◇ 研究报告 ◇

# 声表面波器件在大功率作用下的热效应\*

黄庆云 黄 健 万志坚† 陈知泰 韩建伟

(深圳职业技术大学 深圳 518055)

**摘要:** 声表面波器件在高电场强度和高频驱动下易产生热量,这种热量会显著影响器件的寿命、耐用性和测量 精度,甚至造成器件本身的裂片与失效等问题。目前只有少数的研究关注了器件热效应。该文在前人研究的 基础上,旨在揭示器件热效应来源,建立了声表面波作用下器件发热效应的有限元分析模型,对器件本身的损 耗机制进行了讨论,通过搭建实验平台和有限元仿真对比阐明器件的自热效应,并且分析封装对于器件表面 热分布的影响,进一步阐述了大功率作用下器件失效的原因。该文可以为声表面波器件微流体驱动的产业化 进程提供技术支撑。

关键词: 声表面波; 有限元仿真; 损耗; 热效应 中图法分类号: TN384 文献标识码: A DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2024.06.022

文章编号:1000-310X(2024)06-1381-08

#### The thermal effect of surface acoustic wave devices under high power

HUANG Qingyun HUANG Jian WAN Zhijian CHEN Zhitai HAN Jianwei

(Shenzhen Polytechnic University, Shenzhen 518055, China)

Abstract: Surface acoustic wave (SAW) devices have a tendency to generate heat under conditions of strong electric fields and high-frequency driving, this heat will negatively impact the device's life, durability, and measurement accuracy. It may even result in issues like cracks and failures of the device itself. Only a few research studies have focused on the device's thermal effect. Based on earlier research, this work tries to identify the cause of the device's thermal effect, develops a model for the device's thermal development under the influence of SAW, and examines the system's loss process. Through the construction of an experimental platform and the comparison of finite element simulation to elucidate the self-heating effect of the device, and the analysis of the effect of encapsulation on the surface heat distribution of the device, and further elaborate the reasons for the failure of the device under the action of high power, which can provide technical support for the industrialization of the microfluidic drive of the SAW device.

Keywords: Surface acoustic wave; Finite element simulation; Loss; Thermal effect

# 0 引言

目前, 声表面波 (Surface acoustic wave, SAW) 技术在微流控领域备受关注。应用 SAW 可以进行

微流体驱动的各种操作<sup>[1-3]</sup>,例如微混合<sup>[4]</sup>、液 滴泵送<sup>[5]</sup>、喷射<sup>[6]</sup>、雾化<sup>[7]</sup>等,这些应用都归因于 SAW与微流体相互作用中存在较大的动量传递,当 液体放置在SAW的传播路径上时,SAW将转变为

<sup>2023-07-07</sup> 收稿; 2023-08-31 定稿

<sup>\*</sup>深圳职业技术大学青年创新基金项目(6023310020K)

作者简介:黄庆云(1991-),男,浙江温州人,博士,讲师,研究方向:声表面波器件与雾化。

<sup>†</sup>通信作者 E-mail: wanzj@szpt.edu.cn

基体表面的漏 SAW,同时衍射纵向压力波到液体内 实现各种功能,这称为SAW 声流现象<sup>[8-10]</sup>。然而 与此同时,热效应也与这些声流现象一起发生。一 般来说,热效应可大致分为压电器件由于损耗而产 生的自热效应和由于声波在流体中黏性耗散而产 生的声热效应<sup>[11-12]</sup>。虽然有许多研究关注SAW 声热效应,但只有少数研究关注了器件热效应,对 于热分布管理方法的研究则少之又少。在实际应用 中,压电器件在高电场强度和高频驱动下容易产生 热量。这种热量可能会显著影响器件的寿命、耐用 性和定位精度,甚至导致材料性能的退化,造成器 件本身的裂片与失效等问题,这些问题严重影响着 SAW 器件在微流控领域的应用。施加过高的电压 可能会产生电弧,在SAW传播路径的金属化过程 中会形成空洞和山丘,当山丘变大时,邻近的电极可 能会短路,这意味着器件发生故障。此外,在SAW 大功率作用下,器件表面温度升高是否会对蛋白质 分子或细胞样品产生负面影响仍然是一个悬而未 决的问题,值得关注<sup>[13]</sup>。虽然Senousy等<sup>[11]</sup>在研 究压电叠堆驱动器揭示自热效应主要是由损耗引 起,并且会对压电叠堆驱动器的可靠性和压电性能 有显著影响,Li等<sup>[12]</sup>认为SAW器件基体的热效应 主要由滞弹性效应转化所致,但是目前对SAW器 件热效应的研究基本局限于小功率作用下的情况, 对于大功率作用下的SAW 器件的热分布尚未进行 很好的研究。

本文在前人研究的基础上,旨在揭示器件热效 应来源,建立SAW作用下器件发热效应的有限元 分析模型,对系统本身的损耗机制进行探讨,通过实 验和有限元仿真对比论证大功率作用下器件的自 热效应,从实验角度揭示在大功率作用下热封装对 器件表面热分布的影响。

## 1 仿真建模

#### 1.1 数学模型

SAW 器件自热效应的热源来源于多种损耗机制,但主要包括以下两种损耗<sup>[14]</sup>:

(1) 当压电材料内部发生振动时,其内部阻尼的主要形式为瑞利/振动阻尼,阻尼力和系统速度成正比。当指定瑞利阻尼系数α<sub>dm</sub>和β<sub>dk</sub>时,其阻

尼力和振动阻尼系数方程可以表示为

$$\begin{cases} m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = f(t), \\ c = \alpha_{dm}m + \beta_{dk}k, \end{cases}$$
(1)

式(1)中,m为固体质量,k为固体刚度。瑞利阻尼的 损耗因子η<sub>m</sub>是指每个振荡周期内能量损耗和最大 弹性应变能的比值,用作复刚度表示损耗,其过大时 可能会导致器件振动响应的迟滞。η<sub>m</sub>由材料本身 的特性决定,可由实验获得,当瑞利阻尼的损耗因子 确定时,其与静电场的关系表示为

$$\sigma = D\left(1 + j\eta_m\right)\xi. \tag{2}$$

在频率  $f_0$  确定下, 瑞利阻尼系数  $\alpha_{dm} = 0$ ,  $\beta_{dk} = \eta_m/2\pi f_0$ , 将其代入式 (1) 可以得到阻尼系数  $\xi$  与阻尼力的关系为

$$\begin{cases} \ddot{u} + 2\varepsilon w_n \dot{u} + w_n^2 u = m \frac{1}{F(t)}, \\ \varepsilon = \frac{1}{2} \left( \frac{\alpha_{dm}}{\omega} + \beta_{dk} \omega \right). \end{cases}$$
(3)

(2)除了瑞利阻尼,在压电材料内部还存在其 他形式的阻尼。当压电材料中的电介质置于电场 中,电荷受到极化,导致它们距其平均平衡位置略有 偏移,从而导致介电损耗,存在一个损耗因子η<sub>e</sub>。对 于 SAW 器件,介电损耗功率密度 P<sub>1</sub> 与结构振动应 变功率密度 P<sub>2</sub> 可以根据式 (4)确定<sup>[15]</sup>:

$$P_1 = \frac{1}{2}\omega E^2 \varepsilon \eta_e, \tag{4}$$

$$P_2 = \frac{1}{2} \omega \eta_m \operatorname{Re} \left[ \boldsymbol{\varepsilon}_1 \operatorname{Con} j\left( \boldsymbol{D} \boldsymbol{\varepsilon}_1 \right) \right], \qquad (5)$$

其中, $\omega$ 为角频率,E为电场强度, $\epsilon$ 为相对介电常数 向量, $\epsilon_1$ 为应变矢量。

#### 1.2 有限元仿真模型

本文采用多物理场有限元分析软件进行建模、 仿真和后处理操作。为了便于计算多物理场中复杂 的耦合,对仿真模型做以下假设和简化:(1)忽略压 电器件在驱动过程中对环境的热辐射,因为在传热 领域,由压电器件之间的热传导与热对流起主要作 用;(2)对于SAW器件仿真,为了简化几何结构、降 低计算量,建立二维模型,忽略y方向上的有限尺度 的影响。由于涉及多物理场的耦合,仿真的过程包 含多个步骤,首先进行特征频率仿真,对叉指换能 器 (Interdigital transducer, IDT)进行特征值分析, 以预测发生模态的准确频率;其次进行频域分析, 通过输入设计的电压来提取瑞利SAW器件的损耗, 在此过程中,提取应变能密度代入式(5)可以计算 机械损失产生的热量,通过式(4)得到器件的介电 损耗;最后将提取的损失项作为热源用于固体传热 物理领域的瞬态热分析,将这些热量应用到IDT上, 对IDT进行热分析,得到器件温度分布。建立一个 简化后的单周期IDT二维有限元模型,选择压电物 理场模块,将结构与电势的边界都设置为周期性条 件,用SAW器件的一个波长来模拟多对IDT是为 了更好地显示SAW器件的温度特性。图1为有限 元模型。在模型中采用128°YX-LiNbO<sub>3</sub>作为基体, t表示基体厚度,铝作为叉指电极材料,H为叉指电 极厚度。查阅文献[16],以30 MHz器件为例,在具体 数值仿真中,128°YX-LiNbO<sub>3</sub>材料参数如下所示。

弹性矩阵*C*:

[C] =	20.3	7.23	6.02	1.07	0	0	
	7.23	19.4	9.06	0.89	0	0	
	6.02	9.06	22.03	0.81	0	0	
	1.07	0.89	0.81	7.49	0	0	
	0	0	0	0	5.63	-0.44	
	0	0	0	0	-0.44	7.6	
$ imes 10^{10} ({ m N/m}^2).$							

耦合矩阵e:

$$[e] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 4.46 & 0.4 \\ -1.77 & 4.46 & -1.59 & 0.12 & 0 & 0 \\ 1.68 & -2.67 & 2.4 & 0.59 & 0 & 0 \end{bmatrix} (C/m^2).$$

相对介电常数矩阵 $\varepsilon$ :

$$[\boldsymbol{\varepsilon}] = \begin{vmatrix} 44 & 0 & 0 \\ 0 & 37.9 & -7.81 \\ 0 & -7.81 & 34 \end{vmatrix}$$
(F/m).

铝电极材料的泊松比为0.35, 密度为2700 kg/m<sup>3</sup>,杨氏模量为70 GPa。紧接着设置边界条件,详细边界条件设置和几何参数如表1 所示。

设定好几何模型与边界条件、进行网格划分后 才能进行有限元分析计算。由于SAW主要在基体 表面一个波长深度范围内传播,当深度超过一个波 长后,振动能量将呈指数减弱。因此,为了能够将一 个周期内的信息保存下来,对电极所在的表面进行 网格细化,一个波长内划分5个节点,网格最大尺寸 不超过25 μm,网格细化单元数为38494。



图1 SAW器件有限元模型

Fig. 1 Finite element model of SAW device

表1 有限元模型的边界条件与几何参数 Table 1 Boundary conditions and geometric parameters of the finite element model

模型名称	结构参数与边界条件		
SAW 波长	130 µm		
基体厚度	$500 \ \mu m$		
电极厚度	150  nm		
电极宽度	32.5 µm		
电极1	20 V 电势		
电极2	接地		
上边界 $\Gamma_T$	自由表面		
下边界 $\Gamma_B$	固定约束		
左右边界 $\Gamma_L$ 、 $\Gamma_R$	周期性条件		

### 2 实验方案

为验证仿真结果,设计了如下实验。实验装置主要由SAW发生设备和观测设备构成,如图2 所示。实验中所使用的SAW器件是在128°YX-LiNbO<sub>3</sub>基片上制造的。通过标准的紫外光刻和 剥离技术将150 nm厚的铝电极图案化到LiNbO<sub>3</sub> 基片上,详细的光刻剥离工艺过程可以参考文 献[9]。IDT的配置包括30对叉指,波长为130 μm。 波长λ由IDT电极的宽度和电极间距决定,本实 验中的IDT是标准直叉指结构,宽度和电极间距 设置相等。IDT的孔径设为4 mm,SAW设备的尺 寸为22 mm × 12 mm × 0.5 mm。使用普源公司生 产的信号发生器 RIGOL DSG3000 连接功率放大器 Mini-circuit LZY-22 给 SAW 器件提供信号驱动,需 要强调的是,信号加载前与示波器连接测定输入电 压大小。利用热电偶温度计 (Fluke 51 K/J)测量叉 指电极表面的温度,使用红外相机以视频拍摄的形 式捕捉器件温度随时间的变化。为减小实验误差, 每个实验条件下均进行3次实验。使用 ImageJ 软件 对红外相机的热图像进行分析。ImageJ 软件可以 通过温标条灰度值之间的对应关系得到温度值,并 且在每张红外图像中,测量区域像素点的灰度值,而 不是仅仅从温度标度条中取最高点。



#### 图 2 SAW 器件热效应实验平台

Fig. 2 Experimental platform for thermal effect of SAW devices

#### 3 结果与讨论

#### 3.1 特征频率与频域分析

在对模型特征频率求解后,可以得声波在固体 中传播振型的几种模态。模态是结构的固有振动特 性,每一个模态具有特定的固有频率、阻尼比和模 态振型,图3为SAW器件仿真得到的几种模态。不 同的频率对应不同的声波振型,这其中包括声体波 振型和 SAW 振型。基于 SAW 在基体中传播能量主 要集中在固体表面以下1~2波长范围内,从而提取 出SAW对应的振型,可以看到SAW 振型存在两个 不同振型的特征频率,即对称模态 fsc- 与反对称模 态 f<sub>sc+</sub>,直接用于后续频域相应下的损耗分析。从 图3(b)中可以看到形变主要集中在固体的浅表层, 符合SAW引起振动的特点,而图3(a)中显示的形 变主要集中在固体内部,显然这不符合SAW的谐 振模。该结果与文献[17]在LiNbO3基体上仿真得 到的瑞利波的振动模式完全吻合。通过仿真计算得 到SAW器件的特征频率,因此器件的谐振频率 fsc 可以由这两个特征频率计算得到,

$$f_{\rm sc} = \frac{1}{2}(f_{\rm sc+} + f_{\rm sc-}).$$
 (6)



Fig. 3 Vibration mode of acoustic wave propagation in solids

通过计算可以得到谐振频率 f<sub>sc</sub>为 29.72 MHz,后续 热仿真的计算是基于模态分析的结果下进行的。

根据频域响应分析可以求解应变能,代入公式(5)计算功率,该功率用作热源表示声波振动过程中的机械损耗。介电损耗产生的热量由公式(4)计算得到,并作为热量施加在IDT上。设定LiNbO3 材料的机械损耗因子和介电损耗因子直接关系基体内部的阻尼大小,从而决定着器件损耗所产生的热量,设定压电材料的阻尼损耗因子(详细设定情况可以参考文献[18]),由此得到压电材料由损耗引起的总功耗密度大小,仿真结果如图4所示。该总功耗密度将直接作为热源用于计算后续传热下温度变化。



Fig. 4 Total power density generated by losses

### 3.2 热仿真与实验验证

图5显示谐振频率为29.72 MHz的基体温度分 布随时间变化序列图。由于压电效应,仿真模型从 IDT 处开始升温,在热传递的作用下,器件热量逐 渐传向底端,使底部温度开始上升,从而整体温度 不断升高,越靠近 IDT 表面温度也越高。LiNbO3 晶 体材料的导热系数为38 W/m·K,可以看到在2 s 时,整个器件在厚度方向上温度差为0.04 °C,随着 时间增加,相应的温差将增大,在20 s时厚度方向 上最大温度差达到0.1 °C,且温度均匀分布。如果 输入电压继续增大,在厚度为声波波长 $\lambda_{SAW}$ 的区 域上将产生一定温度梯度,这也给128°YX-LiNbO3 带来了热电,导致奇异电场,特别是在器件的边 缘,促进了局部缺陷的传播,容易导致器件裂片 失效。





启动信号源,产生激励信号,IDT在激励信号 作用下由于逆压电效应产生SAW在基体表面传播, 所以器件表面开始升温,利用热电偶温度计测量输 入功率为5.26 W (+37.21 dBm)电极表面的温度, 相应的实验结果与仿真结果对比如图6(a)所示。在 前20 s内实验结果与仿真结果基本吻合,验证了器 件热效应来源于损耗机制,但随着时间进行,实验





结果与仿真结果偏差增大,这可能归因于器件的谐 振频率随器件表面温度的升高呈线性减小。温度升 高,声波相速度会发生变化,引起SAW 谐振频率改 变,从而降低器件的性能,使得实验过程中器件温度 增加减缓<sup>[19]</sup>。图 6(b)显示t = 20 s时基于红外相机 拍摄后进行图像处理呈现的器件表面的三维温度 分布,可以看到,孔径范围内温度明显高于孔径外的 温度。当SAW 传播到基体边缘,由于边缘处反射使 得边缘处温度最高,相比于其他区域存在较大的温 度梯度差。随着时间持续,表面温度继续升高,相应 的温度梯度差进一步扩大,当t = 80 s时,基体表面 的三维温度分布所显示此时边缘温度达到140 °C, 相较于孔径外的表面温度,最大温度梯度差趋于稳 定,达到50 °C,如果继续加大输入功率,达到器件的 功率阈值,器件将出现裂片失效。

通过实验结果与仿真结果的对比,验证仿真模 型的准确性,揭示器件在大功率作用下的热分布,相 较于厚度方向上温度梯度,孔径方向与两侧区域存 在的巨大的温度梯度差是导致大功率下器件裂片 失效的主要原因。此外,修改仿真模型参数还可以 反映出器件热效应的其他相关信息。例如修改物理 场条件设置,施加电势分别设置为0V、10V、25V、 50 V,其他条件保持一致。电势设置为0 V时,表示 只存在振动阻尼引起的损耗,不存在介电损耗,仿 真20s时结果如图7所示。从图7中明显可以看到, 在没有介电损耗的情况下器件表面温度基本不变, 但随着输入电压增加,电极表面温度急剧升高。所 以器件表面的热效应产生主要来源于IDT中的介 电损耗,随着电势增加,器件温度显著升高。换句话 说,通过控制输入电压的方法可以有效地实现预期 的温度控制。





Fig. 7 Simulation results of electrode temperature for different potentials

#### 1387

## 3.3 热封装对器件表面热分布的影响

上述仿真与实验揭示了器件在大功率作用下 的热分布。事实上,器件在大功率作用下的驱动常 应用于微流体喷射与雾化中,必要的散热封装是必 不可少的。SAW 器件的驱动能力随着所施加射频 信号功率的增大而增大,相应的器件表面温度也急 剧升高,这将对SAW 驱动器的性能产生破坏性影 响。特别是在这种大功率作用下的微流体雾化过 程中, SAW 器件的故障率异常高, 主要表现为断裂 和电火花现象。采用封装与未封装的器件做对比 实验,封装材料采用玻璃料银浆作为夹层材料黏合 器件与铝制散热片,相关的加工工艺方法可以参考 文献[8]。图8显示封装与未封装SAW器件的电极 表面温度变化,可以看到,在不采取任何散热步骤, 在输入射频信号功率为10.49 W (+40.21 dBm)的 情况下, 虚线框内的区域为SAW的传播路径, 声 波损耗转化的热量主要集中在该区域,器件边缘 的亮白色区域则是声波反射引起的温度急剧上升。 当t = 50 s时,未封装的器件虚线框表面温度超过 113 ℃,在SAW传播路径上,明显的光带是热量的 堆积造成的。裸SAW 器件在工作不到60 s的时间 内就发生了开裂现象,这是由于高速振动限制在



图8 裸器件与封装后器件的温度变化

Fig. 8 Temperature changes test results of bare device and packaged device

IDT 孔径范围内, 边界反射效应导致整个器件温度 分布极不均匀。然而, 采用玻璃料银浆作为压电基 板与铝散热器之间的黏合剂, 由于快速散热使器件 表面分布均匀, 在t = 50 s时最高温度不超过79℃, 虚线框内温度与两侧基本相同。在t = 120 s时, 表 面温度仅达到90℃, 热量通过玻璃料银浆快速引入 到散热片散发, 表面的温度最高梯度差仅为15℃。 这对于 SAW 器件表面的热均匀性更好, 降低了开 裂的风险。在 10.49 W 的射频输入功率下, 可实现 连续工作1h以上不开裂。如果没有稳定可靠的工 作装置, 大功率 SAW 微流体驱动应用 (如喷射和雾 化) 将面临重大挑战。

# 4 结论

本文探讨了SAW的损耗机制和传递特性,分 析了SAW自热效应的数学模型,构建了多物理场 有限元二维压电传热仿真模型,通过仿真与实验验 证揭示SAW器件热效应的来源,在大功率输入作 用下,相比于厚度方向上温度梯度,孔径方向与两 侧区域存在的较大的温度梯度差是导致器件裂片 失效的主要原因。此外,器件的热量产生主要来源 于IDT中的介电损耗,随着输入电势增加,器件温 度显著升高。这解释了阻碍 SAW 器件在微流控中 应用的根本原因。特别对于大功率驱动作用下的喷 射与雾化的应用,采用封装与未封装的器件做对比 实验,结果表明,在不采取任何散热步骤,在输入射 频信号功率为10.49 W (+40.21 dBm)的情况下,未 封装的器件虚线框表面温度超过113 ℃,在工作不 到60 s的时间内就发生了开裂现象,而封装后器件 由于快速散热使器件表面分布均匀,在t = 120 s时, 表面温度仅达到90℃,表面温度最高梯度差仅为 15 ℃,可实现连续1h工作以上不开裂,通过对比验 证进一步阐述大功率作用下器件裂片失效的主要 原因,良好的封装可以有效解决器件裂片失效问题。 因此,本研究为大功率SAW 微流体驱动应用(如喷 射和雾化)提供了技术支撑和理论支持。

#### 参考文献

 杨旭豪,刘国君,赵天,等. 声表面波技术在微流控研究领域 中的应用 [J]. 微纳电子技术, 2014, 51(7): 438-446.
 Yang Xuhao, Liu Guojun, Zhao Tian, et al. Applications of surface acoustic wave technology in the microfluidic research field[J]. Micronanoelectronic Technology, 2014, 51(7): 438–446.

- [2] Ding X, Li P, Lin S S, et al. Surface acoustic wave microfluidics[J]. Lab on a Chip, 2013, 13(18): 3626–3649.
- [3] 赵程,周佳成,袁淑雅,等. 薄膜型声表面波器件的研究进展[J]. 微电子学, 2021, 51(4): 570-576.
  Zhao Cheng, Zhou Jiacheng, Yuan Shuya, et al. Research progress of thin film SAW devices[J]. Microelectronics, 2021, 51(4): 570-576.
- [4] Tan M K, Yeo L Y, Friend J R. Rapid fluid flow and mixing induced in microchannels using surface acoustic waves[J]. Europhysics Letters, 2009, 87(4): 47003–47006.
- [5] Ai Y, Marrone B L. Droplet translocation by focused surface acoustic waves[J]. Microfluidics and Nanofluidics, 2012, 13: 715–722.
- [6] Jangi M, Luo J T, Tao R, et al. Concentrated vertical jetting mechanism for isotropically focused Zno/Si surface acoustic waves[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2019, 114: 1–8.
- [7] Huang Q Y, Le Y, Hu H, et al. Experimental research on surface acoustic wave microfluidic atomization for drug delivery[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 7930.
- [8] Huang Q, Sun Q, Hu H, et al. Thermal effect in the process of surface acoustic wave atomization[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2021, 120: 110257.
- [9] Huang Q, Hu H, Lei Y, et al. Simulation and experimental investigation of surface acoustic wave streaming velocity[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2020, 59(6): 064001.
- [10] Collins D J, Manor O, Winkler A, et al. Atomization off thin water films generated by high-frequency substrate wave vibrations[J]. Physical Review E, 2012, 86(5): 056312.

- [11] Senousy M S, Rajapakse R K N D, Mumford D, et al. Self-heat generation in piezoelectric stack actuators used in fuel injectors[J]. Smart Materials and Structures, 2009, 18(4): 045008.
- [12] Li S, Desrosiers J, Bhethanabotla V R. Heating of Rayleigh surface acoustic wave devices in 128°YX LiNbO<sub>3</sub> and ST X quartz substrates[C]. 2017 IEEE Sensors, 2017: 1–3.
- [13] Qi A, Yeo L, Friend J, et al. The extraction of liquid, protein molecules and yeast cells from paper through surface acoustic wave atomization[J]. Lab on a Chip, 2010, 10(4): 470–476.
- [14] Catarino S O, Miranda J M, Lanceros-Mendez S, et al. A numerical study on the heat transfer generated by a piezoelectric transducer in a microfluidic system[J]. Journal of Physics Conference, 2012, 395: 012091.
- [15] Rajesh J T, Vins B, Ramamoorthy V. Heat generation from dielectric loss and vibration using COMSOL Multiphysics[C]//Proc. of COMSOL Bangalore Conference, 2010: 1–4.
- [16] Tan M K, Friend J R, Matar O K, et al. Capillary wave motion excited by high frequency surface acoustic waves[J]. Physics of Fluids, 2010, 22(11): 112112.
- [17] Johnson S, Shanmuganantham T. Design and analysis of SAW based MEMS gas sensor for the detection of volatile organic gases[J]. International Journal of Engineering Research & Applications, 2014, 3(4): 254–258.
- [18] 杨小庆. 声表面波微流体驱动中的热效应研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [19] Lee D, Lee N, Choi G, et al. Heat transfer characteristics of a focused surface acoustic wave (F-SAW) device for interfacial droplet jetting[J]. Inventions, 2018, 3(2): 38.