

文章编号: 1001-3806(2010)02-0206-04

含补偿腔的自混合干涉效应研究

刘敏¹, 张勇², 孙皆宜¹

(1. 唐山学院 基础教学部, 唐山 063000; 2. 河北工业大学 理学院, 天津 300130)

摘要: 为了增加自混合干涉测量的测量距离、改善干涉信号质量, 采用在传统的自混合结构的基础上, 在外腔中加入补偿镜的方法, 在实验和理论上进行了观察和分析。由实验可知, 有补偿腔后, 测量距离从原来3镜腔的20cm增加到60cm; 含有补偿腔结构的干涉信号强而稳定, 明显好于3镜腔结构, 而且干涉信号随补偿镜位置和反射率的不同, 效果不同。根据腔镜结构, 从波的传播理论出发, 给出含补偿腔的理论模型, 用MATLAB编程对模型进行的数值模拟结果与实验结果吻合得很好。结果表明, 通过在自混合干涉系统中加入补偿镜, 克服了来自混合干涉系统的诸多缺点, 为自混合干涉测量的实用化提供了有益的参考。

关键词: 测量与计量; 补偿腔模型; 自混合干涉; 3镜结构; 4镜模型

中图分类号: TN241 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.02.017

Study on self-mixing interference effect with compensative cavity

LIU Min¹, ZHANG Yong², SUN Jie-yi¹

(1. Department of Foundational Teaching, Tangshan College, Tangshan 063000, China; 2. School of Science, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: In order to increase the measuring distance and improve the interference signal, based on conventional three-mirror structure, a new structure with a compensative mirror in the external cavity was put forward. The new structure was studied experimentally and theoretically. The experimental results showed that the measuring distance increased from 20cm to 60cm, signals with a compensative mirror were strengthened and more stable than those without compensative mirrors. The experimental results also showed that different results produced for different location and reflectivity of the compensative mirror. Based on propagating theory, the model of the structure was deduced, and simulated by means of MATLAB software. The simulation results agreed well with those of experimental results. The results showed that the compensative structure conquered many weaknesses of the conventional self-mixing system. It has provided a useful reference for self-mixing interference measurement in practical way.

Key words: measurement and metrology; compensatory cavity model; self-mixing interference; three-mirror structure; four-mirror model

引言

激光自混合干涉技术在很多应用场合能取代传统的、复杂的干涉系统, 逐渐形成一个崭新的有深远应用前景的研究领域。

激光自混合干涉的基本现象于1968被首次报道, 20世纪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; 20世纪90年代, 英国、意大利、法国的学者也开始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形貌测量^[1-2]、探伤研究^[3-4]、振动测量^[5]、模具谱分析^[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^[7-8], 向微型传感器发展。还可以对线宽展宽因数和光反馈因数等激光器参量进行精确估计^[9-11]。

前面提到的研究大多是利用基本的自混合干涉结构, 研究工作都是单外腔结构, 围绕如何选择激光注入电流的调制方式, 如何确定注入激励的大小, 如何改善干涉信号处理电路, 能进行何种量的测量等问题。作者无意中发现: 在自混合干涉测量结构中加入补偿镜, 实验结果与一般自混合干涉型位移测量结构相比, 能够获得粗糙测量面的稳定的锯齿型自混合干涉信号; 补偿腔结构的最佳调整可使激光测量系统降低反馈光噪声、压窄谱线, 因此系统具有高的信噪比、大量程的优良性能。作者建立了含补偿腔结构的自混合干涉系统实验系统, 实验观察了干涉信号, 在此基础上, 建立了系统的理论模型, 分析了该系统的位移干涉信号波

作者简介: 刘敏(1971-), 女, 硕士, 副教授, 现主要从事激光技术方面的研究。

E-mail: lm710928@163.com

收稿日期: 2009-01-15; 收到修改稿日期: 2009-03-19

形,并和实验结果进行了比较。

1 含补偿腔结构的自混合干涉效应实验

观察了有无补偿镜两种情况下的位移干涉信号。实验结果表明:含有补偿腔结构的干涉信号要比没有补偿腔结构的干涉信号的振幅大,而且轮廓清晰,如图1所示。

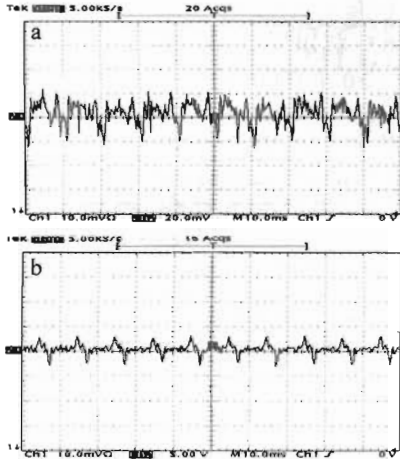


Fig. 1 Displacement interference signals

a—without compensatory mirror ($x: 10\text{ms}/\text{div}$, $y: 20\text{mV}/\text{div}$) b—with compensatory mirror ($x: 10\text{ms}/\text{div}$, $y: 5\text{V}/\text{div}$)

由输出波形发现,在未加补偿腔时输出的位移干涉信号很不稳定,振幅波动很大(如图1a所示)。而在增加了补偿腔之后,位移信号有了明显的改善,输出信号的波形有了明显的规律性,振幅的波动很平缓,达到了非常好的效果(如图1b所示)。

图2a中给出了外腔长20cm、不同补偿腔长度的波形曲线。从上到下补偿腔腔长依次为15cm,12cm,

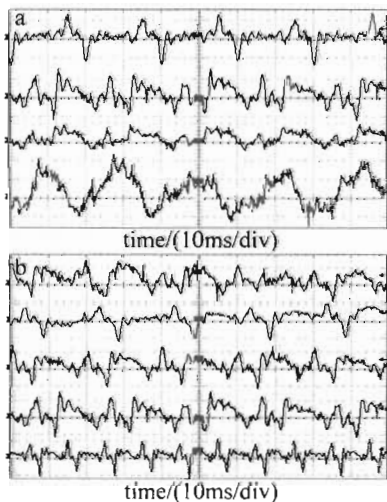


Fig. 2 a— $L_{\text{ext}} = 20\text{cm}$, the interference signals of different compensatory cavity length b— $L_{\text{com}} = 10\text{cm}$, the interference signals of different external cavity length

9cm和6cm。纵坐标单位依次为10mV/div, 20mV/div, 20mV/div和20mV/div。图2b中则给出了同一补偿腔长10cm、不同外腔长的实验结果。从上到下,

外腔长依次为20cm,30cm,40cm,50cm和60cm。纵坐标单位依次为40mV/div, 30mV/div, 20mV/div, 10mV/div和10mV/div。由图可见,外腔长越长,信号幅值越小,但当外腔长到60cm时信号依然很清晰。

实验中还发现:无补偿镜时,当激光器工作在阈值电流附近时,由于激光强度低,激光线宽增大。因此,外腔长大于30cm时,相干长度不足以产生自混合干涉,即观察不到干涉信号;有补偿腔后,外腔长可以长达100cm。可见,补偿镜的存在大大提高了干涉仪的量程;补偿腔腔长 L_{com} 和外腔长 L_{ext} 满足 $0.2 < L_{\text{com}}/L_{\text{ext}} < 0.8$ 时,干涉信号明显,在这个范围之外,干涉信号很弱,几乎看不到,如图3所示;此外,激光波长为532nm时,补偿镜的幅值反射率应在目标镜反射率的0.3~0.6之间,在此范围之外,高于0.6时,由于补偿镜距离内腔较近,是强反馈,这时,目标镜对内腔的影响不明显;低于0.3时,补偿镜失去作用,这是值得关注的问题,需要进一步的理论研究支持。

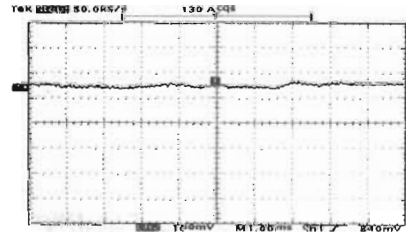


Fig. 3 Interference signals under $0.2 < L_{\text{com}}/L_{\text{ext}} < 0.8$

含补偿腔的自混合干涉效应的结构与一般的自混合干涉结构的不同在于,在激光器与被测目标之间插入一个反射率较高的光学镜,调整反射镜的位置与反射率,有一定的反馈光馈入激光腔,对激光器的性能做初步改善,相当于形成一个外腔激光器,其光谱特性受外反射镜的位置和反射率的影响,使被测物反馈回的光水平很低,不改变系统的光谱特性,利于获得稳定的测量,且易于调试。

2 系统模型的建立

系统用4镜腔模型等效,如图4所示,图中 r_1, r_2, r_3, r_4 分别表示激光器前后腔面、补偿镜、被测物表面幅值反射率。为简单起见,运算中令 $r_1 = r_2$ 。

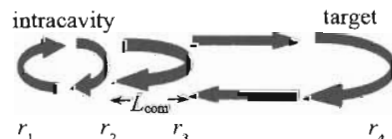


Fig. 4 Model of self-mixing interference system with compensatory cavity effects with a compensatory cavity

假设一束光记做 $E = A \exp[i(\omega t + \phi_0)]$,其中, ω 为角频率, ϕ_0 为初始相位。该光束在系统传播过程分别经激光器有腔面、补偿镜和被测物体反射后,最终汇

集在激光器左腔面,为分析方便,将光束分解为3束光进行描述。系统稳定时,3束光在左腔面的叠加应与初始光束相同,才能形成稳定的激光。3束光各自经历一次往返传播后。

第1束光波透过激光器右腔面反射,只在激光器左腔面反射后向右的光波为:

$$E_1 = r_1 r_2 A \exp[i(\omega t + 2kL_c n_c + \phi_0)] \quad (1)$$

式中, L_c 为腔长, n_c 为腔内折射率。

第2束光波透过激光器右腔面、被反馈镜反射回激光腔,至激光器左腔面反射后向右的光波为:

$$E_2 = r_1 t_2 r_3 \eta_2 A \exp[i(\omega t + 2kL_c n_c + 2kL_{com} + \phi_0)] \quad (2)$$

第3束光透过激光器右腔面、反馈镜后,被被测物体反馈回激光腔,至激光器左腔面反射后向右的光波为:

$$E_3 = r_1 t_2 t_3 r_4 \eta_2 \eta_3 A \exp[i(\omega t + 2kL_c n_c + 2kL_{ext} + \phi_0)] \quad (3)$$

式中, t_1, t_2 分别为激光器右腔面和反射镜的透射率;

$\eta_2 = \frac{r_3}{4r_2}(1 - |r_2|^2)$ 和 $\eta_3 = \frac{r_4}{4r_3}(1 - |r_3|^2)$ 分别为外腔到激光器内腔和外腔到激光器外腔的反馈光耦合系数, k 是波矢的大小。

3束光叠加后与初始光束相同,才能满足激光激发条件,即:

$$E = E_1 + E_2 + E_3 \quad (4)$$

当外部反馈光存在时,腔内载流子的密度 N 将发生改变,同时激光介质的复折射率 $n = n_r - in_i$ 也将改变,引起波矢的变化($k \rightarrow k_0 + \Delta k$)。在反馈光为0处线性化 n_r, n_i , 并令 N_0 为对应的载流子密度。 $n_{r,0}, n_{i,0}$ 分别为对应复数折射率的实部和虚部,记为 $n_{r,0} = n_r(N_0), n_{i,0} = n_i(N_0)$ 。反馈光存在时, $n_r(N), n_i(N)$ 作1级近似展开后,整理得到含补偿腔的自混合干涉系统的模型:

$$\begin{cases} \omega\tau - \omega_0\tau = \frac{\tau}{\tau_c} [\alpha \ln|z| - \arg(z)] \\ \Delta G = -\ln|z| \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{式中, } z = 1 + \eta_2 t_2 r_3 \exp(i\omega\tau_{com})/r_1 + \eta_2 \eta_3 t_2 t_3 r_4 \exp(i\omega\tau_{ext})/r_1 \quad (6)$$

3 数值模拟

根据上面的理论模型用 MATLAB 语言编程进行了模拟仿真。分别模拟了有、无补偿镜情况下的距离、位移、速度曲线(图中依次从上到下),分别如图5和图6所示。

计算中, $r_1 = r_2 = 0.65, r_4 = 0.9, r_3 = (0.3 \sim 0.6) \times r_4, L_{ext} = 20\text{cm} \sim 60\text{cm}, 0.2 < L_{com}/L_{ext} < 0.8$, 激光波长为 532nm。图5最下面的曲线是 L_{com}/L_{ext} 过大或者过小时的情况,由图可见,此种情况下干涉信号几乎消失,对应于图3中的实验结果。图6最下面的曲线是

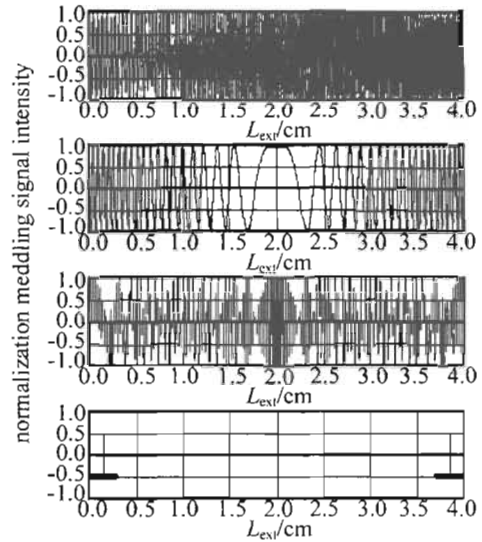


Fig. 5 Analog interference signals with compensatory cavity

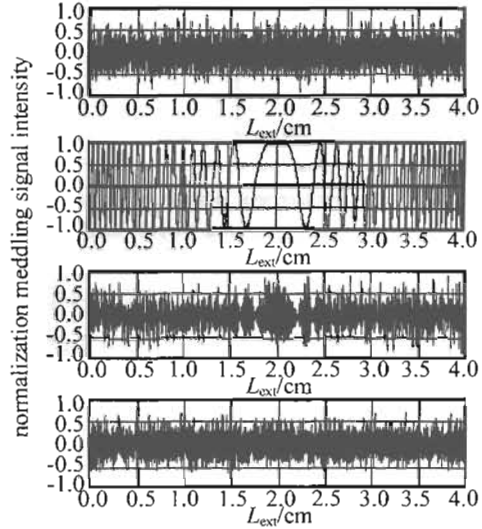


Fig. 6 Analog interference signals without compensatory cavity

相应图5中去掉补偿镜的结果,看到类似于图1a中很不稳定且振幅波动很大的干涉信号,说明理论模拟结果与实验结果吻合。

4 结论

在传统的3镜腔自混合结构的基础上,提出了在外腔中加入补偿镜的设想,在实验和理论上进行了观察和分析,给出了理论模型,并对理论模型进行了数值模拟。有些实验现象还有待于进一步的理论解释,需要进一步的研究。由实验结果可知:(1)含有补偿腔结构的干涉信号要比没有补偿腔结构的干涉信号的振幅大,而且轮廓清晰;(2)在未加补偿腔时输出的位移干涉信号很不稳定,振幅波动很大,而在增加了补偿腔之后位移信号有了明显的改善,输出信号的波形有了明显的规律性,振幅的波动很平缓,系统对反射物反射率要求低、抗干扰能力强、量程加大;(3)只有在 $0.2 < L_{com}/L_{ext} < 0.8$ 的情况下,

干涉信号才是明显的;(4)激光波长为532nm时,补偿镜的幅值反射率应在目标镜反射率的0.3倍~0.6倍之间。

总之,通过在自混合干涉系统中加入补偿镜,克服了原来自混合干涉系统的诸多缺点,对的自混合干涉实验是一个极大的帮助,也为自混合干涉测量的实用化提供了有益的参考。

参 考 文 献

- [1] ZHANG Y, YAO J Q, WANG P, *et al.* Study on self-mixing interference effects in the LD pumped multi-mode solid-state laser[J]. Transactions of Tianjin University, 2003, 9(4):261-263 (in Chinese).
- [2] ZHANG Y, YAO J Q, WANG P, *et al.* Study on self-mixing interference effects in LD pumped single-mode green laser [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2003, 14(7):679-682 (in Chinese).
- [3] PAONE N, SCALISE L. Advances in self-mixing vibrometry [J]. Proc SPIE, 2001, 4204:103-114.
- [4] YU Y G, YE H Y, YAO J Q. Self-mixing interference effects in a multi-mode LD: experimental observation and theoretical analysis [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2002, 13(11):1190-1193 (in Chinese).
- [5] SHIMIZU E T. Directional discrimination in the self-mixing type laser doppler velocimeter[J]. Appl Opt, 1987, 26(2): 4541-4544.
- [6] ZHANG Y, YU Y G, YAO J Q, *et al.* Analysis of self-mixing interference signals in LD pumped solid-state lasers using fast Fourier transform technique[J]. Proc SPIE, 2002, 4919:488-492.
- [7] ZHANG Y, YAO J Q, XU K X, *et al.* New study on self-mixing interference effects in LD pumped laser[J]. Proc SPIE, 2005, 5628: 263-270.
- [8] WANG W M, BOYLE W J, GRATAN K T V, *et al.* Self-mixing interference in a diode laser: experimental observations and theoretical analysis[J]. Appl Opt, 1993, 32(9): 1551-1558.
- [9] LI Sh Y, YU Y G, YE H Y, *et al.* The estimation of the parameters in the model of the selfmixing effect in semiconductor lasers[J]. Laser Technology, 2005, 29(5): 519-521 (in Chinese).
- [10] YU Y G, GUO Ch Y, YE H Y, *et al.* Pre-processing for the optical feedback self-mixing interferometric signal, feedback [J]. Laser Technology, 2008, 32(3): 265-268 (in Chinese).
- [11] YAN Y X, YU Y G. An improved algorithm for estimating parameters of semiconductor lasers [J]. Laser Technology, 2008, 32(4): 353-356 (in Chinese).

(上接第163页)

参 考 文 献

- [1] JANG J H, KIM W T, VAN TYNE C J, *et al.* Experimental analysis on the frictional behaviour of drawbeads in sheet metal forming [J]. Steel Research International, 2007, 78(12):884-889.
- [2] PETEK A L, PODGORNİK B, KUZMAN K, *et al.* The analysis of complex tribological system of single point incremental sheet metal forming—SPIF [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2008, 54(4): 266-273.
- [3] WANG Zh J, LIU J G. Frictional contact problems in sectional finite element analysis of sheet metal flexible-die forming process [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(5): 155-159 (in Chinese).
- [4] BARBER G C, GAO H, TUNG S C. Experimental study on the friction characteristics of lasertex steel sheets during metal forming process [J]. Tribology Transactions, 2005, 48(2):245-249.
- [5] DONG G N, ZHANG J F, YANG H B, *et al.* The performance of friction on super-elastic TiNi alloy surface by laser texturing [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(3): 444-447 (in Chinese).
- [6] HE Y F, DU D, LIU Y, *et al.* Parametric analysis of pulsed Nd:YAG laser texturing process [J]. Laser Technology, 2003, 27(1):8-13 (in Chinese).
- [7] LI B H. Influence and mechanism of surface topography on friction characteristics of wet clutches [D]. Beijing: Mechanical Institute of Science and Technology, 2006:72-93 (in Chinese).
- [8] ZHANG Zh H, HE Zh, ZHAO Zh D, *et al.* Study on mechanical model of friction in metal forming [J]. Lubrication Engineering, 2004(1):4-7 (in Chinese).