

双波长全光自动增益箝制掺铒光纤放大器的实验研究*

贾东方 王衍勇 包焕民 杨天新 李世忱

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘 要 提出了结构简单的光纤布喇格光栅(FBG)双波长全光自动增益箝制方案, 并进行了相关实验. 结果表明, 在三种不同的箝制波长组合 1535.64 nm+1562.68 nm、1530.48 nm+1562.68 nm、1530.48 nm+1551.36 nm 条件下, 1540 nm 信号的输出增益大小和输入信号功率动态范围几乎一致. 对应此三种箝制波长组合, 环路内的损耗分别为: 14.7 dB、15 dB、15 dB. 由此证明, 在相同泵浦条件和环路损耗条件下, 此三种不同箝制波长组合具有近似相同的箝制效果. 而 1551.36 nm+1562.68 nm 箝制波长组合得到的结果相差甚远. 此结果说明, 在设计双波长全光自动增益箝制掺铒光纤放大器(OAGC-EDFA)时, 为了取得足够大的信号增益, 两箝制波长的波长间隔应尽量较大.

关键词 掺铒光纤放大器; 全光自动增益箝制; 光纤布喇格光栅

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

0 引言

在波分复用光传输系统和网络中, 为了防止由于信道增减而引起的剩余信道增益变化, 往往采用增益箝制技术来保证信道数目变化前后剩余信道的功率不变. 迄今, 已报道的 EDFA 的增益箝制技术有多种, 主要有输入、输出光功率监视控制法、饱和和补偿光控制法、载波调制法、全光增益箝制法等. 由于全光增益箝制技术在实现光增益的控制过程中, 不需要任何电子控制的介入, 且不需要使用光有源器件, 具有响应速度快、可靠性高、和输入条件和泵浦功率无关等特性, 成为国际上的研究热点^[1~5]. 单路振荡光箝制的方法不可能同时实现剩余信道的快速平衡和稳态功率差值的最小化^[6], 因此, 多波长振荡箝制方案的提出成为必然. 由于多波长箝制激光的存在大大减小了非均匀加宽空间烧孔的影响, 从而使剩余信道的快速平衡以及稳态差值最小化的同时实现成为可能.

在多波长振荡箝制方案中, Y. Q. Liu 等人提出的利用双环路实现双波长全光增益箝制方案比较具有代表性^[7]. 本文提出了结构更简单的双光纤布喇格光栅(FBG)方案, 并进行了相关实验.

1 双波长 OAGC-EDFA 实验方案设计及其实现

实验光路如图 1, 环路内的选频器件由两个反

射峰值波长不同的 FBG 组成. 按照此光路布局, 本文对四组不同波长组合分别进行了实验研究, 并对它们进行了比较.

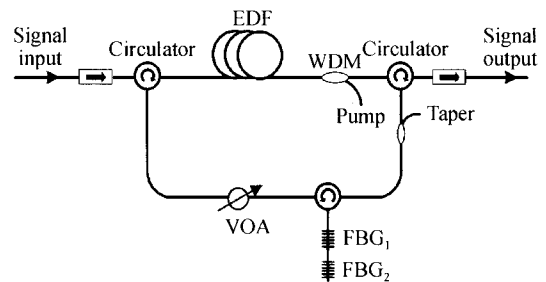


图 1 基于 FBG 的双波长 OAGC-EDFA 结构
Fig. 1 Configuration of dual-wavelength OAGC-EDFA based on FBG

1.1 1535.64 nm 与 1562.68 nm FBG 组合

通过宽带光源测试得到的两个 FBG 的反射谱, 如图 2, 其反射峰值分别为 1535.64 nm 和 1562.68 nm, 形成振荡后对应的光谱如图 3.

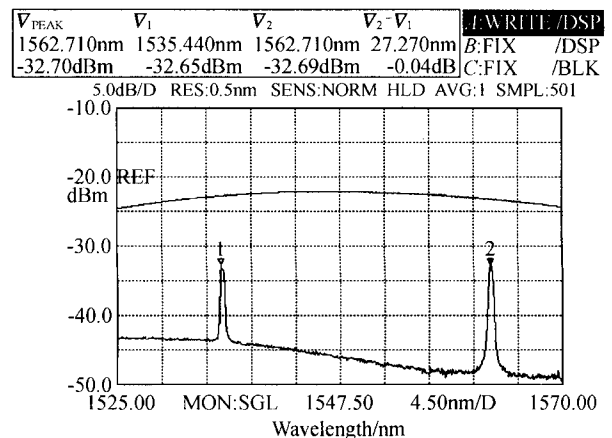


图 2 实验所用 FBG 的反射谱
Fig. 2 Reflective spectrum of FBG

* 国家自然科学基金项目(60507001)、天津市科技发展基金项目(033800411)和天津大学青年教师基金资助
Tel: 022-27402421 Email: jiadf@tju.edu.cn
收稿日期: 2005-06-28

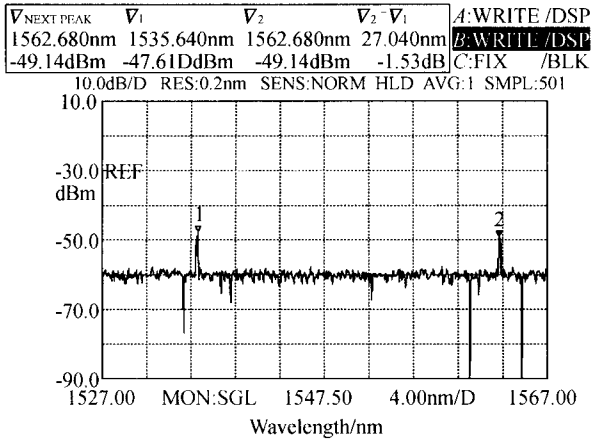


图3 对应的箝制激光光谱
Fig. 3 Corresponding clamping laser spectrum

采用 1535.64 nm+1562.68 nm 的箝制波长组合, 分别对 1540 nm、1550 nm、1557 nm 三种不同波长信号进行了实验. 在 120 mW 泵浦功率条件下, 为了取得近似相同的箝制增益, 环路内引入的损耗分别对应为: 15 dB、14.5 dB 和 13.6 dB. 实验结果如图 4.

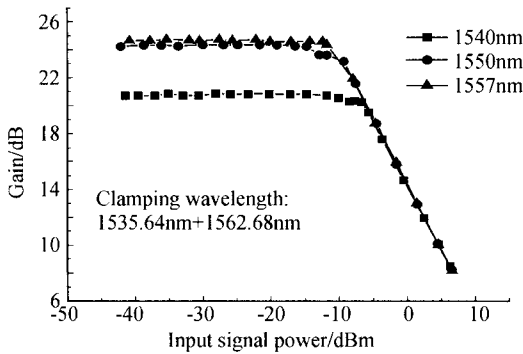


图4 箝制波长为 1535.64 nm 和 1562.68 nm 时信号的增益-输入功率特性
Fig. 4 The gain characteristics vs input signal power when clamping wavelengths are 1535.64 nm and 1562.68 nm

可以看到, 利用该波长组合的 OAGC-EDFA, 不同波长的输入信号都表现出了理想的增益箝制效果. 对于 1540 nm 信号, 在输入功率小于 -10.07 dBm 的范围内, 增益波动 $\Delta G < 0.3$ dB; 对于 1550 nm 信号, 在输入功率小于 -14.77 dBm 的范围内, 增益波动 $\Delta G < 0.12$ dB; 对于 1557 nm 信号, 在输入功率小于 -12.41 dBm 的范围内, 增益波动 $\Delta G < 0.15$ dB. 因此, 与单波长箝制相比^[8], 双波长箝制方案的箝制效果更加明显, 体现出双波长箝制的优势.

1.2 1530.48 nm 与 1562.68 nm FBG 组合

将实验中反射峰值波长为 1535.64 nm 的 FBG 换成反射峰值波长为 1530.48 nm 的 FBG. 在 1530.48 nm 和 1562.68 nm 的双波长箝制组合条件下, 分别对 1540 nm、1550 nm、1557 nm 三种不同波长信号进行了实验. 在相同的 120 mW 泵浦功率条件

下, 对应三个不同信号波长, 环路内引入的损耗分别对应为: 14.7 dB、14.5 dB 和 15 dB. 实验结果如图 5. 从图中可以看到, 此时得到的结果和图 4 结果非常接近, 即箝制波长由 1535.64 nm 改变为 1530.48 nm 后, 放大器的箝制效果几乎不变.

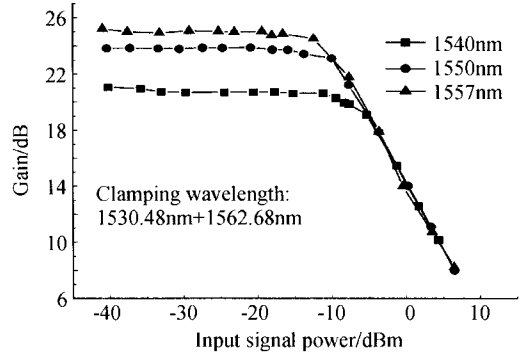


图5 箝制波长为 1530.48 nm 和 1562.68 nm 时信号的增益-输入功率特性
Fig. 5 The gain characteristics vs input signal power when clamping wavelengths are 1530.48 nm and 1562.68 nm

1.3 1530.48 nm 与 1551.36 nm FBG 组合

将实验中反射峰值波长为 1562.68 nm 的 FBG 换成反射峰值波长为 1551.36 nm 的 FBG. 在 1530.48 nm 和 1551.36 nm 的双波长箝制组合条件下, 分别对 1540 nm、1560 nm 两种不同波长信号进行了实验. 在相同的泵浦功率(120 mW), 相同的环路损耗(15 dB)条件下, 得到的实验结果如图 6. 从图中可以看到, 在相同的实验条件下, 在一定输入功率范围内, 放大器对两种波长的信号均实现了良好的增益箝制.

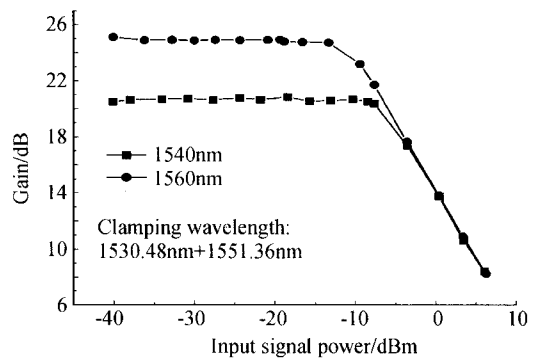


图6 箝制波长为 1530.48 nm 和 1551.36 nm 时信号的增益-输入功率特性
Fig. 6 The gain characteristics vs input signal power when clamping wavelengths are 1530.48 nm and 1551.36 nm

对于 1540 nm 信号, 在输入信号光功率小于 -8.51 dBm 的范围内, 其增益波动 $\Delta G < 0.3$ dB; 对于 1560 nm 信号, 在输入信号光功率小于 -13.39 dBm 的范围内, 其增益波动 $\Delta G < 0.3$ dB. 从此图中可以看到, 在相同的实验条件下 1560 nm 信号可以得到比 1540 nm 更大的增益, 其原因如下: 在此实验中,

放大器处于增益箝制状态时, 铒纤内部上能级反转度被箝制在较低的水平上, 在这种反转度条件下, 长波长信道具有更大的增益系数, 从而可以得到更大的增益. 由于振荡光和信号光同时消耗泵浦能量, 因此, 信号光增益较大必然导致箝制激光强度较弱, 从而输入信号功率动态范围较小. 反之, 信号波长越短时, 增益系数越小、增益越低、输入信号功率动态范围越大.

1.4 1551.36 nm 与 1562.68 nm FBG 组合

在本组实验中, 将 1551.36 nm 的 FBG 与 1562.68 nm 的 FBG 进行组合, 在这两个箝制波长组合条件下, 分别对 1540 nm、1555 nm 两种不同波长信号进行了实验. 在相同的 120 mW 泵浦功率条件下, 对应两个不同信号波长, 环路内引入的损耗分别对应为: 4.2 dB、7 dB. 实验结果如图 7. 从图中可以看到, 虽然放大器对两种不同波长的信号都有效地实现了箝制, 但是, 得到的增益差别较大. 对于 1555 nm 信号, 在输入信号光功率小于 -0.81 dBm 的范围内, 其增益波动 $\Delta G < 0.3$ dB; 对于 1540 nm 信号, 虽然其箝制允许最大输入功率可以达到 6.11 dBm, 而且增益箝制效果很好 ($\Delta G < 0.1$ dB), 但输出增益太小 (3.27 dB).

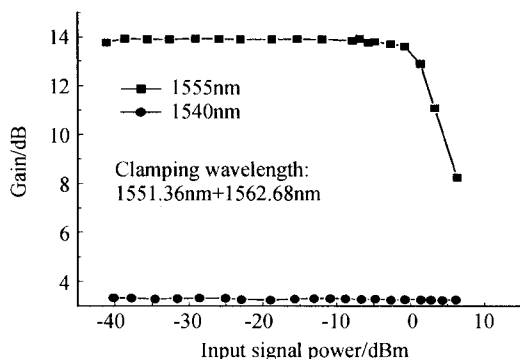


图 7 箝制波长为 1551.36 nm 和 1562.68 nm 时信号的增益-输入功率特性

Fig. 7 The gain characteristics vs input signal power when clamping wavelengths are 1551.36 nm and 1562.68 nm

根据增益箝制的原理, 此时增大环路的损耗, 就可以提高信号的输出增益. 为了提高 1540 nm 信号的增益, 实验中增大了环路内的损耗, 1540 nm 信号的增益的确得到了提高, 但当环路引入的损耗达到 8 dB 时, 1562.7 nm 处的振荡消失. 此现象的原因在于铒纤的均匀加宽性. 由于这两个箝制波长的间隔较小 (~ 11 nm), 处于铒纤的均匀加宽影响范围之内, 因此, 要同时实现这两个波长的振荡, 必须克服模式竞争的影响, 此时振荡光对环路内损耗大小的要求比较苛刻. 当 1551.36 nm 与 1562.7 nm 两波长同时实现振荡时, 振荡光的总强度较大, 此时

1540 nm 信号的增益较小. 改变环路的损耗虽然可以提高信号的增益, 但却破坏了两波长同时起振的条件, 因此在此箝制激光波长组合的条件下, 信号无法取得足够大的增益, 而失去实际意义. 综合四组实验的结果, 给出了在这四种箝制条件下, 1540 nm 信号的输出特性, 如图 8.

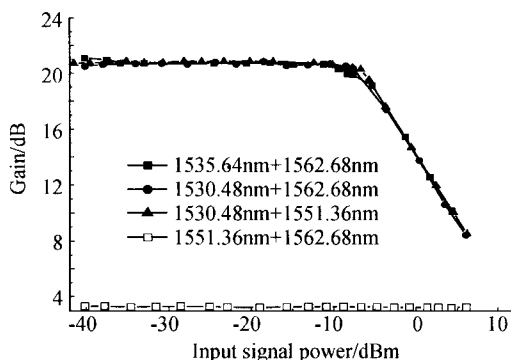


图 8 四种不同箝制波长组合条件下 1540 nm 信号的输出特性

Fig. 8 Output property of 1540 nm signal in dual-wavelength-clamping EDFA under four different combination conditions

从图中可以看到, 在三种不同的箝制波长组合: 1535.64 nm + 1562.68 nm、1530.48 nm + 1562.68 nm、1530.48 nm + 1551.36 nm 条件下, 1540 nm 信号的输出增益大小 (20.8 dB) 和输入信号功率动态范围 (-10 dB) 几乎一致. 对应此三种箝制波长组合, 环路内的损耗分别为: 14.7 dB、15 dB、15 dB, 由此证明, 在相同的泵浦条件和环路损耗条件下, 此三种不同箝制波长组合具有近似相同的箝制效果. 而 1551.36 nm + 1562.68 nm 箝制波长组合得到的结果相差甚远. 此结果说明, 在设计双波长 OAGC-EDFA 时, 为了取得足够大的信号增益, 两箝制波长的波长间隔应尽量较大.

对于全光箝制过程中可能出现的噪音指数劣化问题, 可以通过采用级联结构改善其噪音特性^[9~12]. 另外, 研究表明^[1,13], 通过优化抽运方式、激光振荡波长及传播方向、激光输出耦合比也可以获得低噪音指数.

2 结论

使用环形腔 FBG 选频方案, 进行了四组不同波长组合的双波长全光增益箝制实验研究, 并进行了比较. 结果显示, 使用双 FBG 可以实现良好的箝制效果, 放大器处于增益箝制状态时, 其输出增益波动可以控制在 0.3 dB 以内. 此外, 考虑到铒纤的均匀加宽性, 应使两箝制波长的间隔尽量大, 这样才能得到更高的信号增益.

参考文献

- 1 Ahn J T, Kim K H. All-optical gain-clamped erbium-doped fiber amplifier with improved noise figure and freedom from relaxation oscillation. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, **16**(1):84~86
- 2 Tang M, Gong Y D, Shum P. Dynamic properties of double-pass discrete Raman amplifier with FBG-based all-optical gain clamping techniques. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, **16**(3):768~770
- 3 Ahn J T, Lee J M, Kim K H. Gain-clamped semiconductor optical amplifier based on compensating light generated from amplified spontaneous emission. *Electronics Letters*, 2003, **39**(24): 1140 ~ 1141
- 4 Yeh C H, Lee C C, Chen C Y, *et al.* S band gain-clamped erbium-doped fiber amplifier by using optical feedback method. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, **16**(1):90~92
- 5 Yi L L, Zhan L, Ye Q H, *et al.* Gain-clamped erbium-doped fiber-ring lasing amplifier with low noise figure by using an interleaver. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, **15**(12):1695~1697
- 6 Luo G, Zyskind J L, Sun Y, *et al.* Performance degradation of all-optical gain-clamped EDFA's due to relaxation-oscillations and spectral-hole burning in amplified WDM networks. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1997, **9**(10): 1346~1348
- 7 Liu Y Q, Krol M F. Transient gain control in EDFA's by dual-cavity optical automatic gain control. *IEEE Photonics Technology Letter*, 1999, **11**(11):1381~1383
- 8 包焕民,王衍勇,姜骁骏,等. 单波长全光自动增益箝制 EDFA 的实验研究. 光通信技术, 2004, **28**(12):39~40
Bao H M, Wang Y Y, Jiang X J, *et al.* *Optical Communication Technology*, 2004, **28**(12):39~40
- 9 Jia D F, Wang Y Y, Bao H M, *et al.* High gain low noise L-band preamplifier with cascade double-pass structure. *Chinese Optics Letters*, 2005, **3**(6):311~312
- 10 刘艳格,张吴,蒙红云,等. WDM 用增益平坦的高增益低噪声双段级联掺铒光纤放大器. 光子学报, 2003, **32**(10):1196~1200
Liu Y G, Zhan g H, Meng H Y, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(10):1196~1200
- 11 马晓明. 两段级联掺铒光纤放大器的优化研究. 光子学报, 2003, **32**(6):688~692
Ma X M. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(6):688~692
- 12 秦山, 强则焯, 何赛灵. 低噪声、高增益的 L-band EDFA 的实验研究. 光子学报, 2005, **34**(3):409~411
Qing S, Qiang Z X, He S L. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3):409~411
- 13 Cai M, Liu X M, Cui J C, *et al.* Study on noise characteristic of gain-clamped erbium-doped fiber-ring lasing amplifier. *IEEE Photonics Technology Letter*, 1997, **9**(8):1093~1095

Experimental Studies on the Dual-wavelength Optical Auto Gain Clamping EDFA

Jia Dongfang, Wang Yanyong, Bao Huanmin, Yang Tianxin, Li Shichen

College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Key Laboratory of Opto-electronics Information and Technical Science, Ministry of Education, Tianjin 300072

Received date: 2005-06-28

Abstract A simple scheme using fiber Bragg gratings to realize dual-wavelength optical auto gain clamping erbium-doped fiber amplifier is proposed and demonstrated. It shows that in three kinds of different clamping wavelength combinations; 1535.64 nm and 1562.68 nm, 1530.48 nm and 1562.68 nm, 1530.48 nm and 1551.36 nm, the outputs gain and dynamic state scopes of 1540 nm signal are almost the same. For above three clamping wavelength combinations, loop loss is 14.7 dB, 15 dB and 15 dB, respectively. For the same pump conditions and loop loss, these three kinds of clamping wavelength combinations lead to almost the same results, which is proved by experimental results. However, the result is very different from above under the condition of 1551.36 nm and 1562.68 nm clamping wavelength combinations. It is revealed that when designing a dual-wavelength optical auto gain clamping EDFA, to get high gain, the separation of two clamping wavelengths should be as big as possible.

Keywords Erbium-doped fiber amplifier; Optical auto gain clamping; Fiber Bragg grating



Jia Dongfang was born in Shandong Province, and in 1971. He received his doctor degree in physical electronics from Tianjin University. Now he is an associate professor in the Department of College of Optoelectronics & Precision Instrument Engineering of Tianjin University. His main research interests are concerned on nonlinear fiber optics and high-speed optical fiber communication systems.