

增益竞争双波长放大单频光纤放大器理论研究

杜文博 冷进勇 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, 长沙 410073)

(2011年8月25日收到; 2011年9月22日收到修改稿)

引入增益竞争是抑制单频光纤放大器中受激布里渊散射(SBS)的有效方式. 在单频光纤放大器的基础上, 推导了描述增益竞争双波长放大单频掺镱双包层光纤放大器的稳态速率方程组, 建立了增益竞争双波长放大单频光纤放大器的理论模型; 利用建立的理论模型模拟分析了信号光波长间隔、信号光种子功率比、抽运方式和增益光纤长度等因素对放大器的单频激光输出效率以及 SBS 抑制效果的影响.

关键词: 光纤放大器, 单频激光, 双波长, 受激布里渊散射抑制

PACS: 42.55.Wd, 42.60.By, 42.60.Lh

1 引言

单频光纤激光在频率转换、光束相干合成和激光雷达等领域有着重要的应用^[1-3], 然而受限于光纤中的受激布里渊散射(SBS)效应, 单频光纤激光器的最高输出功率目前有报道的只有 511 W^[4]. 虽然可以利用光纤激光相干合成进一步提升单频激光的功率, 但受当前合成控制技术的限制, 相干合成的合成路数有限^[5], 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 已成为单频光纤激光功率进一步提升的关键.

目前, 主要运用温度场和应力场分布^[6,7]、利用偏振效应^[8]、采用大模场面积光纤^[9]、改变光纤掺杂物成分和分布^[10]、利用布拉格光栅反射后向散射光^[11]以及利用具有布里渊频移分布的光纤^[12]等来实现对 SBS 的抑制. 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^[13-21]. 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, 可以与前述各种 SBS 抑制方法有效结合并且与全光纤激光放大器结构有很好的兼容性. 在多波长放大光纤放大器中, 基于单频和宽线宽信号光增益竞争的双波长放大单频放大器在抑制 SBS、提高单频光

输出功率方面具有操作简单、成本低的优点. 图 1 为增益竞争双波长放大单频光纤放大器的典型结构, 宽线宽激光(波长较短)和单频激光(波长较长)通过波分复用器(WDM)合束后进入光纤放大器, 在放大器前端宽线宽激光首先得到有效放大, 在放大器后端, 掺杂离子吸收宽线宽信号光后, 形成粒子数反转, 为单频信号光提供增益, 最终形成高功率单频激光输出. 当前, 功率最高的 203 W 全光纤单频激光放大器即是基于该方法实现的^[20]. 增益竞争双波长放大单频光纤放大器具有良好的应用前景, 但目前国际上尚无完整的理论研究可供参考. 本文对此类单频光纤放大器建立了完整的理论模型, 进行了详细的理论研究, 定量分析了信号光波长间隔、信号光种子功率比、抽运方式和增益光纤长度等因素对放大器的单频激光输出效率以及 SBS 抑制效果的影响.

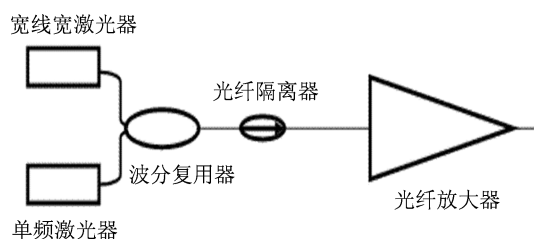


图 1 增益竞争双波长放大单频光纤放大器

[†] E-mail: zhoup203@163.com

2 理论模型

考虑到两信号光之间较大的波长间隔 (大于 10 nm), 光纤中的四波混频 (FWM) 效应可以忽略. 在信号光得到充分放大的条件下, 对描述单频光纤放大器信号光、前向及后向抽运光和斯托克斯光功率的稳态速率方程组^[22-27]进行拓展, 得到的描述增益竞争双波长放大单频掺镱双包层光纤放大器的稳态速率方程组为

$$\begin{aligned} \frac{dP_{s1}}{dz} = & N_0 \Gamma_{s1} P_{s1} \left[\frac{N_2}{N_0} (\sigma_{s1}^e + \sigma_{s1}^a) - \sigma_{s1}^a \right] \\ & - P_{s1} \sum_i g_{SBSi} P_{SBSi} / A_{\text{eff}} \\ & - \alpha_{s1} P_{s1}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{dP_{s2}}{dz} = & N_0 \Gamma_{s2} P_{s2} \left[\frac{N_2}{N_0} (\sigma_{s2}^e + \sigma_{s2}^a) - \sigma_{s2}^a \right] \\ & - \alpha_{s2} P_{s2}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{dP_p^f}{dz} = & N_0 \Gamma_p P_p^f \left[\frac{N_2}{N_0} (\sigma_p^e + \sigma_p^a) - \sigma_p^a \right] \\ & - \alpha_p P_p^f, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{dP_p^b}{dz} = & -N_0 \Gamma_p P_p^b \left[\frac{N_2}{N_0} (\sigma_p^e + \sigma_p^a) - \sigma_p^a \right] \\ & + \alpha_p P_p^b, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{dP_{SBSi}}{dz} = & -N_0 \Gamma_{s1} P_{SBSi} \left[\frac{N_2}{N_0} (\sigma_{s1}^e + \sigma_{s1}^a) - \sigma_{s1}^a \right] \\ & - g_{SBSi} P_{s1} P_{SBSi} / A_{\text{eff}} + \alpha_{s1} P_{SBSi}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$N_2 = N_0 \frac{\sum_{j=1,2} \Gamma_{sj} \sigma_{sj}^a P_{sj} \lambda_{sj} + \Gamma_p \sigma_p^a P \lambda_p + \Gamma_{s1} \sum_i \sigma_{s1}^a P_{SBSi} \lambda_{SBSi}}{\sum_{j=1,2} \Gamma_{sj} (\sigma_{sj}^a + \sigma_{sj}^e) P_{sj} \lambda_{sj} + \Gamma_p (\sigma_p^a + \sigma_p^e) P \lambda_p + \Gamma_{s1} \sum_i (\sigma_{s1}^a + \sigma_{s1}^e) P_{SBSi} \lambda_{SBSi} + \frac{hc A_{\text{eff}}}{\tau}}, \quad (6)$$

其中, P_{s1} , P_{s2} 为信号光功率, P_p^f , P_p^b 分别为前向和后向抽运光功率, $P_p = P_p^f + P_p^b$, P_{SBSi} 和 g_{SBSi} 分别为频率为 ν_{SBSi} 的斯托克斯光的功率和增益系数. z 为沿光纤的位置坐标. σ_x^y 为截面面积, 上标 a 代表吸收, e 代表发射; 下标 s 代表信号光, p 代表抽运光. A_{eff} 为纤芯有效截面, Γ_s 和 Γ_p 分别为信号光和抽运光光场模式与镱离子掺杂区域的重叠因子, α_s 和 α_p 分别为信号光和抽运光的背景损耗. N_0 为镱离子的掺杂浓度, N_2 为上能级离子浓度. τ 为镱离子上能级寿命. 需要说明的是, 在上述方程组中, 由于宽线宽信号光线宽远远大于单频信号光, 其 SBS 可以忽略不计.

考虑温度对布里渊增益谱的影响^[28], 布里渊增益系数可以表示为

$$\begin{aligned} g_{SBSi} = & g_B \frac{1}{1 + \Delta\nu/\Gamma_0} \cdot \frac{\Gamma_0}{2(F_0 - F_c)} \\ & \times \left[\tan^{-1} \left(\frac{F_0 - \nu_{SBSi} + T_c \cdot C_T}{\Gamma_0/2} \right) \right. \\ & \left. - \tan^{-1} \left(\frac{F_c - \nu_{SBSi} + T_c \cdot C_T}{\Gamma_0/2} \right) \right], \end{aligned} \quad (7)$$

其中, g_B 为与光纤材料有关的布里渊峰值增益, $\Delta\nu$ 为信号光谱线宽度, Γ_0 为布里渊增益谱的半极大全宽度 (FWHM). T_c 为纤芯温度, C_T 为温度斜率系

数. F_c 和 F_0 为斯托克斯频移, 可表示为

$$F_c = 2n \cdot v / \lambda_s, \quad (8)$$

$$F_0 = 2n \cdot v [1 - (NA/n)^2]^{1/2} / \lambda_s, \quad (9)$$

其中, n 为纤芯折射率, v 为光纤中的声速, NA 为纤芯数值孔径, λ_s 为能够引起 SBS 的信号光波长.

在增益光纤中, 被吸收的抽运光中有相当部分转化为热, 使得光纤温度上升. 研究表明纤芯温度在径向变化不大, 整个纤芯区域的温度可由纤芯中心的温度代替, 在忽略外界环境温度以及只考虑自然散热的情况下纤芯温度可以表示为^[29,30]

$$\Delta T(z) = \frac{\alpha \eta P_p(z)}{4\pi k} \left(1 + 2 \ln \frac{b}{a} + \frac{2k}{Hb} \right), \quad (10)$$

其中, a , b 分别为纤芯和内包层半径, H 为换热系数, k 为导热系数, α 为抽运光吸收系数, η 为量子亏损, 代表了抽运光转变为热的比例, 在双波长放大时可以近似表示为

$$\eta = \frac{(\lambda_{s1} - \lambda_p) / \lambda_{s1} + (\lambda_{s2} - \lambda_p) / \lambda_{s2}}{2}. \quad (11)$$

(1)–(11) 式构成了描述增益竞争双波长放大单频光纤放大器的理论方程组.

3 数值模拟及讨论

上述的理论方程组应有图 2 所示的边界条件,

即在 $z = 0$ 处, 已知输入的信号光种子功率 P_{s1} , P_{s2} 和正向抽运光功率 P_{p0}^f ; 在 $z = L$ 处, 已知反向抽运光功率 P_{pL}^b 和 SBS 光功率 $P_{SBSi} = P_N$, P_N 为自发布里渊散射光子在其寿命内的平均功率, $P_N = 2h\nu_{SBSi}\Delta\nu_{SBSi}^{[25]}$, 其中 $\Delta\nu_{SBSi}$ 为频率 ν_{SBSi} 附近的散射线宽, 所有的 $\Delta\nu_{SBSi}$ 连接起来就组成了 SBS 的增益谱. 利用修正的弛豫法^[22-24,26,27] 即可求解上述的双边界微分方程组.

利用建立的理论模型对增益竞争双波长放大单频光纤放大器中 SBS 的抑制原理进行研究, 同时对信号光波长间隔、信号光种子功率比 (本文定义为短波长种子功率/长波长种子功率)、抽运方式和

增益光纤长度等因素对放大器的单频激光输出效率以及 SBS 抑制效果的影响进行模拟分析. 模拟中使用到的参数见下表.

3.1 SBS 抑制原理分析

进行 1064 nm 单频、1040 nm 宽线宽双波长放大模拟. 增益光纤长度为 12 m, 1064 和 1040 nm 种子光输入功率分别为 0.01 和 0.1 W, 采用 3.6 W 前向抽运. 图 3 所示为信号光和 SBS 光功率在光纤内的分布. 以种子功率 0.1 W 的 1064 nm 单波长放大前向和后向抽运作对比, 抽运功率均为 3.6 W.

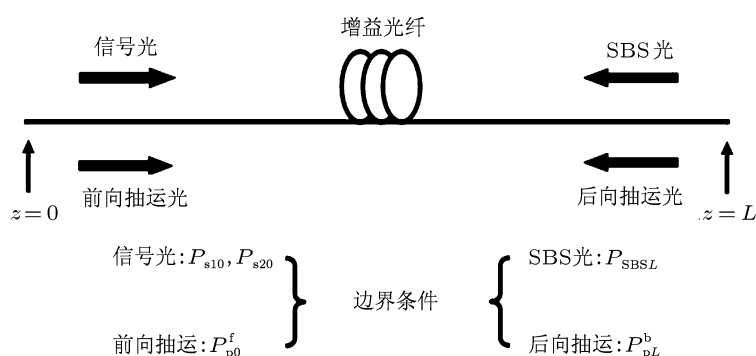


图 2 增益竞争双波长放大光纤放大器稳态速率方程组边界条件

表 1 增益竞争双波长放大单频光纤放大器模拟所用参数

参数名称	数值	参数名称	数值
环境温度/ $^{\circ}\text{C}$	20	抽运光波长/nm	976
1064 nm 光吸收截面/ m^2	5.52004×10^{-27}	1064 nm 光发射截面/ m^2	3.27279×10^{-25}
1040 nm 光吸收截面/ m^2	2.47197×10^{-26}	1040 nm 光发射截面/ m^2	5.15509×10^{-25}
1053 nm 光吸收截面/ m^2	1.01246×10^{-26}	1053 nm 光发射截面/ m^2	3.77322×10^{-25}
抽运光吸收截面/ m^2	2.42539×10^{-24}	抽运光发射截面/ m^2	2.42539×10^{-24}
抽运吸收系数/ $\text{dB}\cdot\text{m}^{-1}$	1.7	纤芯数值孔径	0.06
纤芯半径/ μm	2.5	内包层半径/ μm	65
导热系数/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	1.38	掺杂浓度/ m^{-3}	6.94×10^{25}
抽运光背景损耗/ m^{-1}	0.003	信号光背景损耗/ m^{-1}	0.005
信号光重叠因子	0.88	抽运光重叠因子	0.0025
上能级寿命/ms	0.8	峰值增益/ $\text{m}\cdot\text{W}^{-1}$	2.4×10^{-11}
SBS 线宽/MHz	58	纤芯折射率	1.45
光纤中声速/ $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	5.96	温度系数/ $\text{MHz}\cdot\text{K}^{-1}$	2.25
换热系数/ $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$	3×10^{-3}	1064 nm 光线宽/Hz	2×10^4

由图 3(a) 可知, 1064, 1040 nm 双波长前向抽运放大中, 在光纤的前端 1040 nm 信号光由于较高的输入功率和较大的发射截面首先获得了大部分的增益, 实现了功率的快速增长, 此后由于抽运功率的下降其增益逐渐减小, 并在光纤中的某一段约 4 m 处功率达到了最大值. 此后由于其损耗大于增益, 功率逐渐下降. 与此同时, 掺镱粒子吸收了 1040 nm 信号光后, 形成粒子数反转, 可为 1064 nm 单频信号光提供增益, 这样 1040 nm 信号光和 976 nm 抽运光一起充当 1064 nm 信号光的抽运光, 使其得到有效增益, 实现功率的快速增长. 理想情况下, 在光纤末端 1040 nm 光的功率将全部转移到 1064 nm 光中去. 与具有几乎相同的 1064 nm 输出功率的单波长前向抽运放大相比,

在双波长放大中 1064 nm 信号光的功率在整个光纤中都要比单波长放大中的低. 信号光功率的降低必然引起 SBS 有效增益的下降, 这正如图 3(b) 所示, 双波长前向抽运放大在整个光纤中的 SBS 功率比单波长前向抽运放大中的低. 因此, 可以认为增益竞争双波长放大是通过减小高功率信号光在光纤中的分布区域来降低光纤中 SBS 有效增益, 进而实现对 SBS 的抑制, 其原理与单波长后向抽运放大类似. 由图 3 也可知, 这两种情况较单波长前向抽运放大都取得了良好的 SBS 抑制效果. 但在实际应用中, 光纤放大器前向抽运要比后向抽运更安全, 在技术上也更易实现, 故与单波长前向及后向抽运放大相比, 增益竞争双波长前向抽运放大在实际应用中具有较大的优势.

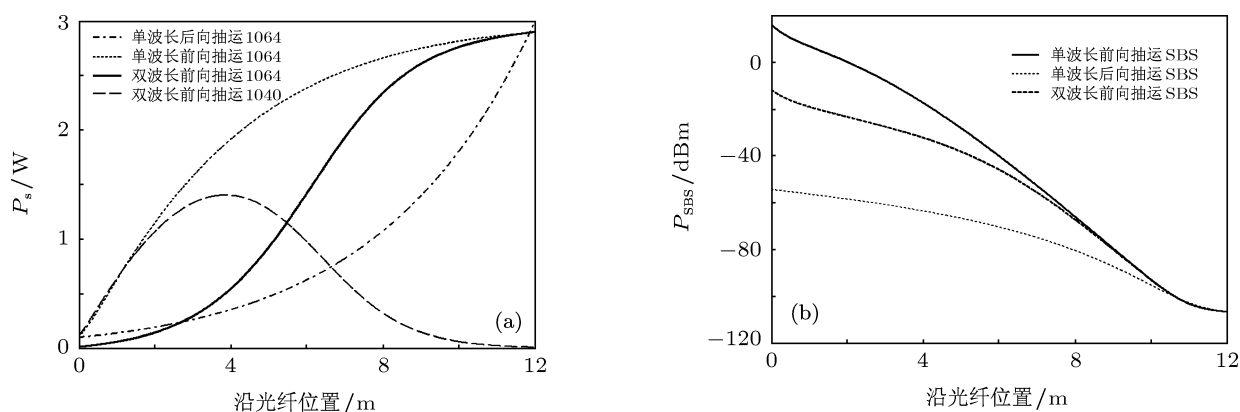


图 3 双波长前向抽运和单波长前向及后向抽运时信号光和 SBS 光在光纤内的分布 (a) 信号光功率; (b) SBS 光功率

3.2 种子波长间隔对单频激光输出效率及 SBS 抑制的影响

图 4 为 1064 nm 单频和 1053 nm 宽线宽双波长放大时信号光在光纤内的分布情况. 增益光纤长度为 12 m, 采用 3.6 W 前向抽运, 1064 nm 种子功率为 0.01 W, 1053 nm 种子光功率为 0.1 W. 由模拟结果可知, 1064, 1053 nm 双波长放大时由于两信号光之间发射截面差别不大, 使得两者在光纤中不能形成差距较大的增益竞争, 1053 nm 信号光在光纤末端也获得了有效增益, 导致输出光中有大量的 1053 nm 光, 这无疑降低了光纤放大器输出单频激光的效率. 虽然可以通过增加增益光纤的长度来实现 1053 nm 光对 1064 nm 光更多的功率转移, 但光纤长度的增加将会降低光纤放大器的 SBS 阈值,

这在下面对增益光纤长度影响的模拟分析中可以得到体现. 故增益竞争双波长放大中, 一般来说种子光之间的波长间隔要足够大, 以保证发射截面之间的有效差距, 使两者之间能够形成有效的增益竞争. 但如图 5 所示, 由于掺镱光纤中发射截面非线性依赖于激光波长, 因此当两信号光之间的波长间隔过大时, 反而会使宽线宽信号光的发射截面不能有效大于单频种子光发射截面, 导致增益竞争变弱, SBS 不能得到有效抑制, 所以种子波长间隔的选择一定要适中.

3.3 种子功率比对单频激光输出效率及 SBS 抑制的影响

增益竞争双波长放大的种子功率比对光纤放大器中 SBS 的抑制和放大器的单频光输出效

率都有重要的影响. 图 6 为种子功率比分别满足 $P_{1040}/P_{1064} = 0.01 \text{ W}/0.01 \text{ W}$ 和 $P_{1040}/P_{1064} = 0.8 \text{ W}/0.01 \text{ W}$ 时光纤内信号光的分布情况.

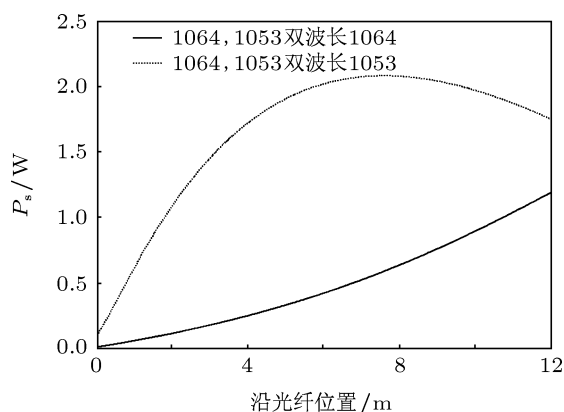


图 4 1064, 1053 nm 双波长放大信号光功率在光纤内的分布

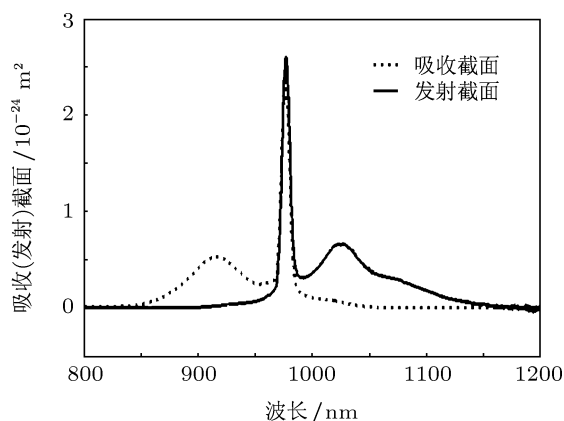


图 5 掺镱光纤吸收、发射截面

当种子功率比较高时, 1040 nm 信号光可以在光纤中更长的部分保持较高的增益, 维持更高的功率, 对 1064 nm 光的功率转移发生的位置也会更靠后, 这无疑有利于 SBS 的抑制. 但种子功率比也不能太高, 如图 6(b) 所示, 过高的种子功率比将会使 1040 nm 光得到过大的放大, 导致其在光纤输出端也不能完成对 1064 nm 信号光的全部功率转移, 这样就会降低放大器单频激光的输出效率, 影响放大器的应用. 对此可以通过增加增益光纤的长度来克服. 图 7 为其余条件保持不变, 仅将增益光纤长度增至 13 m 时信号光在光纤内的分布情况, 输出光中 1040 nm 光所占比例大大减小, 几乎完全实现了对 1064 nm 光的功率转移, 但此时却要考虑光纤长度增加对 SBS 阈值的降低带来的不利影响.

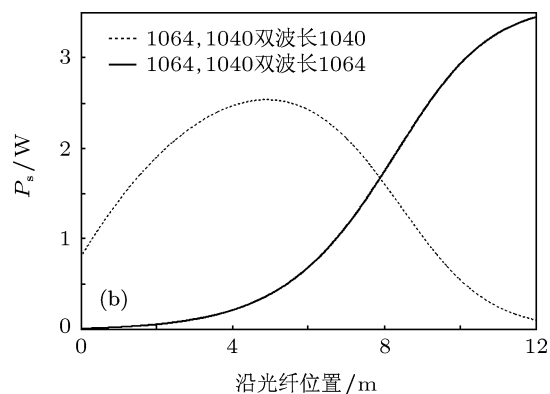
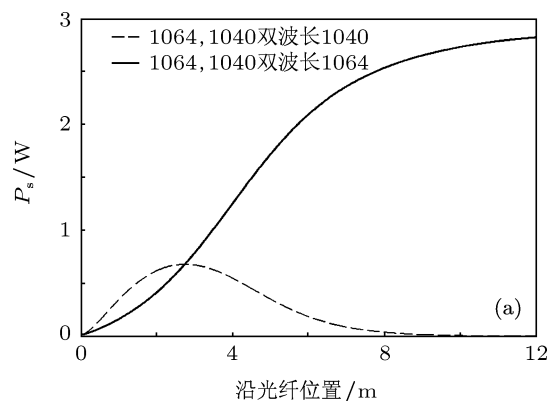


图 6 不同种子功率比的双波长放大信号光在光纤内的分布 (a) $P_{1040}/P_{1064} = 0.01 \text{ W}/0.01 \text{ W}$; (b) $P_{1040}/P_{1064} = 0.8 \text{ W}/0.01 \text{ W}$

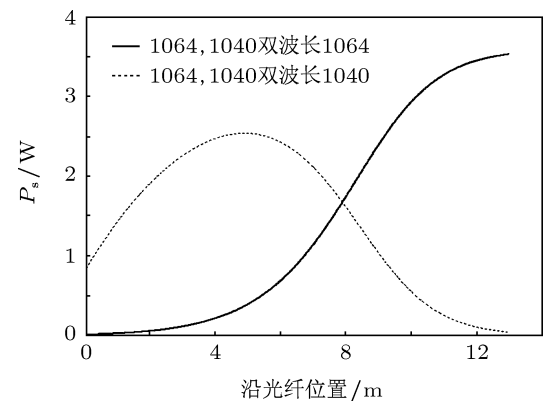


图 7 增益光纤长 13 m 时双波长放大信号光在光纤内的分布

3.4 抽运方式对单频激光输出效率及 SBS 抑制的影响

由前述模拟分析可知, 在 SBS 抑制方面, 单波长后向抽运最好, 双波长前向抽运次之, 单波长前向抽运最差. 下面通过模拟比较双波长后向抽运和单波长后向抽运在抑制 SBS 方面的优劣. 增益

光纤长度为 12 m, 单波长放大采用 3.6 W 后向抽运光放大 0.1 W 的 1064 nm 单频信号光, 双波长放大采用 3.6 W 后向抽运光放大 0.1 W 的 1040 nm 信号光和 0.01 W 的 1064 nm 信号光. 图 8(a) 为两种情况下信号光在光纤内的分布, 双波长后向抽运中 1040 nm 信号光在光纤前段并没有得到十分有效的增益, 不能对 1064 nm 信号光形成有效的增益竞争. 与单波长后向抽运放大相比, 单频 1064 nm 信号光在光纤内有着几乎相同的功率分布. 图 8(b) 为两种情况下 SBS 功率的分布, 两者也几乎相同. 以上结果充分说明双波长后向抽运并不能取得比单波长后向抽运更好的 SBS 抑制效果.

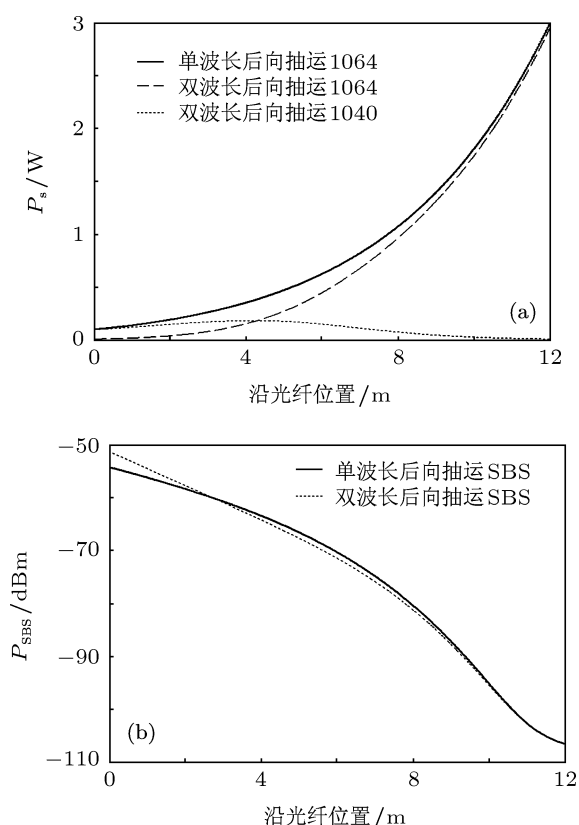


图 8 后向抽运单波长放大和双波长放大的信号光及 SBS 光在光纤内的分布 (a) 信号光功率; (b) SBS 光功率

3.5 增益光纤长度对单频激光输出效率及 SBS 抑制的影响

增益光纤作为光纤放大器实现激光增益的介质, 其重要性不言而喻. 本文仅模拟分析增益光纤长度对于增益竞争双波长放大单频光纤放大器 SBS 抑制及单频激光输出效率的影响. 图 9 为增益光纤长度为 8 m 时光纤放大器内信号光的分布情况. 同样采用 3.6 W 前向抽运. 1064 和 1040 nm

种子光功率分别为 0.01 和 0.1 W. 与图 3(a) 中 12 m 增益光纤的双波长放大情况相比, 此时输出光中 1040 nm 光所占比例增大且 1064 nm 光的输出功率变小. 图 10 为两种情况下光纤中 SBS 相对增益的比较, 光纤长度为 12 m 时的 SBS 相对增益比 8 m 时的大得多. 一般情况下, 较长的增益光纤可以增加对抽运光的吸收, 提高光纤放大器的单频激光输出功率, 也能够使 1040 nm 光对 1064 nm 光的功率转移变得充分, 提高单频激光输出的效率, 但是光纤长度过长也会大大降低 SBS 阈值, 给光纤放大器带来危害. 因此, 在实际应用中一定要根据实际需要优化增益光纤长度.

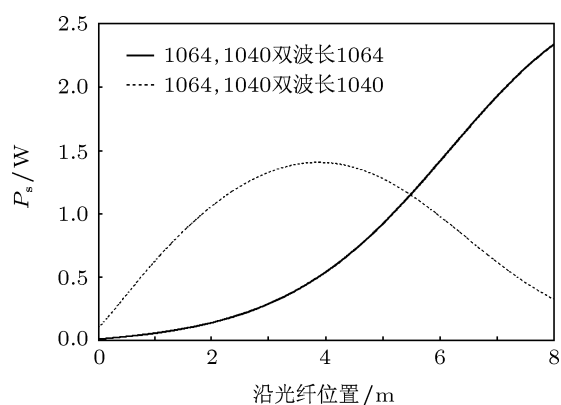


图 9 增益光纤长 8 m 时双波长放大信号光在光纤内的分布

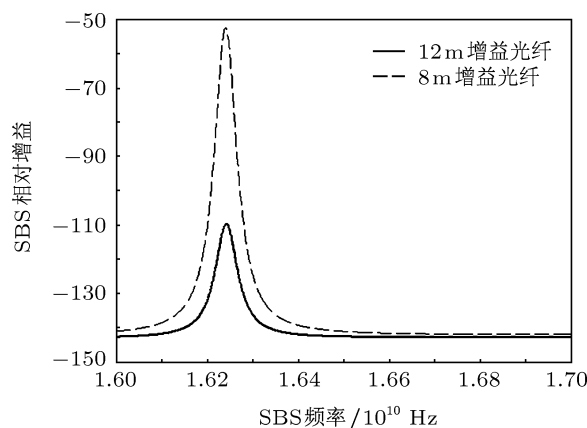


图 10 增益光纤长 8 和 12 m 时双波长放大 SBS 相对增益比较

4 结论

建立了增益竞争双波长放大单频光纤放大器的理论模型, 利用建立的理论模型模拟分析了信号光波长间隔、信号光种子功率比、抽运方式和增益光纤长度等因素对放大器的单频激光输出效率

以及 SBS 抑制效果的影响. 一般来说, 较大的信号光波长间隔可以在不同信号光之间形成有效的增益竞争, 更好地抑制单频信号光的 SBS 效应, 但由于掺镱光纤中发射截面对波长的非线性依赖, 过大的波长间隔将减小两信号光之间发射截面的差别, SBS 抑制效果反而会变差; 种子功率比应根据实际情况适中选择, 过高会降低单频光的输出效率, 过低则不能有效地抑制 SBS; 对增益竞争双波长放大, 综合考虑 SBS 抑制和实际应用中的安全性和成本,

采用前向抽运合理可行; 增益光纤长度既要足够长以充分吸收抽运光, 提高单频激光输出效率, 又要防止光纤长度过长对 SBS 阈值的大幅度降低. 总之, 信号光波长间隔、信号光种子功率比、抽运方式和增益光纤长度等因素对增益竞争双波长放大单频光纤放大器的影响都不是单一的, 在实际应用中应根据需求综合考虑各种因素, 以实现光纤放大器参数的优化.

- [1] Fan T Y 2005 *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.* **11** 567
- [2] Qi Y F, Liu C, Zhou J, Chen W B, Dong J X, Wei Y R, Lou Q H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3942 (in Chinese) [漆云凤, 刘驰, 周军, 陈卫标, 董景星, 魏运荣, 楼祺洪 2010 物理学报 **59** 3942]
- [3] Liu C, Qi Y F, Ding Y Q, Zhou J, Dong J X, Wei Y R, Lou Q H 2011 *Chin. Opt. Lett.* **9** 31402 (in Chinese) [刘驰, 漆云凤, 丁亚倩, 周军, 董景星, 魏运荣, 楼祺洪 2011 中国光学快报 **9** 31402]
- [4] Jeong Y, Nilsson J, Sahu J K, Payne D N, Horley R, Hickey L M B, Turner P W 2007 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **13** 546
- [5] Zhou P 2009 *Ph. D. Dissertation* (Changsha: National University of Defense Technology) (in Chinese) [周朴 2009 博士学位论文 (长沙: 国防科学技术大学)]
- [6] Machewirth D P, Wang Q, Samson B, Tankala K, Connor M O, Alam M 2007 *Proc. SPIE* **6453** 64531F
- [7] Wada A, Nozawa T, Tanaka D, Yamauchi R 1991 *Proc. 17th ECOC* **B1.1** 25
- [8] Spring J B, Russell T H, Shay T M, Berdine R W, Sanchez A D, Ward B G, Roh W B 2005 *Proc. SPIE* **5709** 147
- [9] Ward B G, Robin C, Culpepper M 2007 *Proc. SPIE* **6453** 645307
- [10] Chen X, Wang J, Gray S, Liu A, Demeritt J, Ruffin A B, Crowley A M, Walton D T, Zenteno L A 2007 *Opt. Express* **15** 8290
- [11] Lee H, Agrawal G P 2003 *Opt. Express* **11** 3467
- [12] Shiraki K, Ohashi M, Tateda M 1996 *J. Lightwave Technol.* **14** 50
- [13] Weßels P, Adel P, Auerbach M, Wandt D, Fallnich C 2004 *Opt. Express* **12** 4443
- [14] Dajani I, Zeringue C, Bronder T J, Shay T, Gavrielides A, Robin C 2008 *Opt. Express* **16** 14233
- [15] Dajani I, Zeringue C, Shay T M 2009 *J. Sel. Topics Quantum Electron.* **15** 406
- [16] Dajani I, Zeringue C, Lu C, Vergien C, Henry L, Robin C 2010 *Opt. Lett.* **35** 3114
- [17] Lu C, Dajani I, Zeringue C, Vergien C, Henry L, Lobad A, Shay T M 2010 *Proc. SPIE* **7580** 75802L-1
- [18] Henry L J, Shay T M, Hult D W, Rowland K B 2010 *Opt. Express* **18** 23939
- [19] Zeringue C, Vergien C, Dajani I 2011 *Opt. Lett.* **36** 618
- [20] Wang X L, Leng J Y, Xiao H, Ma Y X, Zhou P, Du W B, Xu X J, Liu Z J, Zhao Y J 2011 *Opt. Lett.* **36** 1338
- [21] Wang X L, Leng J Y, Zhou P, Du W B, Xiao H, Ma Y X, Dong X L, Xu X J, Liu Z J, Zhao Y J 2011 *Opt. Express* **19** 7312
- [22] Liu A 2006 *Proc. SPIE* **6102** 61021R1
- [23] Liu A 2007 *Opt. Express* **15** 977
- [24] Liu A, Chen X, Li M J, Wang J, Walton D T, Zenteno L A 2007 *Proc. SPIE* **6781** 67810H1
- [25] Hildebrandt M, Büsche S, Weßels P, Frede M, Kracht D 2008 *Opt. Express* **16** 15970
- [26] Liu A, Chen X, Li M J, Wang J, Walton D T, Zenteno L A 2009 *J. Lightwave Technol.* **27** 2189
- [27] Leng J Y, Liu C, Guo S F, Qi Y F, Xu X J, Zhao Y J 2010 *Chinese J. Lasers* **37** 2491 (in Chinese) [冷进勇, 刘驰, 郭少锋, 漆云凤, 许晓军, 赵伊君 2010 中国激光 **37** 2491]
- [28] Kovalev V I, Harrison R G 2002 *Opt. Lett.* **27** 2022
- [29] Wang Y, Xu C Q, Po H 2004 *IEEE Photonic Technol. Lett.* **16** 63
- [30] Chen J X, Sui Z, Chen F S, Liu Z Q 2006 *Laser Technol.* **30** 268 (in Chinese) [陈吉欣, 隋展, 陈福深, 刘志强 2006 激光技术 **30** 268]

Theoretical study of two-tone single frequency fiber amplifier with gain competition

Du Wen-Bo Leng Jin-Yong Zhu Jia-Jian Zhou Pu[†] Xu Xiao-Jun Shu Bo-Hong

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

(Received 25 August 2011; revised manuscript received 22 September 2011)

Abstract

Introducing the gain competition is an effective way to suppress stimulated Brillouin scattering (SBS) in single frequency fiber amplifier. Steady rate equation describing two-tone single frequency Yb-doped double cladding fiber amplifier with gain competition is deduced based on single frequency amplifier. A theoretical model of this kind of amplifier is set up. With this model, simulation is performed to analyze the influences of wavelength difference between signals, signal power ratio, pump configuration and length of gain fiber on output efficiency of single frequency laser, and the effect of SBS suppression.

Keywords: fiber amplifier, single frequency laser, two-tone, stimulated Brillouin scattering suppression

PACS: 42.55.Wd, 42.60.By, 42.60.Lh

[†] E-mail: zhoup203@163.com