

文章编号: 0253-2239(2010)12-3501-07

激光二极管自混合干涉和激光的频移

胡险峰

(四川大学物理科学与技术学院, 四川 成都 610064)

摘要 在自混合干涉中激光频率受外腔反馈和外腔反射面运动的影响。由内外复合腔模型给出激光二极管(LD)谐振腔前后端面出射的光场,外腔反馈和外腔运动引起的激光频移,以及自混合干涉信号的频率。实验观察外腔反馈引起的激光频移和自混合干涉信号的频谱。激光的频移包括谐振频移和运动频移,在外腔反射面运动频率较低时,谐振腔前后端面出射光的频移近似相同为谐振频移。外腔反射面高频运动时,谐振腔前后端面出射光的频移不相同,前端面出射光频移会由运动频移决定。外腔反馈极弱时,自混合干涉信号的频率与反射光多普勒频移相同,外腔反馈增强,随外腔反射面振动自混合干涉信号的频率存在尖锐振荡,其最大频率超过反射光多普勒频移的1.6倍。

关键词 光学测量;激光二极管;自混合干涉;激光频率;多普勒频移;有源法布里-珀罗腔

中图分类号 TN 248.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103012.3501

Self-Mixing Interference in Laser Diode and Frequency Shift of Laser

Hu Xianfeng

(College of Physical Science and Technology, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

Abstract Light feedback of external cavity and movement of external cavity mirror in self-mixing interference affect laser frequency. Light fields out of front and rear facets on internal cavity, frequency shift of laser and frequency of self-mixing interference signal are introduced from a model of complex resonant cavity. Frequency shift of laser and frequency spectra of self-mixing interference signal are observed in experiment. Frequency shift of laser is made up resonance frequency shift and movement frequency shift. At lower moving frequency of external cavity mirror, frequency shift of laser out of the front and rear facets are almost the same as resonance frequency shift. At higher moving frequency of external cavity mirror, frequency shift of laser out of the front and rear facets are different from each other. Frequency shift of laser out of the front facet may be dominated by movement frequency shift. Frequency of self-mixing interference signals at extremely weak feedback light is the same as Doppler frequency shift of feedback light. Frequency of self-mixing interference signal at weak feedback light vibrates sharply and its highest frequency is more than 1.6 times of Doppler frequency shift of feedback light.

Key words optical measurement; laser diode (LD); self-mixing interference (SMI); laser frequency; Doppler frequency shift; active Fabry-Pérot cavity

1 引 言

外部反射光返回激光二极管(LD)谐振腔,会引起激光频率和光强发生变化,这就是激光二极管自混合干涉(SMI)现象。激光二极管谐振腔前端面出射光,经外部反射面反射后经前端面反馈回谐振腔,通常用封装在激光二极管谐振腔后端面外的光电探测器测量后端面出射光强,可以检测到外部反射面运动的信息,光强变化的频率与外部反射面运动的速率成正比,以此发展起用激光二极管自混合干涉

测量速率、位移和振动等测量方法^[1~9]。光强变化的频率与外部反射面运动的速率成正比,与反射光频率随反射面运动速度变化的多普勒频移有相似之处。然而,在外腔反馈的情况下激光频率的变化相对复杂,与外部反馈光的光程和耦合进入激光二极管谐振腔的反馈光强有关^[10~13]。在外腔弱反馈情况下,本文从内外复合腔模型给出激光二极管谐振腔前后端面出射的光场,外腔反馈和外腔运动引起激光频率的频移和自混合干涉信号的频率,并实验

收稿日期: 2010-03-14; 收到修改稿日期: 2010-04-02

作者简介: 胡险峰(1962—),副教授,主要从事基础物理实验教学方面的研究。E-mail: ruirui@vip.sina.com

观察外腔反射面振动对激光频率的影响。

2 内外复合腔模型

自混合干涉的内外复合谐振腔模型如图 1 所示^[12], L_i 为内腔长度, L_r 为外腔长度, r_i 为内腔前后端面的反射比, t_b 为内腔后端面透射比, $t_b^2 = t^2 =$

$$E_{bt}(x) = \frac{1 - [r_i \bar{r}_{\text{eff}} G_s \exp(j\delta_i)]^m}{1 - r_i \bar{r}_{\text{eff}} G_s \exp(j\delta_i)} \{ G_s^{\frac{x}{2L_i}} \exp[j\delta_i x / (2L_i)] + \bar{r}_{\text{eff}} G_s \exp(j\delta_i) G_s^{\frac{x}{2L_i}} \exp[-j\delta_i x / (2L_i)] \} t_b E_i. \quad (1)$$

从内腔前端面透射出的光场为

$$E_{ft}(x) = \frac{1 - [r_i \bar{r}_{\text{eff}} G_s \exp(j\delta_i)]^m}{1 - r_i \bar{r}_{\text{eff}} G_s \exp(j\delta_i)} \{ G_s^{\frac{x}{2L_i}} \exp[-j\delta_i x / (2L_i)] + r_i G_s^{\frac{x}{2L_i}} \exp[j\delta_i x / (2L_i)] \} \bar{t}_i E_i G_s^{1/2} \exp(j\delta_i / 2). \quad (2)$$

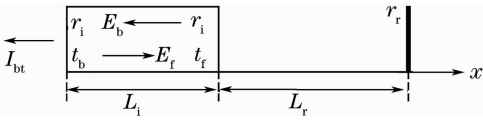


图 1 自混合干涉的复合谐振腔模型

Fig. 1 Model of complex cavity of self-mixing interference

式中 G_s 为内腔的单程增益, m 为光在内腔中反射的次数, $\delta_i = 4\pi n L_i / \lambda$, 为内腔相邻反射的相位差, n 为内腔介质的折射率, λ 为辐射光的波长, $\bar{r}_{\text{eff}} = r_{\text{eff}} \exp(j\varphi)$ 为内腔前端面等效反射比, $\varphi = -\arctan[C \sin \delta_r / (1 - C \cos \delta_r)]$ 为内腔前端面等效反射比的辐角, $r_{\text{eff}} = r_i \beta = r_i (1 + C^2 - 2C \cos \delta_r)^{1/2}$ 为内腔前端面等效反射比的模, \bar{t}_i 为内腔前端面等效透射比, $\delta_r = 4\pi L_r / \lambda$ 为外腔反射镜上相邻反射的相位差, $C = r_r \gamma (1 - r_i^2) / r_i$ 为外腔反馈系数, γ 为外腔耦合系数, $E_i = E_{i0} \exp(j\omega t)$, 为内腔中辐射光的电场强度, ω 为辐射光的角频率, 满足谐振腔选模条件时, ω 就是激光的频率。

在有源法布里-珀罗(F-P)腔中, 若辐射复合的载流子数为 N_s , 在腔长方向分布的平均间隔为 a , 简单地取沿腔长方向单位长度辐射复合的载流子数为 N_s / L_i , 一个长度 a 内辐射复合的载流子数为 $a N_s / L_i$, 在 x 到 $x + a$ 间隔内辐射的光场为 $a N_s E_i / L_i$. 因此, 把(1), (2)式中的 E_i 改写为 $a N_s E_i / L_i$, 令 $x = au$ ($u = 0, 1, 2, 3, \dots, N$), $Na = L_i$, $a N N_s / L_i = N_s$, (1), (2)式对不同辐射源位置 x 的累加改为对 u 求和。当注入载流子浓度足够多时, 内腔向后端面出射的光场为

$$E_{bt} = \frac{1 - [r_i \bar{r}_{\text{eff}} G_s \exp(j\delta_i)]^m}{1 - r_i \bar{r}_{\text{eff}} G_s \exp(j\delta_i)} \times [1 + \bar{r}_{\text{eff}} G_s^{1/2} \exp(j\delta_i)] t_b E_i N_s G_s^{1/4}. \quad (3)$$

$1 - r_i^2$, t_i 为内腔前端面透射比, r_r 为外腔反射镜的反射比, I_{bt} 为内腔后端面出射的光强, E_b 和 E_f 为内腔中向后和向前传播的光场。由于光场最初由自发辐射产生, 在内腔前后端面多次反射后, 内腔中坐标点 x 处辐射的光从内腔后端面透射出的光场为

向前端面出射的光场为

$$E_{ft} = \frac{1 - [r_i \bar{r}_{\text{eff}} G_s \exp(j\delta_i)]^m}{1 - r_i \bar{r}_{\text{eff}} G_s \exp(j\delta_i)} \times (1 + r_i G_s^{1/2}) \bar{t}_i E_i N_s G_s^{1/4} \exp(j\delta_i / 2). \quad (4)$$

取内腔前端面的透射比为波疏介质到波密介质的透射比和波密介质到波疏介质的透射比的几何平均, 由于外腔反馈改变了内腔前端面的反射比, 则 $\bar{t}_i = (1 - \bar{r}_{\text{eff}}^2)^{1/2}$ 。

当 $\delta_i = 2\pi l - \varphi$ 时, l 为整数, 是复合谐振腔的模式指数, 达到复合谐振腔谐振条件^[12], 内腔后端面出射的光场为

$$E_{bt} = E_{i0} (1 + r_i \beta G_s^{1/2}) t_b \beta^{m-1/2} \exp(j\omega t), \quad (5)$$

式中 $E_{i0} = m E_{i0} N_s G_s^{1/4} (r_i^2 G_s)^{(m-1)/2}$ 。内腔前端面出射的光场为

$$E_{ft} = E_{i0} (1 + r_i G_s^{1/2}) t_i \beta^{m-1/2} \times \exp\left[j\left(\omega t + l\pi - \frac{\varphi}{2} + \phi\right)\right], \quad (6)$$

式中

$$t_i = (1 + r_i^4 \beta^4 - 2r_i^2 \beta^2 \cos 2\varphi)^{1/4}, \quad (7)$$

$$\phi = -\frac{1}{2} \arctan \frac{r_i^2 \beta^2 \sin 2\varphi}{1 - r_i^2 \beta^2 \cos 2\varphi}. \quad (8)$$

无外腔反馈时, $\varphi = 0$, $t_b = t_i = t$, $\beta = 1$, $\phi = 0$, 代入(5), (6)式, 模式指数为偶数时, 内腔前后端面出射的光场相同; 模式指数为奇数时, 内腔前后端面出射的光场只是初相位相差 π 。有外腔反馈时, 内腔前后端面出射光场的强度和相位均不相同, 若外腔反馈随时间变化, φ 是时间的函数, 内腔前后端面出射光场的频率也不相同。

在 $CL_r / nL_i < 0.995$ 的情况下, 外腔反馈不改变模式指数^[12,13], 谐振条件 $\varphi + \delta_i = 2\pi l$, 可以改写为

$$\omega = \omega_0 - \frac{\varphi}{\tau_i}, \quad (9)$$

式中 $\tau_i = 2nL_i/c$, 为光在内腔中的回转时间, $\omega = 2\pi c/\lambda$ 为激光的频率, $\omega_0 = \pi c/nL_i$ 为内腔模式的谐振频率, c 是真空中光速。

3 自混合干涉信号

由(5)式内腔向后端面出射的光强为

$$I_{bt} = I_{t0} \frac{(1 + r_i \beta G_s^{1/2})^2}{(1 + r_i G_s^{1/2})^2} \beta^{m-1}, \quad (10)$$

式中 $I_{t0} = (m t E_{i0} N_s)^2 (1 + r_i G_s^{1/2})^2 r_i^{2(m-1)} G_s^{m-1/2}$ 。由(6)式内腔向前端面出射的光强为

$$I_{ft} = I_{t0} \frac{t_f^2}{t^2} \beta^{m-1}. \quad (11)$$

将 $\beta = (1 + C^2 - 2C \cos \delta_r)^{1/2}$ 代入(10), (11)式, 在弱反馈情况下, 由于 C 很小, 忽略包含 C^2 的项, 若 $r_i G_s^{1/2} \gg 1$, 内腔向后端面出射光的强度为

$$I_{bt} \approx I_{t0} - (m+1) I_{t0} C \cos \delta_r. \quad (12)$$

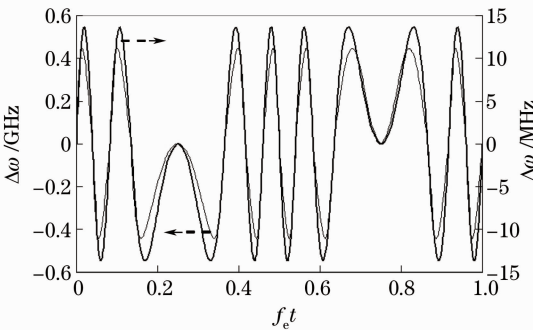
外腔反馈对后端面出射光强度的调制深度 $\kappa_b = (m+1)C$ 。内腔向前端面出射光的强度为

$$I_{ft} \approx I_{t0} - I_{t0} \left(m - \frac{1+r_i^2}{1-r_i^2} \right) C \cos \delta_r. \quad (13)$$

外腔反馈对前端面出射光强度的调制深度 $\kappa_f = [m - (1+r_i^2)/(1-r_i^2)]C$ 。外腔反馈对后端面出射光强度的调制深度大于对前端面出射光强度的调制深度, 即 $\kappa_b > \kappa_f$ 。当 $m < (1+r_i^2)/(1-r_i^2)$, (12), (13)式中第二项的符号相反, 即从内腔前端面和后端面测量到的自混合干涉信号的相位相差 π , 在相关文献[10, 14]中观察到这种情况。

由(12)式或(13)式, 自混合干涉信号的角频率为

$$\omega_s = \left| \frac{\partial \delta_r}{\partial t} \right| = \frac{\omega}{c} v_r + \left| \tau_r \frac{\partial \omega}{\partial t} \right|, \quad (14)$$



式中 $v_r = 2\partial L_r/\partial t$ 为外腔反馈光光程变化速率, $\tau_r = 2L_r/c$ 为光在外腔中回转时间。(14)式右边第一项与运动物体反射光的多普勒频移相同。若外腔反射镜做正弦运动, 即 $L_r = L_{r0} + \Delta L_r \sin \omega_e t$, 则

$$\omega_s = \omega \Delta \tau_r \omega_e |\cos \omega_e t| + \tau_{r0} \left| \frac{\partial \omega}{\partial t} \right| + \Delta \tau_r \left| \frac{\partial \omega}{\partial t} \sin \omega_e t \right|, \quad (15)$$

式中 $\Delta \tau_r = 2\Delta L_r/c$, $\tau_{r0} = 2L_{r0}/c$, $\omega_e = 2\pi f_e$, f_e 为外腔振动频率。

4 计算分析

计算时取外腔静态长度 $L_{r0} = 130$ mm, 外腔长度正弦变化振幅 $\Delta L_r = \lambda$, 内腔光学长度 $nL_i = 1$ mm, 外腔反馈参数 $CL_r/nL_i < 0.995$ 。

4.1 激光的频移

在 $CL_r/nL_i < 0.995$ 时, (9)式只有一个解^[12, 13], 由(5)式和(9)式, 随外腔长度正弦振动一个周期, 内腔后端面出射激光的频移 $\Delta\omega = \omega - \omega_0$ 的变化如图2所示, 其中图2(b)为局部放大。其中粗线和细线分别为 $C = 9.12 \times 10^{-5}$ 和 $C = 2.96 \times 10^{-3}$, 频移变化振幅分别约 13.8 MHz 和 443 MHz, 周期性变化次数与自混合干涉条纹数相同。反馈系数增大约 32 倍, 激光的频移增大也是约 32 倍, 外腔反馈系数大, 则激光的频移曲线随外腔运动方向倾斜更明显。在外腔反射镜振动的正负半周都包含正频移和负频移, 从激光的频移不能类似通常所说的多普勒频移那样通过正频移或负频移来判断外腔反射镜运动的方向。

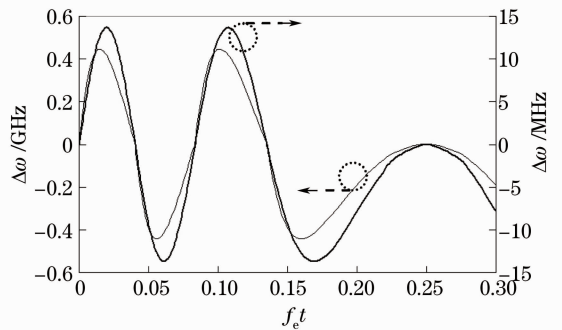


图2 激光频移随外腔振动的变化

Fig. 2 Variation of frequency shift of laser with vibration of external cavity

外腔反射镜运动时, 内腔前后端面出射激光的频移有所不同, 在 $CL_r/nL_i < 0.995$ 的情况下, 外腔反馈不改变模式指数 l , (6)式中 ω 仍由(9)式决定, (6)式中的相位随外腔运动变化, 则内腔前端面出射

激光的频移为

$$\Delta\omega = -\frac{\varphi}{\tau_i} + \omega_m, \quad (16)$$

式中右边第一项就是(9)式决定的频移, 称之为谐振

频移,外腔反馈发生变化后,满足复合腔谐振条件而发生的频移;第二项与外腔反馈随时间的变化有关,若保持外腔反馈系数不变,则与反馈光在外腔中的光程随时间的变化有关,称之为运动频移,即

$$\omega_m = -\frac{1}{2} \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (17)$$

随外腔长度正弦振动一个周期,求解(9)式得到 δ_r ,代入 φ 和 ϕ 中计算 φ 和 ϕ 对时间的微分,得到的运动频移随外腔振动的变化如图3所示,其中粗线和细线分别为 $C=9.12 \times 10^{-5}$ 和 $C=2.96 \times 10^{-3}$ 。运动频移随外腔振动周期性变化,变化幅度随外腔反馈系数增加, $C=2.96 \times 10^{-3}$ 时,最大振幅为 $\omega_m^{\max} = 4.67\omega_e$,若外腔振动的频率 $f_e = 450$ Hz,则 $\omega_m^{\max} = 13.2$ kHz。由图2得到最大谐振频移为443 MHz,运动频移远小于谐振频移,可以认为前后端面出射的激光因外腔反馈导致的频移基本上是相等的。外腔运动的频率越大运动频移也越大,在运动频移不是远小于谐振频移时,前后端面出射的激光因外腔反馈导致的频移不相等,在外腔反射面高频运动时,运动频移会超过谐振频移,谐振腔前端面出射光的频移可能由运动频移决定。从图3可以看到不能通过运动频移的正频移或负频移来判断外腔反射镜运动的方向。

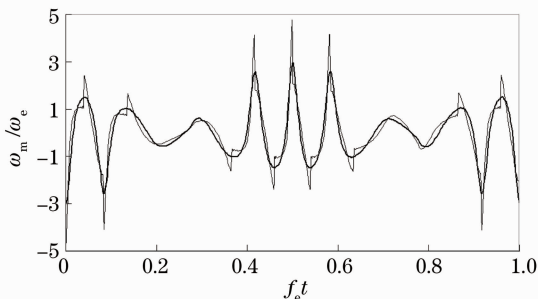


图3 运动频移随外腔振动的变化

Fig. 3 Variation of movement frequency shift with vibration of external cavity

4.2 干涉信号的频率

求解(9)式,计算外腔反馈引起 δ_r 的变化,按(14)式取 δ_r 对时间的微分计算自混合干涉信号的频率。自混合干涉信号的频率随外腔振动的变化如图4所示,其中粗线和细线分别为 $C=9.12 \times 10^{-5}$ 和 $C=2.96 \times 10^{-3}$ 。 $C=9.12 \times 10^{-5}$ 时,外腔反馈很弱,激光的频移很小,激光频移随外腔振动变化的曲线几乎未出现倾斜(图2), (14)式右边第二项很小可以忽略,自混合干涉信号的频率随外腔振动周期性变化的规律为正弦波形的全波整流波形,与实验

测量的情况一致^[6]。 $C=2.96 \times 10^{-3}$ 时,自混合干涉信号的频率随外腔振动变化的趋势与 $C=9.12 \times 10^{-5}$ 时一致,但由于外腔反馈系数增大,激光的频移增大,激光频移随外腔振动变化的曲线出现倾斜(图2), (14)式右边第二项不可以忽略,随外腔振动自混合干涉信号的频率出现尖锐振荡,图中最大频率大约是 $C=9.12 \times 10^{-5}$ 时最大频率的1.61倍,这个值偏小,实际值应该接近2倍,原因是计算步长不是足够小,得到的 δ_r 对时间的微分偏小。

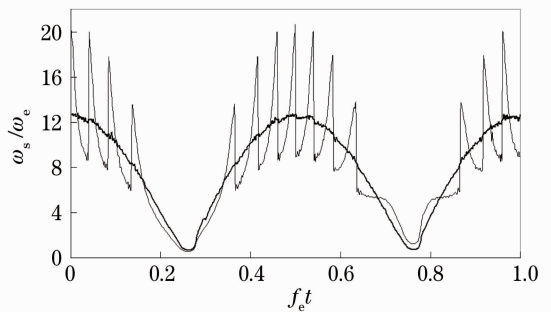


图4 干涉信号频率随外腔振动的变化

Fig. 4 Variation of frequency of interference signal with vibration of external cavity

5 实验测量

用1:1分光镜BS将LD前出光投射向光电探测器PD2,LD前出射光的主偏振方向在分光镜的入射面内,入射角约 45° 。在PD2前放置2.5/0.08显微镜物镜,将光束会聚到PD2上,根据测量需要在显微镜物镜和分光镜之间插入SWB-II-1 mm F-P标准具,如图5所示。PD1为封装在激光二极管LD的谐振腔后端面外的光电探测器。用PIC-MIO-16E-1型A/D卡和LabView软件组成4通道函数记录仪,用A/D卡模出通道输出信号控制LD工作电流自动调节,自动记录PD1和PD2测量到的

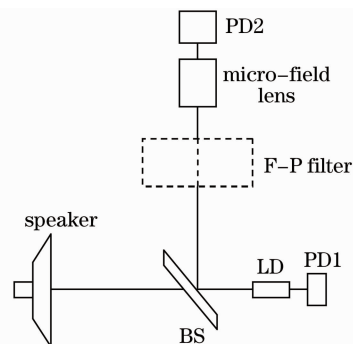


图5 前后端面出射光自混合干涉信号测量装置

Fig. 5 Schematic of the experiment for measurement of SMI signal from front and rear facets of laser diode

静态光电流和自混合干涉信号(动态光电流)。用 TDS3052B 示波器观察 PD1 和 PD2 输出信号波形和快速傅里叶变换(FFT)频谱。

5.1 自混合干涉信号和频谱

文献[6]中用自混合干涉信号的过零信号驱动频率电压变换器,显然测量不到自混合干涉信号的频率出现的尖锐振荡(图 4)。在自混合干涉信号的

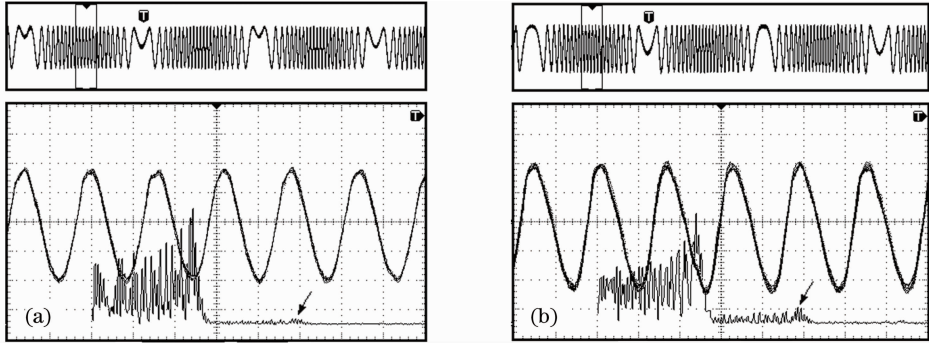


图 6 自混合干涉信号的波形和频谱

Fig. 6 Waveform and spectrum of self-mixing interference

5.2 前后端面出射光的自混合干涉信号

在显微镜物镜和分光镜之间不插入 F-P 标准具,随 LD 工作电流增加,PD1 测量到的静态光电流和自混合干涉信号的幅度如图 7 所示;PD2 测量到的静态光电流和自混合干涉信号幅度如图 8 所示。随工作电流变化,PD1 测量到的自混合干涉信号在大约 27.5~29 mA 处出现肩峰;PD2 测量到的自混合干涉信号在约 31 mA 处又出现一个峰。在自混合干涉信号的幅度下降的工作电流段,自混合干涉信号的波形上出现肩峰或腰峰,且随工作电流变化^[15]。在工作电流达到阈值电流的约 1.3 倍(32.2 mA)之前,PD1 和 PD2 测量到的自混合干涉信号的波形基本相同,再增大工作电流波形则不再保持一致,如

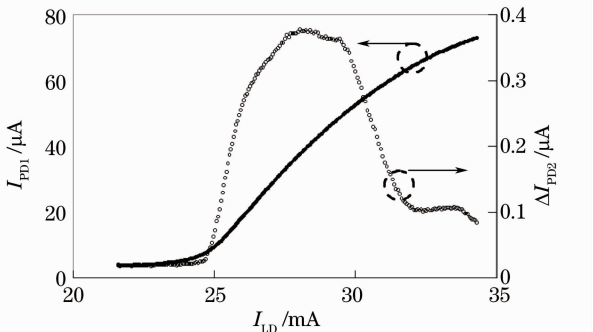


图 7 后端面出射光静态光电流和自混合干涉信号幅度随 LD 工作电流变化

Fig. 7 Variation of static light current and SMI signal with LD operating current that the light comes from rear facet of laser diode

频谱中总是存在强度较小的倍频成分,如图 6 所示。干涉信号的波形为类似正弦波形时,倍频成分的强度很弱,如图 6(a)中箭头所指处;干涉信号为类似锯齿波形时,倍频成分明显增强,如图 6(b)中箭头所指处。其产生原因可以从图 4 中自混合干涉信号的频率出现尖锐振荡得到解释。

图 7和图 8 中工作电流 32.5~34 mA 时,自混合干涉信号上的肩峰或腰峰消失,前后端面出射光的自混合干涉信号的相位关系随工作电流变化,会出现相位反相的情况^[10,14]。

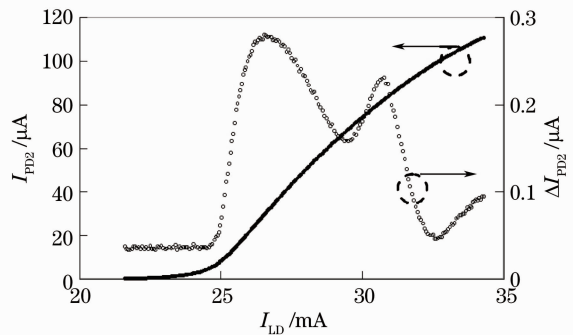


图 8 前端面出射光静态光电流和自混合干涉信号幅度随 LD 工作电流变化

Fig. 8 Variation of static light current and SMI signal with LD operating current that the light comes from front facet of laser diode

由图 7 和图 8,PD2 测量到的干涉信号的调制深度与 PD1 测量到的干涉信号调制深度之比 K ,在略高于阈值电流后, K 在 1~0.28 之间,这是外腔长度约 69 mm 时的情况。随外腔长度增加,外腔反射的散射光反馈回内腔的比例减小,同样的测量得到,在外腔长度增大到约 102 mm 时,在略高于阈值电流后, K 在 1~0.27 之间;在外腔长度增大到约 132 mm 时,工作电流为 25~30 mA 段, K 在 1~0.54 之间,在这之后到 34 mA, K 在 0.85~1.4 之

间。在上述三种外腔反馈情况下,在工作电流为 25~30 mA 时,前端面测量到的自混合干涉信号的调制深度小于后端面测量到的自混合干涉信号的调制深度。

5.3 前端面出射光经 F-P 标准具后的自混合干涉信号

在显微镜物镜和分光镜之间插入 F-P 标准具,为避免 F-P 标准具的反射光返回 LD 谐振腔,让反射光斑边缘紧靠 LD 出光口边缘,也保证光束几乎垂直射入 F-P 标准具。随 LD 工作电流增加,PD1 测量到的静态光电流和自混合干涉信号的幅度与图 7 所示基本相同;PD2 测量到的静态光电流和自混合干涉信号幅度如图 9 所示。随工作电流增加,PD2 测量得到的自混合干涉信号随工作电流增加,在约 27 mA 处有一个峰值,到 32 mA 后则出现迅速上升。静态光强则在 27.3 mA 附近有一个钟罩形的峰,在 30.5 mA 处则是一个谷。PD2 测量到的是 F-P 标准具线形函数和 LD 各个模式的线形函数重叠部分的叠加, F-P 标准具的自由光谱区约 150 GHz,精细度约 62,则线宽约 2.4 GHz,远小于 LD 的模式线宽,随 LD 工作电流变化,LD 各个模式的光频随之变化,PD2 测量到的 F-P 标准具透射峰线形为 LD 各个模式线形的叠加,不能把各个模式分开而成为宽化的钟罩形峰,相邻透射峰的间隔则是 F-P 标准具的自由光谱区。随 LD 工作电流变化,自混合干涉信号的幅度也伴随在静态光强透射峰附近出现峰形变化。

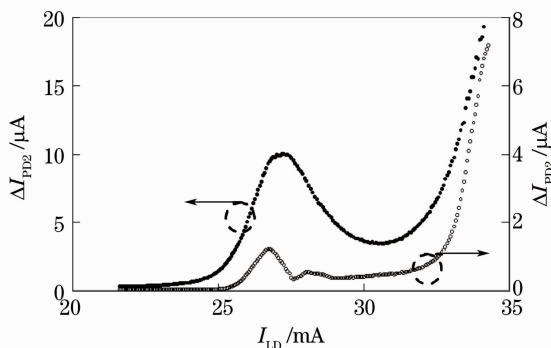


图 9 前端面出射光经过 F-P 标准具后静态光强和干涉信号幅度随 LD 工作电流变化

Fig. 9 Variation of static light intensity and SMI signal with LD operating current that the light comes from front facet of laser diode and passes through an F-P filter

由图 7 和图 9 可知,经过 F-P 标准具测量到的自混合干涉信号的调制深度大于后端面测量到的自混合干涉信号的调制深度,最小约 3 倍,最大则是 316

倍。由于 F-P 标准具是一个滤波器,光波频率在其谐振峰两侧变化会引起透射光强大幅度变化,PD2 测量到的自混合干涉信号的调制深度比 PD1 测量到的大几倍到几百倍,说明经过 F-P 标准具后测量到的干涉信号主要是光频变化引起的。比较图 7 和图 9 中工作电流约 32~34 mA 段,工作电流增大后外腔反馈引起的光强起伏显著减小;而光频起伏则没有显著减小,或有大幅度增加,是略有减小还是大幅度增加与光束入射 F-P 标准具的角度有关。

在 F-P 标准具透射峰附近,大约 26.8 mA 处,经 F-P 标准具后的自混合干涉信号的调制深度约 13%,LD 谐振腔后端面测量到的自混合干涉信号的调制深度约 1.2%;在大约 34 mA 处,经 F-P 标准具后的自混合干涉信号的调制深度约 35%,而 LD 谐振腔后端面测量到的自混合干涉信号的调制深度约 0.1%。由 F-P 标准具的线宽约 2.4 GHz 估计外腔反馈引起的光频变化,2.4 GHz 的一半乘 13% 约为 0.15 GHz,乘 35% 约为 0.42 GHz,即为自混合干涉导致的激光二极管前端面出射激光的频移。实验测量图 7,图 8 和图 9 时,半个外腔振动周期自混合干涉信号约 4 个条纹,即外腔振幅约一个激光波长,振动频率约 450 Hz,由(15)式右边第一项得到外腔振动引起的最大多普勒频移 f_D 约为 5.71 kHz;运动频移 f_m 也达不到几百兆赫兹。在本文实验测量的情况下,自混合干涉引起的光频频移应当是谐振频移,而非反馈光自身的多普勒频移或自混合干涉后的运动频移。

当 F-P 标准具的反射光斑与 LD 出光口重叠,PD1 测量到的静态光电流增大,则 F-P 标准具的反射光返回 LD 谐振腔。随 LD 工作电流增加 PD1 测量到自混合干涉信号的开始工作电流由 24.7 mA 减小到 24.3 mA,自混合干涉信号开始下降的工作电流降到约 25.4 mA,上升段和下降段都变得更陡峭。自混合干涉信号中伴随显著的起伏噪声,在工作电流约为 28~32 mA 段(F-P 标准具反射光相对强),自混合干涉信号则淹没在高频噪声中,示波器选择 128 次采样平均后仍可以观察到减弱的自混合干涉信号,在工作电流约为 33~34 mA 段(F-P 标准具反射光相对弱),示波器不用选择采样平均又能观察到伴随显著起伏噪声的自混合干涉信号。而整个过程中 PD1 测量到的静态光电流并未发生显著变化,与图 7 所示基本一致,工作电流 30 mA 时静态光电流值约增大 5 μ A,工作电流 33 mA 时静态光电流值约增大 1 μ A;PD2 测量到的静态光电流的

峰位没有显著变化,峰高显著减弱。说明反馈光增大使激光二极管阈值电流减小,再同时增大工作电流则动态增益下降;在如此的反馈光增强水平,自混合干涉信号依然存在只是相位不稳定,激光辐射状态没有改变^[13]。

6 结 论

由于自混合干涉激光光场的频率与外腔反射面运动速度已不直接相关,而是通过谐振腔端面复反射比间接与外腔反射面的运动有关,激光二极管前后端面出射激光的频移不是外腔反射镜运动引起的反射光的多普勒频移,不能类似多普勒频移那样从光频的增加或减小反映光反射面运动的方向。在外腔反射面运动频率较小时,运动频移远小于谐振频移,前后端面出射的激光因外腔反馈导致的频移基本上相等,大小由谐振频移决定;外腔反射面高频率运动时,前后端面出射的激光因外腔反馈导致的频移不相等,谐振腔前端面出射光的频移有可能由运动频移决定。忽略外腔反馈引起激光频率的变化,光强起伏形成的自混合干涉信号的频率近似等于外腔反射镜运动引起的反射光的多普勒频移。自混合干涉信号波形出现类锯齿波形倾斜,是外腔反馈导致激光频移引起。外腔反馈增强,激光频移随外腔振动的变化曲线出现倾斜,光强起伏形成的自混合干涉信号的频率随外腔反射面振动出现尖锐振荡,峰值频率接近多普勒频移的两倍,因而自混合干涉信号的频谱中总是包含较弱的倍频成分。

参 考 文 献

- 1 D. Silvano, G. Giuliani, S. Merlo *et al.*. Laser diode feedback interferometer for measurement of displacements without ambiguity[J]. *IEEE J. Quant. Elect.*, 1995, **31**(1): 113~119
- 2 N. Servagent, T. Bosch, M. Lescure. A laser displacement sensor using the self-mixing effect for modal analysis and defect detection[J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1997, **46**(4): 847~850
- 3 G. Giuliani, S. Bozzi-Pietra, S. Donati. Self-mixing laser diode vibrometer [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2003, **14**(1): 24~32
- 4 M. Norgia, G. Giuliani, S. Donati. Absolute distance measurement with improved accuracy using laser diode self-mixing

- interferometry in a closed loop [J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2007, **56**(5): 1894~1900
- 5 Yu Yanguang, Guo Changying, Ye Huiying. Vibration measurement based on moderate optical feedback self-mixing interference[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1430~1434
禹延光,郭常盈,叶会英.基于适度光反馈自混合干涉技术的振动测量[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8): 1430~1434
- 6 Hu Xianfeng. Reconstruction of vibration signal from laser diode self-mixing interference signal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1498~1502
胡险峰.从激光二极管自混合干涉信号重建振动信号[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1498~1502
- 7 Shaoqing Wang, Xiangzhao Wang. Resonant characteristics of microcantilever by using self-mixing interferometer based on phase reconstruction method[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(2): 177~180
- 8 Xia Wei, Zhang Xiaoyuan, Yue Bangqiang *et al.*. Laser self-mixing interference vibrometer based on current modulation and DSP demodulation[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(4): 041201
夏巍,张小元,岳邦强等.一种基于电流调制和DSP解调的激光自混合干涉测振仪[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(4): 041201
- 9 Zhang Guangna, Ye Huiying, Xue Qi *et al.*. Displacement measurement based on moderate optical feedback self-mixing interference[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(3): 66~70
张广娜,叶会英,薛琦等.基于适度光反馈自混合干涉技术的位移测量系统[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(3): 66~70
- 10 P. J. de Groot, G. M. Gallatin, S. H. Macomber. Ranging and velocimetry signal generation in a backscatter-modulated laser diode [J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(21): 4475~4480
- 11 Yanguang Yu, Huiying Ye, Jianquan Yao. Analysis for the self-mixing interference effects in a laser diode at high optical feedback levels [J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2003, **5**(2): 117~122
- 12 Hu Xianfeng. Calculation analysis and experiment observation on laser diode self-mixing interference [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1111~1116
胡险峰.激光二极管自混合干涉的计算分析和实验观察[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1111~1116
- 13 Hu Xianfeng. Effect of external feedback light on state density of photon in internal cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2684~2689
胡险峰.外腔反馈光对内腔中光子态密度的影响[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2684~2689
- 14 W. M. Wang, W. J. O. Boyle, K. T. V. Grattan *et al.*. Self-mixing interference in a diode laser: experimental observations and theoretical analysis [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(9): 1551~1558
- 15 Hu Xianfeng. Analysis and observation on self-mixing interference of multi-longitudinal mode laser diode [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 440~444
胡险峰.多纵模激光二极管自混合干涉的观察和分析[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 440~444