

NAB 对撞增强相位共轭腔快锁模特性*

孙占鳌 朱小磊 吴兆庆 杨香春

(中国科学院上海光学精密机械研究所激光技术开放实验室, 上海 201800)

邱闽旺 黄奕川 江爱栋 罗遵度

(中国科学院福建物质结构研究所, 福州 350002)

提 要

本文分析了 NAB[NdAl₃(BO₃)₄]自激活激光晶体脉冲被动锁模的优越性。研究了对撞增强自启动自泵浦近简并四波混频相位共轭腔的形成条件及其在锁模过程中的作用。首次演示了 NAB 对撞增强快速压缩脉冲锁模过程。获得了平均 7 ps 的超短脉冲的实验结果。

关键词: NAB 自激活激光晶体, 自泵浦相位共轭腔, 对撞增强锁模。

一、引 言

用相位共轭反射镜进行 Nd:YAG 脉冲被动锁模已有报道^[1,2], 所得脉冲宽度分别为 40 ps 和 30 ps, 这表明没有因为采用简并四波混频非线性压缩脉冲机制而进一步压窄 Nd:YAG 锁模脉冲宽度。

用抗共振环的 Nd:YAG 对撞脉冲锁模也有多篇报道^[3~5]。但因所采用的腔型参数不同, 获得的脉冲宽度相差也很大, 文献[4]中甚至未获得进一步压缩(相对于反射镜-染料盒接触式的直线型腔 30~40 ps 脉宽而言)。

分析认为, 除了 Nd:YAG 本身的增益带宽较窄($\sim 5\text{\AA}$), 限制获得窄脉宽外, 腔型参数选择是至关重要的。文献[1]、[2]之所以未获得脉宽短于 30~40 ps 可能是因为他们采用的凹反射镜与锁模染料盒一体化腔型造成相位共轭反射镜的自振脉冲展宽所致; 而文献[4]中虽然采用了对撞抗共振环但未获得短于 30~40 ps 的结果或许是因为他们采用的单通平镜-抗共振环腔型不利于脉冲压缩。

本文采用自激活硼酸铝钕 (NAB) 晶体, 在该晶体中的 Nd³⁺ 离子不是外掺杂的而是 NdAl₃(BO₃)₄ 中的一个组分。与 Nd:YAG 相比, 其 Nd³⁺ 约高 40 倍($5.43 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$), 受激发射截面 σ 相近($8 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$) 荧光带宽约宽 5 倍(25~30 \AA), 上能级寿命约短一个数量级(19 μs), 两者波长相近, 为 1.065 μm ^[6]。

根据起源于噪声脉冲的激光自激振荡条件^[7]为

$$\left. \begin{aligned} \frac{N_2 - N_1}{\tau} &\geq \frac{m}{T}, \\ T &= \frac{l}{(1-r)v_1}, \quad m = \frac{8\pi(n\nu)^2 \Delta\nu}{c^3} \frac{d(n\nu)}{d\nu}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

显然, NAB 比 Nd:YAG 更有利于被动锁模。式中 $N_2 - N_1$ 为反转粒子数密度, τ 为上能级的寿命, m 为经典理论中的驻波模数, T 为腔内光子寿命时间, l 为腔长, $(1-r)$ 为腔的总损耗, v_1 为能量传播速度, 在反常色散区外 $v_1 = v_g$, 即为群速度, 在反常色散区内 v_1 远小于群速度。对于本文的情况, 8π 应改为对应于 TEM₀₀ 基横模的立体角, 例如 $10^{-6}\pi$, m 应理解为参与锁模的纵模数, 在反常色散区内 $d(n\nu)/d\nu$ 变化最快, 且有以吸收线中心为中心拐点的三个拐点。 $\Delta\nu$ 愈宽两边的拐点拉得愈开, 随着 $N_2 - N_1$ 的变化扫过的频率成分愈多。而参与振荡的纵模数愈多, 自泵浦相位共轭反射镜的反射率就愈高, 锁模的脉宽也就愈窄, 锁模运行既快且稳。因此, 预计用 NAB 会看到比 Nd:YAG 更明显的近简并四波混频-相位共轭腔非线性增强快锁模现象。

二、对撞增强自泵浦近简并四波混频的条件和快锁模机理

自启动和自泵浦近简并四波混频-相位共轭腔应是最简单、最有效的结构。实现这个结构应满足如下条件: (1) 对撞泵浦波 A_{P+} , A_{P-} 应足以维持激发态锁模染料分子的粒子数反转。因为共轭信号波 A_{S+} , A_{S-} 是靠消耗或抽空泵浦波而实现的; (2) 泵浦波或共轭信号波可以互换, 透过相位共轭反射镜的泵浦波仍参与这个互换循环, 保证无外损耗和高转换效率; (3) 在锁模发展的线性放大阶段的增益开关脉冲要达到或超过相位共轭腔的阈值*; (4) 应满足简并四波混频时空重叠、偏振和相位匹配; (5) 腔内各光学反射面的散射杂光应远离相位共轭反射镜视场, 避免造成相位共轭反射镜自振拉长脉冲; (6) 可饱和染料的初始透过率 T_0 应选在相位共轭反射镜的最有效区。

本文用于脉冲被动锁模的自泵浦四波混频是属于瞬态四波混频, 其三阶极化强度 $P^{(3)}$ 是介质的激发和弛豫随时间变化的函数。对于近简并四波混频, $P^{(3)}$ 的共振增强和对撞激发的瞬态相干增强作用是简并四波混频-相位共轭反射镜快速锁模的物理基础。由于对撞增强近简并四波混频过程的强非线性效应, 使得新产生的相位共轭波脉宽窄于泵浦脉冲宽度, 只要锁模染料未饱和, 这种变窄过程就快速进行下去, 其速率远快于由于幅度光栅的多次反射和脉冲前沿被染料的多次吸收引起的脉冲压缩速率。从原理上讲, 如果相位共轭反射镜共振带宽足够宽, 这种锁模机制则很容易达到增益带宽限的脉宽。因此可以说, 选用具有高非线性极化率和快弛豫时间的非线性介质, 并采用对撞增强自泵浦近简并四波混频相位共轭反射镜锁模机制, 是获得超短脉冲的理想途径之一。

三、实验演示和讨论

为了验证前述二节中的分析论断, 本文用 NAB 自激活晶体和图 1 所示的抗共振环杂化稳腔做了对撞增强相位共轭反射镜腔快压缩锁模过程的演示。所用的 NAB 晶体**尺寸为 $\phi 3 \times 11$ mm, 光泵浦氙灯为 $\phi 3 \times 30$ mm。在非线性阶段开始前该腔能快速建立起足够

* 简并四波混频无阈值, 但相位共轭腔有阈值。

** 为中国科学院福建物质结构研究所生长。

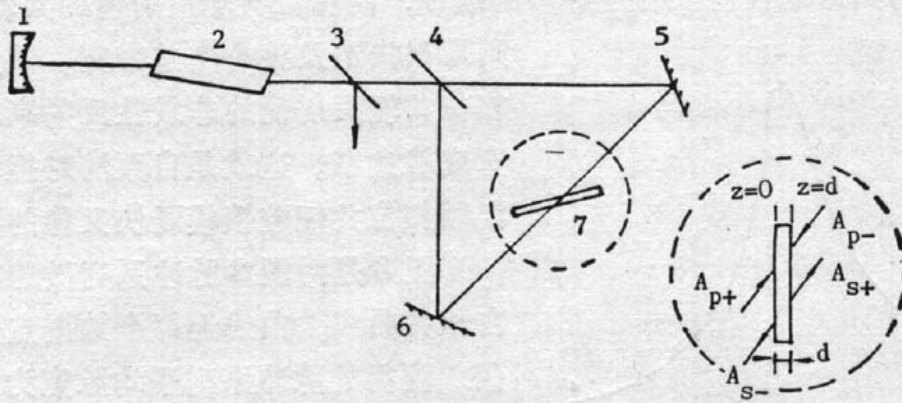


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup and the sketch of DFWM operation at dye cell.

Where 1. HR mirror, $R = +4M$; 2. NAB rod; 3. Output mirror; 4. 50/50 Beam splitter; 5, 6. 22.5° HR mirrors; 7. Dye cell and its sketch of DFWM (right side)

强的增益开关脉冲,作为相位共轭反射镜的“自起动器”。用抗共振环是因为其非振性质能容纳增益介质和共轭镜自身相一致的任何波长,并因对撞环远离凹面全反镜,故能有力地防止相位共轭反射镜自振拉长光脉冲。锁模染料盒厚 2 mm,充满五甲川二氯乙烷染料溶液($\tau_r = 9 \pm 1$ ps),放在抗共振环路等光程中心。

图 2 为 NAB 介质对撞增强锁模脉冲系列。如果以系列包络峰高的十分之一定义为线性阶段的终了,则可清楚地看出,非线性阶段开始后 7~8 个腔来回即达到最高的压缩,随后,由于染料的完全饱和而脉冲又开始展宽。用常规的被动锁模“起伏”模型理论观点无法解释这种快过程。而用自泵浦对撞增强近简并四波混频则能较好地解释这种快压缩锁模现

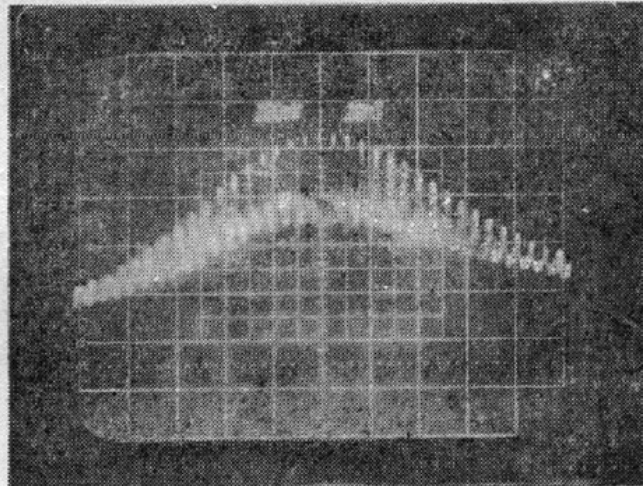


Fig. 2 Oscillogram of the mode-locked pulses train from a concave-antiresonantal ring NAB laser

象。设在线性阶段末了腔内存在 n 个频率为 $\omega_0 \pm n\Delta\omega$ 的纵模,其中 n 等于 0, 1, 2, 3, ..., ($\Delta\omega/\omega_0 \ll 1$), 这些初步锁定纵模的脉冲幅度高到足以启动非线性混频作用。一旦相位共轭反射镜开始有效工作,则腔即变成相位共轭恒稳腔, ($g_0 g_{PCM} = 0.5$), 而被动调 Q 锁模过程也被主动的简并四波混频非线性机制代替。根据相位共轭反射镜的性质,对于近简并的各频谱分量均有频移量反转性质,即有 $\omega_0 \pm \Delta\omega$ 的信号波必有 $\omega_0 \mp \Delta\omega$ 的共轭波,各纵模都分别满足相位共轭自洽条件,又与邻近分量相干耦合,相位共轭反射镜每反射一次就展宽一个

频移量 $\Delta\omega$, 因此, 如果线性阶段有足够多的纵模, 而相位共轭反射镜的共轭带宽又足够宽,

则可很快遍及整个增益带宽。锁定纵模数愈多, 相位共轭反射镜的非线性反射率就愈高, 则脉冲宽度就愈窄。这就是自泵浦对撞增强近简并四波混频相位共轭腔锁模既快又稳的简单机理。

图 3 是对图 2 脉冲系列做的非共线二次谐波自相关曲线。曲线上每个数据点是 5 次测量平均值。测得的脉冲系列平均脉宽为 7 ps。

从上述实验演示和 7 ps 的测试结果表明, 用自泵浦对撞增强近简并四波混频相位共轭反射镜锁模机制可容易地获得比染料弛豫时间略窄的脉冲宽度, 它加快了锁模脉冲压缩过程, 提高了锁模稳定度($\sim 100\%$), 而且对 NAB 激光晶体效果比

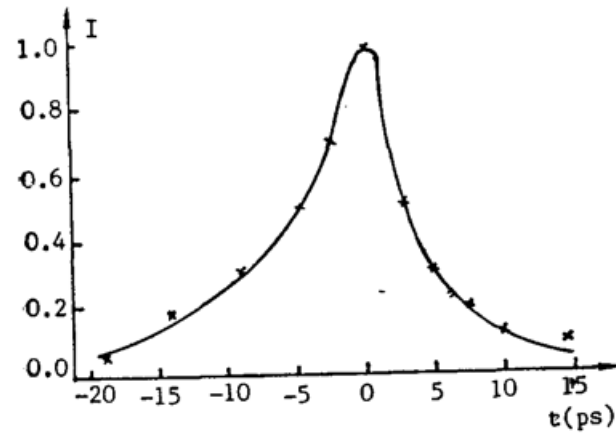


Fig. 3 Curve of the autocorrelation function of noncollinear second harmonic generation

对 Nd:YAG 更明显。深入的理论分析和比较实验研究还在进行。

四、结 论

首次实验演示了 NAB 晶体对撞增强快锁模过程, 得到了脉冲系列平均脉宽为 7 ps 的实验结果。用自泵浦对撞增强近简并四波混频相位共轭腔锁模机理, 能够很好地解释所获得的实验结果。

参 考 文 献

- [1] H. Vanherzeele, J. L. Van Eck *et al.*; *Opt. Lett.*, 1981, **6**, No. 10 (Oct), 467~469.
- [2] M. Szczurek; *Opt. Commun.*, 1987, **61**, No. 1 (Jan), 42~44.
- [3] H. Vanherzeele, J. L. Van Eck *et al.*; *Appl. Opt.*, 1981, **20**, No. 20 (Oct), 3484~3486.
- [4] V. I. Prokhorenko, E. A. Tikhonov *et al.*; *Soviet J. Quant. Electron.*, 1987, **17**, No. 4 (Apr), 505~509.
- [5] 孙占鳌等;《中国激光》, 1989, **16**, No. 5 (May), 302~304.
- [6] S. R. Chinn *et al.*; *Opt. Commun.*, 1975, **15**, No. 3 (Nov-Dec), 345~350.
- [7] A. Kastler; *Annales de Physique*, 1962, **7**, No. 1~2 (Jan-Fev), 57~60

Quickly mode-locking of a NAB laser using collisionally enhanced pulse conjugate resonator

SUN ZHANAQ, ZHU XIAOLEI, WU ZHAOQING AND YANG XIANGCHUN
(*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Lab.
for Laser Technology, Shanghai 201800*)

QIU MIRWANG, HUANG YICHUAN, JIANG AIDONG AND LUO ZUNDU
(*Fujian Institute of Matter Structures, Academia Sinica Fuzhou, 350002*)

(Received 29 March 1990; revised 16 July 1990)

Abstract

The excellent passively pulse mode-locking performances of the NAB [$\text{NdAl}_3(\text{BO}_3)_4$] laser crystal are analyzed. The formation conditions of the self-starting and self-pumped degenerate four-wave mixing-phase conjugate resonator (DFWM-PCR) and its function in quickly mode-locking process are studied. For the first time, demonstration of NAB collisionally enhanced quickly compression process of the mode-locking pulse width is performed experimentally. The result of 7 ps ultrashort pulse has been obtained.

Key words: self-activated laser crystal NAB; self-pumped phase conjugate resonator (SPCR); collisionally enhanced mode-locking.