

激光二极管自混合干涉的计算分析和实验观察

胡险峰

(四川大学物理科学与技术学院, 四川 成都 610064)

摘要 实验上观察到自混合干涉信号的幅度仅仅为静态光强的百分之几。反馈光会引起激光二极管阈值电流减小, 静态输出光强变化几倍, 使激光二极管工作在实际的阈值电流之上。按三镜法布里-珀罗腔结构模型计算激光二极管的出射光强, 由干涉函数主极大条件得出光频与反馈光的关系。计算出的自混合干涉信号的波形, 以及自混合干涉信号的幅度与静态光强的比值均同实验测量结果一致。在 $\tau_r C / \tau_i = 22.8$ 的情况下, 复合谐振腔可同时有 15 个谐振模式, 这些模随外腔长度的变化小于 $2.6 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$, 远小于法布里-珀罗谐振腔谐振模的线宽 3.1 cm^{-1} , 光频在内腔谐振模的线宽以内变化。

关键词 光学测量; 激光二极管; 自混合干涉; 阈值电流

中图分类号 TN248.4 **文献标识码** A

Calculation Analysis and Experimental Observation on Laser Diode Self-Mixing Interference

Hu Xianfeng

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

Abstract Ratio of self-mixing interference amplitude and static light intensity from a laser diode is only a few percent based on experimental observation. Feedback light decreases threshold current of laser diode and increases the static light intensity. The feedback light makes laser diode operate over the actual threshold current. The output intensity of laser diode is calculated with a three-mirror Fabry-Pérot cavity system. An equation between light frequency and feedback light is found from the main maximum condition of interference function. Signal waveform of self-mixing interference and ratio of the signal amplitude with the static light intensity are calculated, and the results are coincident with that measured experimentally. There are 15 resonance modes of complex cavity in the case of $\tau_r C / \tau_i = 22.8$ at the same time. The variations of these resonance modes with external cavity length are less than $2.6 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$ and far less than 3.1 cm^{-1} resonance mode width of Fabry-Pérot cavity. The variation of the light frequency is within the resonance mode width of inherent cavity.

Key words optical measurement; laser diode; self-mixing interference; threshold current

1 引 言

外部反射光进入激光器谐振腔引起激光器出光强度和光频发生变化, 当外部反射光的光程变化时, 激光器出光强度会发生类似双光束干涉形成的光强变化, 这一现象被称为激光自混合干涉。一般情况下应避免激光器出射光反馈回激光器中以免导致输出光强和光频不稳定。然而, 激光自混合干涉包含外部反射面运动的信息, 可用于大尺度高精度位移直接测量, 微小机械振动的无接触直接测量等, 而且光学系统简单、光路调节简便, 更易于集成。对激光

二极管(Laser diode, LD)自混合干涉在应用方面已提出许多方案和解决具体技术问题的方法^[1~3], 但距广泛实际应用尚有相当距离。

实验观察到激光二极管工作在阈值电流附近时, 外腔反馈会引起激光二极管静态输出光强增加几倍, 而自混合干涉信号仅为静态光强的百分之几, 在反馈光影响下激光二极管的阈值电流下降。在已见报道的有关激光二极管自混合干涉的分析和讨论中^[4~12], 主要依据激光器稳定输出条件, 分析讨论反馈光引起激光器输出光的光频变化和动态光强变

化的信号波形,未对反馈光引起静态光强变化和阈值电流变化进行讨论。

按三镜法布里-珀罗腔结构模型^[4],光束在激光二极管内腔的两个端面上来回反射。由于外置反射镜的作用,内腔中从前端面反射回的光被增强,等效于提高了前端面的反射率,内腔前端面与外置反射镜组成的谐振腔称为外腔。本文用三镜法布里-珀罗腔结构模型,计算内腔中多次反射叠加后的出射光强,讨论内腔后端面输出光强与外腔反馈和外置反射镜振动的关系,由实验讨论反馈光对阈值电流的影响。

2 外腔反射比

自混合干涉谐振腔如图 1 所示, I_{bt} 为激光二极管后端面出射的光强, L_i 为内腔的长度, L_r 为内腔前端面到反射镜的距离,称为外腔长度, r_i 为内腔前后端面的反射比, t 为内腔前后端面的透射比, r_r 为反射镜的反射比, E_b 为内腔中向后行走的光波, E_i 为内腔中向前行走的光波。 x 坐标的原点设在内腔的中间。设内腔有源层的折射率为 n ,单位长度增益系数为 g ,单位长度损耗系数为 α_i ,光限制因子为 Γ ,外腔单位长度损耗系数为 α_r ,光波长为 λ 。光波矢的实部为 $k_R = 2\pi/\lambda$,内腔中光波矢的虚部为 $k_i = (\Gamma g - \alpha_i)/2$,外腔中光波矢的虚部为 $k_i = -\alpha_r$ 。

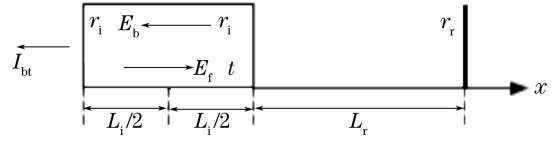


图 1 自混合干涉谐振腔

Fig. 1 Resonant cavity of self-mixing interference

内腔中发射的光束照射到内腔前端面,一部分反射回内腔,另一部分透射入外腔,在外腔中来回反射,并部分透射回内腔。由于外腔中各种耗散,多次反射不是很容易达到,当在外腔中仅有 1 次反射的情况下,内腔前端面等效反射比为

$$\tilde{r}_{\text{eff}} = r_i [1 - C \exp(j\delta_r)] \equiv r_{\text{eff}} \exp(j\varphi) \equiv \beta r_i \exp(j\varphi), \quad (1)$$

式中 δ_r 为外腔反射镜相邻反射的相位差, $\delta_r = 2k_R L_r$, C 为外腔反馈系数, $C = r_r \gamma (1 - r_i^2) / r_i$, γ 为外腔耦合系数, $\gamma = \exp(-2\alpha_r L_r)$, $\beta = (1 + C^2 - 2C \cos \delta_r)^{1/2}$, $\varphi = -\arctan \frac{C \sin \delta_r}{1 - C \cos \delta_r}$ 。

3 内腔出射光

内腔中最初的光是载流子复合辐射产生的,不是由内腔端面外射的。设内腔自发辐射的电场强度为 E_i ,内腔的中点发出的光波经内腔多次反射后,从内腔后端面透射出的光波为

$$E_{bt} = \frac{1 - [r_i \tilde{r}_{\text{eff}} G_s \exp(j\delta_i)]^m}{1 - r_i \tilde{r}_{\text{eff}} G_s \exp(j\delta_i)} (1 + \tilde{r}_{\text{eff}}) t_b G_s^{1/4} \exp\left(j \frac{\delta_i}{4}\right) E_i, \quad (2)$$

式中 $G_s = \exp(2k_i L_i)$ 为内腔的单程增益, δ_i 为内腔相邻反射的相位差, $\delta_i = 2k_R n L_i$, t_b 为内腔后端面透射比, $t_b = t$, m 为光在内腔中反射的次数。从内腔前端面透射出的光波为

$$E_{ft} = \frac{1 - [(r_i \tilde{r}_{\text{eff}} G_s \exp(j\delta_i)]^m}{1 - r_i \tilde{r}_{\text{eff}} G_s \exp(j\delta_i)} (1 + r_i) t_i G_s^{1/4} \exp\left(j \frac{\delta_i}{4}\right) E_i, \quad (3)$$

式中 t_i 为内腔前端面透射比, $t_i \neq t$ 。

激光二极管后端面出射光强为

$$I_{bt} = |E_{bt}|^2 = \Phi(\delta_i + \varphi) (1 + r_{\text{eff}}^2 + 2r_{\text{eff}} \cos \varphi) t_b^2 G_s^{1/2} E_i^2, \quad (4)$$

其中

$$\Phi(\delta_i + \varphi) = \frac{[1 - (r_i r_{\text{eff}} G_s)^m]^2 + 4(r_i r_{\text{eff}} G_s)^m \sin^2 [m(\delta_i + \varphi)]/2}{(1 - r_i r_{\text{eff}} G_s)^2 + 4r_i r_{\text{eff}} G_s \sin^2 [(\delta_i + \varphi)]/2}, \quad (5)$$

为干涉函数。干涉函数的主极大值为

$$\Phi_l(\delta_i + \varphi) = \frac{m^2 (r_i r_{\text{eff}} G_s)^{m-1} \cos [m(\delta_i + \varphi)]}{\cos(\delta_i + \varphi)} \Big|_{\delta_i + \varphi = 2l\pi, l=0,1,2,\dots} = m^2 (r_i r_{\text{eff}} G_s)^{m-1}, \quad (6)$$

对应光波的波长有

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{4\pi n L_i} (2\pi l - \varphi) = \frac{1}{\lambda_i} \left(1 - \frac{\varphi}{2\pi l}\right), \quad (7)$$

式中 $\lambda_i = 2nL_i/l$ 为无外腔反馈时光波的波长。因此干涉函数的主极大对应的光强为

$$I_{bt} = m^2 (r_i r_{\text{eff}} G_s)^{m-1} (1 + r_{\text{eff}}^2 + 2r_{\text{eff}} \cos \varphi) t_b^2 G_s^{1/2} E_i^2. \quad (8)$$

当无外腔反馈时, $\varphi = 0, r_{\text{eff}} = r_i$, 输出光强为

$$I_{\text{bti}} = m^2 (r_i^2 G_{\text{si}})^{m-1} (1 + r_i)^2 t_b^2 G_{\text{si}}^{1/2} E_i^2, \quad (9)$$

式中 G_{si} 为无外腔反馈时内腔的单程增益。当有外腔反馈时, 输出光强可为

$$I_{\text{btr}} = m^2 (r_i r_{\text{eff}} G_{\text{sr}})^{m-1} [(1 + r_{\text{eff}})^2 - 4r_{\text{eff}} \sin^2(\varphi/2)] t_b^2 G_{\text{sr}}^{1/2} E_i^2, \quad (10)$$

式中 G_{sr} 为有外腔反馈时内腔的单程增益。有外腔反馈和无外腔反馈时输出光强之比为

$$I = \frac{I_{\text{btr}}}{I_{\text{bti}}} = \frac{\beta^{m-1} [(1 + \beta r_i)^2 - 4\beta r_i \sin^2(\varphi/2)]}{(1 + r_i)^2} G, \quad (11)$$

式中 G 为有反馈和无反馈时内腔的单程增益之比, $G = (G_{\text{sr}}/G_{\text{si}})^{m-1/2}$ 。

4 自混合干涉信号

4.1 光频变化可忽略时的自混合干涉信号

若外腔耦合很弱, 光频变化可忽略, 即 $\varphi = 0, \lambda = \lambda_i$ 。忽略包含反馈系数的平方项, 由(11)式, 输出光强之比为

$$I = \left\{ 1 - \frac{[(m-1) + (m+1)r_i]C}{(1+r_i)} \cos \delta_r \right\} G, \quad (12)$$

设外腔反射镜做正弦振动, 则

$$\delta_r = \frac{4\pi L_r(t)}{\lambda_i} = \frac{4\pi L_{r0}}{\lambda_i} + \frac{4\pi \Delta L_{r0}}{\lambda_i} \sin 2\pi f t, \quad (13)$$

式中 L_{r0} 为外腔静态长度, ΔL_{r0} 为外腔动态振幅, f 为外腔反射镜振动频率。自混合干涉信号的波形如图 2 所示, $C = 9 \times 10^{-5}$, $m = 10$, $4\pi L_{r0}/\lambda_i = 2k\pi + \pi/2$, $\Delta L_{r0} = 2\lambda_i$, 其为类似正弦波形。

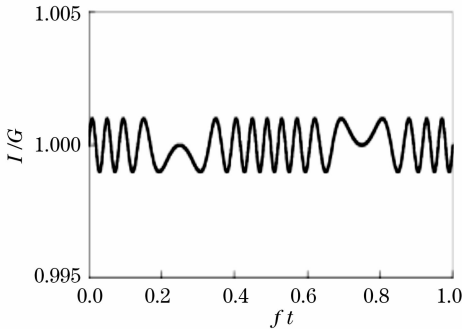


图 2 光频变化可忽略时的自混合干涉信号

Fig. 2 Self-mixing interference signal as variation of light frequency can be neglected

4.2 光频变化不可忽略时的自混合干涉信号

当外腔耦合不是很弱, 则 φ 是外腔长度的函数, 激光的光频将随外腔长度变化, 由(1)式和(7)式可得

$$\omega_0 \tau_r = \omega \tau_r - \frac{\tau_r}{\tau_i} \arctan \frac{C \sin \omega \tau_r}{1 - C \cos \omega \tau_r}, \quad (14)$$

式中 τ_r, τ_i 分别为光在外腔中和内腔中的往返时间,

$\tau_r = \frac{2L_r}{c}, \tau_i = \frac{2nL_i}{c}$ 。在外腔反射镜做正弦振动情况

时, 光频率或相位差 δ_r 随外腔反馈系数 C 变化如图 3 所示, $\tau_r/\tau_i \approx \tau_{r0}/\tau_i = 200$, 计算时 $\tau_r \approx \tau_{r0} = 2L_{r0}/c$ 。可

见, 当 $C=0$ 时, 光频无变化, 但随着 C 逐渐增大光频变化逐渐增大, 且变化曲线逐渐倾斜。

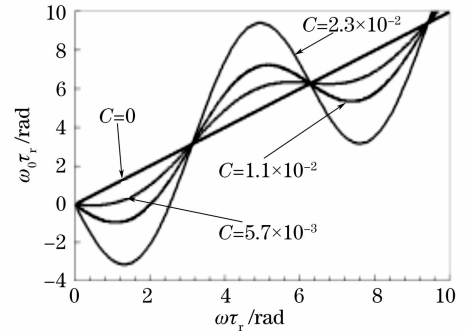


图 3 光频率随反馈系数 C 的变化

Fig. 3 Variation of light frequency with feedback coefficient C

将(14)式右边反正切项移到等式左边, 再对等式取余弦, 并令 $u = \cos \omega \tau_r$, 则

$$u = \cos \left(\omega_0 \tau_r + \frac{\tau_r}{\tau_i} \arctan \frac{C \sqrt{1-u^2}}{1-Cu} \right). \quad (15)$$

在 $-1 \leq u \leq 1$ 区间, $\sin \omega \tau_r \geq 0$, (14) 式和(15)式中反正切的符号相同。求解(15)式, 将解代入(1)式和(11)式, 计算出随外腔振动的自混合干涉信号如图 4 所示, 其为类似锯齿波形, $C = 9 \times 10^{-4}$, $m = 8$, $4\pi L_{r0}/\lambda_i = 2k\pi$, $\Delta L_{r0} = \lambda_i$, $\tau_{r0}/\tau_i = 1000$ 。(14)式的解随着外腔振动周期变化, 也就是由内腔和外腔组成的复合谐振腔的谐振模位置在周期变化, 当

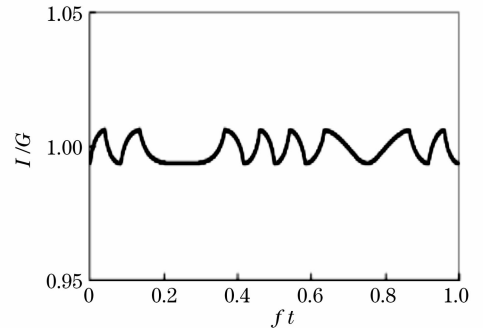


图 4 光频变化不可忽略时的自混合干涉信号

Fig. 4 Self-mixing interference signal when the variation of light frequency cannot be neglected

$C=9 \times 10^{-4}$, $\tau_{r0}/\tau_i=1000$ 时,由(14)式的解可算出谐振模波数变化的最大值约 $1.1 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$ 。

4.3 多模状态下的自混合干涉信号

(14)式的解与反馈系数和外腔长度有关,当 $\tau_{r0}/\tau_i=1000$, $C > 10^{-3}$ 时,有一个以上的解。随着 C 增大,外腔的作用增强,(14)式的解增多;当 τ_{r0}/τ_i 增大时,(14)式的解也增多。当 $\tau_{r0}/\tau_i=1000$, $C=2.28 \times 10^{-2}$ 时,(14)式有 15 个解,且间隔非均匀分布。这些解对应光波的波数变化小于 $2.6 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$,远小于内腔谐振模的间隔,若 $nL_i=6.5 \times 10^5$,内腔谐振模的间隔约 7.7 cm^{-1} 。在这样的外腔长度和反馈水平下,不足以引起内腔谐振模间隔水平的跳模发生。对于 GaAs 法布里-珀罗谐振腔^[13],若内腔谐振模的间隔约 7.7 cm^{-1} ,则内腔谐振模的线宽约 3.1 cm^{-1} 。所以,在上述外腔长度和反馈水平下,光频变化在内腔谐振模的线宽以内。激光二极管工作在由复合谐振腔形成的多模状态

下,模间隔非均匀分布随外腔长度变化远小于内腔谐振模的线宽。

在(14)式有一个以上解的情况下,随着外腔长度变化,解会消失或出现。如当 $C=4 \times 10^{-3}$, $\Delta L_{r0}=\lambda_i$, $4\pi L_{r0}/\lambda_i=2k\pi+\pi/2$, $\tau_{r0}/\tau_i=1000$ 时,(14)式可以同时有 3 个、2 个或 1 个解,这 3 个解随外腔长度变化不连续,见图 5。把这些解代入(11)式,计算出的输出光强之比随外腔尺寸的变化见图 6, $m=8$ 。若 N 个解每个解分配总光强的 $1/N$,那么 3 个解的光强叠加产生光电二极管输出的光电流,即自混合干涉信号,见图 7,图中也描绘出 $C=9 \times 10^{-5}$,仅有一个解时的自混合干涉信号。在外腔振幅为一个波长时,仅有一个解和有 3 个解的自混合干涉信号均有 4 个条纹。有 3 个解时的自混合干涉信号变化陡直或平直,类似上升沿或下降沿过冲的方波波形,若信号处理电路中包含滤波,这 4 个条纹或出现分叉,或形成肩峰。

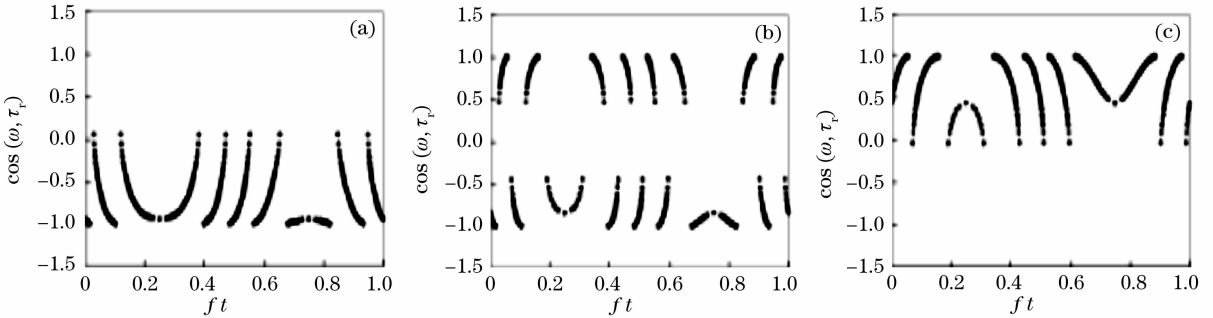


图 5 (14)式的 3 个解随外腔尺寸的变化

Fig. 5 Variation of three solve of equation (14) with external cavity length

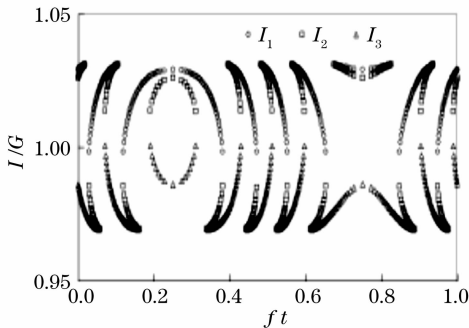


图 6 3 个解的输出光强随外腔尺寸的变化

Fig. 6 Intensity variation of the three solves with external cavity length

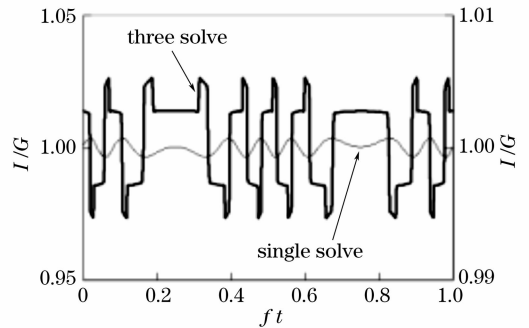


图 7 3 解情况下的自混合干涉信号

Fig. 7 Self-mixing interference signal under three solves

5 实验观察

5.1 静态和动态自混合干涉信号

以恒流源向激光二极管供电,其光电二极管(PD)输出电流经电流电压变换后,用数字毫伏表测

量。通过沿着激光二极管输出的条形光斑的长度和宽度两个方向调整反射光的的角度,来调节反馈回激光二极管的光强。由 PD 输出电流监测激光二极管输出光强。调整反射光束角度,PD 输出达到某一

电流值时,再改变 LD 工作电流,测量 PD 输出电流和 LD 工作电流的关系,测量结果见图 8。图中以 LD 工作电流为 31.4mA 时,仔细调节反射光的的角度得到的最大 PD 输出电流值表征最大反馈光强时 LD 的输出光强,标为 100% 反馈。测量中观察到 LD 工作电流不因光反馈而改变。

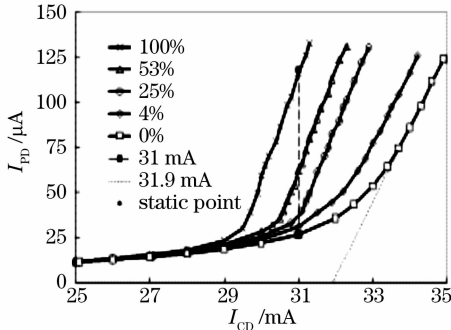


图 8 光电二极管静态电流随 LD 工作电流和反馈光强的变化

Fig. 8 Variation of photodiode Static current versus laser diode operating current and feedback light intensity

从图 8 可见,随反馈光强增加,阈值电流减小,静态工作点上升。当 LD 工作电流为 31 mA 时,外腔反射镜不振动,反馈光最强时 PD 输出电流是无反馈光时的 4.5 倍,外腔反射镜振动时 PD 输出电流中动态分量的幅度约为静态分量的 2.5%。不同的反馈光强时,PD 静态输出不相同,对应的自混合干涉信号见图 9 所示,激光二极管工作电流 31 mA。从图 2、图 4 和图 9 可见,自混合干涉信号的幅度为静态光强的百分之零点几到百分之几。

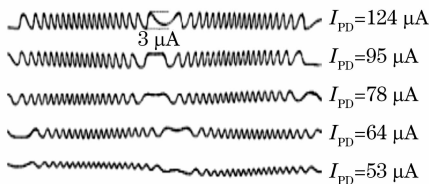


图 9 自混合干涉信号与光电二极管静态输出电流

Fig. 9 Self-mixing interference signal and photodiode static output current

图 9 中自混合干涉信号的幅度和静态光强均随外腔反馈增大而增加。(11)式和图 9 表明外腔反馈引起内腔的单程增益增大,但内腔的单程增益对自混合干涉信号的波形影响不大,自混合干涉信号是反馈光在内外复合腔中光学干涉的结果,内腔中的有源介质对其起放大作用。

5.2 外腔反馈与阈值电流

图 8 中当 LD 工作电流为 31 mA 时,随着外腔反馈增大,激光二极管逐渐工作到相应外腔反馈情

况下的阈值电流之上。实验观察到动态自混合干涉信号时,激光二极管工作在相应光反馈水平的阈值电流之上,不在阈值平衡状态。

激光二极管工作在通常所说的阈值电流(无外腔反馈)附近,有外腔反馈时,实际工作在相应光反馈水平的阈值电流之上,很容易出现老化现象,输出光强逐渐减弱,需要提高工作电流才能再观察到自混合干涉信号。

6 结 论

反馈光会引起激光二极管阈值电流减小,静态输出光强变化几倍,使激光二极管工作在实际的阈值电流之上。按三镜法布里-珀罗腔结构模型计算激光二极管的出射光强,由干涉函数主极大条件得出光频与反馈光的关系,计算出的自混合干涉信号的幅度与静态光强的比值为 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ 数量级,以及计算出的自混合干涉信号的波形均同实验测量结果一致。外腔振动使复合谐振腔的谐振模周期性偏移,光波的中心频率周期性移动,导致自混合干涉信号出现畸变。反馈光过强时激光二极管工作在由复合谐振腔形成的多模状态下,模间隔非均匀分布随反馈水平和外腔长度的变化远小于内腔谐振模的线宽。自混合干涉信号源于反馈光在内外复合谐振腔中的光学干涉,内腔中的激光介质对反馈光及其光学干涉起放大作用。

参 考 文 献

- Zhang Shulian. Laser feedback technique and its development [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(11): 65~71
张书练. 激光回馈技术及发展[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, **44**(11): 65~71
- Zhang Shulian, Liu Gang, Zhu Jun *et al.*. Self-mixing interference effect and progress for measuring displacement application[J]. *Progress in Nature Science*, 2005, **15**(7): 788~798
张书练,刘刚,朱钧等. 自混合干涉效应及其在位移测量应用中的进展[J]. *自然科学进展*, 2005, **15**(7): 788~798
- Mao Wei, Zhang Shulian, Zhang Lianqing *et al.*. Optical feedback effect and the optical feedback interferometry for sensing application[J]. *Optical Technique*, 2007, **33**(1): 16~22
毛威,张书练,张连清等. 激光回馈效应及其传感应用研究的进展[J]. *光学技术*, 2007, **33**(1): 16~22
- P. J. 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
- Sun Xiaoming, Ma Junshan, Qiang Xifu. Theoretical analysis of the self-mixing interference in laser diode[J]. *Chin. J. Lasers*, 1998, **A25**(11): 1018~1022
孙晓明,马军山,强锡富. 半导体激光自混合干涉理论研究[J]. *中国激光*, 1998, **A25**(11): 1018~1022
- Yu Yanguang, Ye Huiying, Yao Jianquan. Steady solution to a

- self-mixing interference system for measuring displacement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(1): 80~84
- 禹延光,叶会英,姚建铨. 激光自混合干涉位移测量系统的稳态解[J]. 光学学报, 2003, **23**(1): 80~84
- 7 Huan Hai, Wang Ming, Hao Hui *et al.*. Theory and experiment study on self-mixing interference with multiple external reflectors [J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(11): 1373~1377
- 宦海,王鸣,郝辉等. 多外腔自混合干涉现象的理论与实验[J]. 中国激光, 2004, **31**(11): 1373~1377
- 8 Yu Yanguang, Cheng Ming, Qiang Xifu. Self-mixing interference effects in a laser diode with multiple optical feedback[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(9): 1903~1098
- 禹延光,程明,强锡富. 多重光反馈的激光自混合干涉[J]. 光学学报, 2001, **21**(9): 1093~1098
- 9 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
- 10 Wang Ming, Nie Shouping, Li Dacheng. Self-mixing interferometry of dual external cavities and its signal analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(6): 729~733
- 王鸣,聂守平,李达成. 两重外腔的自混合干涉及其信号分析[J]. 光学学报, 2003, **23**(6): 729~733
- 11 Huan Hai, Wang Ming, Hao Hui. Self-mixing interference effects in a laser diode with multiple external reflectors[J]. *J. Nanjing Normal University (Natural Science Edition)*, 2003, **26**(4): 46~50
- 宦海,王鸣,郝辉. 弱光反馈条件下的多外腔自混合干涉[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2003, **26**(4): 46~50
- 12 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
- 13 Zhang Mingde, Sun Xiaohan. *Fiber Optical Communication Principle and System* [M]. Third edition, Nanjing: Southeast University Press, 2003. 86
- 张明德,孙小茜. 光纤通讯原理与系统[M]. 第3版,南京:东南大学出版社,2003. 86

Chinese Optics Letters (《中国光学快报》)“纳米光学”专题 征 稿 启 事

纳米科学与技术的快速发展对许多学科产生了巨大影响,尤其是激光与光学领域。*Chinese Optics Letters* (《中国光学快报》)计划于2008年10月推出“纳米光学”专题栏目,现特向国内外广大读者以及作者征集“纳米光学”方面原创性的研究论文,旨在集中报道该方面最新的研究成果及研究进展,以引起国内外广大科研工作者的更大关注。

征稿范围包括:

- Quantum dots and nanowires
- Photonic crystals
- Silicon photonics
- Solar cells and solar energy
- VCSELs
- Slow light and fast light
- Plasmonics
- Other

Feature Editors:

Connie Chang-Hasnain

T. P. Lee

John R. Whinnery Chair Professor in

Telcordia Technologies (Retired)

Electrical Engineering and Computer

Sciences

University of California

截稿日期:2008年7月15日

投稿方式以及格式:可直接将稿件电子版发至邮箱:col@mail.shnc.ac.cn(主题标明“纳米光学专题投稿”),或通过网上投稿系统直接上传稿件(投稿类型选择 focus issue submission),详情请参见《中国光学快报》网站:<http://www.col.org.cn>。投稿必须是英文稿,其电子版请使用 Latex 或者 MS-Word 格式。有任何问题请发邮件至 col@mail.shnc.ac.cn 询问。