

激光二极管泵浦的全固体锁模激光器*

李传东 胡文涛 张正泉 徐至展

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 报道了用国产激光二极管泵浦 Nd·YVO₄ 激光器连续锁模的实验结果。在泵浦功率为 122.4 mW 时获得稳定的锁模序列, 脉冲宽度 43 ps(FWHM), 输出功率 7 mW。实验中在较低的泵浦强度下观察到了弛豫振荡的振幅调制现象, 并导出了含有自相位调制时锁模宽度的自恰解。

关键词 锁模, 折叠腔。

1 引 言

大功率激光二极管(LD)的飞速发展为固体激光器开辟了新的生长点, 而锁模作为获得超短脉冲最有效的手段更是热点中的热点。激光二极管泵浦的锁模固体激光器, 在稳定、紧凑、高效等方面具有传统灯泵和光泵激光器无法比拟的优点, 因而更具有实用价值。更为引人注目的是, 激光二极管泵浦的锁模激光器所获得的脉冲宽度远比理论计算值低^[1]。

掺钕的固体材料, 其吸收带在 800 nm 附近而特别适合以激光二极管作为泵浦光源, 因而其发展也特别迅速, 至今已在 Nd·YAG, YLF, glass 等介质中实现了锁模运转。在众多的掺钕激光介质中, Nd·YVO₄ 具有高的吸收系数、大的增益截面和偏振输出等优点, 更适合作激光二极管泵浦激光器的工作物质。此前对 Nd·YVO₄ 的研究主要偏重于单纵模、高效的红绿激光器以及最近报道的耦合腔电光调 Q 激光器^[2]等方面。本文报道了用国产激光二极管泵浦 Nd·YVO₄ 激光器进行锁模的实验结果。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示。泵浦源为国产标称 1 W 的激光二极管, 发光面尺寸为 280 μm × 1 μm, 发散角 10° × 40°。激光二极管发出的光经焦距分别为 85 mm 和 115 mm 的两个非球面镜耦合进 Nd·YVO₄ 晶体。用 CCD 测量泵浦光经耦合系统之后的参数, 并计算出泵浦光在晶体中的平均光斑约为 300 μm × 100 μm。激光二极管由于长期使用已经老化, 而且耦合系统的传递效率又比较低, 实测的最大泵浦光功率为 221 mW。

激光介质为掺杂 1 wt% 的 Nd·YVO₄ 晶体, 尺寸为 3 mm × 3 mm × 3 mm, 其一端镀 1.06 μm 高反、800 nm 增透的双色膜, 另一端镀 1.06 μm 的增透膜。

* 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1996 年 3 月 18 日; 收到修改稿日期: 1996 年 8 月 29 日

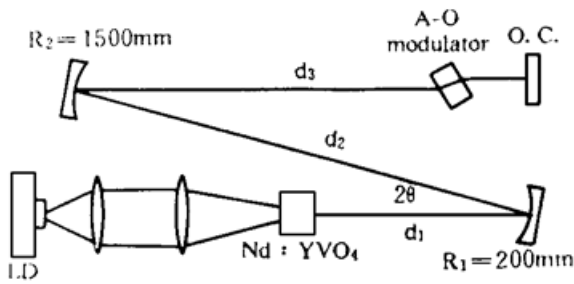


Fig. 1 Experimental setup of the actively mode-locked Nd:YVO₄ laser pumped by a home-made laser diode

调制器的声光介质为熔石英, 两端切成布儒斯特角以减少损耗和避免腔内标准具效应对增益带宽的限制。驱动频率为 80 MHz, 驱动功率为 0.65 W 时, 调制器对 1.06 μm 的平均衍射效率为 $\epsilon = 12\%$ 。根据公式 $\epsilon = \frac{1}{2}[1 - J_0(2\theta_m)]$, 计算得知此时的调制深度 $\theta_m = 0.51$ 。

谐振腔采用折叠腔。为节省空间, 增加谐振腔的稳定性, 选用四镜折叠腔。其中一个全反镜就在 Nd:YVO₄ 晶体的入射面上, 折叠角 $2\theta = 19^\circ$ 。输出镜对 1.06 μm 的透过率为 5.5%。

3 折叠腔的讨论

该腔的往返矩阵为:

$$\begin{aligned}
 M &= \begin{bmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 2d_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &\times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &\equiv \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}
 \end{aligned} \quad (1)$$

在本实验中, $d_1 = 10.50$ cm, $d_2 = 56.00$ cm, $d_3 = 26.25$ cm 注意到腔镜 M_1, M_2 都是以一定的角度放置的, 矩阵中的 R_1, R_2 在相互垂直的两个方向的等效曲率半径是不同的^[3]

$$R_{i\parallel} = R_i \cos \theta, \quad R_{i\perp} = R_i / \cos \theta, \quad i = 1, 2$$

根据稳定性理论, 折叠腔的稳定区在 $d_1 = \frac{R_1}{2}$ 附近, 定义 $\delta = d_1 - \frac{R_1}{2}$ 。腔的稳定性条件为

$\left| \frac{A+D}{2} \right| < 1$, 等效曲率半径不同, 使腔的稳定区在两个方向也有所差异。解得满足稳定条件的 δ 值: -33.9 mm $< \delta_{\parallel} < 10.1$ mm, -31.7 mm $< \delta_{\perp} < 12.3$ mm, 因此该腔的稳定区为 -31.7 mm $< \delta < 10.1$ mm。为使激光器对微扰有足够的稳定性, 一般将 δ 值取在两上临界值的中点。从上面的计算得知, 该腔型的稳定区很宽, 使得激光器的稳定性很好。

图 2 为两个方向上的光腰尺寸以及它们的比值与 δ 的关系。由图可见, 在稳定区的中间, 激光介质中的腔模几乎是圆形的。要使泵浦光与腔模光的模式得到良好匹配, 就必须使其在稳定区的边缘。在本实验中, $\delta = 5$ mm, 此时的腔模光腰为 $74 \mu\text{m} \times 68 \mu\text{m}$, 椭圆比为 1.1。由于腔模光腰比泵浦光小得多, 显然这种模式匹配并不利于提高系统转换效率。但在本实验中, 由于光学平台的稳定性较差, 泵浦光的强度也较低, 因此在考虑谐振腔时, 将注意力放在增大谐振腔的稳定区、降低激光弛豫振荡的阈值上。由于泵浦光斑受限于耦合系统而比较大, 对于像散的补偿几乎未作考虑。计及腔内损耗(包括声光调制器的插入损耗), 在上述实验条件下按文献[4]中有关公式, 算得泵浦阈值为 35 mW, 而实验测得的阈值为 42 mW。静

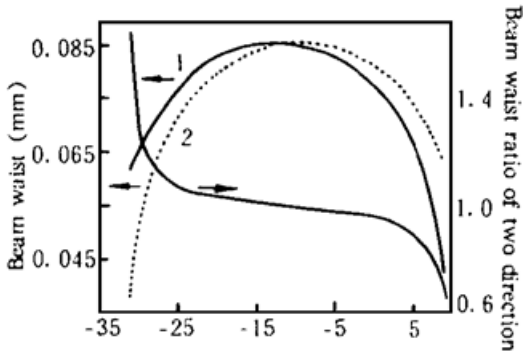


Fig. 2 Lasing beam radii and their ratios for various δ . Curve 1 and 2 are mode size at horizontal and perpendicular orientation respectively

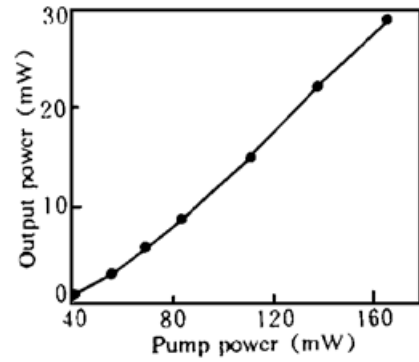


Fig. 3 output power versus pump power at static state

态时的输入-输出曲线如图 3 所示。在泵浦功率为 167.6 mW 时, 输出功率 28.6 mW, 相应的斜效率 26%。比较而言, Nd:YAG 在相同的实验条件下的阈值约为 120 mW, 这说明了 Nd:YVO₄ 晶体优于其它掺钕材料。

4 实验结果和讨论

主动锁模激光器中, 腔长与调制频率的匹配程度决定着锁模状态的好坏。文献[5]中给出了利用示波器判断锁模状态的实验判据。据此, 本文作者在腔长的调整中使激光二极管工作在准连续状态, 重复频率为 10 Hz, 每个泵浦脉冲长为 0.9 ms, 用快响应 PIN 管观察激光从弛豫振荡到稳定锁模的过程, 同时利用 CCD 列阵监视输出激光的横模结构, 使之工作在基横模。

声光调制器的驱动功率为 0.65 W 时的锁模阈值为 52 mW。图 4 为腔长匹配良好时从示波器上观察到的激光波形。实验表明, 在泵浦功率为 120 mW 时, 弛豫振荡建立之后的 250 μ s 内就已经达到稳定锁模的状态。

腔长调整满意之后, 将激光二极管转换至连续工作状态, 用自制的二阶自相关仪测量激光脉冲的宽度。图 5 为泵浦功率为 120 mW 时测得的自相关曲线, 用高斯曲线拟合, 算得锁模脉冲的宽度为 43 ps。此时的输出功率为 7 mW, 光-光转换效率为 5.8%。由于实验中所用的自相关仪是逐点测量的, 无法通过实时观察自相关曲线来进一步调整各光学元件而获得更

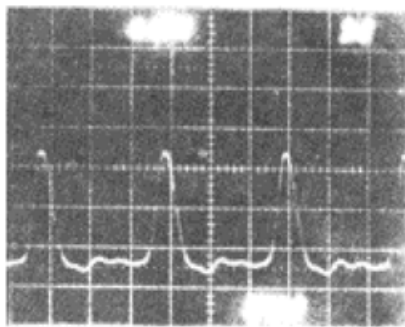


Fig. 4 Output waveform of actively mode-locked Nd:YVO₄ laser at 80 MHz repetition rate

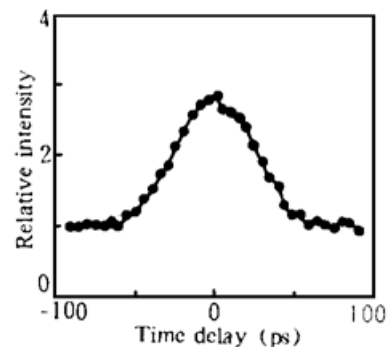


Fig. 5 Autocorrelation trace of mode-locked pulses. The width of 61 ps of the trace corresponds to pulse width of 43 ps

窄的脉冲宽度。实验中发现,当泵浦功率提高到 200 mW 时,脉冲宽度大于 200 ps,这已超出了自相关仪的测量范围,并且此时的锁模状态不稳定。作者认为这与声光调制器的调整状态和晶体的自相位调制有关,而且由于泵浦的光斑尺寸比较大,泵浦功率提高到一定的程度,高阶横模很难通过调整腔结构而抑制。

按照 Kuizenga 的锁模理论,达到稳态时的锁模脉冲宽度为^[5]

$$\tau_p = \frac{\sqrt{2 \ln 2}}{\pi} \frac{1}{(\theta_m f_m \Delta f)^{1/2}} g^{1/4} \quad (2)$$

其中 θ_m 为声光调制器的调制深度; f_m 为调制器驱动频率; Δf 为激光工作介质的增益带宽,对 Nd·YVO₄ 晶体, $\Delta f = 288$ GHz; g 为腔内往返饱和增益系数, $g = \frac{1}{2} \ln(1/R_{\text{eff}})$, R_{eff} 为计及腔内各种损耗的等效反射率。在准连续状态下测量弛豫振荡的周期可以定量地得到 g 的值。由激光弛豫振荡理论^[6]

$$\Delta t = \frac{2\pi \sqrt{\tau_2 \tau_c}}{\sqrt{r - 1}} \quad (3)$$

这里 τ_2 为介质的上能级寿命,在本实验中 $\tau_2 = 90 \mu\text{s}$; $r = P/P_{\text{th}}$ (P , P_{th} 分别是泵浦功率和阈值功率), τ_c 为与腔内各种损耗相关的光子寿命。实验中,在泵浦功率为 120 mW 时, $\Delta t = 15 \mu\text{s}$ 。由此算得 $R_{\text{eff}} = 91.8\%$, 即 $g = 0.043$ 。

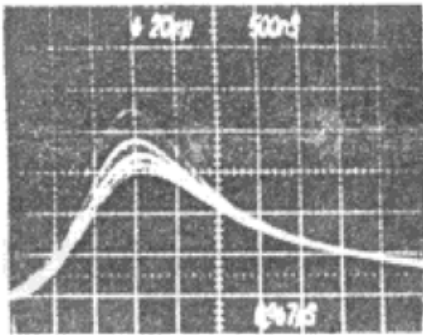


Fig. 6 Self-amplitude-modulation of the diode-pumped Nd·YVO₄ laser

将以上参数代入(2)式,按照稳态锁模理论,在本实验中可获得的最窄脉冲宽度为 51 ps,实验中获得脉冲宽度窄于理论预测。这是由于腔内存在着自相位调制,使得在锁模脉冲的形式过程中不只有振幅调制,还有位相调制。而在 Kuizenga 的理论中,只考虑到振幅调制,由此造成了理论和实验结果的差异。

关闭声光调制器的驱动功率,观察到了明显的调制现象(图 6)。这种调制现象曾在灯泵^[7]和激光二极管泵浦^[8]的 Nd·YAG 激光器中观察到,但在文献[6, 7]中的泵浦功率密度都远大于本实验。这说明 Nd·YVO₄ 的非线性折射率要比 Nd·YAG 高,而正是这种自相位调制导致的自锁模使得实验中得到的锁模脉冲宽度窄于理论预测值。

5 含自相位调制的稳态锁模理论

由于自相位调制而引起的往返相移可写为:

$$\Phi_{PM}(t) = (\pi/\lambda) n_2 I(t) l \quad (4)$$

这里 λ 为激光波长, n_2 为介质的非线性折射率, $I(t)$ 为沿光轴方向的光场强度。考虑形如 $f_1(t) = A \exp(-\alpha t^2) \exp[i(\omega t + \beta t^2)]$ 的起始脉冲,代入上式即可以得到:

$$\Phi_{PM} = \frac{2\pi}{\lambda} n_2 l A^2 \exp(-2\alpha t^2) \quad (5)$$

考虑到自相位调制的有效作用时间就是在 $t = 0$ 附近,因此可对(5)式作泰勒展开:

$$\begin{aligned} \Phi_{PM}(t) &= \frac{2\pi}{\lambda} n_2 l A^2 (1 - 2\alpha t^2) \\ &= \delta_{PM} (1 - 2\alpha t^2) \end{aligned} \quad (6)$$

这里 $\delta_{SPM} \equiv \frac{2\pi}{\lambda} n_2 I A^2$; 显然自相位调制的作用相当于一个相位调制器, 其调制幅度与腔内光强有关。它的传递函数可以表示为:

$$T_{SPM} = \exp[-i\delta_{SPM}(1 - 2\alpha_1 t^2)] \quad (7)$$

由此, 仿照文献[9], 可以导出光脉冲在腔内往返一次之后变为:

$$f_s(t) = \frac{r_1 r_2 A \exp(g_0)}{2} \sqrt{\frac{1}{\alpha_1 - i\beta_1}} \exp(i\omega_0 t) \exp\{[2\delta_i^2(\pi f_m)^2 + (1/4Q)]t^2\} \\ \times \exp[-i\delta_{SPM}(1 - 2\alpha_1 t^2)] \quad (8)$$

上式中各参数的物理意义同文献[9]。

再次利用自恰解条件有:

$$\alpha_1 = 2\delta_i^2(\pi f_m)^2 + \operatorname{Re}\left(\frac{1}{4Q}\right) \quad (9)$$

$$\beta_1 = -\operatorname{Im}\left(\frac{1}{4Q}\right) + 2\delta_{SPM}\alpha_1 \quad (10)$$

将(9)(10)两式展开得到:

$$\alpha_1 = 2\delta_i^2(\pi f_m)^2 + \frac{\alpha_1(1 + 4g_0\alpha_1 T_2^2) + 4g_0\beta_1^2 T_2^2}{(1 + 4g_0\alpha_1 T_2^2)^2 + (4g_0\beta_1 T_2^2)^2} \quad (11)$$

$$\beta_1 = 2\delta_{SPM}\alpha_1 + \frac{\beta}{(1 + 4g_0\alpha_1 T_2^2)^2 + (4g_0\beta_1 T_2^2)^2} \quad (12)$$

对一般的激光二极管泵浦主动锁模激光器, $4g_0\alpha_1 T_2^2 \ll 1$, $4g_0\beta_1 T_2^2 \ll 1$, 则忽略(12)式分母中的高阶项, 并经简化得到:

$$\beta = \frac{\delta_{SPM}}{4g_0 T_2^2} \quad (13)$$

$\beta_1 \neq 0$ 说明, 此时的激光脉冲是含啁啾项的, 即脉冲不是变换极限的, 这与一系列的实验结果是相符合的。

将(13)式代入(11)式, 并利用相同的近似条件对其进行简化, 得到 α_1 应满足的关系式:

$$4g_0 T_2^2 \alpha_1^2 + 2\delta_{SPM}\alpha_1 - 2\delta_i^2(\pi f_m)^2 - \frac{\delta_{SPM}}{4g_0 T_2^2} = 0 \quad (14)$$

在 $\delta_{SPM} = 0$ 的情况下, 上式给出与常规锁模理论相同的公式形式。由此得到:

$$\alpha_1 = \frac{-2\delta_{SPM} + \sqrt{4\delta_{SPM}^2 + 16g_0 T_2^2(\delta_i^2 \pi^2 f_m^2 + \frac{\delta_{SPM}^2}{4g_0 T_2^2})}}{8g_0 T_2^2} \quad (15)$$

首先估计一下 δ_{SPM} 的量级, 以厚为 2 mm, 输出功率 50 mW 的 Nd:glass 锁模激光器为例, 算得 $\delta_{SPM} \approx 84 \times 10^{-7}$ 。图 7 为 τ_p 随 δ_{SPM} 变化的情况。从中可以发现, 随着 δ_{SPM} 的增加, τ_p 逐渐减小。但这并不意味着脉冲可以无限制地窄下去, 因为 δ_{SPM} 越大, 实际上就导致腔与调制器的匹配程度越差, 从而使锁模变得不稳定, 甚至无法形成稳定的锁模脉冲, 这也是为数值计算所证明了的^[10]。

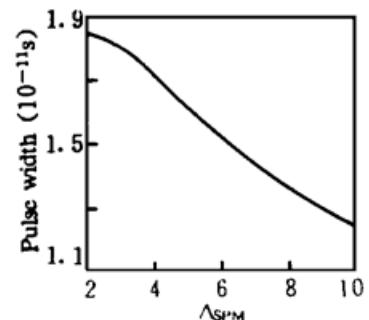


Fig. 7 Pulse duration as function of δ_{SPM}

结 论 报道了利用国产激光二极管泵浦 Nd:YVO₄ 锁模激光器的实验结果, 锁模脉冲宽度为 43 ps, 在泵浦功率 120 mW 时获得了 7 mW 的输出功率。此系统仍有相当大的改进余地, 重点之一是重新设计泵浦光的耦合系统, 提高泵浦光束的质量, 使腔基横模的晶体中的光腰大于泵浦光腰。在锁模的调整过程中如果能够实时地测量输出脉冲的宽度, 并据此细调声光调制器, 相信可以得到更短脉冲。

参 考 文 献

- [1] G. P. A. Malcolm, A. I. Ferguson, Mode-locking of diode laser-pumped solid-state lasers. *Opt. Quant. Electron.*, 1992, **24**(7) : 705~ 717
- [2] J. J. Zayhowski, C. Dill III, Coupled-cavity electro-optically Q-switched Nd:YVO₄ microchip lasers. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(7) : 716~ 718
- [3] H. W. Kogelnik, E. P. Ippen, A. Dienes *et al.*, Astigmatically compensated cavities for cw dye lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1972, **QE-8**(3) : 373~ 378
- [4] M. J. F. Digonnet, C. J. Gaeta, Theoretical analysis of optical fiber laser amplifier and oscillator. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(3) : 333~ 342
- [5] D. J. Kuizenga, Hsot-pulse oscillator development for the Nd-glass laser-fusion system. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1981, **QE-17**(9) : 1694~ 1708
- [6] A. E. Siegman, *Laser*, University science, New York, 1975, Chapter 5
- [7] 樊立明, 朱国英, 陈时胜等, Nd:YAG 激光器中的自锁模. *光学学报*, 1992, **2**(1) : 16~ 20
- [8] 陈有明, 周复正, 胡文涛等, 半导体激光侧面泵浦主动锁模 Nd:YAG 激光器. *中国激光*, 1995, **22**(5) : 330~ 335
- [9] 亚里夫, 量子电子学, 上海, 上海科学技术出版社, 1983 : 10
- [10] H. A. Haus, Y. Silberberg, Laser mode-locking with addition of nonlinear index. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1986, **QE-22**(2) : 325~ 331

All Solid-State Mode-Locked Laser Pumped by a Home-Made Laser Diode

Li Chuandong Hu Wentao Zhang Zhengquan Xu Zhizhan

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 18 March 1996; revised 29 August 1996)

Abstract The experimental results of mode-locked Nd:YVO₄ laser pumped by a home made laser diode are reported. Pumped by 120 mW, the laser generated the cw mode-locked pulse train with 43 ps duration and 7 mW output power. Self-amplitude-modulation was observed in the experiment. The fomula of mode-locking with self-phase modulation was derived.

Key words mode-locking, self-phase-modulation.