

文章编号: 1001-3806(2007)06-0613-03

非线性光纤环形镜掺铒光纤激光器的实验研究

曹 玲, 杨玲珍*, 郭雄英, 周希坚

(太原理工大学 理学院 物理系, 太原 030024)

摘要: 为了研究掺铒光纤激光器超短脉冲的产生, 采用增益平坦型掺铒光纤放大器、两个偏振控制器以及 3 个耦合器, 利用非线性光纤环形镜加成脉冲锁模技术, 通过改变偏振控制器的方向, 获得最大输出功率为 0.6mW 的脉冲输出, 对应的光谱宽度 9nm、中心波长 1561nm、脉冲宽度 434ps、脉冲的重复频率为 1.1MHz。该脉冲经过掺铒光纤放大器放大后, 最大输出功率为 10.8mW。放大后锁模脉冲的中心波长保持不变、光谱带宽稍有变窄、输出功率明显增大、脉冲宽度展宽为 495ps。实验结果表明, 采用商用的掺铒光纤放大器可实现结构简单、调节方便的掺铒光纤激光器超短脉冲输出, 且掺铒光纤激光器可以实现自启动, 并长时间稳定锁模工作。

关键词: 激光技术; 非线性光纤环形镜; 被动锁模; “8”字形腔

中图分类号: TN 248.1 文献标识码: A

Experimental study Er³⁺-doped fiber laser based on the nonlinear optical loop mirror

CAO Ling, YANG Ling-zhen, GUO Xiong-ying, ZHOU Xi-jian

(Department of Physics, College of Sciences, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract To study the generation of ultrashort pulse in Er³⁺-doped fiber laser, the fiber laser was composed of a gain flattened erbium doped fiber amplifier (EDFA), two polarization controllers (PCs) and three couplers. A nonlinear optical loop mirror was used for mode locking. By adjusting the position of PCs, the pulse at 1561nm at a repetition rate 1.1MHz was obtained. The maximum output power of the pulse was 0.6mW with 434ps pulse width and 9nm spectrum width. After amplified by EDFA, the maximum power of the output pulse is 10.8mW and the center wavelength did not change, the spectrum width became slightly narrow, the output power increases greatly and the pulse width of the amplified pulse was 495ps. The experimental results show that the ultrashort pulse could be generated by the Er³⁺-doped fiber laser using a commercial EDFA. The self starting of the mode locked fiber laser can be achieved easily and the mode locked operation can be hardly influenced by the experimental environment.

Key words laser technique; nonlinear optical loop mirror; passively mode locked; figure-of-eight cavity

引 言

被动锁模掺铒光纤激光器结构简单, 可以直接产生变换极限超短光脉冲, 是未来超高速、长距离光纤通信系统中的理想光脉冲源。目前实现脉冲输出的掺铒光纤激光器被动锁模技术主要有两种: 一种是利用半导体可饱和吸收体来实现, 另一种是采用加成脉冲锁模技术。基于 Sagnac 光纤干涉仪的“8”字形激光腔^[1]融合了非线性光纤环形镜 (nonlinear optical loop mirror

和相加脉冲锁模的优点: 极少受外界环境变化的影响, 可长时间稳定锁模工作, 容易实现锁模脉冲光纤激光器工程化^[2]。已经受到世界各国科研人员的密切关注。

“8”字形锁模激光器自启动锁模, 最早由英国的 RICHARDSON 提出, 实验使用 Ti:sapphire 980nm 光抽运掺铒光纤, 产生了脉宽 320fs、带宽 9nm、重复频率为 50MHz~10GHz 的脉冲^[3]。2000 年, JEON 等人在“8”字形被动锁模光纤激光器中插入声光可调谐滤波器, 得到调谐范围在 50nm 的宽带可调谐光纤激光器, 重复频率 2.49MHz、脉冲宽度为 1.5ps^[4]。2002 年, ILDAY 又通过啁啾脉冲放大再压缩的方法, 利用 NOIM 得到脉宽 100fs 的飞秒脉冲输出^[5]。2006 年, MA 等人采用 NOIM 被动锁模光纤激光器, 获得了自启动锁模, 在中心波长 1053nm 时, 测得光谱带宽 6nm、

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60577019); 山西省留学回国人员科研基金资助项目 (20041)

作者简介: 曹 玲 (1978-), 女, 硕士研究生, 现主要从事掺铒光纤激光器的研究。

* 通讯联系人。E-mail: office_science@tyut.edu.cn

收稿日期: 2006-08-24 收到修改稿日期: 2006-09-13

脉冲宽度 234 375ps, 输出功率 2.05mW、重复频率 3.842MHz^[6]。作者采用增益平坦型掺铒光纤放大器、两个偏振控制器以及 3 个耦合器组成光纤激光器, 并利用非线性光纤环形镜相加脉冲锁模实现掺铒光纤激光器超短脉冲输出。

1 NOIM 的“8”字形腔光纤激光器锁模的物理机理

用一段光纤将光纤耦合器的两个输出端口连接起来形成一个环, 构成光纤环镜。如图 1 所示。据光纤

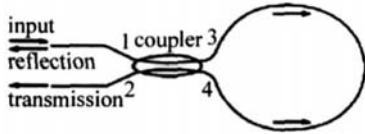


Fig 1 The fiber loop mirror configuration

环的透射率公式^[7]:

$$T = 1 - 2\alpha(1 - \alpha) \{1 + \cos[(1 - 2\alpha) \gamma P_0 L]\} \quad (1)$$

式中, T 为透射率, α 为耦合器的耦合比, γ 为非线性系数, L 为环镜长度, P_0 为输入功率。在自相位调制效应的情况下, NOIM 的透过率与耦合器的耦合比、环镜长度和输入功率有关。

当耦合比 $\alpha = 0.5$ 时, $T \equiv 0$ 即环形镜对任何功率信号的反射率均为 100% (不计耦合器损耗时), 此时 NOIM 相当于一个全反射镜。

当耦合比 $\alpha \neq 0.5$ 时, NOIM 的透射率随入射光的功率周期性变化, 当输入功率较小且 α 趋近 0.5 时, 输入光束将基本上被 NOIM 反射。

脉冲峰值功率满足 $|1 - 2\alpha \gamma P_0 L| = m\pi$ (m 是整数)。当 m 为偶数时, 透射率最小 $T_{\min} = 1 - 4\alpha(1 - \alpha)$, 此时 NOIM 相当于一个全反镜。当 m 为奇数时, 透射率最大 $T_{\max} = 1$, NOIM 就有 100% 的透射率, 这就是用 NOIM 进行被动锁模的物理机理, 一般取 $m = 1$, 因为这样需要较小的输入功率。自相位调制引起的相移就会使输入信号 100% 被透射。

“8”字形腔掺铒光纤激光器基于上述锁模机理工作。输入光经过一个非 3dB 耦合器, 被分成沿相反方向传输、不同强度的两束光, 反向传输的两束光由于强度不同, 虽然在光纤中经历相同的光程, 但由光纤中自相位调制、交叉相位调制等非线性效应引起的非线性相移却大大不同, 两束光在环中传输一周后在这个非 3dB 耦合器相干输出。能量较小的脉冲前后沿部分被反射, 而能量较高的脉冲峰值部分被透射, 在这类可饱和吸收体作用下^[8], “8”字形光纤激光器就形成相加脉冲锁模, 产生超短脉冲输出。NOIM 的耦合比在接近 50:50 时锁模效果最佳^[9], 为了得到彻底的锁模, 本

实验中采用以下方案进行锁模: 实验中采用一个 3dB 耦合器, 同时在环境中非对称地引入一个耦合器, 这样由于此耦合器引入的非对称损耗, NOIM 中正反方向传输不同强度的光, 将引起不同的非线性相移, 在输出端干涉压缩光脉冲, 在“8”字形激光腔内往复运转, 形成稳定的锁模运转, 信号光将通过光纤输出耦合器输出。

2 实验装置

“8”字形腔被动锁模光纤激光器结构图, 如图 2 所示。掺铒光纤放大器 (erbium doped fiber amplifier, EDFA) 的基本部分包括有: 掺铒光纤, 抽运光源, 光无

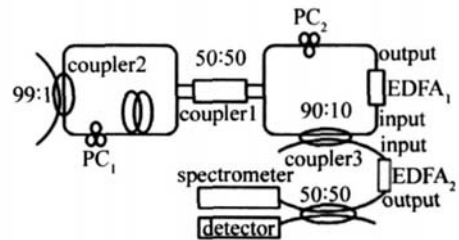


Fig 2 Schematic diagram of the figure-of-eight cavity passively mode-locked fiber laser

源器件 (包括耦合器、光波分复用器、光纤连接器、隔离器等)。掺铒光纤、抽运光源的作用是提供增益; 光隔离器的作用是抑制光反射, 确保光放大器工作稳定, 它的插入损耗很低。EDFA 同时起了提供增益和光隔离器的作用, 可以提高注入光纤的功率。左边的环形腔是一个基本 NOIM, 由光纤耦合器 2 (coupler2, 耦合比为 99:1)、普通石英光纤长 150m、偏振控制器 (PC₁) 组成, 环中相对传播的两束光的强度差由非 NOIM 中非对称放置的耦合器 2 (Coupler2) 引入。采用耦合比为 90:10 的光纤耦合器 3 (coupler3) 耦合输出。PC₁, PC₂ 为光纤偏振控制器, 用来改变光纤内传输光的偏振态, 两个光纤环中间的耦合器为一个 2×2 端口的光纤耦合器 1 (coupler1, 耦合比为 50:50)。

实验中利用带宽 500M 的示波器 (Tektronix TDS3052) 来观测激光器输出的时域特性, 用光谱仪 (Agilent86140B) 观测激光器输出的频域特性。利用光功率计 (PM S-1BF) 测量光纤激光器的输出功率。超快光电探测器 (XPDV 2020) 结合带宽为 50GHz 的取样示波器 (Agilent86100B) 测量脉冲的宽度。

3 实验结果

当激光器达到锁模阈值功率后, 通过联合调节偏振控制器 PC₁, PC₂, 获得稳定锁模脉冲输出。图 3 图 4 为 EDFA₁ 抽运功率 100mW 时的光谱图、锁模脉冲序列图。图 5 为脉冲波形图 (可以测出脉冲宽度), 光

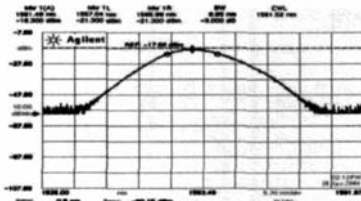


Fig 3 Spectra of mode-locked pulse

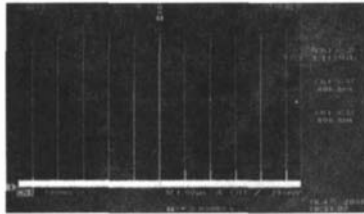


Fig 4 Mode-locked pulse train

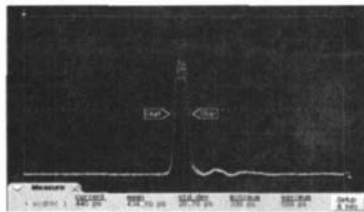
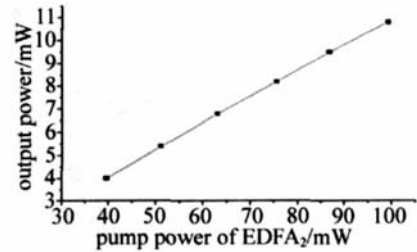


Fig 5 Pulse waveform

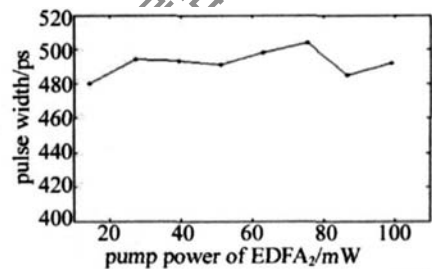
纤长度为 150m 时, 获得中心波长 1561nm, 脉冲宽度 434ps 锁模脉冲输出, 光谱带宽为 9nm, 此时获得最大输出功率为 0.6mW, 重复频率为 1.1MHz, 锁模过程可以自启动, 可长时间稳定锁模工作。

实验测得, 获得连续光输出时 EDFA₁ 的阈值为 13mW, 光纤激光器自启动锁模阈值 72mW, 达到阈值功率后, 抽运功率变化对锁模脉冲脉宽、锁模脉冲的中心波长没有影响。而改变光纤偏振控制器的状态, 脉宽及脉冲的中心波长均受到影响。这是由于通过改变偏振控制器的状态, 从而得到不同参数的脉冲, 中心波长的改变则是由于锁模器件的线性特性所致。且激光器实现锁模后, 降低抽运功率到锁模阈值以下时, 激光器仍能实现锁模输出。当抽运功率降至 43mW 时, 仍可维持稳定的锁模状态。激光器抽运功率低于 43mW 以下时, 锁模脉冲消失; 这时提高抽运功率至 43mW 以上, 仍不能实现锁模运转, 直到将抽运功率提高至 72mW, 激光器恢复锁模工作。以上表明激光器中存在抽运功率回滞现象, 这可解释为当抽运功率较低时, 激光器输出连续光, 腔内光功率小, 激光器无法自启动; 而当锁模脉冲形成后, 即使降低抽运功率, 单脉冲功率仍然很高, 足以维持 NOLM 的非线性开关作用。

EDFA₁ 抽运功率为 100mW 时产生的超短脉冲输入到 EDFA₂ 装置, 用于进行超短脉冲的放大, 实验测得: 中心波长为 1561nm, 脉冲宽度为 495ps, 光谱带宽为 8nm, 最大输出功率为 10.8mW。图 6 为 EDFA₂ 抽运功率与输出功率的关系图。

Fig 6 The relationship of pump power of EDFA₂ and output power

EDFA₂ 抽运功率变化对锁模脉冲的中心波长没有影响, 光谱带宽稍有变窄, 输出功率明显增大, 在不同情况锁模脉冲宽度均有展宽现象: 当 EDFA₂ 抽运功率一定的条件下, EDFA₁ 抽运功率变化对锁模脉冲脉宽几乎没有影响 (EDFA₂ 抽运功率为 99mW, 脉冲脉宽为 495ps), 当 EDFA₁ 抽运功率一定的条件下, EDFA₂ 抽运功率变化对锁模脉冲脉宽有影响 (见图 7)。这两种情况与前面实验得到的 434ps 有展宽。

Fig 7 The relationship of pump power of EDFA₂ and pulse width

4 结 论

基于非线性光纤环形镜相加脉冲锁模技术构成“8”字形腔掺 Er³⁺ 光纤激光器, 采用增益平坦型掺铒光纤放大器、偏振控制器及耦合器实现稳定的、自启动被动锁模运转, 获得了中心波长 1561nm、重复频率 1.1MHz 最大输出功率为 10.8mW 的超短光脉冲。由于此激光器中没有加入色散补偿器件, 输出脉冲被大大展宽, 可以预见, 如果在“8”字形腔中采用用于啁啾补偿的色散位移光纤并进一步优化环境的长度、增益光纤长度, 则脉冲宽度可得到压缩。

参 考 文 献

- [1] DENNIS M L, DULING IN. Role of dispersion in limiting pulse width in fiber lasers [J]. *A P L*, 1993 62(23): 2911~2912
- [2] AVDOKHINA V, POPOV S V, TAYLOR J R. Totally fiber integrated figure of eight femtosecond source at 1065nm [J]. *Optics Express*, 2003 11(3): 265~269.
- [3] RICHARDSON D J, LAMING R I, PAYNE D N *et al*. 320fs soliton generation with passively mode-locked erbium fibre laser [J]. *Electron Lett* 1991 27(9): 730~732.
- [4] JEON M Y, LEE H K, AHN J T *et al*. Wideband wavelength tunable mode-locked fibre laser over 1557nm~1607nm [J]. *Electron Lett* 2000 36(4): 300~301.

(下转第 619 页)

(3) 对于图 3 中的 A 点, 必须分两种情况讨论。

第 1 种情况: 长波长光已经激励, 短波长光刚刚达到阈值。

此时 $P_{1s} = P_{2s} = 0$, 引入耦合因子 K_1 , 令 $P_{21} = K_1 \cdot P_{1s}$, 代入 (4) 式、(5) 式可得:

$$I_{2th} = qV_2 \left[\frac{N_{20}}{\tau_e} + K_1 \cdot \frac{\xi_2 |g_{21}|}{\xi_1 |g_{11}|} \left(\frac{I_{1th}}{qV_1} - \frac{N_{10}}{\tau_e} \right) \right] \quad (7)$$

式中, N_{10}, N_{20} 即为 A 点的载流子浓度, I_{1th}, I_{2th} 为长波长光激励后, 短波长光达到阈值时的抽运电流。由 (7) 式可以得到如图 5 所示的曲线 E_1 。

第 2 种情况: 短波长光已经激励, 长波长光刚刚达到阈值。

此时 $P_{11} = P_{21} = 0$, 引入耦合因子 K_2 , 令 $P_{2s} = K_2 \cdot P_{1s}$, 代入 (4) 式、(5) 式可得:

$$I_{2th} = qV_1 \left[\frac{N_{20}}{\tau_e} + K_2 \cdot \frac{\xi_2 |g_{21}|}{\xi_1 |g_{11}|} \left(\frac{I_{1th}}{qV_1} - \frac{N_{10}}{\tau_e} \right) \right] \quad (8)$$

式中, I_{1th}, I_{2th} 为短波长光激励后, 长波长光达到阈值时的抽运电流。由 (8) 式可以得到如图 5 所示的曲线 E_2 。耦合因子 K_1, K_2 定义为一定波长时顶腔与底腔平均光子数的比值, 在两腔载流子浓度确定的情况下, K_1, K_2 值就确定了, 具体计算方法可以结合传输矩阵和边界条件进行, 由于篇幅所限, 这里只给出计算结果: $K_1 = 3.17, K_2 = 0.32$ 。

由图 5 可以看出, 阈值电流曲线 D_1, D_2, E_1, E_2 把图分成了 4 个区域, 对应于 CC-VCSELs 的 4 种激励状态, 分别为未激励, 长波长光 λ_1 激励, 短波长光 λ_2 激励, 长波长光 λ_1 与短波长光 λ_2 同时激励。通过控制顶腔和底腔的抽运电流可以选择激励状态。例如, 若需要长波长光 λ_1 与短波长光 λ_2 同时激励, 只需顶腔和底腔电流取值在曲线 E_1 与 E_2 之间即可。其中的 C 点为长波长光 λ_1 与短波长光 λ_2 同时达到阈值时的阈值电流, 称为双阈值点。本文中计算得到的双阈值点为 (1 mA, 0.75 mA), 而文献 [9] 中根据速率方程模型计算得到的双阈值点为 (0.6 mA, 1.1 mA), 实验结果为 (0.6 mA, 0.3 mA)。与文献 [9] 中的计算结果相比较, 本文中计算结果虽然因为取值与计算误差的原因在数

值上有差别, 但是电流曲线趋势基本一致, 并且双阈值点也更接近实验结果, 证明了本方法的可行性。

3 结 论

采用传输矩阵和载流子速率方程相结合的方法分析和探讨了垂直耦合腔面发射半导体激光器的阈值特性, 利用这种方法得到了与以往的实验及理论研究相一致的结果, 证明了这种方法的可行。根据阈值电流曲线可以把 CC-VCSELs 分为 4 种激励状态, 并且可以通过控制顶腔和底腔的抽运电流来选择所需的激励状态, 研究结果对 CC-VCSELs 的实际应用具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- [1] KEN CH I I Surface emitting laser— its birth and generation of new optoelectronics field [J]. IEEE Journal Select Topics in Quantum Electronics 2000, 6(6): 1201~1215.
- [2] KOSAKA H. Smart integration and packaging of 2D VCSELs for high speed parallel links [J]. IEEE Journal Select Topics in Quantum Electronics 1999, 5(2): 184~193.
- [3] WANG C L, PAN C L Tunable multiterahertz beat signal generation from a two-wavelength laser diode array [J]. Opt Lett 1995, 20(11): 1292~1294.
- [4] SUZUKI T, OHIDA M, YOKOYAMA K *et al* Stroboscopic two-wavelength interferometer for ir line displacement measurement [J]. CLEO Lasers and Electro-Optics 2003, 2: 638.
- [5] PELLAND N I P, STANLEY R P, HOUDRE R *et al* Dualwavelength emission from coupled semiconductor microcavity [J]. A P L, 1997, 71(7): 864~866.
- [6] CARLIN J F, STANLEY R P, PELLAND N I P *et al* The dualwavelength bit vertical cavity surface emitting laser [J]. A P L, 1999, 75(7): 908~910.
- [7] BRUNNER M, GULDEN K, HOVEL R *et al* Continuous-wave dualwavelength lasing in a two-section vertical cavity laser [J]. IEEE Photonics Technology Letters 2000, 12(10): 1316~1318.
- [8] GRASSO D M, CHOQUETTE K D. Threshold and modal characteristics of composite resonator vertical cavity lasers [J]. IEEE J Q E 2003, 39(12): 1526~1530.
- [9] BADILITA V, CARLIN J F, ILEGEM S M. Rate equation model for coupled-cavity surface-emitting lasers [J]. IEEE J Q E 2004, 40(12): 1646~1656.
- [10] JIA X K, LUO B, PAN W *et al* Research of gain of vertical cavity semiconductor optical amplifiers based on transfer matrix method [J]. Laser Technology 2005, 29(4): 377~379(in Chinese).

(上接第 615 页)

- [5] ILDAY F O, WISE F W. High energy femtosecond stretched pulse fiber laser with a nonlinear optical loop mirror [J]. Opt Lett 2002, 27(17): 1531~1533.
- [6] MA H Q, ZHAO W, ZHANG W *et al* Wavelength passively mode-locked fiber laser [J]. Laser Technology, 2006, 30(3): 289~291(in Chinese).
- [7] DORAN N J WOOD D. Nonlinear optical loop mirror [J]. Opt Lett

1988, 13(1): 56~58.

- [8] WANG Zh Y, YU Zh H, GAO P L *et al* Figure-eight shape actively and passively mode-locked erbium-doped fiber laser [J]. Acta Optica Sinica 2003, 23(11): 1341~1345(in Chinese).
- [9] HEH R, YUAN X H. Analysis of the characteristics of the all-optical switch based on nonlinear amplifying loop mirror [J]. Chinese Journal of Lasers 2005, 32(3): 418~422(in Chinese).