与实测结果吻合。其中, $TCF \approx -25 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,25℃、70℃时的插入损耗分别约为0.9 dB、1.2 dB。通带内的微小差异主要是由于有限元模型所使用的材料参数与实验中实际材料参数之间存在差异,而阻带部分产生的差异主要是由于HFSS模型忽略的PCB板和夹具的电磁效应所致。



(a) 25℃频响曲线对比



(b) 70℃频响曲线对比

图3 不同温度下的滤波器计算结果和实测结果对比

4 结束语

本文利用分层级联算法建立了用于精准分析SAW滤波器温度敏感特性的计算模型,并将温度场以热应力、热应变方式耦合到压电方程中。考虑各材料参数与温度之间的关系,实现了SAW滤波器不同温度场作用下的频率响应曲线、TCF值、损耗、带宽及带外抑制等性能指标的综合分析。研制的声表面波滤波器仿真和实测频响曲线吻合较好,这为不同温度场作用下SAW器件综合性能评估提供了理论指导和方法。

参考文献:

- [1] 郑泽渔,杜雪松,董加和,等.基于有限元法和色散COM模型的声表面波滤波器联合仿真[J].压电与声光,2023,45(2):165-168.
ZHENG Zeyu, DU Xuesong, DONG Jiahe, et al. Co-

- simulation of surface acoustic wave filter based on finite element method and dispersive COM model[J]. *Piezoelectrics and Acoustooptics*, 2023, 45 (2): 165-168.
- [2] 赵雪梅,郑泽渔,白涛,等.基于分层级联技术的梯形声表面波滤波器正向设计[J].*压电与声光*,2023,45(1):1-5.
ZHAO Xuemei, ZHENG Zeyu, BAI Tao, et al. Forward design of ladder surface acoustic wave filter based on hierarchical cascading technique[J]. *Piezoelectrics and Acoustooptics*, 2023,45(1):1-5.
- [3] SU R, SHEN J, LU Z, et al. Wideband and low-loss surface acoustic wave filter based on $15^\circ\text{YX-LiNbO}_3/\text{SiO}_2/\text{Si}$ structure[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2021, 42(3):438-441.
- [4] LIU W, TAN B, GONG Y. SAW temperature sensors system for smart electric grid[C]//San Diego, CA, USA: Proceedings of the IEEE International Ultrasonics Symposium, 2010: 756-759.
- [5] BRUCKNER G, BARDONG J. Wireless readout of multiple SAW temperature sensors[J]. *Sensors*, 2019, 19: 3077.
- [6] SMITH R T, WELSH F S. Temperature dependence of the elastic, piezoelectric, and dielectric constants of lithium tantalate and lithium niobate[J]. *J Appl Phys*, 1971, 42: 2219-2230.
- [7] YONG Y K. Three-dimensional finite-element solution of the Lagrangean equations for the frequency-temperature behavior of Y-cut and NT-cut bars [J]. *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control*, 1987, 34: 491-499.
- [8] MEI H C, WANG S T, HUANG A C S. Study of frequency-temperature characteristics of quartz with various cut angle and metal thickness of electrode[C]//QC, Canada: Proceedings of the IEEE International Frequency Control Symposium & Exposition, Montreal, 2004: 617-620.
- [9] PASTUREAUD T, LARDAT R, CHAMALY S, et al. Prediction of the thermal sensitivity of surface acoustic waves excited under a periodic grating of electrodes[J]. *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control*, 2005, 52: 1378-1383.
- [10] DIAZ J F, KARRER H E, KUSTERS J A, et al. The temperature coefficient of delay-time for X-Propagating acoustic surface-waves on rotated Y-cuts of alpha quartz [J]. *IEEE Trans Sonics Ultrason*, 1975, 22:46-49.
- [11] MUROTA M, SHIMIZU Y. Elastic constants and temperature coefficients of LiTaO_3 for SAW application[J]. *Jpn J Appl Phys*,1991, 30:156-158.
- [12] CAMPBELL J J, JONES W R. A method for estimating optimal crystal cuts and propagation directions for excitation of piezoelectric surface waves [J]. *IEEE Trans Sonics Ultrason*, 1968, 15: 209-217.
- [13] YONG Y K, KANNA S. IDT geometry and crystal cut effects on the frequency-temperature curves of a SAW periodic structure of quartz[C]//Sendai, Japan: Proceedings of the 1998 IEEE Ultrasonics Symposium, 1998.
- [14] YONG Y K, PANG X N. Lagrangian model of the frequency-temperature behavior of SAW resonators[C]//Tours, France: Proceedings of the IEEE International Ultrasonics Symposium, 2016: 1-4.
- [15] GARCIA J, LAROCHE T, DANIAU W, et al. 2-and-3D analysis of temperature effects on periodic transducers using a FEA/BEM approach [C]//Besancon, France: Proceedings of the IEEE International Frequency Control Symposium Joint with the 22nd European Frequency and Time Forum, 2009: 424-429.
- [16] WANG W B, TANG K J, WU H D. Analysis of frequency-temperature behavior of surface acoustic wave (SAW) under periodic IDT[C]//Xiamen, China: Proceedings of the Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves and Device Applications, 2010: 460-464.
- [17] YONG Y K, PANG X. Lagrangian model of the frequency-temperature behavior of SAW resonators[C]//[S. l.]: Proceedings of the IEEE International Ultrasonics Symposium, IEEE, 2016:1-4.
- [18] 林基明.表面波和漏表面波在周期栅格阵中的传播特性研究[D].南京:南京大学,2001.
- [19] 陈正林,赵雪梅,贺艺,等.基于有限元分层级联技术 SAW 滤波器精确计算[J].*压电与声光*, 2022, 44(2): 234-237.
CHEN Zhenglin, ZHAO Xuemei, HE Yi, et al. Precise calculation of SAW filter based on finite element hierarchicalcascading technique[J]. *Piezoelectrics and Acoustooptics*, 2022, 44(2):234-237.
- [20] KOSKELA J, MANIADIS P, WILLEMSSEN B A, et al. Hierarchical cascading in 2D FEM simulation of finite SAW devices with periodic block structure[C]//[S. l.]: Proceedings of the IEEE International Ultrasonics Symposium, IEEE, 2016: 1-4.
- [21] KOSKELA J, PLESSKY V, WILLEMSSEN B, et al. Hierarchical cascading algorithm for 2-D FEM simulation of finite SAW devices[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2018, 65(10): 1933-1942.