

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0631-02

半导体激光自混合干涉系统的稳态分析*

禹延光^{1,2} 叶会英² 赵新¹ 姚建铨¹

(¹ 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 激光与光电子研究所, 教育部光电信息技术科学重点实验室, 天津 300072)
² 郑州大学信息工程学院, 郑州 450052

摘要 通过求解激光自混合干涉位移测量系统模型的相位方程, 确定其单值解和多值解时边界条件, 由此确定自混合干涉系统稳态运行的参数选择规则。

关键词 半导体激光器, 自混合干涉, 稳态解

中图分类号 TH744.3 **文献标识码** A

Analysis for the Self - mixing Interference in Semiconductor Laser System

YU Yan-guang^{1,2} YE Hui-ying² ZHAO Xing¹ YAO Jian-quan¹

(¹ Precision Instrument and Opto-electronic Engineering School, Institute of Laser and Opto-electronico, Optoelectronic Information Science and Technology Lab., Tianjin University, Tianjin 300072)
² Information Engineering School, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052

Abstract The boundary of the single and multiple solution is given by solving the phase equation of self-mixing interference system. This can determine choosing rule of the parameters in a stable operating system.

Key words semiconductor laser, self-mixing interference, stable solution

激光自混合干涉技术是在光反馈效应的研究和消除不利光反馈影响的过程中产生, 由于在很多应用场合能取代传统的、复杂的干涉系统而逐渐形成一个崭新的有深远应用前景的研究领域, 关于该领域的历史背景, 本文作者在其他几篇文章中曾作过介绍^[1,2]。

激光自混合干涉的基本现象于 1968 被首次报道, 80 年代中期, 美国、日本的一些学者开始利用这些基本现象进行距离和速度的测量, 90 年代, 英国、意大利、法国的学者也步入自混合干涉技术的研究, 新的现象不断被报道, 近几年, 自混合干涉技术的研究已扩展到振动测量^[3]、探伤研究^[4]、模具谱分析^[5]、形貌测量^[6]等, 尤其是与大规模集成制造技术结合, 利用表面微机械技术, 可以使微光学动力系统集成在单片半导体基片上^[7], 向微型传感器发展。

我们课题组从 1997 年开始, 已对弱光反馈水平下和较高反馈水平下, 自混合效应作了研究, 并研究

了利用该效应进行位移测量的技术。本文则针对激光自混合干涉位移测量系统的稳态解进行分析, 从理论上确定系统稳态运行条件。

由半导体激光自混合干涉系统模型^[8]知, 系统的相位方程为

$$\omega_0 \tau - \omega \tau = C \sin(\omega \tau - \arctan \alpha) \quad (1)$$

其中, ω_0 为无光反馈时激光角频率, τ 为光在外腔的往返时间, ω 为有光反馈时激光角频率, α 为激光线宽展宽因数, C 为描述光反馈水平的参数,

$$C = fr_3 \frac{1 - r_1^2}{2r_1} \frac{\tau}{\tau_D} \sqrt{1 + \alpha^2},$$

其中, r_1 为激光腔面的幅值反射系数, r_3 为外部反射镜 M 的幅值反射系数, f 为外部反馈光耦合至腔内的反馈比。令

$$\omega_0 \tau - \omega \tau = \Delta \omega \tau = y \quad (\text{相位变化量})$$

$$\omega_0 \tau = x \quad (\text{反馈光相位})$$

$$\arctan \alpha = \varphi_0$$

则(1)式变为

$$y = C \sin(x - y - \varphi_0) \quad (2)$$

令 $f(y) = y - C \sin(x - y - \varphi_0)$

* 国家自然科学基金(60178039)及河南省自然科学基金(0111060200)资助课题。

则对于任意 x 值,有

$$\frac{df(y)}{dy} = 1 + C\cos(x - y - \varphi_0)$$

当 $C < 1$ 时,恒有 $\frac{df(x)}{dy} > 0$,则函数 $f(y)$ 为单调递增函数,即(2)式对任意 x 值,存在唯一解,此时对应自混合干涉系统处于单模稳态运行方式。

当 $C \geq 1$ 时,函数 $f(y)$ 为非单调函数,则(2)式对任意 x 值,存在非唯一解,即自混合干涉系统处于多模运行状态。

下面确定(2)式存在三个解时 C 的边界条件。

图1是 C 取两个不同值2、3时, $y \sim x$ 关系曲线即相位变化量 \sim 反馈光相位之间的关系。显然,随着 C 的增大, $y \sim x$ 关系曲线存在多值的区间增大,如图1中 (x_1, x_2) 存在三个解时, y 的斜率在多值区间出现两个无穷大点 A 、 B 。

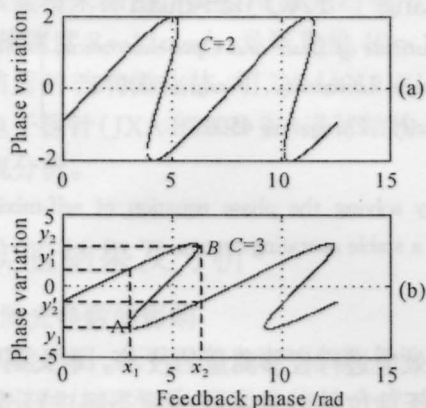


图1 相位变化量随反馈光相位的变化曲线

Fig.1 Curve of phase variation y versus feedback phase x

对(2)式求得

$$\frac{dy}{dx} = \frac{C\cos(x - y - \varphi_0)}{1 + C\cos(x - y - \varphi_0)}$$

当 $\frac{dy}{dx} = \infty$ 时,有

$$\cos(x - y - \varphi_0) = -1/C \quad (3)$$

则 $y = -\varphi_0 + x - \pi \pm a\cos(1/C) \quad (4)$

由图1(b)看出,对应 x_1 时, y 有两个解 y_1 、 y'_1 ,且 $y_1 < y'_1$,显然 y'_1 的斜率不满足无穷大条件,舍之,则由(4)式确定出

$$y_1 = -\varphi_0 + x_1 - \pi - a\cos(1/C) \quad (5)$$

对应 x_2 时, y 有两个解, y_2 、 y'_2 ,且 $y_2 > y'_2$,显然 y'_2 的斜率不满足无穷大条件,舍之,则由(4)式确定出

$$y_2 = -\varphi_0 + x_2 - \pi + \arccos(1/C) \quad (6)$$

由(3)式有

$$\sin(x - y - \varphi_0) = \pm \sqrt{1 - (1/C^2)} \quad (7)$$

将(7)式代入(2)式得

$$y_1 = \sqrt{C^2 - 1}, \quad y_2 = -\sqrt{C^2 - 1}$$

于是

$$x_2 - x_1 = 2\sqrt{C^2 - 1} - 2\arccos(1/C) \quad (8)$$

由(2)式得

$$y(x + 2\pi) = y(x)$$

因此, y 是 x 的周期函数,周期为 2π ,如图1 $y \sim x$ 关系图,显然方程存在三解的区域范围为

$$0 \leq x_2 - x_1 \leq 2\pi$$

由(8)式可得 C 的边界条件为

$$1 \leq C \leq 4.6034 \quad (9)$$

该结论与文献[9]的实验结果一致。

参 考 文 献

- 1 Yu Yanguang, Qiang Xifu. The correct interpretation about a phenomenon of the self-mixing interference in semiconductor laser. *Chinese J. Lasers (B)*, 2000, **B9** (1):24~29
- 2 禹延光,强锡富,魏振禄等. 差动型激光自混合干涉式位移测量系统. *光学学报*, 1999, **19**(9):1269~1273
- 3 P. A. Roos, M. Stephens, C. E. Wieman. Laser vibrometer based on optical feedback-induced frequency modulation of a single-mode laser diode. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(34):6754~6761
- 4 Noel Servagent, Thierry Bosch, Marc Ilescu. A laser displacement sensor using the self-mixing effect for modal analysis and defect detection. *IEEE Trans. Instru. and Meas.*, 1997, **46**(4):847~850
- 5 Thierry Bosch, Noel Servagent. A displacement sensor for spectrum analysis using the optical feedback in a single-mode laser diode. *IEEE Instr. and Meas. Tech. Conference*, 1997, May 19~21:870~873
- 6 Takamasa Suzuki, Osami Sasaki, Takeo Maruyama. Phase-locked laser diode interferometer for surface profile measurement. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(20):4407~4410
- 7 M. A. Hauptmann, K. T. V. Grattan, A. W. Palmer *et al.*. Silicon resonator sensor systems using self-mixing interferometry. *Sensors and Actuators (A)*, 1996, **55**:71~77
- 8 禹延光. 激光自混合干涉理论及其位移测量方法的研究. 哈尔滨工业大学工学博士学位论文, 2000. 62~65
- 9 Silvan Donati, Guido Giuliani. Laser diode feedback interferometer for measurement of displacements without ambiguity. *IEEE. J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(1):113~119