

光回馈 Nd :YAG 激光器中的多模跳变现象^{*}

谈宜东[†] 张书练

(清华大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

(2006 年 7 月 28 日收到, 2006 年 12 月 4 日收到修改稿)

研究了 Nd :YAG 激光器中光回馈引起的多模跳变现象. 光回馈调制了激光器不同纵模的阈值增益, 阈值增益最低的纵模获得振荡. 在外腔调谐过程中, 当振荡模式的阈值增益高于相邻模式的阈值增益时产生模跳变. 光强调制曲线出现相应的波动. 各跳变纵模在增益曲线上的位置不同, 导致模跳变点位置不同, 相应的光强调制曲线也不同. 越靠近中心频率的纵模, 其光强信号峰值越大, 该纵模持续振荡时间也就越长. 当两跳变纵模关于中心频率对称时, 其光强信号峰值相等, 纵模持续振荡时间也相等.

关键词: 自混合干涉, 模跳变, 光回馈, 阈值增益

PACC: 4210J, 4255R

1. 引 言

自混合干涉 (self-mixing interference) 或光回馈 (optical feedback) 会极大地影响激光器性能, 并产生各种丰富的光回馈现象, 如谱线压窄^[1,2]、谱线展宽^[3-5]、相干猝灭^[6-8]以及模跳变^[9-12]等. 由于模跳变现象伴随有低频光噪声^[13]及激光功率的波动, 因而引起了广泛的研究.

Lang 和 Kobayashi^[9]报道了光回馈下半导体激光器的亮度-电流 ($L-I$) 曲线由于模跳变呈现迟滞效应. 由于不对称的非线性增益, 波长较长的模式比波长较短的模式更容易受到抑制, 所以在激光二极管 (LD) 电流增加和减小的过程中, 长波长纵模向短波长纵模跳变的位置和短波长纵模向长波长纵模跳变的位置不一致, 这就是模跳变迟滞效应. 费立刚等^[14]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. 文献^[15]对 Nd :YAG 激光器中光回馈引起的两模跳变现象进行了研究, 指出两模跳变的光回馈信号取决于外腔长和内腔长之比. 上述研究表明, 模跳变极大地影响了激光器的输出光强、光噪声和纵模模式等. 基于光回馈的半导体抽运微片激光器已经广泛应用于形貌测量^[16,17]、多

普勒测速^[18-20]以及振动测量^[21]等领域, 因此研究微片 Nd :YAG 激光器中回馈导致的模跳变至关重要.

本文对 Nd :YAG 激光器中光回馈导致的多模跳变现象进行了研究. 由于外部反射镜的存在, 部分光被反馈回激光器, 激光器不同纵模的阈值增益受到调制. 对应阈值增益最低的模式获得振荡. 在调谐外腔的过程中, 激光器纵模的阈值增益调制情况不同. 当振荡模式的阈值增益高于相邻模式的阈值增益时, 激光器发生模跳变. 光强调制曲线表现出相应的波动. 同时, 本文考虑了各跳变模式在增益曲线上的位置不同, 导致各自获得的增益不同, 从而各模跳变点位置也不一致, 光强调制曲线会发生相应的变化.

2. 实验装置

光回馈 Nd :YAG 激光器中的多模跳变现象研究的实验装置如图 1 所示.

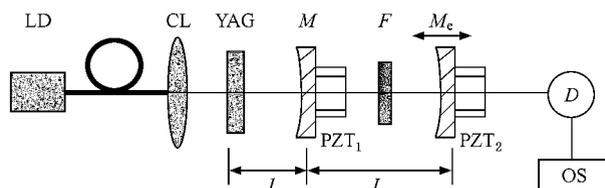


图 1 实验装置示意图

^{*} 国家自然科学基金(批准号 60438010)资助的课题.

[†] E-mail: tanyd03@mails.tsinghua.edu.cn

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 $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$ 的全反膜 , 反射系数 $r_1 = 100\%$; 对 $\lambda = 808 \text{ nm}$ 的增透膜 , 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 组成腔长 $l = 52.4 \text{ mm}$ 的谐振腔 . M 是输出耦合镜 , 反射系数 $r_2 = 98.8\%$, 曲率半径为 200 mm . 抽运源是一光纤耦合 LD , 其输出光经过准直聚焦透镜汇聚于晶体输入面 . 实验过程中 , 保持抽运功率大概为 200 mW , 此时 , 在没有光回馈的情况下 , 激光器输出单纵模 , 基横模 . CL 是准直聚焦透镜 . M_e 是回馈镜 , 其曲率半径为 1500 mm , 反射系数 $r_3 = 98\%$. 由 M 和 M_e 构成回馈外腔 , 腔长 $L = 302 \text{ mm}$. 压电陶瓷

PZT_1 和 PZT_2 分别用来改变内、外腔长 . 采用干涉滤光片 F 滤掉多余的抽运光 . 光强调制信号由光电接收器 D 接收 , 通过示波器 OS 观察 .

3. 实验结果

首先 , 我们比较了传统的光回馈信号和存在多模跳变的光回馈信号 . 为了获得传统的光回馈信号 , 在回馈外腔插入一衰减片 , 控制回馈水平 (P_{in}/P_{out}) 为 1% 左右 . 在这一回馈水平下 , 回馈光对激光器纵模阈值增益的调制不足以克服相邻纵模的增益差 , 此时激光器不发生模跳变 . 这一情况下的光强调制信号为传统的光回馈信号 . 而在观察多模跳变的光回馈信号时 , 撤去衰减片 . 实验结果如图 2 所示 .

图 2 (a) 是传统的光回馈信号 , 即外腔长每改变

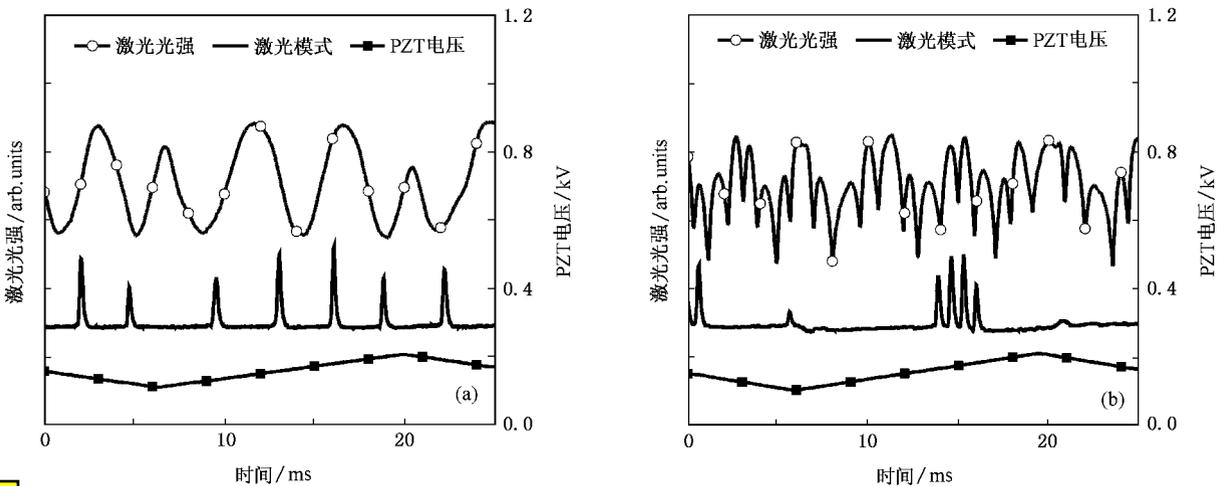


图 2 光回馈强度调制信号 (a) 传统光回馈信号 (b) 多模跳变光回馈信号

$\lambda/2$ 激光器输出光强变化一个周期 . 此时 , 激光器工作在稳定的单纵模状态 . 撤去衰减片后 , 回馈水平提高 , 回馈光对激光器纵模阈值增益的调制足以克服相邻纵模之间的增益差 , 此时就会产生模跳变 . 每发生一次模跳变 , 激光器输出光强相应地产生一次波动 . 图 2 (b) 给出了 4 纵模跳变的光回馈信号 , 在外腔长改变 $\lambda/2$ 的过程中 (或外腔相位改变 2π) , 光强发生了 4 次波动 , 激光器在相邻的 4 个纵模之间来回跳变 .

实验中 , 我们通过 PZT_1 改变内腔长来改变 4 个跳变模在增益曲线上的相对位置 , 从而研究各纵模初始位置不同对多模跳变光回馈信号的影响 . 图 3 给出了 4 个跳变模在增益曲线 G 上的位置分布 . 4

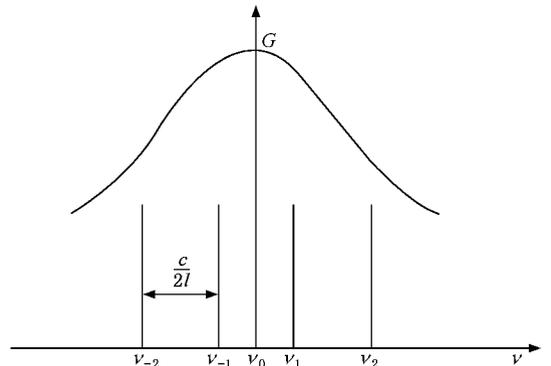


图 3 各个跳变模在增益曲线上的位置

个跳变模分别被命名为 $\nu_1, \nu_2, \nu_{-1}, \nu_{-2}$, 增益曲

线中心处对应频率为 ν_0 . 通过改变内腔长可以实现 4 种不同的纵模分布, 从而导致不同的模跳变过程以及相应的光强调制信号.

4 种不同的纵模分布对应的光回馈多模跳变实

验结果如图 4 所示. 图 4(a) 为 ν_1 与 ν_{-1} 关于中心频率 ν_0 对称, 图 4(b) 为 ν_1 或 ν_{-1} 位于中心频率 ν_0 处, 图 4(c) 为 ν_1 比 ν_{-1} 更靠近中心频率 ν_0 , 图 4(d) 为 ν_{-1} 比 ν_1 更靠近中心频率 ν_0 .

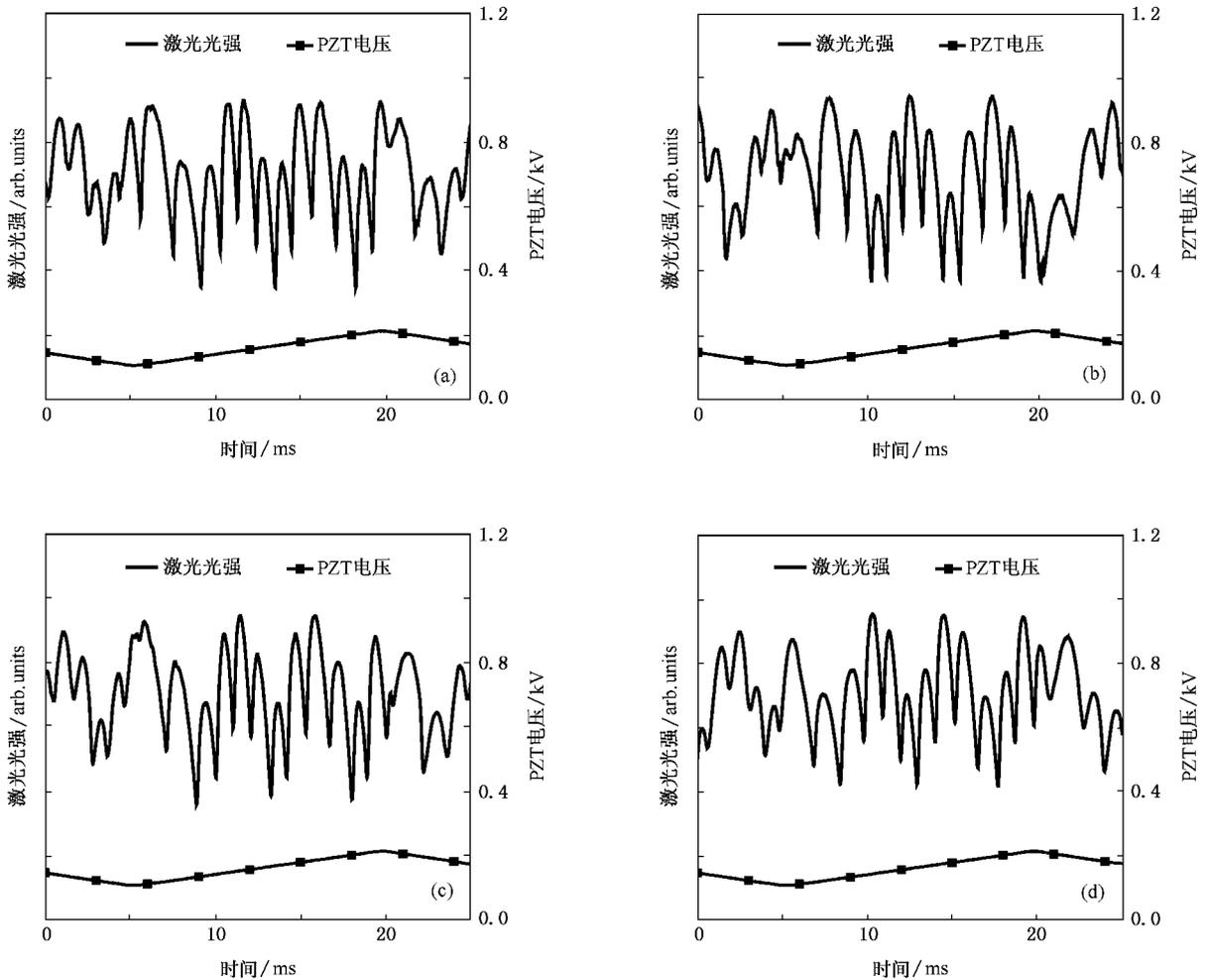


图 4 不同纵模分布的光回馈多模跳变实验结果 (a) ν_1 与 ν_{-1} 关于中心频率 ν_0 对称 (b) ν_1 或 ν_{-1} 位于中心频率 ν_0 处 (c) ν_1 比 ν_{-1} 更靠近中心频率 ν_0 (d) ν_{-1} 比 ν_1 更靠近中心频率 ν_0

图 4 中的多模跳变光回馈信号都有如下特点: 在外腔长改变 $\lambda/2$ 的一个周期内, 光强调制曲线上出现 4 个峰值, 这 4 个峰值分别代表了 4 个跳变模, 即发生了 4 次模跳变. 当 ν_1 与 ν_{-1} 关于中心频率 ν_0 对称时, 其对应的光回馈信号也表现出对称性, 光强信号峰值相等, 持续振荡时间也相等, 如图 4(a) 所示. 当 ν_1 (或 ν_{-1}) 位于中心频率 ν_0 处时, 该纵模获得的阈值增益调制幅度最大, 相应的光强信号峰值最大, 该纵模持续振荡时间最长. 由于 ν_2 与 ν_{-1} 关于 ν_1 对称, 所以其对应的光强信号峰值相等, 且关于 ν_1 对称, 持续振荡时间也相等, 如图 4(b) 所示.

由图 4(c) 和 (d) 可以看出, 越靠近中心频率 ν_0 的纵模, 其相应的光回馈信号峰值越大, 持续振荡时间也越长.

4. 理论分析

基于三镜腔等效模型, 当激光器达到平衡时, 就有

$$r_1 r_2 \exp[(2\pi\nu\tau) + gd] [1 + \kappa \exp(i2\pi\nu\tau_{\text{ext}})] = 1, \quad (1)$$

式中 r_1, r_2 为激光腔面的反射系数; $\tau = 2l/c$, 其中

c 是真空中光速, l 为内腔长; ν 为激光腔频率; κ 为光回馈因子, $\kappa = (1 - r_2^2)r_3/r_2$; τ_{ext} 为外腔往返时间, $\tau_{\text{ext}} = 2L/c$, 其中 L 是外腔长; g 为单位长度线性增益; r_3 为外部回馈镜的反射系数; d 为激光器增益介质的厚度。

根据(1)式, 光回馈对激光器的阈值增益调制可以表示为^[22, 23]

$$\begin{aligned} \Delta g &= g_c - g_0 \\ &= -\frac{\kappa}{d} \cos(2\pi\nu\tau_{\text{ext}}), \end{aligned} \quad (2)$$

式中 g_0 和 g_c 分别是没有光回馈和有光回馈下的激光器阈值增益。

在实验中, 回馈外腔长 $L = 302 \text{ mm}$, 为了方便, 在下面的理论分析中, 选取外腔长 $L = 42 \text{ mm}$ 为例, 并假设跳变的 4 个纵模如图 3 所示分布, 说明在外腔相位改变 2π 的一个周期中多模跳变的过程。

图 5 为光回馈导致的多模跳变过程以及阈值增益的变化。没有光回馈时, 所有纵模的阈值增益 g_0 相等, 如图 5 中的水平虚线所示。从图 5 可以看出, 当存在光回馈时, 不同纵模的阈值增益 g_c 不同, 随着纵模频率呈余弦调制。

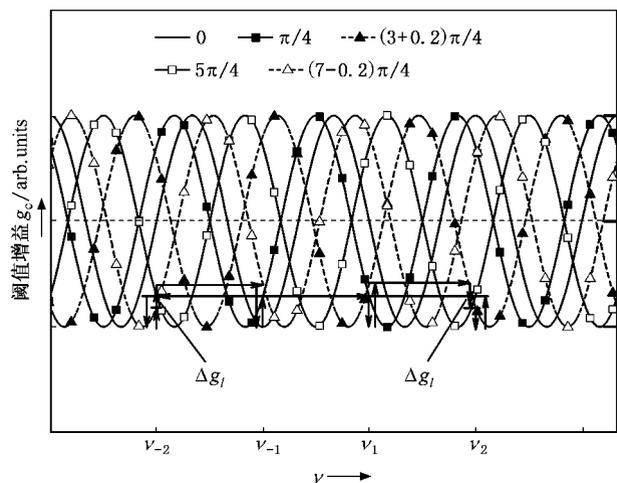


图 5 光回馈导致的多模跳变过程及阈值增益变化 横向箭头表示模跳变过程, 纵向箭头表示阈值增益的变化

在光回馈的情况下驱动 PZT_2 , 在若干微米范围内改变外腔长, 即周期性地改变外腔相位 ($2\pi\nu\tau_{\text{ext}}$), 各个纵模的阈值增益获得了不同的调制, 任意时刻只有阈值增益最低的纵模能够振荡, 这就产生了多模跳变, 如图 5 所示。多纵模跳变及阈值增益变化的具体过程如下: 假设最初外腔相位为 0, 对应图 5 中

的 0 相位曲线。比较此时 $\nu_1, \nu_2, \nu_{-1}, \nu_{-2}$ 这 4 个纵模由于光回馈导致阈值增益的变化。此时, ν_{-1} 模由于光回馈导致的阈值增益为 $g_c = g_0 - \kappa/d$, 说明阈值增益相对于没有光回馈时减小; ν_{-2} 和 ν_1 的阈值增益为 $g_c = g_0$, 即阈值增益没有变化; 而 ν_2 模的阈值增益为 $g_c = g_0 + \kappa/d$, 阈值增益反而有所增加。因此, 外腔相位为 0 时, ν_{-1} 是振荡模。驱动 PZT_2 , 改变外腔相位, 在图 5 中表现为阈值增益曲线整体向左平移。当外腔相位改变 $\pi/4$ 时, ν_{-1} 模和 ν_1 模的阈值增益相等, 都小于 g_0 , 并且随着外腔相位的进一步增加, ν_{-1} 的阈值增益将大于 ν_1 模的阈值增益, 而 ν_{-2} 模和 ν_2 模的阈值增益都大于 g_0 , 所以, 此时 ν_{-1} 模和 ν_1 模之间产生模跳变。在外腔相位从 $\pi/4$ 变为 $3\pi/4$ 的过程中, ν_1 模的阈值增益先降至最小 $g_c = g_0 + \kappa/d$, 然后增加至与 ν_2 模的阈值增益相等 (见图 5)。此时, ν_1 模与 ν_2 模之间应该发生模跳变。但是根据图 3, 由于 ν_1 模更靠近增益曲线中心, 所以 ν_1 模获得的增益比 ν_2 模大, 因此 ν_1 模能够承受比 ν_2 模更高的阈值增益而保持继续振荡。外腔相位继续增加, 当外腔相位为 $(3 + 0.2)\pi/4$ 时, 由回馈引起的 ν_1 模与 ν_2 模之间的阈值增益差 Δg_l 足以克服两者之间由于在增益曲线上位置不同导致的增益差 Δg_n , 因此 ν_1 模与 ν_2 模之间产生模跳变。在 ν_1 模向 ν_2 模跳变时, 为了克服两者之间的增益差 Δg_n , 存在一个额外的相位差 $0.2\pi/4$ 。在外腔从 $(3 + 0.2)\pi/4$ 变为 $5\pi/4$ 的过程中, ν_2 模保持振荡, 其阈值增益先降至最小, 然后增加至与 ν_{-2} 模的阈值增益相等 (图 5)。此时, ν_2 模与 ν_{-2} 模之间发生模跳变 (两者之间没有增益差, 如图 3 所示)。 PZT_2 继续改变外腔相位, ν_{-2} 模与 ν_{-1} 模之间的模跳变应该在 $7\pi/4$ 处发生, 但是, 由于 ν_{-2} 模与 ν_{-1} 模在增益曲线上位置不同, 导致两者之间有额外的增益差, 因此在外腔相位为 $(7 - 0.2)\pi/4$ 处, ν_{-2} 模与 ν_{-1} 模之间产生了模跳变。和 ν_1 模与 ν_2 模之间的模跳变类似, 额外的相位差 $0.2\pi/4$ 是为了克服在增益曲线上位置不同导致的增益差。外腔相位从 $(7 - 0.2)\pi/4$ 至 2π (或 0), ν_{-1} 模保持振荡, 直至外腔相位为 $\pi/4$ 时, ν_{-1} 模与 ν_1 模之间再次发生模跳变。继续改变外腔相位, 上述模跳变过程将周期性地重复。

从图 5 还可以发现, 越靠近中心的纵模其持续振荡时间越长 (可以用该纵模占用的外腔相位变化

量等效表示),如 ν_1 模的持续振荡时间($\pi/2 + 0.2\pi/4$)大于 ν_2 模的持续振荡时间($\pi/2$);关于中心对称的两纵模,其振荡时间相等,如 ν_1 模和 ν_{-1} 模的持续振荡时间相等,都为 $\pi/2 + 0.2\pi/4$. 对于阈值增益变化量 Δg 也有类似的结论.

除图 3 所示的纵模分布方式以外,其余 3 种纵模分布方式也可以做类似的分析.

对于光回馈系统,激光器光强调制规律可以表示如下^[22-24]:

$$I = I_0(1 - k\Delta g), \quad (3)$$

式中 I 为激光器在有光回馈条件下的光强, I_0 为激光器在无光回馈条件下的光强, k 为常数.

基于上述理论分析的多模跳变光回馈仿真计算结果如图 6 所示.

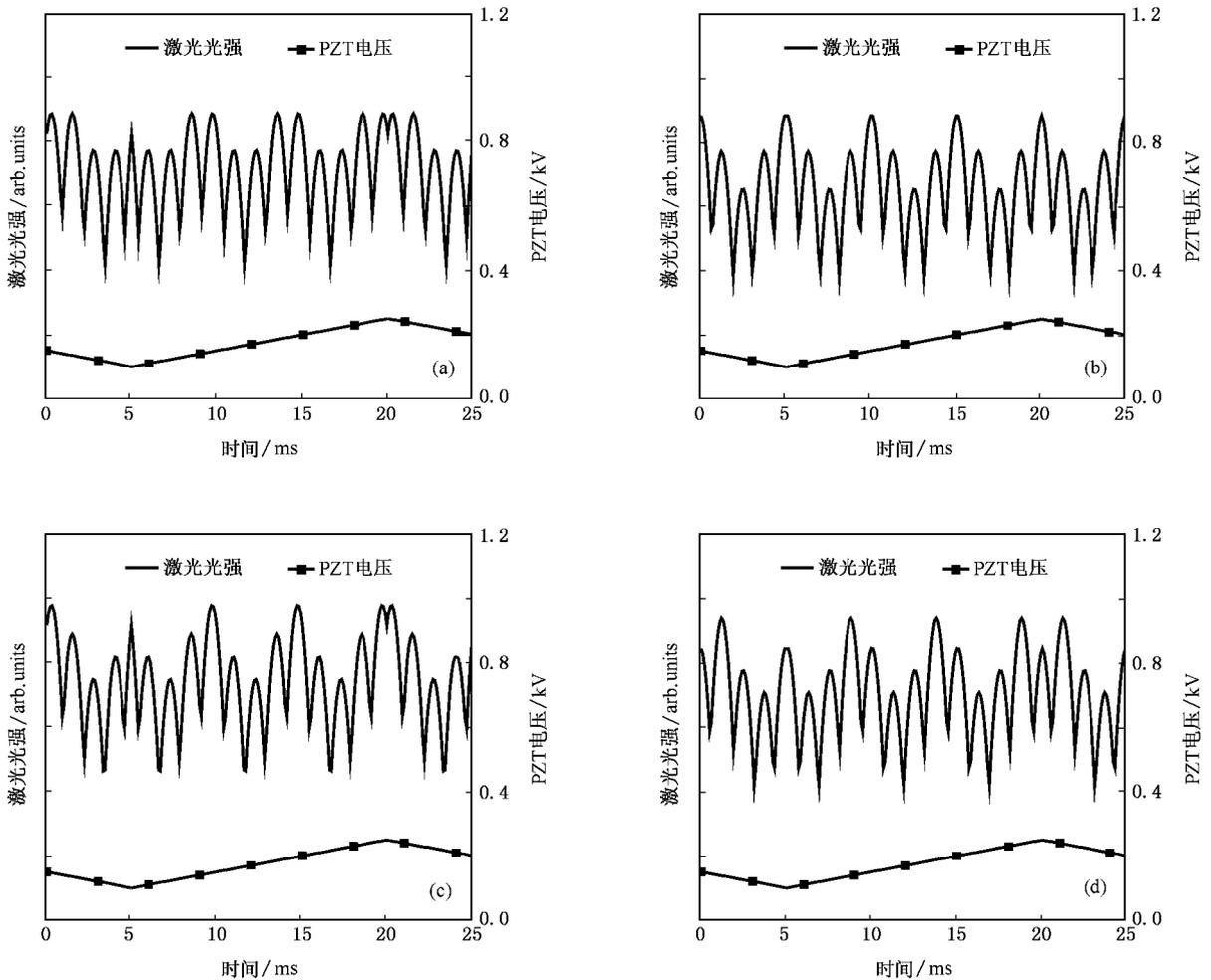


图 6 不同纵模分布的多模跳变光回馈仿真信号 (a) ν_1 与 ν_{-1} 关于中心频率 ν_0 对称 (b) ν_1 或 ν_{-1} 位于中心频率 ν_0 处 (c) ν_1 比 ν_{-1} 更靠近中心频率 ν_0 (d) ν_{-1} 比 ν_1 更靠近中心频率 ν_0

从图 5 和图 6(a) 可以看出,图 5 中 ν_{-1} 模的阈值增益变化过程分为两个阶段.第一阶段是从 ν_{-2} 模向 ν_{-1} 模跳变开始, ν_{-1} 的阈值增益先降至最小值 $g_c = g_0 - \kappa/d$. 根据(3)式,这一阶段该纵模对应光强输出增加.第二阶段是 ν_{-1} 的阈值增益从最小值 $g_c = g_0 - \kappa/d$ 开始增加,直至 ν_{-1} 模向 ν_1 模跳变为止.根据(3)式,这一阶段该纵模对应光强输出减小.这两个阶段的持续时间不等,这是由于 ν_{-2} 模向

ν_{-1} 模跳变是不等阈值增益跳变,要克服额外的增益差,而 ν_{-1} 模向 ν_1 模跳变是等阈值增益跳变.这反映在图 6(a) 中是 ν_{-1} 模对应的光强上升沿和下降沿所占时间不等. ν_{-1} 模对应的光强上升沿大于下降沿,而 ν_1 模恰恰相反,其对应的光强上升沿小于下降沿.理论分析和实验结果符合较好.

从以上分析可知:关于中心频率 ν_0 对称的纵模,在模跳变过程中其光强信号峰值相等,纵模持续

振荡时间也相等.越靠近中心频率 ν_0 的纵模,其光强信号峰值越大,纵模持续振荡时间也越长,如图 5 和图 6 所示.

5. 结 论

光回馈调制了各个纵模的阈值增益,对应阈值增益最低的纵模能够获得振荡.在外腔调谐过程中,

振荡纵模的阈值增益高于相邻纵模时发生模跳变,光强调制信号也发生相应的波动.各跳变纵模在增益曲线上的位置不同,其光强调制曲线也不同.越靠近中心频率的纵模,其光强信号峰值越大,纵模持续振荡时间也越长.当跳变纵模关于中心频率对称时,其光强信号峰值相等,纵模持续振荡时间也相等.

-
- [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] Chartier T, Mezine B, Sanchez F *et al* 1996 *Appl. Opt.* **35** 2016
 - [6] Tromborg B, Mork J 1990 *IEEE J. Quantum Electron.* **26** 642
 - [7] Li H, Ye J, McInerney J G 1993 *IEEE J. Quantum Electron.* **29** 2421
 - [8] Kikuchi N 1997 *IEEE J. Quantum Electron.* **33** 57
 - [9] Lang R, Kobayashi K 1980 *IEEE J. Quantum Electron.* **16** 347
 - [10] Biesterbos J W M, Boef A J D, Linders W *et al* 1983 *IEEE J. Quantum Electron.* **19** 986
 - [11] Sciamanna M, Panajotov K, Thienpont H *et al* 2003 *Opt. Lett.* **28** 1543
 - [12] Sciamanna M, Erneux T, Rogister F *et al* 2002 *Phys. Rev. A* **65** 041801
 - [13] Yasaka H, Yoshikuni Y, Kawaguchi H 1991 *IEEE J. Quantum Electron.* **27** 193
 - [14] Fei L G, Zhang S L, Wan X J 2004 *Chin. Phys. Lett.* **21** 1944
 - [15] Tan Y D, Zhang S L, Wan X J *et al* 2006 *Chin. Phys.* **15** 2934
 - [16] Lacot E, Day R, Stoeckel F 1999 *Opt. Lett.* **24** 744
 - [17] Lacot E, Day R, Pinel J *et al* 2001 *Opt. Lett.* **26** 1483
 - [18] Otsuka K 1994 *Appl. Opt.* **33** 1111
 - [19] Kawai R, Asakawa Y, Otsuka K 1999 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **11** 706
 - [20] Otsuka K, Kawai R, Asakawa Y *et al* 1999 *Opt. Lett.* **24** 1862
 - [21] Otsuka K, Abe K, Ko J Y *et al* 2002 *Opt. Lett.* **27** 1339
 - [22] Wang W M, Grattan K T V, Palme A W *et al* 1994 *J. Lightwave Technol.* **12** 1577
 - [23] Liu G, Zhang S L, Li Y *et al* 2004 *Chin. Phys.* **13** 855
 - [24] Mao W, Zhang S L, Liu G 2006 *Chin. Phys.* **15** 340

Multi-mode hopping in Nd :YAG lasers with optical feedback^{*}

Tan Yi-Dong[†] Zhang Shu-Lian

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

(Received 28 July 2006 ; revised manuscript received 4 December 2006)

Abstract

The multi-modes hopping in Nd :YAG lasers induced by optical feedback is presented. The threshold gains of different longitudinal modes are modulated by optical feedback. The mode which has the lowest threshold gain can oscillate. During the tuning of the external cavity length , when the threshold gain of the oscillating mode is higher than that of the adjacent mode , mode hopping occurs , and the intensity modulation curve fluctuates correspondingly. The different positions of hopping modes in the gain curve lead to different mode hopping points and intensity modulation curves. The closer to the center frequency , the larger intensity amplitude and the longer oscillating period the mode has. When the frequencies of two hopping modes are symmetric about the center frequency , the intensity amplitudes of them are equal , and their oscillating periods are equal too.

Keywords : self-mixing interference , mode hopping , optical feedback , threshold gain

PACC : 4210J , 4255R

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60438010).

[†] E-mail : tanyd03@mails.tsinghua.edu.cn