

文章编号: 1001-3806(2006)01-0009-04

LD 抽运微片激光器光回馈技术的研究进展

万新军, 张书练*, 谈宜东

(清华大学 精密仪器系 光电所, 北京 100084)

摘要: 综述了半导体抽运微片激光器光回馈技术的研究进展状况, 介绍了其研究背景和基本理论模型; 阐述了它的应用成果, 包括超高灵敏度激光自混合多普勒测速技术, 可测量纳米级振动的测振仪, 以及激光回馈层析成像技术等; 展望了微片激光器回馈技术今后的发展方向。

关键词: 激光器; 光回馈; 自混合干涉; 自混合灵敏度

中图分类号: TP212.14 **文献标识码:** A

Development of optical feedback technology of LD pumped microchip lasers

WAN Xin-jun, ZHANG Shu-lian, TAN Yi-dong

(Optoelectronic Institute, Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The development of optical feedback technology of LD pumped microchip Nd:YAG lasers is reviewed. At first its research background and basic theoretical model are introduced. Then its applications such as ultrahigh sensitivity self-mixing laser Doppler velocimeters, nanometer vibrometers and laser optical feedback tomography are described in detail. Finally some predictions of its future development are also presented.

Key words: lasers; optical feedback; self-mixing interference; self-mixing sensitivity

引 言

在光回馈系统中, 激光器输出的光被外部物体反射或者散射回谐振腔中, 反馈光场和谐振腔内的光场相互作用, 导致激光器输出功率产生起伏。光回馈对于将激光器作为光源的光通讯、光盘存储以及传统干涉测量技术而言是干扰因素, 人们围绕消除它的不利影响展开了很多研究^[1]。但是, 研究人员也发现, 在一定条件下, 光回馈导致的激光器功率起伏类似于传统的双光束干涉信号, 可以用于对外部物体的运动参数进行传感测量。光回馈现象因此又被称为自混合干涉。光回馈技术与传统干涉技术相比有结构简单、易准直等优点, 在过去几十年中, 它已经被推广到许多传感应用研究中, 包括位移传感、Doppler测速、振动检测、距离检测、微观表面形貌检测等等^[2~6]。

光回馈系统的核心是激光器。以往的光回馈研究大多都围绕半导体激光器展开, 这有 3 点原因: 半导体激光器的性能研究得到了光通讯事业飞速发展的推动; 它体积小, 价格较低; 它可以电流调频, 丰富了测量方法。气体激光器因为有良好的光束质量, 回馈研究

也曾得到重视^[7]。1979 年, OTSUKA 首次研究了微片 $\text{LNdP}_4\text{O}_{12}$ (LNP) 激光器输出功率在光回馈下的动态特性^[8], 但此时的微片激光器仍需氩离子激光器抽运, 不易用于传感。之后, 半导体抽运微片激光器逐渐出现^[9], 它效率较高, 结构紧凑, 可以单纵模运转, 而且光束质量好, 在计量领域有较大的应用前景。半导体抽运微片激光器的光回馈应用研究在过去 10 多年中逐渐得到发展。尤其是研究人员发现微片激光器对光回馈的灵敏度可以比半导体激光器大至少两个量级, 围绕这一特点, 研究人员开展了多项较有特色的应用研究。

在光回馈研究方面, 国内在半导体激光器光回馈系统的理论建模和传感应用上都有一定的进展^[10~12], He-Ne 激光器的回馈研究有望突破国外的研究思路找到新方向^[13~15], 但是, 对于半导体抽运微片激光器的光回馈应用研究国内尚没有太多了解。

在本文中, 作者将进行微片激光器的回馈灵敏度理论推导, 介绍和评述国内外的应用研究成果, 最后对今后的研究方向做出一些展望。

1 微片激光器光回馈理论模型

微片激光器光回馈系统模型如图 1 所示。激光器输出的激光经过外部运动物体反射或散射后, 反馈光和静态光场相比有一个频率偏差 Ω , 这由 Doppler 频移 (ω_D) 或者外腔移频器件频移 (ω_o) 引起。反馈光将导

作者简介: 万新军 (1981-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光自混合干涉计量的研究。

* 通讯联系人。E-mail: zsl-dpi@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2004-12-01; 收到修改稿日期: 2004-12-13

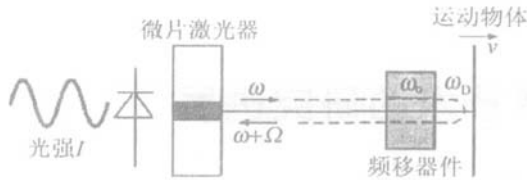


图1 微片激光器光回馈系统模型

致微片激光器的输出功率被调制,调制频率为反馈光和静态光场的频率差。在应用研究中,往往通过分析激光器输出光强 I 的调制频率反求 Doppler 频移,因此,光强调制幅度 $(\Delta I/I)$ 决定了测量的信噪比。

图1所示模型中,在考虑光回馈的情况下,微片激光器的速率方程如下^[16~18]:

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = \gamma(N_0 - N) - BN|E|^2 + F_N(t) \\ \frac{dE(t)}{dt} = i(\omega_c - \omega) + \frac{1}{2}(BN - \gamma_c) \times \\ E(t) + F_E(t) + \gamma_c E_{inj}(t) \\ E_{inj}(t) = KE(t - \tau) \exp(i\Omega t) \times \\ \exp[-i(\omega + \Omega/2)\tau] \end{cases} \quad (1)$$

式中, N 和 N_0 分别为实际反转粒子数和小信号反转粒子数; γ 为反转粒子的衰减速率; B 为爱因斯坦系数; $E(t) (=|E(t)| \exp[i\Phi(t)])$ 为谐振腔内激光电场, $\Phi(t)$ 为相位; ω_c 和 ω 分别为谐振腔共振频率和实际运转频率; γ_c 为光子的腔衰减速率; $F_N(t)$ 和 $F_E(t)$ 分别为由量子噪声引起的粒子数波动和电场波动; $E_{inj}(t)$ 为反馈光电场; K 为电场振幅反馈系数; τ 为反馈光在外腔的时延; Ω 为反馈光的频率偏移。

求解时,将光回馈引起的功率调制看作是对激光器稳定工作状态的微扰。在没有光回馈即 $K=0$ 时,通过实部虚部分离,可以得到激光器稳态工作的电场幅度 E_s 、反转粒子数 N_s 和相位。一般情况下,反馈光的外腔延迟时间 τ 远小于电场的调制周期 $(2\pi/\Omega)$,可以假定 $|E(t - \tau)| \approx |E(t)|$ 。因此,令 $N = N_s + \Delta n$ 和 $E = E_s + \Delta e$,从(1)式可以推导出微扰方程组:

$$\begin{cases} \frac{d\Delta n}{dt} = -\gamma\Delta n - B\Delta n|E_s|^2 - \\ 2BN_s E_s \Delta e \\ \frac{d\Delta e}{dt} = \frac{1}{2}B E_s \Delta n + K\gamma_c E_s \cos[\Omega t - \\ (\omega + \Omega/2)\tau] \end{cases} \quad (2)$$

式中, Δn 和 Δe 为反转粒子数和腔内电场幅度的微扰。从(2)式可以看出 Δe 以频率 Ω 振荡。

从(2)式中可以解得光强调制幅度:

$$\frac{\Delta I}{I_s} \approx \left| \frac{2\Delta e}{E_s} \right| = 2K\gamma_c \frac{(\eta^2 \gamma^2 + \Omega^2)^{1/2}}{[\eta^2 \gamma^2 \Omega^2 + (\omega_r^2 - \Omega^2)]^{1/2}} \quad (3)$$

式中, $\eta = BN_0/\gamma_c$, 为实际抽运功率和阈值抽运功率的比值。 $\omega_r = [(\eta - 1)\gamma\gamma_c]^{1/2}$, 代表微片激光器的弛豫

振荡频率,它由量子噪声引起,和抽运水平 η 成正比。

由(3)式可以知道,当回馈光在外腔的频率偏移 $\Omega = \omega_r$ 时,它引起的光强调制幅度达到最大: $\Delta I/I_s \approx \frac{2K\gamma_c}{\eta\gamma}$ 。对于微片激光器,不论是 Nd:YAG, Nd:YVO₄, 或 LNP, 因为它们的荧光寿命 $1/\gamma$ 远大于光子的腔内寿命,因此 γ_c/γ 可以达到 10^6 量级。这相当于光反馈系数 K 的一个极大的放大。理论上,此时,只要有 10^{-16} 的光强反馈水平,激光器功率调制幅度就达到 1%。对于半导体激光器, γ_c/γ 在 10^3 量级,所以它的回馈灵敏度要远低于微片激光器。

2 应用研究进展和展望

半导体激光器抽运微片激光器对于光回馈具有非常高的灵敏度,而且,回馈系统光路结构简单,准直容易,因此得到了应用研究人员的重视。

2.1 微片激光器自混合 Doppler 测速仪

激光 Doppler 测速技术在很多领域都得到了应用。在散射信号非常弱的情况下,它需要应用光电倍增管和光子计数法来进行信号探测和处理。KAWA I 报道了利用微片 LNP 激光器的自混合效应可以进行高灵敏度非接触速度检测^[19],实验如图2所示。

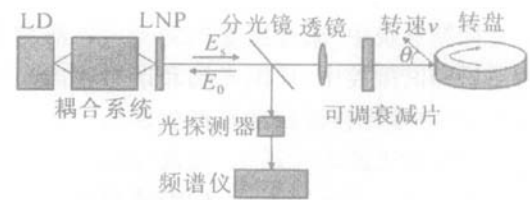


图2 基于 LD 抽运微片 LNP 激光器的自混合激光 Doppler 测速仪

在图2中,微片 LNP 晶体厚 1mm,通过 808nm 半导体激光器抽运,输出 1.32μm 激光。激光器输出会聚在一个转盘上,会聚点的线速度方向和光线方向有一夹角 θ 。部分散射光沿入射方向返回谐振腔,产生回馈信号。回馈光携带了 Doppler 频移信息 ($f_b = 2v \cos \theta / \lambda$),引起激光器的功率调制。光电探测器接受光强信号,通过频谱仪观察信号的频谱。图3为转盘在不同转速下的激光功率谱图,其中,频率峰 f_1 为激光器的弛豫振荡频率,它和抽运水平成正比。图3中,随着转速的增加,频谱上的 Doppler 信号峰强度逐渐降低,这有两点原因: Doppler 频率越偏离弛豫振荡频率,激光功率调制越小,这由(3)式可知;转速增加时,散射光强度减弱。

下面就微片激光器的回馈灵敏度作一评估。在图3的测量中,光强反射率(即反馈光光强与激光器输出光强的比值)大约为 -83dB,信噪比已经可以满足测量要求。在实验的最大速度 10m/s 情况下,会聚到转盘上的激光功率为 8mW,在一个 Doppler 信号周期(大

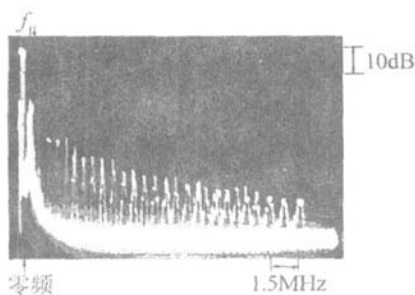


图 3 转盘以不同转速旋转时激光器功率谱

约 66ns)内,只有约 17 个光子反馈回谐振腔。因携带 Doppler 频移信息的微弱光信号在反馈回谐振腔后得到了一个高增益 γ_c/γ ,这使得信号探测和处理非常简单。

OTSUKA 在图 2 的装置中通过在外腔加入声光移频器件,实现了转速方向的识别^[20]。

类似的测速实验在微片 Nd:YAG 和微片 Nd:YVO₄ 激光器上都已经进行,它们对光回馈都表现出了高灵敏度^[21,22]。这种自混合测速仪兼有激光测速仪的众多优点,同时,结构和信号处理又相对简单、成本低,有很好的应用前景。而且,将微片激光器的输出导入几根光纤中,通过光纤它可以同时测量不同目标的速度。

2.2 微片激光器光回馈振动测量

OTSUKA^[18,23]报道了利用微片激光器光回馈进行超高灵敏度的实时纳米级振动测量的研究,测量装置如图 4 所示。

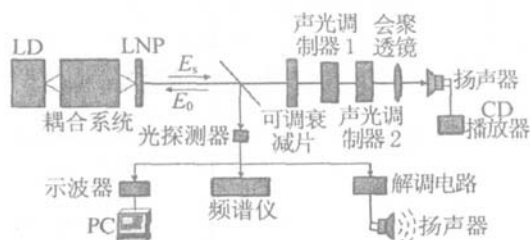


图 4 自混合激光 Doppler 振动测量和实时微弱声信号重构实验装置

微片 LNP 激光器的输出经过两个声光调制器移频后,照射到振动物体上,如扬声器的振动膜片。适当选择两个声光调制器的中心频率和空间角度,可以使回馈光在经过它们一个来回之后产生小于 5MHz 的频移 ω_0 。这样,对扬声器施加振动 $x(t)$ 时,散射光的 Doppler 频移 $\omega_D = 2dx(t)/\lambda dt$,激光器输出功率表现为一个载频为 ω_0 的调频信号。设置载频 ω_0 的目的有两点:(1)使 Doppler 信号远离低频区,可以避免低频环境噪声的影响;(2)可以使载频 ω_0 尽量接近激光器的弛豫振荡频率,利用共振效应提高测量的信噪比。

对激光器的输出功率调频信号进行 Hilbert 变换,可以得到振动的幅度;对调频信号进行解调处理和放大,可以实时再现振动信号。研究人员对图 4 中的扬声器施加幅度为 2V、频率为 22.6kHz 的正弦信号进行

测量。 ω_0 选择在 2MHz,接近弛豫振荡频率;光强反射率大约在 -100dB。测量结果如图 5 所示,其中,图 5a 是实测输出功率调频信号,由于共振作用,它含有载频 ω_0 的高次谐波分量,滤波之后的信号如图 5b 所示;图 5c 为通过 Hilbert 变换得到的振动波形。在图 4 装置中,研究人员对扬声器施加音乐信号,由于信号很弱,产生的声压水平在 20dB 以下,但通过对微片激光器的功率调频信号进行解调处理和放大,研究人员可以实时清晰地再现音乐信号。

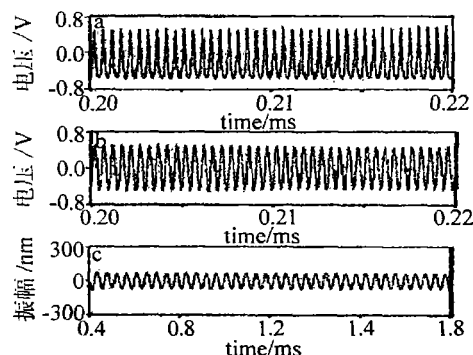


图 5 扬声器振动测量

a—激光器功率调制波形 b—滤波之后的调制波形 c—通过 Hilbert 变换重构的振动波形

这种利用微片激光器回馈效应的测振方法的主要优势有两点:(1)灵敏度极高,非接触测量,对振动物体表面没有要求;(2)可以敏感纳米级振幅的振动。它在医疗和安保等领域有着广阔的应用前景,比如,借助光纤,可以用于帮助发音有困难的人进行声音恢复。

2.3 微片激光器回馈层析成像技术

强散射介质中的物体成像面临的主要问题是:随着探测深度的增加,信号光强度急剧减弱,信噪比非常低。目前,针对这个问题的研究方法有扫描共焦显微技术、光子密度波传输技术,以及光学相干层析技术。

法国 LACOT 等研究人员利用微片激光器的回馈效应提出了一种层析成像的新技术——激光回馈层析成像 (LOFT) 技术^[16]。图 6 为 LOFT 系统示意图。

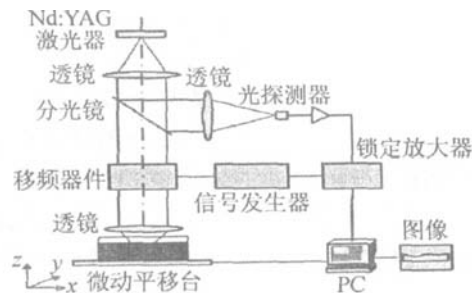


图 6 激光回馈层析成像技术示意图

LOFT 系统的核心是一个半导体抽运微片 Nd:YAG 激光器,微片厚 800μm。在 LOFT 中,散射光信号被反馈入谐振腔中形成光回馈,通过探测激光器功率调制的幅度来确定散射光的强弱。LOFT 有两个特点保证

它的散射信号探测灵敏度和空间分辨率。LOFT通过外腔移频来提高回馈灵敏度:回馈光路中的移频器件使得反馈光产生频移 ω_0 ,调节 ω_0 使它接近激光器的弛豫振荡频率,从(3)式可知,此时功率调制的幅度最大,对散射光将非常灵敏。LOFT应用共焦原理来提高空间分辨率:探测光会聚在散射介质中,在产生的散射光子中,只有在会聚点附近的散射光子才能回到谐振腔的模体积中并和光场作用,这样,激光在Nd:YAG微片中的束腰就构成了一对虚拟的共轭光阑;由于有虚拟共焦,LOFT具有较高的空间分辨率。

工作时,三维扫描工作台的会聚光点相应地在散射介质内扫描。当会聚点落在两种介质的分界面时,其回馈光强度明显强于落在介质中时的强度,相应激光器功率在频率 ω_0 处的调制幅度不同。图7a为用LOFT探测浸没在浑浊液体中的镀金镜,会聚点在 z 方向上不同位置时信号调制幅度的变化;其中 $\Delta z=0$ 处的强调制幅度由浑浊液体表面反射引起, $\Delta z=-12.5\text{mm}$ 处的强调制幅度由镜子引起,纵向分辨率可以达到 $6\mu\text{m}$ 。图7b为研究人员用LOFT探测浸没在悬浊液1cm深处的硬币形貌所得到的图像。

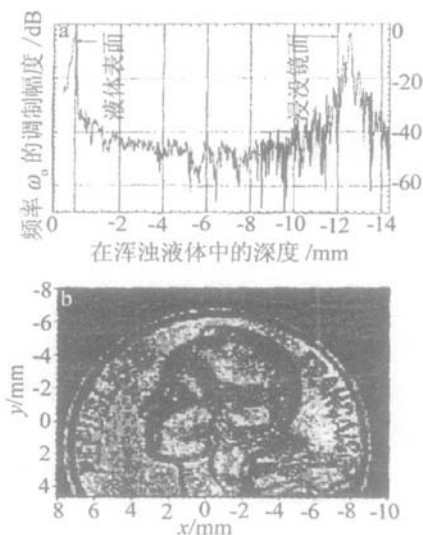


图7 a—LOFT探测浸没在浑浊液体中的镀金镜时在不同深度处的信号幅度 b—LOFT探测的浸没在悬浊液1cm深处硬币的二维图像

LOFT对散射光具有非常高的灵敏度,限制LOFT探测灵敏度的主要因素是光路中元件的散射光引起的噪声。和传统的散射介质成像方法相比,它的系统结构和信号检测简单得多。而且,LOFT还对物体的轴向运动敏感,因此它可以探测除形貌之外的更多信息。

2.4 微片激光器光回馈研究的展望

除了应用研究外,微片激光器光回馈系统还被作为激光动力学研究和混沌研究的良好模型,这方面已经进行了很多理论研究^[24],以后将仍然是一个重要的研究方向。在继续完善前面介绍的应用研究之外,微

片激光器光回馈研究还可以产生新的传感技术,如位移检测、散斑测量技术等等。另外,双偏振微片激光器光回馈研究也有很多令人感兴趣的内容,比如,它可以提高测速信噪比,提供新的测量方法和推动新的理论研究^[25,26]。

3 结束语

综述了LD抽运微片激光器光回馈研究的背景、理论分析,以及应用研究的进展,并对今后的研究方向作了展望。微片激光器对光回馈具有极高灵敏度,这使得它可以完成很多传统测量方法很难做到的工作。本文中介绍的应用研究都很有希望发展成实际产品或技术,并衍生新的应用研究方向。在这方面,国内尚没有太多研究,需要对它有更多了解。

参考文献

- [1] PETERMANN K Laser diode modulation and noise [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988. 250~290.
- [2] DONATH S, GULANIG, MERLO S Laser diode feedback interferometer for measurement of displacement without ambiguity [J]. IEEE J Q E, 1995, 31(1): 113~119.
- [3] KATO J, KIKUCHI N, YAMAGUCHI I Optical feedback displacement sensor using a laser diode and its performance improvement [J]. Measurement Science Technology, 1995, 6(1): 45~52.
- [4] De GROOT P J. Range-dependent optical feedback effects on the multimode spectrum of laser diodes [J]. Journal of Modern Optics, 1990, 37(7): 1199~1214.
- [5] WANG W M, GRATTON K T V, PALMER A W *et al* Self-mixing interference inside a single-mode diode laser for optical sensing applications [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1995, 12(9): 1577~1587.
- [6] LU Ch H, WANG J, DENG K L. Imaging and profiling surface microstructures with noninterferometric confocal laser feedback [J]. A P L, 1995, 66(16): 2022~2024.
- [7] BEARDEN A, NELL M P, OSBORNE L C *et al* Imaging and vibrational analysis with laser-feedback interferometry [J]. Opt Lett, 1993, 18(3): 238~240.
- [8] OTSUKA K Effects of external perturbations on $\text{LnNdP}_4\text{O}_{12}$ lasers [J]. IEEE J Q E, 1980, 15(7): 655~662.
- [9] ZHOU B K, KANE T J, DEXON G J *et al* Efficient, frequency-stable laser-diode-pumped Nd:YAG laser [J]. Opt Lett, 1993, 10(2): 62~64.
- [10] YU Y G, QIAN X F, WEI Zh L *et al* A differential displacement system using laser self-mixing interference effect [J]. Acta Optica Sinica, 1999, 19(9): 1269~1273 (in Chinese).
- [11] WANG M. Fourier transform method for self-mixing interference signal analysis [J]. Opt & Laser Technol, 2001, 33(6): 409~416.
- [12] WANG M. A self-mixing interferometer using an external dual cavity [J]. Measurement Science Technology, 2003, 14(7): 1025~1031.
- [13] LU L, ZHANG Sh L, LI Sh Q *et al* The new phenomena of orthogonally polarized lights in laser feedback [J]. Opt Commun, 2001, 200: 303~307.
- [14] LIU G, ZHANG Sh L, ZHU J *et al* Theoretical and experimental study of intensity branch phenomena in self-mixing interference in a He-Ne laser [J]. Opt Commun, 2003, 221: 387~393.

3 结 论

在三五阶非线性共存时,研究了有损耗单模光纤中基于两光波交叉相位调制的不稳定条件和增益谱。在色散缓变光纤正色散区,详细分析了五阶非线性系数、色散纵向变化参量以及两扰动的频率大小关系对交叉相位调制不稳定增益谱的影响。结果表明,在五阶非线性下,色散的纵向渐减仍然有利于展宽调制不稳定增益谱,说明色散缓变光纤依然是产生调制不稳定的良好介质;而正五阶非线性可使增益谱的谱宽和谱峰值增大,并使谱峰位置远离主波频率,负五阶非线性的作用则相反,即正负五阶非线性分别对调制不稳定起加强和抑制作用;两扰动频率大小关系不同,色散纵向参量的变化对增益谱的谱峰大小和位置的影响也不同,五阶非线性对交叉相位调制不稳定性的加强或抑制程度也不同。

参 考 文 献

- [1] AGRAWAL G P. Nonlinear fiber optics [M]. 2nd ed, New York: Academic Press, 1995. 133~141.
- [2] SYLVESTRE T, COEN S, EMPLIN P *et al* Self-induced modulation instability laser revisited: normal dispersion and dark-pulse train generation [J]. Opt Lett, 2002, 27 (7): 482~484.
- [3] GROSZ D F, MAZZALI C, CELASCHI S *et al* Modulation instability induced resonant four-wave mixing in WDM systems [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1999, 11 (3): 379~381.
- [4] OKUNO T, ONISHIM, NISHIMURA M. Generation of ultra-broadband super-continuum by dispersion-flattened and decreasing fiber [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1998, 10 (1): 72~74.
- [5] XU W C, ZHANG S M, CHEN W C *et al* Modulation instability of femtosecond pulses in dispersion-decreasing fibers [J]. Opt Commun, 2001, 199: 355~360.
- [6] XU W C, LUO A P, GUO Q *et al* Modulation instability in decreasing dispersion fibers [J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20 (10): 1435~1439 (in Chinese).
- [7] AGRAWAL G P, BALDECK P L, ALFANO R R. Modulation instability induced by cross-phase modulation in optical fibers [J]. Phys Rev, 1989, A39 (7): 3406~3413.
- [8] ZHONG X Q, LI D Y, CHEN J G. Further analysis of modulation instability induced by cross-phase modulation [J]. Laser Technology, 2004, 28 (4): 427~430 (in Chinese).
- [9] YANG A L, WANG J, MAO H L *et al* Modulation instability gain spectrum of cross-phase modulation in decreasing dispersion fiber [J]. Laser Technology, 2003, 27 (1): 44~46 (in Chinese).
- [10] PUSHKAROV D, TANEV S. Bright and dark solitary wave propagation and bistability in the anomalous dispersion region of optical waveguides with third- and fifth-order nonlinearities [J]. Opt Commun, 1996, 124: 354~364.
- [11] PALACIOS S L, FERNÁNDEZ-DÍAZ J M. Black optical solitons for media with parabolic nonlinearity law in the presence of fourth order dispersion [J]. Opt Commun, 2000, 178: 457~460.
- [12] DJMIREVSKI K, REMHULT E, SVENSSON E *et al* Analysis of stable self-trapping of laser beams in cubic-quintic nonlinear media [J]. Phys Lett, 1998, A248: 369~376.
- [13] HONG W P. Modulation instability of optical waves in the high dispersive cubic-quintic nonlinear Schrödinger equation [J]. Opt Commun, 2002, 213: 173~182.
- [14] REN Z J, WANG J, YANG A L *et al* Effect of quintic nonlinearity in the anomalous-dispersion regime of fiber [J]. Chinese Journal of Lasers, 2004, 31 (5): 595~598 (in Chinese).
- [15] FEIL G, ZHANG Sh L, WAN X J. Influence of optical feedback from birefringence external cavity on intensity tuning and polarization of laser [J]. Chinese Physics Letters, 2004, 21 (10): 1944~1947.
- [16] LACOT E, DAY R, STOECKEL F. Laser feedback tomography [J]. Opt Lett, 1999, 24 (11): 744~746.
- [17] SIEGMAN A E. Lasers [M]. Mill Valley, California: University Science, 1986. 1~1283.
- [18] OTSUKA K, ABE K, KO J Y. Real-time nanometer-vibration measurement with a self-mixing microchip solid-state laser [J]. Opt Lett, 2002, 27 (15): 1339~1341.
- [19] KAWAIR, ASAKAWA Y, OTSUKA K. Ultrahigh-sensitivity self-mixing laser Doppler velocimetry with laser-diode-pumped microchip $\text{LNdP}_4\text{O}_{12}$ lasers [J]. IEEE Photon Technol Lett, 1999, 11 (6): 706~708.
- [20] OTSUKA K, KAWAIR, ASAKAWA Y *et al* Highly sensitive self-mixing measurement of Brillouin scattering with a laser-diode-pumped microchip $\text{LNdP}_4\text{O}_{12}$ laser [J]. Opt Lett, 1999, 24 (24): 1862~1864.
- [21] OKAMOTO S, TAKEDA H, KANNAR I F. Ultrahighly sensitive laser-Doppler velocity meter with a diode-pumped Nd:Y₄O₄ microchip laser [J]. Rev Scient Instrum, 1995, 66 (5): 3116~3120.
- [22] NERN P, BESESTY P, LABEYE P *et al* Absolute distance and velocity measurements by the FMCW technique and self-mixing interference effect inside a single-mode Nd:YAG-LiTaO₃ microchip laser [J]. J Optics (Paris), 1998, 29 (3): 162~167.
- [23] ABE K, OTSUKA K, KO J Y. Self-mixing laser Doppler vibrometry with high optical sensitivity: application to real-time sound reproduction [J]. New Journal of Physics, 2003, 5: 8. 1~8. 9.
- [24] KO J Y, OHTOMO T, ABE K *et al* Nonlinear dynamics and application of laser-diode-pumped microchip solid-state lasers [J]. International Journal of Modern Physics, 2001, B15 (26): 3369~3395.
- [25] NERN P, PUGET P, BESESTY P *et al* Self-mixing using a dual-polarization Nd:YAG microchip laser [J]. Electron Lett, 1997, 33 (6): 491~492.
- [26] WAN X J, ZHANG Sh L, FEIL G *et al* Self-mixing interference in dual-polarization microchip Nd:YAG lasers [J]. Chinese Physics Letters, 2004, 21 (11): 2175~2178.

(上接第 12 页)