

调频微片 Nd :YAG 激光器光回馈特性的研究*

谈宜东† 张书练

(清华大学精密测试技术与仪器国家重点实验室,北京 100084)

(2006 年 11 月 4 日收到,2007 年 4 月 11 日收到修改稿)

研究了调频微片 Nd :YAG 激光器的光回馈特性.在没有光回馈的情况下,激光频率每改变一个纵模间隔,激光器输出功率变化一个条纹.有光回馈时,同时改变激光频率和外腔相位,激光器输出功率波动频率正比于内、外腔长度之比.基于三镜腔等效模型的理论分析和实验结果相符合.并且讨论了这一现象在精密测量领域的潜在应用.

关键词:光回馈,回馈条纹

PACC:4210J,4255R

1. 引言

自混合干涉或光回馈是指在激光应用系统中,激光器输出光被外部物体反射或散射后,部分光反馈回激光器内与腔内光混合后引起激光器的输出功率变化的现象,其输出信号与传统的双光束干涉信号类似.

光回馈严重影响了激光器的性能^[1-4],产生了一系列丰富的现象,引起了广泛的关注. Gouaux 等^[5]报道了光回馈半导体激光器中,采用注入电流调制激光频率,腔内光与外腔光产生拍频信号,该信号与外腔长度成正比,实现距离测量. Kato 等^[6]采用注入电流调制光回馈半导体激光器的频率,实现了模跳位移测量,分辨率达 30 nm. Fei 等^[7]研究了双折射外腔 He-Ne 激光器中的偏振模跳变现象,指出每个纵模带宽内的偏振跳变次数正比于外腔长与内腔长之比. He-Ne 激光器体积庞大,半导体激光器光束发散角较大以及温漂效应明显,与它们相比,微片 Nd :YAG 激光器体积小,发散角较小,光回馈灵敏度高,非常适合做回馈激光器系统的光源.目前,基于光回馈效应的半导体抽运微片 Nd :YAG 激光器已经广泛应用于形貌测量^[8,9],多普勒测速^[10-12],以及振动测量^[13]等领域,因此,研究调频微片 Nd :YAG 激光器中的光回馈特性有着重要的意义.

本文对调频 Nd :YAG 激光器的光回馈特性进行了研究.在没有外腔回馈时,调制激光频率,激光器输出光强周期性改变.激光频率每改变一个纵模间隔(或者激光器内腔长改变 $\lambda/2$),激光器输出光强变化一个条纹.在有外腔回馈时,同时改变激光器频率和外腔相位,激光频率每改变一个纵模间隔,激光器输出光强波动频率正比于内、外腔长度之比.基于三镜腔等效模型,分析了光回馈对调频 Nd :YAG 激光器输出光强的影响.理论分析和实验结果相符合.最后,讨论了这一现象在测量领域的潜在应用.

2. 实验装置

实验装置如图 1 所示.

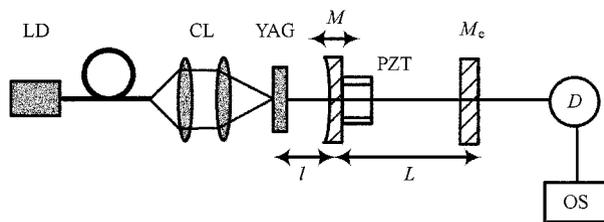


图 1 实验装置示意图

实验所用激光晶体是 Nd^{3+} 掺杂的 YAG 薄片,掺杂浓度为 1.1%,晶体厚度 $d = 2 \text{ mm}$,直径为 5 mm. 该晶体的抽运输入面镀双色膜,对于 $\lambda =$

* 国家自然科学基金(批准号:50575110)资助的课题.

† E-mail: Tanyd03@mails. tsinghua. edu. cn.

1.064 μm 是全反, 反射系数 $r_1 = 100\%$; 对于 $\lambda = 808 \text{ nm}$ 是增透, 透射系数 $t_1 > 95\%$. 晶体的另一面镀 $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$ 的增透膜, 透射系数 $t_2 = 99.9\%$. 该激光器为半外腔结构, 由激光晶体的输入面和腔镜 M 构成腔长 l 约为 11.8 mm 的谐振腔. M 是输出耦合镜, 反射系数 $r_2 = 98.8\%$, 曲率半径 500 mm. 抽运源 LD 是一光纤耦合半导体激光器, 其输出光经过准直聚焦透镜组 CL 汇聚于晶体输入面. 实验过程中, 保持抽运光功率大约为 140 mW, 在没有光回馈的情况下, 激光器输出单纵模, 基横模. M_e 是回馈镜, 反射系数 $r_3 = 30\%$. M 和 M_e 构成回馈外腔, 长度 L . 压电陶瓷 PZT 用来改变内腔长. 激光强度由光电探测器 D 接收, 通过示波器 OS 观察.

3. 实验结果

首先, 去掉图 1 中的回馈镜 M_e , 通过 PZT 连续改变激光频率, 激光器光强变化如图 2 所示.

由图 2 可知, 激光光强随着纵模在增益曲线上移动而改变. 当激光频率位于增益曲线中心时, 输出

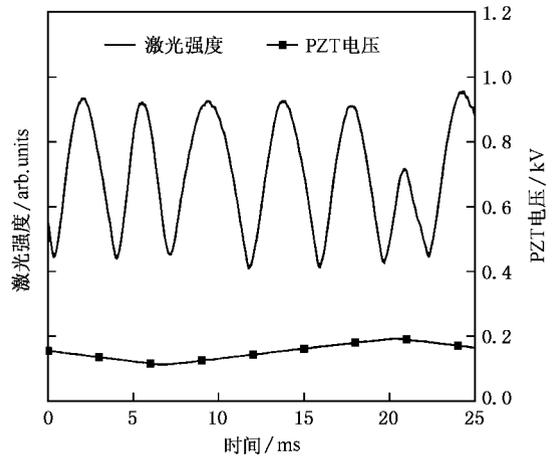


图 2 调频 Nd :YAG 激光器光强变化曲线

光强最大. 内腔长每改变 $\lambda/2$, 激光频率改变一个纵模间隔, 输出光强变化一个条纹.

根据激光原理, 有

$$\Delta\nu = \nu \times \Delta l / l, \tag{1}$$

其中 ν 是激光频率, $\Delta\nu$ 是频率变化量, Δl 是内腔长的变化量.

由 (1) 式, 内腔长改变 $\lambda/2$, 频率改变一个纵模

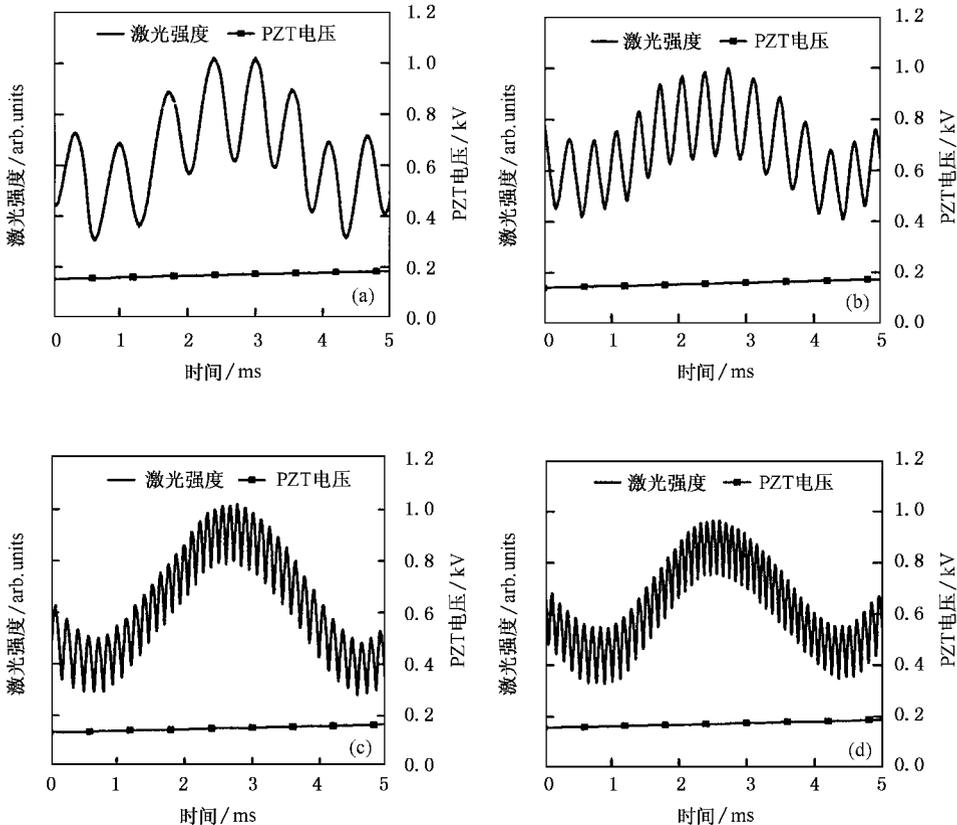


图 3 不同外腔长度下调频 Nd :YAG 激光器光回馈曲线 (a) $L = 58 \text{ mm}$ (b) $L = 117 \text{ mm}$ (c) $L = 353 \text{ mm}$ (d) $L = 412 \text{ mm}$

间隔, 激光光强变化一个条纹. 理论分析和实验现象相符合.

其次, 在有光回馈的情况下, 研究调频 Nd:YAG 激光器的光回馈特性. 在实验中, 同时改变激光器频率和外腔相位, 并且考虑了不同外腔长度 L 对光回馈的影响, 实验结果如图 3. 为了观察方便, 仅给出了一个周期内(即腔长改变半个光波长)的回馈信号.

由图 3 可知, 调频 Nd:YAG 激光器的光回馈曲线是图 2 中无光回馈的曲线(包络曲线)和回馈条纹的叠加. 每一个周期的包络曲线代表内腔长改变 $\lambda/2$. 一个包络周期内的高频回馈条纹波动频率分别是 6, 11, 31, 36, 对应外腔长度 $L = 5l, L = 10l, L = 30l, L = 35l$. 即, 高频回馈条纹波动频率为内、外腔长度之比加 1.

为了更好地说明问题, 在外腔长度 L 从 0.05 m 到 0.53 m 的范围内, 每间隔一个内腔长度测量回馈条纹波动频率, 结果如图 4 所示. 由图 4 可知, 调频 Nd:YAG 激光器光回馈条纹波动频率正比于内、外腔长度之比.

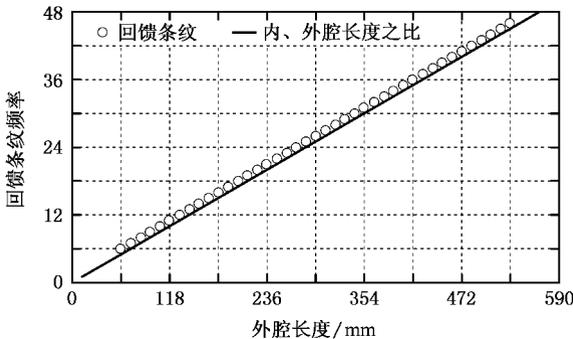


图 4 回馈条纹频率和外腔长度关系

4. 理论分析及讨论

Petermann 及 Wang 等人在研究光回馈对半导体激光器特性的影响时, 都采用了三镜腔等效模型做简化分析^[14,15]. 本文将借鉴这一模型, 对光回馈 Nd:YAG 激光器光强输出特性进行理论分析.

根据三镜腔等效模型, 腔镜 M 的等效反射系数

$$r_{2\text{eff}} = r_2 [1 + \kappa \exp(-j\omega\tau_{\text{ext}})], \quad (2)$$

式中, $\kappa = (1 - r_2^2)r_3/r_2$, 为等效光回馈系数; ω 为激光角频率; $i\tau_{\text{ext}} = 2L_{\text{ext}}/c$, c 为真空中的光速. 根据激光器自洽要求, 有

$$r_1 r_{2\text{eff}} \exp[j\omega\tau_0 + \chi(g - \alpha)d] = 1, \quad (3)$$

式中, g 为光回馈下的阈值增益, $\tau_0 = 2l/c$, α 为腔内吸收损耗, d 是 Nd:YAG 晶体的厚度. 没有光回馈时, 根据自洽要求, 有

$$r_1 r_2 \exp[j\omega_0\tau_0 + \chi(g_0 - \alpha)d] = 1, \quad (4)$$

式中, g_0 和 ω_0 分别是激光器没有光回馈时的阈值增益和角频率.

比较(3)(4)两式, 考虑弱回馈(即 $\kappa \ll 1$), 得到

$$\Delta g = g - g_0 = -\frac{\kappa}{d} \cos(\omega_0\tau_{\text{ext}}). \quad (5)$$

回馈对激光器频率也有影响. 在本实验条件下, 弱回馈引起的激光器频率漂移一般为几十 MHz, 相对于纵模间隔(约 15 GHz)可以忽略, 视为频率没有变化, 即 $\omega = \omega_0$. 又因为激光强度正比于 Δg ^[16,17], 光回馈激光器输出光强可表示为

$$I = I_0 [1 - k\Delta g] = I_0 + \xi \cos(\omega_0\tau_{\text{ext}}), \quad (6)$$

式中, I_0 为激光器没有光回馈时的光强, k 为一常数, $\xi = I_0 k\kappa/d$ 为光回馈因子.

从(6)式可知, 回馈激光器的光强输出由两个部分组成: 1) 直流分量 I_0 , 即没有光回馈时的光强输出; 2) 交流分量 $\xi \cos(\omega_0\tau_{\text{ext}})$, 即回馈外腔相位 ϕ ($\phi = \omega_0\tau_{\text{ext}}$) 变化导致的光强变化. 通常意义上的回馈条纹就是指这一分量.

实验中, 我们同时改变了激光频率和外腔长度, 这和以前的研究是完全不一样的. 首先, 假设没有光回馈(6)式只剩下 I_0 部分, 激光频率改变(改变内腔长), 其强度变化成周期调制, 波形类似于 Lorentz 线型函数(Nd:YAG 介质谱线展宽为均匀展宽), 调制周期为半个光波长^[7]. 其次, 引入光回馈后, 激光频率和外腔长度的变化同时影响外腔相位的变化, 导致回馈条纹的产生. 因此, 同时改变激光频率和外腔长度的光回馈产生的光强输出是以 Lorentz 线型函数波形为包络, 叠加了高频余弦波形的回馈条纹. 回馈条纹的频率由外腔相位变化 $\Delta\phi$ 决定.

驱动 PZT, 同时改变内、外腔长度, 则外腔相位变化如下:

$$d\phi = d(\omega_0\tau_{\text{ext}}) = d\omega_0\tau_{\text{ext}} + \omega_0 d\tau_{\text{ext}}, \quad (7)$$

式中, $d\omega_0$, $d\tau_{\text{ext}}$ 分别表示由于内、外腔长度变化导致的激光频率和外腔往返时间的变化量. 当 PZT 驱动内腔长改变半个光波长, 激光频率改变一个纵模间隔, 同时外腔长度也改变半个光波长:

$$d\omega_0 = 2\pi d\nu = 2\pi \times \frac{c}{2l},$$

$$d\tau_{\text{ext}} = 2dL/c = 2 \times \frac{\lambda}{2c}. \quad (8)$$

由(7)(8)两式得到

$$d\phi = 2\pi \frac{c}{2l} \times \frac{2L}{c} + 2\pi \frac{c}{\lambda} \times \frac{2\lambda}{2c} = 2\pi \left(\frac{L}{l} + 1 \right). \quad (9)$$

即,外腔相位变化呈现 $(L/l + 1)$ 的周期性,正比于内、外腔长度之比.因此,不同的初始外腔长度对应不同调制频率的回馈条纹.例如, $L/l = 5$,一个周期内的回馈条纹频率为 6, $L/l = 10$,一个周期内的回馈条纹频率为 11.回馈条纹波动频率和内外腔长度之比关系如下:

$$N = \frac{L}{l} + 1, \quad (10)$$

式中, N 为回馈条纹波动频率, l 是激光器内腔长度, L 是回馈外腔长度.

从(10)式可知,调频 Nd:YAG 激光器输出光强条纹波动频率正比于内、外腔长度之比.理论分析和图 3 A 所示的实验结果相符合.

在图 3 中,一个周期的包络曲线代表激光器内腔长度改变 $\lambda/2$.同时,回馈条纹变化了 36 个周期.因此,每个波动条纹对应 $\lambda/72$ 的内腔长度变化量,即对于 $1.064 \mu\text{m}$ 的 Nd:YAG 激光器,每个波动条纹为 14.8 nm.而在实验中,实现了最高 46 个周期的回馈条纹,即 11.6 nm.这一结果能够极大地提高光回馈测量系统的分辨率,而且,相比于相位细分^[6,18,19]等方法,光回馈调频 Nd:YAG 激光器系统结构非常简单,只需激光器和一个外部反射镜即可.

由(10)式可以得到

$$L = (N - 1) \times l, \quad (11)$$

式中, N 和 l 分别是回馈条纹频率和调频 Nd:YAG 激光器内腔长, L 是回馈外腔长度.激光器的内腔长 l 已知,只需测出回馈条纹频率 N ,根据(11)式,即可知道外腔长度 L .图 5 是不同外腔长度下的测量结果.因此,该方法也有可能应用于距离测量.

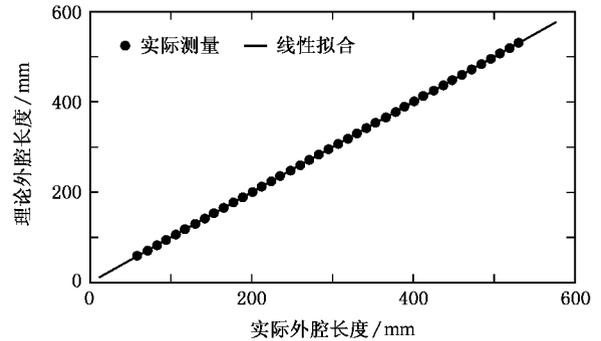


图 5 调频 Nd:YAG 激光器不同外腔长度下的测量结果

5. 结 论

本文研究了光回馈调频 Nd:YAG 激光器的光强输出特性.当同时改变激光频率和外腔长度时,输出光强条纹波动频率正比于内、外腔长度之比.实验中,观察到了高达 46 个周期的回馈条纹,每个条纹对应 $\lambda/92$ 的腔长变化量,即 11.6 nm.这一结果可以应用于高精密度测量,如位移、形貌、速度等.同时,这一现象有可能应用于距离测量.

[1] Henry C H 1982 *IEEE J. Quantum Electron.* **18** 259
 [2] Agrawal G P 1984 *IEEE J. Quantum Electron.* **20** 468
 [3] Miles R O, Dandridge A 1981 *Appl. Phys. Lett.* **38** 217
 [4] Goldberg L 1982 *IEEE J. Quantum Electron.* **18** 555
 [5] Gouaux F, Servagent N, Bosch T 1998 *Appl. Opt.* **37** 6684
 [6] Kato J, Yamato J 1991 *Meas. Sci. Technol.* **3** 146
 [7] Fei L G, Zhang S L, Wan X J 2004 *Chin. Phys. Lett.* **21** 1944
 [8] Lacot E, Day R, Stoeckel F 1999 *Opt. Lett.* **24** 744
 [9] Lacot E, Day R, Pinel J, Stoeckel F 2001 *Opt. Lett.* **26** 1483
 [10] Otsuka K 1994 *Appl. Opt.* **33** 1111
 [11] Kawai R, Asakawa Y, Otsuka K 1999 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **11** 706

[12] Otsuka K, Kawai R, Asakawa Y, Fukazawa T 1999 *Opt. Lett.* **24** 1862
 [13] Otsuka K, Abe K, Ko J Y, Lim T S 2002 *Opt. Lett.* **27** 1339
 [14] Wang W M, Boyle W J O, Grattan K T V, Palmer A 1993 *Appl. Opt.* **32** 1551
 [15] Petermann K 1991 *Laser diode modulation and noise* (Kluwer Academic, Dordrecht, 1991)
 [16] Tan Y D, Zhang S L, Wan X J, Chen X 2006 *Chin. Phys.* **15** 2934
 [17] Tan Y D, Zhang S L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2124 (in Chinese)
 [谈宜东、张书练 2007 物理学报 **56** 2124]
 [18] Suzuki T, Muto T, Maruyama T 1999 *Appl. Opt.* **38** 543
 [19] Takahashi N 1996 *Opt. Eng.* **35** 802

Research on optical feedback characteristics of frequency modulated microchip Nd :YAG lasers^{*}

Tan Yi-Dong[†] Zhang Shu-Lian

(*State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments ,
Tsinghua University ,Beijing 100084 ,China*)

(Received 4 November 2006 ; revised manuscript received 11 April 2007)

Abstract

Optical feedback characteristics of frequency modulated microchip Nd :YAG lasers are investigated. Without optical feedback ,the output intensity changes by one fringe with the laser frequency changing by one longitudinal mode spacing. With optical feedback ,the modulation frequency of output intensity is proportional to the ratio of external cavity length to internal cavity length. The theoretical analysis based on three-cavity-mirror equivalent model is in good agreement with experimental results. The potential applications of this phenomenon in precision measurement are also discussed.

Keywords : optical feedback , feedback fringe

PACC : 4210J , 4255R

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50575110).

[†] E-mail :Tanyd03@mails.tsinghua.edu.cn