

光弹调制器谐振特性的研究及验证

武燕婷¹, 熊伟^{2,3*}, 李超波², 胡震恒¹, 田颀莹²¹中国科学院大学微电子学院, 北京 100049;²中国科学院微电子研究所, 北京 100029;³中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033

摘要 光弹调制器(PEM)是一种广泛应用于光学检测的光调制器件,其利用压电晶体的逆压电效应来周期性改变光弹晶体内部的折射率,从而实现通过对光弹晶体的光信号的相位调制。当系统处于谐振状态时,PEM的调制效率最高。因此,谐振频率和表征其工作效率的品质因子是PEM的两个重要参数。为了研究PEM的谐振特性,设计了一款目标频率在50 kHz附近的二维八角对称结构PEM并进行了理论和实验验证,同时提出一种基于阻抗分析的PEM谐振特性测量方法。首先建立频率模型进行分析以得到目标PEM的理论参数,再通过数值仿真软件进行理论验证,最终完成了两组PEM样品的制备。此外,还基于阻抗分析方法对样品的谐振特性进行了实验验证,测得样品的谐振频率分别为52.363 kHz和52.353 kHz,品质因子分别为5071.2和6096.7。

关键词 调制器;光弹调制器;阻抗分析;谐振频率;品质因子

中图分类号 TH741

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1523002

Research and Verification on Resonance Characteristics of Photoelastic Modulator

Wu Yanting¹, Xiong Wei^{2,3*}, Li Chaobo², Hu Zhenheng¹, Tian Siying²¹School of Microelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;²Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;³State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract Photoelastic modulator (PEM) is a kind of light modulator widely used in optical detection, which uses inverse piezoelectric effect of piezoelectric crystal to periodically change refractive index inside photoelastic crystal to realize phase modulation of optical signal passing through photoelastic crystal. PEM has the highest modulation efficiency when the system is in a resonant state. Therefore, resonant frequency and quality factor representing its working efficiency, are two important parameters of PEM. To study the resonance characteristics of PEM, we design a two-dimensional octagonal symmetric structure PEM with target frequency near 50 kHz and verify it theoretically and experimentally. At the same time, we propose a PEM resonance characteristic measurement method based on impedance analysis. In this paper, the theoretical parameters of the target PEM are obtained by establishing a frequency model for analysis, and then theoretical verification is carried out by numerical simulation software. Finally, two groups of PEM samples are prepared. In addition, the resonance characteristics of the samples are experimentally verified based on the impedance analysis method. The measured resonant frequencies of the sample PEMs are 52.363 kHz and 52.353 kHz, and the quality factors are 5071.2 and 6096.7, respectively.

Key words modulators; photoelastic modulator; impedance analysis; resonant frequency; quality factor

OCIS codes 230.4110; 060.5060; 070.5753; 120.4570; 140.4780

收稿日期: 2020-12-24; 修回日期: 2021-02-26; 录用日期: 2021-03-09

基金项目: 应用光学国家重点实验室资助项目(SKLAO-201916)、中国科学院合肥大科学中心“高端用户培育基金”(2019HSC-UE011)

通信作者: *xiongwei2@ime.ac.cn

1 引言

光弹调制器 (PEM) 是一种重要的光学调制器件, 其具有接收角大 ($\pm 40^\circ$)、功耗小 (≤ 2 W)、调制频率高 (10~200 kHz) 等一系列优势^[1-3], 进而被广泛应用于高灵敏度光学探测和椭圆偏振参数测量^[4-6]。PEM 最早出现于 20 世纪 60 年代。早期, Billardon 和 Badoz 等提出一种由光弹晶体、压电晶体和金属杆组成的自谐振杆, 但这种设计的性能受各部分胶合强度及杂散双折射影响较大^[1]。之后, Kemp^[7] 等提出包括一个压电晶体和一个光弹晶体的棒状 PEM (Kemp 型 PEM), 这种类型的 PEM 在零应力结点处用软粘材料粘合, 与自谐振杆相比, 其杂散双折射得到了降低, 但是这种结构需要通过严格的生产流程来最小化支撑杆引起的应力^[8-9]。二维 (光弹晶体的折射率在与通光轴相垂直的 x 和 y 两个方向上发生改变) 八角对称结构的 PEM (一个四角被切掉的正方形) 相比于 Kemp 型, 具有更大的相位调制范围且对支撑引起的应力双折射较不敏感^[10]。本文重点研究这种性能更加优越的二维八角对称结构的 PEM。

PEM 是一种工作在谐振状态下的光学调制器件^[11], 当激励信号频率等于 PEM 的固有谐振频率时, PEM 的光学调制效率最高。因此, PEM 的谐振特性直接决定了其调制性能, 进而研究 PEM 的谐振特性 (主要包括谐振频率及品质因子 Q) 具有重要的意义。

传统的测量 PEM 谐振频率的方法是利用多普勒测振仪进行测试^[12]。该方法将物体振动转换为多普勒频移, 并通过电信号记录。调节信号源的频率, 当观测到振动位移信号振幅最大时, 便认为被测 PEM 达到了谐振状态, 此时对应的频率就是此 PEM 的谐振频率。由于振动位移信号较弱, 因此该方法对测量平台和测量环境的要求很高且只能通过振动位移信号振幅是否最大来判断其是否处于谐振状态。此外, 谐振工作时的品质因子也无法测量。因此, 本文提出一种基于阻抗测量的方法来确定 PEM 的谐振频率, 并通过谐振电路 (LC) 电路模型模拟其电路特性, 分析计算其谐振状态时的品质因子。此前, 阻抗分析法主要用于分析各类器件, 如压电陶瓷、磁致伸缩材料等, 并未有公开文献报道将此方法应用到 PEM 谐振特性研究上。这种方法可以弥补传统测量方式设备昂贵、误差大、不可计算品质因子等缺点。

首先, 本文介绍了 PEM 的谐振模型, 并基于谐振模型设计了目标频率为 50 kHz 的 PEM 的相关参数 (PEM 的工作频率通常需要根据实际应用需求进行选择, 测量应用过程中的时间分辨率要求越高, 则工作频率要求越高, 本文设计的 50 kHz 工作频率所对应的时间分辨率约为 0.2 ms, 可以满足后续的测量应用需求)。然后, 用有限元分析软件对理论参数做了验证和修正。最后, 利用新方法测量了标准 PEM、压电石英谐振器和样品 PEM 的谐振频率, 并通过 LC 电路模型来模拟三者谐振频率附近时 PEM 的电气特性, 分析得到了其谐振状态时的品质因子。

2 光弹调制器的谐振模型及参数设计

PEM 主要由压电晶体和光弹晶体组成, 两者通过胶合连接在一起。理想情况下, 认为 PEM 是一个悬浮的光学元件, 如图 1 所示。一旦启动, 光学元件将在其固有振动频率下进行无阻尼振动^[13-14]。施加在压电晶体上的周期性电流、电压会使其产生周期性的形变, 并使光弹晶体内部折射率产生周期性应变, 从而对光信号进行调制^[15]。这种设计下, PEM 维持给定应变振幅所需的外力远小于等效应变下的静应变所需的外力, 具有高效、低功耗的优点^[7]。

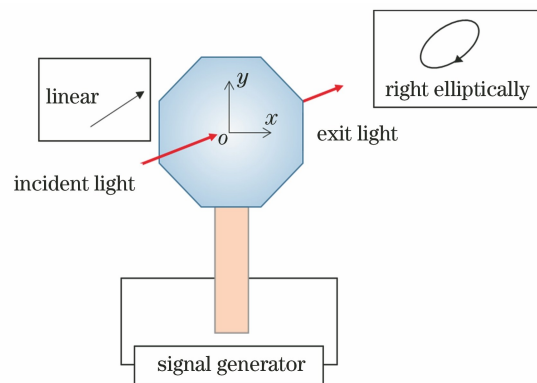


图 1 PEM 工作原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of PEM working principle

石英晶体因具有工艺成熟、相对成本较低、压电特性优越、 Q 值高、单一振动模式好等一系列优势, 是制造 PEM 的最佳选择之一^[16]。将 x -18.5° 切型的压电石英作为压电晶体, 其在长度远大于厚度与宽度时, 具有较好的长度伸缩振动模式。硒化锌和熔融石英作为光弹晶体都具有很好的性能, 但硒化锌的谐振频率大于等于 27.1 kHz, 熔融石英的谐振频率大于等于 42.99 kHz。比较而言, 熔融石英更适合用

于 50 kHz 光弹调制器的制备。因此,选择压电石英为压电晶体,熔融石英为光弹晶体。设计的光弹调制器结构如图 2 所示,其实物图如图 3 所示。

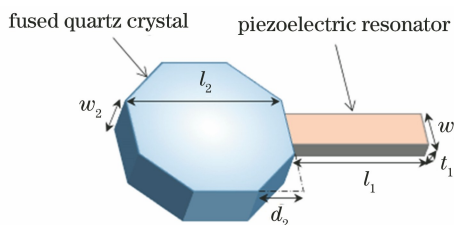


图 2 二维八角对称结构 PEM 示意图

Fig. 2 Schematic diagram of two-dimensional octagonal symmetric structure PEM

对于采用 x -18.5°切型、长度伸缩振动模式的压电石英晶体,其振动频率 f_m 为

$$f_m = m / (2l_1) \sqrt{1 / \sigma s'_{22}}, \quad m = 1, 3, 5, \quad (1)$$

表 1 压电石英晶体弹性柔顺常数 s_{ij} (20 °C)^[17]

Table 1 Elastic compliance constants of piezoelectric quartz crystal s_{ij} (20 °C)^[17] unit: $10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{N}^{-1}$

s_{ij}	s_{11}	s_{33}	s_{12}	s_{13}	s_{55}	s_{66}	s_{14}
Value	12.77	9.60	-1.79	-1.22	20.04	29.12	4.50

s'_{22} 的表达式为

$$s'_{22} = s_{11} \cdot \cos^4 \varphi_1 + s_{33} \cdot \sin^4 \varphi_1 + (2s_{13} + s_{55}) \cdot \cos^2 \varphi_1 \cdot \sin^2 \varphi_1 - 2s_{14} \cdot \cos^3 \varphi_1 \cdot \sin \varphi_1, \quad (2)$$

对于 x -18.5°切型, $\varphi_1 = -18.5^\circ$, 联合表 1 数据及 (2) 式可求得 $s'_{22} = 1.44544 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{N}^{-1}$ 。

根据 (1) 式可进一步求解得到该切型的压电晶体的基频 (即 $m=1$ 时) 的频率常数 K_f 为

$$K_f = f_1 \cdot l_1 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{\sigma s'_{22}}} = 2.5385 \times 10^3 \text{ Hz} \cdot \text{m}, \quad (3)$$

因此,制作目标频率为 $f=50 \text{ kHz}$ 的压电驱动器,压电石英晶体的长度约为 50.77 mm ^[15]。

对于设计的二维八角对称结构的光弹晶体,在 x 和 y 方向上都会产生形变 (该处的二维特指光弹晶体形变是二维的,而非二维材料)。此时熔融石英材料的长度 l_2 为

$$l_2 = \frac{1}{2f} \sqrt{\frac{E}{\eta(1+\nu)}} = 55.57 \text{ mm}, \quad (4)$$

式中: $\eta = 2203 \text{ kg/m}^3$ 为熔融石英材料的密度; $E = 70 \text{ GPa}$ 和 $\nu = 0.17$ 分别为其杨氏模量和泊松比。

所以,目标频率为 50 kHz 的 PEM 的两个重要参数:压电石英晶体的长度和熔融石英材料的边长,经过理论计算分别为 50.77 mm 和 55.57 mm 。

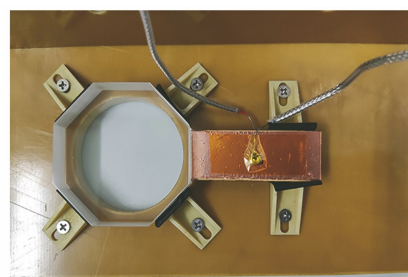


图 3 二维八角对称结构 PEM 实物图

Fig. 3 Physical image of two-dimensional octagonal symmetric structure PEM

式中: l_1 为石英晶体长度; m 为长度伸缩振动的泛音次数,一般压电晶体均工作在基频模式下,即 $m=1$; $\sigma = 2684 \text{ kg/m}^3$ 为石英晶体密度; s'_{22} 为坐标变换后的弹性柔顺系数。压电石英具有 7 个独立的弹性柔顺常数,如表 1 所示。

3 仿真实验与实验验证

3.1 压电石英晶体的仿真

为了验证所设计的 PEM 的谐振频率,利用有限元分析软件进行仿真。对单压电石英晶体进行仿真时,压电晶体材料选择 Quartz LH (1949 IRE)。将库中材料的参数修改为供应商提供的实际参数,材料的密度为 2684 kg/m^3 ,相对介电常数为 2.384。 (xyt) -18.5°切型通过设置旋转坐标系得到。将 $l_1 = 50.77 \text{ mm}$ 输入到有限元分析软件中进行仿真,调整至目标频率为 50 kHz ,得到压电石英晶体的具体参数如表 2 所示。

表 2 目标频率为 50 kHz 的压电石英晶体参数

Table 2 Parameters of piezoelectric quartz crystal with target frequency of 50 kHz unit: mm

Parameter of piezoelectric quartz crystal	Length (l_1)	Width (w_1)	Thickness (t_1)
Value	50.69	19.16	6.48

通过仿真可以得到该尺寸下,压电石英晶体的频率-位移图以及谐振频率下的表面位移图和表面应力分布图,如图 4 所示。其中,图 4(a)给出了压电石英晶体沿长度方向的两端端面在不同激励频率下单位时间内沿长度方向的绝对位移总和。图中显示在 50 kHz 附近,端面的绝对位移总和激增,表明

端面的振动幅度在此时达到最大,即进入谐振状态,这一仿真结果符合预期,较好地验证了第 2 节中介绍的谐振模型。图 4(b)和图 4(c)分别给出了激励频率为 50 kHz 时压电石英晶体的表面位移分布图和表面应力分布图,其中,沿长度方向的两端面处

的表面位移最大、应力最小,中心位置处的表面位移最小、应力最大。从图中可以看到,晶体内部形成了均匀且稳定的驻波,其中两端面处为驻波的波腹,中心位置处为驻波的波节,说明此时晶体内部振动模式单一,达到了稳定的谐振状态。

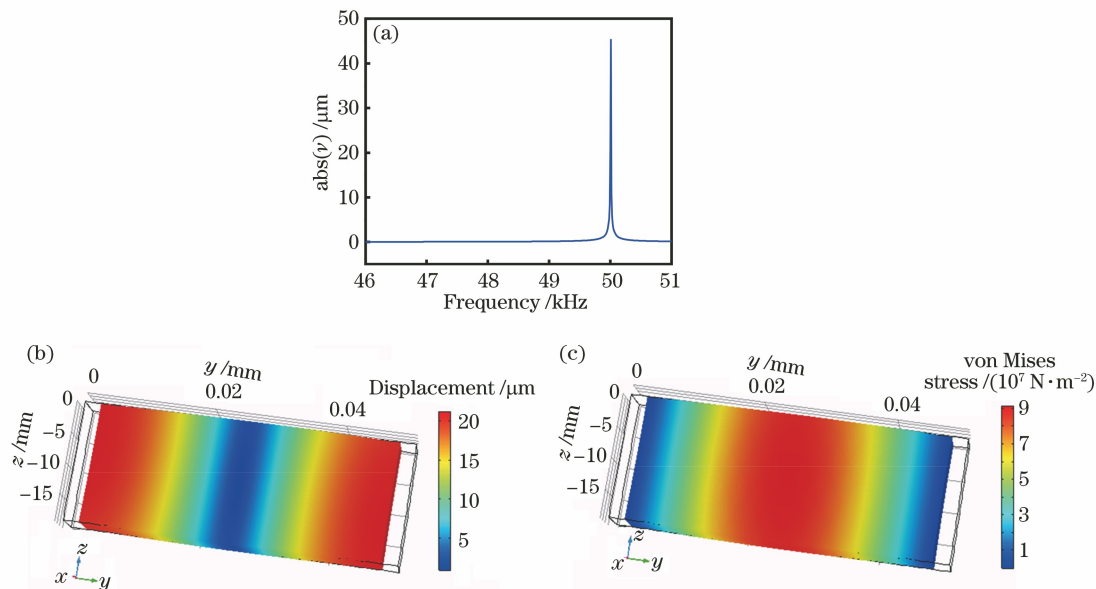


图 4 目标频率为 50 kHz 的压电石英晶体的仿真图。(a)频率-位移点图;(b) 50 kHz 时的表面位移图;(c) 50 kHz 时的表面应力图

Fig. 4 Simulation diagrams of piezoelectric quartz crystal at target frequency of 50 kHz. (a) Frequency-displacement point diagram; (b) surface displacement diagram at 50 kHz; (c) surface stress diagram at 50 kHz

光弹晶体采用有限元分析软件中的 SiO₂ (fused quartz)[solid, average]。材料的泊松比为 0.17,杨氏模量为 70 GPa,密度为 2203 kg/m³。适当调整

参数,使 PEM 的谐振频率为 50 kHz,可以得到熔融石英材料具体参数,如表 3 所示。

表 3 目标频率为 50 kHz 的 PEM 中熔融石英材料的参数

Table 3 Parameters of fused quartz material in PEM with target frequency of 50 kHz unit: mm

Parameter of fused quartz crystal	Length (l_2)	Thickness (t_2)	Distance from chamfer to vertex (d_2)
Value	52.2	16	16.05

通过仿真可以得到 PEM 的频率-位移图、谐振频率下的表面位移图和表面应力分布图,如图 5 所示。其中,图 5(a)给出了 PEM 沿压电晶体长度方向的某一端面在不同激励频率下单位时间内沿压电晶体长度方向的绝对位移总和。图中显示在 50 kHz 附近,此端面的绝对位移总和激增,表明端面的振动幅度在此时达到最大,即进入谐振状态,与图 4 的分析结果类似,这一仿真结果也同样符合预期,较好地验证了第 2 节中介绍的谐振模型。图 5(b)和图 5(c)分别给出了激励频率为 50 kHz 时 PEM 的表面位移分布图和表面应力分布图,由图可知,熔融石英材料内部形成了均匀且稳定的二维驻波,中心位置处为驻波的波节,同样说明此时晶体内部振动模式达到了稳定的谐

振状态,且中心位置处形变最小、应力最大,对入射光线的相位调制也最大。

3.2 PEM 的 LC 模型及实验

基于 LC 电路模型的阻抗分析法可以有效地分析压电振子的谐振特性,而 PEM 虽然由压电石英和熔融石英两部分组成,但两者之间可以近似为刚性连接,且熔融石英处于受迫振动状态。因此,在将整个 PEM 系统作为简谐振子处理的基础上,同样基于 LC 等效电路模型对其进行阻抗分析。

PEM 作为单个简谐振子的 LC 等效电路模型如图 6 所示。其中, C_0 为静电容,代表 PEM 的支架电容; L_1 为动态电感, C_1 为动态电容,代表 PEM 的动态等效参量; R_1 为动态电阻,反映 PEM 的机械

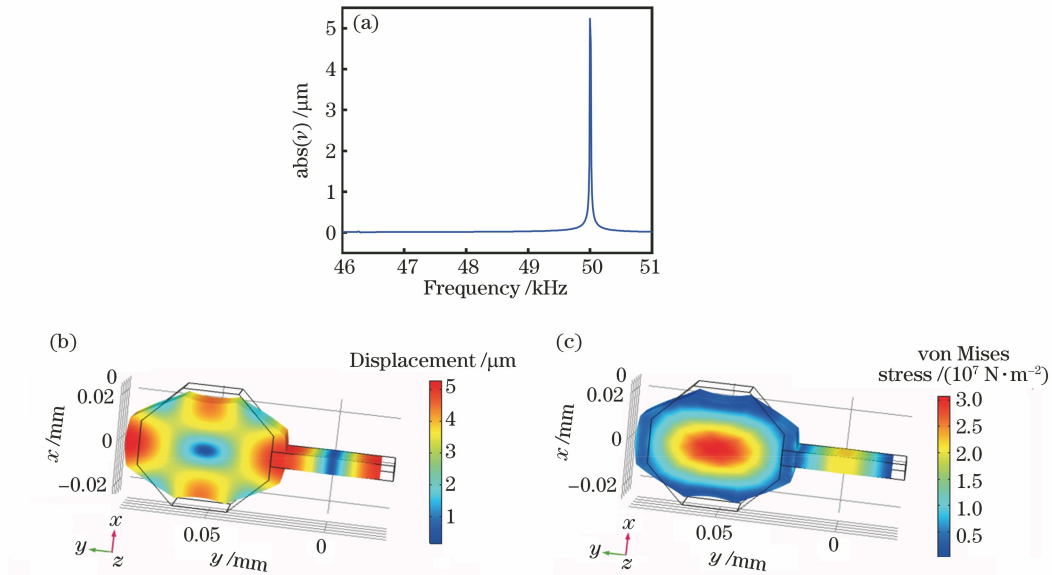


图 5 目标频率为 50 kHz 的 PEM 的仿真图。(a) 频率-位移点图; (b) 50 kHz 时的表面位移图; (c) 50 kHz 时的表面应力图

Fig. 5 Simulation diagrams of PEM at target frequency of 50 kHz. (a) Frequency-displacement point diagram; (b) surface displacement diagram at 50 kHz; (c) surface stress diagram at 50 kHz

损耗。当 $R_1=0$ 时, PEM 的机械损耗为零。这时, 其等效电路如图 7 所示。

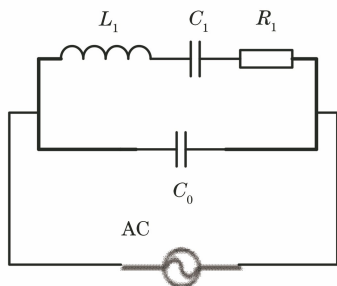


图 6 PEM 的 LC 模型
Fig. 6 LC model of PEM

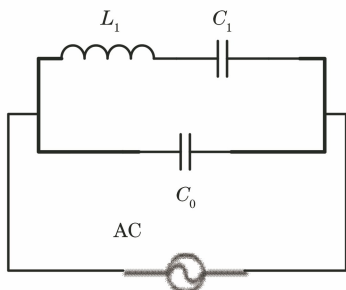


图 7 $R_1=0$ 时, PEM 的 LC 模型
Fig. 7 LC model of PEM with $R_1=0$

当 $R_1=0$ 时, 电路的阻抗绝对值 $|Z|$ 与频率 f 的关系为

$$|Z| = \frac{2\pi f L_1 - \frac{1}{2\pi f C_1}}{2\pi f C_0 \left(2\pi f L_1 - \frac{1}{2\pi f C_0} - \frac{1}{2\pi f C_1} \right)}, \quad (5)$$

由(5)式可导出阻抗最小时的频率。当阻抗最小时, $|Z_m|=0$, 即

$$|Z_m| = 2\pi f L_1 - \frac{1}{2\pi f C_1} = 0, \quad (6)$$

由此得到最小阻抗频率为

$$f_m = 1 / (2\pi \sqrt{L_1 C_1}). \quad (7)$$

根据交流电路理论, 当外加电源频率 $f_s = (2\pi \times \sqrt{L_1 C_1})^{-1}$ 时, LC 电路中出现串联谐振, 因此, f_s 称为串联谐振频率。可以看出, LC 等效电路在动态电阻 $R_1=0$ 时, 存在 $f_m = f_s$ 。

但一般情况下, 机械损耗并不为零。此时, 等效电路的总阻抗 Z 为

$$Z = R_e + jX_e, \quad (8)$$

式中,

$$R_e = \frac{R_1}{\left[1 - \omega C_0 \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} \right) \right]^2 + \omega^2 C_0^2 R_1^2}, \quad (9)$$

$$X_e = \frac{\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} - \omega C_0 \left[R_1^2 + \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} \right)^2 \right]}{\left[1 - \omega C_0 \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} \right) \right]^2 + \omega^2 C_0^2 R_1^2}, \quad (10)$$

$L_1 C_1 R_1$ 串联支路的电抗 X_1 为

$$X_1 = \omega L_1 - 1 / \omega C_1, \quad (11)$$

式中, $\omega = 2\pi f$ 。图 8 给出了总阻抗绝对值 $|Z|$ 、电阻分量 R_e 、电抗分量 X_e 和串联支路电抗 X_1 随频

率变化的曲线。其中, f_m 为最小阻抗频率, f_s 为串联谐振频率, f_r 为谐振频率, f_a 为反谐振频率, f_p 为并联谐振频率, f_n 为最大阻抗频率, $|Z_m|$ 为最小阻抗点, $|Z_n|$ 为最大阻抗点, $|R_r|$ 为谐振时的电阻, R_a 为反谐振时的电阻。

由图 8 可知, 当机械损耗不为零时, $f_m \neq f_s$, 在一级近似下, 认为 $f_m/f_s=1$, 此时与精确值之间的误差为 $-(1/2M^2\gamma)$ 。高质量因数 M 与高电容比 $\gamma(\gamma=C_0/C_1)$ 、 Q 值之间的关系为

$$M = \frac{Q}{\gamma} = \frac{1}{\omega_1 C_0 R_1}, \quad (12)$$

$$Q = \frac{\omega_1 L_1}{R_1} = \frac{1}{\omega_1 C_1 R_1} = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \frac{1}{R_1}, \quad (13)$$

例如, $M^2\gamma = Q^2/\gamma = 1000$ 的 PEM, 按一级近似 $f_m = f_s$ 所引起的误差为 -5×10^{-4} 。所以, 一般都采用一级近似^[17], 即近似认为在 $|Z|$ 值最小时, PEM 达到谐振。根据此原理, 首先, 通过阻抗分析仪分别测量了标称频率分别在 20 kHz 和 23 kHz 的标准 PEM、自制压电石英晶体和自制样品 PEM

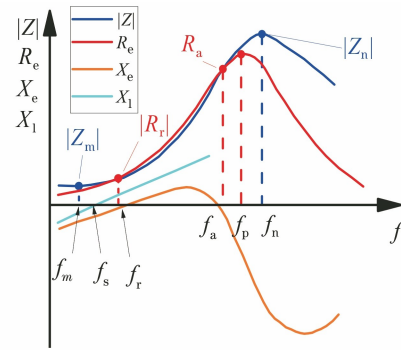


图 8 LC 模型阻抗绝对值 $|Z|$ 、电阻分量 R_e 、电抗分量 X_e 、串联支路电抗 X_1 与频率 f 的关系^[17]

Fig. 8 Relationships between absolute impedance $|Z|$, resistance component R_e , reactance component X_e , series branch reactance X_1 and frequency f in LC model^[17]

的频率-阻抗特性, 得到其谐振频率。然后, 用以上的 LC 电路模型模拟以验证以上原理的正确性, 并计算其 Q 值。图 9 是样品 PEM 频率-阻抗实测图。



图 9 样品 PEM 频率-阻抗实测图

Fig. 9 Frequency-impedance measurement chart of sample PEM

图 10 展示了标称频率分别为 20 kHz 和 23 kHz 的标准 PEM 利用阻抗分析仪测量得到的频率-阻抗图以及用 LC 电路模型模拟得到的频率-阻抗图。其中, 小圆圈曲线代表阻抗分析仪的实际

测量值, 小三角曲线代表 LC 电路模型模拟得到的频率-阻抗关系。图中最小值点和最大值点处分别代表 PEM 的谐振区域和反谐振区域, 小图是谐振频率附近的放大。其中, 圆头箭头和三角箭头分别

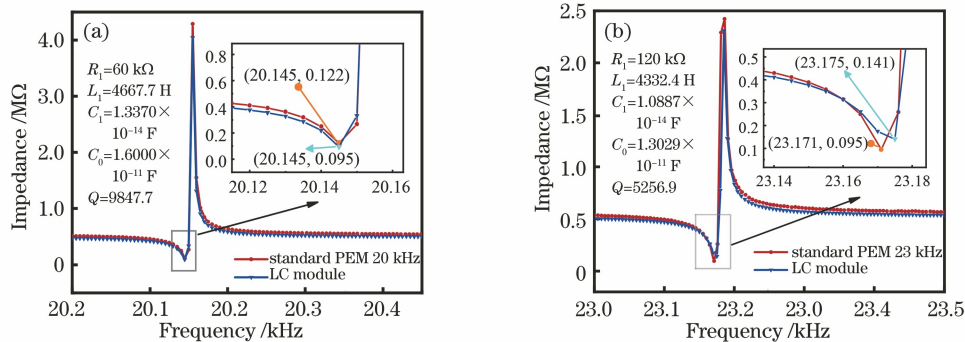


图 10 20 kHz 和 23 kHz 标准 PEM 实测频率-阻抗图及 LC 模型模拟频率-阻抗图。(a) 20 kHz 标准 PEM; (b) 23 kHz 标准 PEM

Fig. 10 Measured frequency-impedance diagram and LC model simulated frequency-impedance diagram of 20 kHz and 23 kHz standard PEMs. (a) 20 kHz standard PEM; (b) 23 kHz standard PEM

指向实际测量得到的谐振点和 LC 电路模拟得到的谐振点。图中左侧的值是 LC 电路的具体参数和品质因子。从图中可以看出,标称频率为 20 kHz 的 PEM,实际测量得到的谐振频率为 20.145 kHz,LC 模型模拟得到谐振频率为 20.145 kHz 的 PEM 的 Q 值为 9847.7。同样,标称频率为 23 kHz 的 PEM,实测得到的谐振频率为 23.171 kHz,LC 模型模拟得到其 Q 值为 5256.9。PEM 在实际工作中,会由于支架

固定、温度上升等因素导致谐振频率稍偏离标称频率,在误差范围内,可以认为测量结果与理论值基本一致。同时,可以看出 LC 电路模型在谐振频率附近可以很好地模拟 PEM 的电学特性。

接着,利用仿真得到的数据,如表 4 所示,分别制备了压电石英谐振器 1、压电石英谐振器 2,以及样品 PEM 1、样品 PEM 2。并通过 LC 模型,对其在谐振频率附近进行了电学特性的模拟和分析。

表 4 目标频率为 50 kHz 的 PEM 的参数

Table 4 Parameters of PEM with a target frequency of 50 kHz

unit: mm

Piezoelectric quartz crystal			Fused quartz crystal		
Length (l_1)	Width (w_1)	Thickness (t_1)	Length (l_2)	Thickness (t_2)	Distance from chamfer to vertex (d_2)
50.69	19.16	6.48	52.2	16.05	16.05

压电石英谐振器 1 和压电石英谐振器 2 的实测频率-阻抗图及 LC 电路模拟得到的频率-阻抗图如图 11 所示。图 11(a)是压电石英谐振器 1 的数据,图 11(b)是压电石英谐振器 2 的数据,其谐振

频率分别为 49.618 kHz 和 49.680 kHz。考虑到样品的加工误差,可以认为实测结果是与理论模型预测基本一致,即这两个样品的 LC 模型也匹配得很好。

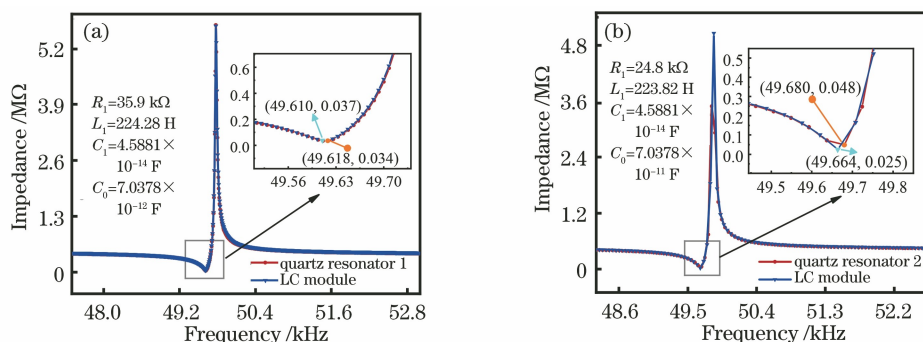


图 11 实测的和 LC 模型模拟的频率-阻抗图。(a)压电石英谐振器 1;(b)压电石英谐振器 2

Fig. 11 Frequency-impedance diagrams of measured and LC model simulated. (a) Piezoelectric quartz resonator 1; (b) piezoelectric quartz resonator 2

将石英谐振器与光弹晶体通过特制胶水粘在一起分别得到样品 PEM 1、样品 PEM 2。再进行阻抗分析,得到的结果如图 12 所示。图 12(a)是样品 PEM 1 的测量数据,图 12(b)是样品 PEM 2 的测量

数据。由图可知,PEM 1 的谐振点为 52.363 kHz,PEM2 的谐振点为 52.353 kHz,二者的 Q 值分别是 5071.2 和 6096.7。

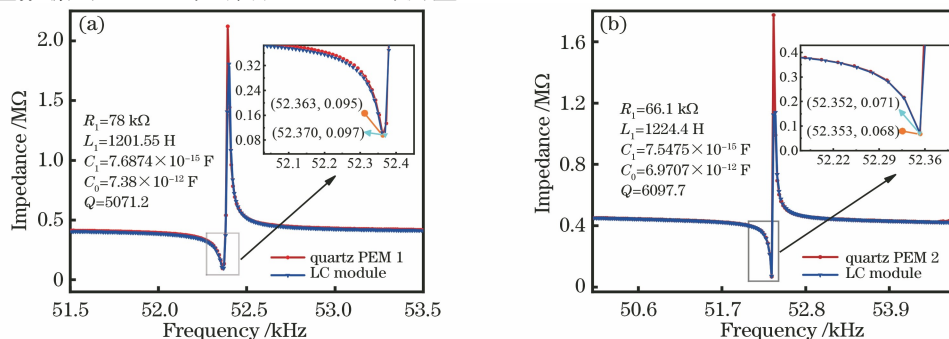


图 12 实测的和 LC 模型模拟的频率-阻抗图。(a)样品 PEM 1;(b)样品 PEM 2

Fig. 12 Frequency-impedance diagrams of measured and LC model simulated. (a) Sample PEM 1; (b) sample PEM 2

4 讨论与结论

从结果来看,样品 PEM 1 和样品 PEM 2 的谐振频率与仿真结果有约 2 kHz 的偏差。偏差的可能来源有如下四个方面:1)仿真中,没有考虑压电晶体和光弹晶体间连接的问题,直接将两者做了一个刚性粘结。而实际上,PEM 是高精度的光学测量仪器,两者之间的连接材料对 PEM 的性能起着不可忽视的作用;2)仿真是在理想条件(悬空、无支架固定、无外界干扰)下进行的,而实际测量中,固定方式、固定松紧等因素会导致实际测量结果与理论值有一定偏差;3)光弹晶体部分没有做单独仿真,最后结果的偏差可能是压电石英晶体和光弹晶体各自的谐振频率稍有偏差导致的不匹配造成的;4)供应商提供的材料参数是一个统计值,样品的实际参数可能与供应商提供的参数有所偏差。综上所述,可以认为实验结果符合预期。

基于 PEM 的基本工作原理,建立了 PEM 的谐振模型,并根据此模型设计、制备了一种谐振频率在 50 kHz 附近的对称型 PEM。同时,提出一种基于阻抗分析方法来测量 PEM 的谐振频率以及品质因子的方法。这种阻抗分析方法主要用于分析如磁致伸缩材料、压电陶瓷等各类器件的阻抗特性,此前,没有公开文献报道将此方法应用到 PEM 谐振特性的研究上。目前主要采用多普勒测振仪来测量 PEM 的光弹晶体振动位移信号变化以确定其谐振频率。但是,多普勒测振仪这类专用测量不仅设备成本相对较高、测量结果容易受到外界影响还不能测量 PEM 的品质因子。提出的基于阻抗分析方法的 PEM 谐振特性测量方法弥补了传统测量方式设备昂贵、误差大,且不能计算品质因子的缺点,对 PEM 的性能测试具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Cheng J C, Nafie L A, Allen S D, et al. Photoelastic modulator for the 0.55–13- μm range[J]. *Applied Optics*, 1976, 15(8): 1960-1965.
- [2] Wang S, Han X, Wang Y N, et al. Dispersion of the retardation of a photoelastic modulator[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(2): 341.
- [3] Zeng A J, Wang X Z, Dong Z R, et al. Application of photoelastic modulator in modulation of polarization direction[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(8): 1063-1067.
曾爱军, 王向朝, 董作人, 等. 光弹调制器在偏振方向调制中的应用[J]. *中国激光*, 2005, 32(8): 1063-1067.
- [4] Li K W, Wang L M, Wang Z B, et al. Polarization characteristic of a photo-elastic modulator with static birefringence and circular dichroism[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(3): 0326001.
李克武, 王黎明, 王志斌, 等. 考虑静态双折射和圆二色性的弹光调制器偏振特性[J]. *光学学报*, 2016, 36(3): 0326001.
- [5] Meng Z J, Li S K, Wang X Z, et al. Simplified analytical method for error sources in mueller matrix imaging polarimeter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(9): 0911002.
孟泽江, 李思坤, 王向朝, 等. 穆勒矩阵成像椭圆偏振误差源的简化分析方法[J]. *光学学报*, 2019, 39(9): 0911002.
- [6] Xing B Z, Ding M, Lu J X, et al. Calibration for phase retardation of photoelastic modulator based on compound Bessel function[J]. *Optik*, 2020, 206: 164322.
- [7] Kemp J C. Piezo-optical birefringence modulators: new use for a long-known effect[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1969, 59(8): 950-953.
- [8] Wang B L, Hinds E, Krivoy E. Basic optical properties of the photoelastic modulator part II: residual birefringence in the optical element[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7461: 746110.
- [9] Canit J C, Badoz J. New design for a photoelastic modulator[J]. *Applied Optics*, 1983, 22(4): 592-594.
- [10] Wang B L, List J. Basic optical properties of the photoelastic modulator part I: useful aperture and acceptance angle[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5888: 58881I.
- [11] Zhou J. Mueller matrix analysis of photoelastic modulator[J]. *Journal of Changshu College*, 2001, 15(4): 19-22.
周军. 光弹调制器应用的 Mueller 矩阵分析[J]. *常熟高专学报*, 2001, 15(4): 19-22.
- [12] Wang L F. The reasearch about matching frequency of photoelastic modulation interference[D]. Taiyuan: North University of China, 2014: 25-27.
王立福. 弹光调制干涉具的频率匹配研究[D]. 太原: 中北大学, 2014: 25-27.
- [13] Zhang R, Chen Y Y, Jing N, et al. High-precision measurement of mid-infrared waveplate phase retardation based on dual photoelastic difference frequency modulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(3): 0312002.
张瑞, 陈媛媛, 景宁, 等. 基于双弹光差频调制的中红外波片相位延迟高精度测量[J]. *光学学报*, 2019,

39(3): 0312002.

- [14] Wang W H. Application of photoelastic scanning method in defect detection of existing curtain wall glass[J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2019, 26(7): 90-93.
 王文欢. 光弹扫描法在既有幕墙玻璃缺陷检测中的应用[J]. 广东土木与建筑, 2019, 26(7): 90-93.
- [15] White N T H, Cole L J. Methods of improving the retardation accuracy and stability of photoelastic modulator devices: US20190243166[P]. 2019-08-08.
- [16] Wei H C, Zhang J L, Wang Z B, et al. Design of piezoelectric crystal driving power based on the photoelastic modulator[J]. Application of Electronic Technique, 2012, 38(6): 68-71.
 魏海潮, 张记龙, 王志斌, 等. 弹光调制压电晶体驱动控制器的设计[J]. 电子技术应用, 2012, 38(6): 68-71.
- [17] Qin Z K. Piezoelectric quartz crystal [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1980: 113-117, 185-193, 279.
 秦自楷. 压电石英晶体 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1980: 113-117, 185-193, 279.