

DOI: 10.7652/xjtuxb201410008

激光激励下石英音叉的振动分析与测量

马斌山, 贾书海, 张周强, 陈花玲
(西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对民航客机微量爆炸物的检测这一难题,对采用石英音叉的光声信号探测原理进行了分析,对光声光谱遥测的光路进行了简化,减少了激光能量的损失,然后建立了实验系统,对石英音叉在激光直接激励时的幅频特性进行了测试,探讨了激光光照位置对于石英音叉振幅的影响。结果表明,当激光光斑在石英音叉叉臂根部偏上约 0.2 mm 处时,石英音叉振幅达到最大值,激光光斑继续向上移动,石英音叉振幅减小,验证了石英音叉振幅与激光功率成正比这一论点。该研究为后续开展远距离光声光谱遥测奠定了基础。

关键词: 光声光谱遥测;光激励;石英音叉;振动分析;振动测量

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)10-0049-05

Vibration Analysis and Measurement for Quartz Tuning Fork under Laser Irradiation

MA Binshan, JIA Shuhai, ZHANG Zhouqiang, CHEN Hualing
(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The trace explosive detection in airline security is still difficult. The principle of detecting the photo-acoustic signals produced by quartz tuning fork is analyzed, then the optical path is simplified with the propose to reduce the energy loss of laser. After the analysis of the amplitude of the quartz tuning fork and the signals produced by the quartz tuning fork, an experimental system is established and the amplitude-frequency characteristic curve of the quartz tuning fork irradiated by laser is acquired. In addition, the influence of the location of laser spot on the amplitude of the quartz tuning fork is measured. And it shows that the amplitude of the quartz tuning fork reaches the maximum when the laser spot is about 0.2 mm above the bottom of the prongs of the quartz tuning fork, laser spot moves up along the prongs, the amplitude decreases gradually, and the fact that the amplitude of the quartz tuning fork is proportional to the laser energy is verified. It is expected to apply to standoff photo-acoustic spectroscopy detection.

Keywords: standoff photoacoustic detection; optical excitation; quartz tuning fork; vibration analysis; vibration measurement

光声光谱技术是一种独特的光谱测量方法,它不是通过检测光谱本身,而是检测物质吸收光后,通过无辐射跃迁返回基态时,由激发能转变成热能激发出的声波获取光谱信息的^[1-2]。自从美国奈斯大

收稿日期: 2014-04-08。 作者简介: 马斌山(1989—),男,硕士生;贾书海(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金委员会与中国民航局联合资助项目(U1233116);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20120201110032)。

网络出版时间: 2014-06-06 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20140606.1541.003.html>

学 Kosterev 在 2002 年提出用石英音叉作为传感器(取代传统光声池)进行痕量气体检测以来,石英增强光声光谱技术得到了长足发展。由于石英音叉具有高共振频率、高品质因子(空气中可以达到 10 000)等特性,可以保证环境噪声对石英音叉的影响很小,同时谐振频率之外的信号被抑制,所以极大地提高了光声光谱技术探测的灵敏度。

但是,国内对于石英增强光声光谱的研究主要集中于痕量气体检测中,将石英音叉用于远距离光声光谱检测中的研究并不多见。痕量气体检测中将光强经过调制的激光汇聚后通过石英音叉臂之间的缝隙,由于缝隙中的气体吸收激光后产生周期性膨胀,从而激励石英音叉产生振动^[3-6]。光声光谱遥测装置中直接将被测物体的反射光汇聚后照射到石英音叉上,由激光的热效应激励起石英音叉振动。两者激励方式的差异导致不能直接将痕量气体检测中的结论用于光声光谱遥测。因此,为了探究光声光谱遥测中石英音叉的激振原理与特性,本文简化了远距离光声光谱探测中的光路,就简化后光路中石英音叉的振动进行了理论分析与实验检测。该研究为后续开展远距离光声光谱遥测奠定了基础。

1 光声光谱遥测原理

光声光谱遥测的原理如图 1 所示。计算机控制激光调制器对激光器进行光强调制,调制频率与石英音叉的共振频率一致,调制后的激光照射到被测物体,然后使用凹面镜收集被测物体的反射光,再将反射光汇聚后直接照射到石英音叉上激励起石英音叉的共振。由于石英音叉臂的振幅与照射到石英音叉上的光强有关,且不同物体对于不同波长的光吸收程度不同,所以当被测物质对某一波长的光吸收越弱时,照射在石英音叉上的光就越强,激励起的石英音叉振幅就越大,产生的压电信号就越强。同理,如果被测物质对某一波长的光吸收较强,那么激励起的石英音叉振幅就比较小,产生的压电信号就较

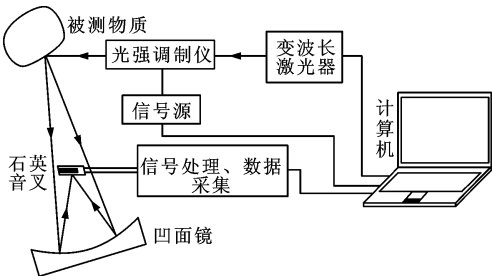


图 1 光声光谱遥测原理

弱,连续改变照明激光的波长,从而可以测得物质的吸收光谱。因此,通过探测石英音叉产生的压电信号就可以实现对物质种类的辨别。这在机场安检时微量爆炸物以及新型危险物品的检测中具有广阔的应用前景。

2 石英音叉振动测量原理

鉴于上述原因,探究在调制光直接激励下石英音叉的振动原因,并对其进行测量,对光声光谱遥测技术的研究具有重要意义。为了对这一问题进行探究,本文对光声光谱遥测的光路做了适当修改,暂时先不考虑被测物质,直接将调制后的激光照射到石英音叉上激励起石英音叉振动。这样做与光声光谱遥测中石英音叉的激振原理一致,只是由于没有被测物质对激光的反射与收集环节,所以照射到石英音叉上的光功率比较大,更容易激励起石英音叉振动,石英音叉输出的信号也比较强。这种区别并不影响对激光激励下石英音叉振动原理的研究,经过修改后的试验系统如图 2 所示。

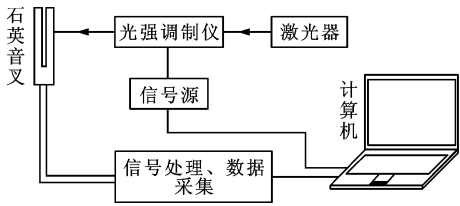


图 2 实验原理示意图

石英音叉可由频率为 32.768 kHz 的商业晶振去掉封装后得到,其结构如图 3 所示。当石英音叉受到交变力的作用时,由于石英晶体具有压电效应,石英音叉将产生一个与激励同频率的压电信号,如果激励的频率与石英音叉的谐振频率相等,石英音叉的振幅将达到最大,石英音叉输出的压电信号也达到最大值。由于石英音叉具有很高的品质因子 Q ,因此对谐振频率以外的干扰具有很好的抑制作

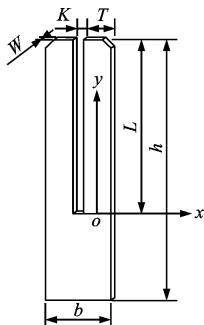


图 3 石英音叉结构示意图

用。在石英音叉的后端接入放大器对石英音叉的输出信号进行放大,放大电路原理图如图 4 所示^[7]。

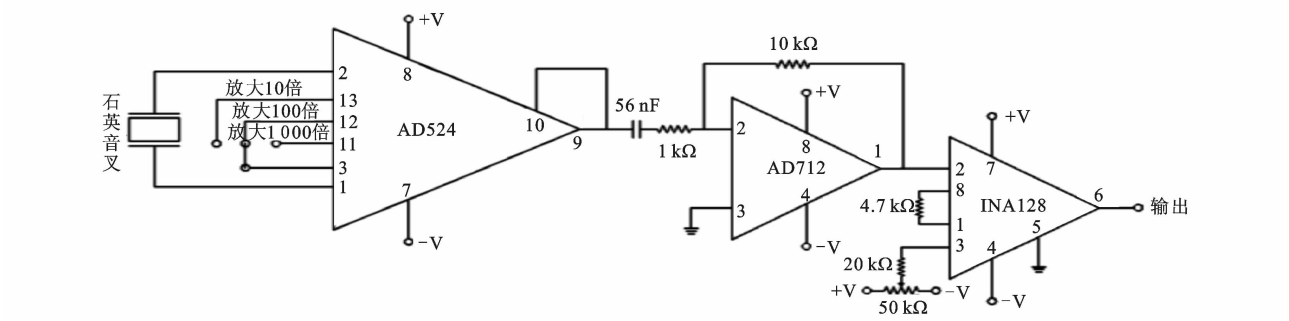


图 4 石英音叉信号放大电路原理图

为了滤除不需要的信号,在放大电路之后接入中心频率为 32.7 kHz、带宽为 2 kHz 的带通滤波器,滤波器电路原理图如图 5 所示。

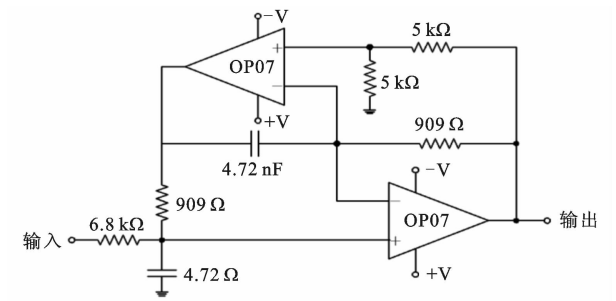


图 5 带通滤波器电路原理图

2.1 理论分析

当石英音叉受到调制激光照射时,石英音叉的振动主要由两个原因引起:①光照射到石英音叉表面上后,由于光子动量在石英音叉表面发生改变,从而使石英音叉受到力的作用,同时光强的变化导致照射到石英音叉表面的光子数目发生变化,从而使石英音叉受到交变力的作用而引起石英音叉振动;②由于光强经过调制,所以光照射到音叉上会使音叉受到交变的热载荷,从而引起音叉振动^[8-9]。这两个力各自的作用与材料对光的反射率、材料对光的吸收率、材料的导热性、气压、温度以及激励光的波长等外在条件有关。

石英音叉由于光子动量在石英音叉表面发生改变而受到的力可以表示为

$$F = \frac{\Phi}{c} P \tag{1}$$

式中: Φ 是与石英音叉表面反射率有关的系数,用来表示光子与石英音叉表面作用时动量改变量的大小,当光子全部被反射时, Φ 取 2,当光子全部被吸收时, Φ 取 1,当光子全部穿过不被吸收时, Φ 取 0; c 表示真空中的光速; P 表示照射到石英音叉上的光功率^[9]。

实验中,采用激光功率计对最终照射到石英音叉上的激光功率进行测量,测得功率为 0.13 mW,光速 c 取 3.0×10^8 m/s,由于石英音叉表面镀有电极,所以石英音叉对光子的反射介于全部反射与全部吸收之间。为了对石英音叉所受的力进行估算, Φ 取 1.5,计算得到石英音叉受到的力 F 为 6.5×10^{-13} N。

2.2 仿真计算

使用 ANSYS Workbench 对石英音叉在这个周期激励下的响应进行计算,由于激光经过汇聚后光斑很小,所以可以等效为集中力后施加在石英音叉叉臂上。同时由力学知识可以知道,光照射到不同部位,激励起的石英音叉振幅不相同。为了充分估计石英音叉在这个周期激励下的响应,在有限元计算中将这个周期激励力加在石英音叉叉臂上端,仿真结果如图 6 所示。从图 6 中发现,施加力的石英音叉叉臂和不施加力的石英音叉叉臂产生的变形不一致,施加力的石英音叉叉臂产生的振幅为 1.29×10^{-15} m,不施加力的石英音叉叉臂产生的变形为 1.14×10^{-15} m。

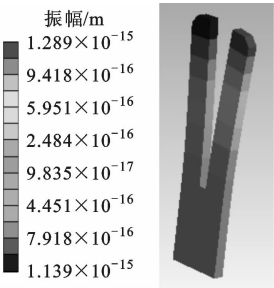


图 6 石英音叉振动仿真结果

石英音叉叉臂尖端振幅与产生的压电电压之间有如下关系^[10]

$$\frac{V_{(x,y)}}{u_L} = \frac{3}{2} \frac{d_{11}}{\epsilon_0} E(L-y) \frac{x^2}{L^3} \tag{2}$$

式中: u_L 代表石英音叉臂顶部振幅; d_{11} 代表石英音叉横向压电模量, 数值为 $2.31 \times 10^{-12} \text{ C/N}$; E 表示杨氏模量, 对于石英材料 $E = 7.87 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$; L 代表石英音叉臂长度; x 、 y 为与石英材料晶轴方向一致的坐标轴, x 的坐标原点在音叉臂外缘面对称面处, y 的坐标原点在音叉臂末端。

当 $x = \pm T/2$ 、 $y = 0$ 时, V 取最大值, 带入数值得到^[10]

$$\frac{V_{\max}}{u_L} = 15.4 \left(\frac{T}{L} \right)^2 \quad (3)$$

实验中石英音叉臂宽度 $T = 0.6 \text{ mm}$, 叉臂长度 $L = 4 \text{ mm}$, 所以 $V_{\max}/\mu_L = 346.5 \text{ V}/\mu\text{m}$ 。由于石英音叉的振幅与光功率成正比^[11-12], 所以测量出石英音叉的电压之后, 就可以知道石英音叉的振幅。

2.3 实验装置

实验采用的装置如图7所示。激励光源采用波长为 532 nm 的半导体泵浦固体倍频激光器, 激光器的输出经过光强调制器调制成按正弦规律变化之后照射到石英音叉上, 激起石英音叉振动, 经激光功率计进行测试, 最终照射到石英音叉上的激光功率为 0.13 mW 。石英音叉信号放大电路如图4所示, 为了减小外界干扰, 整个实验过程采用锡箔纸对电路进行屏蔽。实验中, 石英音叉裸露在空气中, 温度为室温, 气压为外部大气压。

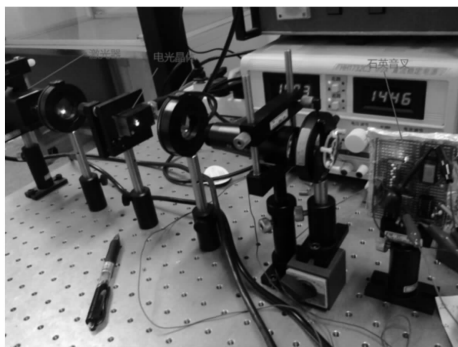


图7 石英音叉振动实验装置

3 实验结果

实验发现, 采用激光激励石英音叉, 在石英音叉谐振频率处, 电路输出为 4.625 V 。由于电路对石英音叉信号放大倍数为 $30\,000$ 倍, 所以石英音叉输出信号为 $4.625 \text{ V}/30\,000 = 0.15 \text{ mV}$ 。利用石英音叉振幅与石英音叉输出电信号的对应关系式(3)可以知道, 石英音叉振幅约为 0.432 pm 。经过与有限元仿真计算的结果对比可以知道, 在激光照射下, 石英音叉振动主要由激光的热效应引起。改变信号源

频率, 可以测到石英音叉振幅随频率变化的曲线, 如图8所示。

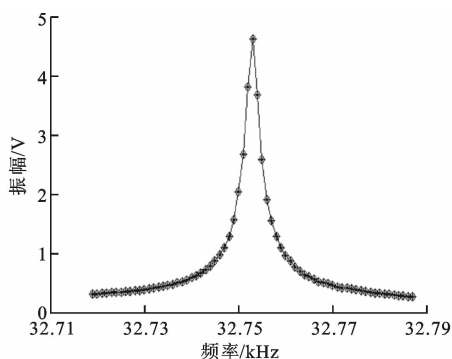


图8 石英音叉幅频特性

调整光调制器的频率为石英音叉的谐振频率 32.754 kHz , 改变调制光照射到石英音叉上的位置, 使激光光斑在音叉臂侧面沿着 x 轴方向移动, 如图9所示, 石英音叉输出信号随照射到石英音叉臂上光斑位置的变化规律如图10所示。

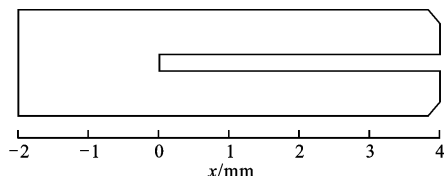


图9 石英音叉坐标示意图

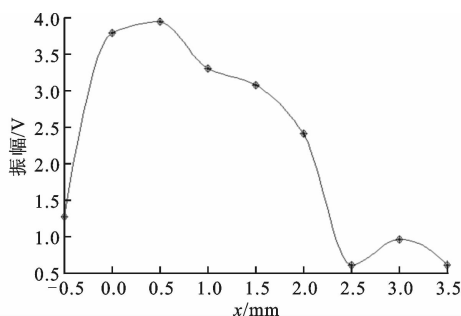


图10 石英音叉输出信号随激光光斑位置变化曲线

由图10可见: 当激光照射石英音叉底部时, 石英音叉的振幅很小; 随着激光光斑向上移动, 石英音叉的振幅增大, 石英音叉输出在激光照射石英音叉叉臂根部偏上约 0.2 mm 处达到最大值; 随着激光光斑位置继续向音叉顶部移动, 石英音叉的振幅逐渐减小, 曲线中下凹部分对应的点刚好对应石英音叉侧壁处透明部分, 此时石英音叉对激光吸收减小, 所以石英音叉振幅减小。实验数据可以很好地支撑石英音叉振动是由激光热效应引起这一论断, 因为如果石英音叉振动是由光子动量改变产生的力引起的, 石英音叉振幅应该在激光照射到石英音叉叉臂

顶部时达到最大值。

对激光器输出的光进行衰减测试,不同透过率对应的石英音叉输出信号如图 11 所示。从图中可见,随着激光透过率减小,石英音叉振幅呈线性减小,这与理论和模拟计算结果一致。

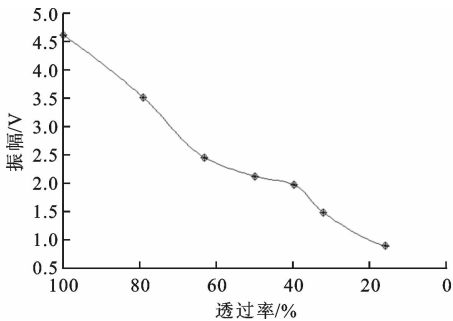


图 11 石英音叉输出信号随激光透过率变化曲线

4 结 论

由于光声光谱遥测中涉及到激光光源发出的激光经过物体表面反射后由凹面镜收集再照射到石英音叉表面的过程,激光能量损失较大。为了研究激光直接激励时石英音叉的振动原理,本文对光声光谱遥测的光路进行了简化,减少了激光能量的损失。在对石英音叉的叉臂振幅与输出信号进行分析后,本文设计实验对石英音叉在激光直接激励时的幅频特性进行了测试,研究了激光光照位置对石英音叉振幅的影响。发现:当激光光斑在石英音叉叉臂根部偏上约 0.2 mm 处,石英音叉振幅达到最大值,激光光斑继续向上移动,石英音叉振幅减小,验证了石英音叉振幅与激光功率成正比这一论点。由于本文中激励石英音叉振动的原理与光声光谱遥测中石英音叉的激振原理相同,差别只在于激光能量的损失不同,所以文中的实验对于继续开展光声光谱遥测研究具有指导意义。

参考文献:

[1] VAN NESTE C W, SENESAC L R, THUNDAT T. Standoff photoacoustic spectroscopy [J]. Applied Physics Letters, 2008, 92: 234102.1-234102.3.

[2] VAN NESTE C W, MORALES-RODRÍGUEZ M, SENESAC L R, et al. Quartz crystal tuning fork photoa-

coustic point sensing [J]. Sensors and Actuators: B, 2010, 150: 402-405.

[3] PETRA N, ZWECK J, KOSTEREV A A, et al. Theoretic analysis of a quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy sensor [J]. Appl Phys: B, 2009, 94, 673-680.

[4] 鲍伟义. 石英增强光声光谱技术研究探索 [D]. 重庆: 重庆大学, 2011: 2-15.

[5] 张洁. 石英增强光声光谱探测系统全光解调技术研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2013: 1-10.

[6] 刘研研, 董磊, 武红鹏, 等. 全光型石英增强光声光谱 [J]. 物理学报, 2013, 62(22): 220701.1-220701.5. LIU Yanyan, DONG Lei, WU Hongpeng, et al. All optical quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(22): 220701.1-220701.5.

[7] VAN NESTE C W. The sound of light: an open environment photoacoustici dentification of surface adsorbed molecules [D]. Cook, Tennessee, USA: Tennessee Technological University, 2009: 84-87.

[8] CHO P S, JONESB R M, SHUMAN T, et al. Investigation of standoff explosives detection via photothermal/photoacoustic interferometry [C]//Proceedings of SPIE 8018. Washionton DC, USA: SPIE, 2011: 8018T.1-8018T.15.

[9] POHLKÖTTER A, WILLER U, BAUER C, et al. Resonant tuning fork detector for electromagnetic radiation [J]. Applied Optics, 2009, 48(4): B119-B124.

[10] KARRA K, GROBERÏ R D. Piezo-electric tuning fork tip-sample distance control for near field optical microscopes [J]. Ultramicroscopy, 1995, 61: 197-205.

[11] SHARMAN R C, KUMAR D, BHARDWAJ N, et al. Portable detection system for standoff sensing of explosives and hazardous materials [J]. Optics Communications, 2013, 309: 44-49.

[12] 张周强, 贾书海, 马斌山. 光声光谱遥测装置中音叉光激励振动的数值模拟 [J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(7): 96-101.

ZHANG Zhouqiang, JIA Shuhai, MA Binshan. Numerical simulation of optical excitation vibration of quartz tuning fork in photoacoustic spectrum remote sensing device [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(7): 96-101.

(编辑 杜秀杰)