

窄线宽脉冲光纤激光的自相位调制预补偿研究

粟荣涛 肖虎 周朴 王小林 马阎星 段磊 吕品 许晓军

Self-phase modulation pre-compensation of narrowlinewidth pulsed fiber lasers

Su Rong-Tao Xiao Hu Zhou Pu Wang Xiao-Lin Ma Yan-Xing Duan Lei Lü Pin Xu Xiao-Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 164201 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180486

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180486>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I16>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[少模光纤放大器中的准静态模式不稳定实验研究](#)

Quasi-static mode instability in few-mode fiber amplifier

物理学报.2018, 67(14): 144203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180140>

[国产光纤实现同带抽运 3000 W 激光输出](#)

3000 W tandem pumped all-fiber laser based on domestic fiber

物理学报.2018, 67(2): 024205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20171676>

[Nd<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 共掺磷酸盐玻璃光纤的发光与激光特性研究](#)

Stimulated emission and laser behaviors of Nd<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> Co-doped phosphate glass fiber

物理学报.2017, 66(16): 164204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.164204>

[单模热致超大模场掺镱光纤放大器的数值研究](#)

Modeling the single-mode thermally guiding very-large-mode-area Yb-doped fiber amplifier

物理学报.2017, 66(6): 064201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.064201>

[基于压电陶瓷与光纤电光调制器双通道伺服反馈的激光相位锁定实验研究](#)

Experimental researches of laser phase lock with dual-servo feedbacks based on the piezoelectric transducer and fiber electrooptic phase modulator

物理学报.2016, 65(23): 234204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.234204>

## 窄线宽脉冲光纤激光的自相位调制预补偿研究\*

粟荣涛<sup>1)2)3)†</sup> 肖虎<sup>1)2)3)</sup> 周朴<sup>2)3)</sup> 王小林<sup>2)3)</sup> 马阎星<sup>2)3)</sup>  
段磊<sup>1)</sup> 吕品<sup>1)</sup> 许晓军<sup>2)3)</sup>

1) (中国科学院软件研究所, 北京 100190)

2) (国防科技大学前沿交叉学科学院, 长沙 410073)

3) (大功率光纤激光湖南省协同创新中心, 长沙 410073)

(2018年3月19日收到; 2018年5月24日收到修改稿)

自相位调制 (SPM) 效应会展宽窄线宽脉冲光纤激光的光谱宽度, 降低其相干性. 通过相位调制对 SPM 引起的非线性相移进行预补偿, 能够使脉冲激光在光纤中进行放大和传输后保持种子激光的光谱特性. 基于三波耦合方程开展数值仿真, 研究了在对 SPM 进行“欠补偿”, “完全补偿”和“过补偿”的情况下, SPM 预补偿对受激布里渊散射阈值和激光光谱特性的影响. 开展了 SPM 预补偿实验研究, 将脉冲激光的光谱宽度从 1.4 GHz 压缩到 120 MHz. 研究内容可以为窄线宽脉冲光纤激光系统的设计搭建提供参考.

**关键词:** 光纤激光, 非线性效应, 自相位调制, 受激布里渊散射

**PACS:** 42.55.Wd, 42.65.-k, 42.65.Jx, 42.65.Es

**DOI:** 10.7498/aps.67.20180486

## 1 引言

窄线宽脉冲光纤激光在非线性和频率变换、激光雷达、量子信息和遥感探测等领域有广泛的应用前景<sup>[1-7]</sup>. 由于难以直接利用振荡器获得高功率的窄线宽脉冲光纤激光, 目前主要采用主振荡功率放大 (MOPA) 结构对低功率种子激光进行放大, 提升其输出功率<sup>[8-14]</sup>. 但是, 窄线宽脉冲光纤放大器中存在较强的受激布里渊散射 (SBS) 效应, 限制了激光的输出功率<sup>[15-19]</sup>. 此外, 自相位调制 (SPM) 效应会使脉冲激光的光谱发生展宽, 降低了激光的相干性<sup>[20,21]</sup>. 为了减小这些非线性效应的影响, 可以采用高掺杂磷酸盐光纤作为增益光纤, 实现高功率的窄线宽脉冲激光输出<sup>[9,22]</sup>, 但此类光纤在平均功率提升方面不具有优势. 为了获得高的平均功率, 一般采用较长的石英掺铒光纤, 并通过优选脉冲宽度、增大光纤模场面积等方式抑制 SBS. 但是,

增加光纤的长度又会引起较强的 SPM 效应, 难以实现窄线宽输出<sup>[8,23]</sup>.

为了消除 SPM 效应引起的光谱展宽, 一种方法是通过特定的方式获得负啁啾脉冲, 负啁啾脉冲因 SPM 效应而发生光谱压缩<sup>[24,25]</sup>, 但是这种方法一般只适用于皮秒/飞秒脉冲激光的光谱压缩, 无法实现窄线宽输出. 另一种方法是通过相位调制的方法对 SPM 引起的非线性相移进行补偿, 从而消除 SPM 的影响<sup>[26-28]</sup>. 但是, 由于 SBS 的增益谱很窄 (一般小于 100 MHz), 激光的光谱特性对 SBS 阈值的影响很大, SPM 预补偿在改变激光线宽的同时, 也会影响激光的 SBS 阈值. 然而, 目前公开报道的 SPM 预补偿研究中还缺乏对 SBS 效应的考虑. 本文综合考虑 SBS 和 SPM 效应, 研究了“完全补偿”, “欠补偿”和“过补偿”情况下脉冲激光的 SBS 阈值特性和光谱特性, 为窄线宽脉冲光纤激光系统的设计搭建提供参考.

\* 国家重点研发计划 (批准号: 2017YFF0104603)、中国博士后科学基金 (批准号: 2017M620070) 和国家自然科学基金 (批准号: 61705265, 61705264) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: surongtao@126.com

## 2 理论模型

为了简化物理过程, 本文研究窄线宽脉冲激光在被动光纤中的传输情况. 窄线宽脉冲光纤激光的功率提升主要受限于SBS, 忽略色散和受激拉曼散射(SRS)效应, 主要考虑抽运激光、布里渊Stokes光和声波场的相互耦合. 被动光纤中的三波耦合方程可以表示为<sup>[29]</sup>:

$$\frac{\partial A_p}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial A_p}{\partial t} = -\frac{\alpha}{2} A_p + i\gamma(|A_p|^2 + 2|A_s|^2)A_p + i\kappa_1 A_s Q, \quad (1)$$

$$-\frac{\partial A_s}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial A_s}{\partial t} = -\frac{\alpha}{2} A_s + i\gamma(|A_s|^2 + 2|A_p|^2)A_s + i\kappa_1 A_p Q^*, \quad (2)$$

$$v_A \frac{\partial Q}{\partial z} + \frac{\partial Q}{\partial t} = -\frac{1}{2} \Gamma_B Q + \frac{i\kappa_2}{A_{\text{eff}}} A_p A_s^* + f, \quad (3)$$

式中  $A_p$ ,  $A_s$  和  $Q$  分别为抽运激光、Stokes光和声波场的振幅;  $v_g = c/n_g$  为群速度,  $c$  为光在真空中的速度,  $n_g$  为群折射率;  $\Gamma_B = T_B^{-1}$  为声阻尼率,  $T_B$  为声子寿命;  $A_{\text{eff}}$  为有效模场面积,  $\gamma = n_2 \omega_p / c A_{\text{eff}}$  为非线性系数,  $n_2$  为非线性折射率,  $\omega_p$  为抽运光的角频率.  $\kappa_1$ ,  $\kappa_2$  为耦合系数, 分别为:

$$\kappa_1 = \gamma_e \omega_p / 2n_p c \rho_0, \quad (4)$$

$$\kappa_2 = \gamma_e \omega_p / c^2 v_A, \quad (5)$$

式中  $\gamma_e$  为电致伸缩常数,  $\rho_0$  为平均密度,  $v_A$  为声速. 方程(3)中  $f$  为引起SBS的噪声项,  $f$  满足以下关系<sup>[30]</sup>:

$$\langle f(z, t) \rangle = 0, \quad (6)$$

$$\langle f(z, t) f^*(z', t') \rangle = N_Q \delta(z - z') \delta(t - t'), \quad (7)$$

$$N_Q = \frac{2kT_0 \rho_0 \Gamma_B}{v_A^2 A_{\text{eff}}}, \quad (8)$$

式中  $k$  为玻尔兹曼常数,  $T_0$  为温度, 在下面的计算过程中将  $f$  按照高斯分布处理. 脉冲激光在光纤中传输时, 因为SPM效应的存在而引起非线性相移, 从光纤输出端的抽运脉冲的振幅可以表示为:

$$A_p(z, t) = A_p(0, t) \exp[i\varphi_{\text{NL}}(z, t)], \quad (9)$$

$$\varphi_{\text{NL}}(z, t) = |A_p(0, t)|^2 \gamma L_{\text{eff}}, \quad (10)$$

式中  $\varphi_{\text{NL}}(z, t)$  为非线性相移;  $L_{\text{eff}}$  为光纤的有效长度, 在忽略损耗的被动光纤中  $L_{\text{eff}}$  等于光纤长度

$L$ . 为了消除或减弱SPM的影响, 可以在光纤输入端对脉冲激光进行相位调制, 施加的调制相位为  $-\varphi_M(t)$ , 则脉冲激光在光纤输出端的振幅可以表示为

$$A(z, t) = A(0, t) \exp\{i[\varphi_{\text{NL}}(z, t) - \varphi_M(t)]\}. \quad (11)$$

当  $\varphi_M(t) = \varphi_{\text{NL}}(L, t)$  时, 脉冲激光在输出端的归一化振幅为  $A(0, t)$ , 输出光谱保持了脉冲种子的宽度.

## 3 数值仿真与讨论

由于窄线宽脉冲光纤激光通常采用主振荡功率放大(MOPA)方案, 数值仿真采用图1所示的系统结构. 激光种子(seed)产生傅里叶变换极限的窄线宽脉冲激光; 电光相位调制器(EOPM)对种子激光施加调制相位; 预放大器(pre-amplifier)对种子激光进行功率预放大, 其有效光纤长度设为  $L_{\text{eff}}$ , 假定预放大器未达到SBS阈值, 只考虑SPM效应对激光光谱的影响; 预放大器后面接入一个隔离器(ISO), 隔离被动光纤(passive fiber)中的后向Stokes光. 数值模型主要考虑被动光纤中的SBS和SPM效应, 初始条件为:

$$A_p(0, t) = \sqrt{P_{\text{peak}}} \exp\left\{-2 \ln 2 \left(\frac{t - t_0}{t_{\text{FWHM}}}\right)^2 + i\left[\gamma P_{\text{peak}} L_{\text{eff}} \times \exp\left(-2 \ln 2 \left(\frac{t - t_0}{t_{\text{FWHM}}}\right)^2\right) - \varphi_M(t)\right]\right\},$$

$$A_p(z, 0) = A_p(L, t) = 0,$$

$$A_s(z, 0) = A_s(L, t) = A_s(0, t) = 0,$$

$$Q(z, 0) = Q(L, t) = Q(0, t) = 0. \quad (12)$$

上式中假设输入的抽运脉冲  $A_p(0, t)$  是峰值功率为  $P_{\text{peak}}$  的高斯型脉冲, 其初始相位包含预放大器中SPM引起的非线性效应和EOPM施加的调制相位.

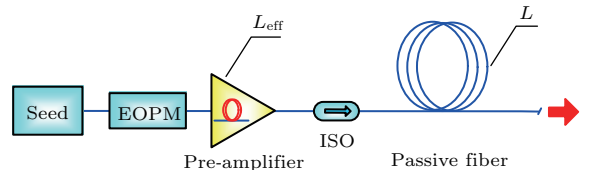


图1 数值仿真系统结构示意图

Fig. 1. Schematic of the numerical simulation system.

在窄线宽光纤激光中, 当SBS发生时, 后向 Stokes 光功率将随着抽运功率的增加而显著增强. SBS 阈值通常定义为光纤入射端的 Stokes 光功率与抽运激光功率之比为  $\mu$  时的抽运光功率<sup>[15]</sup>. 在下面的计算中,  $\mu$  的值取为 0.3%. 例如对于 1 kW 的光纤放大器, 0.3% 的后向功率就意味着 3 W, 过高的后向功率容易损坏前级器件. 为了减小数值仿真的计算量, 光纤长度  $L$  设为 6 m. 为了讨论方便, 定义  $\Delta\varphi = |\varphi_M(t) - \varphi_{NL}(L, t)|$  为“补偿深度误差”. 并定义补偿深度误差为 0 时, 即  $\varphi_M(t) = \varphi_{NL}(L, t)$  时, 为“完全补偿”;  $\varphi_M(t) < \varphi_{NL}(L, t)$  时为“欠补偿”; 当  $\varphi_M(t) > \varphi_{NL}(L, t)$  时为“过补偿”. 采用并行的双向的有限时域差分算法对方程进行求解<sup>[31]</sup>, 计算中所用主要参数取值列于表 1.

表 1 数值仿真中的参数取值  
Table 1. Parameters used in the numerical analysis.

参数	取值	参数	取值
$\gamma_e$	0.902	$n_g$	1.46
$\lambda_p$	1064 nm	$T_B$	5 ns
$n_2$	$2.6 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$	$A_{\text{eff}}$	$4.42 \times 10^{-11} \text{ m}^2$
$\rho_0$	$2210 \text{ kg/m}^3$	$k$	$1.38 \times 10^{-23}$
$v_A$	5900 m/s	$T$	293 K
$t_{\text{FWHM}}$	8 ns	$L$	6 m

首先研究“完全补偿”情况下脉冲激光的 SBS 阈值功率和光谱特性. 如图 2 所示, 圆形图标表示未进行 SPM 预补偿时的计算结果, SBS 阈值功率随着预放大器  $L_{\text{eff}}$  的增加而提高,  $L_{\text{eff}} = 0$  时的 SBS 阈值为 1.85 kW,  $L_{\text{eff}} = 1.25 \text{ m}$  时为 3.10 kW,  $L_{\text{eff}} = 1.5 \text{ m}$  时增加到 5.68 kW; 方形图标表示进行 SPM “完全补偿”时的计算结果, SBS 阈值功率不随  $L_{\text{eff}}$  的改变而改变, 保持在 1.90 kW. 可以看出, 进行 SPM 预补偿会影响 SBS 阈值, 尤其在预放大器  $L_{\text{eff}}$  较大时, SPM 预补偿会导致 SBS 阈值的大幅度降低.

由于 SBS 的增益谱很窄 (一般小于 100 MHz), 激光的光谱特性对 SBS 阈值的影响较大. 图 3 给出了三种典型情况下被动光纤中脉冲激光的光谱分布情况. 图 3 (a) 为没有预放大器影响 ( $L_{\text{eff}} = 0$ )、无 SPM 预补偿时脉冲激光的光谱演化情况. 在沿光纤传输的过程中, SPM 引起的非线性相移不断增加, 其光谱线宽也随着变宽. 当  $L_{\text{eff}} = 1.25$ 、无 SPM

预补偿时, 脉冲激光的光谱演化情况如图 3 (b) 所示. 由于预放大器引入了一个初始非线性相移 (与  $L_{\text{eff}}$  成正比), 导致脉冲激光在整个传输过程中的光谱都得到更大程度的展宽, 这也是导致图 2 中  $L_{\text{eff}}$  较长时 SBS 阈值更高的原因. 图 3 (c) 为 SPM 得到“完全补偿”时的光谱分布. 需要注意的是此

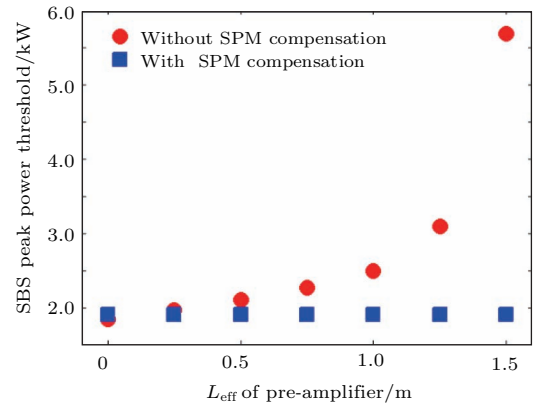


图 2 SPM 预补偿对 SBS 阈值的影响  
Fig. 2. The impact of SPM pre-compensation on SBS threshold.

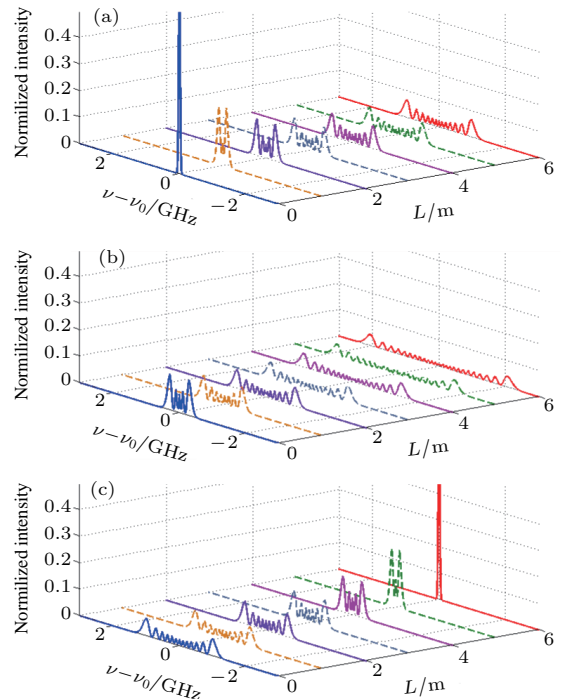


图 3 SBS 阈值功率时激光光谱在光纤中的分布 (a)  $L_{\text{eff}} = 0$ , 无 SPM 预补偿; (b)  $L_{\text{eff}} = 1.25 \text{ m}$ , 无 SPM 预补偿; (c) SPM 得到“完全补偿”  
Fig. 3. Spectra of the pulsed laser in the passive fiber at SBS threshold: (a)  $L_{\text{eff}} = 0$ , no SPM pre-compensation; (b)  $L_{\text{eff}} = 1.25 \text{ m}$ , no SPM pre-compensation; (c) SPM is completely pre-compensation.

时  $\varphi_M(t) = \varphi_{NL}(L_{eff}, t) + \varphi_{NL}(L, t)$ , 即补偿相位包括预放大器和被动光纤中引起的非线性相移. 因此, 其光谱分布不受  $L_{eff}$  的影响, 光谱宽度在光纤输出端线宽达到最窄. 这也说明了为什么在 SPM 得到“完全补偿”时 SBS 阈值不随  $L_{eff}$  的改变而发生变化.

前面讨论了 SPM 得到“完全补偿”的理想情况, 下面研究“补偿深度误差”不为零时 SPM 预补偿对 SBS 阈值和光谱特性的影响. 图 4 为不同 SPM 预补偿情况下脉冲激光的 SBS 阈值. 当“完全补偿”时, SBS 阈值为 1.90 kW; 当“欠补偿”时, SBS 阈值在 1.75—1.78 kW 左右, 比“完全补偿”时略低, 且受“补偿深度误差”的影响很小; 当“过补偿时”, SBS 阈值最高, 且随着“补偿深度误差”的增加迅速提高, 当  $\varphi_M(t) > \varphi_{NL}(L, t) = 5\pi$  时, SBS 阈值提升到 3.54 kW.

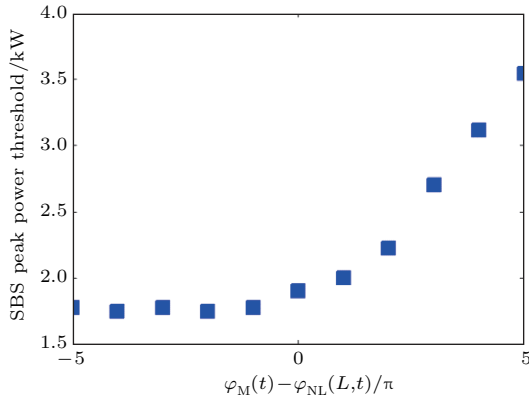


图 4 SPM 预补偿深度误差对 SBS 阈值的影响  
Fig. 4. The impact of SPM pre-compensation depth error on SBS threshold.

图 4 中预补偿深度对 SBS 阈值的影响同样可以利用激光在光纤中的光谱分布来解释. 如图 5(a) 所示, 当 SPM 得到“欠补偿”且“补偿深度误差”为  $5\pi(\varphi_M(t) - \varphi_{NL}(L, t) = -5\pi)$  时, 光谱沿光纤先变窄再展宽, 相对于图 3(c) 所示的“完全补偿”的情况, 激光的光谱宽度始终保持在较窄的水平, 这也是此时 SBS 阈值较低的原因. 当对 SPM 得到“过补偿”且“补偿深度误差”为  $5\pi(\varphi_M(t) - \varphi_{NL}(L, t) = 5\pi)$  时, 光谱在光纤中的分布如图 5(b) 所示. 激光光谱沿光的传输方向不断变窄, 虽然在输出端的光谱宽度和图 5(a) 相同, 但是在其他位置的光谱宽度更宽, 因此 SBS 阈值更高. 对比图 5(b)、图 3(a) 和图 3(b) 还可以发现, 采用 SPM “过补偿”能够在提升 SBS 阈值功率(三种情况下的 SBS 阈值

分别为 3.54, 1.85 和 3.10 kW) 的同时压缩输出激光的线宽.

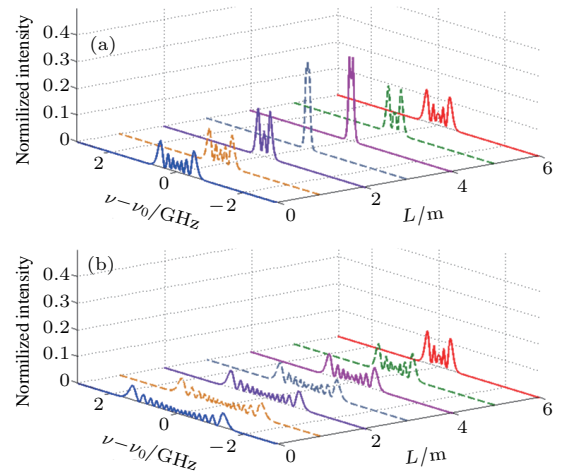


图 5 SBS 阈值功率脉冲激光在光纤中的光谱分布 (a)  $\varphi_M(t) - \varphi_{NL}(L, t) = -5\pi$ ; (b)  $\varphi_M(t) - \varphi_{NL}(L, t) = 5\pi$   
Fig. 5. Spectra of the pulsed laser in the passive fiber at SBS threshold: (a)  $\varphi_M(t) - \varphi_{NL}(L, t) = -5\pi$ ; (b)  $\varphi_M(t) - \varphi_{NL}(L, t) = 5\pi$ .

#### 4 实验及结果

上节数值仿真了不同情况下 SPM 预补偿对 SBS 阈值的影响和输出激光的光谱特性. 为了验证 SPM 预补偿的可行性和仿真结果的可靠性, 搭建了图 6 所示的实验平台, 进行初步的实验验证. 实验系统由种子激光 (seed)、预放大器 (pre-amplifier) 和被动光纤 (passive fiber) 三部分构成. 种子激光主要包括一个单频连续光纤激光器<sup>[32,33]</sup> (CW laser: 线宽 20 kHz, 中心波长 1064 nm, 平均功率几十 mW)、一个电光强度调制器 (EOIM)、一个电光相位调制器 (EOPM: 带宽  $>150$  MHz、半波电压  $V_\pi$  约为 2.2 V) 和两个单模掺铒保偏光纤放大器 (SMF-PA). EOIM 对 CW laser 进行强度调制, 产生脉冲激光; EOIM 对脉冲激光施加调制相位. EOIM 和 EOPM 的驱动信号由一个双通道任意函数发生器 (AFG) 提供. 由于 EOIM 和 EOPM 的损耗较大, 在其后分别接入一个 SMF-PA, 用于放大脉冲激光的功率, 为后面的系统提供足够的种子激光. SMF-PA 的输出端连接一个隔离器 (ISO), 用来防止后级系统的后向 Stokes 光损坏前级器件; ISO 后接入一个 1/99 的耦合器 (coupler) 用于观察种子激光的光谱特性. 预放大器的增益介质为纤芯/内包层直径分别为 5/130  $\mu\text{m}$ 、长度为 8 m 的双包层掺铒光纤 (5/130 YDF). 脉冲种子和中心波长

为976 nm抽运激光经过信号/抽运光合束器 (combiner) 耦合到增益光纤中, 并在增益光纤末端倾泄掉 (dump) 未吸收完全的抽运激光. 连接一个ISO防止被动光纤的后向功率进入功率放大器, 达到保护前级器件的作用. 被动光纤的纤芯/包层直径为6/125 μm, 在被动光纤输出端切8°角以减小端面反射. 在被动光纤前端接入一个5/95的耦合器, 以监测被动光纤中SBS引起的后向传输功率.

实验中, 将脉冲激光的重频和脉宽分别设为5 MHz和8 ns; 将EOPM施加的相位调制电压设为10 V (主要受限于AFG), 对应的调制深度约为 $\pi V/V_{\pi} = 4.5\pi$ . 采用自由光谱宽度(FSR)为4 GHz的Fabry-Perot扫描仪对被动光纤输出端的脉冲激光的光谱进行测量, 测量结果如图7所示. 在没有施加相位调制进行SPM预补偿的情况下,

由于非线性相移和脉冲激光的峰值功率( $P_{\text{peak}}$ )成正比, 激光线宽随着峰值功率的增加而变宽,

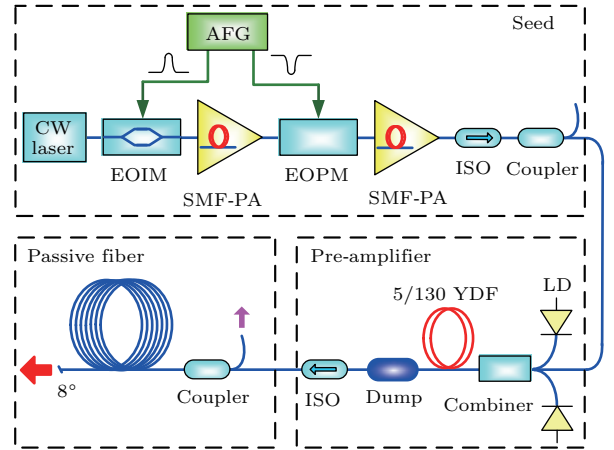


图6 SPM 预补偿实验装置

Fig. 6. Experimental setup of SPM pre-compensation.

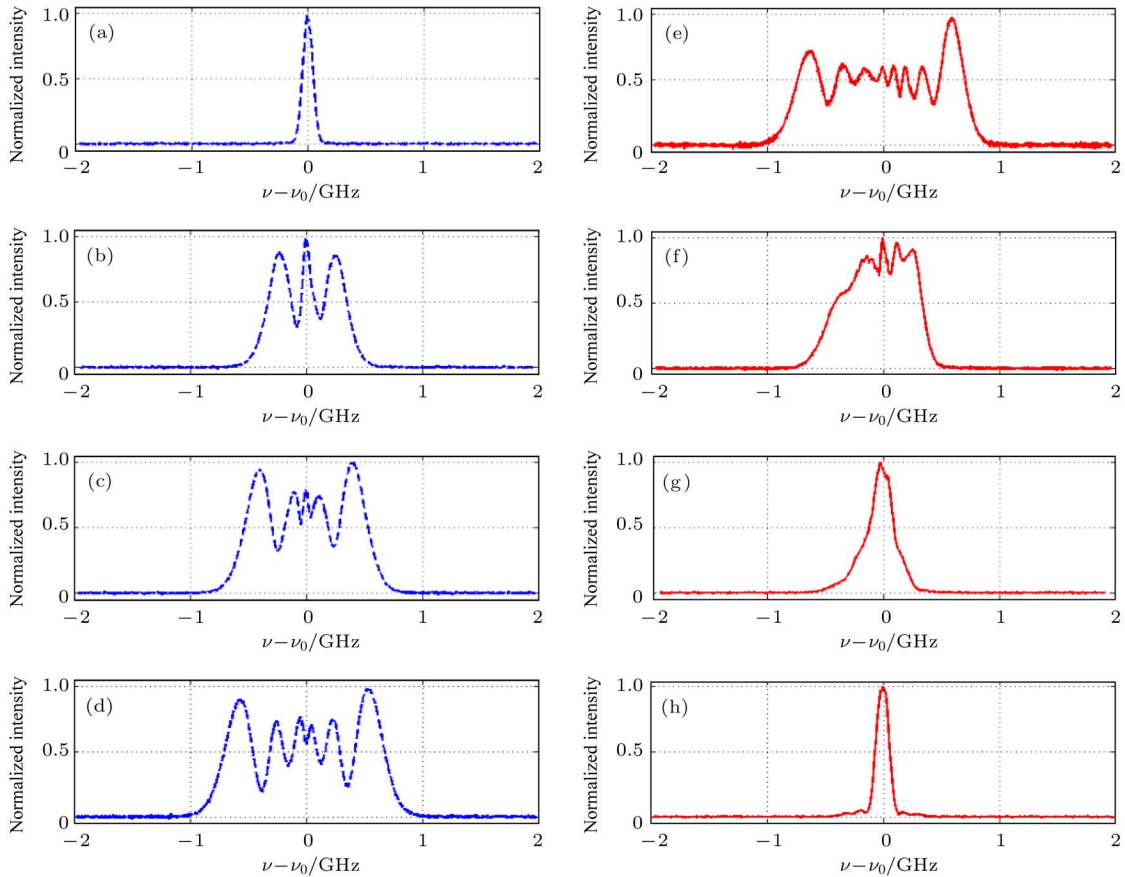


图7 SPM 相位预补偿前后测得的光谱 (a) seed, 无 SPM 补偿; (b)  $P_{\text{peak}} = 11.1$  W, 无 SPM 补偿; (c)  $P_{\text{peak}} = 16.7$  W, 无 SPM 补偿; (d)  $P_{\text{peak}} = 22.3$  W, 无 SPM 补偿; (e) seed, 有 SPM 补偿; (f)  $P_{\text{peak}} = 11.1$  W, 有 SPM 补偿; (g)  $P_{\text{peak}} = 16.7$  W, 有 SPM 补偿; (h)  $P_{\text{peak}} = 22.3$  W, 有 SPM 补偿

Fig. 7. Measured spectra with and without SPM pre-compensation: (a) Seed, without SPM compensation; (b)  $P_{\text{peak}} = 11.1$  W, without SPM compensation; (c)  $P_{\text{peak}} = 16.7$  W, without SPM compensation; (d)  $P_{\text{peak}} = 22.3$  W, without SPM compensation; (e) seed, with SPM compensation; (f)  $P_{\text{peak}} = 11.1$  W, with SPM compensation; (g)  $P_{\text{peak}} = 16.7$  W, with SPM compensation; (h)  $P_{\text{peak}} = 22.3$  W with SPM compensation.

如图7(a)—(d)所示. 当输出峰值功率为22.3 W时, 非线性相移最大, 输出激光的光谱线宽也最大, 约为1.4 GHz, 如图7(d)所示. 在施加相位调制进行SPM预补偿的情况下, 脉冲激光的线宽随着输出功率的增加而减小, 如图7(e)—(h)所示. 对于种子激光, 施加的相位调制引起了光谱展宽, 如图7(e)所示. 当脉冲激光的输出峰值功率为22.3 W时, 调制相位和非线性相移相互抵消, 输出激光从未进行SPM预补偿时的1.4 GHz压缩到120 MHz, 如图7(h)所示, 此时相当于对SPM进行了“完全补偿”.

表2 进行SPM预补偿前后SBS阈值测量结果  
Table 2. Measured SBS threshold with and without SPM pre-compensation.

重频/ MHz	SPM 补偿	SBS 阈值/ W	线宽/ MHz
5	未补偿	—	> 4000
5	补偿	22.5	136
8	未补偿	14.3	1058
8	补偿	5.0	134

进一步测量了激光重频为5 MHz和8 MHz时SPM预补偿前后的SBS阈值, 如表2所列. 当重频为5 MHz、未进行SPM预补偿时, 实验过程中未观察到SBS效应. 由第3节的仿真可知, 当预放大器引入较大的非线性相移时, 被动光纤中的激光光谱随之大幅展宽, 提升了SBS阈值, 导致在实验功率条件下没有测到脉冲激光的SBS阈值. 这种情况下, 激光的光谱也迅速展宽, 超出了Fabry-Perot扫描仪4 GHz的测量范围. 当重频为5 MHz、进行SPM预补偿时, 测量得到的SBS阈值峰值功率为22.5 W, 光谱线宽为136 MHz, 说明在这种情况下虽然线宽得到了压缩, 但SBS阈值也随之降低. 当重频为8 MHz时, 进行SPM预补偿前后的SBS阈值峰值功率分别为14.3 W和5.0 W, 激光线宽分别为1058 MHz和134 MHz. 对比重频为5 MHz和8 MHz时的测量结果可知, SPM预补偿前后SBS阈值和激光线宽的变化趋势一致, 说明SPM预补偿对脉冲激光的SBS阈值和线宽特性的影响不随重频的改变而改变. 但是, 通过对比可以看出, 增加重频会降低SBS阈值. 这是因为光纤长度和激光重频都会影响SBS阈值, 尤其是光纤较长、重频较高时, 前一个脉冲激光的Stokes光向后传输, 能

够在光纤中和后续的激光脉冲相遇, 光纤越长、重频越高, 能遇到的激光脉冲数就越多, SBS效应越强, SBS阈值也就越低<sup>[34,35]</sup>. 这也是在激光功率和F-P扫描仪的测量范围有限的情况下, 采用较长光纤和较高重频进行实验的原因.

## 5 结 论

SPM产生的非线性相移会使脉冲光纤激光发生光谱展宽, 从而降低其相干性. 为了获得窄线宽脉冲激光输出, 可以通过对种子激光施加相位调制的方法补偿非线性相移, 消除或减弱SPM的影响. 数值仿真表明, 在MOPA结构的窄线宽光纤激光系统中, SPM得到完全补偿时( $\varphi_M(t) = \varphi_{NL}(L, t)$ ), 输出的脉冲激光能够保持种子激光的光谱特性, 但SBS阈值通常会随之降低; 在“欠补偿”( $\varphi_M(t) < \varphi_{NL}(L, t)$ )情况下, 光谱线宽不能得到完全压缩, 且输出激光的SBS阈值比“完全补偿”( $\varphi_M(t) = \varphi_{NL}(L, t)$ )更低; 当进行“过补偿”( $\varphi_M(t) > \varphi_{NL}(L, t)$ )时, 光谱线宽虽然不能得到完全压缩, 但SBS阈值相对于“完全补偿”能够得到大幅提升. 搭建SPM预补偿实验平台, 利用相位调制的方法对SPM引起的光谱展宽进行了补偿, 将脉冲激光的光谱宽度从1.4 GHz压缩到120 MHz; 测试了SPM预补偿前后系统的SBS阈值, 变化趋势和理论计算保持一致. 由于窄线宽脉冲光纤激光中SPM预补偿会对SBS效应产生影响, 在系统设计和搭建过程中, 需要综合考虑激光的功率和线宽需求, 选择合适的SPM预补偿方式.

## 参考文献

- [1] Liu Y, Liu J, Chen W 2011 *Chin. Opt. Lett.* **9** 090604
- [2] Liu A, Norsen M A, Mead R D 2005 *Opt. Lett.* **30** 67
- [3] Shi W, Leigh M A, Zong J, Yao Z, Nguyen D T, Chavez-Pirson A, Peyghambarian N 2009 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **15** 377
- [4] Zhu X, Liu J, Bi D, Zhou J, Diao W, Chen W 2012 *Chin. Opt. Lett.* **10** 012801
- [5] Zhang X, Diao W, Liu Y, Liu J, Hou X, Chen W 2015 *Proc. SPIE* **9255** 925503
- [6] Jiang J, Chang J H, Feng S J, Mao Q H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7892 (in Chinese) [蒋建, 常建华, 冯素娟, 毛庆和 2010 物理学报 **59** 7892]
- [7] Su R, Zhou P, Wang X, Zhang H, Xu X 2012 *Opt. Lett.* **37** 3978

- [8] Geng J, Wang Q, Jiang Z, Luo T, Jiang S, Czarnecki G 2011 *Opt. Lett.* **36** 2293
- [9] Shi W, Petersen E B, Nguyen D T, Yao Z, Chavez-Pirson A, Peyghambarian N, Yu J 2011 *Opt. Lett.* **36** 3575
- [10] Fang Q, Shi W, Petersen E, Khanh K, Chavez-Pirson A, Peyghambarian N 2012 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **24** 353
- [11] Wu W, Ren T, Zhou J, Du S, Liu X 2012 *Chin. Opt. Lett.* **10** 050604
- [12] Li P, Hu H, Yao Y, Chi J, Yang C, Zhao Z, Zhang G, Zhang M, Liang B, Ma C 2015 *Proc. SPIE* **9656** 96560B
- [13] Wang X, Jin X, Zhou P, Wang X, Xiao H, Liu Z 2015 *Opt. Express* **23** 4233
- [14] Su R, Zhou P, Wang X, Ma Y, Ma P, Xu X, Liu Z 2014 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **20** 0903913
- [15] Kobayakov A, Sauer M, Chowdhury D 2010 *Adv. Opt. Photon.* **2** 1
- [16] Zhang L, Zhang D, Shi J, Shi J, Gong W, Liu D 2012 *Appl. Phys. B* **109** 137
- [17] Chang L P, Guo S Q, Fan W, Xu H, Ren H L, Wang X C, Chen B 2010 *Acta Opt. Sin.* **30** 1112 (in Chinese) [常丽萍, 郭淑琴, 范薇, 徐红, 任宏亮, 汪小超, 陈柏 2010 光学学报 **30** 1112]
- [18] Liu Y K, Wang X L, Su R T, Ma P F, Zhang H W, Zhou P, Si L 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 234203 (in Chinese) [刘雅坤, 王小林, 粟荣涛, 马鹏飞, 张汉伟, 周朴, 司磊 2017 物理学报 **66** 234203]
- [19] Wang X, Jin X, Wu W, Zhou P, Wang X, Xiao H, Liu Z 2015 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **27** 677
- [20] Perry M D, Ditmire T, Stuart B C 1994 *Opt. Lett.* **19** 2149
- [21] Bao H, Gu M 2009 *Opt. Lett.* **34** 148
- [22] Shi W, Petersen E B, Yao Z, Nguyen D T, Zong J, Stephen M A, Chavez-Pirson A, Peyghambarian N 2010 *Opt. Lett.* **35** 2418
- [23] Su R T, Wang X L, Zhou P, Xu X J 2013 *Laser Phys. Lett.* **10** 015105
- [24] Washburn B R, Buck J A, Ralph S E 2000 *Opt. Lett.* **25** 445
- [25] Zaouter Y, Cormier E, Rigail P, Al E 2007 *Proc. SPIE* **6453** 645300
- [26] Munroe M J, Hamamoto M Y, Dutton D A 2009 *Proc. SPIE* **7195** 71952N
- [27] Su R, Zhou P, Ma P, Lü H, Xu X 2013 *Appl. Opt.* **52** 7331
- [28] Xu C, Mollenauer L, Liu X 2002 *Electron. Lett.* **38** 1578
- [29] Agrawal G P 2013 *Nonlinear Fiber Optics* (Fifth Edition) (New York: Academic) pp370–372
- [30] Boyd R W, Rzyzewski K, Narum P 1990 *Phys. Rev. A* **49** 5514
- [31] Hollenbeck D, Cantrell C D 2009 *J. Lightwave Technol.* **27** 2140
- [32] Xu S, Li C, Zhang W, Mo S, Yang C, Wei X, Feng Z, Qian Q, Shen S, Peng M, Zhang Q, Yang Z 2013 *Opt. Lett.* **38** 501
- [33] Xu S, Yang Z, Zhang W, Wei X, Qian Q, Chen D, Zhang Q, Shen S, Peng M, Qiu J 2011 *Opt. Lett.* **36** 3708
- [34] Su R, Zhou P, Wang X, Xiao H, Xu X 2012 *Chin. Opt. Lett.* **10** 111402
- [35] Su R, Zhou P, Wang X, Lü H, Xu X 2014 *Opt. Commun.* **316** 86



# Self-phase modulation pre-compensation of narrowlinewidth pulsed fiber lasers\*

Su Rong-Tao<sup>1)2)3)†</sup> Xiao Hu<sup>1)2)3)</sup> Zhou Pu<sup>2)3)</sup> Wang Xiao-Lin<sup>2)3)</sup> Ma Yan-Xing<sup>2)3)</sup>  
Duan Lei<sup>1)</sup> Lü Pin<sup>1)</sup> Xu Xiao-Jun<sup>2)3)</sup>

1) (Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

2) (College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

3) (Hunan Provincial Collaborative Innovation Center of High Power Fiber Laser, Changsha 410073, China)

( Received 19 March 2018; revised manuscript received 24 May 2018 )

## Abstract

High peak power, single frequency nanosecond fiber lasers have aroused the intense interest in their applications such as nonlinear frequency generation, LIDAR, and remote sensing. However, self-phase modulation (SPM) will induce a temporally dependent phase shift  $\varphi_{\text{NL}}(L, t) = |A_{\text{p}}(0, t)|^2 \gamma L_{\text{eff}}$ , where  $A_{\text{p}}$  is the amplitude of pump wave,  $\gamma$  is the nonlinear parameter, and  $L_{\text{eff}}$  is the effective fiber length. The nonlinear phase shift will broaden the spectral linewidth of pulsed laser, which degrades the coherence of the laser and influences the performance of the laser. In order to obtain laser pulses with narrower linewidth, we can phase-modulate the pulsed laser with a value of  $-\varphi_{\text{NL}}(L, t)$ . Thus, the SPM induced the nonlinear phase shift can be eliminated, and the spectra of pulsed laser can remain during the amplification and transmission in the fiber. Stimulated Brillouin scattering (SBS) has very low threshold and should be taken into consideration in narrow linewidth fiber lasers. The SBS threshold, which is dependent on the linewidth of laser, will be changed at the same time when the SPM is pre-compensated for. Because the SPM pre-compensation will change the linewidth of the pulsed laser. According to three coupled amplitude equations, we numerically analyze the influence of SPM pre-compensation on SBS threshold and spectral characteristics. The stimulation results show that in a master oscillator power amplifier structured fiber laser system, when SPM is completely compensated for ( $\varphi_{\text{M}}(t) = \varphi_{\text{NL}}(L, t)$ ), the spectrum of the output pulsed laser can be maintained as that of the laser seed, but the SBS threshold usually decreases. When the SPM is compensated for incompletely ( $\varphi_{\text{M}}(t) < \varphi_{\text{NL}}(L, t)$ ), the spectral linewidth of the output laser cannot be compressed to that of the laser seed, and the SBS threshold in this situation is lower than the SBS threshold obtained when  $\varphi_{\text{M}}(t) = \varphi_{\text{NL}}(L, t)$ . When the SPM is overcompensated for ( $\varphi_{\text{M}}(t) > \varphi_{\text{NL}}(L, t)$ ), the spectral linewidth of the output laser cannot be compressed to that of the laser seed either, but the the SBS threshold in this situation is higher than the SBS threshold when  $\varphi_{\text{M}}(t) = \varphi_{\text{NL}}(L, t)$ . We also build an experimental setup to verify the feasibility of SPM compensation. In our experiment, the linewidth of the pulsed laser is reduced from 1.4 GHz to 120 MHz when SPM is compensated for by phase modulation. The SBS threshold of the system are measured before and after SPM pre-compensation, and correctness of theoretical simulation is experimentally verified. This analysis method can provide the design guidelines for narrow-linewidth pulsed fiber laser systems.

**Keywords:** fiber lasers, nonlinear optics, self-phase modulation, stimulated Brillouin scattering

**PACS:** 42.55.Wd, 42.65.-k, 42.65.Jx, 42.65.Es

**DOI:** 10.7498/aps.67.20180486

\* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2017YFF0104603), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2017M620070) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61705265, 61705264).

† Corresponding author. E-mail: [surongtao@126.com](mailto:surongtao@126.com)