

光纤倏逝波型石英增强光声光谱技术

何应 马欲飞 佟瑶 彭振芳 于欣

Fiber evanescent wave quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy

He Ying Ma Yu-Fei Tong Yao Peng Zhen-Fang Yu Xin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 020701 (2018) DOI: 10.7498/aps.20171881

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.20171881>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I2>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[点光源哈特曼最优阈值估计方法研究](#)

Shack-Hartmann optimum threshold estimation for the point source

物理学报.2017, 66(9): 090701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.090701>

[基于光纤微结构加工和敏感材料物理融合的光纤传感技术](#)

Optical fiber sensing technologies based on femtosecond laser micromachining and sensitive films

物理学报.2017, 66(7): 070703 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.070703>

[光纤法布里-珀罗干涉温度压力传感技术研究进展](#)

Research progress of in-fiber Fabry-Perot interferometric temperature and pressure sensors

物理学报.2017, 66(7): 070708 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.070708>

[硅纳米线/氧化钒纳米棒复合材料的制备与气敏性能研究](#)

Synthesis and gas-sensing properties of the silicon nanowires/vanadium oxide nanorods composite

物理学报.2016, 65(9): 090701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.090701>

[顶栅石墨烯离子敏场效应管的表征及其初步应用](#)

Characterization and preliminary application of top-gated graphene ion-sensitive field effect transistors

物理学报.2016, 65(8): 080701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.080701>

# 光纤倏逝波型石英增强光声光谱技术\*

何应 马欲飞<sup>†</sup> 佟瑶 彭振芳 于欣

(哈尔滨工业大学, 可调谐激光技术国家级重点实验室, 哈尔滨 150001)

(2017年8月21日收到; 2017年9月22日收到修改稿)

采用块状光学准直聚焦透镜组的传统石英增强光声光谱(QEPAS)技术存在体积难以缩减, 结构稳定性不佳, 无法适应空间狭小、振动复杂的特殊环境等缺点. 基于此, 将光纤倏逝波技术与QEPAS技术相结合, 提出了一种新型微纳结构光纤QEPAS痕量气体检测技术. 实验中, 为了提高QEPAS系统信号幅值, 优化了石英音叉与激光束的空间位置、激光波长调制深度, 同时对比了两种不同共振频率的石英音叉, 最终采用共振频率较低的30.720 kHz石英音叉作为声波探测元件, 获得的检测极限为 $6.25 \times 10^{-4}$  (体积分数), 归一化噪声等效吸收系数为 $4.18 \times 10^{-7} \text{cm}^{-1} \cdot \text{W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ .

**关键词:** 痕量气体检测, 石英增强光声光谱, 光纤倏逝波

**PACS:** 07.07.Df, 42.81.-i, 42.62.Fi, 33.20.Ea

**DOI:** 10.7498/aps.67.20171881

## 1 引言

近年来, 人类的活动对环境中各种痕量气体种类以及浓度的影响在持续增加, 如大气中的温室气体臭氧( $\text{O}_3$ )、酸雨催生气体氮氧化物( $\text{NO}_x$ )、二氧化硫( $\text{SO}_2$ ), 体积分数为 $10^{-12}$ — $10^{-6}$ 量级, 这些气体的浓度上升直接使环境发生改变<sup>[1,2]</sup>. 同时, 随着工业化进程的加速, 工业生产过程中的各种痕量气体, 如一氧化碳( $\text{CO}$ )、甲烷( $\text{CH}_4$ ), 会对人类自身的安全造成影响. 因此, 对痕量气体进行精确的测量变得十分紧迫.

随着激光技术以及光谱技术的不断发展, 采用光谱学方法对痕量气体进行测量成为了热点. 其中, 激光吸收光谱法气体检测技术具有种类鉴别性好、探测灵敏度高、能够实现在线测量等优点, 近年来发展迅速. 在众多光谱测量技术中, 石英增强光声光谱(quartz-enhanced photoacoustic spec-

troscopy, QEPAS)作为一种新型光声光谱探测技术<sup>[3]</sup>, 具有更加鲜明的优势. QEPAS技术采用石英音叉(quartz tuning fork, QTF)作为声波探测元件, 石英音叉具有体积小、品质因数高、价格低廉等诸多优点<sup>[4,5]</sup>. 目前, QEPAS技术被广泛应用于多种痕量气体的检测研究中<sup>[6-11]</sup>.

在传统QEPAS技术中, 常采用一组块状光学透镜将激光束聚焦穿过石英音叉叉股间隙, 因此, 这部分光路存在结构稳定性欠佳、探测单元的尺寸难以缩小等缺点, 这些因素在一定程度上限制了该技术的实际应用. 光纤具有结构稳定、体积小、传输损耗低等一系列优点, 在QEPAS技术中有潜在的应用优势<sup>[12]</sup>. 本文采用全光纤传输结构, 利用光纤倏逝波技术, 开展光纤倏逝波型石英增强光声光谱痕量气体检测技术研究. 乙炔( $\text{C}_2\text{H}_2$ )气体是变压器绝缘油中的溶解气体之一, 是表征电力变压器早期潜伏性故障的重要特征量<sup>[13]</sup>, 同时也是聚乙烯生产线上乙烯气流中的污染物之一<sup>[14]</sup>, 因此, 选

\* 国家自然科学基金(批准号: 61505041)、黑龙江省自然科学基金(批准号: F2015011)、中国博士后科学基金特别资助(批准号: 2015T80350)、中国博士后科学基金面上项目(批准号: 2014M560262)、黑龙江省博士后科学基金(批准号: LBH-Z14074, LBH-TZ0507)、中央高校基本科研业务费专项资金、哈尔滨市应用技术研究与开发项目(批准号: 2016RAQXJ140)和国家重大科学仪器设备开发专项(批准号: 2012YQ040164)资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: mayufei@hit.edu.cn

择  $C_2H_2$  气体作为测量对象. 该研究对  $C_2H_2$  气体浓度的高灵敏度、快速测量在变压器故障诊断、环境监测等领域具有重要意义.

## 2 光纤倏逝场计算

倏逝场是指当光以全反射的方式在不同折射率的界面传输时, 会有微量的光波渗透到另一折射率介质中, 形成一种趋于指数衰减的电磁场, 其渗透深度与光波长相当. 而在光纤中, 光波于纤芯中传输, 在纤芯与包层界面发生全反射, 因此在光纤包层靠近界面处也会有一部分呈指数衰减的电磁场. 光纤倏逝场基本结构如图 1 所示, 将光纤进行相应的处理, 可将其直径缩小至与光波长相当, 即所谓的微纳结构光纤, 于是在光纤与空气的界面处会有一部分光渗透到空气中, 这便是光纤倏逝波. 若将微结构光纤置于目标探测气体环境中, 渗透到空气中的倏逝场就会与周围的介质发生相互作用, 本研究正是要利用这种倏逝波作为 QEPAS 系统中

气体吸收的激励源.

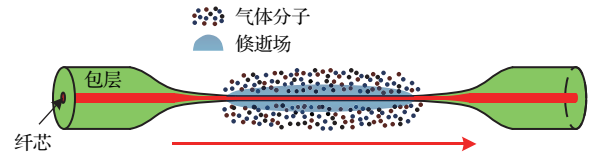


图 1 光纤倏逝场示意图

Fig. 1. Schematic of fiber evanescent wave.

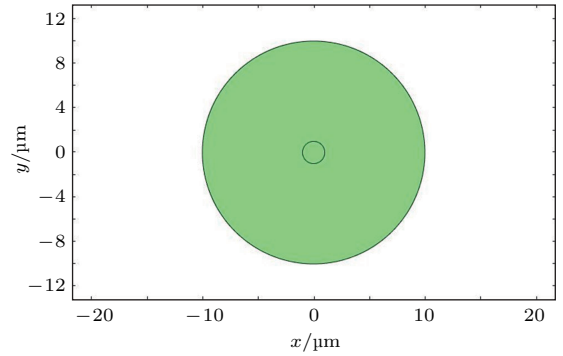


图 2 光纤截面的求解模型

Fig. 2. Solving model of fiber interface.

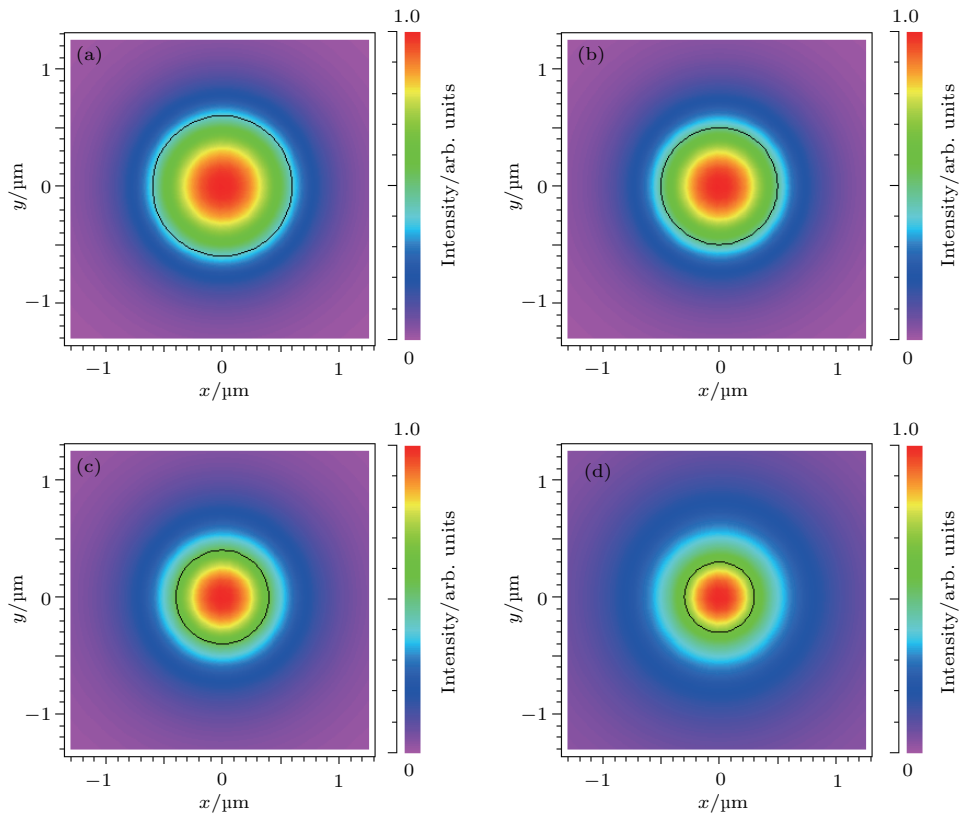


图 3 不同光纤直径下的截面光场分布 (a)  $D = 1.2 \mu\text{m}$ ,  $m = 0$ ,  $n_{\text{eff}} = 1.265727$ ; (b)  $D = 1.0 \mu\text{m}$ ,  $m = 0$ ,  $n_{\text{eff}} = 1.218575$ ; (c)  $D = 0.8 \mu\text{m}$ ,  $m = 0$ ,  $n_{\text{eff}} = 1.152950$ ; (d)  $D = 0.6 \mu\text{m}$ ,  $m = 0$ ,  $n_{\text{eff}} = 1.070514$

Fig. 3. The optical field distribution for different fiber diameters: (a)  $D = 1.2 \mu\text{m}$ ,  $m = 0$ ,  $n_{\text{eff}} = 1.265727$ ; (b)  $D = 1.0 \mu\text{m}$ ,  $m = 0$ ,  $n_{\text{eff}} = 1.218575$ ; (c)  $D = 0.8 \mu\text{m}$ ,  $m = 0$ ,  $n_{\text{eff}} = 1.152950$ ; (d)  $D = 0.6 \mu\text{m}$ ,  $m = 0$ ,  $n_{\text{eff}} = 1.070514$ .

为掌握微结构光纤中的光场分布以及光纤界面外空间中的光功率分布与大小比例, 利用基于有限元分析法的 COMSOL Multiphysics 软件对光纤的光场分布进行模拟分析以及光功率的理论计算. 理论模拟过程中利用 COMSOL Multiphysics 软件的频域分析功能, 首先对光纤结构进行建模, 该求解模型为图 2 所示的两个同心圆, 其中, 小圆表示光纤截面, 外圆表示空气层, 模拟的光纤直径为 0—3  $\mu\text{m}$ , 空气层直径为 10  $\mu\text{m}$  (因为倏逝场渗透深度为光波长量级), 折射率分别为 1.4378 和 1. 建模完成后, 对模型进行精细的网格划分, 选择求解模式, 由传输激光波长 (1.53  $\mu\text{m}$ ) 设置模式分析频率, 并以光纤折射率 ( $n = 1.4378$ ) 为模式的基准点, 随后选择物理场与变量, 进行计算求解. 最终计算直径  $D = 0\text{—}3 \mu\text{m}$  范围内的光场分布, 部分结果如图 3 所示.

图 3 中, 黑色线圈表示包层与空气层的界面,  $m$  表示光的传输模式,  $n_{\text{eff}}$  表示有效折射率, 图中光纤直径依次为 1.2, 1.0, 0.8, 0.6  $\mu\text{m}$ . 从计算得到的光纤横截面光场分布可以看出, 随着光纤包层直径的减小, 溢出光纤包层的光场在空气中的深度增大, 同时空气中的光场逐渐变强, 即包层直径越小, 溢出到空气中的倏逝场越强. 根据模拟计算得到的光场结果, 利用 COMSOL Multiphysics 软件的数据后处理, 计算不同包层直径下倏逝场的功率与激光总功率之比, 最终得到的结果如图 4 所示.

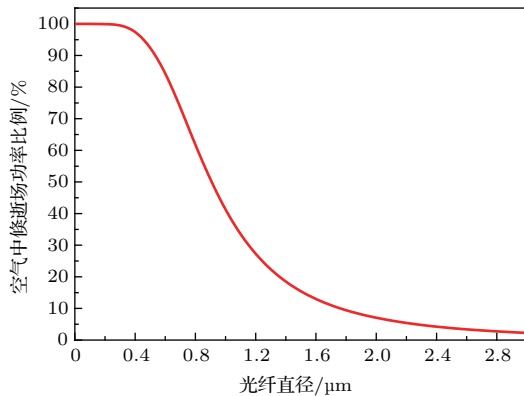


图 4 不同光纤直径下的倏逝场功率比例

Fig. 4. Power fraction of the evanescent wave as a function of fiber diameter.

从图 4 可以看出, 当光纤包层直径大于 2  $\mu\text{m}$  后, 空气中倏逝场的功率大小变化缓慢, 在总的光场中所占比例小于 10%. 而 QEPAS 技术中, 由于信号强度与光场功率成正比, 因此, 为了增大信号强度, 得到更优异的探测极限, 拉锥后的光纤直径不宜大于 2  $\mu\text{m}$ .

### 3 实验装置

#### 3.1 激光波长调制深度分析

为了便于后续信号处理及增大信噪比, 拟采取波长调制及谐波探测的方案<sup>[15]</sup>, 这就意味着用低频锯齿波电流使激光器扫描经过整个吸收线, 同时用高频正弦波信号对激光器波长进行调制. 调制深度是指激光波长调制系数  $\chi$  与待测目标气体吸收谱线线宽  $\Delta\gamma$  的乘积. 气体吸收系数表达式为

$$\begin{aligned} \alpha(v) &= CN_0 S g(v) \\ &= \frac{CN_0 S}{\pi\gamma_{\text{line}}} \cdot \frac{1}{1 + [(v - v_0)/\gamma_{\text{line}}]^2} \\ &= \alpha_0 \frac{1}{1 + x^2}, \end{aligned} \quad (1)$$

式中  $C$  为气体浓度,  $N_0$  为总粒子数密度,  $S$  为气体吸收谱线强度,  $g(v)$  为标准化线性函数,  $\alpha_0 = CN_0 S / (\pi\gamma_{\text{line}})$  为谱线中心吸收系数,  $x = (v - v_0)/\gamma_{\text{line}}$  为无量纲激光波数. 当采用频率为  $\omega_\chi$  的正弦波进行调制时,  $x$  还可以表示为

$$x = \bar{x} - c \cos(\omega_\chi t + \phi), \quad (2)$$

式中  $\phi$  表示采用正弦波调制频率为  $\omega_\chi$  时的相位差, 改写吸收系数公式, 对其进行傅里叶分解, 则

$$\begin{aligned} \alpha(\bar{x}) &= \alpha_0 \frac{1}{1 + [\bar{x} - \chi \cos(\omega_\chi t + \phi)]^2} \\ &= \alpha_0 \left[ H_0(\bar{x}) + \sum_{n=1}^{\infty} H_n(\bar{x}) \cos(n\omega_\chi t + n\phi) \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

其中各项傅里叶系数的表达式为

$$H_0(\bar{x}) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \frac{1}{1 + (\bar{x} - \chi \cos \theta)^2} d\theta, \quad (4)$$

$$H_n(\bar{x}) = \frac{2}{\pi} \int_0^\pi \frac{\cos(n\theta)}{1 + (\bar{x} - \chi \cos \theta)^2} d\theta. \quad (5)$$

在光声光谱技术中, 常以二次谐波信号作为被探测的值, 其表达式为

$$\begin{aligned} S_{\text{PA}, 2f_\chi}(v) &= k C_{\text{cell}} [\alpha(v) P(v)]_{2f_\chi} \\ &= k C_{\text{cell}} \alpha_0 P_0 [(1 + p_\Omega \bar{x}) H_2 \cos(2\omega_\chi t + 2\phi)], \end{aligned} \quad (6)$$

式中  $f_\chi = \omega_\chi / (2\pi)$  为调制频率,  $k$  为系统转换常数,  $C_{\text{cell}}$  为探测器转换系数. 由于  $S_{\text{PA}, 2f_\chi}$  表达式中隐含了  $\chi$  参量 (即隐含了调制深度参量), 因此通过优化调制深度便可对 QEPAS 系统二次谐波信号值进行优化.

### 3.2 实验装置

在光纤倏逝波型 QEPAS 技术实验研究中,设计的实验系统结构如图 5 所示,系统的控制电路部分主要由波长调制和信号放大解调模块组成,并由电脑通过 LabVIEW 上位机软件进行操控. 由于 QEPAS 系统信号强度与石英音叉共振频率  $f_0$  成反比<sup>[16]</sup>,因此,与常见 QEPAS 技术中共振频率  $f_0$  为 32.768 kHz 的石英音叉不同,实验选用共振频率  $f_0$  为 30.720 kHz 的石英音叉. 在波长调制技术中,一个正弦波调制周期内激光波长两次经过吸收谱线,因此产生的信号频率是正弦波调制频率的 2 倍,所以当调制频率  $f$  为石英音叉共振频率  $f_0$  的 1/2 时,石英音叉能够形成共振,进而产生最大的二次谐波信号,实验中石英音叉参数测定的共振频率  $f_0$  为 30716 Hz,因此正弦波频率  $f$  设定为  $f = f_0/2 = 15358$  Hz. 锯齿波驱动电流作用是使激光器输出激光扫描经过一段特定的波长,覆盖气体吸收峰,实验中设定的锯齿波频率为 1/60 Hz. 激光激励源选择 1.53  $\mu\text{m}$  的连续波分布反馈式 (DFB) 半导体激光器. 该半导体激光器通过光纤输出并连接拉锥后的单模光纤 (康宁标准 SMF-28e<sup>+</sup>). 将光纤锥区放置于石英音叉叉股之间. 整个探测单元 (包括石英音叉 (QTF) 和光纤锥区) 放置于气室中. 光纤锥区与石英音叉相对位置的局部放大如图 5 右上侧所示. 激光经光纤锥区输出后由功率计接收并检测,该功率计用以实时监测光纤的输出功率,可以测量激光经光纤锥区后的功率损耗情况. 实验中,10 M $\Omega$  的跨阻抗放大器 (TA) 将石英音叉探测到的电流信号转化为电压值,锁相放大器用此

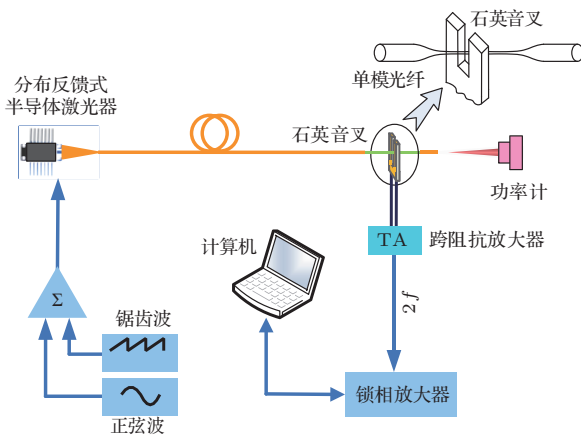


图 5 实验系统结构示意图

Fig. 5. Schematic of QEPAS system.

电压信号解调出二次谐波分量 ( $2f$ ). 实验中所用的测量气体为体积分数为 2% 的  $\text{C}_2\text{H}_2$  (以  $\text{N}_2$  为背景气体).

### 4 实验结果和分析

首先对光纤锥在石英音叉叉股间隙处竖直方向上的位置 ( $Y$ ) 进行了优化研究,结果如图 6 所示. 从图中可以看到,当  $Y < 0.5$  mm 时, QEPAS 系统  $2f$  信号强度随着  $Y$  的增大而迅速增大. 当  $0.5$  mm  $\leq Y \leq 0.9$  mm 时,  $2f$  信号强度处于最优范围内. 当  $Y > 0.9$  mm 时, QEPAS 系统  $2f$  信号强度随着  $Y$  的增大而逐渐变小. 实验结果表明, QEPAS 系统  $2f$  信号强度随着  $Y$  的变化而发生改变,这主要是因为  $Y$  值过小时,作用在石英音叉上的声波能量会有损失 (部分声波从音叉叉股上部溢出),而当  $Y$  值过大时,声波作用在石英音叉上的等效力矩将会减小,致使石英音叉叉股摆动幅度变小. 在后续的实验中,为了获得最强的  $2f$  信号幅值,  $Y$  值设定为 0.7 mm.

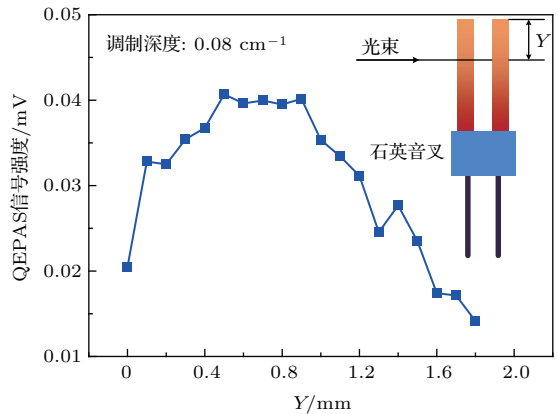


图 6 QEPAS  $2f$  信号幅值随音叉竖直方向位置的变化

Fig. 6. Amplitude of QEPAS  $2f$  signal as a function of  $Y$ .

优化光纤锥与石英音叉的相对位置后,进一步通过实验对激光波长调制深度进行优化,实验结果如图 7 所示. 从图中可以看出,系统存在最佳调制深度,根据结果选择的激光波长最佳调制深度为 0.24  $\text{cm}^{-1}$ .

作为对比,实验还对相同条件下、共振频率  $f_0$  为 32.768 kHz 的石英音叉进行了研究. 最后,向 QEPAS 系统气室中通入高纯气体  $\text{N}_2$ ,并将其测量值作为噪声数据. 两种音叉情况下的  $2f$  信号波形以及对应的噪声值如图 8 (a) 和图 8 (b) 所示. 从图中可以看出,共振频率为 30.720 kHz 的石英音叉所

对应的系统具有更高的  $2f$  信号幅值. 同时, 从噪声测试结果中能够看出, 两系统的噪声值基本相当. 经计算,  $f_0$  为 30.720 和 32.768 kHz 的石英音叉对应系统的 QEPAS 信号幅值分别为 0.075 和 0.068 mV, 系统探测极限 (MDL, 用体积分数表示, 下同) 分别为  $6.25 \times 10^{-4}$  和  $6.90 \times 10^{-4}$ . 由此可见, 共振频率较低的石英音叉对应的 QEPAS 系统能够获得更高的  $2f$  信号幅值. 根据实验得到的相关参数进行计算, 表 1 列出了该系统的各参数指标, 从中可以看出, 共振频率为 30.720 kHz 的石英音叉更适合用于光纤倏逝波 QEPAS 技术.

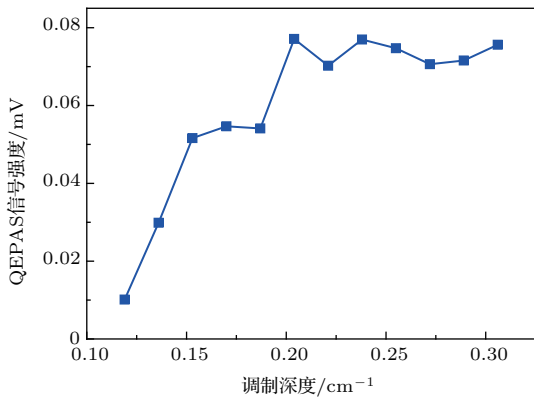


图 7 QEPAS  $2f$  信号幅值随调制深度的变化

Fig. 7. Amplitude of QEPAS  $2f$  signal as a function of modulation depth.

在 QEPAS 系统中存在一个评价传感器指标的重要参数, 即系统的归一化噪声等效吸收系数 (NNEA), 这是表征传感器检测灵敏度的一个重要参数. NNEA 的计算公式为  $V_{NNEA} = \alpha P / \sqrt{\Delta f}$ , 其中  $\alpha$  为气体吸收系数, 由系统探测极限经 HITRAN 数据库计算得到,  $P$  为气体吸收峰处的激光功率,  $\Delta f$  为锁相放大器带宽. 在 NNEA 的计算过程中, 需要确定激发探测气体的激光功率, 即光纤倏逝场的激光功率. 根据第 1 节的理论模拟计算结果 (图 4) 可知, 如果获得光纤锥的直径便可得到倏逝场功率比例, 因此, 利用扫描电子显微镜 (SEM) 测量光纤直径, 拍摄的光纤锥图像如图 9 所示. 测量得到光纤锥直径为  $1.77 \mu\text{m}$ , 根据理论模拟计算结果可知光纤锥对应的倏逝场比例为 9.7%. 经实

验测量, 半导体激光器输出功率为 6 mW, 通过光纤锥后的激光功率为 4.7 mW, 光纤锥传输损耗为 1.06 dB, 进一步计算可得光纤锥的倏逝场功率为  $455.9 \mu\text{W}$ . 最终得到系统的归一化噪声等效吸收系数为  $4.18 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-1} \cdot \text{W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ .

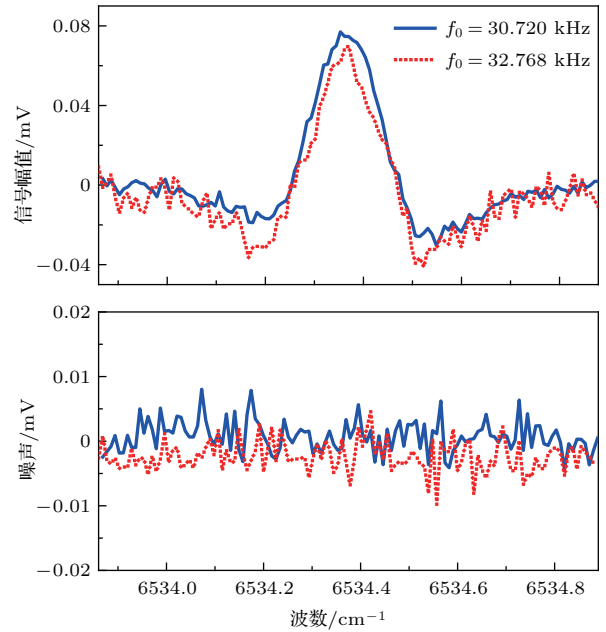


图 8 不同共振频率  $f_0$  下 QEPAS 系统的  $2f$  波形及噪声值 (a)  $2f$  信号波形; (b) 纯  $\text{N}_2$  条件下实验的噪声值

Fig. 8.  $2f$  signal amplitude and noise of QEPAS system with different resonant frequencies: (a) Amplitude of  $2f$  signal; (b) determined noise in pure nitrogen environment.

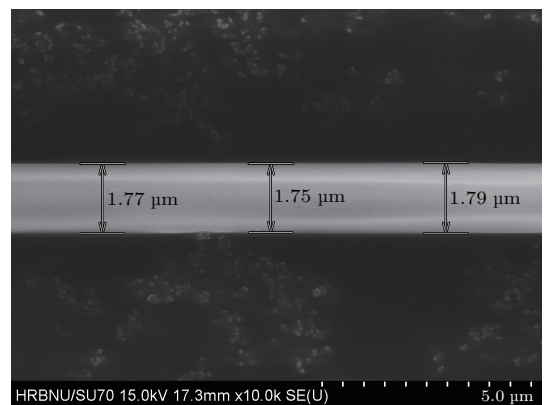


图 9 扫描电子显微镜拍摄的光纤锥

Fig. 9. SEM image of fiber taper.

表 1 不同石英音叉共振频率下系统的探测性能

Table 1. Experimental results for QTFs with different resonant frequencies.

$f_0/\text{kHz}$	$2f_{\text{peak}}/\text{mV}$	$1\sigma$ for noise/ $\mu\text{V}$	Signal-to-noise ratio	MDL/ $10^{-4}$
32.768	0.070	2.38	29	6.89
30.720	0.077	2.42	32	6.25

## 5 结 论

将光纤倏逝波技术应用于 QEPAS 技术中, 搭建了全光纤结构的 QEPAS 测量系统. 理论模拟计算了光纤倏逝场的光场分布以及倏逝场功率之比, 优化了光束与石英音叉的空间位置、激光波长调制深度, 对比了两种不同共振频率的石英音叉, 最终在较低共振频率 30.720 kHz 的石英音叉的实验研究中获得了  $6.25 \times 10^{-4}$  的探测极限, 计算得到的系统归一化噪声等效吸收系数为  $4.18 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-1} \cdot \text{W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ . 与传统块状光学系统相比, 该光纤倏逝波型光路结构有效缩小了 QEPAS 系统探测单元的体积, 提高了系统工作稳定性, 有利于 QEPAS 痕量气体检测技术的实用化.

## 参考文献

- [1] Khalil M A K, Rasmussen R A 1984 *Science* **224** 54
- [2] Logan J A, Prather M J, Wofsy S C, McElroy M B 1981 *J. Geophys. Res.* **86** 7210
- [3] Kosterev A A, Bakhirkin Y A, Curl R F, Tittel F K 2002 *Opt. Lett.* **27** 1902
- [4] Liu K, Li J, Wang L, Tan T, Zhang W, Gao X M, Chen W D, Tittel F K 2009 *Appl. Phys. B* **94** 527
- [5] Ma Y F, Lewicki R, Razeghi M, Tittel F K 2013 *Opt. Express* **21** 1008
- [6] Zheng H, Yin X, Zhang G F, Dong L, Wu H P, Liu X L, Ma W G, Zhang L, Yin W B, Xiao L T, Jia S T 2015 *Appl. Phys. Lett.* **107** 221903
- [7] Ma Y F, He Y, Zhang L G, Yu X, Zhang J B, Sun R, Tittel F K 2017 *Appl. Phys. Lett.* **110** 031107
- [8] Liu K, Zhao W, Wang L, Tan T, Wang G, Zhang W, Gao X, Chen W 2015 *Opt. Commun.* **340** 126
- [9] Dong L, Yu Y J, Li C G, So S, Tittel F K 2015 *Opt. Express* **23** 19821
- [10] Ma Y F, He Y, Yu X, Chen C, Sun R, Tittel F K 2016 *Sensor. Actuat. B* **233** 388
- [11] Ma Y F, Yu X, Yu G, Li X D, Zhang J B, Chen D Y, Sun R, Tittel F K 2015 *Appl. Phys. Lett.* **107** 021106
- [12] Ma Y F, He Y, Yu X, Zhang J B, Sun R 2016 *Appl. Phys. Lett.* **108** 091115
- [13] Marshall S T, Schwartz D K, Medlin J W 2009 *Sensor. Actuat. B* **136** 315
- [14] Miller K L, Morrison E, Marshall S T, Medlin J W 2011 *Sensor. Actuat. B* **156** 924
- [15] Webber M E, Pushkarsky M, Patel C K N 2003 *Appl. Opt.* **42** 2119
- [16] Ma Y F, Yu G, Zhang J B, Yu X, Sun R, Tittel F K 2015 *Sensors* **15** 7596

# Fiber evanescent wave quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy\*

He Ying Ma Yu-Fei<sup>†</sup> Tong Yao Peng Zhen-Fang Yu Xin

(National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

( Received 21 August 2017; revised manuscript received 22 September 2017 )

## Abstract

In a conventional system of quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy (QEPAS), the size of block-like optical collimation focusing lens group is difficult to reduce, and the structural stability is poor, which makes it hard to adapt itself to some special conditions, such as narrow space and vibrating circumstance. Based on this situation, in this research the fiber evanescent wave technique is combined with QEPAS. Therefore, trace gas detection for acetylene ( $C_2H_2$ ) based on an all-fiber structural QEPAS system is developed. To obtain the characteristics of fiber evanescent wave, the optical distribution of micro structural fiber is simulated and the evanescent wave power ratio is calculated based on the COMSOL Multiphysics software. In order to increase the QEPAS  $2f$  signal amplitude, the optical path between fiber taper and quartz tuning fork (QTF) and the laser wavelength modulation depth are optimized. In addition, two kinds of QTFs with different resonant frequencies are optimized. Finally, a QTF with a lower resonant frequency of 30.720 kHz is adopted as the acoustic wave transducer, and a minimum detection limit (MDL) of  $6.25 \times 10^{-4}$  (volume fraction) is obtained with a laser wavelength modulation depth of  $0.24 \text{ cm}^{-1}$ . To investigate the evanescent wave power of micro structural fiber, the fiber taper diameter is measured by a scanning electron microscope. Subsequently, by combining the diameter of fiber taper with the theoretical calculation results, we determine an evanescent wave power of  $455.9 \text{ }\mu\text{W}$ , and the normalization of noise equivalent absorption (NNEA) which indicates the sensor sensitivity is  $4.18 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-1} \cdot \text{W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ .

**Keywords:** trace gas detection, quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy, fiber evanescent wave

**PACS:** 07.07.Df, 42.81.-i, 42.62.Fi, 33.20.Ea

**DOI:** 10.7498/aps.67.20171881

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61505041), the Natural Science Foundation of Heilongjiang Province of China (Grant No. F2015011), the Special Financial Grant from the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2015T80350), the General Financial Grant from the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2014M560262), the Postdoctoral Fund of Heilongjiang Province, China (Grant Nos. LBH-Z14074, LBH-TZ0507), the Fundamental Research Funds for the Central Universities, the Application Technology Research and Development Projects of Harbin, China (Grant No. 2016RAQXJ140), and the National Key Scientific Instrument and Equipment Development Projects of China (Grant No. 2012YQ040164).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [mayufei@hit.edu.cn](mailto:mayufei@hit.edu.cn)