

DOI: 10.7652/xjtuxb201407017

光声光谱遥测装置中音叉光激励振动的数值模拟

张周强, 贾书海, 马斌山

(西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对光声光谱遥测装置中不同功率激光器和空气阻尼对石英音叉光激励振动过程的影响问题,采用数值模拟的方法研究了石英音叉的前四阶振型并对各振型进行了分析,建立了激光热激励石英音叉振动谐响应分析模型,模拟了由不同功率激光器发射的激光,经被检测物吸收和凹面镜收集后照射到音叉上时对音叉振动产生的影响,发现照射到音叉的激光能量与激励起音叉的共振振幅成线性关系。此外,还考虑了不同空气阻尼对音叉振动的影响,通过比较分析可知:激光器的功率不能小于10 mW,否则音叉的共振振幅太小,产生的压电信号会更小,不利于微弱信号探测;采用真空封装消除空气阻尼影响和增加激光器功率均可提高音叉的共振振幅,但前者的影响更大。上述结论可为光声光谱分析的后续研究提供理论指导。

关键词: 光声光谱遥测装置;空气阻尼;音叉共振;数值模拟

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)07-0096-06

Numerical Simulation of Optical Excitation Vibration for Quartz Tuning Forks in Photoacoustic Spectrum Remote Sensing Devices

ZHANG Zhouqiang, JIA Shuhai, MA Binshan

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The problem that the optical excitation vibration process in photoacoustic spectrum remote sensing devices is influenced by air damping and laser device with different powers is considered, and a numerical simulation method is used to study the first four orders of vibration mode. A harmonic response analysis model for the vibration of quartz tuning forks excited by laser is established. Simulations are performed to study the effects of lasers with different power on vibration of quartz tuning fork, where the lasers after absorption of detected objects and collection by concave mirror excite the vibration. It is found that the resonance amplitude of tuning forks is proportional to the laser energy. In addition, the influence of different air dampings on the vibration of tuning fork is also taken into account in a large extent. Comparative analyses show that the laser power cannot be less than 10 mW, otherwise the resonance amplitude of the tuning fork is too small to generate proper piezoelectric current for detection of weak signal. Adopting vacuum packaging and increasing laser power improve the resonance amplitude of the tuning fork, while the influence of the former is greater. The conclusion may provide a theoretical guidance for further study of the photoacoustic spectrum analysis.

Keywords: photoacoustic spectrum remote sensing device; air damping; tuning fork resonance; numerical simulation

收稿日期: 2013-11-05。 作者简介: 张周强(1983—),男,博士生;贾书海(通信作者),男,教授。 基金项目: 国家自然科学基金委员会、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: 2014-04-25

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20140425.0930.004.html>

随着激光技术的发展,光声光谱技术已成为近年来研究的热点^[1-5]。国内外关于光声光谱技术的研究主要集中在探测气体、液体以及固体中的物质的成分和含量上,整个探测过程使用特定功率的激光器而没有考虑空气阻尼的影响。由于光声光谱信号的强弱跟音叉的共振振幅成正比,因此音叉的光激励共振振幅越大,其压电流越大,最终产生的光声光谱信号就越强。激光器的功率和空气阻尼是影响音叉共振的主要因素,因此有关激光器功率和空气阻尼对石英音叉共振特性影响的研究具有重要的现实意义。

本文针对该装置中的关键部件石英音叉在受到频率调制后的不同功率激光照射和空气阻尼影响下的共振情况,利用 comsol 软件进行了数值模拟。该仿真研究可为危险品光学检测实验研究提供理论指导。

1 光声光谱遥测装置检测原理

光声光谱遥测装置的原理如图 1 所示。该装置主要用于 TNT 炸药等危险品的光声光谱检测分析,主要原理是采用特定功率的激光器发射出固定波长的激光,经过频率调制后照射到被检测物品上,由检测物品漫反射的激光再通过凹面镜收集后照射到音叉上。由于调制的激光频率和音叉固有频率很接近,因此可以激起石英音叉的共振,由于石英材料的正压电效应,所以音叉的共振会引起交变的压电流,压电流从覆盖在音叉臂上的电极引出。从音叉电极流出的压电流经互阻抗放大器变换为放大电压信号,该电压信号送入锁相放大器解调,得到相应的谐波信号,然后由计算机分析得到该物质的光谱。由于不同被测物对光的吸收特性不同,故被测物对某一波长的光吸收越强,反射光就越弱,石英微音叉的共振振幅就越小,产生的压电流也就越小。通过分析被测物的吸收光谱,可以区分出不同的物质,从而实现危险品的检测。

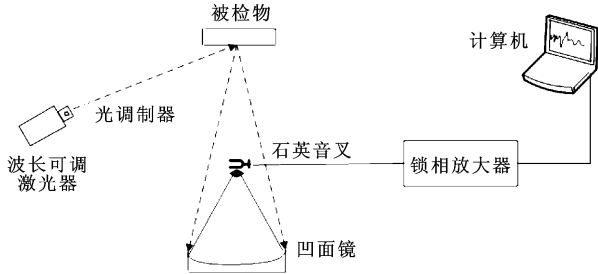
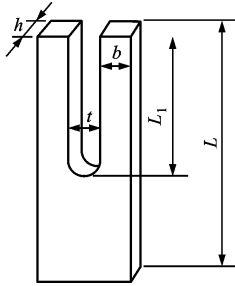


图 1 光声光谱遥测装置原理图

2 光激励振动数值模拟方法

2.1 石英音叉模型

U 型石英微音叉的几何模型和结构参数如图 2 所示。



$L=7.25\text{ mm}; L_1=3.88\text{ mm}; t=0.24\text{ mm}; b=0.66\text{ mm}; h=1\text{ mm}$

图 2 音叉结构示意图

2.2 激光激励振动热源模型

光激励音叉振动过程实际上是一种结构的热胀冷缩过程,当热源发生变化时,其产生的热应力就会引起音叉的振动,热源变化的频率越接近于音叉的固有频率,就越容易激起音叉共振,进而产生较大的压电流。在热输入分析中,热源的选取对模拟音叉结构中温度场、应力场以及位移场尤为重要。

常用的热源模型主要有能量高斯分布热源、圆形均匀分布热源和矩形均匀分布热源^[6-7]。

2.2.1 能量高斯分布热源 高斯分布热源的热流密度 H 呈高斯函数分布,可表示为

$$H = 2\lambda P \exp(-2r^2/R^2)/(\pi R^2) \tag{1}$$

式中: λ 为材料对光的吸收系数; P 为激光器的输出功率; R 为光束有效半径; r 为工件表面任意一点距光斑中心的距离。

2.2.2 圆形均匀分布热源 圆形均匀分布热源的热流密度在光斑直径范围内呈均匀分布,可表示为

$$H = \frac{\lambda P}{\pi R^2} \tag{2}$$

2.2.3 矩形均匀分布热源 矩形均匀分布热源的热流密度在矩形范围内呈均匀分布,可表示为

$$H = \frac{\lambda P}{ac} \tag{3}$$

式中: a 为矩形的长; c 为矩形的宽。

2.3 激光参数及石英材料的属性

模拟激光参数:激光功率为 10 mW、50 mW、100 mW,激光频率 f 为石英音叉的共振频率。

石英材料的属性:密度为 2 200 kg/m³,泊松比为 0.17,杨氏模量 E 为 70 GPa,石英材料对激光的吸收

系数为1,热膨胀系数为 5×10^{-7} ,石英材料的传热系数为 $41.46 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$,导热系数为 $1.4 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 。

2.4 温度场有限元计算基本理论

在激光照射下,石英材料表面吸收的激光光能首先转变成热能,使石英材料表层温度上升,然后温度由表及里,由高温到低温进行热扩散,热传导偏微分方程为^[8]

$$c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q(x, y, z, t) \quad (4)$$

式中: c_p 为石英材料的容积比热; T 为温度; t 为时间; k 为导热系数; Q 为音叉单位体积单位时间内吸收的激光能量。

在自然空气冷却条件下,考虑对流换热时,石英音叉表面温度的变化可表示为

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T_{\text{ext}} - T_a) \quad (5)$$

式中: T_{ext} 为石英音叉周围的环境温度; T_a 为音叉边界给定的初始温度; h 为传热系数; n 为边界的法向量。

在激光热通量输入边界条件下,石英音叉加热表面的温度变化可表示为

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = q \quad (6)$$

式中: q 为热通量。

由激光器发射出来的激光经过调频装置后的热通量的余弦形式可表示为

$$q = \frac{p}{2} \cos(2\pi ft) + \frac{p}{2} \quad (7)$$

式中: p 为照射到整个音叉表面的激光功率; f 为激光的调制频率。

在危险品远距离检测中,激光被检测物吸收后的反射光经过凹面镜照射到音叉上的能量为^[9-10]

$$P_T = \frac{k^2 \rho \eta_1 \eta_2 D^2}{16 S^2} P_{\text{laser}} \quad (8)$$

式中: $k = e^{-\alpha S}$, α 为环境衰减系数; ρ 为被测目标的反射率; η_1 、 η_2 分别为光发射和光接收效率; D 为凹面镜的直径; S 为激光器到检测物的距离。

3 结果与讨论

为了研究的方便,本文仿真研究采用圆形均匀分布热源模型进行计算。仿真参数如下:激光器功率为 10 mW 、 50 mW 、 100 mW ;凹面镜的直径 D 为 0.25 m ;激光器到检测物的距离 S 为 10 m ;中红外

区间的环境衰减系数 α 为 10^{-3} m ;光发射效率 $\eta_1 \geq 0.95$;光接收效率 $\eta_2 \geq 0.95$;目标的反射率 ρ 为 0.8 。

3.1 石英音叉前四阶的振型

石英音叉的振动方式分为对称振动和非对称振动,前四阶阶型如图3~6所示。非对称振动的2个音叉臂同方向弯曲,不能激发有效的压电响应,而对称振动则相反。经仿真分析可知:石英音叉的前两阶振型为非对称式振动,后两阶振型为对称式振动,对称振动的共振频率很高,周围环境中的声波很难

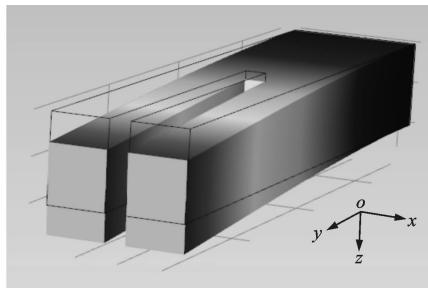


图3 石英音叉振动的一阶振型

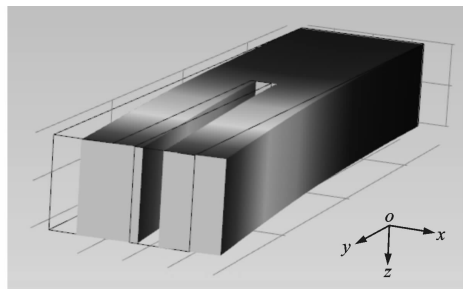


图4 石英音叉振动的二阶振型

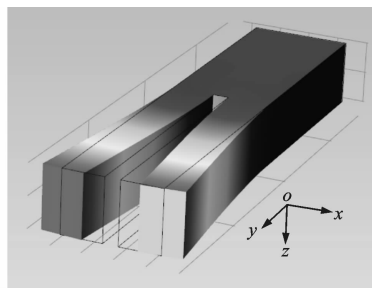


图5 石英音叉振动的三阶振型

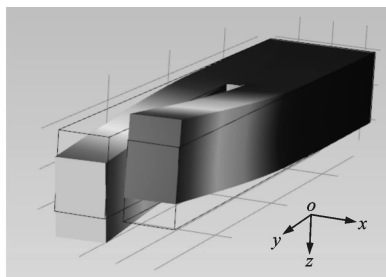


图6 石英音叉振动的四阶振型

使石英音叉产生对称式振动,并且石英音叉的频谱范围很窄,品质因子很高,这些都可有效抑制周围环境噪声及其他频率噪声的影响和干扰。因此,为了达到增强光声光谱探测信号、消除干扰噪声影响的目的,本文选用石英音叉的三阶振型进行光激励振动研究。

3.2 经凹面镜收集的激光能量对音叉共振的影响

本文研究的石英音叉主要用于 TNT 炸药等危险品的光声光谱检测分析,其原理是采用特定功率激光器发射的固定波长的激光经频率调制后照射在 10 m 处的被检测物品上,吸收后的漫反射光再由凹面镜收集照射到音叉上,由于激光频率和音叉固有频率很接近,因此可以激起石英音叉共振。图 7 和图 8 分别为 3 种不同功率的激光器沿 x 和 z 方向的位移随频率变化的曲线,该曲线考虑了激光传输过程中的能量损失,且音叉的共振振幅随着激光能量的损失而有所降低。根据式(8)计算可知,功率为 10 mW 的激光器发出的激光经过被检测物吸收后的反射激光经凹面镜收集后的能量约为 0.002 8 mW,仿真计算得到的音叉共振振幅约为 14×10^{-9} m。因此,激光器的功率不能小于 10 mW,否则音叉共振振幅就会小于 10 nm,产生的压电电流微弱,不利于微弱信号的探测。

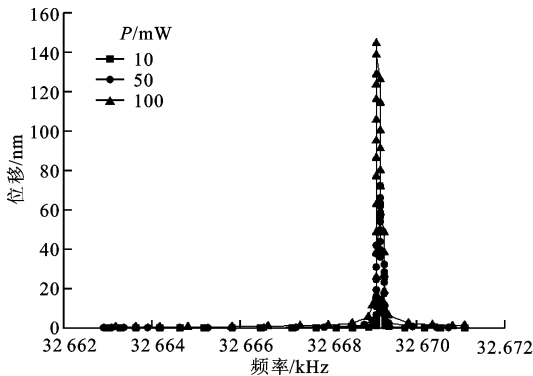


图 7 x 方向位移随频率的变化

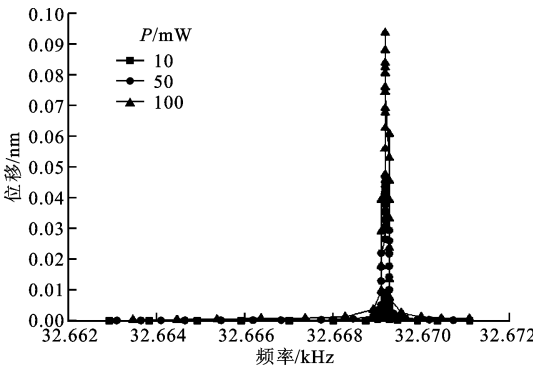


图 8 z 方向位移随频率的变化

3.3 空气阻尼对音叉共振的影响

为了研究空气阻尼对石英音叉振动性能的影响^[11],本文模拟了 10 mW、50 mW 和 100 mW 3 种不同功率激光器在空气阻尼系数为 10^{-6} 时沿 x 方向和 z 方向的音叉位移频率响应曲线,并研究了空气阻尼 $\eta=10^{-4}, 10^{-5}, 10^{-6}$ 3 种不同空气阻尼对功率为 50 mW 的激光器照射下的石英音叉振幅的影响,仿真模拟时考虑了被检测物质的吸收和凹面镜收集过程中激光能量的损失,仿真曲线如图 9~12 所示,通过对受空气阻尼影响的各谐响应曲线综合分析可知,空气阻尼对音叉的共振振幅影响很大,空气阻尼越大,音叉共振振幅就越小。此外,根据图 13~14 所示的 x 方向和 z 方向的共振振幅与激光功率的关系可知,激光器功率也是影响音叉共振振幅的主要因素,因此在实际光声光谱遥测装置中可以通过增加激光器的功率或者对石英音叉进行真空透明封装从而消除空气阻尼的影响来提高音叉共振振幅,后者的影响更大。

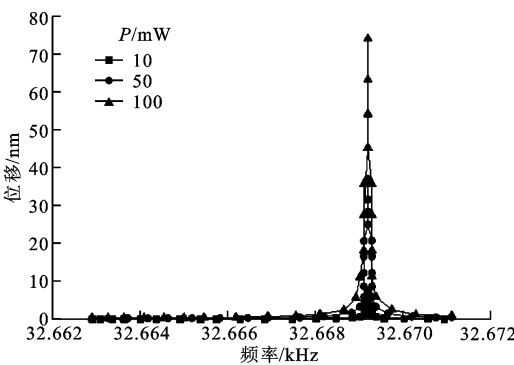


图 9 $\eta=10^{-6}$ 时 x 方向位移随频率的变化

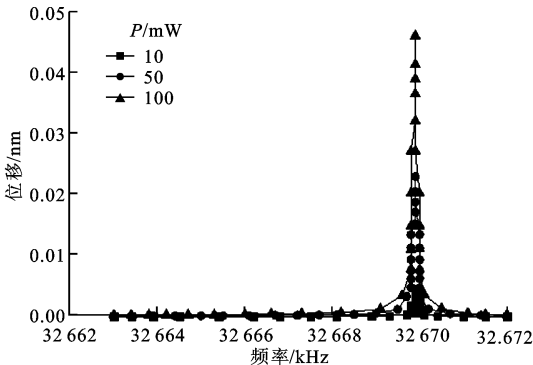


图 10 $\eta=10^{-6}$ 时 z 方向位移随频率的变化

3.4 音叉结构尺寸对共振振幅的影响

根据文献[12]可知,在音叉总长度 L 和厚度 h 不变的条件下,音叉臂间距 t 对固有频率的影响不敏感,因此通过分析选择出了较合理的音叉结构尺寸范围($L=7.25$ mm, 1 mm $\leq L_1\leq 5$ mm, 0.75 mm

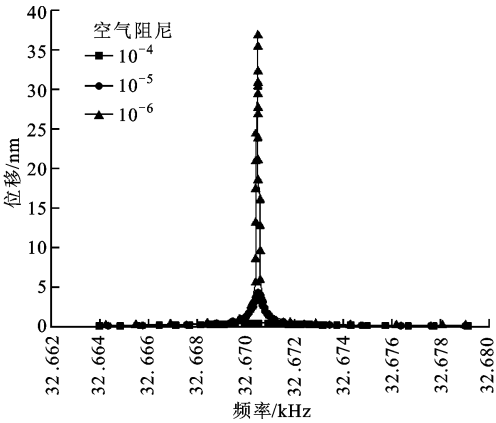


图 11 激光器功率为 50 mW 时不同阻尼下 x 方向位移随频率的变化

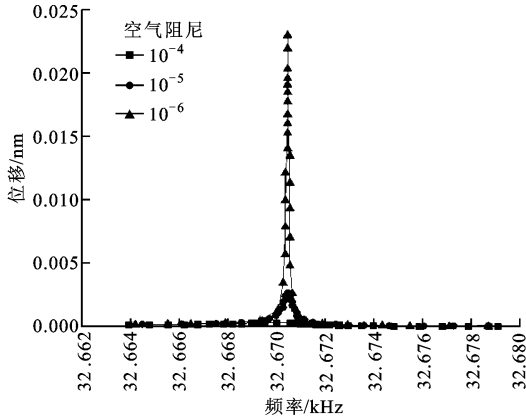


图 12 激光器功率为 50 mW 时不同阻尼下 z 方向位移随频率的变化

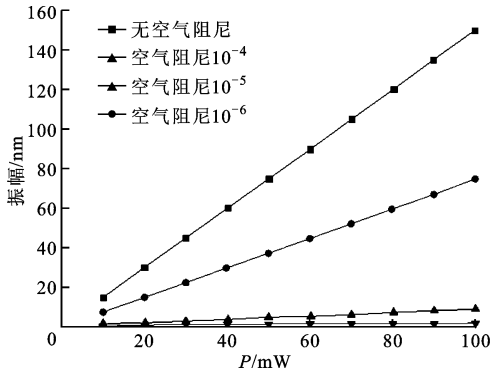


图 13 x 方向共振振幅与激光功率的关系

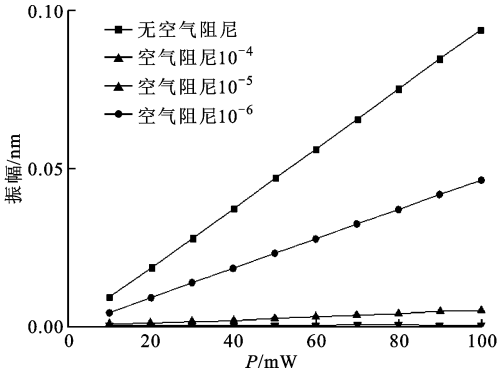


图 14 z 方向共振振幅与激光功率的关系

文中采用了功率为 10 mW 的激光器进行仿真分析, 音叉的共振振幅与音叉臂长度的关系如图 15 所示。

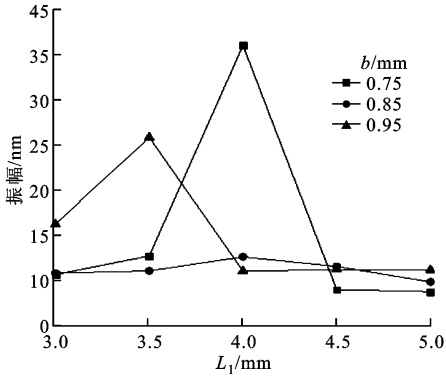


图 15 音叉臂长度 L_1 与共振振幅的关系

通过对上述曲线分析可知, 音叉臂长度和宽度对音叉的共振振幅影响较大, 对于不同宽度的音叉臂, 都存在使音叉共振振幅最大的音叉臂长度, 并且随着音叉臂宽度的不同而变化。当音叉结构尺寸 $L=7.25\text{ mm}$ 、 $L_1=4\text{ mm}$ 、 $b=0.75\text{ mm}$ 、 $t=0.24\text{ mm}$ 、 $h=0.5\text{ mm}$ 时, 音叉的共振振幅可以达到 39.96 nm , 远远大于结构尺寸 $L=7.25\text{ mm}$ 、 $b=0.75\text{ mm}$ 、 $t=0.24\text{ mm}$ 、 $L_1=4\text{ mm}$ 、 $h=1\text{ mm}$ 的共振振幅 14 nm , 因此更适合于光声光谱探测。

4 结 论

本文重点研究了不同功率激光器和空气阻尼对音叉共振特性的影响, 揭示了音叉共振振幅与不同功率激光在有、无空气阻尼影响下的变化规律, 并研究了音叉结构尺寸对共振振幅的影响, 通过分析比较得出了如下结论。

- (1) 激光器的功率不能太小, 否则石英音叉共振产生的压电电流太微弱, 会增加微弱信号探测难度。
- (2) 在激光器功率为 50 mW, 空气阻尼系数为 10^{-6} 时, 音叉的共振振幅约为 38 nm; 当空气阻尼系

$\leq b \leq 1\text{ mm}$, $t=0.24\text{ mm}$, $h=0.5\text{ mm}$), 才能保证设计出的音叉结构在受到第二阶固有频率的激光照射时前三阶固有频率间不会发生相互干扰, 然而光声光谱遥测装置中利用了石英音叉的压电效应, 对称振动能激发有效的压电效应, 因此音叉臂长度不能过小, 否则不能形成对称振动, 故音叉臂的长度需要大于 2 mm, 这样的石英音叉才适用于光声光谱遥测装置。为了研究音叉结构尺寸对共振振幅的影响,

数增加到 10^{-4} 时,音叉的共振振幅就接近于 0,由此可知空气阻尼对音叉的共振振幅影响更大。

(3)根据 x 和 z 方向的共振振幅与激光功率的变化规律可知,激光器的功率与音叉共振振幅呈线性关系且受阻尼影响较大,增加激光器功率可以提高音叉共振的振幅。

(4)通过研究音叉结构尺寸与共振振幅的关系,得到了更适合于光声光谱探测的音叉结构尺寸。

(5)根据仿真分析研究可知,激光器的功率不能小于 10 mW 且波长可以在一定范围内以步长为 0.01 nm 进行调节,目前,市场上的量子级联激光器的性能可以满足光声光谱实验装置的要求。

参考文献:

- [1] HANYECZ V, MOHACSI A, PUSKAS S, et al. Photoacoustic spectroscopy-based detector for measuring benzene and toluene concentration in gas and liquid samples [J]. Measurement Science & Technology, 2011, 22(12): 125602.
- [2] DUMITRAS D C, DUTU D C, MATEI C, et al. Evaluation of ammonia absorption coefficients by photoacoustic spectroscopy for detection of ammonia levels in human breath [J]. Laser Physics, 2011, 21(4): 796-800.
- [3] VAN NESTE C W, SENESAC L R, YI D, et al. Standoff detection of explosive residues using photo-thermal microcantilevers [J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(23): 134102-134104.
- [4] KRAUSE A R, VAN NESTE C W. Trace explosive detection using photothermal deflection spectroscopy [J]. Journal of Applied Physics, 2008, 103(9): 94906-94911.
- [5] KIRACOFÉ D, KOBAYASHI K. High efficiency laser photothermal excitation of micro-cantilever vibrations in air and liquids [J]. Review of Scientific Instruments, 2011, 82(1): 13702-13708.
- [6] 刘顺洪,吉巧杰,杨晶. 钢管激光弯曲成形的数值模拟 [J]. 激光技术, 2006(4): 355-360.
LIU Shunhong, JI Qiaojie, YANG Jing. Numerical simulation on laser bending of steel tubes [J]. Laser Technology, 2006(4): 355-360.
- [7] 胡玲玲,周建忠. 激光弯曲陶瓷片的数值模拟 [J]. 中国激光, 2010(12): 1631-1635.
HU Ingling, ZHOU Jianzhong. Numerical simulation

of laser bending of ceramic plate [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010(12): 1631-1635.

- [8] 张辑洲. 传热学 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1985: 12-127.
- [9] SHARMA R C, KUMAR D, BHARDWAJ N, et al. Portable detection system for standoff sensing of explosives and hazardous materials [J]. Optics Communications, 2013, 309(15): 44-49.
- [10] SAHAPONG K, JOEWONO W. Laser range finder using Gaussian beam range equation [J]. Optical & Laser Technology, 2010, 42(5): 749-754.
- [11] 高伟. 热激励为悬臂梁谐振式 MEMS 气体传感器研究 [D]. 北京: 清华大学, 2009.
- [12] ZHANG Zhouqiang, JIA Shuhai, MA Binshan. Study on the nature frequency of optical excitation quartz tuning fork sensor [C] // 2013 IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2013: 230-234.

[本刊相关文献链接]

- 魏颖雯,闫相国. 应用经验模式分解去除近红外光的运动伪迹. 2014, 48(2): 131-136. [doi:10.7652/xjtuxb201402022]
- 秦玉伟,赵宏,庄仲琴. 热光源谱域光学相干层析成像系统. 2011, 45(11): 63-67. [doi:10.7652/xjtuxb201111013]
- 杨亚晶,王万征. Rijke 管热声不稳定的实验研究. 2014, 48(5): 21-26. [doi:10.7652/xjtuxb201405004]
- 李应刚,陈天宁,王小鹏,等. 外部动态激励作用下齿轮系统非线性动力学特性. 2014, 48(1): 101-105. [doi:10.7652/xjtuxb201401017]
- 陈汝刚,陈韬,龚超. 箔片动压止推气体轴承流固耦合数值模拟. 2014, 48(5): 72-77. [doi:10.7652/xjtuxb201405013]
- 王建伟,徐晖,马宁. 内嵌自主移动钢球欧拉梁自适应碰撞减振研究. 2010, 44(11): 103-108. [doi:10.7652/xjtuxb201011021]
- 王太,李会雄,李阳. 同轴两个气泡融合特性的数值研究. 2013, 47(7): 1-6. [doi:10.7652/xjtuxb201307001]
- 徐自力,上官博,吴其林,等. 松装叶片燕尾型叶根干摩擦力模型及振动响应分析. 2009, 43(7): 1-5. [doi:10.7652/xjtuxb200907001]
- 郭旭东,颜国正,何文辉. 交变励磁三维遥测定位方法研究. 2007, 41(6): 717-721. [doi:10.7652/xjtuxb200706019]
- 徐自力,谷伟伟,吕强,等. 基于微动滑移模型的叶片阻尼结构参数研究. 2007, 41(5): 507-511. [doi:10.7652/xjtuxb200705001]

(编辑 赵炜)