

基于压电陶瓷驱动的声光调制器的多物理场耦合仿真

通过模拟声压场的分布计算谐振频率和光学性能，从而优化液体声光调制器的设计。

吕卓元¹, 马青原¹, 杜肖晗^{*1}

¹ 系统工程系, 香港城市大学, 香港特别行政区, 中国

* xiaohadu@cityu.edu.hk

摘要

本课题旨在开发一种新型液体声光调制器，通过设计压电阵列驱动的液体腔，实现可调控的复杂声场和折射率分布。这种动态生成复杂声场结构可以快速将高斯光束转变为其他预定光束形状。液体声光器件具有更高的响应速度（兆赫兹级别），还因其液体本质和无机械移动部件的设计，具备高损伤阈值、高稳定性等优点。课题旨在建立一套系统性的器件设计和参数优化方法，依托仿真分析与实验验证，探索多物理场耦合下的声光器件的优化，最大化其内部声压和折射率的变化，从而提升声光器件的光学性能。

方法

使用 COMSOL 的压力声学、固体力学、电路、几何光学和静电场五个模块仿真。建立二维声学模型以模拟液体在压电陶瓷片振动影响下形成的声压场。通过多物理场接口将固体力学模块与压力声学模块耦合，求解固体力学方程来计算固体中的应力：

$$-\nabla^2 u = \nabla \cdot s + F_v e^{i\phi}$$

同时也会求解亥姆霍兹方程来计算声压场，并在固体与流体的边界处添加相应的边界条件：

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho_0} \nabla p \right) + \frac{\omega^2}{c^2} p = 0$$

为了深入了解压电陶瓷的振动模式，使用电路模块分别模拟其在空气和水中的电压与电流的频率响应，以确定其谐振频率。通过在谐振点附近操作，能够更容易地形成梯度较大的折射率场 ($\Delta n \propto 10^{-7} \sim 10^{-5} \Delta$)。

最后，利用几何光学模块进行光线追踪，结果符合拉曼-奈斯衍射现象。

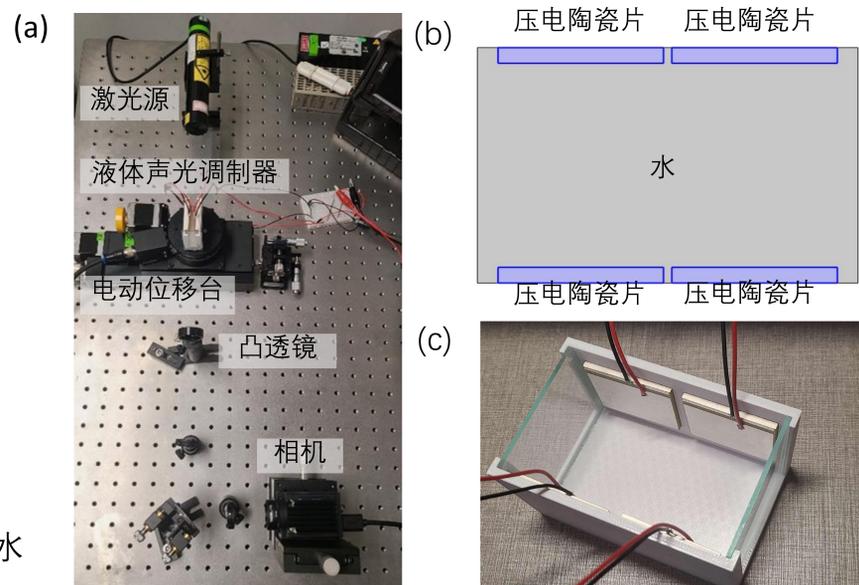


图1. (a) 为光学部分实验图。使用光束轮廓相机观察激光产生的衍射现象。(b) 为二维仿真的几何建模。其中蓝色部分为压电陶瓷，其余灰色部分为液态水。(c) 为实验原型。使用 3D 打印的外壳，并安装两对 PZT-5H 压电陶瓷。

结果

当压电陶瓷在某些特定的频率（如505kHz、534kHz）下振动的时候会在腔体内形成较为规律的声驻波模式。此时声压的梯度比较大，相应的折射率变化也较大，可以看作是具有衍射效应的光栅。

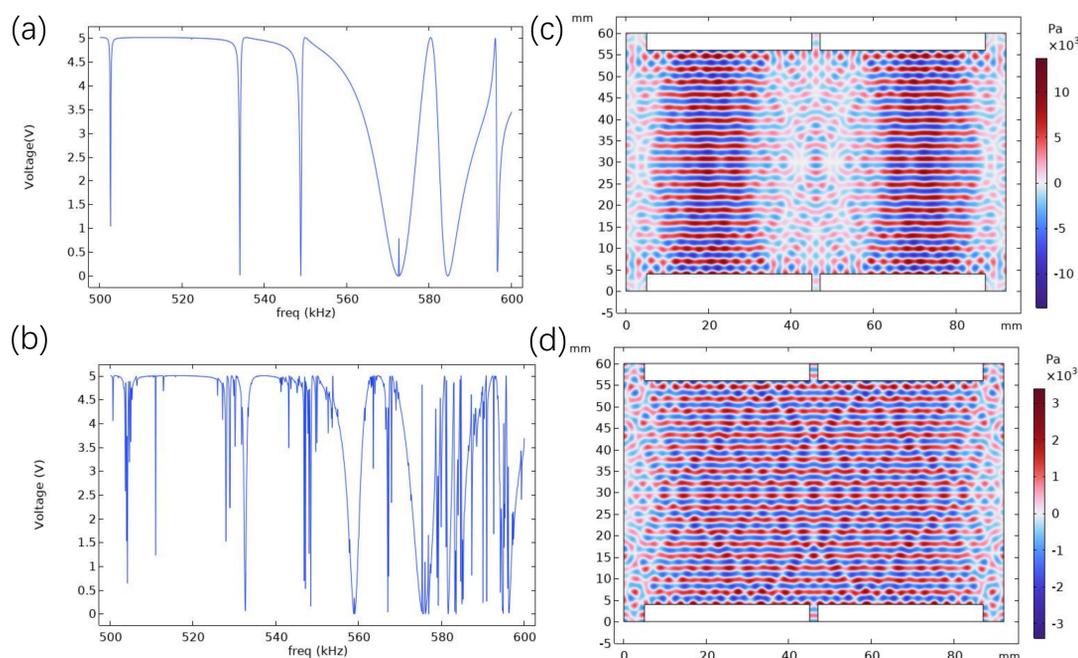


图2. 压电陶瓷在空气中 (a) 与水中 (b) 工作时的电压频率响应。压电陶瓷在频率为503kHz (c) 和534kHz (d) 振动的时候形成的声压场。

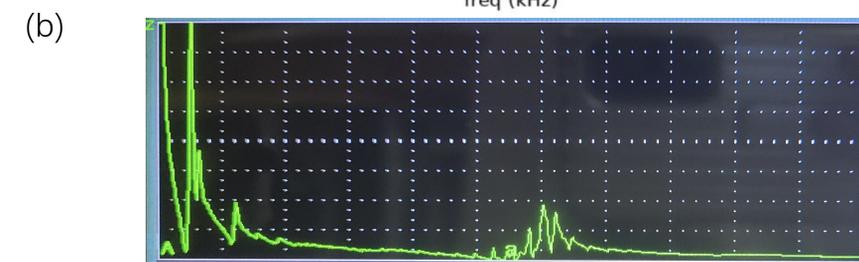
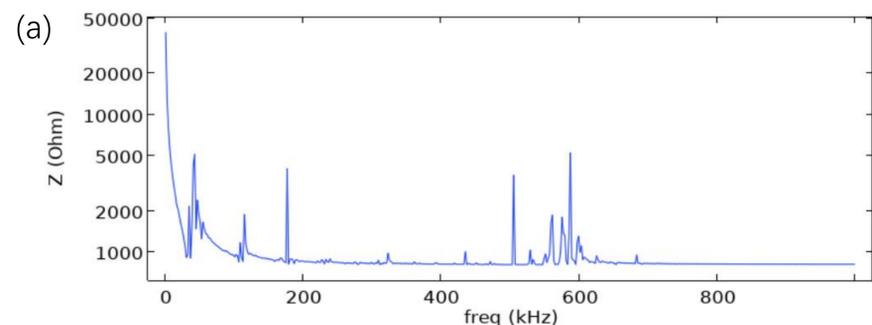


图3. 使用 COMSOL 中的探针表数据绘制的阻抗图 (a) 与实际使用阻抗分析仪测量的频谱图 (b) 的对比。

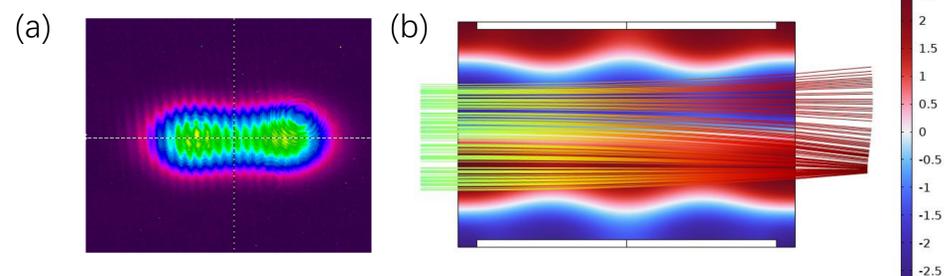


图4. (a) 使用光束轮廓相机拍摄出的使用该调制器作为光栅的衍射效果，(b) 使用 COMSOL 的光线追踪模块模拟调制器对光线传播方向的偏转作用。