环形腔掺铒光纤激光器频谱仿真和优化

马曙光[1]，倪延辉[1]，柳　海[1]，徐　攀[2]
(1. 空军工程大学电讯工程学院，陕西　西安　710077；2. 国防科技大学光电科学与工程学院，湖南　长沙　410073)

摘要　基于掺铒光纤Giles模型，建立了环形腔掺铒光纤激光器模型，按照实际所用的σ结构激光器设定仿真参数，对前向、后向以及双向放大自发辐射(Amplified Spontaneous Emission，ASE)光对激光器性能的影响进行仿真，得到激光器性能优化参数。仿真结果表明在激光器起振时，是否考虑腔内的前后向ASE光对输出光功率幅值与掺铒光纤增益粒子分布影响不大，后向ASE光是导致掺铒光纤存在截止长度的原因。实验结果和仿真结果的对比表明本模型可较准确地仿真激光器的性能，可用于对实际激光器的设计进行参数优化。

关键词　激光技术；掺铒光纤激光器；数值仿真；放大自发辐射
DOI　10.3969/j.issn.1009-3516.2011.03.019
中图分类号　TN242　　**文献标识码**　A　　**文章编号**　1009-3516(2011)03-0090-05

掺铒光纤激光器具有低阈值连续输出、低成本以及易于与光纤系统耦合等诸多优点，因而在光纤通信、光纤传感等领域获得广泛应用[1]。与实验测量相比，光纤激光器数值建模及仿真可在全参数空间低成本地模拟激光器的运行，而不需要实际更换掺铒光纤、改变输出耦合比等器件参数，这对高效准确地改进激光器结构参数，优化其性能具有不可替代的重要作用。目前已有多种解析及数值模型用于求解激光器的优化参数。黄志坚等[2]、徐华斌等[3]基于解析模型得到抽运阈值、斜率效率，最佳光纤长度等解析解，但都忽略了放大自发辐射光(ASE)[4]的影响；夏江珍等在2004年研究了光纤环形腔激光器的输出特性[5]；A. Cucinotta等基于Giles模型对环形腔光纤激光器进行建模[6]，S. Selvakennedy在其基础上考虑了激发态跃迁建立改进模型对激光器进行优化[7]。但他们都没有充分利用Giles频谱模型的优势，对腔内存在ASE光的情况进行深入讨论。本文在已有激光器模型的基础上，对各种抽运方式下前向、后向以及双向ASE光对激光器性能的影响进行进一步分析，所得结果对实际激光器的设计具有指导意义。

1　理论

激光器模型由抽运源、增益单元、损耗单元、选频单元、反馈及输出单元组成，见图1。

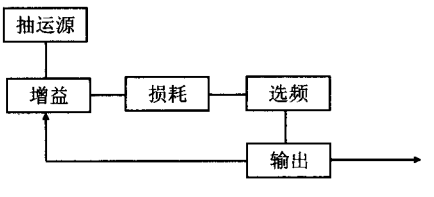

图1　激光器仿真模型
Fig. 1　Simulation model of laser

增益模块是整个激光器模型的核心模块，它描述了光场与增益介质相互作用从而获得增益的过程。1990年Giles基于速率方程理论，首次比较全面和系统的分析和总结了掺铒光纤放大器理论模型，提供了均匀加宽假设下稳态模型和时变模型的分析工具[8]。其不仅能对ASE光等多种参量进行全面的分析，还为多波长信号在铒纤中传输提供了全频谱解决方案。我们已使用这一模型对双波长激光器

收稿日期：2010-11-29
基金项目：国家自然科学基金资助项目(60678018)
作者简介：马曙光(1983-)，男，江苏常州人，讲师，主要从事光电检测研究. E-mail：mashuguang@163.com

的模式竞争过程进行仿真[9],这里我们利用这一模型对考虑腔内存在前后向 ASE 光情况下的激光器进行优化设计。本模型的特点在于,为了讨论全频谱的增益演变情况,允许所有波长的信号光进入下一轮循环,而并非如常用的建模方法,当某个波长的增益为负时,人为设定该波长光功率为零。在本模型中,当信号光总增益为负时,在循环的过程中会自动损耗直至湮没;而净增益为正的信号光将逐步增大直至稳定。因此,本模型对信号光循环过程的处理很好地与实际情况吻合。

模型的具体仿真过程如下:

1) 首先在抽运光的作用下,铒纤将产生 ASE 信号,此时铒纤无输入信号;

2) 当循环次数 $n=2$ 时,第一步中产生的 ASE 信号经谐振腔返回作为铒纤输入信号;

3) 当循环次数 $n>2$ 时,第 n 步循环中铒纤的信号光由两部分组成,一部分是第 $n-2$ 次循环的信号输出光经 $n-1$ 次循环放大之后而得到,另一部分为第 $n-1$ 次循环过程中产生的 ASE 光,2 部分叠加作为第 n 次循环的信号输入;

4) 在每次循环中,逐个波束比较本次循环与上一次循环得到的输出功率,当各波束输出功率变化量的最大值小于给定的收敛因子时,循环结束。

2　仿真结果与讨论

按照实际所用的 σ 结构激光器设定仿真参数,见图 2。980 nm 抽运源通过波分复用器耦合进环形腔。掺铒光纤吸收 980 nm 抽运光辐射出 1.5 μm 的激光。1.5 μm 的光受环行器的作用只能在环形腔内顺时钟运转。环行器 2 端口串接一个光纤布拉格光栅选出所需的波长。输出耦合器将环形腔内的部分能量向外输出,另一部分能量通过环形腔反馈回铒纤输入端。在仿真时,忽略偏振态、ESA 效应及激光线宽等参量的影响。

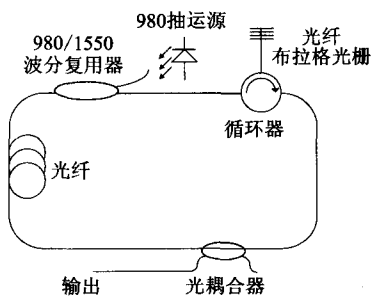

图 2　单波长掺铒环形激光器结构图

Fig. 2　Structure of single - wavelength erbium - doped fiber ring laser

2.1　单波长激光器输出频谱仿真

设置各项仿真参数,并设腔内损耗为 4.7 dB,输出耦合比为 10%。对前向、后向以及双向抽运方式运行下的激光器输出频谱进行了仿真。仿真结果表明:

1) 仿真时考虑和不考虑后向 ASE 光对前向抽运方式下的激光输出功率并无影响。由图 3 可见,2 种方式下激光谱线完全重合;在图 4 中它们的反转粒子数分布几乎相同,只是考虑后向 ASE 时反转粒子数略低。

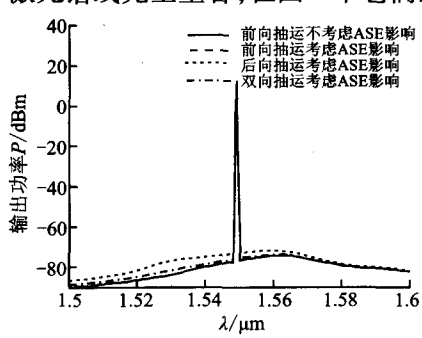

图 3　稳定时激光器输出频谱图

Fig. 3　Laser output spectrum graph in stable condition

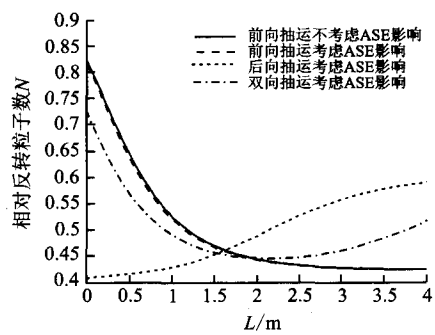

图 4　稳定时相对反转粒子数分布

Fig. 4　Distribution of relative reversal particle number in stable condition

2) 前后向抽运方式对激光输出没有影响。由图 5 可见,它们在所选波长上的功率相等。但是二者 ASE 谱有所差别,后向抽运方式下激光器输出的 ASE 噪声要大于前向抽运方式。产生这种现象的原因是 2 种方式的相对反转粒子数分布不同,见图 6。前向抽运方式反转粒子主要分布在铒纤输入端附近,沿传输方向迅速减少,因此在输入端产生的大量 ASE 光在传输过程中被铒纤吸收;后向抽运方式反转粒子主要分布在铒纤输出端附近,在该位置产生的前向 ASE 光直接输出,而不会被掺铒光纤重新吸收。

3)双向抽运方式的输出功率大于前2种方式,而ASE噪声介于二者之间。主要原因是双向抽运对掺杂离子的利用率最高,反转粒子数水平低于前2种方式,所产生的ASE小于后向抽运而略大于前向抽运

4)由图5、图6可看到激光产生的过程。前向抽运方式与后向抽运方式无太大差别。首先铒纤在抽运光激励下产生在全频谱分布的ASE光,经过选频元件衰减后信号光持续放大,其余波长的光被损耗,最终信号光达到稳定振荡。

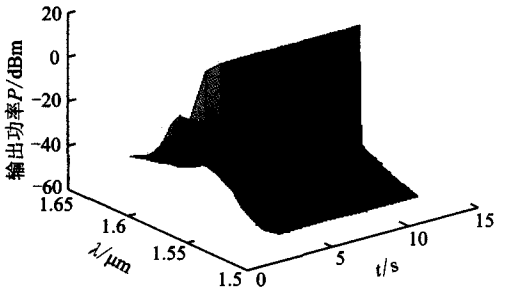

图5 前向抽运激光器输出功率随时间变化

Fig. 5 Forward pumping output power of laser changes with the time

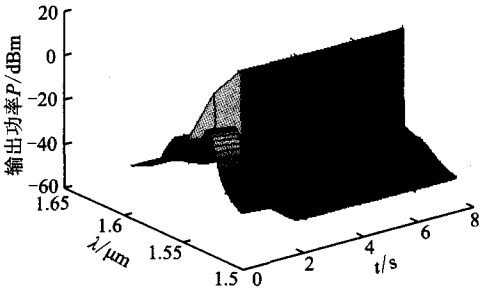

图6 后向抽运激光器输出功率随时间变化

Fig. 6 Backward pumping without power of laser changes with the time

2.2 不考虑ASE光时前向抽运方式输出特性

首先不考虑掺铒光纤中后向ASE传输,对腔内只有与输出激光同向的前向ASE光的情况进行仿真。为讨论铒纤长度及抽运光功率与输出光功率的关系,固定输出耦合比为10%,分别改变铒纤长度与抽运光功率,得到输出功率与二者的关系,如图7所示。随着铒纤长度的增加,斜率效率先迅速增大,然后缓慢减小;抽运阈值也随铒纤长度增加而增大。当不考虑后向ASE光时,只要抽运功率足够大,10 m以内的铒纤长度均能产生激光。由此可以得到随着抽运功率增加,最佳铒纤长度也随之增加。当抽运功率大于40 mW时,最佳长度在3-4 m之间。

2.3 考虑ASE光时前向与后向抽运方式输出特性

前向抽运方式时,考虑后向ASE,结果与不考虑后向ASE的情况有较大差别。在激光起振时,其规律与不考虑后向ASE的结果类似。但是存在一个铒纤截止长度,当铒纤长度大于截止长度时,无论如何增加抽运功率,也不能产生激光振荡。当铒纤长度为6 m时,抽运阈值已经达到40 mW。当铒纤长度大于6 m时,随着长度增加,信号增益不断靠近损耗,却始终不能达到,因此无法产生激光,见图8。

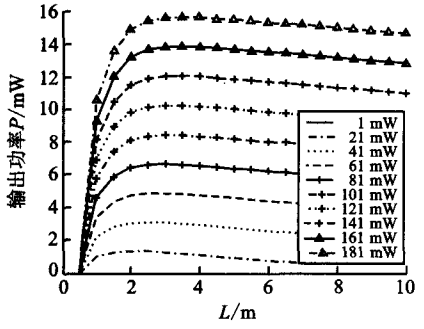

图7 不考虑ASE光时,前向抽运方式不同抽运功率下输出功率随铒纤长度变化

Fig. 7 Without considering ASE, forward pumping output power change with Erbium length in different pumping power

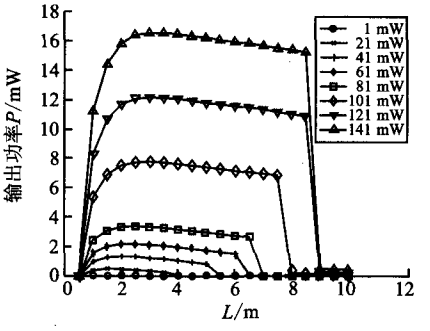

图8 考虑ASE光时,前向抽运方式不同抽运功率下输出功率随铒纤长度变化

Fig. 8 Considering ASE, forward pumping output power change with Erbium length in different pumping power

为避免前向抽运时抽运光与激光一同输出,实际的激光器常采用后向抽运方式,因此对后向抽运方式进行仿真。在仿真时,同时考虑了信号光与双向ASE光的传输,其余条件设置与前向抽运方式相同,结果与考虑后向ASE光时的前向抽运方式类似,也存在掺铒光纤截止长度,见图9。

2.4 仿真与实验数据对比

测量使用的激光器为使用为未抽运掺铒光纤为饱和吸收体的超窄线宽激光器。激光器输出耦合比为50%,FBG中心波长为1 549 nm,掺铒光纤长度为4 m,测得腔内损耗为9.7 dB。

图10为实测斜率效率与本模型仿真结果的对比,仿真中激光器参数与测量所用的激光器相同。模型所得斜率效率与实验值吻合情况相当好,说明本模型能在一定程度上对激光器的性能进行准确仿真。

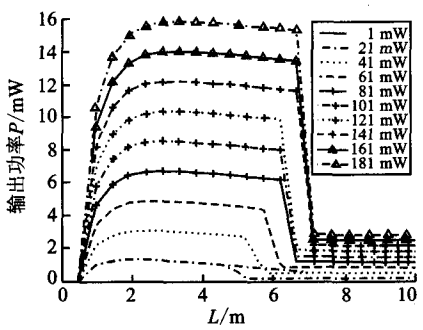

图9 考虑ASE光时,后向抽运方式不同抽运功率下输出功率随铒纤长度变化

Fig. 9 considering ASE, backward pumping: output power change with erbium length in different

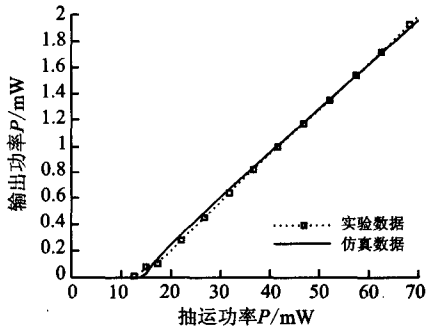

图10 实测斜率效率与仿真对比

Fig. 10 Comparison between measured slope efficiency and simulation

3 结论

本文基于掺铒光纤Giles模型,对各种抽运方式下前向、后向以及双向ASE光对激光器性能的影响进行仿真,所得结果表明:

1)在激光器起振时,是否考虑腔内的前后向ASE光对输出光功率幅值与掺铒光纤增益粒子分布影响不大;

2)无论是前向抽运方式还是后向抽运方式,当仿真中考虑双向ASE光传输时,掺铒光纤存在一个截止长度,当增益光纤长度超过此截止长度时,无论如何提高抽运光功率均无法出射激光。而在前向抽运方式下不考虑后向ASE光时,并无截止现象出现。因此可判断后向ASE光的存在是造成这一现象的原因。

3)实验与仿真结果对比表明,本模型可较准确的仿真激光器的性能,可用于对激光器的设计进行由参数到性能的正向优化。

参考文献

[1] 郭晓东, 乔学光, 贾振安, 等. 掺铒光纤激光器的研究与进展[J]. 激光与光电子学进展, 2003, 40(12): 27-31.
GUO Xiaodong, QIAO Xueguang, JIA Zhen'an, et al. The research and development of Erbium-doped fiber laser[J]. Laser & optronics progress, 2003, 40(12): 27-31. (in Chinese)

[2] 黄志坚, 孙军强, 黄德修. 线形腔掺铒光纤激光器输出特性的理论研究[J]. 光学学报, 1996, 16(12): 1671-1675
HUANG Zhijian, SUN Junqiang, HUANG Dexiu. Output characteristics of linear cavity Erbium-doped fiber[J]. Acta optica sinica, 1996, 16(12): 1671-1675. (in Chinese)

[3] 徐华斌, 陈林. 掺铒光纤激光器输出特性的研究[J]. 光子学报, 2004, 33(7): 777-781.
XU Huabin, CHEN Lin. Studies on the output characteristics of Erbium-doped fiber laser[J]. Acta photonica sinica, 2004, 33(7): 777-781. (in Chinese)

[4] 赵尚弘,占生宝,马志强. 双包层Er^{3+}/Yb^{3+}共掺光纤放大器ASE的动态特性[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2006,7(2):73-77.
ZHAO Shanghong, ZHAN Shengbao, MA Zhiqiang, et al. Dynamic behavior of amplified spontaneous emission in Er^{3+}/Yb^{3+} co-doped double-clad fiber amplifiers[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2006,7(2):73-77. (in Chinese)

[5] 夏江珍,蔡海文,任虹,等. 掺铒光纤环形激光器输出特性的研究[J]. 光学学报, 2003, 23(7): 823 - 827.
XIA Jiangzhen, CAI Haiwen, REN Hong, et al. Study on output characteristics of Erbium - doped fiber ring lasers[J]. Acta optica sinica, 2003, 23(7): 823 - 827. (in Chinese)

[6] Cucinotta A. Modeling of Erbium doped fiber ring laser[J]. Optics communications, 1997, 141(15): 21 - 24.

[7] Selvakennedy S. Design optimisation of Erbium - doped fibre ring laser through numerical simulation[J]. Optics communications, 1999. 170(9): 247 - 253.

[8] Randy Giles C, Desurvire E. Modeling erbium - doped fiber amplifiers[J]. Journal of lightwave technology, 1991, 9(2): 271 - 283.

[9] 徐攀, 胡正良, 马丽娜, 等, 双波长环形腔掺铒光纤激光器建模及模式竞争的仿真[J], 光学学报, 2008, 28(1): 74 - 78.
XU Pan, HU Zhengliang, MA Lina, et al. Modeling of dual - wavelength Erbium - doped fiber ring laser and simulation of mode competition[J]. Acta photonica sinica, 2008, 28(1): 74 - 78. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)

Spectrum Simulation and Design Optimization of Erbium - doped Fiber Ring Laser

MA Shu - guang[1], NI Yan - hui[1], LIU Hai[1], XU Pan[2]
(1. Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China; 2. College of Opt - electronic Science & Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Based on the erbium - doped fiber Giles' model, a numerical model of an erbium - doped fiber ring laser is established and stimulation parameters are set according to the actual used σ structure, which are used to simulate the impacts of forward Amplified Spontaneous Emission (ASE), backward ASE and two - way ASE on the performance of laser, and to obtain the optimum parameters of laser. Stimulation results show that when the laser oscillates, the consideration of the direction of ASE has little influence on the output optical power amplitude or Giles gain particles distribution, while the existence of backward ASE results in the cut - off length of erbium - doped fiber. The comparison between the experiment and the simulation indicates that this model can describe the performance of laser precisely, so that it can be used to optimize the actual laser design.

Key words: laser technology; erbium - doped fiber laser; numerical simulation; amplified spontaneous emission