

Nd:YAG 激光器中的自锁模

樊立明 朱国英 陈时胜 彭 辉 徐至展

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

提 要

本文报道在 Nd:YAG 激光器中首次获得的自锁模脉冲序列。自锁模是由于 Nd:YAG 棒中的自相位调制引起的。在主被动对撞锁模运转情况下, 自锁模对脉冲波形有较大的影响。

关键词: Nd:YAG 激光器, 锁模, 自相位调制。

一、前 言

稳定的超短脉冲激光振荡器对一个高功率激光器系统及泵浦染料激光器是非常重要的。为此, 人们通过各种途径以获得超短激光脉冲: 主动锁模激光器^[1]、对撞锁模激光器^[2]、主被动锁模激光器^[3]、孤子激光器^[4]、激光脉冲压缩技术^[5,6] 以及附加外腔锁模激光器^[7~14] 等。锁模的关键在于对激光进行腔内或腔外的调制(相位或幅度), 使激光模式锁定从而产生稳定的超短脉冲序列。最近, Spence 等人^[10] 利用 TiO_2Al_3 中的非线性效应已成功地实现 TiO_2Al_3 激光器的自锁模运转。

本文报道在 Nd:YAG 激光器中观测到的自锁模现象, Nd:YAG 激光器的自锁模是由于 Nd:YAG 介质本身的自相位调制引起的。Nd:YAG 既是增益介质也是非线性介质, 两者同时在激光器中作用, 产生一个稳定的锁模序列。实验中发现谐振腔中的 F-P 腔对自锁模效果有一定的增强作用。在存在自锁模的情况下, 主被动锁模激光器的锁模脉冲将产生畸变, 利用有劈角的平面输出镜可有效地减弱自锁模的影响。自锁模作为一种方便的锁模技术, 在获得超短脉冲方面可能具有应用潜力。

二、实验与结果分析

实验装置见图 1, 非共振环形腔由输出镜 M_1 和非共振环结构组成, 其中 M_1 为 50% 的

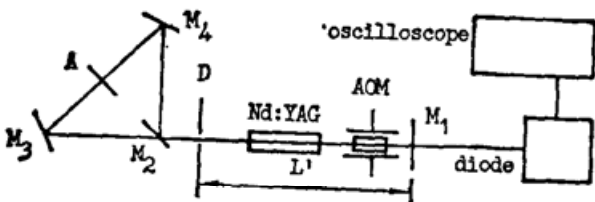


Fig. 1 Experimental setup

平面反射镜并置于微调平台上; M_3 、 M_4 为 100% 平面反射镜, M_2 为 45°S 分量的半反半透分束镜; Nd:YAG 棒产生的激光被 M_2 分成强度近似相等而传播方向相反的两束光, 在两束光传播路径完全重合的理想情况下, 在 M_2 处相干叠加后

几乎全部返回增益介质; 增益介质 Nd:YAG 为 $\phi 4 \times 105$ mm, 由两根 $\phi 10 \times 80$ mm 的氙灯

泵浦。器件工作重复频率 1 Hz。 D 为 $\phi 2$ mm 的小孔光阑, 用于模式选择; AOM 为 LiONi_3 声光调制器 ($20 \times 5 \times 5$ mm), 调制频率 50 MHz, 调制度 60%, 工作温度 $t = 60^\circ \pm 0.1^\circ\text{C}$, 频率匹配腔长为 1.411 m; A 为 BDN 染料片, 透过率 $T = 20\%$; 实验中用高速响应光电二极管与 7104 示波器 (Tektronix 7104) 结合起来研究激光的锁模特性。激光器稳定运转于 TEM_{00} 模。

1. Nd:YAG 激光器的自锁模特性

声光调制器无驱动电流, 移去 BDN 染料片, 即没有任何附加的腔内或腔外调制, 激光器处于自由运转状态, 发现该激光器仍存在非常强烈的锁模效应 (如图 2 所示), 称之为自锁模 (Self Mode-Locking), 因为此时的锁模脉冲是完全由激光器自身振荡过程产生的, 脉冲频率 $f_{\text{SML}} = 800$ MHz。图 2(a)、2(b) 是平行平面输出镜的结果; 图 2(c)、2(d) 为有劈角的平面输出镜的实验结果, 二者的区别在于平行平面镜输出镜情况下自锁模效应更强烈, 表明: 平行平面镜不是产生自锁模的原因。此外, 在有平面输出镜情况下, 输出反射镜等效于腔内加入标准具 (F-P), 对激光振荡起纵模选择作用, 因而参与振荡的纵模数减少, 和有更多纵

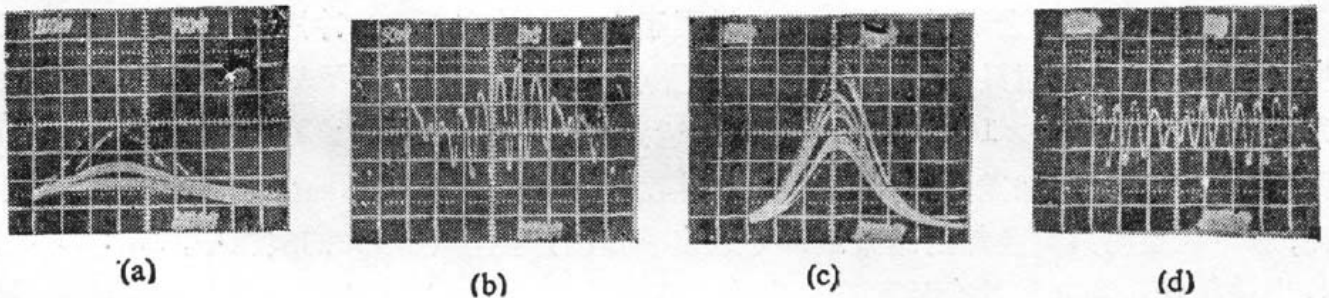


Fig. 2 Photograph of Self Mode-Locking pulsetrain of antiresonant ring cavity. A AOM crystal turning off RF power is in the cavity. Fig. 2(a) and (b) for a parallel output mirror M_1 ($T = 50\%$) with 200 ns/div, 2 ns/div respectively. Fig. 2(c) and (d) for a wedge output mirror M_1 ($T = 50\%$) with 200 ns/div, 2 ns/div respectively.

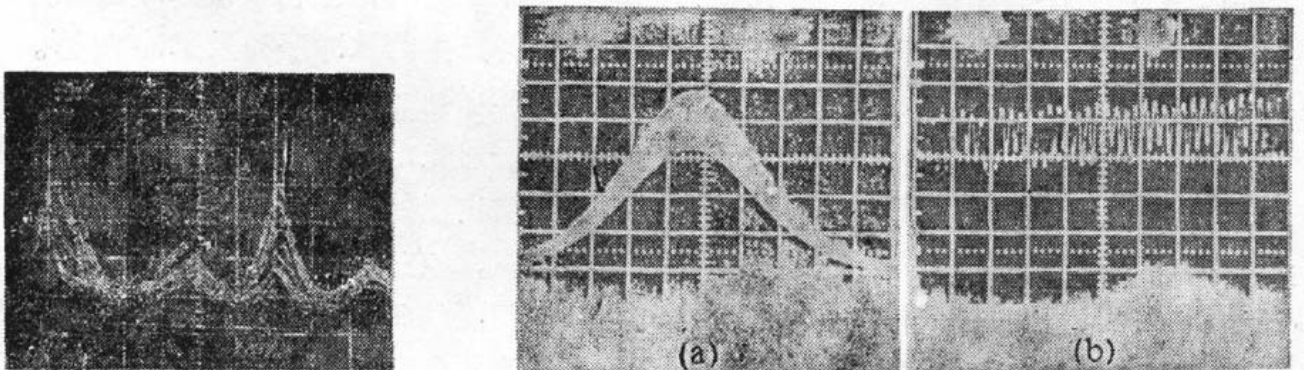


Fig. 3 Photograph of Self Mode-Locking pulses in an antiresonant ring cavity (no AOM crystal placing in the cavity). We find that Self Mode-Locking effect is reduced and fluctuation of pulse intensity is more evident.

Fig. 4 Photograph of Self Mode-Locking in a F-P cavity with a parallel output mirror M_1 ($T = 50\%$). There is a AOM crystal turning off RF power in the cavity. Fig. 4(a) for scanning 200 ns/div and (b) for 2 ns/div.

模参与振荡的情况相比,更容易实现锁定,产生更强的自锁模。从图 2 中看出,自锁模产生的脉冲序列不是完全模式锁定的,并且有一周期性的强度调制,调制频率为 100 MHz,这个调制频率与激光等效腔长 $2L/c$ 是一致的。

将声光调制器晶体从腔内移开,腔内只有 Nd:YAG 介质的情况下,仍然观察到较强的自锁模现象(见图 3),此时的脉冲变得非常不稳定而难以与测量设备同步。实验中用的调制器为 Raman-Nath 型声光衍射晶体,其两通光表面为平行平板结构。此结果再次表明,声光调制器的两通光面尽管镀有减反膜层,但它在激光腔内仍起 F-P 选模作用。当调制器移出腔外,激光振荡纵模增加,不易实现多纵模锁定。

图 4 是在直腔时(即 F-P 腔)得到的自锁模结果,和非共振环形腔完全类似,只是强度调制频率为 154 MHz。此时的腔长 $L'=86$ cm,计及 Nd:YAG 棒与调制器的折射率影响,有效腔长为 $L'_{\text{有}}=86+7.8+1=94.8$ cm,得到相应的激光脉冲在腔内往返振荡的脉冲频率为 $f=c/2L'_{\text{有}}=3\times 10^8/94.8=158$ MHz。实验结果表明:在自锁模情况下,脉冲序列将附加一个周期性的强度调制,其调制频率恰好就是该激光器的腔长匹配频率。

直腔与非共振环形腔的实验结果表明,自调制不可能是由非共振环引起的,也不是声光调制器晶体产生的,声光调制器晶体只是增强了自锁模效应而使脉冲序列变得稳定。所以,产生自锁模的唯一原因只能来自 Nd:YAG 晶体。我们知道, Nd:YAG 晶体的非线性折射率系数较大($n_2=4.09\times 10^{-13}$ esu),较容易产生自相位调制(Self Phase Modulation),自相位调制导致激光光谱加宽,同时由于存在群速度色散(GVD)使得脉冲变宽,而产生“啁啾”脉冲,脉冲在腔内共振叠加的结果最终导致自锁模的产生。在本文的实验中, Nd:YAG 同时作为增益介质和非线性介质而产生自锁模现象。

2. 自锁模对主被动锁模激光器的影响

自锁模既然也是一种相位调制的结果,其调制频率 f_{SML} 和主动锁模激光器的调制频率

$f=50.00$ MHz 不同,对主被动锁模激光器的脉冲波形必然带来影响。图 5 是非共振环形腔中,当腔长与声光调制器的调制频率匹配时的主动锁模脉冲包络。图 6 为主被动锁模激光器产生的脉冲序列及脉冲波形。利用 BDN 染料片所产生的脉冲宽度约(FWHM)200 ps^[15],大于实验中所使用的光电二极管的响应时间。图 6(a)、6(b)为平行平面输出镜的结果;图 6(c)、6(d)对应于带劈角的平面输出镜。在图 6(b)及图 6(d)中的脉冲中,子脉冲与主脉冲间隔约 1 ns,而我们采用的输出镜为厚度 5 mm 的平行平板(图 6(d)为劈板),而它产生的子脉冲间隔应为 16 ps,远小于平面光二极管的时间分辨,因此,观测到的子脉冲不是通常认为的二次反射造成的,而是由于输出镜的 F-P 选纵模特性,使激光振荡纵模数减少,增强了自锁模造成的。将图 6(b)与图 6(d)相应的脉冲宽度比较,前者较后者略宽,这也表明前者是由于平行平面输出镜的纵模选择作用的结果。实验结果表明:自锁模导致激光器脉冲波形畸变,利用带劈角的平面输出镜可以将自锁模的影响减小,但难以完全消除。

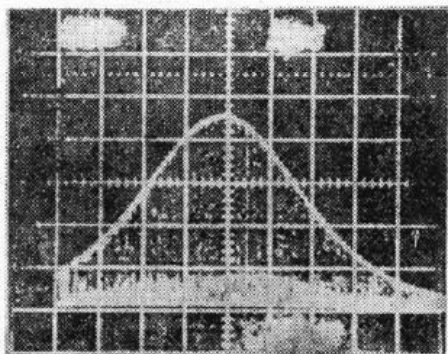


Fig. 5 Pulse-train of Active Mode-Locking in an antiresonant cavity when the cavity length was matched with the modulation frequency of AOM. (Scanning 200ps/div.)

自锁模既然也是一种相位调制的结果,其调制频率 f_{SML} 和主动锁模激光器的调制频率 $f=50.00$ MHz 不同,对主被动锁模激光器的脉冲波形必然带来影响。图 5 是非共振环形腔中,当腔长与声光调制器的调制频率匹配时的主动锁模脉冲包络。图 6 为主被动锁模激光器产生的脉冲序列及脉冲波形。利用 BDN 染料片所产生的脉冲宽度约(FWHM)200 ps^[15],大于实验中所使用的光电二极管的响应时间。图 6(a)、6(b)为平行平面输出镜的结果;图 6(c)、6(d)对应于带劈角的平面输出镜。在图 6(b)及图 6(d)中的脉冲中,子脉冲与主脉冲间隔约 1 ns,而我们采用的输出镜为厚度 5 mm 的平行平板(图 6(d)为劈板),而它产生的子脉冲间隔应为 16 ps,远小于平面光二极管的时间分辨,因此,观测到的子脉冲不是通常认为的二次反射造成的,而是由于输出镜的 F-P 选纵模特性,使激光振荡纵模数减少,增强了自锁模造成的。将图 6(b)与图 6(d)相应的脉冲宽度比较,前者较后者略宽,这也表明前者是由于平行平面输出镜的纵模选择作用的结果。实验结果表明:自锁模导致激光器脉冲波形畸变,利用带劈角的平面输出镜可以将自锁模的影响减小,但难以完全消除。

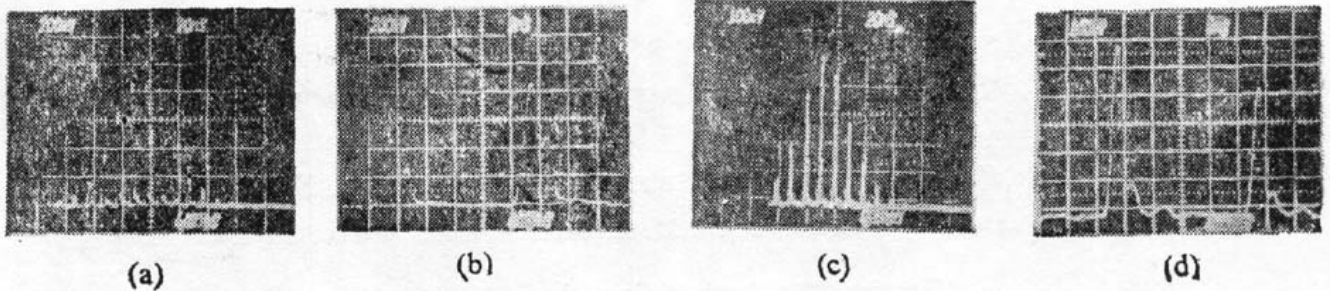


Fig. 6 Pulse-train of Active Passive Colliding Pulse Mode-Locking (APCPM) Nd:YAG laser by an antiresonant cavity with a parallel output mirror $M_1(T=50\%)$ for (a) and (b), and a wedge output mirror $M_1(T=50\%)$ for (c) and (d). The saturation absorber is BDN film with $T=20\%$. The scanning is 20 ns/div for (a) and (c), 2 ns/div for (b) and (d). The wing pulse is separated from main pulse about 1 ns in (b) and (d)

三、结 论

在 Nd:YAG 激光器中首次获得较强的自锁模脉冲序列。自锁模是由于 Nd:YAG 晶体中的自相位调制引起的, Nd:YAG 晶体既作为增益介质也作为非线性介质同时在谐振腔中作用, 即使在没有任何的外加调制的情况下, 该激光器都产生非常强的锁模。Nd:YAG 激光器的自锁模序列脉冲输出有一个明显的强度调制, 其调制频率由腔长决定, 等于该激光器的腔长匹配频率。在主被动锁模情况下, 自锁模导致输出脉冲波形畸变, 利用有劈角的平面输出镜可以减弱自锁模的影响。所以为了消除自锁模对主被动锁模激光器的影响, 激光腔内应尽可能采用劈角形元件, 以减小 F-P 选模带来的自锁模增强作用。另外利用谐振腔中存在的 F-P 腔对自锁模的增强作用, 可以获得较强的自锁模。Spence 等人利用色散补偿元件, 已在 TiAl_2O_3 激光器中实现完全自锁模的脉冲输出, 得到 60 fs 的超短脉冲激光^[16]。作者认为这将是一个非常有力量的锁模技术, 是获得超短脉冲激光的一个比较方便的途径。

参 考 文 献

- [1] M. G. Cohen, *Proc. SPIE*, 1982, Vo. 322, 44.
- [2] Lin Lihuang *et al.*; *Chinese Phys. Lett.*, 1986, 3, No. 7(Jul), 329~332.
- [3] 王世杰等;《中国激光》, 1989, 16, No. 8(Aug), 409~492.
- [4] L. F. Mollenauer, R. H. Stolen; *Opt. Lett.*, 1984, 9, No. 1(Jan), 13~15.
- [5] W. H. Knox *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1985, 46, No. 12(15 Jun), 1120~1121.
- [6] 樊立明等;《光学学报》, 1991, 11, No. 5(May), 385~389.
- [7] J. Mark *et al.*; *Opt. Lett.*, 1989, 14, No. 1(Jan), 48~50.
- [8] K. J. Blonl, B. P. Nelson; *Opt. Lett.*, 1988, 13, No. 11(Nov), 1026~1028.
- [9] J. Goodberlet *et al.*; *Opt. Lett.*, 1989, 14, No. 20(Oct), 1125~1127.
- [10] J. Goodberlet *et al.*; *Opt. Lett.*, 1990, 15, No. 9(May), 504~506.
- [11] L. Y. Liu *et al.*; *Opt. Lett.*, 1990, 15, No. 10(May), 553~555.
- [12] J. M. Liu *et al.*; *Opt. Lett.*, 1990, 15, No. 12(Jun), 685~687.
- [13] F. Krousz *et al.*; *Opt. Lett.*, 1990, 15, No. 13(Jul), 737~735.
- [14] F. Krousz *et al.*; *Opt. Lett.*, 1990, 15, No. 19(Oct), 1082~1084.
- [15] 林立煌等;《光学学报》, 1991, 11, No. 5(May), 413~418.
- [16] D. E. Spence *et al.*; *Opt. Lett.*, 1991, 16, No. 1(Jan), 42~44.

Self mode-locking in Nd:YAG laser

FAN LIMING, ZHU GUOYING, CHEN SHISHENG, PENG HUI AND XU ZHIZHAN
(*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics Academia, Sinica, Shanghai 201800*)

(Received 21 March 1991; revised 27 May 1991)

Abstract

In this paper, the experimental results of self mode-locking in Nd:YAG laser is reported for the first time. We attributed the self mode-locking to the self phase modulation of the Nd:YAG rod. The pulse shape in the active-passive colliding pulse mode-locking (APOPM) Nd:YAG laser is strongly affected by the self mode-locking.

Key words: Nd:YAG laser, mode-locking, self-phase modulation.