

文章编号: 1001-9014(2010)05-0337-05

飞秒激光对 P 型碲镉汞打孔的形貌和 PN 结特性研究

周松敏¹, 查访星^{1*}, 郭青天¹, 殷菲², 李茂森¹, 马洪良¹, 张波²

(1. 上海大学理学院物理系, 上海 200444; 2. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要: 激光束诱导电流 (LBIC) 检测实验表明, 飞秒激光刻蚀 P 型碲镉汞形成的孔洞结构具有 PN 结特性. 实验研究了激光刻蚀功率、激光聚焦透镜数值孔径等参数对刻蚀孔形貌的影响, 发现在较低的激光功率范围内, 孔径与激光功率基本呈线性关系. 刻蚀孔反型层的厚度也与激光功率基本呈线性关系, 但不同激光功率刻蚀所形成孔结构的 LBIC 信号强度的改变不大. 另外, 还研究了刻蚀激光在材料中聚焦深度对刻蚀孔 LBIC 信号的影响, 发现该因素的影响并不明显.

关键词: 碲镉汞; PN 结; 激光束诱导电流; 飞秒激光打孔

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A

THE MORPHOLOGY OF MICRO HOLE PN JUNCTION IN P-TYPE HgCdTe FORMED BY FEMTOSECOND LASER DRILLING

ZHOU Song-Min¹, ZHA Fang-Xing^{1*}, GUO Qing-Tian¹, YIN Fei²,

LI Mao-Sen¹, MA Hong-Liang¹, ZHANG Bo²

(1. Department of Physics, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: The laser beam induced current (LBIC) characterization on femtosecond laser drilled holes indicates the formation of pn junctions in p-HgCdTe. The influences of laser power and numerical values of focus lens on the morphology of the drilled holes were studied. The diameter of the holes and their inversion layer thickness are both linearly proportional to the power of laser. On the other hand, there were no observable changes in the LBIC signals of the holes as the laser power was changed. In addition, the LBIC signal intensity of the holes was insensitive to the change of focus depth of the drilling laser.

Key words: HgCdTe; PN junction; laser beam induced current (LBIC); femtosecond laser drilling

引言

飞秒激光具有高峰值功率、脉冲极短等特性, 不仅导致了光与物质相互作用领域许多新的物理现象和规律, 而且作为一种有效的材料微加工技术, 在金属、半导体、玻璃等材料中有广泛应用^[1,2]. 飞秒激光被越来越多地用于制作各种光学微器件如光子晶体、光波导、探测器等^[2,3]. 同时, 飞秒激光能够通过光掩膜、光学全息和衍射分束镜等方法实现微米量级的窗口阵列从而形成二维平面的飞秒激光脉冲阵列^[4-6], 大大简化了工艺过程, 提高了器件制备效

率. 特别由于激光加工方法具有与样品环境能够隔离的非接触优点, 如果上述超快激光阵列加工技术能够应用于红外焦平面器件的构建, 无疑是具有很高的实用价值. 对于碲镉汞材料而言这一构想并非没有基础. 例如, 离子束干法刻蚀构建碲镉汞阵列探测器的环孔焦平面技术是红外焦平面领域早已成熟的方法. 而对于激光与碲镉汞材料的相互作用, 上世纪九十年代 Dawar 等人的研究中发现碲镉汞经激光辐射后起局部电学性质会发生转变^[7,8]. 受此启发, 最近我们将飞秒激光打孔工艺应用于对 P 型碲镉汞材料作用, 并利用激光束诱导电流 (LBIC) 实验对

收稿日期: 2009-12-21, 修回日期: 2010-06-18

基金项目: 上海市重点学科建设无线电物理专项基金 (S30105)

作者简介: 周松敏 (1985-), 男, 浙江庆元人, 硕士研究生, 主要从事 HgCdTe 红外探测器 PN 结研究, E-mail: zhou songmin@163.com.

* 通讯作者: E-mail: fxzha@shu.edu.cn.

Received date: 2009-12-21, revised date: 2010-06-18

刻蚀结构表征,观察到伴随激光刻蚀孔材料局域电学性质的反型(由 P 型转化为 N 型)而形成 PN 结^[9].之后,还通过电学测量观察到打孔结构的电学整流特性,进一步确认了这一类环孔 PN 结结构的形成^[10].

尽管在我们最近的报道中通过激光束诱导(LBIC)测量揭示了飞秒激光刻蚀碲镉汞产生的反型^[9],但是对于激光刻蚀参数,如激光功率、激光聚焦透镜数值孔径以及激光聚焦深度等因素对成结效果的影响尚未作深入探讨.而本项工作将报道在这方面所作的进一步实验研究.结果发现激光功率对于形成孔的几何尺寸和反型层厚度有着明显影响,并基本呈线性关系,但是不同激光功率所形成刻蚀孔的 LBIC 信号强度发生的变化并不很大.还考察了激光聚焦深度改变对所形成刻蚀孔 LBIC 测量结果的影响,发现激光聚焦深度改变对测量结果影响也不明显.这些结果对于进一步探讨器件应用具有重要参考价值.

1 实验

1.1 飞秒激光打孔

用于激光打孔的材料系由液相外延(LPE)方法生长在 CdZnTe 衬底上的 P 型 $\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$ 薄膜($x = 0.27$),外延层厚度约 $25\mu\text{m}$,表面有 $0.25\mu\text{m}$ 的 ZnS 钝化层.实验装置如文献^[9]描述,所用飞秒激光器为钛宝石激光器,可产生脉宽 150fs 、波长 800nm 、重复频率 250kHz 的脉冲激光.光束经物镜聚焦到样品上.样品置于由电脑控制可进行 XYZ 三维平移的移动台上.激光功率由一个衰减器控制,脉冲数由快门控制.实验采用的激光打孔功率范围区间为 $30 \sim 500\text{mW}$.并使用了不同的物镜聚焦倍数(100X、50X 和 20X)以及两种不同激光聚焦深度打孔,即激光聚焦深度分别位于样品表面($Z = 0\mu\text{m}$)和聚焦在样品表面以下 $5\mu\text{m}$ 处($Z = 5\mu\text{m}$).所有刻蚀孔采用统一的快门开启时间 0.001s ,对应的激光脉冲数为 250.

1.2 激光束诱导电流测量

LBIC 方法是一种十分适合微尺度 PN 结诊断的无损伤的、非直接接触表征技术,具有分辨率高、操作方便且能获取整个样品电场的空间分布等特点^[11~13].关于该表征技术原理的详细介绍可参考以上文献.简言之,在 LBIC 测试中诱导激光扫描到样品中存在内建电场的位置时,激发的光生载流子就被内建电场分开而在两个远端电极间感应产生光伏电势,它对于闭合检测回路产生电流,电流大小取决

于光伏电势的强度.当诱导激光光斑在样品表面扫描时就获得 LBIC 信号对于样品空间位置的关系曲线.基于该 LBIC 曲线可以分析结电场强弱,获得反型层宽度等信息.

2 实验结果和讨论

为了考察不同激光功率以及物镜聚焦倍数对刻蚀孔几何形貌的影响,进行了一组如图 1 所示样品的实验.该图给出了飞秒激光采用不同功率及不同聚焦透镜和聚焦深度打孔所形成刻蚀孔阵列的光学显微图像.图中标注了形成每一刻蚀孔所采用的激光功率、激光聚焦物镜的放大倍数和聚焦焦斑相对于表面深度.(左侧注明所使用物镜放大倍数,上方标明激光功率参数,右侧数字说明激光光斑聚焦深度 Z : $Z = 0$ 表示聚焦在样品表面, $Z = 5$ 表示光斑聚焦深度为深入样品 $5\mu\text{m}$).对于所采用的 100X、50X 和 20X 三种放大倍率聚焦物镜,每一物镜又采用了两种聚焦方式,即激光聚焦在样品表面和聚焦在深入样品表面之下 $5\mu\text{m}$ 处.可以发现,激光功率变化对刻蚀孔孔径存在明显的影响:在相同的物镜倍数和聚焦深度时,随着激光功率的增大,刻蚀孔孔径增大.光斑聚焦深度深入样品表面 $5\mu\text{m}$ 和聚焦在样品表面对刻蚀孔的影响不明显.在相同激光功率和聚焦深度下,物镜倍数大的刻蚀孔孔径反而小.

为了定量地显示上述参数对刻蚀孔形貌的影响,我们在图 2 中绘出了刻蚀孔孔径与激光功率关系曲线图(图中从上往下每两条曲线对应一组物镜聚焦倍数,同时标明了每条曲线所对应的聚焦深度 Z ,聚焦深度单位为 μm).可以看到:1)物镜聚焦倍

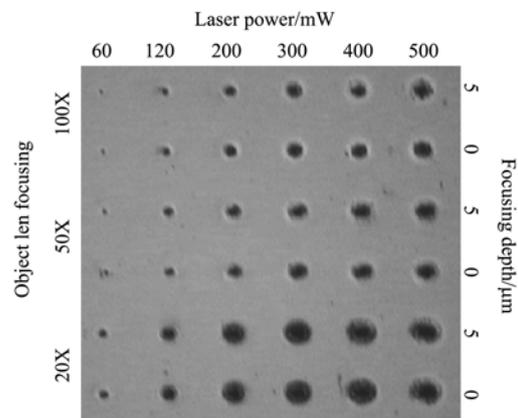


图 1 不同激光刻蚀功率、物镜聚焦倍数和聚焦深度下刻蚀孔的光学图像

Fig. 1 Optical micrograph of laser drilling induced holes with different laser power and focus lens

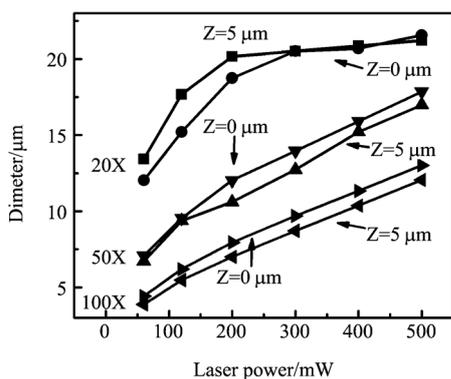


图2 激光刻蚀孔孔径与刻蚀功率关系图

Fig.2 The diameter of laser drilled holes vs. laser drilling power

数为 100X 和 50X 的刻蚀孔孔径和激光功率呈现较好的线性关系;2)物镜聚焦倍数为 20X,在较小功率时,孔径与激光功率呈线性关系,当功率达到一定值后达到饱和,即在较大功率范围时激光刻蚀功率对孔径影响不大;3)对于聚焦在表面和聚焦深入 $5\mu\text{m}$ 两种情形,刻蚀孔孔径尺寸差别不大。

激光刻蚀孔的 PN 结特性可以通过 LBIC 实验来揭示.为了研究激光刻蚀功率及激光聚焦深度对成结效果的影响,这里针对 20X 聚焦物镜激光打孔的两组数据进行了 LBIC 测量.如图 3 所示,图(a)为打孔激光聚焦在样品表面所形成孔的 LBIC 信号,(b)为聚焦深入样品表面之下 $5\mu\text{m}$ 所形成孔的 LBIC 信号.图中从左侧开始每一对波峰和波谷对应着一个刻蚀孔两边侧壁的 PN 结界面.每对波峰-波谷所对应的激光刻蚀功率在图中进行了标注.看到:(1)当功率大于 60mW 后,功率变化对 LBIC 信号强度的影响不大,而当功率小于 60mW 时信号强度明显变小,可能在 60mW 之下存在导致孔区反型的刻蚀功率阈值,这与前面报道的采用物镜倍数 100X 的激光刻蚀孔的结果类似^[9]; (2)从图 3(a)和(b)的对比可发现,激光光斑聚焦深入材料表面之下 $5\mu\text{m}$ 打出的孔和聚焦在样品表面打出的孔的 LBIC 信号强度无明显差别; (3)每对信号的波峰和波谷的强度在一定程度上并不完全对称,这可能是刻蚀激光光斑形状不对称或刻蚀激光入射角度的差异所造成的.值得注意的是,对于激光功率高于 200mW 的刻蚀孔,在刻蚀孔几何中央区有一小的峰结构,实际上该小峰结构中心对应的 LBIC 信号强度应近似为零,可能这是因为较大功率激光已经将碲镉汞薄膜层刻穿,导致光伏响应消失.因目前缺乏有效地表征孔深度的测试手段(我们曾尝试原子力显微镜,

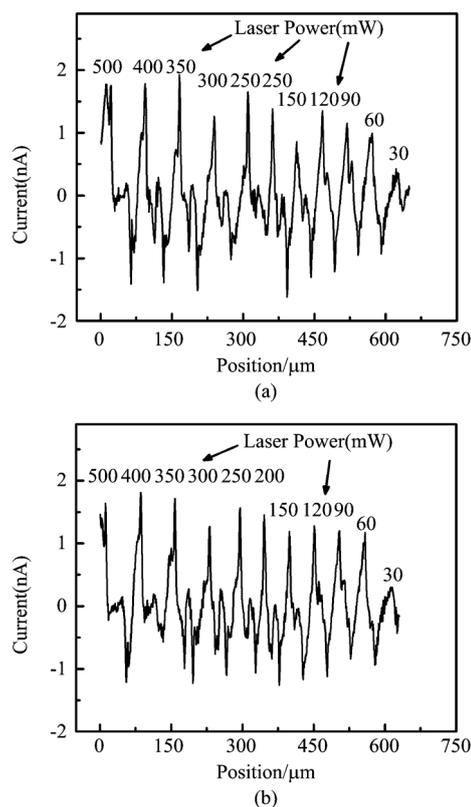


图3 激光分别聚焦于样品表面(a)和纵深 $5\mu\text{m}$ 处(b)形成的孔的 LBIC 信号强度与激光刻蚀功率的关系

Fig.3 LBIC linescan across a row of laser drilled holes generated with various laser intensities (a) the laser was focused on the surface (b) the focus was $5\mu\text{m}$ below the surface

但由于针尖只能最深测得 $5\mu\text{m}$,而 150mW 以上刻蚀孔的深度已经深于该极限测量),如何测量孔深是目前拟进一步研究的实验内容。

LBIC 实验数据还可以进一步揭示刻蚀孔反型层的空间尺度^[13].具体计算方法是:用 LBIC 信号峰谷间距和刻蚀孔孔径估算侧壁反型层平均厚度 d , $d = [\text{LBIC 信号峰谷间距} - \text{刻蚀孔孔径}] / 2$.图 4 中(a)和(b)的 LBIC 测试结果分别来自激光刻蚀物镜倍数为 100X 和 20X 两种情形,激光功率均为 200mW ,光斑聚焦在样品表面.基于上述方法估算出两种刻蚀孔侧壁反型层平均厚度分别为 $8.05\mu\text{m}$ 和 $6.15\mu\text{m}$.说明在相同功率和相同聚焦深度条件下,高倍物镜形成的刻蚀孔反型层厚度较厚。

运用上述估算方法,对物镜聚焦倍数为 20X,激光光斑聚焦在样品表面和聚焦深入样品表面 $5\mu\text{m}$ 两种情况下刻蚀孔的侧壁反型层的平均厚度进行了系统估算,并在图 5(Z 表示聚焦深度)中给出了这两种情况下刻蚀孔的侧壁反型层的平均厚度与激光功率的关系.该关系图很好地说明了在聚焦倍数为

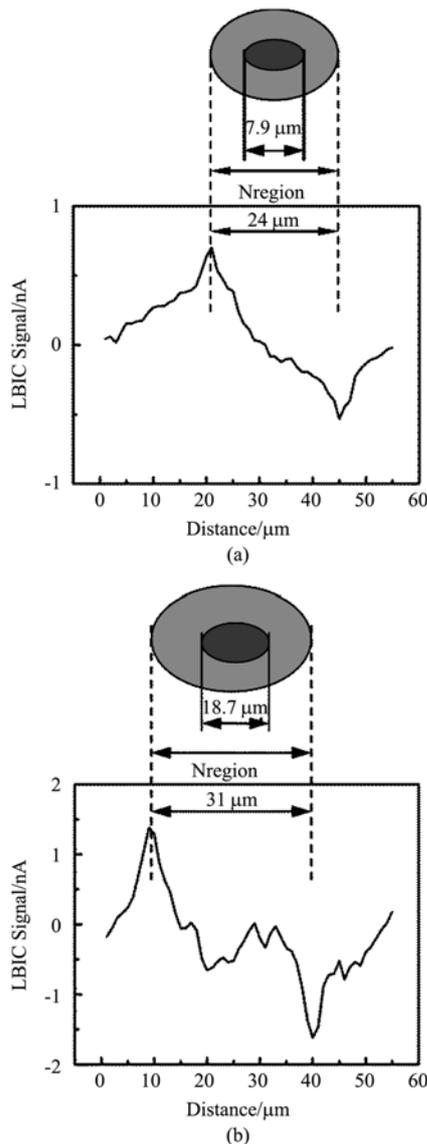


图4 同一激光刻蚀功率(200 mW)下采用两种聚焦透镜形成的刻蚀孔的反型区比较 (a)和(b)物镜聚焦倍数分别为100X和20X

Fig. 4 Comparison of the inversion layer thicknesses of the holes formed with two types of objective lens in laser focusing (a)100X (b)20X. The laser intensities in both were 200mW

20X的物镜下,激光刻蚀所形成侧壁反型层平均厚度与激光功率呈一定的线性关系,从图中还发现不同激光聚焦深度对侧壁反型层厚度有略微影响但并不明显。

3 结论

着重分析了不同刻蚀参数对刻蚀孔形貌、LBIC信号和形成PN结侧壁反型层厚度的影响。在形貌变化上,通过改变激光刻蚀功率,发现采用聚焦倍数为100X和50X的物镜进行激光打孔所形成刻蚀孔

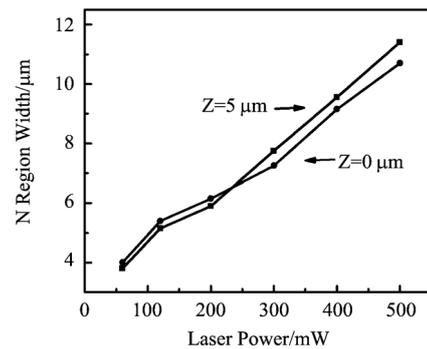


图5 刻蚀孔侧壁反型层平均厚度与激光功率关系图
Fig. 5 The relationship between N-region width and laser drilling power

的孔径和激光功率呈现较好的线性关系,而在20X的物镜下功率较大时,功率改变对刻蚀孔孔径影响较小,而在功率降低到较小时,孔径发生明显变化。聚焦深度则对刻蚀孔尺寸的影响不明显。重点分析了在20X的物镜下激光刻蚀孔的LBIC测试结果,并估算和对比了采用两种聚焦深度所形成刻蚀孔侧壁反型层的数值。较强飞秒激光刻蚀孔的LBIC信号强度随功率变化的变化不大,而当功率减小到60mW时出现明显减小,表明存在引起反型的刻蚀阈值功率。在激光聚焦深度的对比实验说明,激光光斑聚焦深入样品表面5μm或聚焦在样品表面,对刻蚀孔的孔径、LBIC信号强度及侧壁反型层厚度无明显的影响。

REFERENCES

- [1]Nielsen C S, Balling P. Deep drilling of metals with ultra-short laser pulses: A two-stage process [J]. *J. Appl. Phys.*, 2006, **99**:093101.
- [2]Straub M, Ventura M, Gu M. Multiple higher-order stop gaps in infrared polymer photonic crystals[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **91**:043901.
- [3]Amit Garg, Avinashi Kapoor, Tripathi K N, *et al.* Laser induced damage studies in mercury cadmium telluride [J]. *Optics and Laser Technology*, 2007, **39**:1319—1327.
- [4]Toshiaki Kondo, Shigeki Matsuo, Saulius Juodkazis, *et al.* Multiphoton fabrication of periodic structures by multibeam interference of femtosecond pulses[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**:2759.
- [5]Toshiaki Kondo, Saulius Juodkazis, Vygantas Mizeikis, *et al.* Holographic lithography of periodic twoand three-dimensional microstructures in photoresist SU-8[J]. *OPTICS EXPRESS*, 2006, **14**:7943.
- [6]Shigeki Matsuo, Takashi Miyamoto, Takuro Tomita, *et al.* Applications of a microlens array and a photomask to the laser microfabrication of a periodic photopolymer rod array [J]. *APPLIED OPTICS*, 2007, **46**:8264.
- [7]Dawar A L, Savita Roy, Tirlak Nath, *et al.* Effect of laser annealing on electrical and optical properties of n-mercury

cadmium telluride[J]. *J Appl Phys.*, 1991, **69**(7):3849—3852.

- [8] Dawar A L, Savita Roy, Mall R P, *et al.* Effect of laser irradiation on structural, electrical, and optical properties of p-mercury cadmium telluride[J]. *J Appl Phys.*, 1991, **70**(7):3516—3520.
- [9] Zha F X, Zhou S M, Ma H L, *et al.* Laser drilling induced electrical type inversion in vacancy-doped p-type HgCdTe [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **93**:151113.
- [10] Zha F X, Li M S, Shao J, *et al.* Femtosecond laser-drilling induced HgCdTe Photodiodes[J]. *OPTICS LETTERS*, 2010, **35**(7):971.
- [11] Siliquini J F, Dell J M, Musca C A, *et al.* Scanning laser

microscopy of reactive ion etching induced n-type conversion in vacancy-doped p-type HgCdTe [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **70**:3443.

- [12] YE Zhen-Hua, HU Xiao-Ning, CAI Wei-Ying, *et al.* Application of laser beam induced current for technology detecting of HgCdTe two-color detector [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (叶振华, 胡晓宁, 蔡炜颖, 等. 激光束诱导电流在 HgCdTe 双色探测器工艺检测中的应用. *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(6):459—462.
- [13] CAI Wei-Ying. Laser beam current induce technology and characterization of semiconduct [J]. *Infrared* (蔡炜颖. LBIC 技术与半导体材料特性的表征. *红外*), 2000, **9**:12—14.

(上接 324 页)

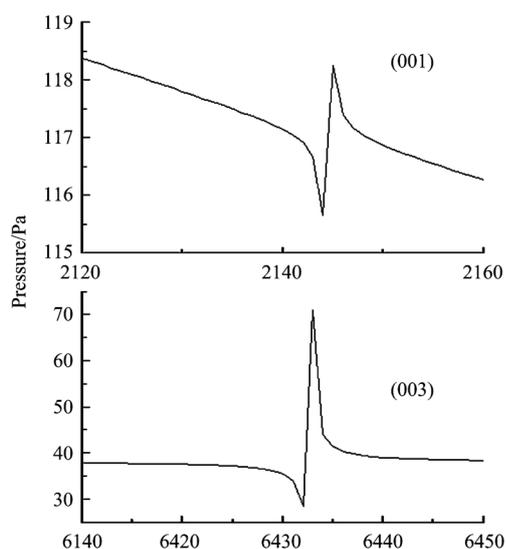


Fig. 6 The simulated odd harmonic response of the PA cavity with certain exiting point in the loudspeaker plane
图 6 光声腔在扬声器平面上特定点激发产生的奇次谐波响应的模拟结果

mission and detection in the PA cell using FEM have been performed to simulate its features and compared with the measured data. Results show that the second longitudinal mode of the PA cell has the highest resonance amplitude around 4.2 KHz with moderate Q value, so this mode is quite suitable for MIR-PAS gas sensing purpose.

REFERENCES

- [1] BELL A G. On the production and reproduction of sound by light[J]. *Am. J. Sci.*, 1880, **XX**:305—324.
- [2] BELL A G. Upon the production of sound by radiant energy [J]. *Phil. Mag. J. Sci.*, 1881, **XI**:510—528.
- [3] ZHANG Yong-gang, ZHENG Yan-Lan, LIN Chun, *et al.* Continuous wave performance and tunability of MBE grown 2.1 μm InGaAsSb /AlGaAsSb MQW lasers [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2006, **23**(8):2262.
- [4] BAI Y, SLIVKEN S, DARVISH S R, *et al.* Room temperature continuous wave operation of quantum cascade lasers with 12.5% wall plug efficiency [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **93**, 2.
- [5] LYAKH A, PFLUGL C., Diehl L, *et al.* 1.6 W high wall plug efficiency, continuous-wave room temperature quantum cascade laser emitting at 4.6 μm [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**, 11.
- [6] FILHO M B, DA Silva M G, STHEL M S, *et al.* Ammonia detection by using quantum-cascade laser photoacoustic spectroscopy [J]. *Applied Optics*, 2006, **45** (20): 4966—4971.
- [7] GROSSEL A, ZENINARI V, JOLY L, *et al.* Photoacoustic detection of nitric oxide with a Helmholtz resonant quantum cascade laser sensor [J]. *Infrared Phys. & Tech.*, 2007, **51** (2):95—101.
- [8] MUKHERJEE A, DUNAYEVSKIY I, PRASANNA M, *et al.* Sub-parts-per-billion level detection of dimethyl methyl phosphonate (DMMP) by quantum cascade laser photoacoustic spectroscopy [J]. *Applied Optics*, 2008, **47** (10): 1543—1548.
- [9] ZHANG Yong-gang, XU Gang-Yi, LI Ai-Zhen, *et al.* Pulse wavelength scan of room-temperature mid-infrared distributed feedback quantum cascade lasers for N₂O gas detection [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2006, **23**(7):1780.
- [10] ZHANG Yong-gang, ZHANG Xiao-Jun, ZHU Xiang-Rong, *et al.* Tunable diode laser absorption spectroscopy detection of N₂O at 2.1 μm using antimonide laser and InGaAs photodiode [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2007, **24**(8): 2301.
- [11] ZHANG Yong-gang, GU Yi, ZHANG Xiao-Jun, *et al.* Gas sensor using a robust approach under time multiplexing scheme with a twin laser chip for absorption and reference [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2008, **25**(9):3246.
- [12] WOLFF M, GRONINGA H G, BAUMANN B, *et al.* Resonance Investigations using PAS and FEM [J]. *Acta Acustica*, 2005, **91**(Suppl. 1):99.
- [13] KREUZER L B, The physics of signal generation and detection, *Optoacoustic Spectroscopy and Detection*, Pao, Y.-H. (Ed.) [M]. Academic: London, 1-25 (1977).
- [14] ANDRAS Miklos, PETER Hess, ZOLTAN Bozoki. Application of acoustic resonators in photoacoustic trace gas analysis and metrology [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2001, **72**(4):1937—1955.