

# 利用多波长放大抑制窄线宽光纤放大器中受激布里渊散射效应的研究进展

杜文博 朱家健 周 朴 许晓军 舒柏宏

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 多波长放大是能够有效抑制窄线宽光纤放大器中受激布里渊散射(SBS)效应的一种新方法。对其基本理论进行了详细的介绍,并按照波长间隔的不同将其分为大波长间隔和小波长间隔多波长放大两种类型。综述了这两类多波长放大方法在理论研究和实验研究方面取得的重要成果,分析了它们各自在抑制SBS上的优势,指出大波长间隔多波长放大在提高单频激光输出功率方面具有明显优势,而小波长间隔多波长放大在进一步提升高功率光纤激光相干合成系统功率方面具有巨大的应用价值。

**关键词** 光纤光学;窄线宽光纤放大器;受激布里渊散射;多波长放大;高功率光纤激光

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.110607

## Research Progress in Suppression of Stimulated Brillouin Scattering in Narrow-Linewidth Fiber Amplifiers with Multi-Tone Amplification

Du Wenbo Zhu Jiajian Zhou Pu Xu Xiaojun Shu Bohong

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** Multi-tone amplification is a novel technique to effectively suppress stimulated Brillouin scattering (SBS) effect in narrow-linewidth fiber amplifiers. The corresponding basic principles are described in detail. Multi-tone amplifications can be classified into large and small wavelength separation amplifications. Important outcomes in theoretical and experimental researches of these two kinds of amplifications are overviewed and their superiorities in SBS suppression are analyzed. It is pointed out that the large wavelength separation amplification shows great advantage in enhancing the output power of the single frequency laser and the small wavelength separation amplification is of great value to further enhance the output power of current high power coherent beam combination system of fiber lasers.

**Key words** fiber optics; narrow-linewidth fiber amplifier; stimulated Brillouin scattering; multi-tone amplification; high power fiber lasers

**OCIS codes** 060.2310; 060.2320; 060.3510

## 1 引言

近年来,随着光纤技术的飞快发展,单根单模输出功率千瓦量级的光纤激光器已经问世且功率不断提升<sup>[1~3]</sup>。然而,这些高功率光纤激光器输出激光较宽的谱线特性使得它们在诸如引力波探测、同位素分离、自由空间光通信、激光雷达以及光束相干合成等需要窄线宽(线宽在数千赫兹)激光的领域无法得到应用。对于窄线宽光纤激光,功率提升面临的主要障碍就是光纤中的受激布里渊散射(SBS)效应<sup>[4~7]</sup>。由于光波被限制在小截面的光纤纤芯中传输,光纤激光器中的光功率密度很高、光场相互作用距离较长,因而在高功率光纤激光器中很容易产生各种非线性效应<sup>[8]</sup>。特别是在高功率窄线宽光纤放大器中,激光线宽(千赫兹量

**收稿日期**: 2011-05-16; **收到修改稿日期**: 2011-07-25; **网络出版日期**: 2011-10-13

**作者简介**: 杜文博(1986—),男,硕士研究生,主要从事光纤放大器方面的研究。E-mail: duwenbomtn@163.com

**导师简介**: 舒柏宏(1960—),男,教授,硕士生导师,主要从事高能激光技术方面的研究。E-mail: shu\_bh@tom.com

级)远小于受激布里渊增益线宽(数十兆赫兹量级),在较低的抽运功率下便会产生较强的SBS效应。SBS使得信号光以较低的频率后向散射,当抽运光超过一定的阈值时后向散射的斯托克斯光将会急剧增加,严重时后向散射光会造成光纤隔离器、抽运激光器以及种子激光器等器件的损伤。目前有报道的窄线宽光纤放大器的单纤最高输出功率仅在511 W<sup>[9]</sup>。虽然可以利用光纤激光相干合成进一步提升窄线宽激光的功率,但目前受合成控制技术的限制,相干合成的合成路数有限,实现功率的提升仍要基于单链路激光功率的大幅度提升。因此,抑制SBS已成为高功率窄线宽光纤激光功率进一步提升的关键。

目前已经提出或实现的SBS抑制方法主要有运用温度场和应力场分布<sup>[10,11]</sup>、利用偏振效应<sup>[12]</sup>、采用大模场面积光纤<sup>[13]</sup>、改变光纤掺杂物成分和分布<sup>[14]</sup>、利用布拉格光栅反射后向散射光<sup>[15]</sup>以及利用具有布里渊频移分布的光纤<sup>[16]</sup>等。近年来,利用多波长放大抑制SBS的方法被提出并得到了理论模拟和实验验证<sup>[17~26]</sup>。该方法通过在光纤放大器中同时放大不同波长的激光来实现对SBS的抑制,可以与前述的各种SBS抑制方法有效结合并且与当前的全光纤激光放大器结构具有很好的兼容性。本文回顾总结近几年来多波长放大抑制SBS的研究进展,分析其在抑制SBS上的优势,并对其应用前景做了展望。

## 2 基本理论与数值模拟

按照波长成分之间的频率间隔,多波长放大可以分为两类:1)小波长间隔多波长放大,其各波长成分之间的频率间隔等于或小于2倍布里渊频移;2)大波长间隔多波长放大,其各波长成分之间的频率间隔大于甚至远大于2倍布里渊频移。这两种情形在抑制SBS上具有不同的物理机制。基础理论和数值模拟方面,美国空军实验室Dajani等<sup>[17,18]</sup>取得了较为典型的研究成果。

### 2.1 基本理论

多波长放大理论模型的建立需综合考虑激光增益、SBS和四波混频(FWM)效应<sup>[18]</sup>。以小波长间隔三波长放大为例,如图1所示,三个种子光频率分别为 $\omega_1, \omega_2$ 和 $\omega_3$ ,产生的FWM边频光中只需考虑频率靠近种子光的影响较大的4个,其余均可忽略不计。

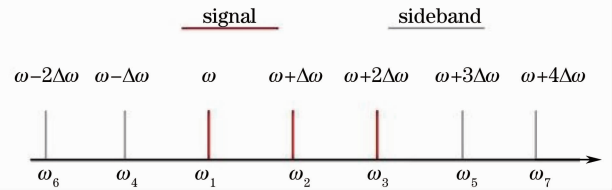


图1 频率间隔为2倍布里渊频移的种子光及产生的FWM边频光

Fig. 1 Signals with wavelength separation of twice the Brillouin shift and their FWM sidebands

忽略FWM边频光和SBS斯托克斯光之间的相互作用,所有频率成分的电场可表示为

$$E_i(\mathbf{r}, t) = \sum_j \frac{1}{2} A_{i,j}(z) \phi_{i,j}(x, y) \exp[i(\beta_{i,j}z - \omega_i t)] + c. c., \quad (1)$$

式中 $j$ 代表模式, $A_{i,j}(z)$ 为振幅, $\beta_{i,j}$ 为传播常数, $\phi_{i,j}(x, y)$ 为横截面。由于大模场光纤对于高阶模式有较大的弯曲损耗,模拟中可以只考虑低阶模并在以后的表达中略去 $j$ 。因为波长间隔远小于光波长,所有模式截面均视为相等。当 $i = 1, 2$ 时有

$$\frac{dA_i}{dz} = \frac{g_i}{2} A_i - \frac{g_B \epsilon_0 c n_i \kappa_{ao}}{4} (|A_{i,S}|^2 + \alpha |A_{i+1,S}|^2) A_i + \frac{i \omega_i n^{(2)} \kappa_{pm}}{c} f_i, \quad (2)$$

式中 $\alpha$ 为耦合因子,小波长间隔时为1,大波长间隔时为0; $g_i, n^{(2)}$ 和 $g_B$ 分别为激光增益、非线性折射率和SBS增益系数; $A_{i,S}$ 为斯托克斯光; $f_i$ 为与FWM有关的因子。FWM边频光间的重叠因子 $\kappa_{pm}$ 和声波与光波间的重叠因子 $\kappa_{ao}$ 为

$$\kappa_{pm} = \kappa_{ao} = \frac{\iint |\phi|^4 dx dy}{\iint |\phi|^2 dx dy}. \quad (3)$$

激光增益以二能级系统建模可表示为

$$g_i = \frac{\iint (N_2 \sigma_i^{(e)} - N_1 \sigma_i^{(a)}) |\phi|^2 dx dy}{\iint |\phi|^2 dx dy}, \quad (4)$$

式中 $N_2$ 和 $N_1$ 分别为上下能级的粒子数密度, $\sigma_i^{(e)}$ 和 $\sigma_i^{(a)}$ 表示频率 $\omega_i$ 的发射和吸收截面。对(4)式在纤芯中

积分。对于高频成分有

$$\frac{dA_3}{dz} = \frac{g_3}{2}A_3 - \frac{g_B\epsilon_0 cn_3 \kappa_{ao}}{4} |A_{3,S}|^2 + \frac{i\omega_3 n^{(2)} \kappa_{pm}}{c} f_3, \quad (5)$$

对于斯托克斯光有

$$\frac{dA_{1,S}}{dz} = -\frac{g_{1,S}}{2}A_{1,S} - \frac{g_B\epsilon_0 cn_1 \kappa_{ao}}{4} |A_1|^2 A_{1,S}, \quad (6)$$

$$\frac{dA_{i,S}}{dz} = -\frac{g_{i,S}}{2}A_{i,S} - \frac{g_B\epsilon_0 cn_i \kappa_{ao}}{4} (|A_i|^2 + \alpha |A_{i-1}|^2) A_{i,S}, \quad (i = 2, 3) \quad (7)$$

对于 FWM 边频光有

$$\frac{dA_i}{dz} = \frac{g_i}{2}A_i + \frac{i\omega_i n^{(2)} \kappa_{pm}}{c} f_i, \quad (i = 4, 5, 6, 7) \quad (8)$$

起始位置处的所有 FWM 边频光大小为零。

采用同向抽运结构,抽运光可表示为

$$\frac{dI_P}{dz} = \frac{d_{core}^2}{d_{clad}^2} (N_2 \sigma_P^{(e)} - N_1 \sigma_P^{(a)}) I_P, \quad (9)$$

式中  $d_{core}$  和  $d_{clad}$  分别为纤芯和内包层的直径。

由稳态速率方程可得

$$N_0 = N_1(z) + N_2(z), \quad (10)$$

$$N_2(z) = \frac{\sum_{i=1}^7 \frac{\tau \sigma_i^{(a)}}{\hbar \omega_i} I_i + \sum_{i=1}^3 \frac{\tau \sigma_{i,S}^{(a)}}{\hbar \omega_{i,S}} I_{i,S} + \frac{\tau \sigma_P^{(a)}}{\hbar \omega_P} I_P}{\sum_{i=1}^7 \frac{\tau (\sigma_i^{(a)} + \sigma_i^{(e)})}{\hbar \omega_i} I_i + \sum_{i=1}^3 \frac{\tau (\sigma_{i,S}^{(a)} + \sigma_{i,S}^{(e)})}{\hbar \omega_{i,S}} I_{i,S} + \frac{\tau (\sigma_P^{(a)} + \sigma_P^{(e)})}{\hbar \omega_P} I_P + 1} N_0, \quad (11)$$

式中  $N_0$  为纤芯中镱原子的密度,  $\tau$  为上能级寿命,  $I$  为总光强。

$f_i$  与自相位调制 (SPM) 和交叉相位调制 (XPM) 有关, 总共包含 128 个与 FWM 相关的因子。以下给出  $f_1$  的表达式, 其余与其类似:

$$f_1 = |A_1|^2 A_1 + 2 \sum_{i \neq 1} |A_i|^2 A_1 + A_2^2 A_3^* \exp[i(2\beta_2 - \beta_3 - \beta_1)z] + 2A_1^* A_2 A_4 \exp[i(\beta_2 + \beta_4 - 2\beta_1)z] + 2A_2^* A_3 A_4 \exp[i(\beta_3 + \beta_4 - \beta_2 - \beta_1)z] + 2A_5^* A_2 A_3 \exp[i(\beta_2 + \beta_3 - \beta_1 - \beta_5)z] + \dots \quad (12)$$

大波长间隔与小波长间隔理论模型相似, 不同之处在于: 1) 此时信号光不能通过 SBS 光相互耦合, 故  $\alpha = 0$ ; 2) FWM 效应基本可以忽略, 近似有  $f_i = 0$ 。

## 2.2 小波长间隔情形下的 SBS 抑制

### 2.2.1 基本原理

以三波长放大为例说明小波长间隔放大的基本原理。如图 2 所示, 三个种子光之间的频率间隔等于 2 倍布里渊频移 (布里渊频移一般约为 16.36 GHz, 即约 0.06 nm)。在放大过程中, 种子放大光与产生的 SBS 斯托克斯光之间发生相互耦合, 使得高频种子放大光产生的 SBS 光将能量转移到相邻的低频种子放大光中, 进而有效地提高了高频种子光的 SBS 阈值和光纤放大器的总输出功率。小波长间隔放大会出现较为严重的 FWM 现象, 产生较多的边频光成分。

### 2.2.2 数值模拟

考虑小波长间隔三波长放大的情形, 对理想最佳种子功率比 (定义为从高频到低频顺序各种子光的功率之比, 本文沿用此定义) 进行理论分析, 忽略 FWM 效应与折射率差异, 且令  $r = P_1/P_2$ ,  $q = P_2/P_3$ , 3 个斯托克斯光的小信号 SBS 增益可以表达为

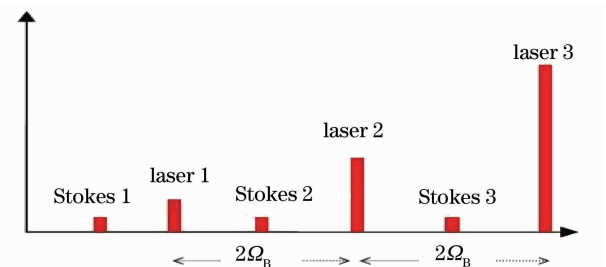


图 2 频率间隔为 2 倍布里渊频移的种子光及产生的 SBS 斯托克斯光

Fig. 2 Signals with wavelength separation of twice the Brillouin shift and their SBS sidebands

$$A_{1,s} = A_{1,s}(L) \exp\left[\frac{g_B \epsilon_0 c n \kappa_{a0} |A_3|^2}{4} r q (L - z)\right], \quad (13)$$

$$A_{2,s} = A_{2,s}(L) \exp\left[\frac{g_B \epsilon_0 c n \kappa_{a0} |A_3|^2}{4} q (1 - r) (L - z)\right], \quad (14)$$

$$A_{3,s} = A_{3,s}(L) \exp\left[\frac{g_B \epsilon_0 c n \kappa_{a0} |A_3|^2}{4} (1 - q) (L - z)\right]. \quad (15)$$

理想最佳种子功率比时 3 个种子光的小信号 SBS 增益应几乎相等。由(13)~(15)式可得,按照高频到低频顺序最佳种子功率比应为 3:2:1。推而广之,一般认为  $N$  波长放大的理想最佳种子功率比应为  $N:N-1:N-2:\dots$ 。由于 FWM 和激光效应的影响,实际情况与此会有偏差。

以 2.1 节的理论模型为基础进行数值模拟,其中增益光纤为 6.5 m 长的 Nufern 产大模场(25/400)掺镱光纤<sup>[17,18]</sup>。

1) 选择 1068 nm 附近激光进行双波长放大模拟,此时只需将前述三波长模型中某一种子光的输入功率设为零即可。种子光总功率为 2 W,种子功率比为理想最佳值 2:1,以单波长放大作对比,模拟结果如图 3 所示。双波长放大最大总输出功率为 80 W,约为单波长放大的 3 倍,其中较高频率光的输出功率约为单波长放大输出功率的 2 倍。双波长放大中 FWM 是阈值最低的非线性效应。

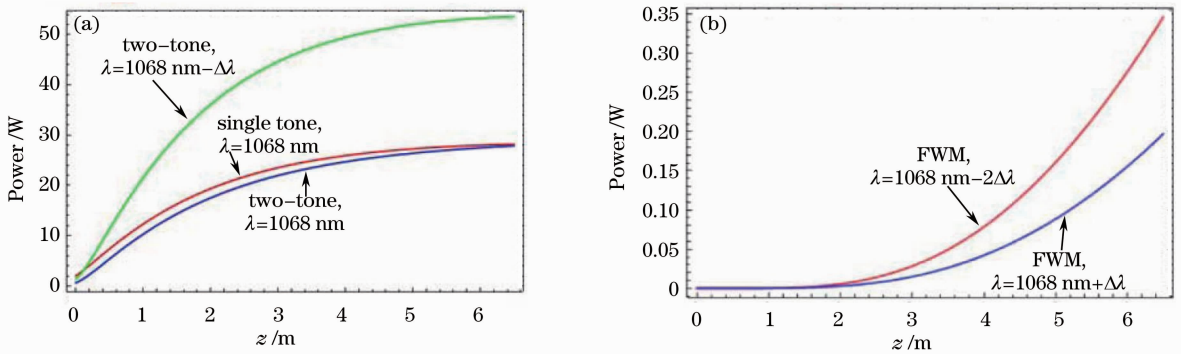


图 3 小波长间隔双波长放大数值模拟结果。(a)种子光功率随光纤位置的变化;  
(b) FWM 边频光功率随光纤位置的变化

Fig. 3 Simulated results of two-tone amplification with small wavelength separation. (a) Spatial evolution of seed laser power; (b) spatial evolution of FWM power

保持种子光总功率不变,在 1:1 到 3:1 之间改变种子功率比进行模拟发现,种子功率比在 1.8:1 到 2.3:1 的范围内都能够获得有效的 SBS 抑制效果。

2) 以理想最佳种子功率比三波长放大 2 W 种子光,抽运功率为 184 W;以 32 W 阈值抽运的单波长放大作对比。如图 4(a)所示,三波长放大的总输出功率为单波长放大的 5.4 倍多,其中最高频率光的输出功率

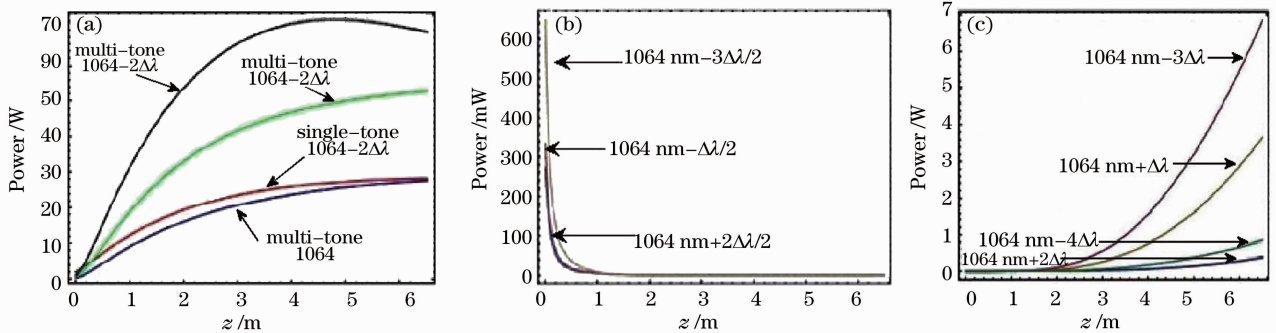


图 4 小波长间隔三波长放大数值模拟结果。(a)种子光功率随光纤位置的变化;(b) SBS 光功率随光纤位置的变化;  
(c) FWM 边频光功率随光纤位置的变化

Fig. 4 Simulated results of three-tone amplification with small wavelength separation. (a) Spatial evolution of seed laser power; (b) spatial evolution of SBS power; (C) spatial evolution of FWM power



率约为单波长放大的 2.5 倍(理想值为 3 倍,但由于 FWM 效应其值稍低)。对比图 4(b)和(c)可知,此时 FWM 为阈值最低的非线性效应,且较双波长放大时要明显。保持种子光总功率不变,改变种子功率比进行模拟发现最佳种子功率比约为 3.6:2.2:1。

### 2.2.3 小结

小波长间隔多波长放大可以有效抑制 SBS,提高光纤放大器的总输出功率,但其输出光含有较多的波长成分(种子光和 FWM 边频光),使得应用其在需要单频激光的场合受到限制。通常在最佳的种子功率比下可以获得  $N$  倍于单波长放大的输出功率( $N$  为波长数目),但随着波长数目的增加,最佳功率比的确定将变得越来越复杂。此外对小波长间隔多波长放大可以通过采用窄线宽种子光(高频成分)和宽线宽种子光(低频成分)组合的方法进一步提高高频种子光的 SBS 阈值,这是由于宽线宽种子光本身较高的 SBS 阈值使得放大器在抑制 SBS 上可以获得更多的自由度。

## 2.3 大波长间隔情形下的 SBS 抑制

### 2.3.1 基本原理

在这种情形下,各种子光之间的频率间隔远大于 2 倍布里渊频移且频率较高的种子光具有较高的输入功率。较大的频率间隔使得种子放大光与产生的 SBS 光之间不会发生耦合,而且 FWM 现象也很微弱,基本可以忽略。此时,各波长成分将会通过增益竞争相互作用。一般来说,在光纤的前段频率较高的种子光由于较高的种子功率和较大的发射截面将会优先获得大部分的增益,随着光波的传输光纤中上能级粒子数将会减少,在光纤的某一点频率较高的种子光将达到最大功率(未到 SBS 阈值)。此后,高频种子光将会经历负增益并将和抽运光一起作为抽运激光来放大低频种子光。因此,低频种子光只在光纤的后半部分获得有效增益。由于在光纤中的大部分位置低频种子光功率都较小,故其 SBS 增益也小,整个光纤中的 SBS 增益得到了较好的抑制。

### 2.3.2 理论模拟

同样选用 6.5 m 长的 Nufern 产大模场(25/400)掺铒光纤进行模拟<sup>[17,18]</sup>。

1) 双波长放大 1.2 W 1064 nm 和 0.8 W 1068 nm 窄线宽激光,用 2 W 1064 nm 激光单波长放大作对比。抽运光波长为 977 nm。模拟结果如图 5 所示。单波长放大当抽运功率为 33 W 时阈值输出功率为 28 W;双波长放大抽运功率 62 W 时达到 SBS 阈值,1064 和 1068 nm 光的输出功率分别为 24.5 和 30 W,总输出功率约为单波长放大的 2 倍。FWM 比 SBS 要小 1 个量级,可以忽略不计。

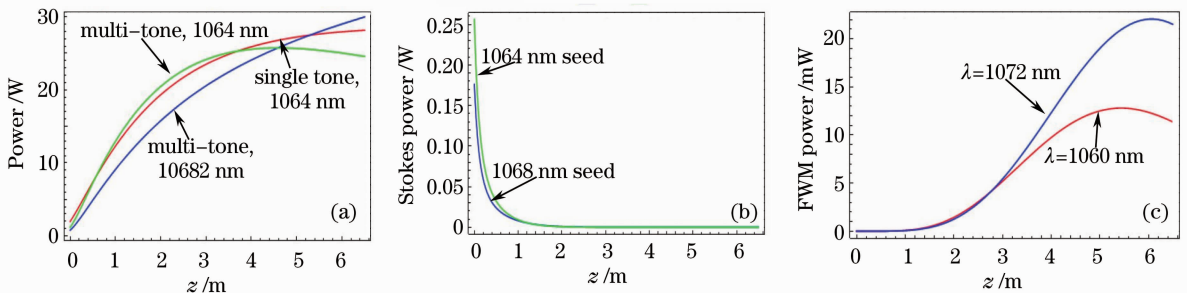


图 5 1064 和 1068 nm 双波长放大模拟结果。(a)种子光功率随光纤位置的变化;(b)SBS 光功率随光纤位置的变化;(c)FWM 边频光功率随光纤位置的变化

Fig. 5 Simulated results of two-tone amplification of 1064 and 1068 nm seed lasers. (a) Spatial evolution of seed laser power; (b) spatial evolution of SBS power; (c) spatial evolution of FWM power

保持抽运功率约 60 W 不变,通过改变波长间隔进行模拟发现,波长间隔小于 3 nm 时,FWM 明显增强并变得足以与 SBS 相比;波长间隔大于 10 nm 时,FWM 变得极小,例如波长间隔为 14 nm 时,以种子功率比 9:1 进行 1050 和 1064 nm 双波长放大,得到了 46 W 的 1064 nm 光输出。与 1064 nm 单波长放大相比较,1064 nm 光的输出功率增加了 64%。

2) 双波长放大 1064 nm 窄线宽种子光和 1040 nm 宽线宽种子光,以 1064 nm 单波长放大作对比。宽线宽种子光的 SBS 增益系数可视作零。模拟结果如图 6 所示,双波长放大在满足最佳种子功率比时,1064 nm

光输出功率为 74 W,与单波长放大相比,1064 nm 光输出功率增加了 164%,优于前述两种种子都为窄线宽时双波长放大的 64%。

3) 种子光波长分别为 1056,1060 和 1064 nm,功率比为 4:2.7:1。模拟结果如图 7 所示。三波长放大总输出功率略高于 80 W,约为 1064 nm 单波长放大的 3 倍;1064 nm 输出光功率高于单波长放大。此时 FWM 效应微弱。

在同样的光纤中,用 1040,1044 和 1070 nm 光进行模拟,由于种子光间隔进一步增加,FWM 得到了进一步的抑制。模拟结果如图 8 所示,1070 nm 光输出功率约为 1070 nm 单波长放大的 2.2 倍。

将光纤长度变为 4.5 m,较短的光纤容许更高的抽运功率。模拟结果如图 9 所示,三波长和单波长放大的阈值抽运功率分别为 110 和 50 W,1070 nm 输出光功率分别为 83 和 44.5 W,三波长放大较单波长放大提高了 0.9 倍。

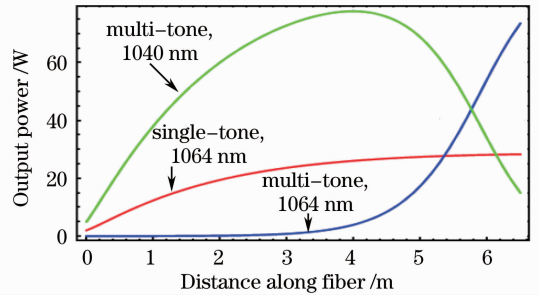
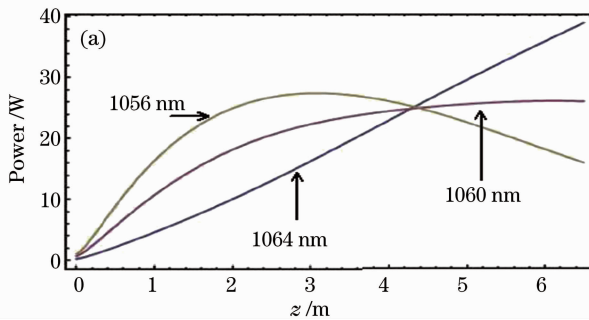


图 6 1040 和 1064 nm 双波长放大种子光功率随光纤位置变化的模拟结果

Fig. 6 Simulated results of spatial evolution of signal powers in two-tone amplification of 1040 and 1064 nm seed lasers

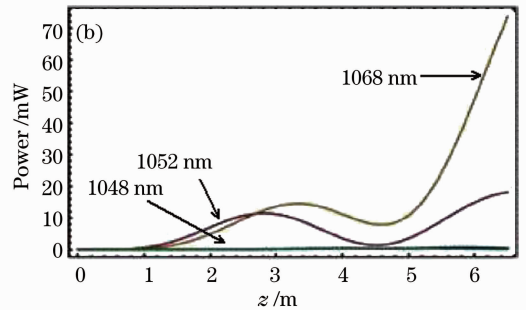


图 7 1056,1060 和 1064 nm 三波长放大模拟结果。(a)种子光功率随光纤位置的变化;(b) FWM 边频光功率随光纤位置的变化

Fig. 7 Simulated results of three-tone amplification of 1056, 1060 and 1064 nm seed lasers. (a) Spatial evolution of seed laser power; (b) spatial evolution of FWM power

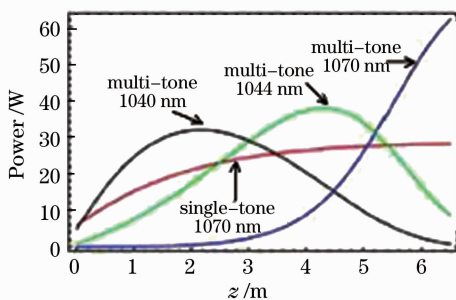


图 8 1040,1044 和 1070 nm 三波长放大种子光功率随光纤位置变化的模拟结果

Fig. 8 Simulated results of spatial evolution of signal powers in three-tone amplification of 1040, 1044 and 1064 nm seed lasers

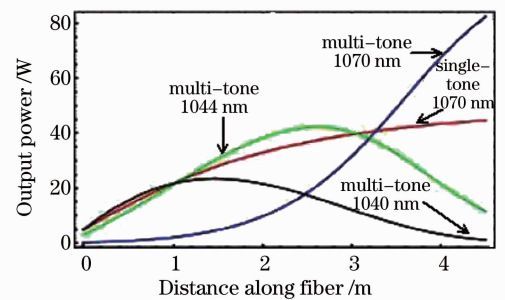


图 9 4.5 m 增益光纤 1040,1044 和 1070 nm 三波长放大种子光功率随光纤位置变化的模拟结果

Fig. 9 Simulated results of spatial evolution of signal powers in three-tone amplification of 1040, 1044 and 1070 nm seed lasers with 4.5 m gain fiber

### 2.3.3 小结

在合理选择波长成分间的频率间隔以及优化种子光输入功率比和光纤长度的情况下,大波长间隔多波长放大可以获得较单波长放大更高功率的单频光输出,对于需要高功率单频光的应用场合具有十分重要的意义。此外,通过适当增加高频种子光的谱线宽度还可以使光纤放大器在抑制 SBS 上有更多的自由度。但

大波长间隔放大对种子频率间隔、功率比及光纤长度等参数要求严格,优化起来较为复杂,给实际应用带来了一定的困难。

### 3 实验研究

#### 3.1 小波长间隔多波长放大

2004年,越南科学家 Weβels 等<sup>[19]</sup>进行了双波长放大实验。图 10(a)为其实验结构图。实验中采用两个 1064 nm 单频非平面环形振荡器(NPRO)作为种子激光器,增益光纤为 72 m 单模掺铒双包层光纤。纤芯直径 6 μm,数值孔径(NA)为 0.16;内包层为 D 型结构,直径 400 μm,NA 为 0.38。抽运光波长为 808 nm,种子 1 和种子 2 的功率分别为 100 和 50 mW,种子 2 的频率可以通过改变晶体温度调节,通过调节使两种子光频率间隔等于 2 倍布里渊频移。图 10(b)为实验结果。只放大种子 1,阈值输出功率为 2 W;两种子同时放大但不调节频率间隔时,阈值输出功率为 4.5 W;两种子同时放大且调节为 2 倍布里渊频移间隔时,阈值输出功率为 6.3 W。2 倍布里渊频移双波长放大总输出功率是单波长放大的 3 倍多。实验中出现了较明显的 FWM 现象。该实验首次验证了频率间隔为 2 倍布里渊频移的窄线宽小波长间隔双波长放大抑制 SBS 的有效性,为后来多波长放大的研究奠定了基础。

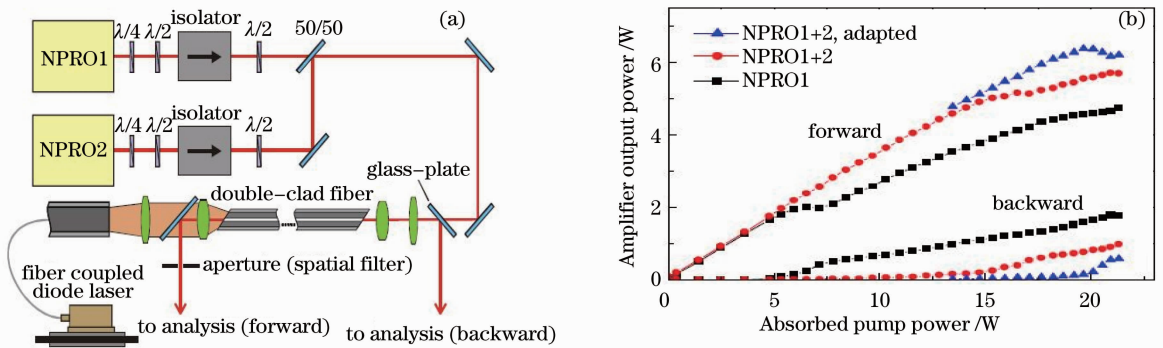


图 10 小波长间隔双波长放大实验。(a)实验结构图;(b)输出功率随抽运功率的变化

Fig. 10 Experiment of two-tone amplification with small wavelength separation. (a) Experimental setup; (b) output power versus pump power

2011年,国防科学技术大学 Wang 等<sup>[20]</sup>进行了基于单频激光相位调制产生多波长激光抑制 SBS 的实验。对单频种子激光进行调制幅度为  $\pi/2$ 、调制频率为 100 MHz 的正弦信号调制,产生如图 11(a)所示的多波长种子光。将此多波长种子光在放大器链路中进行放大,SBS 得到了抑制,在最大抽运功率为 348.4 W 时,输出功率为 275 W。图 11(b),(c)分别为功率特性和输出为 275 W 时的输出光谱图。从图中可以看出,在最大输出功率时没有明显的 SBS,放大自发辐射(ASE)也得到了 30 dB 的抑制。增加抽运功率,输出功率还有望进一步提高。

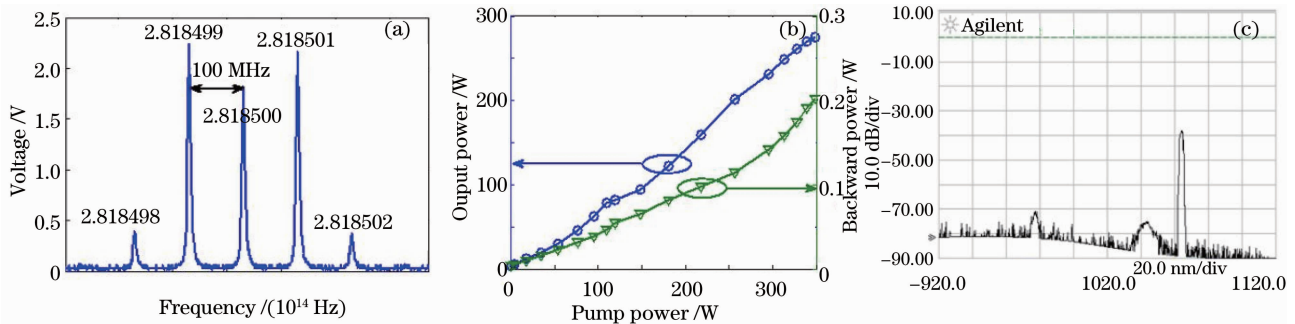


图 11 基于单频激光相位调制的多波长放大实验。(a)单频激光相位调制后频率成分;(b)功率特性;(c) 275 W 时输出光谱

Fig. 11 Experiment of multi-tone amplification based on phase modulation of the single frequency seed laser. (a) Frequency constitution after phase modulation; (b) power characteristics; (c) spectrum of 275 W output laser

此实验中相位调制产生的多波长激光波长成分之间的频率间隔为 100 MHz, 小于 2 倍布里渊频移。他们的实验首次验证了波长间隔更小的多波长放大在抑制 SBS 上的有效性。

### 3.2 大波长间隔多波长放大

2010 年, 美国空军实验室 Dajani 等<sup>[21,22]</sup> 报道了他们进行的低功率和高功率双波长放大实验。他们首次在实验上验证了窄宽线宽大波长间隔双波长放大抑制 SBS 的有效性, 并获得了功率大于 100 W 的 1064 nm 单频激光输出。图 12(a) 为低功率条件下的实验结构图。1064 nm 种子线宽为 10 kHz, 最大输出功率为 1.1 W; 1045 nm 宽线宽种子最大输出功率可达 1 W。增益光纤是 10 m 单模保偏掺镱双包层光纤, 纤芯和内包层直径分别为 10 和 125  $\mu\text{m}$ , 抽运波长为 976 nm。实验中, 通过在输出端放置滤光镜将抽运光及 1045 nm 光从 1064 nm 光中分离出来。图 12(b) 为 SBS 功率与 1064 nm 光输出功率的关系曲线。单波长放大 400 mW 1064 nm 光, 阈值输出功率约为 3.5 W。在最大输出功率为 5 W 时记录了输出光谱图, 如图 12(c) 所示, 斯托克斯峰值要比瑞利峰值高约 40 dBm, 说明此时已经超过了 SBS 阈值。在 300~800 mW 之间改变种子功率, SBS 阈值变化很小。对宽线宽 1045 nm 种子进行放大没有发现明显的 SBS 光。以 700 mW 1045 nm 光和 65 mW 1064 nm 光进行高功率比放大实验, 由于抽运功率的限制最大输出功率只到 6 W。对此时的输出光谱也进行了记录, 如图 12(d) 所示, 斯托克斯峰值低于瑞利峰值, 说明此时还未到 SBS 阈值。以 350 mW 1045 nm 光和 65 mW 1064 nm 光进行低功率比放大实验, 阈值输出功率为 5 W。

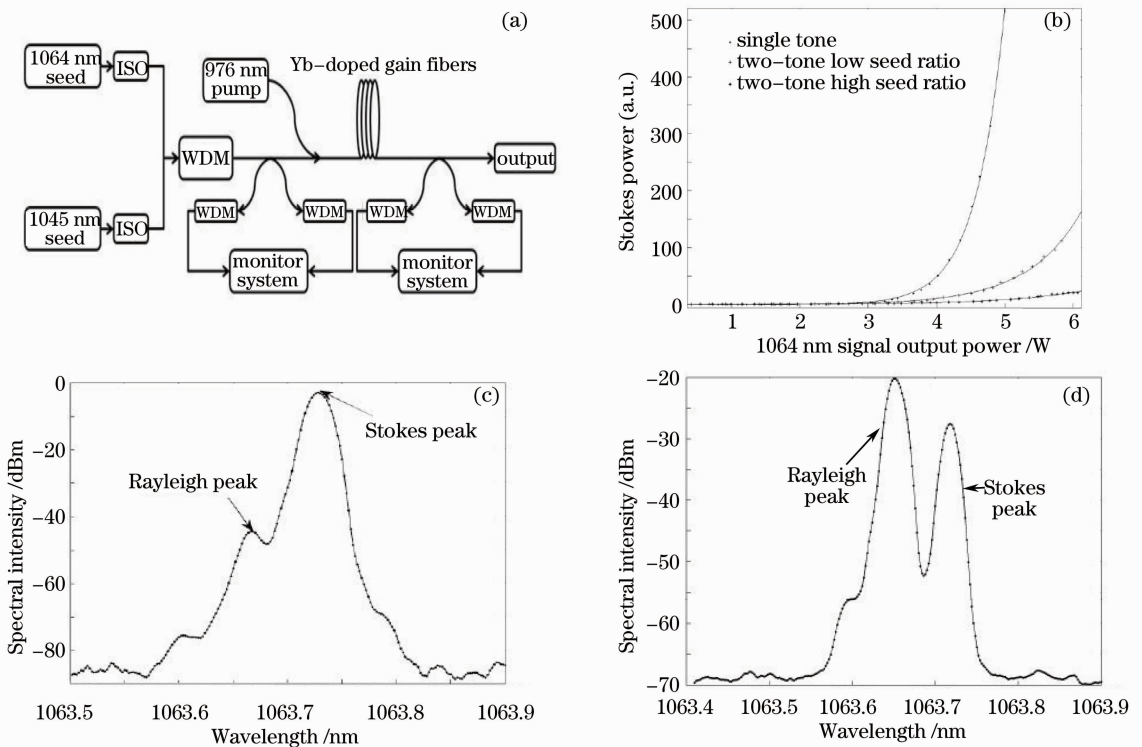


图 12 单频输出 6 W 双波长放大实验。(a) 实验结构图; (b) SBS 功率与 1064 nm 光输出功率的关系曲线; (c) 单波长放大 5 W 时后向散射光光谱; (d) 高功率比双波长放大最大输出功率时后向散射光光谱

Fig. 12 Experiment of two-tone amplification with 6 W single frequency output. (a) Experimental setup; (b) SBS power versus 1064 nm output power; (c) backward spectrum of 5 W single-tone amplification; (d) backward spectrum of maximum output laser in high seed ratio two-tone amplification

图 13(a) 所示为高功率双波长放大实验结构图<sup>[22]</sup>, 1064 nm 种子光通过预放大后最大输出功率可达 3 W, 1040 nm 宽线宽种子光最大输出功率可达 2.1 W。增益光纤为 8 m 长的 Nufern 产保偏掺镱大模场 (25/400) 光纤, 弯曲半径为 5 cm 以使放大器工作在单模状态。光纤保持 17  $^{\circ}\text{C}$  恒温。采用滤光镜和抽运倾泄结合的方法滤除输出光中的抽运光和 1040 nm 光。图 13(b) 为实验结果, 对 2 W 1064 nm 光进行单波长放大, 阈值输出功率为 50 W。双波长放大最佳种子功率比为 3:1, 在 1064 nm 光最大输出功率达 100 W 时仍未到 SBS 阈值。更进一步的功率提升受限于可用的抽运功率。



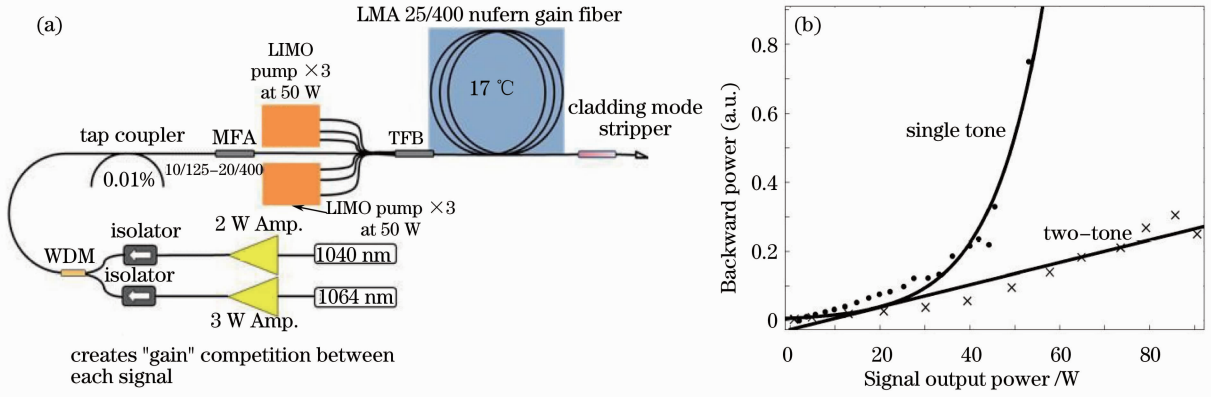


图 13 单频输出百瓦级双波长放大实验。(a)实验结构图;(b)后向功率与输出功率关系曲线

Fig. 13 Experiment of two-tone amplification with output power over 100 W. (a) Experimental setup; (b) backward power versus output power

2010年,美国空军实验室的 Henry 等<sup>[23]</sup>进行的高功率实验验证了 1064 nm 双波长窄线宽放大器的输出功率和效率取决于光纤的长度、种子功率比、宽线宽种子的波长和增益光纤的温度。图 14(a)为实验结构图,预放大后的种子光通过波分复用器(WDM)进入 Nufern 产 7 m 保偏大模场(25/400)掺镱双包层增益光纤,抽运光波长为 976 nm。用同样的放大系统对 1064 nm 光进行单波长放大。如图 14(b)所示,实验中未吸收的抽运光通过滤光镜 M1 滤除,双波长放大中 1040 nm 光由窄带滤波器 M2 滤除。为了尽可能地抑制 SBS,单波长放大中约 57.5%的前段增益光纤保持恒温 16 °C,剩下的光纤自由散热。双波长放大中恒温部分约占 82%。以上长度选取的原则是使两段光纤的 SBS 增益大致相等。

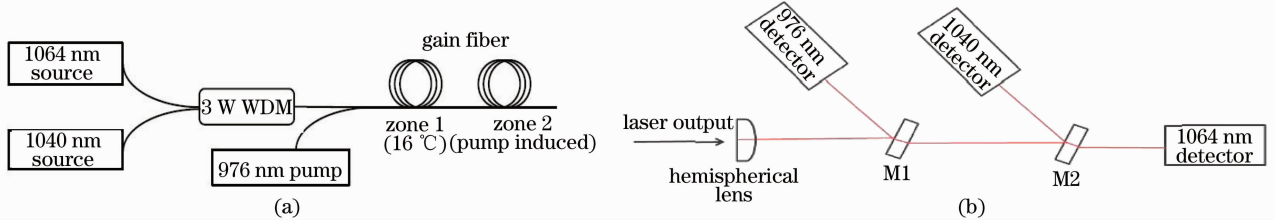


图 14 双波长放大器输出功率及效率影响因素分析实验。(a)实验结构图;(b)抽运光滤除

Fig. 14 Experiment of two-tone amplification aiming to find factors that influence the efficiency and output power of the amplifier. (a) Experimental setup; (b) elimination of pump laser

为了确定双波长放大的最佳参数,进行了不同光纤长度和种子功率下的实验。光纤长度在 1~10 m 之间改变,1064 和 1040 nm 种子光的功率变化范围分别为 39.5~236 和 295~2456 mW。用约 2.3 W 的 1064 nm 光在不同长度光纤下的单波长放大实验作对比。典型实验结果如表 1 和表 2 所示。

表 1 1064 nm 双波长放大器输出功率和光纤长度及效率的关系

Table 1 Relations among efficiency, output power and fiber length

Gain fiber length /m	Efficiency ranges for 1064 nm amplifier			
	75%~80%	70%~75%	65%~70%	60%~65%
	Maximum 1064 nm output power /W			
10	27.8	45.3	49.3	45.5
9	43.6	49.6	48.1	58.6
8	47.4	71.7	78.5	No data
7	77.5	79.8	84.4	80.2
6	68.8	74.7	75.5	76.8
5	Does not exist	62.8	76.5	88.8



表 2 不同光纤长度下效率大于 70% 的双波长放大相对于单波长放大的功率提升  
Table 2 Enhancement of output powers in two-tone amplifications with efficiencies over 70% employing different fiber lengths

Length /m	Maximum power (single-tone) /W	Maximum power (two-tone) /W	Two-tone efficiency /W	Enhancement relative to single tone at same length	Enhancement relative to optimum single tone at 5 m	Optimum power ratio of 1064 nm to 1040 nm
5	50.0	62.8	70.3	1.26	1.26	4.19
6	45.0	68.8	76.0	1.53	1.38	1.64
7	35.5	79.8	71.3	2.25	1.60	0.20~0.60
8	31.3	71.7	71.6	2.29	1.43	0.10
9	27.0	49.6	71.8	1.84	0.99	0.10
10	25.0	45.3	73.3	1.81	0.91	0.10

为了研究温度对于放大器效率和输出功率的影响,对 7 m 增益光纤分别采取冷却至恒温 16 °C 和约 18% 的光纤末端自由散射的处理,表 3 为典型实验结果。

表 3 光纤具有不同温度分布时放大器的功率、效率对比

Table 3 Comparisons of output powers and efficiencies in amplifiers with different temperature distributions in fiber

Power of 1064 nm seed /W	Power of 1040 nm seed /W	Ratio	$P_{out}(1064 \text{ nm, all cold}) /W$	$P_{out}(1064 \text{ nm, cold/hot region}) /W$	Percentage decrease in output power /%	Efficiency in cold region	Efficiency in cold/hot region	Percentage decrease in efficiency /%
0.706	1.200	0.59	48.3	77.5	37.7	61.5	76.7	19.8
0.485	1.987	0.24	61.5	77.8	21.0	63.8	71.5	10.8
0.150	0.295	0.51	65.5	79.8	-18.0	65.9	71.3	7.6

2011 年, Henry 等<sup>[24]</sup>在上述实验的基础上进行了加热增益光纤以提高 1064 nm 双波长放大器效率的实验。通过实验发现,增益光纤纤芯温度的改变对于 1064 nm 双波长窄线宽放大器输出激光中 1064 和 1040 nm 光的功率分布有很大的影响,在较高温度时输出光中 1064 nm 光的成分较多。他们认为这主要归因于相关波长的发射和吸收截面对于温度的依赖。图 15(a) 为其实验结构图,图 15(b) 和表 4 为典型实验结果。实验中增益光纤长度为 7 m。

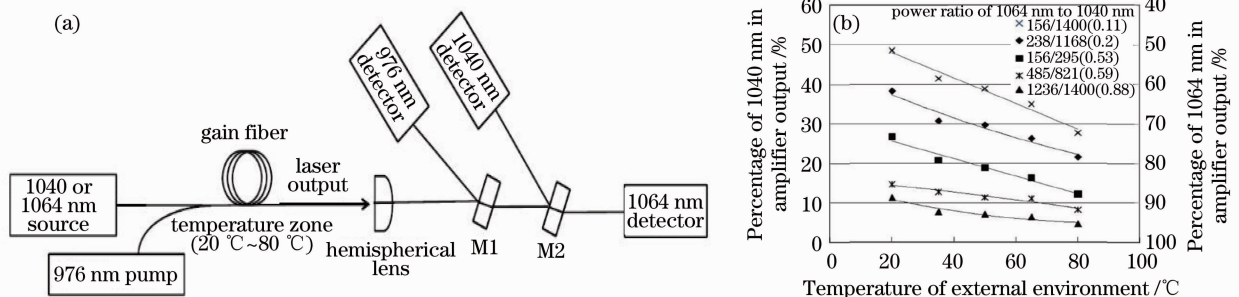


图 15 加热光纤提高双波长放大器效率实验。(a) 实验结构图;(b) 实验结果

Fig. 15 Experiment of two-tone amplification with enhanced efficiency by heating of gain fiber. (a) Experimental setup; (b) experimental results

表 4 输出光中 1040 nm 成分对于增益光纤温度的依赖

Table 4 Reliance of 1064 nm laser on temperature distribution in the gain fiber

	Amplifier1	Amplifier2	Amplifier3	Amplifier4	Amplifier5
Power of 1064 nm seed /mW	156	238	238	485	1236
Power of 1040 seed /mW	1400	1168	600	821	1400
Ratio	0.11	0.20	0.40	0.59	0.88
Single temperature zone					
Percentage of 1040 nm at 20 °C /%	48.62	38.17	26.67	14.64	11.27
Percentage of 1040 nm at 35 °C /%	41.40	30.74	20.72	12.76	7.65
Percentage of 1040 nm at 50 °C /%	38.82	29.72	18.84	11.38	7.04
Percentage of 1040 nm at 65 °C /%	34.95	26.30	16.34	11.11	6.40
Percentage of 1040 nm at 80 °C /%	27.71	21.58	12.22	8.27	4.63
Decrease from 20 °C to 80 °C /%	43.01	-43.46	-54.18	-43.51	-58.92
Increase in 1064 nm efficiency from 20 °C to 80 °C /%	40.70	26.80	19.70	7.50	7.50

2011年, Dajani等<sup>[25]</sup>在同向抽运的保偏光纤放大器中利用双波长放大的方法得到了203 W的1065 nm单频输出光。图16为其实验结构图。单频种子激光器工作波长为1065 nm, 谱线宽度100 kHz, 最大输出功率1 W。宽谱种子谱宽约为0.1 nm, 波长在1035~1045 nm之间可调, 用一个全光纤保偏滤波器滤除其中的ASE光后经预放其输出功率可达6 W。主放大器增益光纤为Nufern产7 m大模场(25/400)保偏光纤, 包层和纤芯NA分别为0.46和0.06, 弯曲直径约15 cm以使放大器近似工作在单模状态。

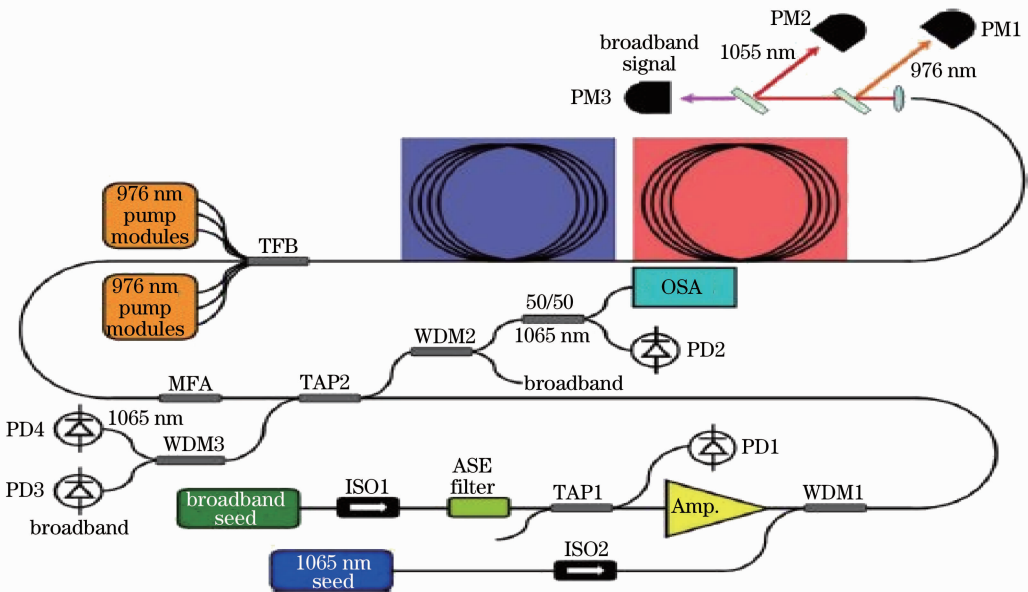


图 16 单频输出 203 W 双波长放大器结构图

Fig. 16 Experimental setup of two-tone amplifier with 203 W single frequency output

为了研究双波长放大与温度梯度结合的效果, 采用了3种不同的温度结构: a结构增益光纤保持12 °C恒温以消除温度梯度的影响; b结构6 m光纤保持12 °C恒温, 剩下1 m在空气中自由散热; c结构6 m光纤保持恒温, 剩下1 m保持80 °C恒温。采用a结构的单波长放大阈值输出功率为43 W; 双波长放大种子功率比大于15:1, 1065和1035 nm双波长放大输出单频光90 W, 1065和1040 nm双波长放大输出单频光约83 W。采用b结构的单波长放大输出功率较a结构时提升很少, 双波长放大输出功率有较大提升, 其中1035和1065 nm双波长放大提升幅度较大, 阈值输出功率约达130 W。采用c结构的1040和1065 nm双波长放大种子功率比约为50:1时1065 nm光输出功率达182 W, 对后向散射光谱的检测显示此时还未达SBS阈值; 采用c结构的双波长放大当1065和1035 nm光的种子功率分别为40 mW和5 W时, 受限于抽运光的1065 nm光输出功率达203.5 W, 对后向光谱和后向功率与输出功率的关系曲线的分析显示此时还

未达到 SBS 阈值。

2011 年,国防科学技术大学 Wang 等<sup>[26]</sup>进行了双波长放大抑制 SBS 的实验,并首次利用双波长放大抑制 SBS 后的两路高功率输出光实现了 390 W 的相干合成功率输出,开创了双波长放大用于高功率相干合成的先例,实验原理如图 17 所示。种子 1 是商用单频激光器,中心波长为 1064.4 nm,线宽约 87 kHz;种子 2 的中心波长为 1063.8 nm,线宽约 240 kHz。两种子频率间隔虽大于 2 倍布里渊频移,但 0.6 nm 的波长间隔使得它们之间不会形成明显的增益竞争,都能够得到有效放大。

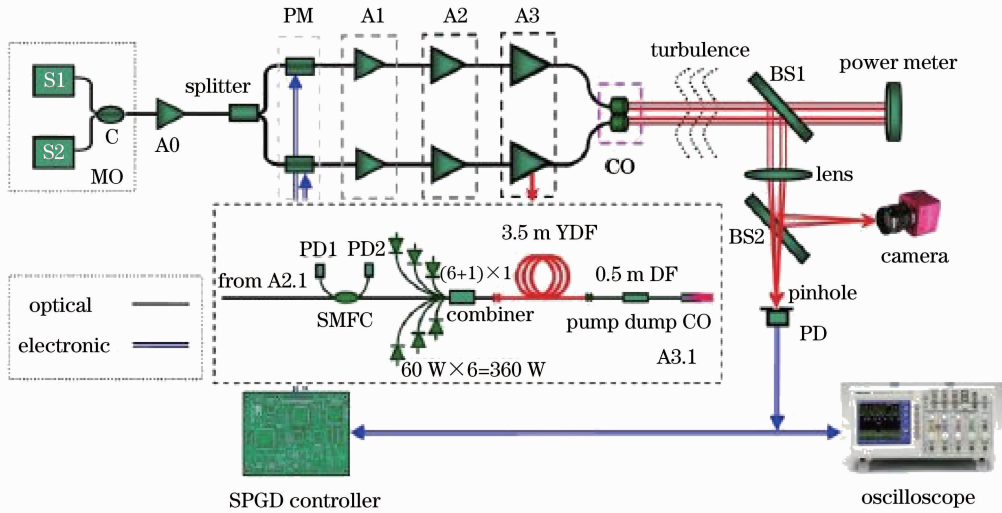


图 17 两路 390 W 双波长放大相干合成实验原理图

Fig. 17 Schematic of coherent combining of two two-tone amplification chains with output power of 390 W

实验中共有两个双波长放大链路,其中一路最大可提供 360 W 抽运功率,另一路最大仅有 150 W 抽运功率。对较大抽运功率链路进行研究,当只用种子 1 放大时,SBS 阈值输出功率为 120 W;当只用种子 2 放大时,SBS 阈值输出功率为 168 W;当两个激光器种子功率比为 1:1.6(种子 2 功率较高)时进行双波长放大,在最大抽运功率为 348.4 W 时,输出功率达 275 W,分别为单波长放大时两个波长对应值的 2.3 倍和 1.64 倍,实验结果如图 18(a)所示。图 18(b)为最大输出 275 W 时的输出光谱,可以看到放大器中的 ASE 得到了大于 30 dB 的抑制。对第二路放大器,受限于抽运功率(最大 150 W),最高输出功率为 115 W。在两路放大器最大输出功率分别为 275 W 和 115 W 时,利用随机并行梯度下降(SPGD)算法进行锁相控制,实现了 390 W 的合成输出。

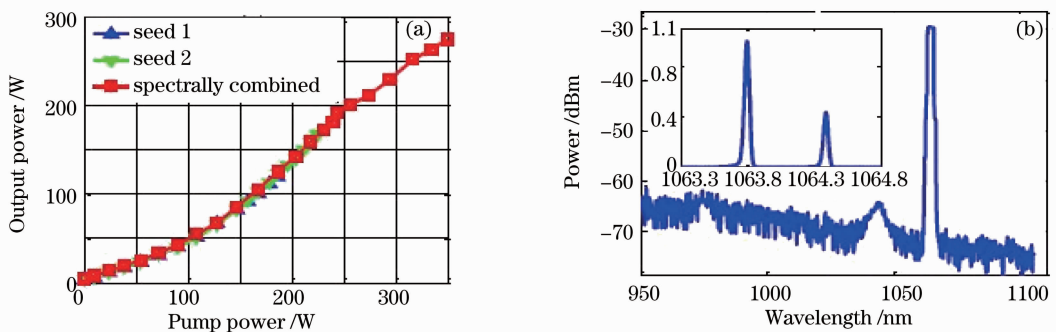


图 18 双波长放大输出 275 W 实验结果。(a)不同种子放大功率特性;(b) 275 W 时输出光谱

Fig. 18 Experimental results of 275 W two-tone amplifier. (a) Amplification property with different seed laser;

(b) spectrum of 275 W output laser

## 4 结束语

多波长放大可以有效抑制窄线宽光纤放大器中的 SBS 效应,提高放大器输出功率。大波长间隔多波长

放大在各参数得到优化后,可以获得较高功率的单频激光输出,能够用于大多数需要单频激光的应用场合;利用小波长间隔多波长放大抑制 SBS 后获得的高功率窄线宽激光实现相干合成,为高功率光纤激光的功率提升探索了一条可行的道路。对波长数目更多的多波长放大中 SBS 效应的抑制以及高功率窄线宽输出激光的多波长相干合成值得深入研究。高功率多波长放大相干合成有望在近期得到更进一步的发展,潜力巨大。

### 参 考 文 献

- 1 V. Fomin, A. Mashkin, M. Abramov *et al.*. 3 kW Yb fiber lasers with a single-mode output[C]. Symp. High-Power Fiber Lasers Appl. , 2006
- 2 D. Gapontsev. 6 kW CW single mode ytterbium fiber laser in all-fiber format[C]. Conference on Solid State and Diode Laser Technology Review, 2008
- 3 IPG Photonics. IPG Photonics Successfully Tests World's First 10 Kilowatt Single-Mode Production Laser [OL]. <http://www.ipgphotonics.com/newsproduct.htm>, June 15, 2009
- 4 Leng Jinyong, Wu Wuming, Chen Shengping *et al.*. Suppression of stimulated Brillouin scattering in single-frequency Raman fiber amplifiers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2334~2339  
冷进勇, 吴武明, 陈胜平等. 单频拉曼光纤放大器中受激布里渊散射的抑制[J]. 中国激光, 2010, **37**(9): 2334~2339
- 5 Leng Jinyong, Liu Chi, Guo Shaofeng *et al.*. Influence of temperature distribution on stimulated Brillouin scattering in high power single-frequency fiber amplifiers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(10): 2491~2496  
冷进勇, 刘 驰, 郭少锋等. 高功率单频光纤放大器中温度分布对受激布里渊散射的影响[J]. 中国激光, 2010, **37**(10): 2491~2496
- 6 Chen Wei, Meng Zhou. Effects of phase modulation on threshold of stimulated Brillouin scattering in optical fibers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(3): 0305002  
陈 伟, 孟 洲. 相位调制对光纤受激布里渊散射阈值的影响[J]. 中国激光, 2011, **38**(3): 0305002
- 7 Liu Chi, Leng Jinyong, Qi Yunfeng *et al.*. Stimulated Brillouin scattering in single-frequency, single-mode, linearly polarized ytterbium-doped fiber amplifier[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0502001  
刘 驰, 冷进勇, 漆云凤等. 单频保偏掺 Yb 光纤放大器中的受激布里渊散射实验研究[J]. 中国激光, 2011, **38**(5): 0502001
- 8 Liao Suying, Gong Mali. New development of nonlinearity management in high power fiber lasers and amplifiers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(6): 27~33  
廖素英, 巩马理. 高功率光纤激光器和放大器的非线性效应管理新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2007, **44**(6): 27~33
- 9 Y. Jeong, J. Nilsson, J. K. Sahu *et al.*. Power scaling of single frequency ytterbium-doped fiber master-oscillator power-amplifier sources up to 500 W[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2007, **13**(3): 546~551
- 10 D. P. Machewirth, Q. Wang, B. Samson *et al.*. Current developments in high-power, monolithic, polarization maintaining fiber amplifiers for coherent beam combining applications[C]. *SPIE*, 2007, **6453**: 64531F
- 11 A. Wada, T. Nozawa, D. Tanaka *et al.*. Suppression of SBS by intentionally induced periodic residual-strain in single-mode optical fibers[C]. Proc. 17<sup>th</sup> ECOC, 1991, 25~28
- 12 J. B. Spring, T. H. Russell, T. M. Shay *et al.*. Comparison of stimulated Brillouin scattering thresholds and spectra in non-polarization maintaining and polarization-maintaining passive fibers[C]. *SPIE*, 2005, **5709**: 147~156
- 13 B. G. Ward, C. Robin, M. Culpepper. Photonic crystal fiber designs for power scaling of single-polarization amplifiers [C]. *SPIE*, 2007, **6453**: 645307
- 14 M. J. Li, X. Chen, J. Wang *et al.*. Al/Ge co-doped large mode area fiber with high SBS threshold[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(13): 8290~8299
- 15 H. Lee, G. P. Agrawal. Suppression of stimulated Brillouin scattering in optical fibers using fiber Bragg gratings[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(25): 3467~3472
- 16 K. Shiraki, M. Ohashi, M. Tateda. SBS Threshold of a fiber with a Brillouin frequency shift distribution [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(1): 50~57
- 17 I. Dajani, C. Zeringue, T. J. Bronder *et al.*. A theoretical treatment of two approaches to SBS mitigation with two-tone amplification[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(18): 14233~14247
- 18 I. Dajani, C. Zeringue, T. M. Shay. Investigation of nonlinear effects in multitone-driven narrow-linewidth high-power amplifiers[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2009, **15**(2): 406~414
- 19 P. Weßels, P. Adel, M. Auerbach *et al.*. Novel suppression scheme for Brillouin scattering[J]. *Opt. Express*, 2004,

**12**(19): 4443~4448

- 20 Xiaolin Wang, Jingyong Leng, Pu Zhou *et al.*. Phase locking of a 275 W high power all-fiber amplifier seeded by two categories of multi-tone lasers[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(8): 7312~7324
- 21 I. Dajani, C. Zeringue, C. Lu *et al.*. Stimulated Brillouin scattering suppression through laser gain competition: scalability to high power[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(18): 3114~3116
- 22 C. Lu, I. Dajani, C. Zeringue *et al.*. SBS suppression through seeding with narrow-linewidth and broadband signals: experimental results[C]. *SPIE*, 2010, **7580**: 75802L
- 23 L. J. Henry, T. M. Shay, D. Hult *et al.*. Enhancement of output power from narrow linewidth amplifiers via two tone effect-high power experimental results[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(23): 23939~23947
- 24 L. J. Henry, T. M. Shay, D. Hult *et al.*. A novel method of increasing the efficiency of 1064 nm two tone amplifiers through heating of the gain fiber[C]. *SPIE*, 2011, **7914**: 79140A
- 25 C. Zeringue, C. Vergien, I. Dajani. Pump-limited, 203 W, single-frequency monolithic fiber amplifier based on laser gain competition[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(5): 618~620
- 26 Xiaolin Wang, Jingyong Leng, Hu Xiao *et al.*. Simultaneous spectrum and coherent combining by active phasing dual two-tone all-fiber MOPA chains[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(8): 1338~1340