

文章编号: 0258-7025(2006)07-0945-04

非高斯光束脉冲热透镜技术

李斌成

(中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)

摘要 将非高斯加热光束引入到模式不匹配的脉冲热透镜技术中,描述了非高斯加热光束热透镜技术的优点。实验研究了不同加热光束形状时热透镜信号的振幅和时间特性以及与实验参数的关系。实验结果显示在不同加热光束形状时都可通过使用近场探测构型和优化实验参数如探测距离提高热透镜技术的测量灵敏度,而通过使用远场探测构型则可消除实验参数对材料热性质测量的影响。

关键词 测量;微弱吸收测量;热透镜;非高斯光束;平顶光束

中图分类号 O 484.5 **文献标识码** A

Pulsed Thermal Lens Technique with a Non-Gaussian Beam Excitation

LI Bin-cheng

(Institute of Optics and Electronics, The Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)

Abstract A non-Gaussian beam excitation scheme was introduced to a mode-dismatched pulsed thermal lens technique. The advantages of the thermal lens approach with a non-Gaussian beam excitation were described. Experiment was performed to investigate the amplitude and temporal behaviors of the thermal lens signals excited by non-Gaussian beams of different profiles, as well as their dependences on the experimental parameters. The experimental results showed that for different beam profiles, the measurement sensitivity of the thermal lens technique could be maximized by employing the near-field detection scheme and optimizing the geometric parameters (e. g., the detection distance) of the thermal lens configuration. On the other hand, the influence of these geometric parameters on the determination of thermal properties of a measured sample could be minimized by using a far-field detection scheme.

Key words measurement; weak absorptance measurement; thermal lens; non-Gaussian beam; top-hat beam

1 引 言

热透镜技术是一种灵敏的微弱吸收检测技术,已被广泛应用于化学分析^[1]、光学薄膜吸收测量^[2,3]等领域。传统的热透镜实验使用高斯光束作为加热源^[4]。由于能用于热透镜技术中的高斯加热光束必须由价格昂贵的激光器产生,并且一般的脉冲激光器输出光束为非高斯光束,这在一定程度上限制了热透镜技术的广泛应用。为了打破这一限制, Li 等曾在表面热透镜技术中使用了平顶加热光束,用于测量紫外光学薄膜的微弱吸收^[5,6]。同时理论也证明,通过使用模式不匹配的热透镜构型^[7]并优化实验参数,平顶光束热透镜的测量灵敏度是高斯光束

构型的两倍左右^[8]。而且实验上平顶光束比高斯光束更容易实现,例如通过使用孔径光阑遮挡光束边缘或使用光束匀光器^[5,6]都可以将非高斯脉冲激光光束整形形成平顶光束。

本文在实验上进一步研究使用平顶加热光束时脉冲热透镜信号的振幅和时间特性,同时通过使用不同光强分布的加热光束,研究光束形状对脉冲热透镜信号特性的影响。

2 实 验

实验采用共线式模式不匹配的热透镜构型,系统光路如图 1 所示。加热光束由脉冲式准分子激光

收稿日期:2005-10-19;收到修改稿日期:2006-01-17

作者简介:李斌成(1966—),男,湖北天门人,中国科学院光电技术研究所研究员,博士,主要从事光热技术和光学薄膜检测技术研究。E-mail:beli@ioe.ac.cn

器提供,工作波长为193 nm,脉冲宽度约9 ns,重复频率10 Hz.输出光束经可变衰减器和光束分布均匀器^[9]后通过一圆孔后由一聚焦透镜($f = 160$ mm)会聚到样品表面.加热光束在样品处的强度分布通过调节聚焦透镜位置来改变.当样品处于圆孔的像平面位置时,加热光束为平顶光束.加热光束在样品处的光强分布由对紫外光敏感的 CCD 相机测量.探测光束由氦氖激光器提供,工作波长为543 nm,输出功率约1 mW.探测光束从背面入射到样品上,激光器到样品的距离约为2.1 m,探测光束在样品处的直径为2.6 mm.两光束在样品前表面相交,夹角约为 7° .穿过样品的探测光束的中心光强变化由一带针孔的光电探测器检测,针孔的直径约为0.32 mm.光电探测器的输出信号由数字示波器直接读出和记录,数字示波器由准分子激光器输出的脉冲信号触发.实验中使用的样品是一面多层 $\text{LaF}_3/\text{MgF}_2$ 高反镜,基板是直径25 mm,厚度2 mm的 CaF_2 .反射带中心波长为193 nm,反射率约为98%.实验在空气环境中进行.由于空气在193 nm处存在一定的吸收,实验测量的热透镜信号包括样品内折射率变化和空气吸收导致的空气折射率变化的影响.

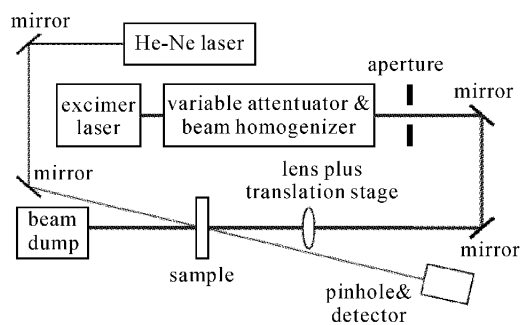


图 1 实验装置图

Fig. 1 Schematic diagram of the pulsed thermal lens experiment

在进行热透镜测量前,测量了不同聚焦透镜位置时样品位置处加热光束的强度分布及其横向(x 方向)、纵向(y 方向)尺寸(半峰全宽),结果如图2和3所示.从图中可以看出,移动聚焦透镜位置主要改变光斑的横向尺寸及分布.定义样品表面加热光束为平顶光束(图2(b))时透镜的相对位置为0 mm(此时聚焦透镜与样品之间的距离约为165 mm),此时光斑的直径约为0.53 mm.在偏离像面位置处的类椭圆形光斑是由准分子激光器的输出光束特性和光束均匀器特性决定的.当聚焦透镜相

对位置从-11 mm变化到9 mm时,样品处光斑横向和纵向尺寸的变化范围分别为1.08 mm-0.54 mm-0.92 mm和0.52 mm-0.60 mm,如图3所示.样品处光斑在 x 和 y 方向的不同变化规律是由于准分子激光束在 x 和 y 方向的发散角不同引起的.这种不规则的变化使定量描述实验结果变得非常困难.在聚焦透镜位置的调节范围内样品处加热光束尺寸均小于探测光束尺寸(直径2.6 mm),满足模式不匹配热透镜构型条件.

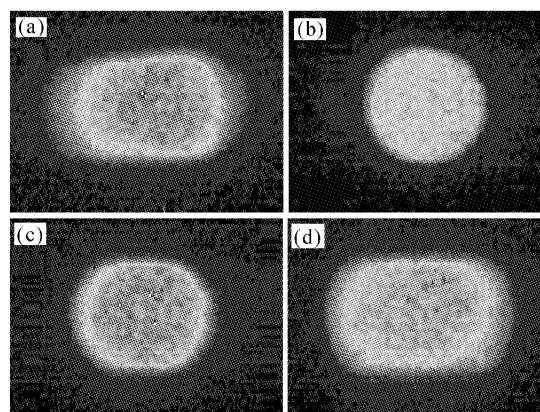


图 2 不同聚焦透镜位置时样品位置处加热光束的二维强度分布

Fig. 2 Two-dimensional intensity profiles of the excitation beam obtained with different focusing lens positions

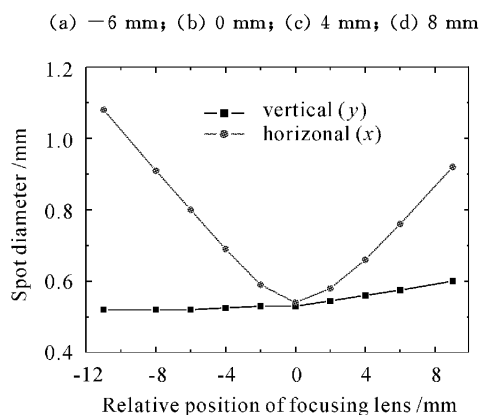


图 3 光斑尺寸与聚焦透镜位置的关系

Fig. 3 Spot size versus focusing-lens position

3 结果与讨论

实验首先测量了不同探测距离(定义为样品到探测器之间的距离)时热透镜信号最大振幅与聚焦透镜位置的关系,其结果如图4所示,探测距离分别为23.5 cm,53.5 cm和141 cm.图中热透镜信号最大振幅 S_{\max} 的定义为

$$S_{\max} = \Delta I_{\max} / I, \quad (1)$$

式中 ΔI_{\max} 为热透镜效应导致的最大探测光中心强度变化, I 为无热透镜效应时的探测光中心强度。从图中可以看出, 当探测距离较近时(近场探测), 热透镜信号振幅在聚焦透镜位置近似为 -2 mm 时出现最大, 而当探测距离较远时(远场探测), 信号振幅最大的位置则移动到 1 mm 左右。图中结果说明加热光斑的强度分布决定了信号振幅与探测距离的关系。

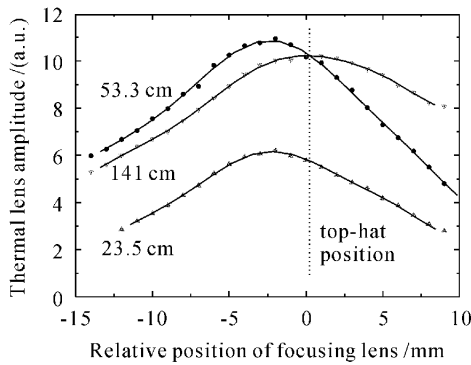


图 4 不同探测距离时热透镜信号最大振幅随聚焦透镜位置的变化曲线

Fig. 4 Maximum thermal lens amplitude versus relative position of the focusing lens obtained with a detection distance of 23.5 cm, 53.5 cm, and 141 cm, respectively

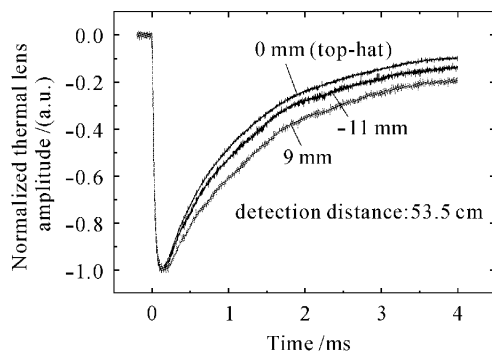


图 5 不同聚焦透镜位置时的归一化热透镜信号

Fig. 5 Normalized thermal lens signals obtained with different focusing-lens positions

同时也记录了在探测距离为 53.5 cm, 聚焦透镜位置为 -11 mm, 0 mm 和 9 mm 时的归一化热透镜信号的时间变化曲线, 如图 5 所示。热透镜信号的时间特性反映了样品内及相邻空气中热传导随时间变化的情况。探测光束区域内的热传导速率越快, 热透镜信号衰减越快。从图中可以看出, 当样品处的光斑尺寸最小且光斑边缘最陡时, 热透镜信号

衰减速率最快。随着光斑尺寸的增大和光斑边缘变宽, 信号衰减速率随之减慢。值得说明的是, 虽然当透镜位置为 -11 mm 时样品处加热光束的横向光斑尺寸比透镜位置为 9 mm 时的大, 但在该两透镜位置时热传导的速率主要是纵向热传导决定的, 因为在透镜位置为 9 mm 时的纵向光斑尺寸较小, 此时的热透镜信号衰减速率反而快。

在模式不匹配的热透镜构型中, 探测距离是一个重要的实验参数。通过设置合适的探测距离, 可以提高热透镜的测量灵敏度。从图 4 可以看出, 当加热光斑形状不同时, 热透镜信号最大振幅随探测距离的变化情况也将不同。图 6 给出了当加热光束为平顶光束时热透镜信号最大振幅随探测距离变化的测量结果。图中给出的误差范围是三次测量的统计结果, 实线和虚线分别是激励光束为平顶光束和高斯光束时的理论结果^[8]。实验结果显示当探测距离增加时, 热透镜信号最大振幅最初随探测距离迅速增加, 在 60 cm 附近达到最大值并饱和, 随后基本与探测距离无关。从图中可以看出, 实验结果与理论计算产生了严重的偏离。主要原因是实验中热透镜信号包括了样品吸收和空气吸收的影响。由于实验使用了共线式构型, 在空气中两光束的相互作用距离较长, 在样品前较长一段距离内(请注意加热光斑尺寸是位置的函数)空气由于吸收而产生的折射率变化对热透镜信号的影响导致了实验和理论结果的偏离。在没有折射率变化影响的前提下, 理论结果显示热透镜信号振幅在如下探测距离时达到最大^[8]

$$z_0 = A \cdot \frac{\pi a^2}{\lambda}, \quad (2)$$

式中 a 为激励光束半径, λ 为探测激光束的波长, A

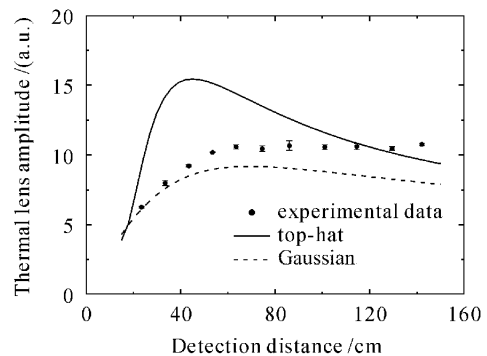


图 6 平顶加热光束时热透镜信号最大振幅随探测距离的变化

Fig. 6 Maximum thermal lens amplitude versus detection distance obtained with a top-hat beam excitation

为由激励光束强度分布形状决定的参数。当激励光束为高斯光束时 $A = 1$, 平顶光束时 A 约为 0.7。激励光束强度分布越平滑, A 值越大。

实验测量了平顶加热光束时探测距离为 23.5 cm, 63.5 cm, 114 cm 和 142 cm 时的热透镜信号时间特性, 结果如图 7 所示。与理论结果^[8]一致, 在近场探测时热透镜信号对加热光束强度分布非常敏感, 信号振幅随时间衰减很快。当探测距离逐渐增加时, 热透镜信号的衰减速率逐渐降低直至饱和。在远场探测时, 热透镜信号的时间特性变得与探测距离无关。因此, 当利用热透镜信号的时间特性测量材料的热传导特性时^[7], 应采用远场探测构型, 以消除实验参数对测量结果的影响。

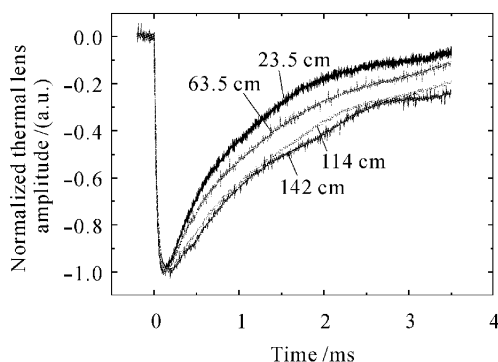


图 7 不同探测距离时的归一化热透镜信号

Fig. 7 Normalized thermal lens signals obtained with different detection distances

实验中由于光束强度分布和尺寸随聚焦透镜位置变化的不规律性及空气吸收的影响, 未能对实验结果进行定量分析。如果使用其他波长的激励光束来消除空气吸收的影响, 期望实验和理论结果能相符合, 为优化实验构型提供准确的依据。

4 结 论

实验证明平顶光束及非高斯加热光束可用于模式不匹配的热透镜构型中。相关构型的最佳实验参数如最佳探测距离与加热光束的强度分布直接有关。通过构型优化, 非高斯光束热透镜技术可望在化学分析、光学薄膜检测和材料热特性测量领域得到广泛应用。

致谢 本工作由德国洪堡基金资助, 在德国 Laser Zentrum Hannover 完成。实验中得到了 Holger Blaschke 的大力帮助, 在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

- 1 Stephen E. Bialkowski. Photothermal Spectroscopy Methods for Chemical Analysis [M]. New York: Wiley, 1996
- 2 Wang Yingjian, Hu Haiyang, Li Qingguo *et al.*. Study of weak absorption of the thin films coated on the Si plates [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(10): 937~940
王英剑, 胡海洋, 李庆国等. 高反射硅镜弱吸收研究[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(10): 937~940
- 3 Fan Shuhai, He Hongbo, Fan Zhengxiu *et al.*. Theory and experiment of surface thermal lens technique used in absorption measurement of thin films [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(12): 5774~5777
范树海, 贺洪波, 范正修等. 表面热透镜技术应用于薄膜微弱吸收测量的理论和实验[J]. *物理学报*, 2005, **54**(12): 5774~5777
- 4 Mladen Franko, Chieu D. Tran. Analytical thermal lens instrumentation [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1996, **67**(1): 1~18
- 5 Bincheng Li, Sven Martin, Eberhard Welsch. Pulsed top-hat beam thermal-lens measurement for ultraviolet dielectric coatings [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(20): 1398~1400
- 6 Bincheng Li, Sven Martin, Eberhard Welsch. In situ measurement on ultraviolet dielectric components by a pulsed top-hat beam thermal lens [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(25): 4690~4697
- 7 J. F. Power. Pulsed mode thermal lens effect detection in the near field via thermally-induced probe beam spatial phase modulation; a theory [J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(1): 52~63
- 8 Bincheng Li, Eberhard Welsch. Probe-beam diffraction in a pulsed top-hat beam thermal lens with a mode-mismatched configuration [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(24): 5241~5249
- 9 H. Blaschke, M. Jupé, D. Ristau. Absorbance measurements for the DUV spectral range by laser calorimetry [C]. *SPIE*, 2003, **4932**: 467~474