

全光纤超短脉冲掺 Yb^{3+} 光纤环形激光器^{*}

黄绣江^{1) 2) 3)} 刘永智²⁾ 隋 展³⁾ 李明中³⁾ 李 忻⁴⁾ 林宏兔³⁾ 王建军³⁾

1) 中国电子科技集团公司第二十三研究所, 上海 200437)

2) 电子科技大学光电信息学院, 成都 610054)

3) 中国工程物理研究院激光聚变中心, 绵阳 621900)

4) 上海贝尔阿尔卡特股份公司研创中心, 上海 201206)

(2005 年 4 月 15 日收到, 2005 年 7 月 4 日收到修改稿)

讨论了自启动被动锁模掺 Yb^{3+} 光纤环形激光器产生短脉冲的机理, 并研制出全光纤结构超短脉冲掺 Yb^{3+} 光纤环形激光器. 采用两个 976nm 半导体激光器级联抽运作为抽运源, 高掺杂浓度掺 Yb^{3+} 光纤作为增益介质, 利用光纤的非线性偏振旋转效应, 得到自启动、十分稳定的 ps 量级锁模光脉冲. 激光器锁模阈值功率 260mW, 输出功率 25mW, 锁模光脉冲中心波长 1056nm, 3dB 带宽 11.7nm, 重复频率 20MHz. 与其他结构光纤激光器相比, 这种全光纤结构具有更高的效率和更好的稳定性.

关键词: 环形光纤激光器, 高掺杂浓度掺 Yb^{3+} 光纤, 自启动, 被动锁模

PACC: 4260, 4260D

1. 引言

利用掺稀土光纤锁模激光器获得超短脉冲, 在光纤通信、超快光学、光纤传感、工业加工、光信息处理、激光制导、医疗、惯性约束快点火等领域都有着重要的应用, 因此近年来引起人们的广泛关注, 并已在 Nd^{3+} , Tm^{3+} , Er^{3+} , Yb^{3+} 等光纤中获得了锁模飞秒光脉冲输出^[1-4]. 利用光纤激光器锁模获得超短脉冲主要实现方法有被动锁模法、主动锁模法和主被动锁模法, 其中, 被动锁模激光器是利用光纤或其他元件中的非线性光学效应实现锁模工作的, 因此其脉冲宽度不受调制器件调制能力的限制, 在一定条件下, 可以实现自启动锁模工作, 获得宽度很窄(fs 量级)的脉冲, 且不存在超模噪声^[5-7].

掺 Yb^{3+} 石英光纤具有很宽的吸收谱和发射谱, 不存在激发态吸收、浓度淬灭和多声子跃迁等消激发过程, 可以通过选择不同波长的抽运源, 在 970—1200 nm 波长范围内获得激光输出, 因此掺 Yb^{3+} 激光器引起了人们广泛的研究兴趣. 以往实验掺 Yb^{3+} 激光器获得超短脉冲, 主要采用的是非全光纤直线腔结构, 插入损耗大、技术复杂、实用化比较困

难^[8-10]. 惯性约束聚变(ICF)激光驱动前端系统要求主振荡器输出 1053nm, fs 或者 ps 级超短脉冲, 并有一定能量、高信噪比以及良好的稳定性, 以作为诊断激光束的“种子光源”. 本文报道的超短脉冲掺 Yb^{3+} 光纤激光器利用光纤的非线性偏振旋转效应实现被动锁模, 输出光谱包含 1053nm 波长, 可获得自启动、十分稳定的 ps 量级光脉冲, 具有作为主振荡器应用于 ICF 激光驱动前端系统的重要价值.

2. 实验装置及原理

实验装置如图 1 所示, 掺 Yb^{3+} 光纤环形腔体主要由两段高掺杂浓度 Yb^{3+} 光纤、偏振相关型光纤隔离器(ISO/Polarizer)、两个偏振控制器 PC1 和 PC2, 980nm/1053nm 波分复用器(WDM)、输出耦合器(Coupler)组成. 抽运源是两台中心输出波长为 976nm 的半导体抽运激光器, 其最大输出功率约为 230mW, 抽运光经 980nm/1053nm 波分复用器件耦合进入两段掺 Yb^{3+} 光纤. 本文采用两台抽运源级联抽运掺 Yb^{3+} 光纤, 实验研究表明, 级联抽运的方式比双向抽运、前向或者后向抽运具有更高的抽运效率和更好的稳定性. 两段 Yb^{3+} 光纤均为高掺杂浓度光

^{*} 国家高技术研究发展计划(批准号: 2003AA49060)资助的课题.

[†] E-mail: xiujianhuang_99@163.com

纤,其掺杂浓度为 $N = 1.93 \times 10^{26}/\text{m}^3$,对 976nm 的吸收为 2100dB/m,模场半径 2.4 μm ,数值孔径 $\text{NA} = 0.18$,截止波长 $\leq 826\text{nm}$,由于光纤掺杂浓度很高,由 Barnard 的理论,掺杂浓度比较高时,有利于提高激光器的斜效率,降低激光阈值^[11],因此采用较短的光纤就可以获得激光输出.在掺 Yb 光纤激光器中,对于确定的波长,增大掺杂浓度或者光纤长度可以使更长波长的激光获得最大增益,因此在损耗与波长无关时,在一定的掺杂浓度下,增长光纤可以使得更长波长的激光运转,为了获得 1053nm 的激光,光纤长度对应于一个最佳值.实验采用的两段掺镱光纤长度分别为 11cm,15cm,输出耦合器输出耦合比为 90:10.整个光纤激光器腔体采用全光纤结构,环形腔体总长度约为 14m.

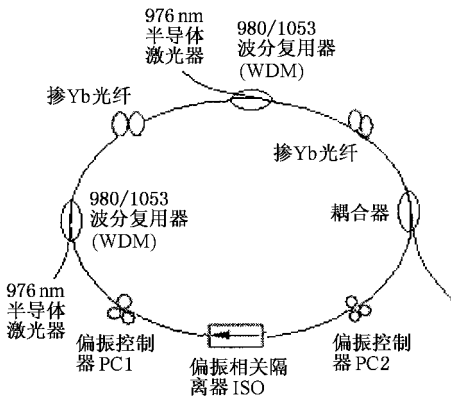


图 1 掺 Yb^{3+} 光纤环形激光器装置图

利用非线性偏振旋转效应实现被动锁模,获得短脉冲的工作原理是经过偏振相关型光纤隔离器的线偏光经过第一个偏振控制器 PC1 后变为椭圆偏振光,椭圆偏振光可以认为是强度不同的左旋与右旋圆偏振光的合成,当两个旋转方向不同的圆偏振光经过掺 Yb^{3+} 光纤得到增益放大时,经历腔内光纤的非线性效应(Kerr 效应)产生不同的非线性相移,相移量与腔内光强度有关,脉冲峰值比脉冲前后沿经历更多的旋转,因而经历更多的相移,在偏振灵敏型隔离器处产生相干叠加,即附加脉冲锁模效应(additive pulse mode locking)使得腔内产生自幅度调制可饱和吸收体,实现锁模窄化.第二个光纤偏振器 PC2 主要用于调整经历不同非线性相移干涉后光脉冲的偏振方向,使得光脉冲峰值经历小的损耗通过偏振灵敏型光纤隔离器,即光脉冲峰值通过隔离器并反复经过腔内增益放大,越来越强,而光脉冲的前后沿越来越弱,最后形成稳定的超短光脉冲^[12].与

半导体可饱和吸收体或光子晶体光纤实现锁模相比,非线性偏振旋转开关实现锁模采用全光纤结构,降低了由于非光纤结构元器件与光纤耦合所引起的腔体损耗,可以获得飞秒量级的超短脉冲.通常这种锁模机理称之为非线性偏转锁模,为了研究超短脉冲的形成机理,采用非线性薛定谔方程^[13,14]

$$i \frac{\partial A}{\partial z} - \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} + \gamma |A|^2 A = [(g - \alpha) A + M_{\text{NL}}(A) A], \quad (1)$$

式中 A 为归一化电场包络, β_2 为群速色散, γ 为克尔非线性系数, g 为增益系数, $g = g_0 (1 + \sigma P_{\text{av}})$, g_0 为小信号路径平均增益, $P_{\text{av}} = \frac{1}{T_c} \int_{-T_c/2}^{+T_c/2} A^2 d\tau$ 为脉冲波归一化平均功率, z, T 分别为群时延坐标系中的空间坐标和时间坐标, $\sigma = 1/P_{\text{sat}}$, P_{sat} 为增益媒质的饱和功率, T_c 为脉冲在谐振腔中循环一周所需的时间, α 为平均损耗系数, $M_{\text{NL}}(E) = -\alpha' + \gamma_3 |A|^2 - \gamma_5 |A|^4$, $\alpha', \gamma_3, \gamma_5$ 分别为自幅度调制作用所引入的线性路径平均损耗、三阶和五阶强度调制非线性系数.引入归一化电场包络 $q = A/\sqrt{P_0}$, 归一化空间坐标 $\xi = z/L_D$ 和归一化时间坐标 $\tau = T/t_0$, 则可将 (1) 式简化为

$$i \frac{\partial q}{\partial \xi} - \frac{1}{2} \text{sgn}(\beta_2) \frac{\partial^2 q}{\partial \tau^2} + |q|^2 q = [(g_e q + a_1 |q|^2 q - a_2 |q|^4 q)], \quad (2)$$

其中 $g_e = g - \Gamma$, $\Gamma = (\alpha + \alpha') L_D$, $a_1 = \gamma_3/\gamma$, $a_2 = \gamma_5/(\gamma^2 L_D)$, $P_0 = 1/(\gamma L_D)$, $L_D = t_0^2/|\beta_2|$. P_0 物理含义为基阶孤子脉冲峰值功率; t_0 为初始脉冲半宽度; L_D 为光纤的色散长度.

采用分步傅里叶方法对方程 (2) 进行了数值求解.结合具体实验,计算时各参数取值如下: $\sigma = 3.0$, $\alpha_1 = 0.15$, $\alpha_2 = 0.047$, $\Gamma = 0.05$, 初始信号是用零均值的高斯伪随机噪声来模拟掺 Yb^{3+} 光纤产生的自发辐射噪声.当增大抽运功率,使得腔内小信号增益系数增大至满足增益振荡条件 ($g_0 > \Gamma$),腔内的自发辐射才可以得到放大,并逐渐形成稳定振荡.图 2 为被动锁模光纤环形激光器自启动过程演化曲线图,图 3 为信号幅度演化图.

从图 2 和图 3 可以看出光脉冲的演化过程:自发辐射噪声在经历 SPM/XPM, GVD 和增益介质(光纤)的增益等共同作用后,在腔内经过几百次循环,

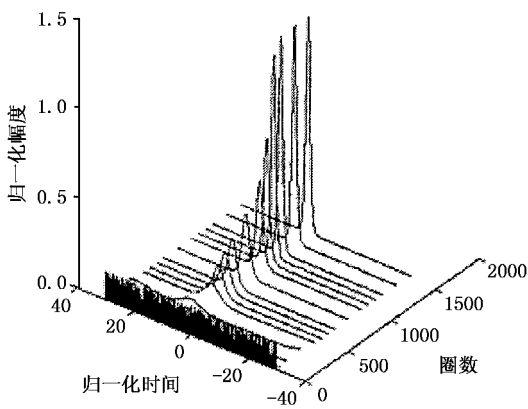


图 2 被动锁模光纤环形激光器光信号演化图

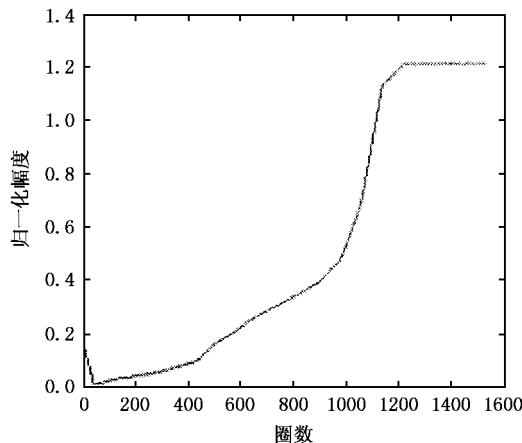


图 3 信号幅度演化图

结合可饱和吸收体的自振幅调制作用,最终形成稳定的超短脉冲光信号.在连续波演变成成为脉冲波过程中,最初 900 圈时信号的幅度变化比较缓慢,而在随后的 200 圈内信号幅度迅速增加.这是因为开始腔内增益和损耗还没有达到平衡,在 1200 圈时,增益与损耗基本上达到平衡,脉冲的形状和宽度基本上趋于稳定.从 1200 圈一直到 1500 圈,脉冲的幅度和形状始终保持不变,这说明被动锁模环形腔激光器系统已经过渡到一个稳定平衡态.通过调整光纤偏振控制器 PC1 和 PC2,改变抽运功率以及光纤长度、光纤掺杂浓度等参数,可以改变腔内光强度以及增益和损耗,使被动锁模环形腔激光器系统达到一个稳定平衡态.根据 Nir 的光纤激光器主偏振态理论^[15],通过偏振控制器来改变输入信号光的偏振态,当起偏器的偏转角平行于输出主偏振态时,对所有频率的输入信号而言,它们都具有相同的透射率,正是因为这种宽通带的特性,使激光器腔体中出现多纵模

振荡,从而为锁模创造条件,实现自启动锁模.

3. 实验结果及讨论

输入掺 Yb³⁺ 光纤环形激光器中的抽运功率达到锁模阈值后,通过调整光纤偏振控制器 PC1 和 PC2 的方位角,使掺 Yb³⁺ 光纤环形激光器达到自启动锁模,实验观察光纤激光器可以长时间稳定工作,日常工作时间内,工作平台的一般振动不影响其锁模质量及稳定性.图 4 是从示波器上拍摄到的稳定锁模脉冲序列,光脉冲的重复频率为 20MHz.由锁模的基本原理^[12],模式频率间隔 $\Delta\nu = c/L_{opt}$, c 为光速, L_{opt} 为腔内往返一次的光学长度.对于本文的环形腔总长度约为 14m,计算可得基频锁模光脉冲的重复频率约为 21MHz,可见光纤激光器输出的是基频锁模光脉冲.图 5 是对应锁模光脉冲的光谱曲线,中心波长为 1056nm,其光谱 3dB 带宽为 11.7nm,从光谱图上看,光纤激光器有很好的边模抑制特性.考虑变换极限情况,当二阶色散与自相位调制相互平衡时,可以获得变换极限脉冲,若产生的是双曲正割 (sech) 脉冲,时间带宽乘积约为 0.315 时,对应图 5 所示的光谱的脉冲宽度极限应为 100fs.然而,实际实验中,用掺 Yb³⁺ 光纤产生信号光波长为 1.0 μ m 左右,掺 Yb³⁺ 光纤所产生的锁模脉冲通常为一个啁啾脉冲,偏离傅里叶变换极限.正是由于啁啾脉冲引起平均孤子特征效应,因此光谱具有方形特征,这和 Kutz 的理论分析是一致的^[16].在实际测量中,用带宽 6GHz,采样率 20Gs/s 的数字示波器测得脉冲宽度为 60ps,受光电探测器响应速度的限制,可测得脉冲最窄宽度为 50ps,因此实际脉冲宽度在 ps 量级且由光谱估计小于 50ps.由锁模脉冲理论,脉冲宽度 $\propto$

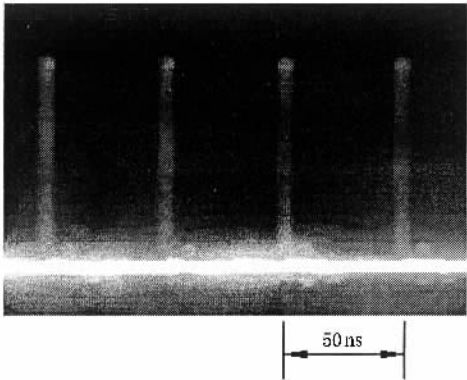


图 4 锁模脉冲序列

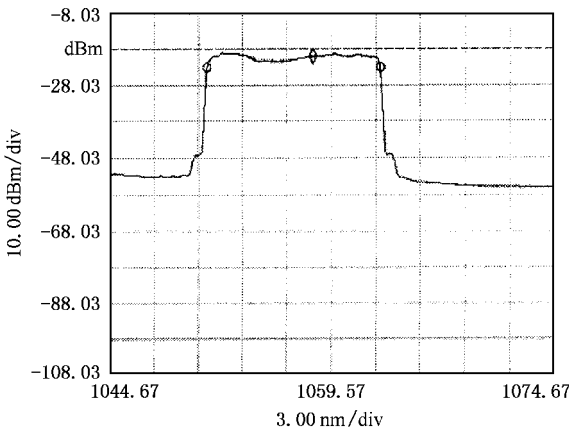


图 5 锁模脉冲序列对应的光谱图

$(|\overline{\beta_2}| L/4\pi)^{1/2[12]}$, 其中 $\overline{\beta_2}$ 为 GVD 的平均值, L 为腔长, 可见通过减小腔长和腔内净 GVD 可以得到更短的锁模脉冲. 我们采用的短光纤作为增益介质, 其单程增益低, 增加输出耦合器耦合比可以使腔内获得

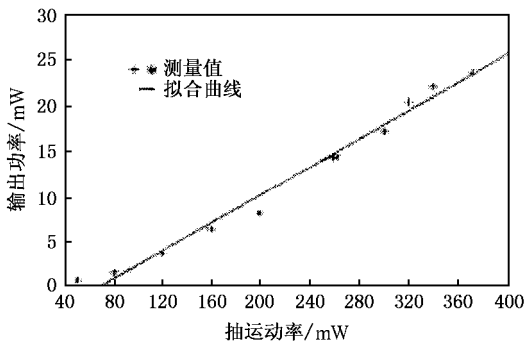


图 6 输出功率与抽运功率之间的关系

更多能量, 提高 Q 值, 使得输出功率增加, 而较长光纤具有高的单程增益, 增加输出耦合器耦合比过大时会出现增益饱和效应, 因此获得最大输出功率对应一最佳输出耦合比.

图 6 是输出信号激光功率与抽运光功率的关系曲线. 实验中测得的激光器锁模抽运阈值功率为 260mW, 连续激光输出的抽运阈值功率为 60mW. 由于采用的是两个抽运源级联抽运, 横坐标是入纤的总抽运功率. 在激光器达到锁模阈值后继续加大抽运功率, 锁模脉冲输出重复频率和光谱十分稳定, 没有因为腔内的增益提高出现高阶谐波锁模. 这是因为高掺杂 Yb^{3+} 光纤吸收系数大, 增大了噪声和散射的损耗, 使其不能获得足够的增益而起振形成高阶谐波锁模^[17], 因此采用高掺杂 Yb^{3+} 光纤不仅缩短了腔长, 而且有利于激光器的稳定输出. 采用高掺杂光纤获得短腔长结构激光器, 抽运功率达到锁模阈值后, 脉冲序列输出十分稳定, 对工作平台施加扰动, 输出脉冲也不消失, 激光器稳定锁模的时间达 4—5h.

4. 结 论

利用光纤的非线性偏振旋转效应实现了掺 Yb^{3+} 光纤环形激光器的被动锁模, 获得了 ps 量级, 重复频率为 20MHz, 中心波长 1056nm 的稳定锁模光脉冲. 从实验装置来看, 进一步缩短激光器腔长, 如减小腔内光纤元器件的尾纤长度, 采用光栅对或光纤光栅对脉冲进一步压缩, 可以获得功率更高, 脉宽达到 fs 量级的超短光脉冲.

[1] Luis A G , Lasse O , Tomi J *et al* 2004 *IEEE J. Selected Topics in Quant. Electron* **10** 129

[2] Myoung S O , Hee S P , Byoung Y K 2003 *IEEE Photonics Technology Letters* **15** 266

[3] Kim A D , Kutz J N , Muraki D J 2000 *IEEE J. Quant. Electron* **36** 465

[4] Kuroda K , Hideki T 1999 *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* **48** 1018

[5] Huang Z J 1998 *Acta Optica Sinica* **18** 962 (in Chinese) 黄志坚 1998 *光学学报* **18** 962]

[6] Cao S X 1997 *Acta Optica Sinica* **17** 667 (in Chinese) 曹顺湘 1997 *光学学报* **17** 667]

[7] Zhang J Y 2001 *Acta Optica Sinica* **21** 1482 (in Chinese) 张劲治 2001 *光学学报* **21** 1482]

[8] Chi R H 2003 *Chinese Journal of Lasers* **30** 1061 (in Chinese) 迟荣华 2003 *中国激光* **30** 1061]

[9] Lefort L , Price J H V , Richardson D J 2002 *Opt. Lett.* **27** 291

[10] Seong N H , Dug Y K 2002 *IEEE Photonics Technology Letters* **14** 459

[11] Bamard C , Myslinski P , Chrostowski J *et al* 1994 *IEEE Journal of Quantum Electronics* **30** 1817

[12] Agrawal G P 2002 *Nonlinear fiber optics & applications of nonlinear fiber optics* (Beijing : Publishing house of electronics industry) 414 (in Chinese) Agrawal G P 2002 *非线性光纤光学原理及应用* (北京 : 电子工业出版社) 第 414 页]

[13] Haus H A , Ippen E P , Tamura K 1994 *IEEE J. Quant. Electron* **30** 200

[14] Haus H A 2000 *IEEE J. Selected Topics in Quant. Electron* **6** 1173

[15] Nir F , Avishay E , Moshe T 1997 *IEEE J. Quant. Electron* **33** 642

[17] Liu D F , Chen G F , Bai J T *et al* 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 241(in Chinese) 刘东峰、陈国夫、白晋涛等 2000 物理学报 **49** 241]

[16] Kutz J N , Steffen D K , Leng L *et al* 1997 *J. Opt. Soc. Am. B* **14** 2681

Ultrashort pulse Yb³⁺ -doped fiber ring laser with all-fiber structure^{*}

Huang Xiu-Jiang^{1)†} Liu Yong-Zhi²⁾ Sui Zhan³⁾ Li Ming-Zhong³⁾
Li Xin⁴⁾ Lin Hong-Huan³⁾ Wang Jian-Jun³⁾

- 1)(China Electronics Technology Group Corporation No.23 Research Institute , Shanghai 200437 ,China)
- 2)(School of Optic-Electronic Information , University of Electronic Science and Technology of China , Chengdu 610054 , China)
- 3)(Research Center of Laser Fusion , China Academy of Engineering Physics , Mianyang 621900 ,China)
- 4)(Alcatel Shanghai Bell Research & Innovation Center , Shanghai 201206 , China)

(Received 15 April 2005 ; revised manuscript received 4 July 2005)

Abstract

Theory of the self-starting passive mode-locked Yb³⁺ -doped fiber ring laser generating short pulses is presented. The ultrashort pulse Yb³⁺ -doped fiber ring laser with all-fiber structure has been designed and turned out. Two 976nm LD pumped lasers are used as the pump sources and high concentration Yb³⁺ -doped fiber is adopted as gain medium. Using the nonlinear polarization rotation (NPR) effect of the fiber , self-starting stable mode-locked pulse is obtained. The mode-locked threshold power of the laser is 260mW and the output power is 25mW. The center wavelength of the mode-locked pulse is 1056nm with 3dB bandwidth of 11.7nm at repetition rate of 20MHz. Comparing with the other structures of the fiber lasers , the structure we adopted is more efficient and has better stability.

Keywords : fiber ring laser , high concentration Yb³⁺ -doped fiber , self-starting , passive mode-locked

PACC : 4260 , 4260D

^{*} Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(Grant No.2003AA49060).

[†] E-mail :xiujianghuang 99@163 . com