

## 光纤环形腔光反馈被动相干合成系统分析

唐 选<sup>1,2</sup>, 柯伟伟<sup>1,2</sup>, 王小军<sup>1,2</sup>

- (1. 中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621900;
2. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

**摘 要:** 研究了光纤环形腔光反馈系统的锁相原理和锁相过程, 分析了聚焦透镜焦距对锁相速度的影响; 基于宽谱放大以及受激布里渊散射效应的数值模型, 评估了系统各路之间光程的方差大小、动态相位噪声频率大小, 受激布里渊散射效应对系统的选频过程及其稳定性的影响。计算结果表明, 选择合适的聚焦透镜焦距, 可以获得较快的锁相速度; 相位噪声会引起光束质量退化, 严重时导致跳模现象发生; 高功率输出时, 光纤中的受激布里渊散射效应会限制各频率下的峰值强度, 并导致更多波长激射以及光束质量退化。理论证明了环形腔光反馈会提供一种模式线宽随反馈次数增加而不断压窄的机制, SBS 效应的存在则提供了一种谱线展宽机制, 使得实际模式线宽稳定在均衡值。

**关键词:** 环形腔光反馈被动相干合成; 相位噪声; 受激布里渊散射

**中图分类号:** TN24    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2014)05-1421-07

## Analysis on passive phasing in the ring-cavity fiber laser

Tang Xuan<sup>1,2</sup>, Ke Weiwei<sup>1,2</sup>, Wang Xiaojun<sup>1,2</sup>

- (1. Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;
2. Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China)

**Abstract:** The theory and basic properties on the passive phasing in the ring-cavity structure was illustrated. The influence of the focal length on the mode-locking speed was analyzed. An analysis model was established consisting of a broad spectrum amplification model and a simplified model for stimulated Brillouin scattering effect. Speed and stability of the mode-locking in this scheme was shown to be determined by the variance of optical path difference, the dynamic phase noise and the stimulated Brillouin scattering effect. The simulation results show that, using a proper focal length, a fast mode-locking speed is obtained. The phase noise degenerates of the beam quality, and even causes the mode hopping. The stimulated Brillouin scattering effect of the fiber with high power output limits the peak power of each frequency, increases the peak number in the output spectrum, and causes degeneration of beam quality. The mechanism of the mode width decrease with the growth of feedback times is demonstrated in theory. The results show that the stimulated Brillouin scattering effect provides a mechanism of mode width growth, which makes the mode width maintain at a balanced value.

**Key words:** passive phasing in the ring-cavity structure; phase noise; stimulated Brillouin scattering

收稿日期: 2013-09-17; 修订日期: 2013-10-24

基金项目: 中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室基金(LJG2012-06)

作者简介: 唐选(1983-), 男, 博士, 主要从事激光物理方面的研究。Email: tang\_xuan@iapcm.ac.cn

### 0 引言

半导体激光泵浦的全固态激光器因其体积小、效率高、可靠性高等优点,具有广阔的发展前景。

但是热效应、激光介质特性等因素限制了单台全固态激光器的平均输出功率。将多路激光进行相干合成,是在保持良好光束质量的同时获得更高功率激光输出的可行途径之一。

实现相干合成需要采用相位控制技术锁定各路激光的相位,相位控制技术可以分为主动相位控制<sup>[1-4]</sup>和被动相位控制<sup>[5-10]</sup>两大类。被动相干合成的基本原理通常是通过某种自反馈,增强同相信号,抑制异相信号。虽然随着激光路数的增多,被动相位控制方案的锁相效果降低,相干合成的效率也随着激光数目的增多而下降<sup>[9]</sup>,但是在激光路数较少时,因为不需要伺服-反馈装置、相较于主动锁相方式、系统的结构更简单,仍具有吸引力。在光纤激光系统中,已经发明了自傅立叶腔反馈<sup>[6]</sup>、合束自组织<sup>[7]</sup>、环形腔光反馈<sup>[8]</sup>等多种被动相干合成方式,但自傅立叶腔难以实现全光纤结构,合束自组织效率较低,而环形腔光反馈目前看起来具有向高能的定标能力<sup>[9]</sup>,其中涉及的物理问题也值得深入研究。文中介绍了对环形腔光反馈被动相干合成系统的物理建模,研究其中涉及到的物理问题,如相位噪声、光纤中的受激布里渊散射(SBS)对合成效果的影响。

### 1 锁相原理

环形腔光反馈被动相干合成系统基本结构如图1所示,对于由 N 路放大器组成的激光阵列,准直发射后提取少量输出能量,并通过会聚透镜聚焦至收集反馈光能量的单模光纤的端口。由于透镜焦平面的模场与激光阵列的远场有着相同的场分布形态,各子光束同相时反馈能量能更有效的耦合入单模光纤中(图 2)。通过这种空间频谱滤波进而反馈放大的过程,实现对同相模式低损而其他空间模式高损,从而达到系统的相位锁定。

笔者所使用主要光纤结构参数与计算参数如下:7 束光纤激光呈六角排布,子光束近场由 1.75 倍芯区的光纤模场扩束而成(99.9%以上的能量集中在

该范围内),相干合成以平面波计的 Airy 斑大小为 1.3 倍反馈单模光纤的芯径。

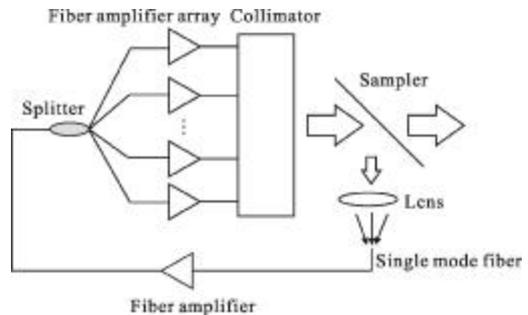


图 1 环形腔光反馈被动相干合成系统基本结构  
Fig.1 Schematic diagram of passive phasing in the ring-cavity structure

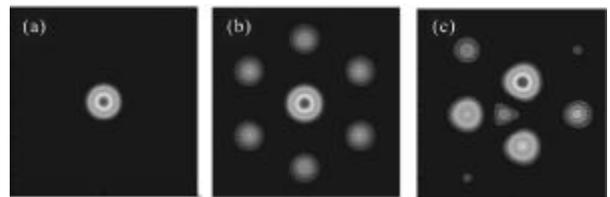


图 2 单模光纤模场(a);透镜焦平面远场,子束同相(b);子束不同相(c)  
Fig.2 Field pattern of single mode fiber (a); far field pattern with phase locking (b); far field pattern without phase locking (c)

任一时刻的退相干来自于子光束光学长度(OPL)的不一致

$$\phi_i = 2\pi(nL_i/\lambda - [nL_i/\lambda]) \tag{1}$$

在给定的光谱区间可能存在一些频率,使得各子光束 OPL 的差异并不带来相对相移,即

$$\phi_i = 2\pi(nL_i/\lambda - [nL_i/\lambda]) \equiv \phi \tag{2}$$

这些频率在聚焦透镜焦平面中心区域的强度明显大于其他频率,对应频率的反馈能量能更有效的耦合入单模光纤中(图 2),其反馈量的大小正比于透镜焦平面的模场  $u_f$  与单模光纤模场  $u_{01}$  交叠积分  $C_{FD}$  的模平方:

$$C_{FD}(\lambda) = \frac{\iint d\vec{x}_f^2 \cdot u_f(\vec{x}_f, \lambda) u_{01}(\vec{x}_f, \lambda)}{\iint d\vec{x}_f^2 \cdot |u_{01}(\vec{x}_f, \lambda)|^2} \tag{3}$$

对于 Yb 光纤放大器,其增益谱可达数十 nm,可能存在多个满足相位锁定条件的频率,对应输出谱上多个尖峰<sup>[8-9]</sup>。为了描述多波长出射下的光束质量,定义 BQ:

$$BQ = \sqrt{\frac{R_{PIB} \int d\lambda \cdot P_{out}(\lambda)}{\int d\lambda \cdot PIB(\lambda)}} = \sqrt{\frac{R_{PIB} \int d\lambda \cdot P_{out}(\lambda)}{\int d\lambda \cdot P_{out}(\lambda) / BQ^2(\lambda)}} \quad (4)$$

式中:  $R_{PIB}$  为理想时第一衍射斑中的能量比例, 因此多波长下好的光束质量应对于发射能量集于少数波长且这些波长的光束质量  $BQ(\lambda)$  好的情况。

没有相位/光程噪声的扰动时, 如果存在几个理想相干匹配的频率, 数次反馈后绝大多数能量将集中到这几个频率上。由公式(3)可知, 反馈注入的远场光斑的尺寸将直接影响反馈强度: 子束同相时与相干相消时的  $|C_{FD}(\lambda)|^2$  的差异越大, 则空间频谱滤波的效果越明显, 锁相速度则越快。因此对于实际的实验系统, 需要选择合适的透镜焦距。图 3 给出了不同透镜焦距下,  $BQ$  随反馈次数的变化, 其中  $L_f$  对应于以平面波计的 Airy 斑等于反馈单模光纤芯径时的聚焦透镜焦距。透镜焦距越大, 子束同相时透镜焦平面模场  $u_f$  的主瓣较单模光纤模场  $u_{01}$  越大, 经过反馈单模光纤的空间滤波, 焦平面原点附近更小区域的能量才能反馈进入光回路。因此, 透镜焦距过小会导致 OPL 不一致的频率仍然能获得较大的光反馈, 会严重降低锁相速度。从计算结果可以看出, 当透镜焦距小于  $L_f$  时, 锁相速度的变化与  $f$  的变化敏感; 当透镜焦距大于  $L_f$  后, 锁相速度的提升并不明显。在后面的计算中, 选择透镜焦距  $f=1.3L_f$ , 这时在目前选取光纤阵列结构参数下, 相干合成相位锁定时远场  $u_f$  的主瓣与光纤模场  $u_{01}$  相似度高(图 2)。

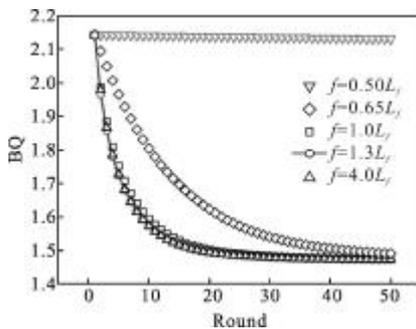


图 3 不同透镜焦距下  $BQ$  随反馈次数的变化

Fig.3 BQ vs round-trip number with different focal length

不考虑噪声时, 由于原理上各波长不同权反馈, 主峰持续获得最强反馈, 主峰中心频率功率快速增加, 谱线宽度持续压窄, 反复反馈选频后会完全抑制其他绝大多数频率(图 4)。

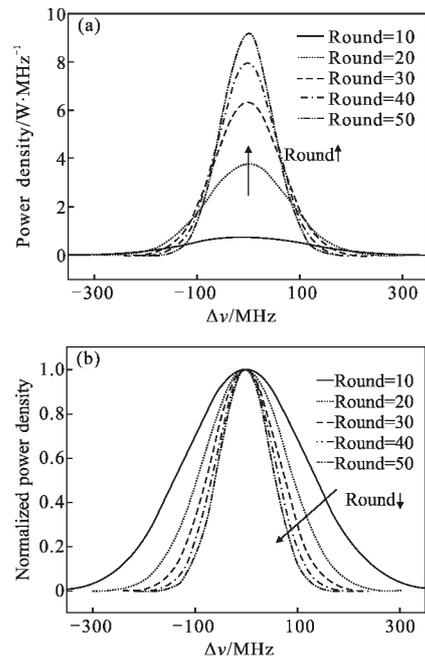


图 4 主峰随光反馈次数的变化, 图(b)是图(a)的峰值归一化结果

Fig.4 Main peak patterns with different round-trip number,

(a) absolute value, (b) normalized value

图 5 给出了理想情况下光束质量  $BQ$  随反馈次数的变化。虽然光程方差  $\sigma(nL)$  越大, 输出光谱中的尖峰越多, 谱宽越窄<sup>[10]</sup>, 但是锁相后的光束质量与  $\sigma(nL)$  并无必然关系。

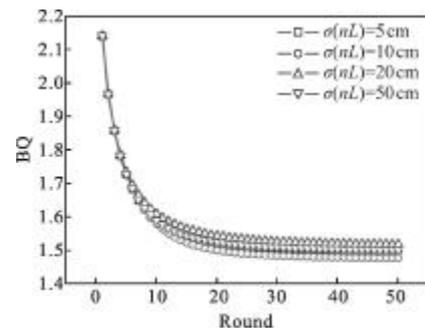


图 5 不同光程方差下  $BQ$  随反馈次数的变化

Fig.5 BQ vs round trip number with different variances of OPL

## 2 相位噪声对系统选频过程影响

子光束的相位噪声是造成系统无法锁相的最主要因素。笔者认为各种噪声均起源于统一的光学长度扰动, 即:

$$\Delta\phi_i(\lambda) = 2\pi \frac{\Delta n L_i}{\lambda} \quad (5)$$

有噪声存在时, 光学长度差持续变化, 这会破坏

静态下主峰稳定增长的机制,甚至跳模现象(图 6)。由于相位噪声抑制或破坏了主要模式幅值的稳定增长,光束质量会发生退化(图 7)。下面将给出这一现象的理论解释。

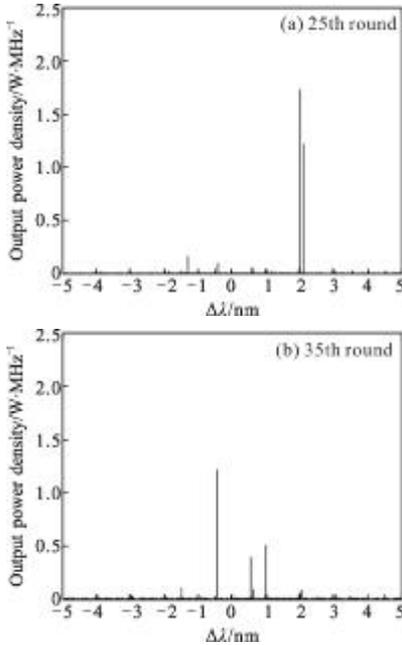


图 6 相位噪声导致的跳模现象

Fig.6 Mode hopping induced by phase noise

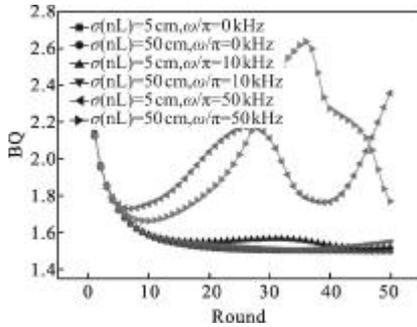


图 7 不同光程方差/噪声频率下 BQ 随反馈次数的变化

Fig.7 BQ vs round-trip number with different variances of OPL and noise frequencies

环形腔反馈过程可以看作出射光经过空间滤波再光放大输出的循环过程,假设出射光谱和空间滤波谱均由一系列中心频率不同的高斯峰叠加而成,则在某一轮光反馈过程中,出射光经过空间滤波后反馈光的频谱可以表达为出射光谱和空间滤波谱的乘积,即:

$$S_{\text{feedback}}(\nu) = S_{\text{laser}}(\nu) S_{\text{filter}}(\nu) = \sum_i A_{if} \exp \left[ -\frac{(\nu - \nu_{if})^2}{2\sigma_{if}^2} \right]$$

$$\sum_i A_{if} \exp \left[ -\frac{(\nu - \nu_{if})^2}{2\sigma_{if}^2} \right] = \sum_i \sum_j A_{ifij} \exp \left[ -\frac{(\nu - \nu_{fij})^2}{2\sigma_{fij}^2} \right] \quad (6)$$

其中,

$$A_{fij} = A_{if} A_{fj} \exp \left[ -\frac{(\nu_{if} - \nu_{fj})^2}{2(\sigma_{if}^2 + \sigma_{fj}^2)} \right] \quad (7)$$

$$A_{fij} = \frac{\sigma_{fj}^2 \nu_{if} + \sigma_{if}^2 \nu_{fj}}{\sigma_{if} + \sigma_{fj}} \quad (8)$$

$$\frac{1}{\sigma_{fij}^2} = \frac{1}{\sigma_{if}^2} + \frac{1}{\sigma_{fj}^2} \quad (9)$$

其中,下标 **f** 表示反馈光;下标 **i** 表示分光进入汇聚透镜的出射激光;下标 **f** 表示空间滤波。

从公式(7)-(9)可以看出,静态无相位噪声时,由于最初始的输出谱近似为放大器增益介质的增益谱,对于 Yb 光纤放大器,其增益谱可达数十 nm,远大于空间滤波谱中的高斯峰的谱宽<sup>[8]</sup>,第一轮反馈后,输出光的谱形与空间滤波谱相似,在之后的反馈中,模式频率锁定在滤波谱高斯峰的中心频率处,锁定模式的谱线宽度持续压窄;相位噪声会导致空间滤波谱高斯峰分布的变化,则每次反馈光放大输出后,其高斯峰的中心频率与空间滤波谱不一致,则经过空间滤波后,反馈光的中心频率位于新的频率处,该频率较空间滤波前的出射光向空间滤波谱的中心频率处移动,同时峰值的增长将受到抑制,较稳态时的减小比例为  $\exp[-(\nu_{if} - \nu_{fj})^2 / [2(\sigma_{if}^2 + \sigma_{fj}^2)]]$ 。若在一轮光反馈的时间内,相位变化量较小,如相位噪声的幅度较小或者频率较低时,则空间滤波谱中心频率变化量较小,主要模式仍有可能较稳定的增长,光束质量退化较少;若噪声较强,新的中心频率大幅偏离原来位置,同时峰值会出现大比例的削弱,两者效果的共同作用导致跳模现象出现。

从公式(9)可以看出,虽然相位噪声会导致模式频率的变动,但每轮反馈的空间滤波后,新模式谱线宽度均会被压窄为原来的  $1/\sqrt{1 + \sigma_{if}^2/\sigma_{fj}^2}$ ,谱线宽度越小,压窄效应越弱。也就是说,尽管实际的输出光谱不断变化,输出功率会动态地集中在数个谱宽较窄的频段上,因此输出高功率激光时,SBS 效应必须考虑。

### 3 SBS 对系统选频过程影响

对于 Yb 光纤放大器,其增益谱可达数十 nm;在

输出高功率激光时, SBS 效应不可忽略。针对这些特点, 计算模型中加入了宽谱放大过程 (~10 nm, 目前只考虑了主放过程), 并实现了 SBS 与反馈过程的耦合计算。

笔者所使用主要光纤结构参数与计算参数如下: 7 束光纤激光呈六角排布, 子光束近场由 1.75 倍芯区的光纤模场扩束而成, 相干合成以平面波计的 Airy 斑大小为 1.3 倍反馈单模光纤的芯径; 主光纤尺寸为 20/400 μm, 长 15 m, 泵浦吸收 1.26 dB/m, 反馈单模光纤 10/125 μm, 注入信号 100 W, 有效泵浦功率 1.2 kW, 循环长度 30 m, round-trip 时间 0.15 μs, 总频谱区间 10 nm, 假设光学长度差满足正态分布; 考虑 SBS 效应时, SBS 增益线宽为 30 MHz。

计算采用的耦合 SBS 的宽谱功率放大模型如下, 其中 SBS 模型使用双热平衡能级近似的速率方程, 考虑光纤对 SBS 增益谱的非均匀展宽, 考虑不同频率信号产生的 SBS 的交叠, 使用分布式 BS 噪声模型。

$$\begin{cases} \frac{dP_{pf}}{dz} = ((\alpha_p + g_p)N_2 - \alpha_p - I_p)P_{pf} \\ -\frac{dP_{pb}}{dz} = ((\alpha_p + g_p)N_2 - \alpha_p - I_p)P_{pb} \\ \frac{dP_s^{(j)}}{dz} = ((\alpha_s + g_s)N_2 - \alpha_s - I_s)P_s^{(j)} - \left( \sum_i \frac{g_{SBS}^{(j \rightarrow i)}}{A_{30}} P_b^{(i)} \right) P_s^{(j)} - \left( \sum_i Q^{(j \rightarrow i)} \right) P_s^{(j)} \\ -\frac{dP_b^{(i)}}{dz} = ((\alpha_s + g_s)N_2 - \alpha_s - I_s)P_b^{(i)} + \left( \sum_j \frac{g_{SBS}^{(j \rightarrow i)}}{A_{30}} P_s^{(j)} \right) P_b^{(i)} + \left( \sum_i Q^{(j \rightarrow i)} P_s^{(j)} \right) \end{cases} \quad (10)$$

式中, 反转分数为:

$$N_2 = \frac{\sum_k P_k \lambda_k \alpha_k}{\frac{hcA_{co}n_0}{\tau} + \sum_k P_k \lambda_k (\alpha_k + g_k)} \quad (11)$$

其中, 第 j 个信号频率产生第 i 个 SBS 频率的增益为:

$$g_{SBS}^{(j \rightarrow i)}(f) = g_0 \frac{\Gamma_0/2}{F_{co} - F_{cl}} \left( \arctan \frac{f - F_{cl}}{\Gamma_0/2} - \arctan \frac{f - F_{co}}{\Gamma_0/2} \right) \quad (12)$$

第 j 个信号频率产生第 i 个 BS 频率噪声强度为:

$$Q^{(j \rightarrow i)} = \frac{g_{SBS}^{(j \rightarrow i)} \Gamma_0 c k T}{8n_{co} v_{sound} A_{30}} \quad (13)$$

由于计算中谱线需要分割到远小于 SBS 增益线

宽, 导致全谱耦合计算需要大规模的计算量, 目前使用的是等效模型, 做了如下近似假设: SBS 耦合只发生在频谱峰段内, 每个选频分到的总能量不因 SBS 变化, 某频谱峰段内 SBS 损耗比例相同 (不能描述 SBS 对谱宽的影响), 忽略 SBS 频移 (~10 GHz) 对导致的模式竞争。

由于 SBS 随着功率提升将非线性增大, 因此会显著抑制主峰的增强, 主峰频率损耗增大, 阈值提高, 导致其他次峰频率获得能量, 峰的数目增多 (图 8), 而这些次峰并非对应最佳的相干条件, 因此 SBS 的存在会导致输出功率的下降, 以及光束质量退化 (图 9)。另外过高的 SBS 反射功率无法接受, 对系统中的单根光纤最大输出功率提出了限制。

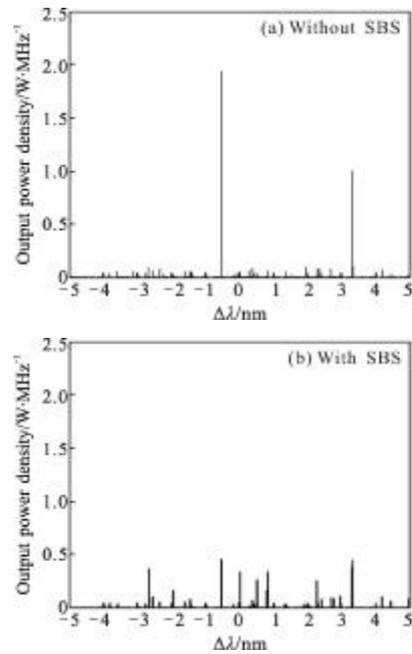


图 8 SBS 对锁相输出光谱的影响 (25th round)

Fig.8 Influence of SBS on output spectrum (25th round)

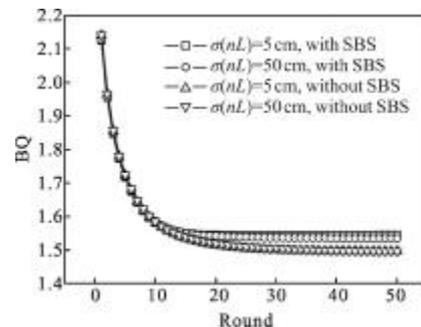


图 9 有/无 SBS 时不同光程方差 BQ 随反馈次数的变化

Fig.9 BQ vs round trip number with different variances of OPL, taking an/no account of SBS impact

不考虑 SBS 时,空间滤波作用使得相位锁定模式可以近似为高斯形分布<sup>[8-9]</sup>,因此在目前含 SBS 效应的宽谱放大计算模型中,输入输出模式均近似为高斯形。该近似模型仅引入了 SBS 效应的衰减机制,可以反映出 SBS 效应对模式峰值增长的限制,但并不改变谱型形状;在 SBS 精确模型下,达到 SBS 阈值时,SBS 效应还会使得经过光放大后输出谱的尖峰较输入时展宽,近似模型并不能反映出这种效应。图 10 给出了无 SBS、SBS 近似模型和 SBS 精确模型下,高斯形输入再经放大后的输出谱形,其中输入信号光功率 30 W,线宽 100 MHz,泵浦功率 100 W,考虑 SBS 效应后,输出信号功率为 114.4 W,SBS 功率为 5.64 W。由于 SBS 随着功率提升将非线性增大,相较于无 SBS 效应的结果,不仅会使得整体损耗增大功率下降,同时由于峰值附近 SBS 效应更为明显,导致实际的输出谱线宽度增加。

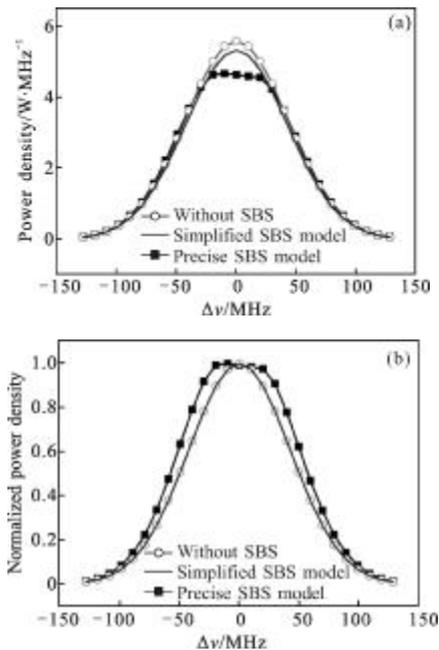


图 10 不同 SBS 计算模型下输出光谱示意图  
Fig.10 Schematic diagram of output spectrum with different calculation models of SBS

图 11 给出了不同入射线宽的高斯峰,经过放大后 SBS 效应导致的谱线展宽情况,其中输入信号光功率 30 W,泵浦功率为 100 W 和 200 W,定义半高全宽的展宽比例(FWHM Broadening Ratio)为放大后激光的半高全宽比输入信号光的半高全宽, $P_b$  为 SBS 的总功率, $P_s$  为放大后的信号光总功率。从图中可以

看出,相同泵浦功率下,输入信号光谱线越窄,展宽比例越大,SBS 相对于出射光的功率比例越大,即 SBS 效应越明显;泵浦功率越大,发生展宽现象的 FWHM 临界值越大。所以 SBS 近似模型因无法模拟峰的展宽效应,经过多次光反馈后会出现谱线过度压窄,进而高估 SBS 的总功率。未来将进一步实现基于全谱段 SBS 过程的计算,以更准确地评估宽谱放大时的 SBS 强度及其影响。

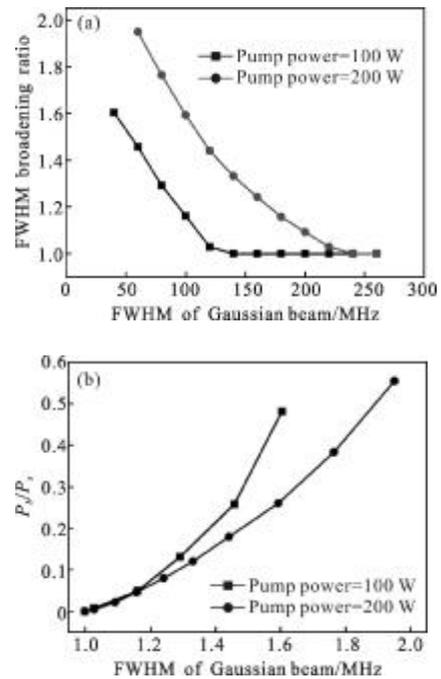


图 11 输入信号谱宽 vs 谱宽展宽比例和谱宽展宽比例 vs SBS 与信号光的功率比例  
Fig.11 FWHM vs FWHM broadening ratio and FWHM broadening ratio vs power ratio of  $P_b$  to  $P_s$

在第 2 节中已理论证明了环形腔光反馈会提供一种模式线宽随反馈次数增加而不断压窄的机制,相位噪声的存在并不能改变谱线宽度的变化趋势,压窄效应只会随着模式线宽的减小而减弱;而 SBS 效应的存在则提供了一种谱线展宽机制,并且随着模式线宽的减小,展宽效应越为明显。因此实际中模式线宽会取得一个均衡值而非无限减小,此时近似有:

$$\frac{1}{\sigma_{fb}^2} \approx \frac{1}{\eta^2 \sigma_{fb}^2} + \frac{1}{\sigma_{filter}^2} \quad (14)$$

式中: $\eta$  为谱线展宽的比例,与输入信号功率、泵浦功率以及输入信号 FWHM( $=2\sqrt{2\ln 2} \sigma_{fb}$ )有关。由公式(14)可知均衡时输出谱线宽度为:

$$\text{FWHM}_{\text{output}} = \sqrt{\eta^2 - 1} \cdot \text{FWHM}_{\text{filter}} \quad (15)$$

式中:  $\text{FWHM}_{\text{filter}}$  为空间滤波谱的半高全宽, 反比于光程方差  $\sigma(nL)^{[10]}$ 。

## 4 结 论

文中基于耦合 SBS 的宽谱功率放大模型, 研究了光纤环形腔光反馈系统的锁相过程。计算结果表明, 选择合适的聚焦透镜焦距, 可以获得较快的锁相速度; 相位噪声会引起光束质量退化, 严重时导致跳模现象发生; 高功率输出时, 光纤中的受激布里渊散射效应会限制各频率下的峰值强度, 并导致更多波长激射以及光束质量退化。理论证明了环形腔光反馈会提供一种模式线宽随反馈次数增加而不断压窄的机制, 相位噪声的存在并不能改变谱线宽度的变化趋势, SBS 效应的存在则提供了一种谱线展宽机制, 使得实际模式线宽稳定在均衡值。

## 参 考 文 献:

- [1] Marmo J, Injeyan H, Komine H, et al. Joint high power solid state laser program advancements northrop grumman [C]//SPIE, 2009, 7195, 719507.
- [2] Shay T M, Baker J T, Sanchez A D, et al. High power phase locking of a fiber amplifier array [C]//SPIE, 2009, 7195: 71951M.
- [3] Vorontsov M A. Adaptive photonics phase-locked elements (APPLE): system architecture and wave front control concept [C]//SPIE, 2005, 5895: 589501.
- [4] Zhou Pu, Ma Yanxing, Wang Xiaolin, et al. Coherent beam combination of three two-tone fiber amplifiers using stochastic parallel gradient descent algorithm [J]. Optics Letters, 2009, 34(19): 2939-2941.
- [5] Napartovich A P. Phase-locking of laser arrays: problems and solutions[C]//SPIE, 2000, 4065: 748-758.
- [6] Corcoran C J. Experimental demonstration of a phase-locked laser array using a self-Fourier cavity [J]. Applied Physics Letters, 2005, 86: 201118-201121.
- [7] Brusselback H, Jones D C, Mangir M, et al. Self-organized coherence in fiber laser arrays[J]. Optics Letters, 2005, 30: 1339.
- [8] Rothenberg Joshua E. Passive coherent phasing of fiber laser arrays [C]//SPIE, 2008, 6873: 687315.
- [9] Zhou Jun, He Bing, Xue Yuhao, et al. Study on passive coherent beam combination technology of high power fiber laser arrays[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900129. (in Chinese)  
周军, 何兵, 薛宇豪, 等. 高功率光纤激光阵列被动相干光束技术研究[J]. 光学学报, 2011, 31(9): 0900129.
- [10] Bochove Erik J, Shakir Sami A. Analysis of a spatial-filtering passive fiber laser beam combining system[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2009, 15(2): 320-327.