

doi:10.3788/gzxb20154412.1214001

超短脉冲数字全息泵浦-探测系统的能量测算

岳文艳¹, 杨晓苹¹, 杨勇²

(1 天津理工大学 电子信息工程学院, 天津 300384)

(2 南开大学 现代光学研究所 教育部光电信息技术科学重点实验室, 天津 300071)

摘 要:提出了一种测算探测系统所需能量最低值的方法. 利用该方法分别针对子脉冲能量不均匀和子脉冲能量均匀的脉冲数字全息光路系统进行讨论, 计算得到其探测系统对入射光强的能量利用率分别为 41.3% 和 28.8%. 用马赫-曾德干涉仪测出用以记录干涉条纹的电荷耦合器件能够有效记录全息图的能量临界值为 56.7 mW. 根据能量临界值和入射光能量利用率反推出两种探测系统所需的最低能量分别为 0.86 W 和 1.575 W.

关键词:全息; 超短脉冲; 马赫-增德尔干涉仪; 能量利用; 全息图

中图分类号: O436

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)12-1214001-5

Power Measurement of Ultra-fast Pulse Digital Holography Pump-probe System

YUE Wen-yan¹, YANG Xiao-ping¹, YANG Yong²

(1 School of Electronics Information Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

(2 Nankai University, Key Laboratory of Optoelectronic Information Science and Technology, Institute of Modern Optics, Ministry of Education, Tianjin 300071, China)

Abstract: A method of measuring the lowest energy in the detection system was proposed. The system in which the power of subpulse is equable and the system in which the power of subpulse is inequable were studied by the proposed method, the results show that the energy efficiency of input intensity are 41.3% and 28.8%, respectively. The threshold energy of the charge-coupled device which used to detect the interference fringe is measured of 56.7 mW by using Mach-Zehnder interferometers. The energy two kinds of detecting systems need are 0.86 W and 1.575 W respectively calculated by the measured energy efficiency and threshold.

Key words: Ultrashort pulses; Mach-Zehnder interferometers; Energy utilization; Holograms

OCIS Codes: 140.3538; 090.1995; 320.7090; 320.7160; 320.5550

0 引言

随着超短脉冲激光技术及电荷耦合器件(Charge-Coupled Device, CCD)技术的迅速发展, 泵浦-探测技术与数字全息技术相结合, 已成为记录和再现超快动态过程的有力工具, 可用于对激光烧蚀物体的研究, 如对飞秒激光烧蚀金属^[1]和石英玻璃^[2-3]、击穿空气产生等离子体^[4-5]、损伤薄膜^[6]、烧蚀去离子水表面^[7]的超快瞬态过程的记录和再现; 对光的非线性效应的记录和再现^[8-9]; 对三维分布的物场的测量等^[10-15].

泵浦-探测系统正常工作的前提是激光器提供的能量可以同时满足超快过程的泵浦和探测的能量需求^[1,4-5]. 超快过程的激发往往需要较多的能量, 而一台激光器的能量有限, 将探测系统的能量控制在一个合理的范围, 就可以将更多的能量用于泵浦, 有利于超快过程的获得^[2-3]. 同时, 激光器的成本与输出的能量成正比, 输出能量越高, 其成本也越高. 因此合理利用激光器的能量可以节约成本, 避免资源浪费. 探测系统能否有效工作取决于探测系统的每个子脉冲到达 CCD 光敏面时能否被 CCD 有效记录. 对探测系统能量的测

基金项目: 国家自然科学基金科学仪器基础研究项目(No. 61227010)资助

第一作者: 岳文艳(1990-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为数字全息技术. Email: yuef2003@163.com

导师(通讯作者): 杨晓苹(1962-), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为光信息处理. Email: yangxiaoping@tsinghua.org.cn

收稿日期: 2015-04-07; 录用日期: 2015-09-02

<http://www.photon.ac.cn>

算能够保证探测系统分配的能量达到记录超快过程的要求. 通常实验时采用的方法是用两台高功率激光器分别进行泵浦和探测^[6-7], 但比较浪费资源.

本文针对超短脉冲激光数字全息系统, 提出一种测算探测系统能量的方法, 理论计算探测系统对出射激光单脉冲的能量利用率, 并用实验测得 CCD 可有效记录干涉信息所需的最低能量, 从而推算出探测系统所需的能量.

1 能量利用率计算

1.1 子脉冲能量不均匀的探测系统

将光路系统中的每一个元件命名为一个函数, 函数值为该元件对光的透过率, 函数变量为若干参量, 分别代表该元件对光产生衰减的几个原因. 这样只要在主程序中, 按照光束经过的元件顺序, 依次调用各个元件的函数, 就可得到从入射到出射的整个光路对入射光束的利用率, 即

$$D = d_1 \times d_2 \times d_3 \times \dots \times d_n \quad (1)$$

式中, D 表示系统的总的光能的利用率, d_i ($i=1, 2, 3, \dots, n$) 表示某一个元件对应的光透过率.

以如图 1 所示的探测空气电离现象超快过程的泵浦-探测系统^[16]为例进行能量计算. 该光路是一个三路复用系统, 可实现对单脉冲的自动分割, 产生具有一定延迟的三个角度不变的物光子脉冲和角度多重的三个参考光子脉冲, 并实现立体角分复用的超短脉冲数字全息记录. 图中虚线框内的部分是探测系统, 包括物光部分和参考光部分. 激光器能量一部分用作探测, 另一部分用作空气电离现象的泵浦.

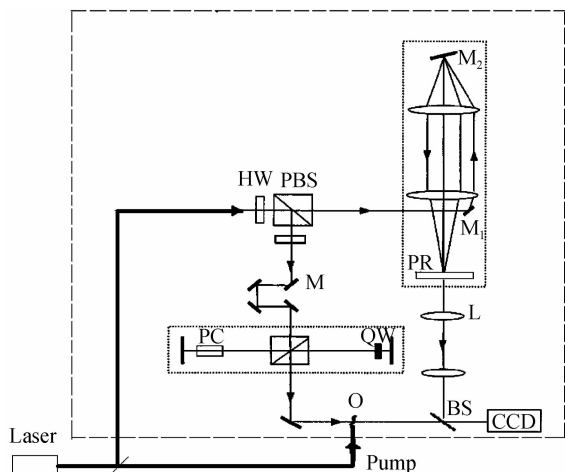


图 1 3路超短脉冲数字全息光路

Fig. 1 3 roads ultra-fast pulse digital holography light path
 对于一个参考光子脉冲来说, 光线入射后, 依次经过半波片 (Half Wave plate, HW)、偏振分束器 (Polarization Beam Splitter, PBS)、反射镜 (M_1)、两个透镜 (Lens, L)、反射镜 (M_2)、两个透镜-部分反射镜

(Part Reflection Mirror, PR)、两个透镜-分束镜 (Beam Splitter, BS), 最后到达记录介质 CCD.

定义半波片的透过率函数为

$$d_1 = 0.98 \quad (2)$$

式中 d_1 代表半波片的透射率, 0.98 是实验中选用的半波片的实际透光率. 定义偏振分束器 PBS 的函数为

$$d_2 = 0.5 \times (1 - \alpha) = 0.5 \times (1 - 0.02) = 0.49 \quad (3)$$

式中 d_2 代表 PBS 的透射率, α 是实验中选用的偏振分束器的损耗.

同理, 定义反射镜、透镜、部分反射镜、分束镜的透过率分别为

$$d_3 = 0.98 \quad (4)$$

$$d_4 = 0.98 \quad (5)$$

$$d_5 = 0.5 \quad (6)$$

$$d_6 = 0.5 \times (1 - \alpha) = 0.5 \times (1 - 0.02) = 0.49 \quad (7)$$

依次定义每个元件的函数后, 在主程序中调用这些函数, 便可得到这束子脉冲对入射脉冲的能量利用率, 即

$$D_{r1} = d_1 \times d_2 \times \dots \times d_n = d_1 \times d_2 \times d_3^2 \times d_4^6 \times d_5 \times d_6 = 0.98 \times 0.49 \times 0.98^2 \times 0.98^6 \times 0.5 \times 0.49 = 0.100 \quad (8)$$

式中, D_{r1} 代表参考光子脉冲 1 对入射光的利用率.

将每个元件定义为一个函数后, 当光路设计发生改变时, 只需在调用这些函数的主程序中稍作修改, 故该方法能够适应复杂系统的能量计算.

设激光器出射的一个光脉冲的能量为 1, 经计算可得到图 1 所示光路的 3 个参考光子脉冲对入射光的能量利用率分别为 0.100、0.045、0.020, 3 个物光子脉冲对入射光的能量利用率分别为 0.104、0.098、0.046. 故整个探测系统对入射光的能量利用率为

$$D = D_{oi} + D_{ri} = D_{o1} + D_{o2} + D_{o3} + D_{r1} + D_{r2} + D_{r3} = 0.413 = 41.3\% \quad (i=1, 2, 3) \quad (9)$$

式中 D_{oi} 表示物光各子脉冲对入射脉冲的能量利用率, D_{ri} 表示参考光各子脉冲对入射脉冲的能量利用率.

1.2 子脉冲能量均匀的探测系统

以图 2 所示的脉冲数字全息系统进行计算. 图中所示是一个探测空气电离产生等离子体超快现象的 8 路脉冲探测系统.

能量利用率的计算原理与过程同 1.1 节中相同, 不同的是在这个系统中, 可以设计每个分束镜的分束比, 使得每个出射子脉冲的能量均等, 经计算, 每个子脉冲对入射光能量的利用率均为

$$D_i = 0.018 \quad (10)$$

故整个探测系统对入射光的总利用率为

$$D = 16 \times D_i = 0.288 = 28.8\% \quad (11)$$

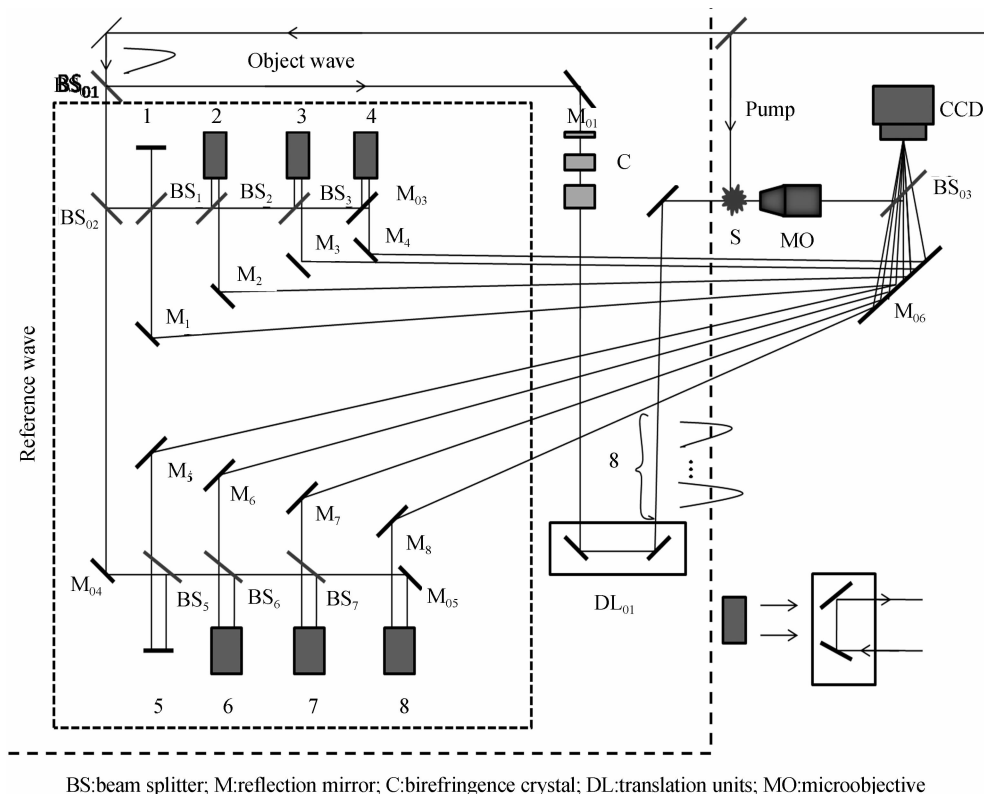
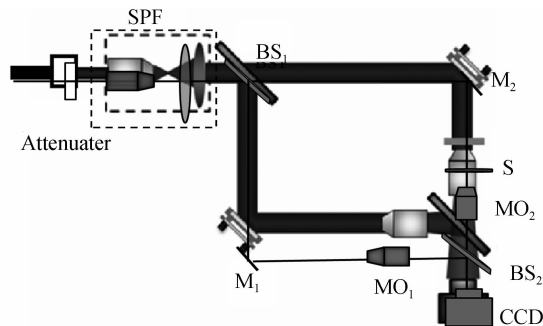


图2 8路脉冲数字全息系统
Fig. 2 8 roads pulse digital holography system

2 CCD有效记录的临界能量测试

能量测试的目的是测量 CCD 能够有效记录干涉信息时所需的最低能量. 由于数字全息要再现得到物光光场, 所以再现物光波的质量即成为检验 CCD 能否有效记录全息图的标准. 即 CCD 在某能量下拍摄全息图时, 再现出的物光波恰好清晰可见, 则此时的记录能量为 CCD 有效记录所需的临界能量.

选用经典的马赫-曾德干涉仪进行 CCD 临界能量测试^[17], 能量的衰减通过在干涉仪前设置衰减系统实现, 衰减系统由不同衰减倍率的衰减片组合而成. 测试光路如图 3.



Attenuator: the light-weakening system; SPF: beam expander and collimation BS: beam splitter mirror; M: reflection mirror; MO: Microscope objective; S: subject

图3 能量测试光路
Fig. 3 Power measuring light path

图3中, 由激光器发出的光经过分光镜 BS₁ 分束后, 一束光经过扩束、准直形成平行光并通过显微物镜后入射到 CCD 靶面上, 这束光作为参考光波; 另一束光同样通过扩束、准直后照射在被测样品上, 被测样品的透射光经过显微物镜的放大、成像至 CCD 靶面, 这束光作为物光波.

实验中采用波长为 520 nm, 振荡频率为 1 MHz, 功率为 85 mW 的激光器, 工作模式为连续脉冲模式, 并采用 Point Grey 公司的 CCD 相机 Chameleon CMLN-13S2M 作为记录元件, 该相机的帧频为 15. 被测样品为分辨率版.

图4为该 CCD 的光谱响应曲线. 从图中可以看出

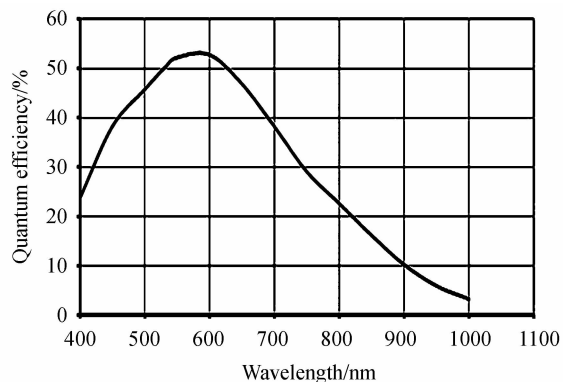


图4 Chameleon CMLN-13S2M 光谱响应曲线
Fig. 4 Chameleon CMLN-13S2M response curve of CCD spectrograph

这款 CCD 响应最好的波长在 580 nm 左右,在同样的照度下,光源波长越接近 580 nm,CCD 的输出值就越高,实验结果所得的探测系统所需阈值就越低.实验采用 520 nm 的光源,CCD 的量子效率约为 50%.

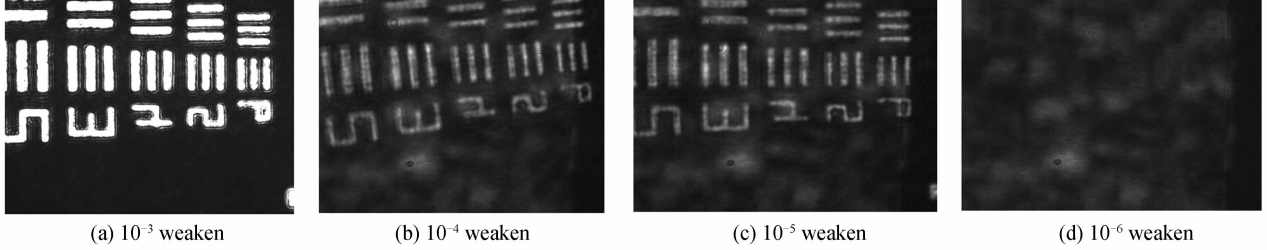


图 5 各倍率能量衰减下的重构物光振幅
Fig. 5 Amplitude of reconstruction object wave under each weaken rate

3 实验结果及分析

3.1 子脉冲能量不均匀的探测系

测出 CCD 可有效记录干涉条纹时的能量临界衰减值为 10^{-5} 量级,但测试时,激光器的工作模式为连续脉冲模式,而用于实际探测时,激光器的工作模式是单脉冲模式,同时,CCD 的响应具有积分效应,故考虑激光器的振荡频率和 CCD 的帧频,CCD 能够有效记录全息图时,从激光器发出的单脉冲能量为

$$E_{\text{separate}} = E_{\text{continuous}} \times t \times f \quad (12)$$

式中, E_{separate} 代表激光器工作在单脉冲模式时,出射的单脉冲应当具有的能量, $E_{\text{continuous}}$ 代表激光器工作在连续脉冲模式时,CCD 可有效记录全息图时的临界能量, t 代表 CCD 一帧的时间, f 代表激光器的振荡频率.

所以在单脉冲模式下,CCD 能够有效记录全息图时,从激光器出射的单脉冲能量为

$$E_{\text{separate}} = E_{\text{continuous}} \times t \times f = 85 \times 10^{-5} \times \frac{1}{15} \times 10^6 = 56.7 \text{ mW} \quad (13)$$

探测系统能够正常工作的条件,是探测系统中能量最小的一对物光和参考光子脉冲所具有的能量满足 CCD 的有效记录要求,因此反推图 1 中探测系统所需能量为

$$E_{\text{probe}} = \frac{E_{\text{separate}}}{D_{\text{omin}} + D_{\text{rmin}}} = \frac{56.7}{0.020 + 0.046} = 859.1 \text{ mW} = 0.86 \text{ W} \quad (14)$$

式中, E_{probe} 代表探测系统所需的最小能量值, E_{separate} 代表 CCD 可有效记录全息图时所需的最低能量, D_{omin} 和 D_{rmin} 分别代表探测系统中能量最低的子脉冲对入射光能的利用率.

3.2 子脉冲能量均匀的探测系统

图 2 所示的探测系统因其出射的每个子脉冲能量均等,故任意一对子脉冲的能量满足 CCD 的记录要求

图 5 为不同衰减倍率下得到的再现物光振幅.从图中可以看出,将激光器能量衰减到 10^{-5} 量级时,再现像依然清晰;但当其衰减到 10^{-6} 量级时,再现像不可分辨.故 CCD 相机可探测的临界衰减值为 10^{-5} 量级.

即可.所以系统所需的最低能量为

$$E_{\text{probe}} = \frac{E_{\text{separate}}}{2 \times D_i} = \frac{56.7}{2 \times 0.018} = 1575 \text{ mW} = 1.575 \text{ W} \quad (15)$$

计算值与实际值存在误差,误差的主要来源有:计算时代入的各种镜片的参量,如反射镜的反射率,分光平片的分光比等与实际光路中的情况存在微小差异;光源的稳定性存在波动,如出光功率和光斑质量在每次开启激光器时存在差异;在泵浦过程中激发的超快现象对光能有吸收.另外,由于光学元件表面的灰尘造成的光的散射也会损耗能量.一般在计算值基础上为探测系统能量多预留一个数量级,用于实际搭建光路时不可避免的损耗.

4 结论

本文针对超短脉冲数字全息泵浦-探测系统的能量问题,提出了一种计算和测试探测系统所需最低能量的方法.以两个不同的探测系统为例,通过计算得到了探测系统对入射光束的能量利用率,实验测试得到选用的 CCD 可以有效记录全息图信息时,所需的最低能量,从而得出了探测系统所需的最低输入能量.该方法适应性强,操作性便捷,可用于复杂光路设计时的能量利用率评估与激光器能量的合理分配,从而降低科研成本,避免资源浪费.

参考文献

- [1] HU Hao-feng, WANG Xiao-lei, LI Zhi-lei, *et al.* Ultra-fast pulsed digital holographic diagnosis of ejected material in femtosecond laser ablation of aluminum[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(11): 7662-7667.
胡浩丰,王晓雷,李智磊,等.飞秒激光烧蚀铝靶产生喷射物的超快脉冲数字全息诊断[J]. *物理学报*, 2009, **58**(11): 7662-7667.
- [2] HU Hao-feng, WANG Xiao-lei, GUO Wen-gang, *et al.* Time-resolved optical diagnosis of intense femtosecond laser ablation of silica glass[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(1): 017901.
胡浩丰,王晓雷,郭文刚,等.强飞秒激光烧蚀石英玻璃的超快时间分辨光学诊断[J]. *物理学报*, 2011, **60**(1): 017901.
- [3] HU Hao-feng, WANG Xiao-lei, ZHAI Hong-chen. High-

- fluence femtosecond laser ablation of silica glass; effects of laser-induced pressure[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2011, **44**(13): 135202.
- [4] ZHAI Hong-chen, WANG Xiao-lei, MU Guo-guang. Record of ultra-fast process of the femtosecond order by pulse digital holography[J]. *Laser&Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(2): 19.
翟宏琛,王晓雷,母国光. 记录飞秒级超快瞬态过程的脉冲数字全息技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, **44**(2): 19.
- [5] SHAKED N T, ZHU Y, RINEHART M T, *et al.* Two-step-only phase-shifting interferometry with optimized detector bandwidth for microscopy of live cells[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(18): 15585-15591.
- [6] ŠIAULYS N, LAURENT G, ANDRIUS M. Direct holographic imaging of ultrafast laser damage process in thin films[J]. *Optics Letters*, 2014, **39**(7): 2164-2167.
- [7] WANG J, ZHAO J L, DI J L, *et al.* Visual measurement of the pulse laser ablation process on liquid surface by using digital holography[J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, **115**(17): 173106.
- [8] ZHU Lin-wei, SUN Mei-yu, CHEN Jian-nong, *et al.* Integrated digital holography for measuring the photothermal effect induced by femtosecond laser pulses [J]. *Optical Engineering*, 2014, **53**(11): 112311.
- [9] WANG Xiao-lei, ZHAI Hong-chen, WANG Yi, *et al.* Spatially angular multiplexing in ultra-short pulsed digital holography[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(3): 1137-1142.
王晓雷,翟宏琛,王毅,等. 超短脉冲数字全息术中的立体角分复用技术[J]. *物理学报*, 2006, **55**(3): 1137-1142.
- [10] LI Lu-jie, WANG Xiao-lei, ZHAI Hong-chen. Single-shot diagnostic for the three-dimensional field distribution of a terahertz pulse based on pulsed digital holography[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(14): 2737-2739.
- [11] TAKASHI K. Digital light-in-flight recording by holography by use of a femtosecond pulsed laser[J]. *Ieee Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2012, **18**(1): 479-485.
- [12] JIA Fang, FENG Zhong-yao, ZHOU Li-bin, *et al.* Three dimensional surface shape measurement of big objects by pre-imaging digital holography[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(11): 2239-2243.
贾昉,冯忠耀,周利斌,等. 预成像数字全息测量大物体三维形貌[J]. *光子学报*, 2008, **37**(11): 2239-2243.
- [13] LU Xiao-wei, LI Jing-zhen, CHEN Hong-yi, *et al.* A simple and compact design for multi-chromatic channel digital holography to record femtosecond order processes [J]. *Journal of Optics*, 2012, **14**(6): 065205.
- [14] ASSAFRAO A C, WACHTERS A J H, VERHEIJEN M, *et al.* Direct measurement of the near-field super resolved focused spot in InSb[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(9): 10426-10437.
- [15] DONG Ke-ping, QIAN Xiao-fan, ZHANG Lei, *et al.* Digital holographic microscopy study for cells[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(11): 2013-2016.
董可平,钱晓凡,张磊,等. 数字全息显微术对细胞的研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(11): 2013-2016.
- [16] ŠIAULYS N, STANISLAUSKA S T, *et al.* Ultrafast nonlinear dynamics in thin GaN films studied by femtosecond digital holography[C]. EPJ Web of Conferences, 2013, **41**: 04007.
- [17] DENG Li-jun. Digital holographic microscopy and study on the several application technologies[D]. NanKai University. 2014.
邓丽军. 数字全息显微术及若干应用技术研究[D]. 南开大学, 2014.