

文章编号:1001-5078(2020)01-0054-04

· 激光器技术 ·

## 相位调制展宽激光的线宽压缩方法研究

刘迎国<sup>1</sup>, 岳耀笠<sup>2</sup>, 朱允智<sup>2</sup>

(1. 中国人民解放军第95835部队, 新疆 乌鲁木齐 830000; 2. 中国电子科技集团公司第三十四研究所, 广西 桂林 541000)

**摘要:**单频激光通过相位调制可以进行光谱展宽、提高光纤放大器受激布里渊散射的阈值, 从而可以提高光纤放大器的输出功率, 但也破坏了单频激光的高相干性; 本文根据相位调制光谱展宽的原理公式, 提出了进行激光线宽压缩的思路, 用于激光放大后恢复相干性能; 根据线宽压缩的原理提出了线宽压缩装置的构造, 即采用两个相位调制器, 一个负责光谱展宽, 另一个负责光纤放大后的线宽压缩, 并提出了实现线宽压缩的相位差调节和幅度调节的控制条件; 限于实验条件不足, 本文仅对理论模型进行了分析。

**关键词:**窄线宽脉冲光纤激光器; 激光相位调制光谱展宽; 谱线操作; 线宽压缩; 受激布里渊散射阈值

中图分类号: TN212 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2020.01.010

## Research on the line-width compression of phase-modulated broadening laser

LIU Ying-guo<sup>1</sup>, YUE Yao-li<sup>2</sup>, ZHU You-zhi<sup>2</sup>

(1. Unit 95835 of PLA, Urumqi 830000, China; 2. The 34th Institute of CETC, Guilin 541000, China)

**Abstract:** By using phase modulation, single-frequency laser can broaden the spectrum and increase the threshold of stimulated Brillouin scattering of the fiber amplifier, so the output power of fiber amplifier can be improved, but the high coherence of single-frequency laser is also destroyed. According to the principle formula of spectral broadening by phase modulation, the idea of laser line-width compression is proposed in this paper, which can be used to recover the coherence after laser amplification. According to the principle of line-width compression, the construction of line-width compression device is put forward, that is, two phase modulators are used, one is responsible for spectral broadening, the other is responsible for line-width compression after fiber amplification, and the control conditions for realizing phase difference adjustment and amplitude adjustment of line-width compression are put forward. Due to the lack of experimental conditions, this paper only analyzes the theoretical model.

**Keywords:** narrow line-width pulsed fiber laser; laser phase modulation spectral broadening; spectral line operation; line-width compression; stimulated Brillouin scattering threshold

### 1 引言

光纤激光器是波导式的结构, 使泵浦光场与信号光场重合得非常好, 从而转换效率相当高, 同时由于有源光纤有较大的表面积, 使其具备功耗低、散热

快等优点; 然而, 同样是因为光纤的波导结构, 小模场面积也导致了非线性效应的阈值很低, 容易使激光器产生物理损伤, 从而限制了光纤激光器的输出功率<sup>[1]</sup>。例如, 作为相干激光测风雷达的主要光源

作者简介: 刘迎国(1980-), 男, 学士学位, 工程师, 主要研究方向为指挥控制, 测量控制及光通信等。E-mail: 185117452@qq.com

收稿日期: 2019-05-29; 修订日期: 2019-07-23

之一的单频脉冲光纤激光器,由于受限于受激布里渊散射(SBS)阈值,以 Amonics 公司产品为例,脉冲峰值功率最大 700 W,与固体激光器的输出水平有很大差距。因此,提高单频脉冲光纤激光器的受激布里渊散射阈值,是与固体激光器缩小技术差距的主要方法。

国防科学技术大学<sup>[4]</sup>、西南技术物理研究所<sup>[5]</sup>、中国工程物理研究院<sup>[6]</sup>等单位验证了通过使用大模场光纤、提高光纤掺杂浓度、缩短有源光纤长度及输出尾纤长度等常规手段,可以提高光纤激光器 SBS 阈值,北京交通大学尝试了通过温度应力场分布提高 SBS 阈值<sup>[7]</sup>,但都提高有限,发展前景十分有限;中国工程物理研究院<sup>[8-9]</sup>通过使用相位调制光谱展宽的方法提高 SBS 阈值,可以将 SBS 阈值提高到占光纤激光器输出功率限制的次要作用下,但大幅度增加的相位噪声严重影响了光纤激光器的相干性能。

本文根据相位调制激光展宽的理论,提出了二级相位调制线宽压缩的构想,分析了线宽压缩的成立条件,并根据该条件设计了激光线宽压缩装置。

## 2 相位调制激光展宽原理

单频激光相位调制展宽方法<sup>[8]</sup>如图 1 所示,输入激光脉冲经加载电信号的光纤相位调制器,输出光谱展宽的激光信号,其中展宽激光的光谱为频率间隔与电信号频率相同的梳状光谱,并且相位调制器的调制强度越大,激光光谱展宽级数越多,即光谱展宽越宽,光纤放大器的 SBS 阈值也越高。激光光谱展宽理论分析如下。

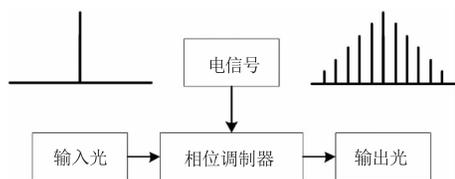


图 1 相位调制光谱展宽原理图

Fig. 1 Schematic diagram of phase modulation spectrum broadening

相位调制器输出的光场由下式表示:

$$E_{out} = A \cos[\omega t + \Psi] \quad (1)$$

相位调制器通过改变  $\Psi$  (调相) 来得到  $E_{out}$  的不同值,而

$$\Psi = \delta \sin \omega_m t \quad (2)$$

从文献[9]中可得,相位调制系数  $\delta$  与外加电压成正比,与晶体程度无关。通过改变相位调制系数  $\delta$  和外加电场频率  $\omega_m$  来改变相位  $\Psi$ ,从而得到不同的光场  $e_{out}$ ,输出光场按贝塞尔函数展开为:

$$\begin{aligned} e_{out} &= A \cos[\omega t + \Psi] \\ &= A [J_0(\delta) \cos \omega t + J_1(\delta) \cos(\omega + \omega_m)t - \\ &\quad J_1(\delta) \cos(\omega - \omega_m)t + J_2(\delta) \cos(\omega + 2\omega_m)t - \\ &\quad J_2(\delta) \cos(\omega - 2\omega_m)t + \dots] \end{aligned} \quad (3)$$

从上式可知,电光相位调制的结果产生若干边频带,理论上是有穷多边频带组成。光谱展宽是指由许多边带频谱组成的波形包络的半宽。均匀展宽要求边带尽量丰富。这就要求  $e_{out}$  的展开项更多更大,因而需要增大  $\delta$  或  $\omega_m$ ;而要增加  $\delta$ ,从(3)式可知,需要增加在晶体上的微波调制功率和选择好的调制器。

## 3 相位调制激光线宽压缩可行性分析

根据公式(1),假设使用两个相位调制器,并且两个相位调制器的相位改变量为  $\Psi_1$ 、 $\Psi_2$  时,且  $\Psi_1 + \Psi_2 = 0$ ,有:

$$e_{out} = A \cos[\omega t + \Psi_1 + \Psi_2] = A \cos \omega t \quad (4)$$

即光信号恢复到为原来的窄线宽特性。

实际应用中,两个相位调制器之间有一定的光纤长度,该光纤长度的光程还受到环境温度、振动等因素的调制,结合公式(4),有:

$$e_{out} = A \cos \left[ \omega t + \delta_1 \sin \omega_m t + \delta_2 \sin \omega_n t + \frac{n(L_0 + \Delta L)}{\lambda} \right] \quad (5)$$

要将相位调制器光谱展宽的激光再实现线宽压缩,恢复激光器的窄线宽特性,则需满足:

$$\delta_1 \sin \omega_m t + \delta_2 \sin \omega_n t + \frac{n(L_0 + \Delta L)}{\lambda} = 2N\pi \quad (6)$$

其中,  $N$  为正整数;  $\delta_1 \sin \omega_m t$  为第一相位调制器产生的相位调制信号;  $\delta_2 \sin \omega_n t$  为第二相位调制器产生的相位调制信号;  $\frac{n(L_0 + \Delta L)}{\lambda}$  为两相位调制器之间的相位差。  $\delta_1 \sin \omega_m t$  和  $\delta_2 \sin \omega_n t$  为高频信号,  $\frac{n(L_0 + \Delta L)}{\lambda}$  为低频信号。为使式(6)等式成立,可

以通过两种情况实现,分别为:

$$\delta_1 \sin \omega_m t + \delta_2 \sin \omega_n t = 0 \quad (7)$$

$$\frac{n(L_0 + \Delta L)}{\lambda} = 2N_2\pi \quad (8)$$

或:

$$\begin{aligned} &\delta_1 \sin \omega_m t + \left( \delta_2 \sin \omega_n t + \frac{n(L_0 + \Delta L)}{\lambda} \right) \\ &= 2N\pi \end{aligned} \quad (9)$$

#### 4 激光线宽压缩装置设计

根据公式(7)和(8),光纤激光器的线宽压缩系统可以设计为图2、图3的系统<sup>[10]</sup>。光纤激光器为MOPA结构,激光种子源一般为外调制的窄线宽脉冲激光器,经过相位调制器1将光谱展宽,使得光纤放大器的SBS阈值提高,经过功率放大之后再由相位调制器2进行线宽压缩。为达到线宽压缩条件,两个相位调制器的调制频率相同,调制相位相差 $\pi$ 的奇数倍。为实现以上要求,两个相位调制器采用同一个频率源(假设其频率为 $F$ ),配合不同功率的射频放大器进行驱动,以实现调制频率相同;同时光路中添加一个光纤移相器,用于调节两个相位调制器的相位差,使 $(n(L_0 + \Delta L))/\lambda$ 接近 $2\pi$ 的整数倍。

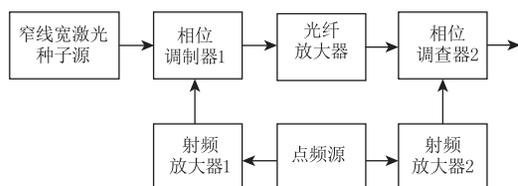


图2 相位调制线宽压缩装置结构图

Fig. 2 Structure diagram of phase-modulated line-width compression device

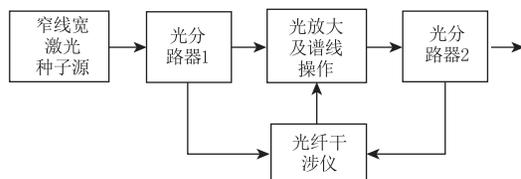


图3 线宽压缩检测

Fig. 3 Line-width compression detection

激光线宽压缩装置(如图4所示)的工作调节控制由种子源本振光和线宽压缩后的激光信号相干,检测拍频频率和强度,当光纤移相器连续改变 $2\pi$ 相位过程中,检测到的拍频频率 $nF$ 中 $n$ 最小( $n$ 为整数)、拍频强度最小时,就是光纤移相器的最佳工作点,然后光纤移相器连续跟踪该点进行工作。然后调节相位调制器2的射频驱动功率,同样检测到拍频强度最弱时为相位调制器2的最佳工作点。

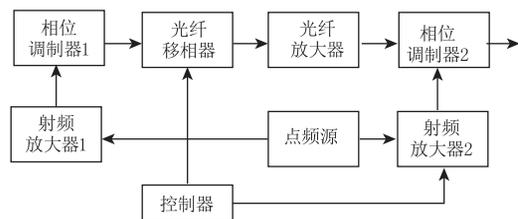


图4 线宽压缩控制部分

Fig. 4 Control part of line-width compression

通常,窄线宽脉冲放大器为了尽量获得更大的峰值功率,末级放大器一般使用低数值孔径大模场光纤(LMA)的放大器,即会造成相位调制器2输入光纤为LMA光纤;同时,相位调制器为了提高端面损伤阈值,也需要扩大输入光斑直径,最终使相位调制器2做成空间光相位调制器,因此两个相位调制器的射频驱动功率是不一致的。

限于实验条件不足,本文仅对线宽压缩装置的理论模型进行了分析。

#### 5 结语

本文介绍了一种MOPA结构的单频脉冲光纤激光器的激光放大过程中提高SBS阈值的方法,通过相位调制器将单频激光脉冲进行光谱展宽,可以大大提高激光脉冲放大过程中光纤放大器的SBS阈值,再通过第二个相位调制器进行线宽压缩,使激光信号恢复窄线宽特性;本方法相对于温度应力场分布法,所能提高的SBS阈值范围更大。

然而,由于现有相位调制器的端面损伤阈值较低,设计出能够承受大功率激光脉冲的相位调制器,是相位调制展宽激光线宽压缩方法实用化的前提。

#### 参考文献:

- [1] GAO Kun. Characteristics analysis and application research of high power fiber laser[D]. Hefei: University of science and Technology of China, 2009: 4 - 5. (in Chinese)
- [2] 高昆. 高功率光纤激光器特性分析及应用研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009: 4 - 5.
- [3] YANG Chunbo, LENG Jinyong, LU Qisheng, et al. Theoretical analysis of SBS in  $\text{Yb}^{3+}$ -doped double clad single frequency fiber amplifier[J]. Laser Technology, 2011, (1): 117 - 121. (in Chinese)
- [4] 杨春波, 冷进勇, 陆启生, 等. 掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层单频光纤放大器中 SBS 的理论分析[J]. 激光技术, 2011, (1): 117 - 121.
- [5] HE Xingkai, FENG Litian, SHEN Qihao, et al. Experimental study on SBS effect in single frequency pulsed fiber amplifier[J]. Laser Technology, 2012, (3): 191 - 193. (in Chinese)
- [6] 何幸锴, 冯力天, 沈琪皓, 等. 单频脉冲光纤放大器中的 SBS 效应实验研究[J]. 激光技术, 2012, (3): 191 - 193.

- [4] SUN Yinhong. Theoretical and experimental research on high power and narrow line-width fiber lasers[D]. Mianyang: China Engineering Physics Research Institute, 2016:75-97. (in Chinese)  
孙殷宏. 高功率窄线宽光纤激光器理论和实验研究[D]. 绵阳:中国工程物理研究院,2016:75-97.
- [5] WANG Chuncan, ZHANG Fan, LU Yuchun, et al. Theoretical analysis of suppressed stimulated Brillouin scattering in single frequency high power fiber amplifier[J]. Chinese Journal of Laser, 2006, (12):1630-1635. (in Chinese)  
王春灿,张帆,陆玉春,等. 单频大功率光纤放大器中抑制受激布里渊散射的理论分析[J]. 中国激光, 2006, (12):1630-1635.
- [6] XU Dangpeng, WANG Jianjun, LIN Honghuan, et al. High pulse peak power large mode-field all fiber amplifier[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, (3):589-592. (in Chinese)  
许党朋,王建军,林宏兔,等. 高峰值功率大模场全光纤脉冲放大器[J]. 强激光与粒子束, 2011, (3):589-592
- [7] LI Wei, PU Hongtu, WU Jian, et al. Spectral broadening characteristics analysis and experimental study[J]. Journal of Applied Optics, 2001, (6):31-33. (in Chinese)  
李伟,濮宏图,吴健,等. 光谱展宽特性分析及实验研究[J]. 应用光学, 2001, (6):31-33.
- [8] SONG Guicai, QUAN Wei. Optical waveguide principle and devices [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012:152-160. (in Chinese)  
宋贵才,全薇. 光波导原理与器件[M]. 北京:清华大学出版社,2012:152-160.
- [9] YUE Yaoli, LV Hongwei, ZHAO Hao, et al. The invention relates to a narrow-line-width fiber pulse laser with peak power and its application method; China, 201710428556. 4 [P]. 2017-6-8. (in Chinese)  
岳耀笠,吕宏伟,赵灏,等. 一种高峰值功率的窄线宽光纤脉冲激光器及其使用方法:中国,201710428556. 4 [P]. 2017-6-8.