

# 飞秒被动锁模光纤激光器的稳定性研究

赵德双, 刘永智, 黄绣江, 张长命

(电子科技大学 光电信息学院, 四川 成都 610054)

**摘要:** 从广义非线性薛定谔锁模方程出发, 运用数值方法分别研究了泵浦光功率和非线性饱和吸收体对飞秒被动锁模光纤激光器工作特性的影响, 并得到了激光器在基阶脉冲重复频率下稳态输出的最高输入泵浦功率和其对应的非线性饱和吸收体稳定工作区间。该研究结果为进一步优化设计最高泵浦功率、非线性饱和吸收体开关以及提高被动锁模光纤激光器的稳定工作性能都具有指导意义。

**关键词:** 光纤激光器; 被动锁模; 稳定性

中图分类号: TN248

文献标识码: A

## Stability of Passively Mode-locked Femtosecond Fiber Laser

ZHAO De-shuang, LIU Yong-zhi, HUANG Xiu-jiang, ZHANG Chang-ming

(College of Electro-optical Information, University of Electronic and Science Technology of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** The stability of passively mode-locked femtosecond fiber laser affected by different factors, especially pump power and fast saturable absorber, has been thoroughly studied in this paper. The results show that it is necessary to make laser work with proper driving of fast absorber and mediate pumping power for stable pulse output.

**Keywords:** fiber laser; passively mode-locked; stability

### 引言

由于被动锁模光纤激光器所产生的超短脉冲在光纤通信、超快现象、光纤传感、新一代频标测量等方面有着十分广阔的应用前景, 因此在近 10 年取得了快速的发展。然而, 被动锁模光纤激光器的稳定性一直没有得到很好的解决, 在很大程度上限制了被动锁模光纤激光器的广泛应用。在不同的实验研究中发现, 被动锁模脉冲的重复频率很难控制, 会在很大的范围内发生变化, 激光谐振腔中可以同时存在多个脉冲, 各个脉冲间隔并不完全相等。此外, 还发现脉冲幅值、脉冲宽度也在不断地改变<sup>[2-4]</sup>。很显然, 被动锁模光纤激光器的这些不稳定性为其在实际工程应用中造成了很大的障碍。目前, 加快被动锁模光纤激光器在实际工程应用中的进程, 不断地提高其工作稳定性已经显得十分必要。为此, 本文对影响飞秒被动锁模光纤激光器稳

定性的各种因素进行了较为全面的分析。其中, 重点分析了泵浦光功率和快速非线性可饱和吸收体的影响。此外, 还对激光器在不稳定工作状态下出现的各种现象做出了解释, 并提出了相应的解决措施。

### 1 激光器结构及其锁模方程

飞秒被动锁模光纤激光器的原理如图 1 所示。它由单模光纤、掺稀土增益光纤媒质、快速可饱和吸收体、滤波器以及泵浦源等共同组成。其中,

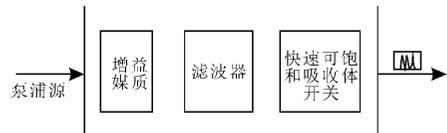


图 1 被动锁模光纤激光器原理图

Fig. 1 Schematic diagram of passively mode-locked fiber laser

收稿日期: 2004-02-26; 修回日期: 2004-06-21

基金项目: 国防预研基金(编号: 51402040203DZ02)

作者简介: 赵德双(1974-), 男, 河南新县人, 电子科技大学博士研究生, 主要从事光纤激光器及超短脉冲激光器的研究工作。

快速可饱和吸收体是整个被动锁模光纤激光器的关键器件,锁模脉冲的产生和形成都与其传输特性相关。在被动锁模光纤激光器设计中,目前较为常见的快速可饱和吸收体有两种:一种是非线性光学环境或者非线性放大光学环境<sup>[5]</sup>,另一种是非线性偏振旋转开关<sup>[6]</sup>。这两种可饱和吸收体都采用相干原理将光脉冲的非线性相移转换为自幅度调制,并且具有全光纤结构。与半导体、超晶格可饱和吸收体相比,它们不仅保全了被动锁模光纤激光器的全光纤结构、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,而且还具有超快响应特性(fs量级)。因此,多数飞秒锁模光纤激光器都采用了上述两种结构的非线性可饱和吸收体作为锁模元器件。此外,增益媒质也是激光器中不可缺少的,它为激光器提供必要的增益以补偿腔体损耗和输出损耗。光纤激光器中可用作增益媒质的掺稀土光纤媒质有很多种,其中较为常用的有掺铒、镱、钕光纤。这三种掺杂光纤都具有很宽的增益谱线,在合理设计腔体结构参数条件下利用它们作为增益媒质的激光器都可以输出约100 fs锁模光脉冲。为了研究这种以快速可饱和吸收体作为锁模元件的飞秒被动锁模光纤激光器的稳定特性,本文采用了如下的广义非线性薛定谔锁模方程:

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

式中,  $A$  为归一化电场包络;  $\beta_2$  为群速色散;  $\gamma$  为光克尔非线性系数;  $z$  和  $T$  分别为群时延坐标系中的空间坐标和时间坐标;  $g$  为路径平均可饱和和放大增益系数,且  $g = g_0 / (1 + \sigma P_{av})$ ,  $g_0$  为小信号路径平均增益系数,  $P_{av} = \frac{1}{T_c} \int_{-T_c/2}^{+T_c/2} A^2 d\tau$  为脉冲波归一化平均功率,  $\sigma = 1/P_{sat}$ ,  $P_{sat}$  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;  $\alpha$  为路径平均损耗系数;  $B$  为滤波器带宽;  $L$  为激光器腔长;  $M_{NL}(A)$  为非线性偏振开关或非线性光学环境的自幅度调制函数<sup>[5~6]</sup>。在引入

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  $\tau = T/t_0$  后,可将(1)式简化为

$$i \frac{\partial q}{\partial \xi} - \frac{1}{2} \text{sgn}(\beta_2) \frac{\partial^2 q}{\partial \tau^2} + |q|^2 q = i \left[ g_0 q + B_f \frac{\partial^2 q}{\partial \tau^2} + M'_{NL}(q) \right] \quad (2)$$

其中,  $g_e = g - \Gamma$ ,  $\Gamma = \alpha L_D$ ;  $B_f = 2L_D / (B^2 t_0^2 L)$ ,  $P_0 = 1 / (\gamma L_D)$ ,  $L_D = t_0^2 / |\beta_2|$ 。  $P_0$  的物理含义为基阶孤子脉冲峰值功率;  $t_0$  为预先设定的孤子脉冲半宽度,其数值大小可采用激光器系统的最小带宽作近似估计;  $L_D$  为光纤的色散长度。由于方程式(2)暂时没有精确的解析解法,必须采用数值方法。这里我们采用了分步傅里叶法对其进行了求解<sup>[7]</sup>,并对激光器在不同泵浦功率下的工作状态以及快速可饱和吸收体对激光器工作特性的影响作了较为详细地分析。在增益光纤足够长时(即不考虑泵浦饱和和效应),增益媒质的小信号增益系数与泵浦光功率近似成正比关系,所以本文在数值分析时都采用小信号增益系数来代表泵浦功率的大小。其他相应的设计参数分别为:腔体长度 12 m,光纤的色散系数  $-17 \text{ ps}^2/\text{km}$ ,非线性系数  $2.6 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ ,滤波器带宽为 20 nm。

## 2 泵浦功率对稳定性的影响

通过数值分析发现,在起振后激光器等幅等脉冲间隔的稳定工作状态只能在一定的泵浦功率范围下保持。在此功率范围之内,腔体中只存在一个光脉冲,并且能够以稳定的基阶重复频率不断地输出光脉冲,而且在泵浦功率恒定下,其峰值功率和脉宽始终保持不变(见图2和图3)。但是,当泵浦功率超过某一阈值时,这种以等幅等间隔的单脉冲稳

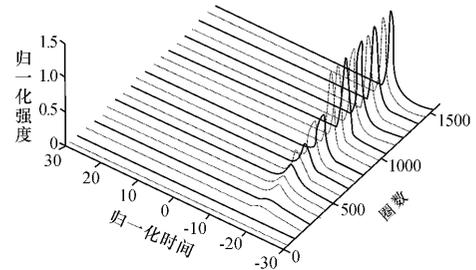


图2 激光器在  $g_0 = 0.10$  时的光信号演化图

Fig. 2 Signal evolution of laser at  $g_0 = 0.10$

定输出状态则发生了很大的变化。从图4可以看出,当泵浦功率增加到使掺杂光纤的平均小信号增益系数约等于0.3时,激光器出现脉冲分裂现象,并在腔体中形成两个脉冲。显然,这种双脉冲输出现象破坏了原有的等间隔脉冲输出状态。当进一步增加泵浦功率后,脉冲继续分裂,从而形成更多的脉冲,同时在谐振腔体中进行传播。尽管这些脉冲具有一定形状,可是每个脉冲的幅度却并不完全相

同, 并且彼此之间的间隔也不尽相同(见图5)。这种不稳定的脉冲输出状态在实验中曾多次被观测到。

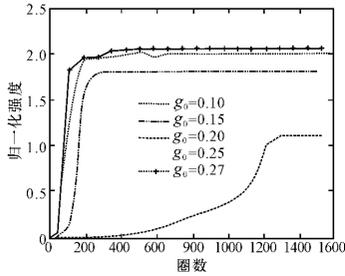


图3 在不同增益下的单脉冲峰值功率演化图

Fig. 3 Evolution of peak power of single pulse generated at different gains

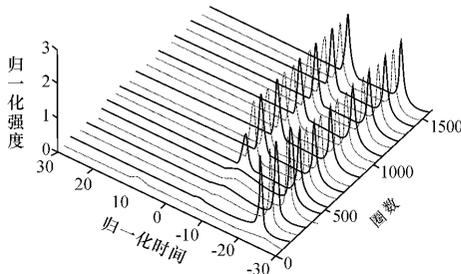


图4 激光器在  $g_0 = 0.30$  时的光信号演化图

Fig. 4 Signal evolution of laser at  $g_0 = 0.30$

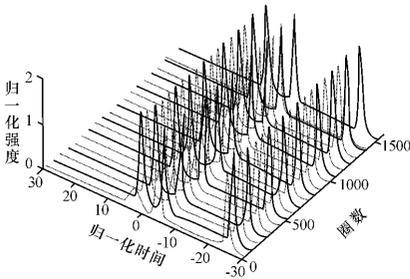


图5 激光器在  $g_0 = 0.55$  时的光信号演化图

Fig. 5 Signal evolution of laser at  $g_0 = 0.55$

由此可见, 过强的泵浦功率会造成激光器不能够以恒定的重复频率和幅值进行工作。因此, 以合理地设计泵浦源的最大功率就显得十分必要。

根据理论分析可知, 在给定腔体光纤GVD系数  $\beta_2$  和非线性系数  $\gamma$  的情况下, 若脉冲宽度不受限制, 激光器谐振腔体在理论上可以支持任意高能量基阶孤子光脉冲, 其脉冲能量大小为  $E = 2|\beta_2|/(\gamma T_0)$ 。从此式可以看出, 如果激光器可以产生任意短的光脉冲, 则泵浦功率可以进行任意增加。但

是, 由于增益媒质和滤波器带宽有限, 激光器所能产生的脉冲宽度不可能无限短, 其理论极限反比于增益媒质的带宽(其实际脉冲最小宽度取决于系统的最小频谱宽度)。除此之外, 脉冲能量因受到增益媒质和输出耦合损耗等腔体元器件的作用而产生周期性扰动, 这种周期性能量扰动对激光器产生的最短脉冲宽度也有限制。这种限制主要体现在脉冲宽度对腔体长度和腔体色散系数的依赖关系, 即  $T_0 \geq (|\beta_2|L_c/4\pi)^{1/2}$ 。当系统带宽和增益带宽足够宽时, 脉冲宽度基本上取决于腔体的长度和腔体色散。因为激光器需要足够长的增益光纤来提供必要的腔体能量补偿, 所以光纤激光器的腔体不可能设计得很短。通过上述分析可知, 当激光器的各种结构参数确定后, 激光器产生的最短脉冲宽度基本上可以完全确定。于是, 激光器谐振腔所能够支持的基阶孤子脉冲的最高能量也就被确定下来, 其数值大约为

$$E_{\max} = 2\kappa|\beta_2|/(\gamma\min(T_0)) \quad (3)$$

其中,  $\kappa$  为基阶孤子脉冲的峰值功率增强因子, 通过数值仿真分析发现, 其值约为1.9~2.1。所以, 泵浦功率过度增加会使腔体中的平均光功率  $P_{av} > f_r E_{\max}$  ( $f_r$  为基阶脉冲重复频率), 造成光纤非线性与色散作用严重失配, 从而导致孤子脉冲发生分裂, 在谐振腔体中形成多个脉冲。通过上述分析可知, 最大泵浦功率为

$$P_{\max}^p = \frac{2\kappa|\beta_2|f_r}{\eta\gamma\min(T_0)} \quad (4)$$

其中,  $\eta$  为泵浦光的转换效率。因此, 要使被动锁模激光器能够稳定输出等幅等间隔的光脉冲, 就必须使泵浦光功率不超过其最大值。此外, 还需要对泵浦光功率采取稳定措施, 否则会引起脉冲幅值和脉宽出现微小的波动。

### 3 快速可饱和吸收体对稳定性的影响

在以往的研究中, 人们往往注重快速可饱和吸收体对被动锁模激光器自启动特性以及脉冲波形的影响。但是, 本文的数值分析表明, 可饱和吸收体还对激光器的稳定性产生重大影响。这种影响可大致分为3种情况: 一种是稳定激光器脉冲输出; 另一种是造成激光器输出不稳定, 形成无规则的脉冲输出; 还有一种就是产生弱稳定的谐波输出。通过分析我们发现, 产生这3种效应的原因可从可饱和吸收体的传输特性找到。图6为非线性偏振旋转开关快速可饱和吸收体的传输特性(非线性光学环境

和非线性放大光学环境也有类似的传输特性<sup>[5]</sup>。从图6可以看出,其传输特性与输入光功率近似成周期性变化。正是这种周期性的变化,才使得可饱和吸收体对激光器的工作状态产生不同的影响。当脉冲经过增益媒质放大后到达非线性可饱和吸收体之前,其峰值功率处在图6的第一个区间内时,激光器可以处于稳定工作状态。因为在第一个区间内,脉冲峰值部分遭受的损耗要比其两翼小,所以可饱和吸收体不会破坏输入脉冲的形状。尤其当腔体脉冲的峰值功率处于可饱和吸收体传输特性的

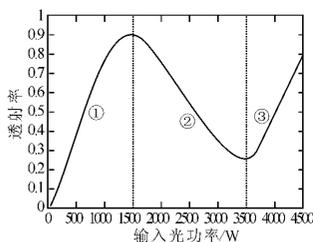


图6 非线性偏振旋转开关传输特性

Fig. 6 Transmission characteristic of nonlinear polarization rotating switch

第一个峰值点附近时,可饱和吸收体还具有稳定脉冲幅度功能。可是,当脉冲的峰值功率超过此峰值点进入图6的第二个区间时,激光器则表现出一种不稳定工作状态。因为在这个区间内,脉冲峰值功率所受到的损耗要比脉冲两翼大,经过增益媒质不断放大后,脉冲两翼的强度会不断地增加,而脉冲峰值强度则相对减小,由此便会破坏原有脉冲的形状,形成一系列的无规则光脉冲输出。

可饱和吸收体的传输特性不同于泵浦功率过强造成的光纤非线性与色散作用严重失配引起的无规则脉冲输出。当脉冲功率处于第三个区间时,由于光脉冲受到可饱和吸收体在时域上的周期性调制,所以在一定的条件下会出现高阶的谐波锁模运转。数值分析表明,这一状态的稳定性不是很好。当泵浦功率发生变化时,稳定的谐波锁模脉冲消失。由此可见,激光器的工作状态与可饱和吸收体的工作特性有着密切关系。可饱和吸收体的工作特性又与腔体中的脉冲功率相关,所以在激光器设计时,为使激光器能够稳定工作,应该合理设计激光器的各种结构参数以及泵浦光的功率,以确保激光器腔中基阶孤子脉冲的最高峰值功率落入可饱和吸收体传输特性的第一个工作区内。

#### 4 其他影响因素

除了上述两种影响激光器稳定性的原因外,还

存在很多其他因素。例如,周围工作环境的变化会造成激光器脉冲输出重复频率发生波动,光纤的随机线性双折射会影响锁模脉冲的形成,过高的输出耦合损耗会增强腔体色散波以及高阶非线性效应可使脉冲载波发生频移等等。针对上述影响因素,目前人们正在寻求一些解决措施。例如,通过缩小腔长和采用保偏光纤来降低周围环境的变化和随机线性双折射对激光器的影响;采用较小的耦合输出损耗和分布式的增益放大来保证腔体脉冲不出现较大的能量波动。此外,还可通过反馈装置在时域上对脉冲的重复频率和峰值幅度进行控制,以及采用各种类型的滤波器在频域上稳定激光器输出脉冲的频谱和载频等等。

#### 5 结论

本文分析了被动锁模激光器的稳定性问题。其中,较为详细地分析了泵浦功率以及可饱和吸收体对激光器稳定性的影响。分析结果表明,激光器稳定工作时有一个最高泵浦功率  $P_{\max}^P = \frac{2\kappa|\beta_2|f_r}{\eta\gamma\min(T_0)}$ 。当泵浦功率超过这一最高值时,激光器会出现脉冲分裂,形成间隔不等的多脉冲输出。同时,可饱和吸收体也会因其传输特性对激光器的稳定性产生影响。当腔体中脉冲的峰值功率不超过可饱和吸收体的第一个透射峰值功率时,激光器的稳定性才可以得到保证。否则,会形成一系列无规则脉冲输出和弱稳定的谐波锁模多脉冲输出。

#### 参考文献:

- [1] Haus H A. Mode-locking of lasers[J]. IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics, 2000, 6(6):1173-1185.
- [2] Richardson D J, Lanming R I, et al. Pulse repetition rates in passive, selfstarting, femtosecond soliton fiber laser[J]. Electronics Letters, 1991, 27(16): 1451-1453.
- [3] Tang D Y, B Zhao, et al. Compound pulse solitons in a fiber ring laser[J]. Physical Review A-Atomic, Molecular, and Optical Physics, 2003, 1-8.
- [4] 刘东峰, 陈国夫, 王贤华. 自起振被动锁模掺Er<sup>3+</sup>光纤环形腔孤子激光器的试验研究[J]. 中国科学, 1999, A29(7):656-661.
- [5] Doran N J, David Wood. Nonlinear-optical loop mirror[J]. Optics Letters, 1988, 13(1):56-58.
- [6] Haus H A, Ippen E P, Tamura K. Additive pulse mode-locking in fiber laser[J]. IEEE J Quantum Electronics, 1994, 30(1):200-208.
- [7] G P Agrawal[著], 贾东方, 等译. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.