

# 基于 FBG 铥钬共掺光纤放大器反向 ASE 的再利用

龙 虎 姚 波 毛庆和

中国科学院安徽光学精密机械研究所安徽省光子器件与材料重点实验室, 安徽 合肥 230031

**摘要** 针对铥钬共掺光纤放大器在放大  $2\ \mu\text{m}$  以上长波段信号光时因存在反向放大的自发辐射 (ASE) 而造成的放大效率浪费的问题, 提出了在放大器输入端插入一个中心波长为  $1950\ \text{nm}$  的光纤光栅 (FBG) 的方案, 并从理论上研究了光栅参数对放大器在  $2\ \mu\text{m}$  以上波段增益特性的影响。通过数值模拟给出了几种不同的铥钬掺杂比例下、有无 FBG 时, 放大器对  $2040\ \text{nm}$  信号光的增益随光纤长度的变化曲线, 分析了插入 FBG 后放大器最大增益和对应的最佳光纤长度的变化, 以及这种变化对铥钬掺杂比例的依赖性。通过模拟放大器输入端的反向 ASE 光谱, 以及抽运光、信号光、ASE 与 FBG 反射光功率沿光纤传输的演化行为, 解释了 FBG 对放大器产生影响的根本原因, 并进一步指出为提高放大器长波段增益而加入短波段 FBG 的适用条件。并初步研究了加入 FBG 对放大器增益谱及噪声特性的影响。

**关键词** 光纤光学; 光纤放大器; 铥钬共掺;  $2\ \mu\text{m}$  以上波段; 放大自发辐射; 光纤布拉格光栅

**中图分类号** TN201 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201643.0505006

## Reusing the Backward ASE in Tm-Ho Co-Doped Fiber Amplifiers Based on FBG

Long Hu Yao Bo Mao Qinghe

Anhui Provincial Key Laboratory of Photonics Devices and Materials, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

**Abstract** Regarding to the problem that the backward amplified spontaneous emissions (ASE) in Tm-Ho co-doped fiber amplifier reduce the amplification efficiency beyond  $2\ \mu\text{m}$  band, the influence on gain property beyond  $2\ \mu\text{m}$  band by inserting a  $1950\ \text{nm}$  fiber Bragg grating (FBG) into the input terminal of the amplifiers with different Tm/Ho doping ratios is studied theoretically. Simulation results of the  $2040\ \text{nm}$  signal gain over the fiber length with or without FBG are given under several different Tm/Ho doping ratios in order to analyze the variations of maximum gain and corresponding optimal fiber length due to the insertion of FBG, as well as the dependence of the variations on Tm/Ho doping ratio. The influence of FBG is explained through simulating the backward ASE spectrum at  $z = 0$ , and the propagation of pump, signal, ASE and reflected light from FBG along the fiber. Discussions on the simulation results further point out the applicable conditions of short-band FBG for improving long-band gain of amplifier. In addition, the influences on gain spectrum and noise characteristics by FBG are also investigated.

**Key words** fiber optics; fiber amplifier; Tm-Ho co-doped; beyond  $2\ \mu\text{m}$  band; amplified spontaneous emission; fiber Bragg grating

**OCIS codes** 060.2320; 060.2390; 140.3280

## 1 引 言

$2\ \mu\text{m}$  光学波段处在大气近红外低损耗窗口, 且覆盖了水、甲烷及二氧化碳等众多分子的强吸收线, 在气体探测、光学遥感、激光医疗、非线性频率转换产生中红外光源等应用中具有重要的价值和独特的优势<sup>[1-5]</sup>。光纤激光器件具有增益带宽大、工作波长灵活、光束质量好、效率高及散热性能好等一系列优点, 发展  $2\ \mu\text{m}$  波段光纤激光器和放大器是激光技术近年来的研究热点之一。迄今为止,  $2\ \mu\text{m}$  波段增益光纤主要有掺铥光

**收稿日期**: 2015-11-04; **收到修改稿日期**: 2016-01-11

**作者简介**: 龙 虎 (1986—), 男, 博士研究生, 主要从事光纤激光器件方面的研究。E-mail: tiger0317@126.com

**导师简介**: 毛庆和 (1963—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事微纳光子学、光纤光学和光纤激光器件等方面的研究。E-mail: mqinghe@aiofm.ac.cn (通信联系人)

纤(TDF)、掺铥光纤(HDF)与铥铒共掺光纤(THDF)<sup>[6]</sup>。TDF 可采用相对成熟的商用 0.79  $\mu\text{m}$  半导体激光器或 1.57  $\mu\text{m}$  光纤激光器抽运,尽管其工作波长范围为 1.7~2.1  $\mu\text{m}$ ,但在 2.0  $\mu\text{m}$  以上波段工作时,其增益低、效率不高;而 HDF 在 2.0  $\mu\text{m}$  以上波长段依然可提供较高的增益,但其有效吸收峰位于 1.95  $\mu\text{m}$  和 1.15  $\mu\text{m}$  附近,因而目前缺乏高效的商用抽运源。因此人们研制出了 THDF,该光纤也可采用 0.79  $\mu\text{m}$  或 1.57  $\mu\text{m}$  的激光器抽运,利用铥铒间的能量转移(ET)机制,使铒离子间接吸收抽运光能量。THDF 光纤激光器的工作波长已有效拓宽到了 2  $\mu\text{m}$  以上波段<sup>[7-10]</sup>。并且,由于激光腔中循环光子数目大,激光器在 2  $\mu\text{m}$  以上波段工作时,依然可抑制位于短波长处的放大自发辐射(ASE),使得激光器保持较高的工作效率。但是,当采用 THDF 构成光纤放大器对 2  $\mu\text{m}$  以上波段信号光放大时,尤其是对弱信号进行高倍率放大时,由于信号光难以抑制因发射截面高而产生的处于短波长附近的 ASE,导致放大器反向 ASE 较高,该反向 ASE 将消耗掉放大器输入端附近的大量反转粒子,影响长波长信号光的增益和噪声性能。

事实上,这种输入端附近过大的短波长反向 ASE 效应对长波长信号光增益造成的不利影响是光纤放大器中的普遍现象。例如,在掺铒光纤放大器中,输入端附近的 C 波段 ASE 会制约 L 波段高增益的获取。为此,人们相继提出了在信号输入端插入 C 波段 FBG、接入附加的未抽运增益光纤以及采用双程放大结构等 3 种方案,有效提高了 L 波段的增益与放大效果<sup>[11-13]</sup>。最近,Han 等<sup>[14]</sup>实验报道了在铥铒共掺光纤放大器信号输入端插入铒波段 FBG 以反射反向 ASE 中的铒波段成分,从而提高放大器对铒波段信号光的增益。这些方案的本质机制均是实现对反向短波长处 ASE 的再利用。对于铥铒共掺的光纤放大器,信号光输入端处的反向 ASE 峰位于 1.95  $\mu\text{m}$ ,恰好对应于铒离子的吸收带,这为再利用 ASE 改善对 2  $\mu\text{m}$  以上长波段信号光的增益特性提供了可能。但是,共掺杂系统由于涉及两种不同掺杂离子之间的相互作用,与普通单掺铒光纤放大器的情况不同,其跃迁机制更为复杂,这将显著影响两种离子的掺杂比例对反向 ASE 的再利用效果。因此,有必要在不同铥铒掺杂比例下研究再利用反向 ASE 对铥铒共掺光纤放大器 2  $\mu\text{m}$  波段增益的影响,从而揭示反向 ASE 的再利用效果对于铥铒掺杂比例的依赖性,进而指出其适用条件和优化原则。

本文以 1565 nm 正向抽运的铥铒共掺光纤放大器为研究对象,通过数值模拟考察在放大器信号输入端插入一个 1950 nm 波段 FBG 对放大器在 2  $\mu\text{m}$  以上波段增益的影响,重点研究增益的改善效果对于铥铒掺杂比例的依赖性,为 2  $\mu\text{m}$  以上波段铥铒共掺光纤放大器的研究和设计提供理论参考。

## 2 理论模型

图 1 给出了 THDF 的受激吸收、发射截面谱以及在 2  $\mu\text{m}$  波段的能级跃迁机制示意图<sup>[15]</sup>。采用 790 nm 激光抽运时,如图 1(b)所示,THDF 中的铥离子由基态( $^3\text{H}_6$ )被激发到 $^3\text{H}_4$ ,然后通过多声子弛豫(MR)至 $^3\text{H}_5$ 和 $^3\text{F}_4$ 能级,而 $^3\text{F}_4$ 能级具有较长的能级寿命(约为 335  $\mu\text{s}$ <sup>[16]</sup>),故 $^3\text{F}_4$ 与 $^3\text{H}_6$ 就构成了与铥离子 2  $\mu\text{m}$  辐射相对应的激光上下能级。但是,由于 $^3\text{F}_4$ 与 $^3\text{H}_4$ 和 $^3\text{H}_6$ 与 $^3\text{F}_4$ 之间的能级差相近,故一个抽运光子可将

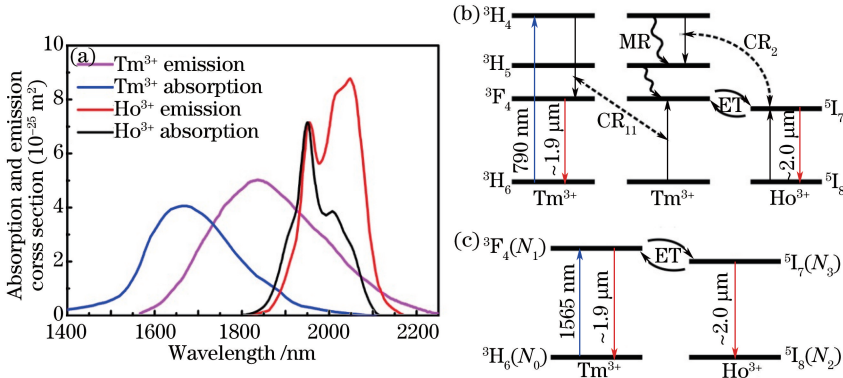


图 1 THDF 的光谱特性及 2  $\mu\text{m}$  波段能级跃迁机制。(a)受激吸收、发射截面谱; (b) 790 nm 抽运模型;(c) 1565 nm 抽运模型

Fig. 1 Spectrum property and 2  $\mu\text{m}$  band energy level transition mechanism of THDF.

(a) Cross sections of stimulated absorption and emission; (b) pumping model at 790 nm; (c) pumping model at 1565 nm

两个基态铥离子激发到激光上能级 $^3F_4$ ,产生所谓的交叉弛豫效应(CR, $^3F_4, ^3H_6 \Leftrightarrow ^3F_4, ^3F_4$ ),导致总量子效率提高<sup>[17]</sup>。同时,由于 THDF 中铥离子的 $^3F_4$ 能级与钬离子的 $^5I_7$ 能级相当接近,通过二者间的 ET 机制<sup>[16]</sup>,可使钬离子由基态 $^5I_8$ 激发至其亚稳态 $^5I_7$ (能级寿命约为 $567 \mu s$ <sup>[16]</sup>),形成钬离子的粒子数反转,而由于钬离子激光上下能级差小于铥离子激光上下能级差,从而前者更有利于提供长波段的增益。当采用 $1565 \text{ nm}$ 激光抽运时,如图 1(c)所示,则不存在 CR 效应,抽运光直接将铥离子由基态激发至其激光上能级( $^3F_4$ )。同时,处于激光上能级的铥离子,也可通过 ET 机制使钬离子在 $^5I_8$ 和 $^5I_7$ 间形成粒子数反转,进而使钬离子也参与提供 $2 \mu m$ 波段的增益。

由以上讨论可知,无论采用 $790 \text{ nm}$ 还是 $1565 \text{ nm}$ 激光抽运,THDF 放大器中与两种离子相关的效应均为 ET 机制,基于此,本文重点研究再利用反向 ASE 来提高 THDF 放大器长波段的增益。考虑到 $790 \text{ nm}$ 抽运时涉及复杂的交叉弛豫效应,因此,为简单且不失一般性,以下仅考虑 $1565 \text{ nm}$ 抽运的情况。假设 THDF 掺杂分布与浓度沿光纤轴向不变,且在光纤截面上均匀掺杂,在光纤轴向 $z$ 处,铥离子与钬离子处于其激光上、下能级的线密度分别为 $N_1(z)$ 与 $N_0(z)$ 、 $N_3(z)$ 与 $N_2(z)$ ,则由图 1(c)所示的能级结构及跃迁机制,可得到 THDF 放大器在稳态条件下的速率方程<sup>[18]</sup>:

$$\left\{ \frac{\Gamma_p P_p(z)}{Ah\nu_p} \sigma_{ap, Tm} + \sum_k \frac{\Gamma_k [P_k^+(z) + P_k^-(z)]}{Ah\nu_k} \sigma_{ak, Tm} \right\} N_0(z) - \left\{ \frac{\Gamma_s P_s(z)}{Ah\nu_s} \sigma_{es, Tm} + \sum_k \frac{\Gamma_k [P_k^+(z) + P_k^-(z)]}{Ah\nu_k} \sigma_{ek, Tm} \right\} N_1(z) - \frac{N_1(z)}{\tau_1} - \kappa_{1023} N_1(z) N_2(z) + \kappa_{0132} N_0(z) N_3(z) = 0, \quad (1)$$

$$\left\{ \frac{\Gamma_s P_s(z)}{Ah\nu_s} \sigma_{as, Ho} + \sum_k \frac{\Gamma_k [P_k^+(z) + P_k^-(z)]}{Ah\nu_k} \sigma_{ak, Ho} \right\} N_2(z) - \left\{ \frac{\Gamma_s P_s(z)}{Ah\nu_s} \sigma_{es, Ho} + \sum_k \frac{\Gamma_k [P_k^+(z) + P_k^-(z)]}{Ah\nu_k} \sigma_{ek, Ho} \right\} N_3(z) - \frac{N_3(z)}{\tau_3} + \kappa_{1023} N_1(z) N_2(z) - \kappa_{0132} N_0(z) N_3(z) = 0, \quad (2)$$

式中 $P_p(z)$ 和 $P_s(z)$ 分别为抽运光和信号光的功率, $\nu_p$ 和 $\nu_s$ 分别为抽运光和信号光频率; $P_k^\pm(z)$ 分别表示正反向 ASE 的第 $k$ 个中心频率 $\nu_k$ 、带宽 $\Delta\nu_k$ 的光谱“窄条”内的功率; $\Gamma_p$ 、 $\Gamma_s$ 和 $\Gamma_k$ 分别表示抽运光、信号光和 ASE 光模场分布与掺杂分布的重叠积分因子<sup>[19]</sup>; $\sigma_a$ 和 $\sigma_e$ 分别表示受激吸收和发射截面,其下标分别对应于铥离子或钬离子对抽运光、信号光及 ASE 光的受激吸收与受激发射; $\tau_1$ 与 $\tau_3$ 分别表示铥离子上能级 $^3F_4$ 与钬离子上能级 $^5I_7$ 的自发辐射寿命; $\kappa_{1023}$ 与 $\kappa_{0132}$ 分别表示铥离子上能级 $^3F_4$ 与钬离子下能级 $^5I_7$ 之间的 ET 系数<sup>[16]</sup>;A 为光纤纤芯的横截面积; $h$ 为普朗克常数。

若 THDF 的总掺杂线密度为 $N$ ,其中所掺的铥、钬离子所占比例各为 $C_{Tm}$ 和 $C_{Ho}$ ,则 $C_{Tm} + C_{Ho} = 1$ ,且有

$$N_0(z) + N_1(z) = C_{Tm} N, \quad (3)$$

$$N_2(z) + N_3(z) = C_{Ho} N. \quad (4)$$

对于如图 2(a)所示最常用的单端正向抽运结构方案,THDF 放大器内抽运光、信号光及正反向 ASE 的功率传输方程为

$$\frac{\partial P_p(z)}{\partial z} = -\Gamma_p \sigma_{ap, Tm} N_0(z) P_p(z), \quad (5)$$

$$\frac{\partial P_s(z)}{\partial z} = \Gamma_s \{ [\sigma_{es, Tm} N_1(z) + \sigma_{es, Ho} N_3(z)] - \sigma_{as, Ho} N_2(z) \} P_s(z), \quad (6)$$

$$\frac{\partial P_k^\pm(z)}{\partial z} = \pm \Gamma_k \{ [\sigma_{ek, Tm} N_1(z) + \sigma_{ek, Ho} N_3(z)] - [\sigma_{ak, Tm} N_0(z) + \sigma_{ak, Ho} N_2(z)] \} P_k^\pm(z) \pm 2\Gamma_k h\nu_k \Delta\nu_k [\sigma_{ek, Tm} N_1(z) + \sigma_{ek, Ho} N_3(z)], \quad (7)$$

式中光纤的传输损耗均已忽略。由于在 $1565 \text{ nm}$ 抽运波长处铥离子受激发射截面、钬离子的受激吸收和发射截面均很小,故(5)式中只考虑了铥离子对抽运光的受激吸收;而铥离子在 $2.05 \mu m$ 以上信号光波长处的

受激吸收截面很小,故(6)式也忽略了铥离子对信号光的受激吸收;(7)式中等号右侧最后一项则为唯象引入的自发辐射产生项<sup>[20]</sup>。通过对描述 THDF 放大器的速率方程和传输方程(1)~(7)式进行迭代法数值求解<sup>[20]</sup>,可获得放大器的增益和噪声特性。

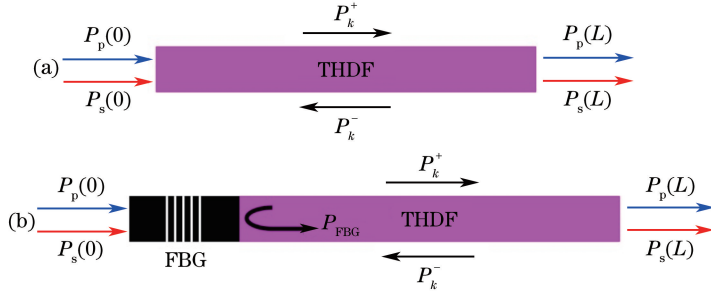


图 2 铥钬共掺光纤放大器结构示意图。(a) 简单正向抽运; (b) 插入 FBG 后

Fig. 2 Configuration of Tm-Ho co-doped fiber amplifiers. (a) For simple forward pumping; (b) after insertion of FBG

为了再利用光纤放大器信号输入端短波长处的反向 ASE,典型的方案是在信号光输入端接入一个中心波长处于反向 ASE 峰处的 FBG<sup>[14]</sup>,结构如图 2(b)所示,图中  $P_{\text{FBG}}$  表示被 FBG 反射回来的反向 ASE 的功率。该 FBG 对抽运光无任何影响,但却能将短波长处的反向 ASE 反射回放大器中形成正向 ASE 光,并在抽运输入端与信号光一起得到放大,而在抽运光逐渐被吸收后,该放大后的 ASE 光能起到辅助抽运光的作用。通过应用由 FBG 决定的边界条件,数值求解(1)~(7)式,仍然可获得如图 2(b)所示的带有短波长处反向 ASE 再利用的 THDF 放大器的增益和噪声特性。数值模拟所用参数值如表 1 所示,其中的掺杂浓度  $N$ 、ET 系数、能级寿命等均取自实际测量值<sup>[18-19,21-22]</sup>。

表 1 模拟过程中所用到的参数值

Table 1 Values for parameters used in the simulation process

Parameter	$N$ /( $10^{25} \text{ m}^{-3}$ )	$\kappa_{1023}$ /( $\text{m}^3/\text{s}$ )	$\kappa_{0132}$ /( $\text{m}^3/\text{s}$ )	$\tau_1$ /( $10^{-4} \text{ s}$ )	$\tau_3$ /( $10^{-4} \text{ s}$ )	$\Gamma_i$ ( $i = s, p_1, p_2, k$ )	$A$ /( $10^{-11} \text{ m}^2$ )	Bandwidth of FBG at 1950 nm /nm
Value	6	$\frac{5000}{\sqrt{C_{\text{Tm}} C_{\text{Ho}} N^2}}$	$0.3\kappa_{1023}$	3.35	5.67	0.8	2.83	10

需要指出的是,由于抽运光、信号光、ASE 的边界条件有数量级的差别,当截面谱离散划分的“窄条”数量过多时,对应的多个传输方程往往难以同时收敛。为使模拟程序容易收敛且具有足够的精度,将图 1(a)中铥离子及钬离子的吸收、发射截面谱从 1700 nm 至 2100 nm 每隔 10 nm 取一组离散值作为模拟计算采用的参数。同时,对抽运光、信号光及 ASE 光的边界值采用独立的收敛条件,其中抽运光及信号光功率的收敛精度均为各自输入功率的 1%,ASE 光功率的收敛精度则为  $10^{-8} \text{ W}$ 。此外,FBG 对反向 ASE 功率的反射率则近似为其反射带宽与 ASE 带宽的比值。考虑到这一近似的合理性问题,FBG 的带宽不宜取得过大。同时,由铥钬共掺光纤的截面谱可以看到,铥离子和钬离子在 1950 nm 附近均既有吸收截面、也有发射截面,且钬离子的 1950 nm 吸收峰相对较窄,因此远离 1950 nm 的 ASE 不仅不能被钬离子吸收并再利用,反而会被单调放大,不利于放大器对信号光的增益。因此,对于 FBG 带宽仅取 10 nm 作为典型值进行模拟计算和分析讨论。

### 3 结果与讨论

众所周知,光纤放大器的增益特性与增益光纤的掺杂情况、长度,输入抽运光和信号光的波长、功率等因素均有关。而在掺杂情况、输入抽运光和信号光波长、功率均已给定的条件下,放大器的增益光纤长度存在一个最佳值,在此长度下信号光可获得最高增益。因此,先设放大器增益光纤的铥、钬掺杂比例[即  $N(\text{Tm}) : N(\text{Ho})$ ]为 0.75:0.25,1565 nm 的抽运光功率为 500 mW,输入信号光波长为 2040 nm,功率为 0.1 mW,在此条件下模拟放大器对信号光的增益随放大器增益光纤长度的变化趋势,结果如图 3 中虚线所示。

可见,放大器的增益光纤最佳长度( $L_{opt}$ )为 1.20 m,对应的最大增益为 30.35 dB。此时,若在放大器输入端插入一个中心波长为 1950 nm 的 FBG,由于 FBG 的影响,放大器增益光纤的最佳长度以及对应的最高增益都会发生改变。如图 3 中实线所示,加入 FBG 后,放大器的增益光纤最佳长度变为 1.55 m,较无 FBG 时延长了 0.35 m;且对应的最大增益较无 FBG 时提高了 0.83 dB,为 31.18 dB。这是由于:FBG 将一部分反向 ASE 光反射回放大器内被增益光纤重新吸收,从而形成了辅助抽运,并且延长了放大器的有效抽运长度,使信号光获得了更充分的放大。此外,还应注意到,图 3 中虚线并非始终在实线下方,即在同一增益光纤长度条件下,有 FBG 的放大器增益未必一定大于无 FBG 的放大器增益。可见,由于 FBG 的插入改变了放大器的增益特性,在同一个增益光纤长度条件下考察 FBG 对放大器增益的改善,并不能真实全面地反映 FBG 所起到的效果。因此,在考察 FBG 对放大器增益的改善效果时,应以加入 FBG 前后放大器分别对应的最佳长度为前提条件。

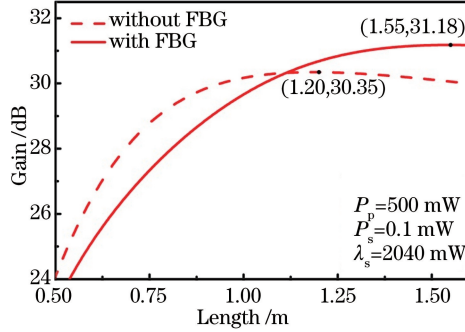


图 3 铥钬掺杂比例为 0.75:0.25 时,放大器对 2040 nm 信号光的增益随增益光纤长度的变化  
Fig. 3 2040 nm signal gain over active fiber length when  $N(\text{Tm}):N(\text{Ho})=0.75:0.25$

由于铥钬共掺光纤放大器中存在着两种不同的激活离子,它们不仅共同参与信号光以及 ASE 的受激过程,而且相互之间还发生着 ET 过程,因此铥钬掺杂比例对放大器的增益特性有着重要影响。为此,在保持输入抽运光及信号光不变的条件下,分别模拟几组不同铥钬掺杂比例的放大器在有无 FBG 时信号光的增益随增益光纤长度的变化趋势。如图 4 所示,其中实线与虚线分别表示有或无 FBG 时的结果。从图 4 可以看出,铥钬掺杂比例越大时,FBG 对放大器的影响越明显,它使放大器对信号光的增益特性发生了显著改变,

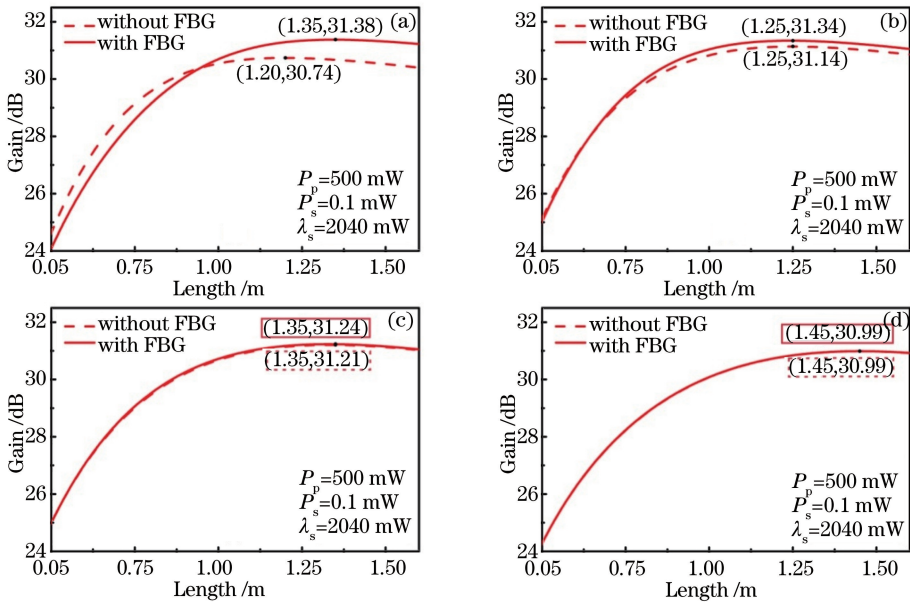


图 4 2040 nm 信号光增益随增益光纤长度的变化。(a)  $N(\text{Tm}):N(\text{Ho})=0.7:0.3$ ; (b)  $N(\text{Tm}):N(\text{Ho})=0.6:0.4$ ;  
(c)  $N(\text{Tm}):N(\text{Ho})=0.5:0.5$ ; (d)  $N(\text{Tm}):N(\text{Ho})=0.4:0.6$

Fig. 4 2040 nm signal gain over active fiber length. (a)  $N(\text{Tm}):N(\text{Ho})=0.7:0.3$ ; (b)  $N(\text{Tm}):N(\text{Ho})=0.6:0.4$ ;  
(c)  $N(\text{Tm}):N(\text{Ho})=0.5:0.5$ ; (d)  $N(\text{Tm}):N(\text{Ho})=0.4:0.6$

增益获得了提高,对应的增益光纤最佳长度也被延长;当铥钬掺杂比例逐渐减小时,有无 FBG 对放大器的影响也随之逐渐减弱。当铥钬掺杂比例低于 0.5:0.5 时,实线与虚线几乎重合,此时 FBG 不起作用。值得注意的是,放大器对信号光的最大增益出现在铥钬掺杂比例为 0.7:0.3 且有 FBG 时,为 31.38 dB,对应的增益光纤最佳长度为 1.35 m;相同掺杂比例下无 FBG 的放大器对信号光的最大增益为 30.74 dB,对应的增益光纤最佳长度是 1.20 m。可见,FBG 在放大器中所起的效果对铥钬掺杂比例较为敏感,只有当铥钬掺杂比例较高时,在放大器中加入 FBG 才能对增益有较为显著的改善。但对比图 3 的结果可见,铥钬掺杂比例也不宜过高,否则由于缺乏足够的钬离子,将不利于 2 μm 以上波段信号光的增益。目前常用的市售商用铥钬共掺光纤,其铥钬掺杂比例均较高,例如 CorActive 公司生产的 TH530 型铥钬共掺光纤、NOIC 生产的单模铥钬共掺光纤,铥钬掺杂比例均在 0.85:15 附近,若采用此类光纤构建放大器对 2 μm 以上波段信号进行放大时,在放大器信号输入端加入一个 1950 nm 附近短波段的 FBG,将对放大器的增益有较为显著的改善。

加入 FBG 后放大器增益的改善得益于反向 ASE 的再利用,因而反向 ASE 的光谱成分及其功率大小决定了 FBG 对放大器增益的改善效果。为此研究了上述不同铥钬掺杂比例下放大器的反向 ASE 光谱。图 5 是各掺杂比例下放大器内  $z=0$  处的反向 ASE 光谱的数值模拟结果,其中红色实线与黑色实线分别代表有或无 FBG 时的结果,且放大器的增益光纤长度均对应于各自的最佳长度。可见,铥钬共掺光纤放大器的反向 ASE 谱存在 3 个明显的峰结构,分别位于 1840、1950、2040 nm 附近。结合图 1(a)可知,1840 nm 峰主要由铥离子贡献,2040 nm 峰主要由钬离子贡献,1950 nm 峰则由二者共同贡献,且钬离子在 1950 nm 附近的吸收与发射截面相当。当铥钬掺杂比例较高时[如图 5(a)],由于铥离子占主导,反向 ASE 中 2 μm 以下的短波段成分居多。此时在放大器的信号输入端插入一个中心波长为 1950 nm 的 FBG,将使反向 ASE 中一部分 1950 nm 波段的信号反射回放大器内,最终通过钬离子的吸收实现再利用,从而提高放大器在 2 μm 以上长波段的增益。而随着铥钬掺杂比例的降低,反向 ASE 中 2 μm 以下短波段的成分显著减少。当铥钬掺杂比例小于 0.5:0.5 时,2 μm 以下短波段成分相对于 2 μm 以上长波段成分已经可忽略不计,因而此时 1950 nm 的 FBG 不能起作用,有无 FBG 时放大器的反向 ASE 光谱几乎重合。此外还应注意,在铥钬掺杂比例较高的情况下,加入 1950 nm 的 FBG 对放大器反向 ASE 中 2 μm 以下短波段成分有整体的抑制作用。

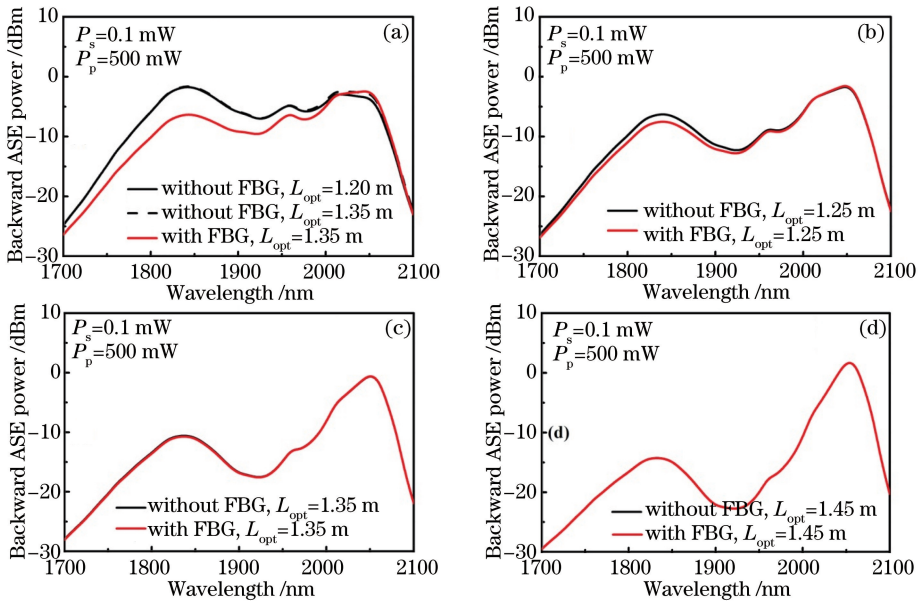


图 5 放大器内  $z=0$  处的反向 ASE 光谱。(a)  $N(\text{Tm}):N(\text{Ho})=0.7:0.3$ ;

(b)  $N(\text{Tm}):N(\text{Ho})=0.6:0.4$ ; (c)  $N(\text{Tm}):N(\text{Ho})=0.5:0.5$ ; (d)  $N(\text{Tm}):N(\text{Ho})=0.4:0.6$

Fig. 5 Backward ASE spectrum at  $z=0$  in the amplifier. (a)  $N(\text{Tm}):N(\text{Ho})=0.7:0.3$ ;

(b)  $N(\text{Tm}):N(\text{Ho})=0.6:0.4$ ; (c)  $N(\text{Tm}):N(\text{Ho})=0.5:0.5$ ; (d)  $N(\text{Tm}):N(\text{Ho})=0.4:0.6$

为了进一步理解 FBG 使放大器长波段增益提高的机理,以及不同掺杂比例造成差异的原因,分别以铥钬掺杂比例为 0.7:0.3 和 0.4:0.6 为例,模拟分析两种掺杂比例下有无 FBG 时增益光纤内抽运光、信号光以

及正反向 ASE 功率的传输演化情况,其中增益光纤的长度分别对应于各自的最佳长度。如图 6 所示,由于 ASE 功率往往相对较小,为了更好地体现其传输演化情况,图中正、反向 ASE 功率均相对于右侧纵坐标作图,而抽运光、信号光及 FBG 反射光的功率则相对于左侧纵坐标作图。无 FBG 时[如图 6(a)、(c)],剩余抽运光及正、反向 ASE 均造成了一定的功率浪费。其中,对于铥钬掺杂比例较高的情况[如图 6(a)],由前面的讨论可知,此时反向 ASE 中短波段成分占主导,且在 1950 nm 附近有显著的峰值。加入 FBG 后,如图 6 (b)所示,其中一部分 1950 nm 的信号被反射回放大器内。起初,由于 1565 nm 抽运光的作用,光纤中铥离子的反转度处于较高水平,因此这部分 1950 nm 的信号在铥离子的受激发射下被迅速放大,并在大约  $z = 0.7$  m 处达到极大值。此后,由于 1565 nm 抽运光被吸收而逐渐减弱,铥离子的反转度随之逐渐下降,此前被放大的 1950 nm 信号被钬离子逐渐吸收,成为辅助抽运光并为 2040 nm 信号光提供增益。至放大器末端,1950 nm 信号以及原 1565 nm 的抽运光均被吸收殆尽,而 2040 nm 信号光的功率则达到了最大值 137 mW,较无 FBG 时的最大值 118 mW 提高了约 16.1%。而对于铥钬掺杂比例较低的情况[如图 6(c)],由于没有足够的激发态铥离子,一方面反向 ASE 中的短波段成分较少,另一方面被 FBG 反射回放大器内的短波段 ASE 成分无法在放大器前半段被放大,也无法在放大器后半段成为辅助抽运,故此时 FBG 对放大器几乎不起作用。此外,对比图 6(a)与图 6(b)还可以看到,加入 FBG 后放大器的正、反向 ASE 均得到了一定程度的抑制。

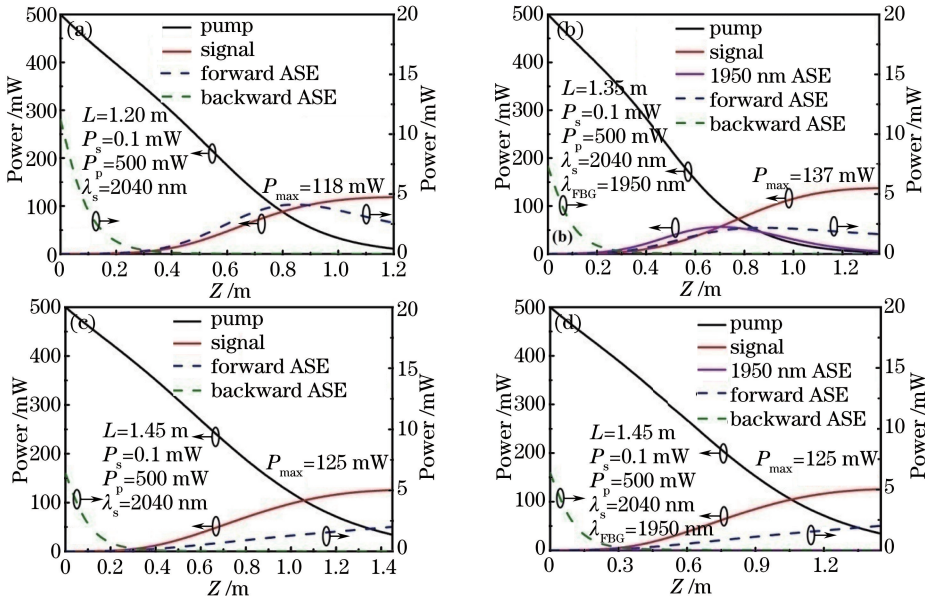


图 6 抽运光、信号光以及 ASE 功率在增益光纤中的传输演化情况(ASE 对应于右侧纵坐标)。

- (a)  $N(\text{Tm}):N(\text{Ho})=0.7:0.3$ , 无 FBG; (b)  $N(\text{Tm}):N(\text{Ho})=0.7:0.3$ , 有 FBG;
- (c)  $N(\text{Tm}):N(\text{Ho})=0.4:0.6$ , 无 FBG; (d)  $N(\text{Tm}):N(\text{Ho})=0.4:0.6$ , 有 FBG

Fig. 6 Evolution of pump, signal and ASE power propagating along the fiber (ASE corresponds to right Y-axis).

- (a)  $N(\text{Tm}):N(\text{Ho})=0.7:0.3$ , without FBG; (b)  $N(\text{Tm}):N(\text{Ho})=0.7:0.3$ , with FBG;
- (c)  $N(\text{Tm}):N(\text{Ho})=0.4:0.6$ , without FBG; (d)  $N(\text{Tm}):N(\text{Ho})=0.4:0.6$ , with FBG

由以上讨论可知,在铥钬共掺光纤放大器的输入端插入一个 1950 nm FBG 的实质是利用铥离子和钬离子各自的吸收、发射特性,将放大器产生的反向 ASE 中的短波段成分重新利用以提高长波段的增益。因此,FBG 对放大器增益提高的效果依赖于放大器产生的反向 ASE 本身及铥钬掺杂比例,只有当反向 ASE 中短波段成分占主导且功率较高时,采用在放大器输入端加入短波段 FBG 的方法才能实现长波段信号光的增益的显著提高。该方法一般适用于铥钬掺杂比例较高、且抽运光功率远大于输入信号光功率的高倍率放大的情况。

此外,该方法应不仅适用于放大 2040 nm 的信号光,也适用于铥钬共掺光纤增益谱中 2  $\mu\text{m}$  以上波段的任意波长。如图 7(a)所示,以铥钬掺杂比例为 0.7:0.3 的放大器为例,分别模拟了有无 FBG 时放大器在

1800~2100 nm 波长范围内的增益谱,其中抽运光和信号光功率分别为 500 mW 和 0.1 mW,而增益光纤的长度则分别对应于前文所求的最佳长度,即有 FBG 时为 1.35 m、无 FBG 时为 1.20 m。由图 7(a)可以看出,在 2000~2075 nm 波段内,有 FBG 时放大器的增益较无 FBG 时均有所提高。需要指出的是,虽然结果显示在靠近 2100 nm 波段有 FBG 时放大器的增益并未高于无 FBG 时的放大器增益,这是由于该结果是以放大 2040 nm 信号光所对应的最佳光纤长度作为统一的参数而得出的。实际上,其他波长的信号光应分别对应于各自不同的最佳光纤长度,才能真实地反映 FBG 对放大器增益的改善效果。插入 FBG 对放大器噪声特性影响的模拟结果如图 7(b)所示,可见在整个 2 μm 以上波段,放大器的噪声系数并未被恶化。

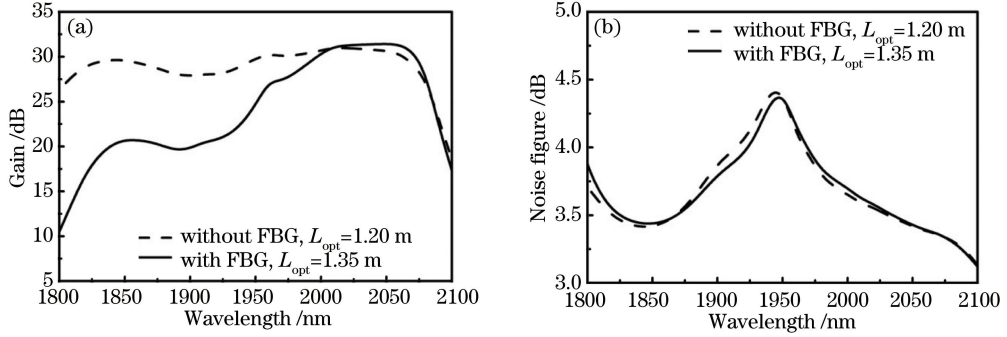


图 7 铥钬掺杂比例为 0.7:0.3 时放大器的增益谱与噪声系数谱( $P_s=0.1$  mW,  $P_p=500$  mW)

Fig. 7 Gain and noise figure spectra of the amplifier when  $N(\text{Tm}):N(\text{Ho})=0.7:0.3$  ( $P_s=0.1$  mW,  $P_p=500$  mW)

## 4 结 论

针对铥钬共掺光纤放大器在放大 2 μm 以上长波段信号光时因反向 ASE 过大而造成放大效率浪费的问题,提出了通过在放大器输入端插入一个 1950 nm 的 FBG 将一部分铥波段的反向 ASE 反射回放大器内并加以再利用的方案,数值模拟该方案其对放大器增益特性的影响,并重点研究和分析了放大器增益特性对于铥钬掺杂比例的依赖性。研究表明,在铥钬共掺比例较高的情况下,加入 FBG 可提高放大器在 2 μm 以上长波段的增益,延长了对应的最佳光纤长度。但 FBG 对放大器增益提高的效果依赖于放大器产生的反向 ASE 大小及光谱成分比例,故该方案一般适用于铥钬掺杂比例较高,且抽运光功率远大于输入信号光功率的高倍率放大的情况。此外,对放大器输出噪声系数谱的模拟结果表明,插入 FBG 后放大器的噪声特性并未发生恶化。

## 参 考 文 献

- 1 刘江, 师红星, 刘昆, 等. 210 W 全光纤结构单频、单偏振掺铥光纤激光器[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0505007-7.
- 2 Wang Li, Yang Jingwei, Cai Xuwu, *et al.*. 2.09 μm nanosecond holmium laser pumped ZnGeP<sub>2</sub> optical parametric oscillator[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0102008.  
王礼, 杨经纬, 蔡旭武, 等. 2.09 μm 纳秒钬激光抽运的磷锗锌光参量振荡器[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0102008.
- 3 Lü Tao, Zhang Wei, Chen Fang. Experimental research of dissecting biological soft tissues induced by fiber-guided Q-switched thulium:YAG laser microsurgical scalpel[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1117001.  
吕涛, 张伟, 陈防. 光纤传输调 Q 钬激光外科手术刀切割生物软组织实验研究[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1117001.
- 4 Scholle K, Lamrini S, Koopmann P, *et al.*. 2 μm laser sources and their possible applications [M].//Bishnu Pal. Frontiers in Guided Wave Optics and Optoelectronics. Rijeka: INTECH, 2010: 471-500.
- 5 Geng J, Wang Q, Jiang S. 2 μm fiber laser sources and their applications[C]. SPIE, 2011, 8164: 816409.
- 6 Walsh B M. Review of Tm and Ho materials: Spectroscopy and lasers[J]. Laser Physics, 2009, 19(4): 855-866.
- 7 Oh K, Morse T F, Kilian A, *et al.*. Continuous-wave oscillation of thulium-sensitized holmium-doped silica fiber laser [J]. Optics Letters, 1994, 19(4): 278-280.
- 8 Jackson S D, Mossman S. High-power diode-cladding-pumped Tm<sup>3+</sup>, Ho<sup>3+</sup>-doped silica fibre laser[J]. Applied Physics



- B, 2003, 77(5): 489-491.
- 9 Yuen T, Billy R, David B, *et al.*. Tm<sup>3+</sup>/Ho<sup>3+</sup> codoped tellurite fiber laser[J]. Optics Letters, 2008, 33(11): 1282-1284.
- 10 Xue G, Zhang B, Yin K, *et al.*. All-fiber wavelength-tunable Tm/Ho-codoped laser between 1727 nm and 2030 nm[C]. SPIE, 2015, 9255: 92550U.
- 11 Min B, Yoon H, Lee W, *et al.*. Performance improvement of wideband EDFA by ASE injection from C band to L band amplifier[C]. Proceedings of the Fifth Asia-Pacific Conference on Communications and Fourth Optoelectronics and Communications Conference, 1999, (2): 1346-1347.
- 12 Hui Xiaoli, Lin Rujian. Gain enhanced L-band erbium-doped fiber amplifier using a single fiber Bragg grating[J]. Optical Communication Technology, 2003, 27(10): 31-33.  
惠小丽, 林如俭. 基于单个光纤光栅反射技术的高性能 L 波段 EDFA[J]. 光通信技术, 2003, 27(10): 31-33.
- 13 Harun S W, Subramaniam T, Tamchek N, *et al.*. Gain and noise figure performances of L-band EDFA with an injection of C-band ASE[J]. Jurnal Teknologi, 2004, 40(D): 9-16.
- 14 Han Q, Yao Y, Chen Y, *et al.*. Highly efficient Er/Yb-codoped fiber amplifier with an Yb-band fiber Bragg grating[J]. Optics Letters, 2015, 40(11): 2634-2636.
- 15 Gao G, Wang G, Yu C, *et al.*. Investigation of 2.0  $\mu\text{m}$  emission in Tm<sup>3+</sup> and Ho<sup>3+</sup> co-doped oxyfluoride tellurite glass [J]. Journal of Luminescence, 2009, 129(9): 1042-1047.
- 16 Jackson S D, King T A. CW operation of a 1.064- $\mu\text{m}$  pumped Tm-Ho-doped silica fiber laser [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1998, 34(9): 1578-1587.
- 17 Allain J Y, Monerie M, Poignant H. High-efficiency CW thulium-sensitized holmium-doped fluoride fibre laser operating at 2.04  $\mu\text{m}$ [J]. Electronics Letters, 1991, 27(17): 1513-1515.
- 18 Feng T, Yan F, Peng W, *et al.*. Theoretical analysis of characteristics for 2  $\mu\text{m}$  Tm<sup>3+</sup> : Ho<sup>3+</sup> co-doped silica fiber laser pumped by a 1550 nm fiber laser[J]. Optical Fiber Technology, 2012, 18(4): 204-208.
- 19 Digonnet M J, Gaeta C J. Theoretical analysis of optical fiber laser amplifiers and oscillators[J]. Applied Optics, 1985, 24(3): 333-342.
- 20 Mao Q, Wang J, Sun X, *et al.*. A theoretical analysis of amplification characteristics of bi-directional erbium-doped fiber amplifiers with single erbium-doped fiber[J]. Optics Communications, 1999, 159(1-3): 149-157.
- 21 Zou X, Toratani H. Spectroscopic properties and energy transfers in Tm<sup>3+</sup> singly and Tm<sup>3+</sup> Ho<sup>3+</sup> doubly-doped glasses [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1996, 195(1-2): 113-124.
- 22 Wang J. Theoretical modelling of thulium-sensitized holmium continuous-wave fibre lasers[J]. Journal of Modern Optics, 2007, 41(7): 1457-1472.