

LD 泵浦单模绿光激光器自混合干涉效应的研究^{3 X}张 勇^{126 3 3}, 姚建铨^{1,326}, 王 鹏^{1,326}, 禹延光^{1,326}

(1. 天津大学精仪学院激光与光电子研究所, 天津 300072; 2. 河北工业大学理学院, 天津 300130; 3. 南开大学、天津大学联合研究院, 天津 300072; 4. 教育部光电信息技术科学重点实验室, 天津 300072; 5. 华中科技大学激光技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074; 6. 哈尔滨工业大学可调谐(气体)激光技术国防科技重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:从自混合干涉效应的等效 F2P 腔模型出发, 研究了 LD 泵浦的单模绿光激光器的自混合干涉效应, 建立了一般模型。该模型适用于强反馈以及多重光反馈下的自混合干涉效应和弱光反馈水平的情况, 也可以转化到其它文献所报道的模型。实验结果表明, 该绿光激光器的位移测量精度比半导体激光器的测量精度提高了 100 nm 以上。

关键词:LD 泵浦; 单模绿光激光器; 自混合干涉效应; 一般模型

中图分类号: TN241 **文献标识码:** A **文章编号:** 100520086(2003)0720679204

Study on Self-mixing Interference Effects in LD Pumped Single-mode Green Laser

ZHANG Yong¹²⁶, YAO Jianquan^{1,326}, WANG Peng^{1,326}, YU Yan2guang^{1,326}

(1. Institute of Laser and Optoelectronics, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. College of Science, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 3. Cooperated Institute of Nankai University and Tianjin University, Tianjin 300072, China; 4. Key Lab. of Optoelectric Information Science and Technology, Ministry of Education, Tianjin 300072, China; 5. State Key Lab. of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 6. State Key Lab. of Tunable(Gas) Laser Technology on Defense Science and Technology, Harbin University of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Based on the equivalent F2P model of self-mixing interference effect, we studied the self-mixing interference effects in the LD pumped single mode green laser and established a general model for the effects in the laser. This model was the same with conditions of strong feedback (also strong feedback with multiple reflections) and weak feedback. And this model could be transformed to other reported models. The experimental results showed that the measuring precision of the LD pumped green laser was 100 nm higher than that of semiconductor lasers.

Key words: LD pumped; single-mode green laser; self-mixing interference; general model

1 引 言

自混合干涉效应是指入射到外反射物(靶)的光被部分反射回激光内腔, 并在腔内与出射光混合干

涉, 从而改变了激光器的输出特性, 引起光谱、光强的变化。反馈光携带了反射物的信息, 所以通过分析干涉谱, 就可以得到反射物的诸如位置、位移以及运动速度等信息, 甚至可以进行三维形貌的测量。因此,

X 收稿日期: 2002212215 修订日期: 2003204201

3 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60278001); 教育部南开大学、天津大学联合研究院基金资助项目; 激光技术国家重点实验室(华中科技大学)资助项目

3 3 E-mail: yongzhang@eyou.com

自 20 世纪 60 年代自混合干涉效应被发现以来,已经成为微观测量新的研究领域,并迅速得到广泛的研究^[1-6]。但研究大都集中在半导体激光器自混合干涉效应,对于固体激光器尤其是 LD 泵浦的固体激光器自混合干涉效应的研究,迄今尚未有较完整的报道。尤其是关于自混合干涉系统的模型。研究都是从各自实验系统出发,建立与自己所观察实验现象相吻合的模型。本文建立了自混合干涉系统的一般模型。该模型适用于强反馈以及多重光反馈下的自混合干涉效应,并且可以转化到弱光反馈水平的情况,与以往所报道的弱光模型相统一。

2 自混合干涉效应

2.1 一般模型的建立

通常激光自混合干涉系统的分析从复合腔激光系统的激发条件出发,用三镜腔来描述,即用含外腔的激光器等效,如图 1 所示。图中, L_c 和 L_{ext} 分别表示激光内、外腔的长度; r_1 、 r_2 和 r_3 分别表示激光器内腔左、右面和外腔面幅值反射率。

含外腔激光系统的振荡条件为^[7]

$$r_1 r_{eff} \exp[(g - \alpha_{in}) L_c] \exp(i 2 n_c k L_c) = 1 \quad (1)$$

其中 r_{eff} 为等效腔面复数反射率。光反馈较强时应考虑多重光反馈的影响, r_{eff} 可以表示为^[8]

$$r_{eff} = r_2 - (1 - r_2^2) r_3 \sum_{p=1}^{\infty} (r_2 r_3)^{p-1} f_p \exp(i p \omega \tau) \quad (2)$$

其中, ω 为激光角频率; $\tau = 2 L_{ext} / c$, 为光在外腔的往返时间, 式中 c 为真空中光速; p 表示多重反馈下第 p 次光的往返; $f_p = (1 - r_2^2)^2$ 表示外腔和内腔的光耦合系数。

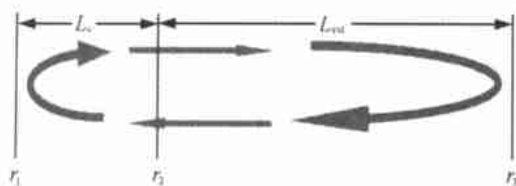


图 1 自混合干涉基本原理图

Fig. 1 Schematic of self-mixing interference effect

令 $r_{eff} = \exp(G + i\varphi)$, 其中 G 和 φ 分别表示 r_{eff} 的实部和虚部。光反馈改变了半导体激光的输出光功率和光相位, 其实质是光反馈改变了载流子的密度, 从而导致激光媒质复数折射率的实部 n_R 和虚部 n_I 均发生变化。实部的变化影响激光光强; 虚部的

变化影响激光的相位。设复数折射率表示为 $n_c = n_R - i n_I$, 将其代入(1)式后, 分离其实部和虚部, 可得系统激发条件为

$$\begin{cases} n_R k = -\frac{1}{2 L_D} (\ln |r_1| + (g - \alpha_{in}) L_c + G) \\ n_I k = \frac{1}{2 L_c} (2\pi m - \varphi) \quad (m \text{ 是正整数}) \end{cases} \quad (3)$$

当反馈光不存在时, $r_3 = 0$, 所以, $r_{eff} = r_2$, $G = \ln r_2 = \ln r_1$, $\varphi = 0$, 则(3)式可简化为

$$\begin{cases} n_{R0} k_0 = -\frac{1}{2 L_c} (\ln |r_1|^2 + (g - \alpha_{in}) L_c) \\ n_{I0} k_0 = \frac{1}{2 L_c} 2\pi m \end{cases} \quad (4)$$

(4) 式是激光器激发条件。式中, n_{R0} 、 n_{I0} 为激光媒质复数折射率的实部、虚部; k_0 为无外部反馈光存在时的波矢。

当外部反馈光存在时, 腔内载流子的密度 n 将发生改变, 引起折射率 n_c 改变, 因此导致波矢的变化 ($k \rightarrow k_0 + \Delta k$)。

在反馈光为 0 处线性化 n_R 、 n_I 。令 n_0 为对应的载流子密度, n_{R0} 、 n_{I0} 为对应的复数折射率的实部和虚部, 记为 $n_{R0} = n(n_0)$ 、 $n_{I0} = g(n_0)$ 。反馈光存在时, 将 $n_R(n)$ 和 $n_I(n)$ 做一级近似展开, 有

$$\begin{cases} n_R(n_0 + \Delta n) = n_{R0} + (dn_R/dn_0)\Delta n = n_{R0} + \chi \Delta n \\ n_I(n_0 + \Delta n) = n_{I0} + (dg/dn_0)\Delta n = n_{I0} + \rho \Delta n \end{cases} \quad (5)$$

式中 χ 、 ρ 分别为复数折射率 n_c 的实部和虚部随载流子密度 n 的变化率。将(5)式带入(3)式, 并以 $k_0 + \Delta k$ 代替 k , 将 Δn 、 Δk 作为独立变量并消去 $\Delta n \Delta k$ 项, 得

$$\Delta k = \frac{\chi \ln |r_1|}{2 n_{R0} L_c (\chi \frac{n_{I0}}{n_{R0}} - \rho)} + \frac{1}{2 n_{R0} L_c (\chi \frac{n_{I0}}{n_{R0}} - \rho)} (\varphi - G) \quad (6)$$

令 $\alpha = \chi / \rho$, 称为激光线宽展宽因数。当 n_{I0} / n_{R0} 远小于 1 时, (6) 变为

$$\Delta k = -\frac{\alpha \ln |r_1|}{2 n_{R0} L_D} - \frac{1}{2 n_{R0} L_c} (\varphi - \alpha G) \quad (7)$$

根据关系: $k = 2\pi / \lambda$, $\omega = 2\pi c / \lambda = ck$, $c \Delta k = \Delta \omega = \omega_0 - \omega$, 其中 c 为真空中光速。故系统相位方程可以写为

$$\omega - \omega_0 = -\frac{\alpha \ln |r_1|}{2 n_{R0} L_c} - \frac{c}{2 n_{R0} L_c} (\varphi - \alpha G) \quad (8)$$

由于 $n_I k - n_{I0} k_0 = -(G - \ln |r_1|) / 2 L_c$, 用 Δg 表示阈值增益 ($n_I k - n_{I0} k_0$) 的变化量, 并令 $\Delta g_0 = 1 / 2 L_c$, 则

$$\frac{\Delta g}{\Delta g_0} = \ln |r_1| - G \quad (9)$$

将系统的相位条件和阈值条件写在一起,则有

$$\begin{cases} \omega\tau - \omega_0\tau = -\alpha \ln |r_1| - \frac{1}{\tau_c} - \frac{1}{\tau_c}(\varphi - \alpha) \\ \frac{\Delta g}{\Delta g_0} = \ln |r_1| - G \end{cases} \quad (10)$$

其中 $\tau_c = 2n_c L_c / c$ 。(10)式可以描述激光强度随外部反射物移动的变化情况,是单模激光自混合干涉系统的一般位移模型。

以上讨论的是准直外腔情况。对于非准直外腔效应,用与准直外腔时同样的分析方法建立系统模型。为了更精确地表示光反馈的实际情况,引入角度敏感分量参数 $\gamma = 2\pi\theta_l$,将等效反射率修改为

$$r_{\text{eff}} = r_2 - \frac{r_{31} \exp[i(\omega\tau + \gamma)]}{1 - [r_2 r_3 \exp(i\omega\tau)]^2} - \frac{r_{32} \exp[i(2\omega\tau)]}{1 - [r_2 r_3 \exp(i\omega\tau)]^2} - \frac{r_{33} \exp[i3(\omega\tau + \gamma) + \gamma]}{1 - [r_2 r_3 \exp(i\omega\tau)]^2} \quad (11)$$

式中, $r_{31} = (1 - r_2^2) r_3 f \sin(\theta_l \pi) / \theta_l \pi$; $r_{32} = (1 - r_2^2) r_2 r_3^2 f$; $r_{33} = (1 - r_2^2) r_2^2 r_3^3 f \sin(\theta_l \pi) / \theta_l \pi$ 。其中, f 为外腔准直时内外腔耦合效率; θ_l 是相对于衍射图样的第 1 个暗条纹对应角度的归一化倾斜角,约 $100 \mu\text{rad}$,研究范围设定在 $\theta_l \leq 1$ 。将(11)代入(1)式,则式(10)也可以描述非准直外腔时自混合干涉现象。

2.2 向其他模型的转化

当光反馈水平较弱时,即 r_3 很小,由(2)式,可得

$$G = \ln |r_{\text{eff}}| = \ln \frac{\sqrt{[r_2 + r_3 \cos(\omega\tau)]^2 + r_3^2 \sin^2(\omega\tau)}}{\sqrt{[1 + r_2 r_3 \cos(\omega\tau)]^2 + r_2^2 r_3^2 \sin^2(\omega\tau)}} \approx \ln(r_2) + \frac{(1 - r_2^2)}{r_2} r_3 \cos(\omega\tau) \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \varphi &= \arctg\left(\frac{r_3 \sin(\omega\tau)}{r_2 + r_3 \cos(\omega\tau)}\right) - \arctg\left(\frac{r_2 r_3 \sin(\omega\tau)}{1 + r_2 r_3 \sin(\omega\tau)}\right) \approx \\ &\quad \frac{1 - r_2^2}{r_2} r_3 \sin(\omega\tau) \end{aligned} \quad (13)$$

代入一般模型式(10)得

$$\begin{cases} \omega\tau - \omega_0\tau = -C \sin(\omega\tau - \arctg\alpha) \\ \frac{\Delta g}{\Delta g_0} = \cos(\omega\tau) \end{cases} \quad (14)$$

其中, $\Delta g_0 = \frac{(1 - r_2^2)}{r_2} r_3$; $C = \frac{1 - r_2^2}{r_2} r_3 \frac{1}{\tau_c} \sqrt{1 + \alpha^2}$,通常表示光反馈水平,由此转化的弱反馈模型与文献[9,10]报道的模型相同。 $C \ll 1$,对应弱光反馈; C 接近 1,为适

度光反馈; $C > 1$,则为较强光反馈。但 $C > 1$ 时,不能用式(12)而应采用式(10)。去分析自混合干涉现象。

3 实验研究

实验装置如图 2 所示,包括 LD 泵浦 Nd:YAG 的、KTP 晶体倍频的激光器(LDPL)(中心波长 532 nm)、外反射镜(靶)、光探测器以及记录激光模式的光谱仪。通过前后移动反射镜,可以在示波器上观察到自混合干涉的类锯齿波波形,如图 3、4 所示。

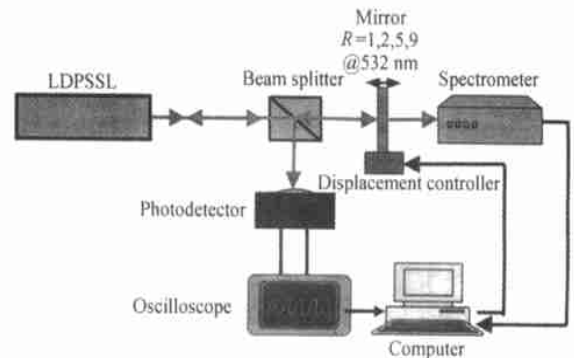


图2 自混合干涉实验装置图

Fig. 2 Experimental setup of self-mixing interference

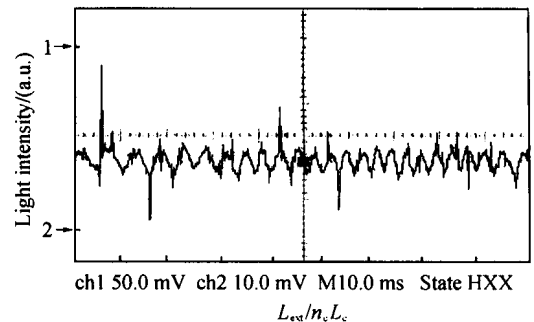


图3 距离干涉信号

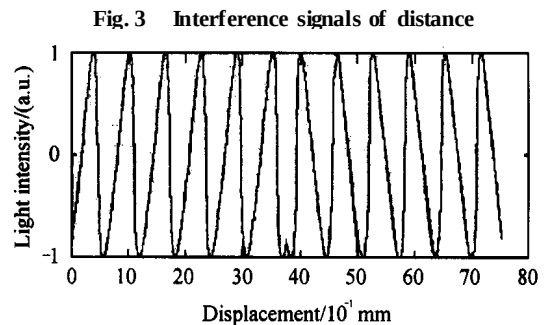


图4 位移干涉信号

Fig. 4 Interference signal of displacement

对实验所得到的干涉信号进行快速傅里叶变换(FFT),结果表明,该绿光激光器测量位移的精度比半导体激光器的测量精度提高了 100 nm 以上。关于用 FFT 法分析干涉信号的过程与结果已另文

发表^[11]。

4 结 论

本文从自混合干涉效应的等效 F2P 腔模型出发,研究了 LD 泵浦的单模绿光激光器的自混合干涉效应,建立了一般模型。该模型适用于强反馈以及多重光反馈下的自混合干涉效应和弱光反馈水平的情况,并可以转化到其它文献所报道的模型。进行了该激光器的自混合干涉实验,得到了清晰的类锯齿波波形,将测量精度提高了 100 nm 以上。

参 考 文 献:

- [1] Peter J De Groot, Gregg M Gallatin. Backscatter modulation velocimetry with an external cavity laser diode[J]. Optics Letter, 1989, **14**(3):1652167.
- [2] Edson T Shimizu. Directional discrimination in the self mixing type laser doppler velocimeter[J]. Appl. Opt., 1987, **26**(2):454124544.
- [3] Therry Bosch, Noel Servagent, Ryad Chellali. Three dimensional object construction using a self mixing type scanning laser range finder[J]. IEEE Trans. Instrum. And Meas., 1998, **47**(5):132621329.
- [4] YU Yan2guang, SUN Xiao2ming, WEI Zhen2lu, et al. Model and simulation of optical feedback displacement sensor using a laser diode[J]. Optical Technique, 1999, **11**(213), 100221582. (in Chinese)
- [5] YU Yan2guang, YE Hui2ying, YAO Jian2quan. Self mixing interference effects in a multimode LD: Experimental observation and theoretical analysis[J]. J. of Optoelectronics Laser(光电子 激光), 2002, **13**(11):119021193.
- [6] W M Wang, K T V Grattan, A W Palmer. Self mixing interference inside a single mode diode laser for optical sensing applications[J]. IEEE J. Light Wave Technology, 1994, **12**(9):157721587.
- [7] A Olsson, C L Tang. Coherent optical interference effects in external cavity semiconductor lasers[J]. IEEE J. Q. E., 1982, **17**(8):132021323.
- [8] Dongsun Seo, Jongdae Park, John G Mcinerney. Multiple feedback effects in asymmetric external cavity semiconductor lasers[J]. IEEE J. Q. E., 1989, **25**(11):222922237.
- [9] Silvan Donati, Guido Giuliani. Laser diode feedback interferometer for measurement of displacements without ambiguity. [J]. IEEE J. Q. E., 1995, **31**(1):1132119.
- [10] Klaus Petermann. External optical feedback phenomena in semiconductor lasers[J]. IEEE J. Selected Topics in Q. E., 1995, **1**(2):4802489.
- [11] Yong Zhang, Yanguang Yu, Jianquan Yao, Peng Wang, Jin Chen. Analysis of self mixing interference signals in LD pumped solid state laser using fast Fourier transform technique[A]. Proceedings of SPIE. The International Society for Optical Engineering[C], 2002, **4919**:4882492.

作者简介:

张 勇 (1971 -), 男, 回族, 讲师, 博士生, 主要研究固体激光器及其自混合干涉效应 1