

利用COMSOL分析不同模型下SAW微流控芯片中PDMS腔体内的物理场

倪正阳¹, 刘子星¹, 郭震生¹

1. 南京大学近代声学教育部重点实验室, 南京, 江苏

简介: 本文以声表面驻波 (SSAW) 微流控芯片为例, 通过三种不同的方式对PDMS腔体建模, 利用有限元方法分析了腔体内部的物理场和腔体内粒子的运动过程。对PDMS腔体建模时, 分别采用COMSOL中的固体力学、压力声学和声阻抗边界三种方式分析PDMS腔体对微流腔内声场和流场的影响。

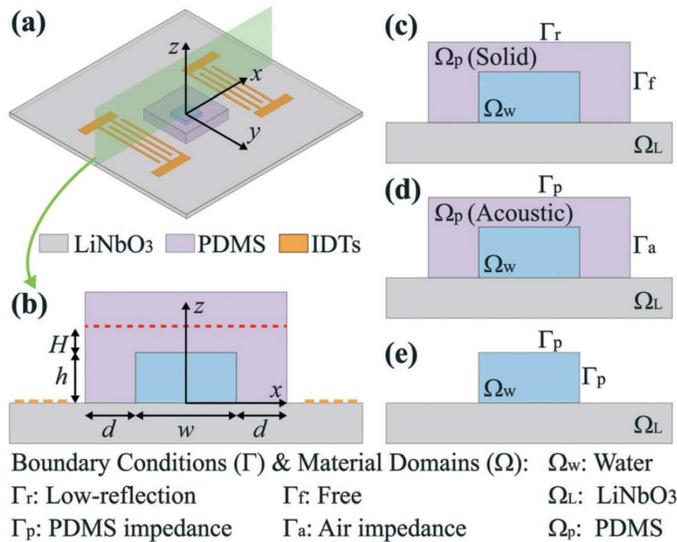


图 1. (a) SAW微流控器件三维示意图, (b)x-z二维截面, (c-e) 使用不同模块处理PDMS腔体, 对SAW微流控器件的x-z截面建模

控制方程:

1, Thermoviscous Acoustics:

$$\rho_0 \frac{\partial v_1}{\partial t} = -\nabla p_1 + \mu \nabla^2 v_1 + \left(\eta + \frac{1}{3} \mu \right) \nabla (\nabla \cdot v_1)$$

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} = -\rho_0 \nabla \cdot v_1, \quad \rho_0 C_p \frac{dT}{dt} - \alpha_0 T \frac{dp_1}{dt} = \nabla \cdot (k_{th} \nabla T)$$

2, Solid Mechanics:

$$-\rho_s (1 - i\mu_s)^2 \omega^2 u_s = \nabla \cdot \sigma_s$$

3, Pressure Acoustics:

$$\nabla \left(-\frac{1}{\rho_s} \nabla p_1 \right) = \frac{k^2 p_1}{\rho_s}$$

4, Acoustic Radiation Force:

$$F_r = -\pi a^3 \left\{ \frac{2\kappa_0}{3} \text{Re} [f_1^* p_1^* \nabla p_1] - \rho_0 \text{Re} [f_2^* v_1^* \cdot \nabla v_1] \right\}$$

5, Acoustic Streaming:

$$\rho_0 \nabla \cdot \langle v_2 \rangle = -\nabla \cdot \langle \rho_1 v_1 \rangle$$

$$-\langle \nabla p_2 \rangle + \mu \nabla^2 \langle v_2 \rangle + \left(\eta + \frac{1}{3} \mu \right) \nabla \nabla \cdot \langle v_2 \rangle = \left\langle \rho_1 \frac{\partial v_1}{\partial t} \right\rangle + \rho_0 \langle (v_1 \cdot \nabla) v_1 \rangle$$

结果: 不同模型的声场结果如图2所示, 可发现三种模型所得声场分布在Main Area无显著差异, 而在Side Area中, Model A与Model S结果更为接近。而三者的声流场分布并无显著差异, 结果如图3所示。此外, 我们也进一步分析了不同大小的聚苯乙烯 (PS) 微球 (半径分别为0.5、1.5、5.0微米) 在不同模型所获得的声流场中的运动轨迹, 其结果如图4所示。

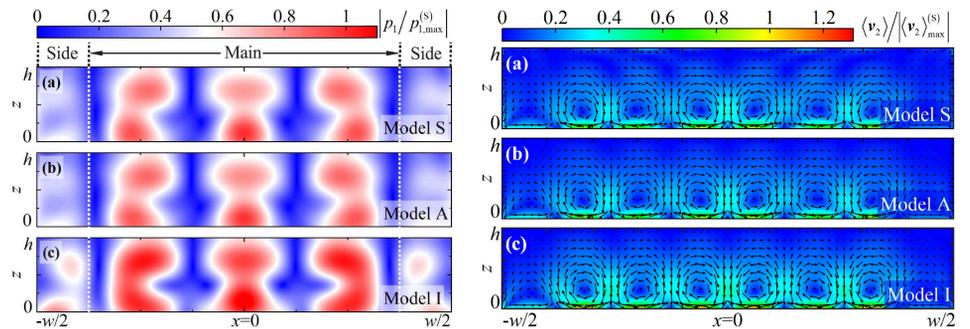


图 2. 不同模型的声场结果

图 3. 不同模型的流场结果

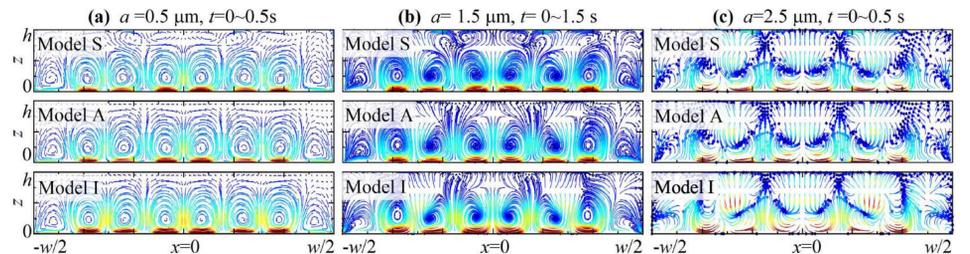


图 4. 图片描述三种模型下不同大小的PS微球在PDMS腔体内的运动轨迹

不同厚度的PDMS侧墙对SAW的衰减影响结果如下图所示。Model I采用PDMS阻抗边界, 可看作PDMS侧墙厚为0的情况。PDMS侧墙厚对SAW的影响不随腔体宽度改变。

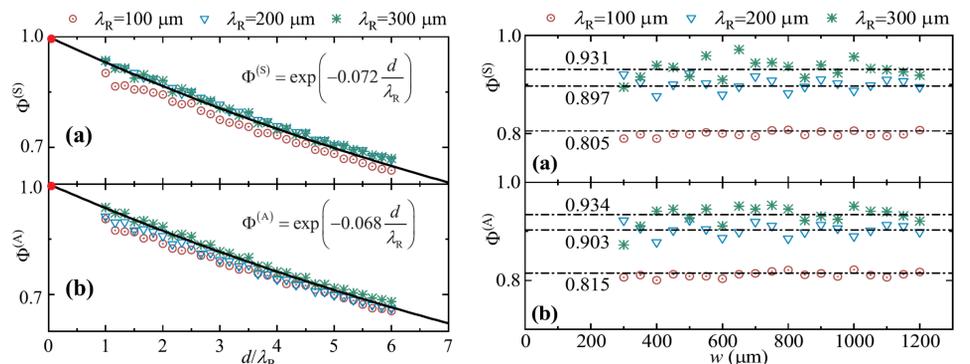


表 1. 不同PDMS侧墙厚对声场的影响

图 5. PDMS侧墙厚对SAW的衰减不随腔体宽度变化

结论: PDMS中的横波对声流场有影响, 尤其在近壁面处横波对声流场以及粒子运动的影响十分显著。这表明我们在进行狭窄腔道的微流控器件设计时, 必须考虑PDMS中横波的影响。SAW经过PDMS时导致的衰减与PDMS腔体的侧壁厚度和频率有关, 而材料本身的声衰减对SAW的影响很小。在设计PDMS腔体时, 需选择合适的PDMS侧墙厚度。一方面PDMS侧墙需足够厚以支撑腔体内的流体, 另一方面应控制厚度以避免SAW在PDMS腔体中的过多损耗。当只关注远离PDMS边界的声场时, 将PDMS看作流体来建模计算其声场就可以很好地反映腔体内的物理场以及对应的粒子轨迹。基于模拟所得结果, 研究人员在设计新型基于PDMS的SAW器件时, 可根据实验目的来选择合适的模型进行建模分析, 并了解选择不同的模型可能存在的影响。

参考文献:

- Ni Z, Yin C, Xu G, et al. Modelling of SAW-PDMS acoustofluidics: physical fields and particle motions influenced by different descriptions of the PDMS domain[J]. Lab on a Chip, 2019, 19(16): 2728-2740.
- Nama N, Barnkob R, Mao Z, et al. Numerical study of acoustophoretic motion of particles in a PDMS microchannel driven by surface acoustic waves[J]. Lab on a Chip, 2015, 15(12): 2700-2709.
- Muller P B, Barnkob R, Jensen M J H, et al. A numerical study of microparticle acoustophoresis driven by acoustic radiation forces and streaming-induced drag forces[J]. Lab on a Chip, 2012, 12(22): 4617-4627.