

非腔长匹配相干叠加脉冲锁模 激光器的实验研究*

王清月 沈家强 许 键 向望华

张 钊 章若冰

(天津大学精密仪器系, 天津 300072)

(1993 年 8 月 9 日收到)

实现了一种新型的非腔长匹配相干叠加脉冲锁模 Nd:YAG 激光器的锁模运转。锁模脉冲宽度为 60ps。给出该种新型锁模激光器的运转特性以及锁模状态与各种实验参数之间的关系。对于该种激光器的各种实验现象给出了简明清晰的物理解释。

PACC: 4280W

1 引 言

最近,大量的理论和实验研究表明^[1-6],在传统的锁模激光器中(如主动锁模、被动锁模和同步泵浦锁模等),如加入一个带有非线性介质的外腔,即使该非线性介质具有正的群速度色散,在适当的条件下也能使锁模脉冲得到进一步的压缩,产生超短激光脉冲。其原理是利用了外腔中的非线性介质所产生的自相位调制使其光脉冲在经外腔再返回主腔时,与主腔中的光脉冲在耦合镜上产生相干叠加。这种超短脉冲激光器称为相干叠加脉冲锁模激光器(Additive Pulse Mode-locking—APM)。由于脉冲在 APM 激光器的外腔中经历了非线性相互作用,使其相位发生变化,因而当其与主腔的脉冲叠加时,脉冲包络的各个部位具有不同的相位差,如果适当地控制相位差的数值,使得两脉冲的顶部具有相干加强,而中部和尾部具有相干减弱,这时叠加后的脉冲宽度比原来主腔中的脉冲宽度更窄。这一得到压缩的脉冲注入到主腔,往返一周后,再重复上述过程,周而复始,使脉冲压缩到一新的稳定的宽度。由于这一过程能获得十分有效的压缩,并能广泛地用于各种激光介质和锁模机制,因此形成了超短脉冲激光领域新的研究热点。然而,在目前众多的 APM 激光方案中均采用一直线耦合腔实现相干叠加脉冲锁模运转,这就要求主腔和耦合腔的腔长匹配在十分之一波长范围内。这一苛刻的要求使得实验条件变得相当复杂和困难。尽管许多实验室都采用了伺服反馈电子系统^[3-6],企图精确实时地控制主腔和耦合腔的腔长匹配,但终因精度不够和过程过于复杂而使该种 APM 激光器的稳定性成为一个

* 国家自然科学基金资助的课题。

严重的问题。

鉴于通常 APM 激光器所存在的上述问题,王清月等^[7]于 1991 年提出了一新的 APM 激光器的理论模型,称为非腔长匹配相干叠加脉冲锁模激光器。在该模型中,利用带有一个非线性介质的非谐振环代替直线耦合腔,以实现相干叠加脉冲锁模运转而无须腔长匹配。本文就是根据这一新的理论模型及其计算结果,在实验上实现了 Nd:YAG 的非腔长匹配的 APM 激光运转,并使锁模脉冲宽度由 200ps 压缩至 60ps。

2 实验装置及原理

图 1 给出该激光器的实验装置原理。 M_1 为平面反射镜, C 为声光调制器, D 为其驱

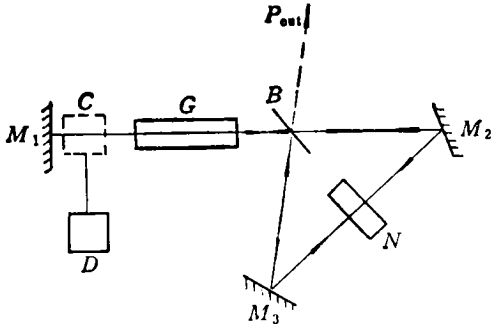


图 1 非腔长匹配 APM 激光器原理图。 M_1, M_2, M_3 为高反平面镜; C 为声光调制器; D 为调制器驱动电源; G 为增益介质 Nd:YAG 棒; B 为分束器; N 为非线性介质

动电源; G 为 YAG 棒(长为 60mm, 直径 8mm), 由分束器 B 和平面全反射镜 M_2 和 M_1 构成非谐振环。一非线性材料 N 置于非谐振环内, 在本实验中, 利用半导体掺杂玻璃 ($\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$) 做为非线性材料, 该材料厚 1mm, 吸收系数 $\alpha = 0.58\text{cm}^{-1}$, 非线性折射率 $n_2 = 10^{-11}\text{cm}^2/\text{W}$ 。

由声光调制器所构成的主动锁模机理首先在激光腔内产生锁模光脉冲, 该脉冲经分束器 B 分为强度不相等的两列相向传输的脉冲, 该脉冲经过非线性介

$$\varphi_{1,2}(t) = \frac{2\pi}{\lambda} \ln_2 I_{1,2}(t) \quad (1)$$

质 N 时, 由于非线性效应(主要是自相位调制效应)使其脉冲包络各自携带了非线性相位移^[7]

式中 λ 为激光波长 ($1.06\mu\text{m}$), l 为非线性介质的厚度, n_2 为其非线性折射率, $I_{1,2}(t)$ 为两脉冲的光强。由于分束器 B 为不等量分束(在本实验中反射率与透射率之比为 4:6), 即光强 $I_1(t) \neq I_2(t)$, 因此, 当两列相向传输的脉冲 $I_1(t)$ 和 $I_2(t)$ 经过非线性介质在分束器 B 再次叠加返回激光腔时, 其脉冲包络对应部位的非线性相位差为

$$\varphi(t) = \varphi_1(t) - \varphi_2(t) = \frac{2\pi}{\lambda} \ln_2 [I_1(t) - I_2(t)]. \quad (2)$$

它是一时间的函数, 即脉冲包络不同位置的非线性相位差是不同的。适当控制两脉冲幅值的大小及非线性介质的长度, 使其在脉冲半宽度处具有一 π 的非线性相位差, 这样两脉冲在顶部为同相位相干叠加, 而脉冲中部为 $-\pi$ 相位相干叠加, 即脉冲顶部为振幅相加, 而脉冲中部为振幅相减, 从而使叠加后的脉冲得到有效的压缩。周而复始, 经多次往返, 就会达到一个更窄脉冲的稳定状态, 实现相干叠加脉冲锁模运转。

3 实验结果及讨论

该实验是利用一台自制的主动锁模 Nd:YAG 激光器完成的。在没有加入非谐振环时,即该激光器运转在通常的主动锁模状态时,其锁模脉冲宽度为 200ps。利用带有非线性介质 $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$ 半导体玻璃的非谐振环,使其运转在 APM 锁模状态时,适当地控制氙灯的泵浦电流,半导体玻璃的位置,分束器的分束比,脉冲宽度可压缩到 60ps。图 2 是该状态下的自相关函数实验曲线。该实验曲线是利用厚为 2mm 的 KDP 晶体在 I 类匹配非共线情况下测得的。实验发现,一旦实验参数合适,激光器进入 APM 锁模状态,其表现出的运转特性与主动锁模 YAG 激光器具有十分鲜明的差别。

首先,这一差别表现在对腔长匹配精度的依赖关系上。当该激光器运转在主动锁模时,如果腔长改变 $\pm 10\mu\text{m}$,就将失去最佳锁模状态。但是,当激光器运转在 APM 状态时,腔长改变 $\pm 2\text{mm}$,激光器仍能给出很好的锁模状态。图 3(a) 和 (b) 给出了腔长失配 +2mm 和 -2mm 情况下锁模脉冲序列,可见其锁模状态仍是完好的。产生这种情况的原因是:当激光器进入 APM 锁模状态后,与腔长因素无关的 APM 压缩脉冲的过程占据了主导地位,而强烈依赖于腔长的由声光调制器所引起的主动锁模过程处于非常次要的地位。这一解释还可从另一种实验现象中得到证实。这就是,一旦实现了 APM 锁模,即使停止声光调制器的工作,APM 锁模仍能维持若干分钟,有时甚至很长。可见,声光调制器的主动锁模过程只是在 APM 锁模过程的初期起到提供种子脉冲的作用。这一现象与通常的带有直线外腔的 APM 激光器

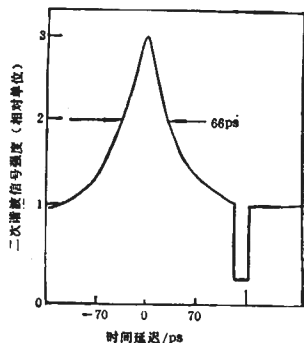
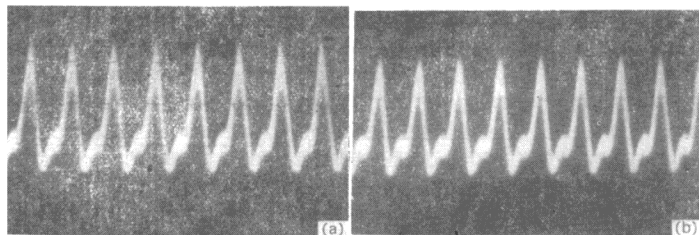


图 2 锁模脉冲的相关函数曲线,脉冲宽度为 66ps



(a) 为腔长位移 +2mm

(b) 为腔长位移 -2mm

图 3 非腔长匹配 APM 激光器的脉冲序列

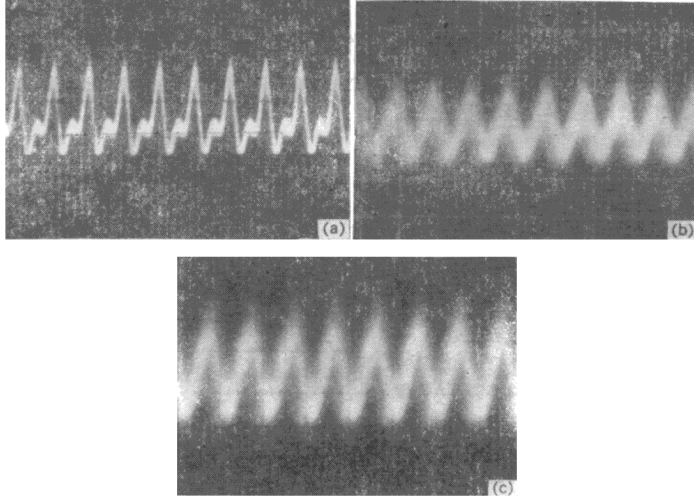


图4 非腔长匹配 APM 激光器的脉冲序列,分别对应泵浦电流为 (a) 19.5A; (b) 18.6A; (c) 22A.

所表现出的特性是相同的^[1-2]。

正像带有可饱和吸收体的被动锁模激光器一样,非腔长匹配 APM 激光器的锁模状态对泵浦强度的依赖关系非常敏感。图 4(a) 给出的锁模脉冲序列是在泵浦氙灯的电流为 19.5A 时得到的,其锁模状态很好。图 4(b) 和 (c) 是在泵浦电流分别为 18.5A 和 22A 时得到的,显而易见,它们已经失去了锁模状态,而处于周期调制状态。造成这一结果的原因是这样的,当泵浦强度偏离最佳锁模所需的腔内功率时,在非谐振环内相向传输的两列光脉冲所携带的非线性相位移不能再满足 APM 锁模所需的数值,即在脉冲半宽度处,位相差已经偏离 $-\pi$ 很多。在这种情况下,APM 过程不仅对锁模过程无益,而且会破坏已经存在的由声光调制器所产生的主动锁模过程。

实验发现,非腔长匹配 APM 激光器的锁模状态对非线性介质在非谐振环内的位置有一定的依赖关系。大量的实验表明,当非线性介质正好处于非谐振环的对称中心位置时,始终不能得到好的锁模状态。图 5(a) 给出这种情况下的脉冲序列。当非线性介质偏离中心位置 10mm 左右时,激光器进入较好的锁模状态,图 5(b) 是在偏离中心位置 10mm 时获得的。造成这一现象的原因是:当非线性介质处于非谐振环的中心对称位置时,相向传播的两列脉冲在非线性介质中相互重叠,由此造成两脉冲在非线性介质中的互相位调制效应 (Cross-Phase Modulation——XPM)^[3]。这种互相位调制效应的结果是使得两列脉冲各自在非线性介质中由于自相位调制所引起的非线性相位差变小,从而减弱了 APM 的锁模作用。

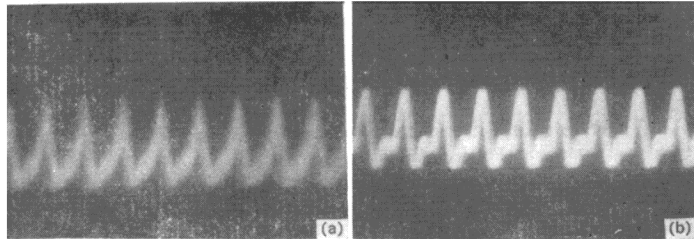


图5 非腔长匹配 APM 激光器的脉冲序列,分别对应非线性介质 N 的位置为
(a) 中心对称位置; (b) 偏离中心位置 10mm

该激光器的振幅起伏在 8% 左右。

4 结 论

在王清月等人^[1]提出的非腔长匹配 APM 锁模激光器理论模型的基础上,本文在实验上实现了非腔长匹配相干叠加脉冲锁模 Nd:YAG 激光器的锁模运转,脉冲宽度由 200 ps 压缩至 60ps。本文还就该种新型锁模激光器的运转特性及其实验结果进行了分析及讨论。

作者十分感谢长春物理研究所徐迈提供了 GdS_xSe_{1-x} 玻璃样品。

- [1] K. L. Blow, D. Wood, Journal of Optical Society of America (B), 5(1988), 629.
- [2] A. G. Bulushev, E. M. Dianov, O. G. Okhotnikov, Opt. Lett., 15(1990), 968.
- [3] T. F. Carruthers, I. N. Duling, Opt. Lett., 15(1990), 804.
- [4] E. P. Ippen, H. A. Hause, L. N. Liu, Journal of Optical Society of America (B), 6(1989), 1736.
- [5] J. Goodberlet, J. Wang, J. G. Fujimoto, et al., Opt. Lett., 15(1990), 1300.
- [6] L. Y. Liu, J. M. Huxley, E. P. Ippen, et al., Opt. Lett., 15(1990), 553.
- [7] 王清月,沈家强,丛若冰,张贵忠,光学学报,13(1993),97.
- [8] G. P. Agrawal, Phys. Rev. Lett., 59(1987), 880.

EXPERIMENTAL STUDY FOR NON-CAVITY LENGTH MATCHED ADDITIVE PULSE MODE-LOCKING LASER

WANG QING-YUE SHEN JIA-QIANG XU JIAN XIANG WANG-HUA

ZHANG ZHAO ZHANG RUO-BING

(Department of Precision Instruments Engineering, Tianjin University, Tianjin, 300072)

(Received 9 August 1993)

ABSTRACT

A new type of mode-locking laser—non cavity length matched additive pulse mode-locking laser was realized experimentally. This new kind of laser consists of an active mode-locking Nd:YAG laser and a nonlinear antiresonant ring as an end mirror. A semiconductor doped glass was used in the nonlinear resonant ring as a nonlinear element in which the nonlinear phase shift was produced when the mode-locked light pulse propagate through it. In proper conditions stable mode locking performance was got with a pulse width of 60 ps which is more than three times shorter than that from a normal active mode-locking Nd:YAG laser. The mode-locking characteristics of this laser are presented in this paper.

PACC: 4280W