

文章编号: 1001-3806(2009)03-0279-04

飞秒激光直写钇镱玻璃波导激光器的优化设计

尚艳丽, 陈海滨, 洪治*

(中国计量学院 太赫兹技术与应用研究所, 杭州 310018)

摘要: 为了对双向抽运的飞秒激光直写钇镱共掺磷酸盐玻璃波导激光器进行数值模拟, 采用钇镱共掺系统的速率方程及传输方程, 对波导尺寸、激光器后腔镜反射率、掺杂钇镱离子浓度比等参量进行了优化。得到当波导长度为10mm、后腔镜反射率为0.6、掺杂钇镱离子浓度比为3.6, 975nm波长400mW抽运时, 有1535nm波长57mW的激光输出。结果表明, 计算结果和国外相关报道的实验结果相近, 能够为飞秒激光加工有源玻璃波导及其激光器设计提供一定的理论依据。

关键词: 超快光学; 波导激光器; 速率方程; 飞秒激光微加工

中图分类号: TN248.1+2 **文献标识码:** A

Optimum design of the $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped glass waveguide laser fabricated by femtosecond laser pulses

SHANG Yan-li, CHEN Hai-bin, HONG Zhi

(Centre for THz Research, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order that numerical simulation of the bidirectional pumped, erbium and ytterbium co-doped phosphate glass waveguide laser fabricated by femtosecond laser pulses was performed, based on the transition rate equations and propagation equations of the erbium and ytterbium co-doped system, the optimal parameters such as the size of the waveguide, output coupler reflectivity, the ratio of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ were obtained. The results indicated that with the parameters of 10mm long waveguide, 0.6 of the mirror reflectivity and 3.6 of the ratio of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$, the laser at 1535nm output up to 57mW with the pump power of 400mW at 975nm. The theoretical analysis agreed well with the experimental results reported so far. The simulation results provide a rigid theoretical base for the fabrication of active glass waveguide and the design of femtosecond laser.

Key words: ultrafast optics; waveguide laser; transition rate equations; femtosecond laser microfabrication

引言

用近红外超短激光脉冲照射光学介质, 多光子吸收和雪崩电离等效应可引起光学介质内部结构的永久性破坏^[1-2]。利用这一技术可以进行光栅、耦合器、增益波导等无源和有源光子器件的加工制作。与离子交换/扩散、光刻技术等其它成熟的波导制作工艺相比, 飞秒激光直写技术不仅具有制作工艺简单、低成本、大批量、适用介质更广等优点, 而且可方便地实现3维集成光学器件的制作。

目前, 在很多无源光学介质中实现了2维、3维光波导、光分束器、光耦合器等器件的飞秒激光脉冲直写

制作^[3-6]。飞秒激光直写有源波导, 进而对其放大器及激光器性能的研究也越来越受到人们的重视^[7-9]。其中, 直写波导参量(长度、横截面尺寸、折射率分布及损耗等)及波导与通信光纤的耦合等因素在很大程度上影响波导激光器的性能。因此, 需要对其进行理论计算及参量优化, 进而指导波导的飞秒加工制作。

作者从钇镱共掺系统的速率方程及传输方程出发, 对双向抽运的飞秒激光直写钇镱共掺磷酸盐玻璃波导激光器进行了数值模拟及参量优化, 从而为飞秒激光加工有源玻璃波导及其激光器设计提供一定的理论依据。

1 基本理论模型

$\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺系统的能级图如图1所示。在图1中, Er^{3+} 的各能级 $^4\text{I}_{15/2}$, $^4\text{I}_{13/2}$ 上的粒子数密度分别用 n_1, n_2 表示, Yb^{3+} 的各能级 $^2\text{F}_{7/2}$, $^2\text{F}_{5/2}$ 上的粒子数密度分别用 n_5, n_6 表示。由于 Er^{3+} 能级 $^4\text{I}_{11/2}$ 上粒子的寿命极短, 从 Er^{3+} 到 Yb^{3+} 的能量传输过程可以忽略不计。

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(Y105426)

作者简介: 尚艳丽(1982-), 女, 硕士研究生, 主要从事飞秒激光加工波导方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: hongzhi@cjl.u.edu.cn

收稿日期: 2008-04-16; 收到修改稿日期: 2008-08-13

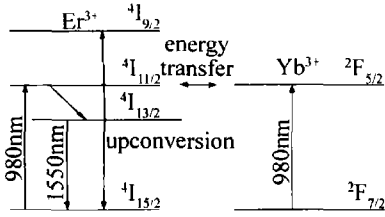


Fig. 1 Energy-level diagram of the $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped system

假设系统是由 975nm 波长的光抽运,通过对 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 粒子数密度变化情况的分析,稳态时 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 耦合多能级系统的速率方程用重叠积分的方法可写为^[10]:

$$\begin{cases} -\frac{\sigma_{a,s} I_s(z) n_1(z) \Gamma_s - \sigma_{a,p} I_p(z) n_1(z) \Gamma_p + A_{21} n_2(z) + \frac{\sigma_{e,s} I_s(z) n_2(z) \Gamma_s + C_{up} n_2^2 - C_{cr} n_1(z) n_6(z) = 0}{h\nu_s}}{n_1(z) + n_2(z) = N_{Er}} \\ -\frac{\sigma_{a,p}' I_p(z) n_5(z) \Gamma_p + \frac{\sigma_{e,p} I_p(z) n_6(z) \Gamma_p + A_{65} n_6(z) + C_{cr} n_1(z) n_6(z) = 0}{h\nu_p}}{n_5(z) + n_6(z) = N_{Yb}} \end{cases} \quad (1)$$

式中, A_{21}, A_{65} 表示 $4I_{13/2}, 2F_{5/2}$ 能级上粒子自发辐射的几率, $A_{21} = 1/\tau_{21}, A_{65} = 1/\tau_{65}$, τ_{21}, τ_{65} 分别是 Er^{3+} 能级 $4I_{13/2}$ 和 Yb^{3+} 能级 $2F_{5/2}$ 上的荧光寿命。 $n_1(z), n_2(z), n_5(z), n_6(z)$ 分别是波导各点处 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 基态和激发态的粒子数。 Er^{3+} 粒子之间从 $4I_{13/2}$ 态分别到 $4I_{15/2}$ 态和 $4I_{9/2}$ 态的能量上转换效率用 $C_{up} n_2^2$ 来表示,从 Yb^{3+} 到 Er^{3+} 的能量传递过程的交叉弛豫项用 $C_{cr} n_1(z) n_6(z)$ 来表示, N_{Yb}, N_{Er} 分别表示波导中单位体积内的 $\text{Yb}^{3+}, \text{Er}^{3+}$ 个数。 $\sigma_{a,p}(\nu_s), \sigma_{a,p}'(\nu_p), \sigma_{e,p}(\nu_p), \sigma_{a,s}(\nu_s), \sigma_{e,s}(\nu_s)$ 分别是在抽运光和激光时 $\text{Yb}^{3+}, \text{Er}^{3+}$ 的吸收和发射截面面积, h 是普朗克常量, $I_s(z), I_p(z)$ 分别是激光和抽运光在波导长度 z 处的光强度, ν_s, ν_p 分别是激光和抽运光频率。 Γ_p, Γ_s 分别表示抽运光和激光光场强度的横向归一化分布与钇离子横向归一化分布之间的重叠积分。

在双向抽运方式下,设波导对抽运光和激光的损耗分别为 a_p 和 a_s ,忽略放大自发辐射的影响,波导中抽运功率和激光功率随波导长度变化的传输方程为^[11]:

$$\begin{cases} \pm \frac{dP_p^\pm(z)}{dz} = -a_p P_p^\pm(z) - \Gamma_p [\sigma_{a,p} n_1(z) + \sigma_{a,p}' n_5(z) - \sigma_{e,p} n_6(z)] P_p^\pm(z) \\ \pm \frac{dP_s^\pm(z)}{dz} = -a_s P_s^\pm(z) + \Gamma_s [\sigma_{e,s} n_2(z) - \sigma_{a,s} n_1(z)] P_s^\pm(z) \end{cases} \quad (2)$$

式中,正负号表示功率沿波导的正反两方向传输, $P_p^+(z), P_p^-(z), P_s^+(z), P_s^-(z)$ 分别表示沿波导正反两

个方向传播的抽运光和激光功率。其中, $P_p(z) = P_p^+(z) + P_p^-(z), P_s(z) = P_s^+(z) + P_s^-(z)$, 则, $I_s(z) = P_s(z)/A, I_p(z) = P_p(z)/A, A$ 是波导横截面积。

考虑到波导与通信光纤的耦合损耗,边界条件为:

$$\begin{cases} P_p^+(0) = P_{p,in} C_1 \\ P_p^-(0) = P_{p,in} C_1 \\ P_s^+(0) = R_1 P_s^-(0) C_1^2 \\ P_s^-(L) = R_2 P_s^+(L) C_1^2 \end{cases} \quad (3)$$

式中, R_1, R_2 分别表示前腔镜和后腔镜对激光的反射率, C_1 为波导与通信光纤之间的耦合效率。

输出功率可以表示为:

$$P_{s,out} = (1 - R_2) P_s^+(L) C_1 \quad (4)$$

结合方程组(1)式,利用 MATLAB 可求出方程组(2)式满足边界条件(3)式的数值解。

2 模拟结果

以飞秒激光直写的 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐玻璃波导为激光增益介质进行数值模拟。所用有源玻璃由中国科学院上海光学精密机械研究所提供,掺杂钇镱离子浓度分别为 $N_{Er} = 2.0 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}, N_{Yb} = 3.8 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$, 折射率为 1.55。其中 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐玻璃的吸收和发射曲线如图 2 所示。可由倒易法分别计算得到 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 的吸收和发射截面,数据如表 1 所示。采用的双向抽运波导激光器结构见图 3。

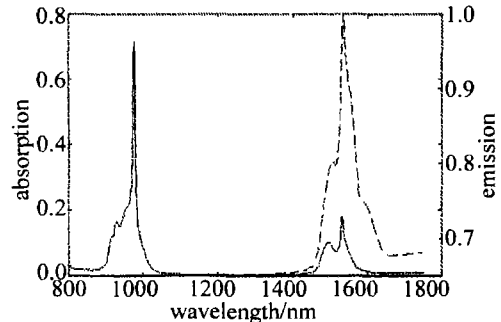


Fig. 2 Absorption and emission curves for the $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped phosphate glass

Table 1 Parameters for the simulation of the waveguide laser

parameters	values	parameters	values
λ_s	1535nm	λ_p	975nm
$[\text{Er}^{3+}]$	$2 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$	$[\text{Yb}^{3+}]$	$3.8 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$
$\sigma_{a,p}'(\nu_p)$	$2.68 \times 10^{-25} \text{ m}^2$	P_{p0}	500mW
$\sigma_{a,s}(\nu_s)$	$6.1 \times 10^{-25} \text{ m}^2$	$\sigma_{a,p}(\nu_p)$	$1.3 \times 10^{-24} \text{ m}^2$
$\sigma_{e,s}(\nu_s)$	$8.5 \times 10^{-25} \text{ m}^2$	$\sigma_{e,p}(\nu_p)$	$1.69 \times 10^{-24} \text{ m}^2$
$\Gamma_p^{[10]}$	0.8	$\Gamma_p^{[10]}$	0.8
$\tau_{21}^{[10]}$	8.5ms	$\tau_{65}^{[10]}$	2ms
$\alpha^{[9]}$	0.4dB/cm	$\beta^{[9]}$	0.4dB/cm
$C_{up}^{[14]}$	$4.1 \times 10^{-24} \text{ m}^3/\text{s}$	$C_{cr}^{[14]}$	$2.48 \times 10^{-22} \text{ m}^3/\text{s}$
R_1	0.999	C_1	0.95

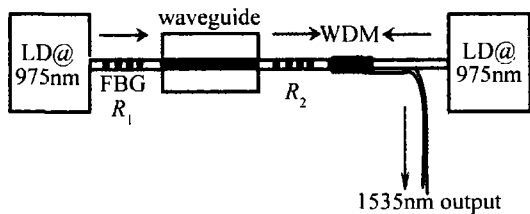


Fig. 3 Bidirectional pumped waveguide laser cavity configuration

飞秒激光直写波导制作一般采用横向直写方式,即加工波导轴向垂直于激光传输方向。这种方式加工的波导长度可以根据需要设定,通过适当设计直写光学系统,可得到径向对称性较好的圆波导^[12]。波导尺寸、均匀性及折射率的分布决定了波导与通信光纤的耦合损耗、波导传输损耗及抽运光和激光光场的重叠积分。飞秒激光加工的波导其折射率改变一般在 10^{-3} 量级。设波导折射率为高斯分布,采用有源波导直径约为 $9.5\mu\text{m}$ 。激光在波导中传输时其模场直径理论计算为 $11.8\mu\text{m}$ 。采用的单模通信光纤直径为 $8.3\mu\text{m}$,模场直径为 $9.3\mu\text{m}$ 。可通过计算波导模场与光纤模场的重叠积分获得波导与光纤的耦合损耗^[13]约为 0.15dB ,即其耦合效率 $C_1=96.6\%$ 。进行数值计算的有关参量见表1。

在抽运功率为 500mW 时,计算了在不同的后腔镜反射率情况下,激光输出功率随波导长度的变化曲线以选择最佳波导长度,结果见图4。在掺杂一定的钕镱离子浓度下($N_{\text{Er}}=2.0\times 10^{26}\text{m}^{-3}$, $N_{\text{Yb}}=3.8\times 10^{26}\text{m}^{-3}$),输出功率达到最大时对应的波导长度为 10mm 。

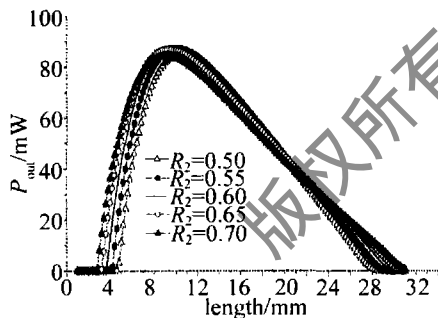


Fig. 4 Laser output as a function of the waveguide length

图5为在抽运功率及掺杂钕镱离子浓度不变、波导长度为 10mm 时,激光输出功率随后腔镜反射率的

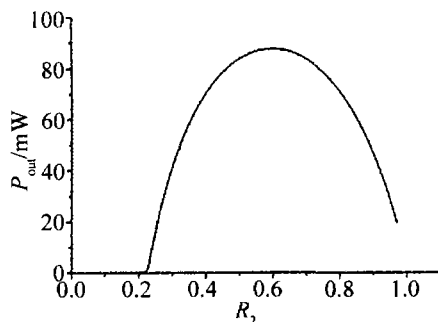


Fig. 5 Output power versus reflectivity R_2

变化曲线。可以看出,当后腔镜反射率 $R_2=0.6$ 时激光输出功率最大。

抽运功率为 500mW 、波导长度为 10mm 、后腔镜反射率 $R_2=0.6$,在钕离子浓度不变($N_{\text{Er}}=2.0\times 10^{23}\text{m}^{-3}$)时,激光输出功率随掺杂钕镱离子浓度比的关系曲线如图6所示。由于 Yb^{3+} 离子的吸收截面远大于 Er^{3+} 离子

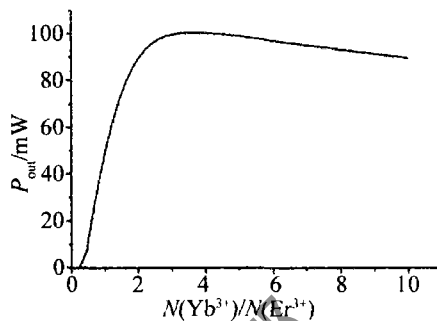


Fig. 6 Output power as a function of the ratio of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$

吸收截面,随着掺杂 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 浓度之比的上升,对运光的吸收增加,输出功率变大。当掺杂 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 离子浓度比超过一定值时,由于 Yb^{3+} 离子与 Er^{3+} 离子之间交叉弛豫导致的 Er^{3+} 上能级粒子数增加小于因 Er^{3+} 对抽运光吸收减少的 Er^{3+} 上能级粒子数时,激光输出功率将会下降。从图中可以得出:当 $N(\text{Yb}^{3+}):N(\text{Er}^{3+})=3.6$,即 $N_{\text{Er}}=2.0\times 10^{26}\text{m}^{-3}$, $N_{\text{Yb}}=6.8\times 10^{26}\text{m}^{-3}$ 时,输出功率达到最大。

利用上述优化参量,即波导长度为 10mm ,后腔镜反射率 $R_2=0.6$,掺杂钕镱离子浓度分别为 $N_{\text{Er}}=2.0\times 10^{26}\text{m}^{-3}$, $N_{\text{Yb}}=7.2\times 10^{26}\text{m}^{-3}$,计算了激光输出功率随抽运功率的变化曲线,如图7所示。当抽运功

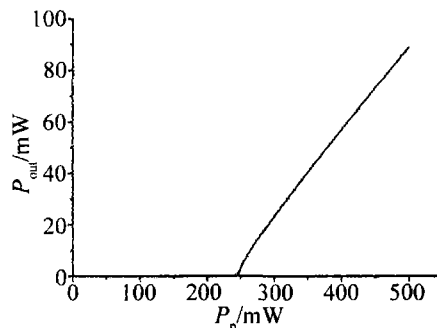


Fig. 7 Output power as a function of pump power

率为 400mW 时,激光输出功率为 57mW 。文献[9]中报道了利用飞秒激光脉冲直写有源波导并进行了激光实验,在 400mW 抽运下获得了 55mW 的激光输出。

3 结论

通过对飞秒激光直写钕镱共掺磷酸盐玻璃波导激光器进行模拟及参量优化,获得了最佳波导长度、后腔镜反射率及掺杂钕镱离子浓度比。在 975nm 波长 400mW 抽运时,得到了 1535nm 波长 57mW 的激光输

出。通过适当设计飞秒激光直写系统参量,得到合适的波导尺寸及折射率分布,从而优化波导与通信光纤的耦合损耗、波导传输损耗及抽运光和激光光场的重叠积分。这将为飞秒激光加工有源玻璃波导及其激光器设计提供一定的理论依据。

参考文献

- [1] DAVIS K M, MIURA K, SUGIMOTO N, *et al.* Writing waveguides in glass with a femtosecond laser [J]. *Opt Lett*, 1996, 21 (21): 1729-1731.
- [2] GLEZER E N, MILOSAVLJEVIC M, HUANG L, *et al.* 3-D optical storage inside transparent materials [J]. *Opt Lett*, 1996, 21 (24): 2023-2025.
- [3] CHAN J W, HUSER T, RISBUD S, *et al.* Structural changes in fused silica after exposure to focused femtosecond laser pulses [J]. *Opt Lett*, 2001, 26(21): 1726-1728.
- [4] SCHAFFER Ch B, BRODEUR A, GARCIA J F, *et al.* Micromachining bulk glass by use of femtosecond laser pulses with nanojoule energy [J]. *Opt Lett*, 2001, 26(2): 93-95.
- [5] NOLTE S, WILL M, BURGHOF J, *et al.* Femtosecond waveguide writing: a new avenue to three-dimensional integrated optics [J]. *Appl Phys*, 2003, A77(1): 109-111.
- [6] MINOSHIMA K, KOWALEVICZ A M, HARTL I, *et al.* Photonic device fabrication in glass by use of nonlinear materials processing with a femtosecond laser oscillator [J]. *Opt Lett*, 2001, 26(19): 1516-1518.
- [7] DELLA V G, OSELLAME R, CHIODO N, *et al.* C-band waveguide amplifier produced by femtosecond laser writing [J]. *Optics Express*, 2005, 13(16): 5976-5982.
- [8] TACCHEO S, DELLA V G, OSELLAME R, *et al.* Er: Yb-doped waveguide laser fabricated by femtosecond laser pulses [J]. *Opt Lett*, 2004, 29(22): 2626-2628.
- [9] DELLA V G, TACCHEO S, OSELLAME R, *et al.* 1.5 μm single longitudinal mode waveguide laser fabricated by femtosecond laser writing [J]. *Optics Express*, 2007, 15(6): 3190-3194.
- [10] CHEN H Y, LIU Y Zh, DAI J Zh, *et al.* Design of Er^{3+} - Yb^{3+} codoped phosphate glass (LGS-L) waveguide amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(6): 697-701 (in Chinese).
- [11] KELSON I, HARDY A A. Strongly pumped fiber lasers [J]. *IEEE J Q E*, 1998, 34(9): 1570-1577.
- [12] OSELLAME R, CERULLO G, TACCHEO S, *et al.* Femtosecond laser writing of symmetrical optical waveguides by astigmatically shaped beams [J]. *SPIE*, 2004, 5451: 360-368.
- [13] OSELLAME R, CHIODO N, VALLE G, *et al.* Optical waveguide writing with a diode-pumped femtosecond oscillator [J]. *Opt Lett*, 2004, 29(16): 1900-1902.
- [14] KARÁSEK M. Optimum design of Er^{3+} - Yb^{3+} codoped fibers for large-signal high-pump-power applications [J]. *IEEE J Q E*, 1997, 33(10): 1699-1705.

(上接第 278 页)

参考文献

- [1] LEBRUN D. Application of wavelet transform to hologram analysis: three-dimensional location of particle [J]. *Optics and Lasers Engineering*, 2000, 33(6): 409-421.
- [2] LIU Ch, LIU Zh G, BO F, *et al.* Separation of the reconstructed images in digital holography [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(5): 588-591 (in Chinese).
- [3] DUBOIS F, MONNPM O, YOURASSOWSKY C, *et al.* Border processing in digital holography by extension of the digital hologram and reduction of the higher spatial frequencies [J]. *Appl Opt*, 2002, 41(14): 2621-2626.
- [4] LEFEVRE C B, COETMELLE C, PEDRINI G, *et al.* Short-coherence digital microscopy by use of a lensless holographic imaging system [J]. *Appl Opt*, 2002, 41(22): 4489-4496.
- [5] CLERC F L, COLLOT L, GROSS M. Numerical heterodyne holography with two-dimensional photodetector arrays [J]. *Opt Lett*, 2000, 25(10): 716-718.
- [6] RENAUD B, JOSEPH C, JEAN-CLAUDE L. Short-range synthetic aperture imaging at 633nm by digital holography [J]. *Appl Opt*, 2002, 41(23): 4775-4782.
- [7] KREIS T, KAYSER D. Resolution increase by aperture synthesis in digital holography [J]. *Opt Engng*, 2007, 46(5): 055803(1-7).
- [8] MARTINEZ L, JAVIDI B. Synthetic aperture single-exposure on-axis digital holography [J]. *Optics Express*, 2008, 16(1): 161-169.
- [9] MASSIG J H. Digital off-axis holography with a synthetic aperture [J]. *Opt Lett*, 2002, 27(24): 2179-2181.
- [10] ZHONG L Y, ZHANG Y M, LU X X, *et al.* Synthetic aperture digital holography and multiple reference wave synthetic aperture digital holography [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(11): 1343-1347 (in Chinese).
- [11] WANG H Y, WANG D Y, XIE J J, *et al.* Study of the reconstructing methods of the digital off-axis lensless Fourier transform hologram [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(3): 288-290 (in Chinese).
- [12] YUAN C J, ZHONG L Y, WANG Y P, *et al.* The analysis of off-axis digital holographic recording conditions [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(5): 482-484 (in Chinese).
- [13] MARTINEZ L, JAVIDI B. Improved resolution synthetic aperture holographic imaging [J]. *Proc SPIE*, 2007, 6778: 67780A(1-8).
- [14] KREIS T, JPTNER W. Digital in-line holography in partial measurement [J]. *SPIE*, 1999, 3744: 54-64.
- [15] CHENG P Q. Digital signal processing [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2001: 185-215 (in Chinese).