

文章编号: 0253-2239(2005)02-190-5

半导体激光器的自混合散斑干涉测量流体速度^{*}

陆 敏 王 鸣^{**} 郝 辉

(南京师范大学物理科学与技术学院, 南京 210097)

摘要: 提出了一种简便的激光自混合散斑干涉测量流体速度的方法。根据散斑和法布里-珀罗腔的理论,提出了半导体激光器的自混合散斑干涉模型。研究了流体运动时在半导体激光器内产生的自混合散斑干涉效应(SMPD),给出了激光器输出增益的变化及其概率密度分布。得到了激光自混合散斑干涉平均频率与流体速度之间的关系。模拟计算和实验结果验证了这个关系。利用散斑干涉的平均频率与流体速度的关系测量了高分子材料溶液的速度,并在溶液浓度和背景光变化时,对流体速度进行了测量、比较和分析。实验表明,在溶液浓度不太低时,测量误差小于8%。

关键词: 激光技术; 流体速度测量; 自混合散斑; 半导体激光器

中图分类号: O439 文献标识码: A

Measurement of Flow Velocity Using Self-Mixing Speckle Interference Generated in Laser Diode

Lu Min Wang Ming Hao Hui

(School of Physical Science and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210097)

Abstract: The theoretical analysis and experimental result of self-mixing laser speckle interference (SMSI) velocimeter for flow measurement are presented based on the theory of Fabry-Pérot (F-P) cavity model. The mean speckle frequency reflects the activity of flow. The variation of gain and distribution of probability density are given. The computer simulation shows the linear relation between the mean speckle frequency and velocity of flow, and experimental result proves relation. The velocity of glutin solution is measured by this linear relation. The effect of background and concentration of flow are considered in the experiment. When the concentration of flow is appropriate, the error of experiment is less than 8%. The results of experiment show this method is useful for measurement of flow.

Key words: laser technique; measurement of flow velocity; self-mixing speckle; semiconductor laser

1 引 言

由于散斑是由被随机表面各个散射元散射回的光波之间的干涉形成的,因而是随机表面某些信息的携带者,这样,借助于散斑不仅可以研究粗糙表面本身,而且还可以研究它的形状和位置的变化^[1]。当随机散射平面移动时,散斑场的空间分布也将随之迅速变化,这就是动态散斑。动态散斑统计性质已被用于测量运动物体的速度^[2,3]。

当激光器的出射光被外部反射物反射或散射后,其中一部分光又被反馈回激光器的谐振腔。重

新注入的激光与激光腔内的光混合,引起输出功率和频率变化,形成外光学反馈效应,即“激光自混合”^[4]。结合自混合干涉和散斑的原理,将自混合散斑现象引入激光二极管。让半导体激光器的光学反馈来自垂直照射的粗糙表面,把光强调制成为随机的散斑信号。封装在激光二极管管壳内另一侧的光电二极管,检测光学反馈生成的散斑信号,可以测量物体的运动速度。

由于激光技术在流速测量中具有高的空间和时间分辨率、不接触测量物体、不扰动测量对象等显著

^{*} 国家自然科学基金(50375074)和江苏省自然科学基金(BK2001109)资助课题。

作者简介: 陆 敏(1977~),女,江苏无锡人,南京师范大学硕士研究生,主要从事光电子技术与激光应用的研究工作。
E-mail: minluchina@yahoo.com.

^{**} 通信联系人。E-mail: wangming@pine.njnu.edu.cn.

收稿日期: 2004-03-16; 收到修改稿日期: 2004-09-20

特点,已成为流动测量领域中重要的技术。激光多普勒测速仪(LDA)就是其中一种重要的流速测量仪器。但当被测物体的表面比较粗糙时,会引起测量光信号的幅度波动,增加了信号后期处理的复杂度。而且激光器须有足够高的功率,如果功率低,则测速范围将限制于低速。功率稳定性应保持每小时的变化范围不超过 10%。另外,激光多普勒测速技术对激光器的频带宽度也有较为严格的要求。粒子成像速度场仪(PIV)也是近年来高速发展的一种流体测速装置。它具有测量范围广,测量精度高,分辨率好的优点。但仪器昂贵,对信号采集仪器的要求高,信号处理复杂^[5,6]。

本文在法布里-珀罗(F-P)腔的自混合散斑干涉模型的基础上,提出了一种利用半导体激光器自混合散斑现象测量流体速度的方法,同样具有不接触测量物体和不扰动测量对象的特点,而且光学系统结构简单,光路易准直。验证了半导体激光器自混合测速技术的可行性,探讨了溶液浓度和背景变化等情况对该技术的影响。

2 原 理

2.1 半导体激光器的自混合散斑干涉

激光器发射的光到达靶面并被散射返回时,一小部分光耦合进激光腔,并与腔内激光混合,使得发射激光的振幅和频率受到调制。在粗糙表面相对于激光束横向运动时,激光束照明表面的不同部分。由每个散射元返回的散射光有不同的振幅和相位,反射回到激光腔内的光是每个散射元返回的散射光的总和,从而形成散斑。由于表面的移动造成散斑随着时间的变化而变化,这产生了粗糙表面的动态自混合散斑现象。

在半导体激光二极管内产生的散斑干涉可以用

法布里-珀罗腔的模型来分析。等效图如图 1 所示。其中 L_D 为激光器内腔长度, L_E 为外腔长度, r_1 、 r_2 为激光腔面的幅值反射系数, n_c 为激光腔内媒介的复数折射率, n 为外腔内媒介的折射率。 M_1 和 M_2 为激光腔的两个端面, S 为散射面。

假设光波向右传播, M_1 为起始点, 向右传播的光波为

$$E = E_0 \exp[-i(\omega t + \varphi)], \quad (1)$$

其中 E_0 , ω 和 φ 分别为光波初始时刻的振幅、频率和相位。光波分为两束。在腔内经过一次往返至 M_1 处的光波为

$$E_1 = E_0 \exp[-i(\omega t + \varphi + 2n_c L_D k)] r_1 r_2, \quad (2)$$

其中 k 为波矢值。

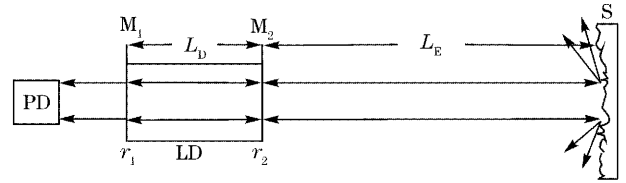


图 1 自混合散斑干涉示意图

Fig. 1 Schematic diagram of SMSI

存在光学反馈时,分析等效腔的激光振荡。激光二极管发射的光在外腔中传播,到靶面时被散射返回。一小部分光耦合到激光腔,在粗糙表面条件下,透射出 M_2 后被 S 反射又耦合进内腔的光波为

$$E_2 = E_0 \exp[-i(\omega t + \varphi + n_c L_D k + 2k L_E)] \times \xi^2 U_0(x, y) \exp[-i\phi(x, y)] \times f \exp[-in_c k L_D] r_1, \quad (3)$$

其中 $U_0(x, y)$, $\phi(x, y)$ 为被 S 反射后的散射光波振幅和相位的变化,是 S 平面坐标 x 和 y 的函数, ξ 是激光由内腔到外腔的耦合系数, f 是外部反馈光耦合至腔内的反馈比。弱反馈时,两束光波在 M_1 处叠加。当系统稳定时,有

$$E_0 \exp[-i(2n_c L_D k + \omega t + \varphi)] r_1 r_2 + \xi^2 f U_0(x, y) r_1 E_0 \exp\{-i[2n_c k L_D + 2k L_E + \omega t + \varphi + \phi(x, y)]\} = E_0 \exp[-i(\omega t + \varphi)], \quad (4)$$

从而可知激光二极管的频率方程和阈值增益变化量分别为

$$\omega - \omega_0 \tau = -C \sin[(\omega t + \phi) - \arctan(\chi/\rho)], \quad (5)$$

$$\Delta G = -\frac{\beta}{2L_D} \cos(kL_E + \phi), \quad (6)$$

其中

$$C = \frac{c\beta \sqrt{1 + (\chi/\rho)^2}}{2nL_D [1 - g_0 \chi / (\rho n_0)]},$$

$$\tau = 2L_E / c, \quad \beta = \xi^2 f U_0 / r_2,$$

χ , ρ 分别为激光介质的复折射率 n_c 的实部和虚部随载流子密度 N 的变化率。

由于激光器输出功率与输出增益有关,所以自混合散斑干涉强度为

$$\Delta P \propto -\frac{\beta}{2L_D} \cos(kL_E + \phi). \quad (7)$$

2.2 速度与平均散斑频率的关系

自混合散斑干涉强度随着时间的变化可以用内置

的光电二极管探测。采用计数法可以获得散斑波动次数^[7]。图2为自混合散斑干涉信号及其处理方法。图2(a)所示为一段时间内的散斑信号,用平均的方法求出散斑信号在此时间内的平均值,见图2(a)中所示横线。如果设定高于平均值的信号表示为1,低于平均值的信号表示为0,则可以把散斑信号处理如图2(b)所示的脉冲列。测量时间内的脉冲个数就可以求得在此测量时间内散斑信号波动次数。图2(c)所示即为在一段时间内散斑信号的波动次数。

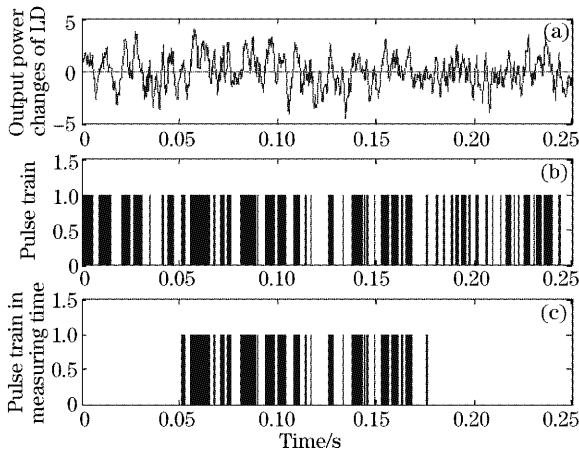


图2 自混合散斑干涉信号及其处理方法。(a) 自混合散斑干涉信号,(b)脉冲列,(c)测量时间内脉冲列

Fig. 2 SMSI signal and processing. (a) SMSI signal, (b) pulse train, (c) pulse train in measuring time

根据(7)式可以利用计算机模拟生成一定条件下,粗糙表面移动、自混合散斑干涉存在时,激光器输出功率的变化,这也就是自混合散斑干涉强度随时间的变化。具体的模拟方法如下所示:为了模拟粗糙表面的相对横向运动,选择照明宽度相对于粗糙表面长度的变化。设照明区域宽为 M 点,粗糙表面长为 X 点。程序分为若干次循环进行。第一次采样运算从 $0, 1, \dots$ 到 $M-1$ 点;第二次采样运算从 $1, 2, \dots$ 到 M 点;以后,依次类推,直到 $X-M+1, \dots, X-M$ 点,完成全部计算。每一次循环运算相当于激光在外腔中一个往返,每一次往返相当于激光束照明表面上一个不同区域。依次循环的运算等价于表面的移动。速度的变化用每次循环运算中采样点数的多少表示。利用上面所介绍的计数法,可以得到在一定的观察时间内,不同扫描速度对应于的散斑信号的波动次数。单位时间内散斑波动次数可以用平均散斑频率来表示:

$$f = N/t, \quad (8)$$

其中 f 为平均散斑频率, t 为观察时间, N 为该时间

段内信号波动的次数。这样散斑波动次数与扫描速度之间的线性关系可以用平均散斑频率来表示:

$$f = \alpha V + f_0, \quad (9)$$

其中 V 为扫描速度, f 为该扫描速度所对应的散斑平均频率, f_0 为散斑平均频率的初始值, α 为斜率。

3 实 验

3.1 实验设备

实验装置如图3所示。本实验所用光源为中科院光电 ELD65NTP10 的激光二极管(LD),波长为650 nm,功率为10 mW,阈值电流20 mA。将被测试样注入长度为10 cm,深度为7 mm,宽度为5 mm的溶液槽,溶液槽放在精密移动平台上。精密移动平台由伺服电机(Panasonic MSMA042A1C)驱动。精密移动平台的移动步长为 (10 ± 0.1) mm。激光二极管的驱动电流设置在高于阈值电流的范围,从激光管出射的光平行照射在测量试样上,测量试样距离激光管5 cm,位于激光管封装内的光电二极管(PD)接收激光二极管输出功率的变化,信号经放大电路放大后,由数据采集卡(National Instrument 6024E)采集并送入计算机,利用专用的数据分析软件(National Instrument LabView)分析。

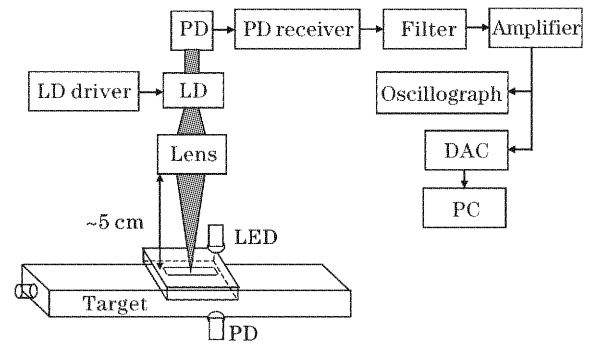


图3 实验系统

Fig. 3 Schematic diagram of the measurement system

3.2 实验结果

3.2.1 溶液的统计特性

测量的试样是明胶溶于水时形成的高分子溶液。图4所示为浓度为8 g/l的明胶溶液以不同速度相对激光二极管移动时,由分析软件 LabView 制作成的虚拟仪器所显示的信号图以及对应的概率密度方程。运动速度分别为27 mm/s,107 mm/s和200 mm/s,背景为铝面,数据采集频率为20000 dot/s,所显示的为50 ms内的散斑波动信号。从图中可知半导体激光器输出功率的变化满足高斯统计分布,且速度大小的变化对统计分布没有影响。

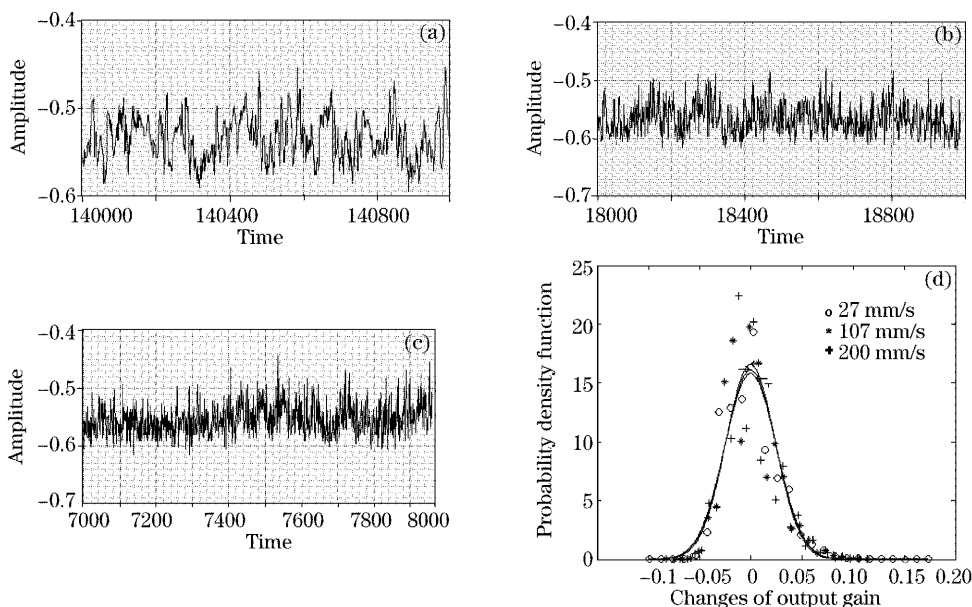


图 4 实验采集的散斑信号(a),(b),(c)及其对应的概率密度函数(d)。(a),(b)和(c)图分别为移动速度 27 mm/s, 107 mm/s 和 200 mm/s 时的信号

Fig. 4 The experimental signal (a), (b) and (c) along with probability density function (d) at velocities of 27 mm/s (a), 107 mm/s (b) and 200 mm/s (c)

从图中可知半导体激光器输出功率的变化满足高斯统计分布,这与文献[8]的理论分析结果相符,且速度大小的变化对统计分布没有影响。

3.2.2 自混合散斑干涉信号的波动次数与流体速度的关系

图 5 是 0.25 s 的观察时间内,背景为黑色纸面,浓度为 6 g/l 的明胶溶液以不同速度移动时,平均散斑频率和移动速度的关系,横坐标为速度大小,纵坐标为平均散斑频率。可以看到在相同的观察时间内,散斑波动次数随速度的增加而增加,且与速度之间存在着线性关系。对实验数据进行拟合,可以得到单位时间的波动次数 f 与速度 V 的关系为

$$f = 5.1 \times V + 251.6. \quad (10)$$

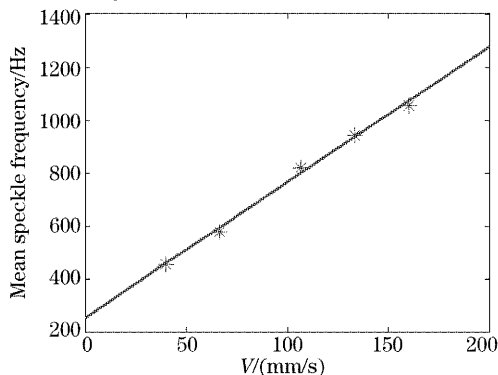


图 5 溶液速度和平均散斑频率之间的关系

Fig. 5 The linear relation between the mean speckle frequency and the velocity of liquid

3.2.3 背景光相同时,溶液浓度的变化对散斑波动次数与移动速度关系的影响

图 6 是 0.25 s 的观察时间内,背景光相同时,浓度不同的明胶溶液以不同速度移动时,平均散斑频率和扫描速度之间的关系。图中明胶溶液浓度分别为 8 g/l, 6 g/l 和 4 g/l,扫描背景为铝板。从图中可以知道在背景相同,溶液浓度不同的情况下,平均散斑频率和液体速度同样成线性关系。当溶液浓度过小时,拟合曲线偏差较大,但当溶液浓度适中或偏大时,拟合曲线偏差很小。

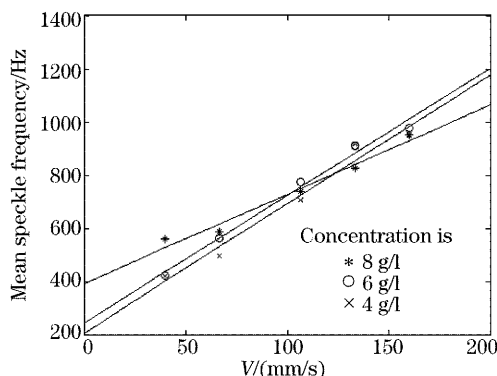


图 6 溶液浓度对平均散斑频率的影响(背景为铝板)

Fig. 6 The effect of liquid concentration on the mean speckle frequency (background is aluminium plate)

3.2.4 溶液浓度相同时,背景光变化对散斑波动次数与移动速度关系的影响

图 7 为在观察时间内,当背景不同时,浓度为

6 g/l的明胶溶液以不同速度移动,平均散斑频率和移动速度之间的关系。背景分别是铝板、白纸、黑纸。从图中可知,背景不同时,同种浓度的溶液依然可以保持线性关系。

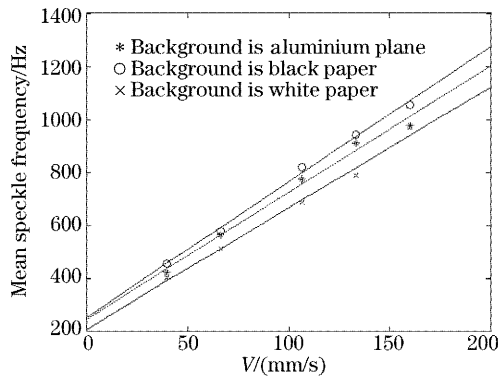


图 7 背景对平均散斑频率的影响

Fig. 7 The effect of background on the mean speckle frequency

3.2.5 利用散斑波动次数与速度的线性关系对速度进行测量

利用以上得到的(10)式对横向移动的浓度为6 g/l的明胶溶液进行速度测量,明胶溶液的实际速度可以由伺服电机的转速得到,测量的速度是利用散斑平均频率和速度之间的线性关系计算所得。表1为测量速度和实际速度的对比及相对误差。

表 1 测量速度、实际速度及其误差

Table 1 Measured velocity, calibrated velocity and error

| | Velocity (calibrated) / (mm/s) | Velocity (measured) / (mm/s) | Error / % |
|---|-----------------------------------|---------------------------------|-----------|
| 1 | 26.7 | 24.6 | 7.87 |
| 2 | 53.3 | 49.5 | 7.13 |
| 3 | 80.0 | 85.7 | 7.12 |
| 4 | 93.3 | 98.6 | 5.68 |
| 5 | 120.0 | 115.6 | 3.67 |
| 6 | 146.7 | 141.8 | 3.34 |
| 7 | 173.3 | 164.5 | 5.08 |
| 8 | 186.7 | 176.4 | 5.52 |
| 9 | 200.0 | 202.1 | 1.05 |

由实验的初步结果可知,测量的相对误差在8%以下,利用该方法对液体流速大小进行测量是可行的。造成误差的最主要的原因是伺服电机的噪声。

理论上,该方法可以用来测量流速很大的液体的速度,但在我们的实验中由于受到设备的限制,测量的速度有一定的范围。在实验中影响测速大小的因素有激光二极管内置光电二极管的响应频率、放大电路的带宽以及数据采集卡的采样频率。普通商用半导体激光二极管内置光电二极管的响应频率可达

兆赫兹的数量级,但由于受放大电路带宽的限制,最后实际输出信号只能达45 kHz,这使得实验所能测得的流体速度小于4 m/s。此外,目前在我们的实验中采用的拖动装置,达到的速度在240 mm/s以下。

在实验中,我们发现(9)式中斜率 α 受溶液浓度的影响较大,这是由于溶液浓度不同造成溶液中颗粒的大小和颗粒间距的不同,由随机散射面移动而形成的动态散斑会随着这些因素的变化而变化,进而影响激光器输出功率的变化,因此在利用这种方法对未知溶液的速度进行测量前,需要先对溶液标定。

4 结 论

半导体激光器自混合散斑干涉技术是一种用来测量流体速度的简便易行的方法,在溶液浓度适中或偏大的情况下,它的误差很小,而对于浓度过小的溶液,这种方法有一定的局限。实验中发现,当溶液浓度低于2 g/l,误差大于10%。反射背景的变化对于该方法影响不大。

参 考 文 献

- 1 R. K. Erf. *Speckle Metrology* [M]. Yu Guanzheng, Li Dacheng, Cao Mang trans.. Beijing: China Metrology Press, 1990. 59~79 (in Chinese)
罗伯特. K. Erf. 散斑计量学[M]. 余官正,李达成,曹芒译. 北京:中国计量出版社,1990. 59~79
- 2 Sun Hong, Liu Ying, Ma Shining. Dynamic characteristics of double scattering speckle field in longitudinal motion[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(2): 181~185 (in Chinese)
孙虹,刘迎,马世宁. 纵向运动双散射散斑场的动态特性研究[J]. *光学学报*, 1999, **19**(2): 181~185
- 3 T. Asakura, N. Takai. Dynamic laser speckles and their application to velocity measurements of the diffuse object[J]. *Appl. Phys.*, 1981, **25**(3): 179~194
- 4 W. M. Wang, W. J. O. Boyle, K. T. V. Grattan *et al.*. Self-mixing interference in a diode laser: experimental observation and theoretical analysis[J]. *Appl. Opt. -LP*, 1993, **32**(9): 1551~1558
- 5 Sheng Senzhi, Xu Yueting, Yuan Huijing. New development in the technology of flow measurement over the laser decade[J]. *Mechanics and Practics*, 2002, **24**(5): 1~14 (in Chinese)
盛森芝,徐月亭,袁辉靖. 近十年来流动测量技术的新发展[J]. *力学与实践*, 2002, **24**(5): 1~14
- 6 Hong Xin, He Shunzhong, Jiang Chengzhi *et al.*. Remote displacement measurement of solid scattering surface utilizing laser Doppler effect[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(1): 118~121 (in Chinese)
洪昕,贺顺忠,蒋诚志等. 用激光多普勒效应远距离测量固体散射表面的位移[J]. *光学学报*, 2001, **21**(1): 118~121
- 7 Takaaki Shibata, Shigenobu Shinohara, Hiroaki Ikeda *et al.*. Automatic measurement of velocity and length of moving plate using self-mixing laser diode[J]. *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, 1999, **48**(6): 1062~1067
- 8 Lu Min, Wang Ming, Hao Hui. Self-mixing speckle interference generated in laser diode[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(9): 1229~1236 (in Chinese)
陆敏,王鸣,郝辉. 半导体激光器内自混合散斑干涉[J]. *光学学报*, 2004, **24**(9): 1229~1236