

# 不同谐振状态下弹光调制器的品质因数分析

张敏娟<sup>1,3</sup> 王艳超<sup>3</sup> 王召巴<sup>1,2</sup> 王志斌<sup>1,2,3</sup> 王国梁<sup>3</sup>

<sup>1</sup>中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051

<sup>2</sup>中北大学电子测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051

<sup>3</sup>中北大学信息与通信工程学院, 山西 太原 030051

**摘要** 为了提高弹光调制器在高压驱动下的工作效率,以提高傅里叶变换光谱仪的光谱分辨率,在建立弹光调制器的损耗模型和振动方程的基础上,描述了包含损耗因数的弹光调制器幅频特性,并推导了谐振和反谐振频率下弹光调制器的品质因数。结合压电材料的电致伸缩效应及其损耗,分析了高压驱动下各损耗因数之间的关系,提出了一种较谐振驱动具有更高品质因数和调制深度的反谐振驱动方法。实验验证,当驱动电压在500~1200  $V_{p-p}$ 范围内,反谐振驱动方法较传统的谐振驱动方式,品质因数和调制深度均提高了43%,有效地提高了弹光调制器的工作效率。

**关键词** 光学器件; 弹光调制器; 品质因数; 谐振; 反谐振; 调制深度

中图分类号 O799

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0415002

## Quality Factor Analysis of Photoelastic Modulation with Different Resonant State

Zhang Minjuan<sup>1,3</sup> Wang Yanchao<sup>3</sup> Wang Zhaoba<sup>1,2</sup> Wang Zhibin<sup>1,2,3</sup> Wang Guoliang<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Key Lab of Instrument Science and Dynamic Measurement of the Ministry of Education, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China

<sup>2</sup>State Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China

<sup>3</sup>School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China

**Abstract** In order to improve the efficiency of photoelastic modulation under the high driving voltage, the spectral resolution of Fourier transform spectrometer is improved. Wasting model and vibration equation are established to describe the amplitude-frequency characteristics of photoelastic modulator, including the loss factors, and its quality factor is deduced under the condition of resonant frequency matching and anti-resonant frequency matching. The relationship between loss factors is analyzed under high driving-voltage by combining electrostrictive effect and its loss of piezoelectric material, then anti-resonant frequency driving method is presented, whose quality factor and modulation depth are higher than resonant frequency driving method. Experimental results show that when the drive voltage is in the range of 500~1200  $V_{p-p}$ , quality factor and modulation depth of anti-resonant frequency driving method can be improved 43% compared with resonant frequency driving. Thus, anti-resonant frequency driving method can improve the efficiency of photoelastic modulation.

**Key words** optical devices; photoelastic modulation; quality factor; resonant; anti-resonant; modulation depth

**OCIS codes** 300.6380; 260.5740; 260.1180

收稿日期: 2014-10-14; 收到修改稿日期: 2014-12-01

基金项目: 国家自然科学基金(61127015)、科技部国际科技合作项目(2012DF)

作者简介: 张敏娟(1977—), 女, 博士, 讲师, 主要从事弹光调制器的驱动控制、数据处理等方面的研究。

E-mail: zmj7745@163.com

## 1 引 言

弹光调制傅里叶变换光谱仪(PEM-FTS)基于对弹光晶体双折射率的非线性调制以产生干涉图,其弹光调制器的谐振频率一般在 30~50 kHz,以致于每秒钟可产生上万张干涉图,可满足爆燃、爆轰等瞬态光谱探测的需求<sup>[1-3]</sup>。其高速性是现有傅里叶变换光谱仪无法比拟的。

弹光调制器(PEM)作为 PEM-FTS 的核心部件,其调制深度决定了光谱仪的光谱分辨率和应用范围。而 PEM 的调制深度与弹光晶体的振幅  $A$ 、弹光系数  $\rho$ 、通光路径  $d$  以及品质因数等有关。现有的静态双折射法、反射镜法、多块串接法<sup>[4-6]</sup>等是通过增加通光路径  $d$ ,以提高调制深度,实现光谱分辨率的增加。但是该类方法并没有提高单块 PEM 在单次光路中的调制深度,且使光能利用率大幅度减小<sup>[7]</sup>。

为了提高 PEM 的调制深度,以提高复原光谱的光谱分辨率,本文在建立弹光调制器振动模型的基础上,分析了 PEM 在谐振频率和反谐振频率下的频率特性和品质因数,并提出了一种基于反谐振频率下的弹光调制器的高压驱动技术。该技术与现有的驱动技术相比较,能有效地提高弹光调制器的品质因数和调制深度,因此,能在不降低光能利用率的前提下,实现 PEM 单次入射调制光程差的增加,提高光谱分辨率。

## 2 弹光调制器的特性分析

本课题组研究的改进 KEMP 型 PEM 实物如图 1 所示,由压电晶体和石英晶体构成的多物理场耦合器件,压电晶体采用  $(xyt)-18.5^\circ$  切型,石英晶体采用八角形。为了提高 PEM 的调制深度,有必要对压电晶体和石英晶体的阻抗和品质因数进行分析。

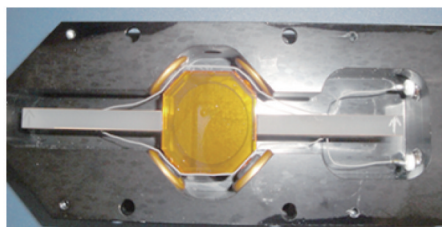


图 1 PEM 实物图

Fig.1 Picture of PEM

从电学的角度分析,压电晶体可等效为能量传递的二端口驱动器,石英晶体作为负载<sup>[8-9]</sup>。

在正弦激励信号  $E = E_0 \exp(j\omega t)$  作用下,压电晶体基于逆压电效应处于长度伸缩振动模式,如图 2 所示。其长度  $l$ 、宽度  $w$ 、厚度  $t$ ,满足  $l \gg w \gg t$ 。

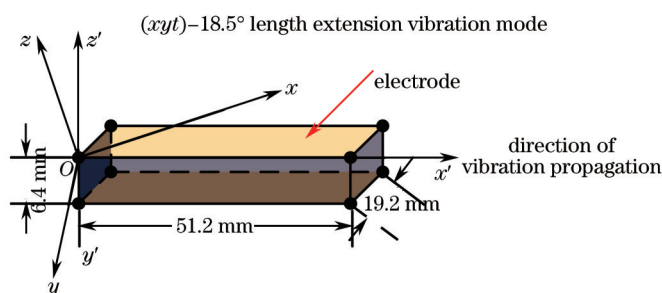


图 2 压电振子振动模型

Fig.2 Vibration model of piezoelectric devices

由于在振动过程中,压电晶体两端处于自由状态,结合机械自由和电学短路的边界条件,可以得到理想状态下,压电驱动器的等效导纳<sup>[10-11]</sup>:

$$Y = Y_d + Y_m = j\omega \frac{\epsilon^T w l}{b} \left[ 1 - k^2 + k^2 \frac{\tan\left(\frac{\omega l}{2v}\right)}{\frac{\omega l}{2v}} \right], \quad (1)$$

式中  $\omega$  为驱动信号频率,  $\epsilon^T$  为恒定应力时的介电常数,  $k$  为机电耦合系数,  $v$  为在石英晶体中传播的声速。

已知压电晶体在正弦交流信号激励下,存在一个谐振频率点  $\omega_r$  和一个反谐振频率点  $\omega_a$ 。当压电石英驱动器工作在谐振频率  $\omega_r$  时,满足  $\frac{\tan(\omega l/2v)}{\omega l/2v} = \infty$ ,工作在反谐振频率  $\omega_a$  时,满足  $\frac{\tan(\omega l/2v)}{\omega l/2v} = \frac{k^2 - 1}{k^2}$ 。

弹光调制器在振动过程中,其能量损耗由初始条件下的介电损耗、振动过程中的机械损耗和压电损耗 3 部分组成<sup>[12-13]</sup>,将各损耗因子带入(1)式,可得到包含损耗的 PEM 导纳表达式:

$$Y = Y_d + Y_m = j\omega C_d(1 - j \tan \delta') + j\omega C_0 k^2 \left\{ \left[ 1 - j(2 \tan \theta - \tan \phi) \right] \frac{\tan(\omega l/2v^*)}{\omega l/2v^*} \right\}, \quad (2)$$

式中  $C_0 = \frac{wl}{b} \epsilon^T$ ,  $C_d = C_0(1 - k^2)$ ,  $\tan \delta' = \frac{1}{1 - k^2} [\tan \delta - k^2(2 \tan \theta - \tan \phi)]$ ;且有,  $\delta$  为电位移  $D$  与电场  $E$  之间的相位延迟;  $\phi$  为应变  $s$  与应力  $T$  之间的相位延迟,  $\theta$  为应变  $s$  与电场  $E$  之间的相位延迟。

### 3 在谐振和反谐振驱动下 PEM 的品质因数

为了便于分析 PEM 在不同驱动频率下的等效导纳,定义归一化频率因数  $\Omega = \frac{wl}{2v}$ ,且有 PEM 在谐振状态下满足  $\Omega_r = \frac{\pi}{2}$ ,反谐振状态下  $\Omega_a = 0$ 。

#### 3.1 谐振频率下 PEM 的品质因数 $Q_r$

由(2)式可知,PEM 在工作在谐振频率  $\omega_r$  时,其动态等效导纳为最大值,即:

$$Y_m^{\max} = \frac{8\omega_r C_0 k^2}{\pi^2 \tan \phi}, \quad (3)$$

当 -3 dB 的等效带宽为  $\Delta\Omega_r = \frac{\pi \tan \phi}{4}$  时,  $Y_m = \frac{\sqrt{2}}{2} Y_m^{\max}$ 。根据品质因数  $Q$  的定义,可以得谐振频率  $\omega_r$  下 PEM 的品质因数为

$$Q_r = \frac{\Omega_r}{2\Delta\Omega_r} = \frac{1}{\tan \phi}. \quad (4)$$

#### 3.2 在反谐振频率下 PEM 的品质因数 $Q_a$

当 PEM 工作在反谐振状态时,由(2)式可以得到 PEM 的等效导纳为

$$Y(\Omega_a) = \frac{2vC_0}{l} (Y_1 + jY_2), \quad (5)$$

式中  $Y_1 = \tan \delta'(1 - k^2)\Omega_a + \left( 2 \tan \theta - \frac{3}{2} \tan \phi \right) k^2 \tan \Omega_a + \tan \phi k^2 \frac{\Omega_a}{2 \cos^2 \Omega_a}$ ,  $Y_2 = (1 - k^2)\Omega_a + k^2 \tan \Omega_a$ 。

且动态导纳  $Y_m$  为最小值,满足  $Y_2 = 0$ 。由此可得反谐振状态下,导纳为

$$Y^{\min} = A^2 \Omega_a^2, \quad (6)$$

式中  $A = (\tan \delta + \tan \phi - 2 \tan \theta) + \frac{\tan \phi}{2} \left[ 1 + \left( k - \frac{1}{k} \right)^2 \Omega_a^2 \right]$ 。

PEM 反谐振状态 -3 dB 带宽范围内,存在  $Y(\Omega_a) = Y(\Omega_a + \Delta\Omega_a) = 2Y^{\min}$ 。根据泰勒级数展开式的一阶近似,可以得到:

$$A^2 \left( \frac{\Omega_a}{\Delta\Omega_a} \right)^2 + 2AB \left( \frac{\Omega_a}{\Delta\Omega_a} \right) - (B^2 + C^2) = 0, \quad (7)$$

式中  $B = (1 - k^2) \tan \delta' + k^2 \left( 2 \tan \theta - \frac{3}{2} \tan \phi \right) \frac{1}{\cos^2 \Omega_a} + k^2 \tan \phi \frac{1 + 2\Omega_a \tan \Omega_a}{2 \cos^2 \Omega_a}$ ,  $C = (1 - k^2) + \frac{k^2}{\cos^2 \Omega_a}$ ,且满足  $C \gg B$ 。

因此,可以得到反谐振频率下 PEM 的品质因数为

$$Q_a = \frac{\Omega_a}{2|\Delta\Omega_a|} = \frac{(1 - k^2) + (k^2 / \cos^2 \Omega_a)}{2(\tan \delta + \tan \phi - 2 \tan \theta) + \left\{ \left[ 1 + \left[ k - (1/k) \right]^2 \Omega_a^2 \right] \tan \phi \right\}}, \quad (8)$$

将(8)式整理,可以得到  $Q_a$  与  $Q_r$  之间的关系为

$$\frac{1}{Q_a} = \frac{1}{Q_r} + \frac{2}{1 + [k - (1/k)]^2 \Omega_a^2} (\tan \delta + \tan \phi - 2 \tan \theta), \quad (9)$$

由(9)式可知,  $Q_a$  与  $Q_r$  二者之间的差异取决于  $\tan \delta + \tan \phi$  与  $2 \tan \theta$  之间的关系。

### 3.3 $Q_a$ 与 $Q_r$ 比较分析

已知在低压驱动下,基本压电方程能够完整描述压电振子的物理模型,但在高压驱动条件下,除正、逆压电效应外,还应该考虑电致伸缩效应对压电振子性能的影响<sup>[14]</sup>。在高压驱动下,压电换能器完整压电方程可表示为

$$s = s_{11}^E T + d^* E + M^* E^2, \quad (10)$$

$$D = \varepsilon_{33}^T E + d^* T + 2M^* \cdot E \cdot T, \quad (11)$$

式中  $M^*$  为电致伸缩系数。在电学短路和机械自由边界条件下,外电场  $E$  诱导压电振子产生压电极化和自发极化,压电振子发生的形变包含逆压电效应和电致伸缩效应两部分,其损耗包含介电损耗和电致伸缩损耗;应力  $T$  诱导压电振子产生应变,应变引起的极化仅包含压电效应,不包含电致伸缩效应。因此,在高压驱动下,PEM的损耗因数满足条件:

$$\tan \delta + \tan \phi - 2 \tan \theta < 0, \quad (12)$$

即有:  $Q_a > Q_r$ 。

将(12)式代入(9)式,可知在反谐振频率驱动下,PEM有比较高的品质因数。以致于在相同驱动力作用下,PEM的调制深度提高,双折射率差增加,产生更大的光程差,以提高仪器的光谱分辨率。

## 4 实验验证

为了提高光谱分辨率,课题组设计了二维振动的PEM,如图1所示,其弹光晶体采用八角形结构、尺寸为  $33.2 \text{ mm} \times 33.2 \text{ mm} \times 32 \text{ mm}$  的硒化锌晶体,驱动器采用两个对称安装的长条形石英晶体,经实测后PEM的谐振频率和反谐振频率分别为  $49.889$  和  $50.285 \text{ kHz}$ 。为了验证PEM在谐振和反谐振匹配条件下的工作效果和品质因数,搭建了如图3所示的实验装置,其入射光源为  $632 \text{ nm}$  激光器,采用 Throlabs 公司的 PDA10-CE 型光电探测器实现干涉图的检测,激光多普勒测振仪记录PEM的振幅。

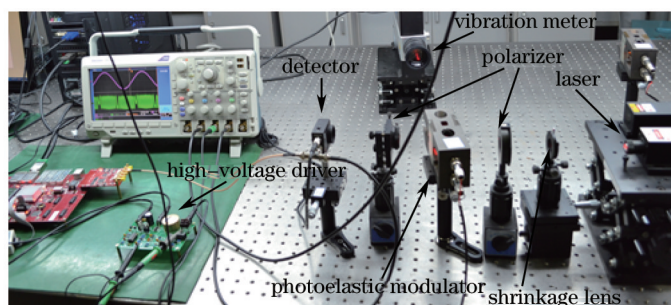


图3 PEM调制效率测试图

Fig.3 Experiment for modulation efficiency test of PEM

首先,在驱动电压为  $1000 V_{p-p}$  时,以扫频方式对PEM进行驱动,通过测量不同频率下PEM的电流幅值,并结合谐振和反谐振频率幅频特性曲线,绘制出如图4所示的PEM驱动频率和电流变化曲线。从图4中可以看出,设计的PEM的谐振频率为  $49.886 \text{ kHz}$ ,反谐振频率为  $50.284 \text{ kHz}$ 。当驱动电路采用反谐振频率驱动PEM时,负载电流为最小值;且随着反谐振品质因数的增加,负载电流减小。

在驱动电压  $500 \sim 1200 V_{p-p}$  范围内,分别记录单次入射条件下PEM在谐振频率和反谐振频率驱动下的调制光信号,绘制出图5所示的电压光程差(OPD)变化曲线。实验结果表明,在驱动电压比较低(小于  $350 \text{ V}$ )时,两种谐振匹配方式调制干涉图的光程差基本相同,因此有相同的调制效率;随着驱动电压的增加(大于  $350 \text{ V}$ ),反谐振频率匹配与谐振频率匹配驱动方式相比,反谐振频率驱动下,调制的干涉图的最大光程差比谐振频率驱动下提高了  $43\%$ ,即说明了PEM在反谐振频率点具有更高的品质因数,压电石英驱动器能够获得更高的带负载能力。这与理论推导结论是相同的。

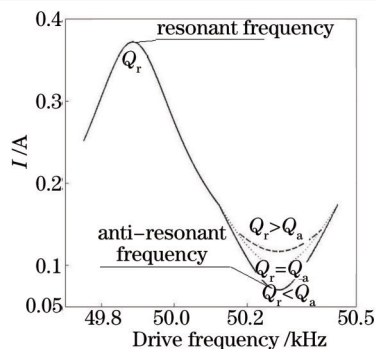


图4 频率-电流曲线

Fig.4 Frequency-current curve

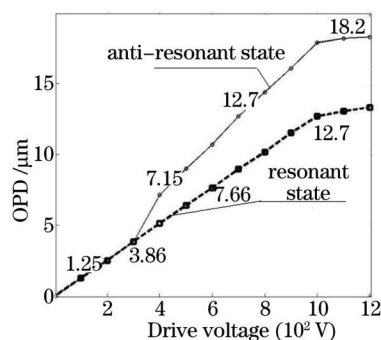


图5 电压-光程差曲线

Fig.5 Voltage-OPD curve

## 5 结 论

针对PEM的调制深度与光谱分辨率有关,在分析弹光调制器振动模型的基础上,分别对谐振和反谐振匹配型的PEM的品质因数进行推导,得出反谐振匹配型PEM较谐振匹配型PEM有比较高的品质因数。并在恒定电压下以扫频方式驱动PEM,绘制了其电流-频率曲线,对比了谐振和反谐振驱动下的品质因数;在相同的驱动电压下,通过检测两种谐振状态下的调制光程差,以比较两种谐振状态下的PEM的调制深度。实验表明,PEM在反谐振频率驱动下,在不降低PEM光能利用率的前提下,将单次入射调制的光程差增加43%,提升了PEM在高压驱动下的调制深度,使得PEM-FTS的光谱分辨率得到提高。

## 参 考 文 献

- 1 Arno Simon, Jurgen Gast, Axel Keens. Fourier spectrometer: US, 5309217[P]. 1994-05-03.
- 2 Gao Zhan. Static Fourier-transform spectrometer with spherical reflectors[J]. Applied Optics, 2002, 41(3): 560-563.
- 3 J C Kemp. Piezo-optical birefringence modulators: new use for a long-known effect[J]. J Opt Soc Am, 1969, 59(8): 950-954.
- 4 Theodore C Oakberg. Relative variation of stress-optical coefficient with wavelength in fused silica and calcium fluoride[C]. SPIE, 1999, 3754: 226-234.
- 5 Theodore C Oakberg. Modulated interference effects: use of photoelastic modulators with laser[J]. Optical Engineering, 1995, 34(6): 1545-1550.
- 6 Tudor N Buican. Controlling resonant photoelastic modulators: US, 6970278B1[P]. 2005-11-29.
- 7 Arthur H Carrier, Tudor N Buican. Ultra-high speed solid-state FTIR spectroscopy and applications for chemical defense[C]. Proceedings for the Army Science Conference (24th), 2004. ADA431953.
- 8 Wang Jinfeng, Dong Huomin, Zhang Peilin, et al.. Analyses of the thickness vibration modes for (yxl)  $\phi$ -cut quartz thin plates[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 1998, 20(2): 99-102.  
王矜奉,董火民,张沛霖,等.(yxl)  $\phi$ 切压电石英谐振器振动模式分析[J]. 压电与声光, 1998, 20(2): 99-102.
- 9 Tian Wenjie, Lu Junling, Liu Lingling, et al.. The characteristics and applications of a shear-vibrating quartz crystal resonator[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2006, 28(2): 150-152.  
田文杰,路峻岭,刘玲玲,等.切变振动型石英晶体谐振器的特点及其应用[J]. 压电与声光, 2006, 28(2): 150-152.
- 10 Zhang Jiahong, Chen Fushen, Li Wanjun. Influence of frequency characteristics by piezoelectric effect on LiNbO<sub>3</sub> integrated optical waveguide electric field sensor[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0105006.  
张家洪,陈福深,李万军.压电效应对LiNbO<sub>3</sub>集成光波导电场传感器频率特性的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0105006.
- 11 Seiji Hirose, Akinori Yamada, Takehiro Takano, et al.. Newly developed measuring method of high-power characteristics of piezoelectric transducer constants including dielectric loss[C]. SPIE, 1997, 13241: 436-442.
- 12 Baoliang Wang, Emily Hinds, Erica Krivoy. Basic optical properties of the photoelastic modulator part II: residual birefringence in the optical element[C]. SPIE, 2009, 7461: 746110.
- 13 Tatsuya Izumi, Manabu Hagiwara, Takuya Hoshina, et al.. Analysis of vibration waveforms of electromechanical response to determine piezoelectric and electrostrictive coefficients[J]. IEEE Transactions on Ultrasonic, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2012, 59(8): 1632-1638.
- 14 Yu Youlong, Tan Ling, Li Qian, et al.. Influence of thermal effect caused by piezoelectric ceramic transducer on interferometric demodulation for fiber Bragg grating sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0506005.  
余有龙,谭玲,李茜,等.压电陶瓷发热对光纤光栅传感信号干涉解调的影响[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0506005.

栏目编辑:张雁