

单频窄线宽分布布拉格反射光纤激光器研究*

薛亦元 安宏林 傅立斌 林祥芝 刘弘度
(北京大学物理系, 北京 100871)

摘 要 分析了单频窄线宽分布布拉格反射(DBR)光纤激光器的单模工作条件,在此基础上算出单模工作区域,制作了一个单频窄线宽分布布拉格反射光纤激光器。该激光器在波长为 975.5 nm 的半导体激光器抽运下,在 1556.91 nm 波长处,当抽运功率为 55.35 mW 时输出功率可达 1.43 mW,频宽小于 1.2 MHz(受测量仪器分辨率限制)。经测量,该输出激光是稳定的单纵模输出。

关键词 单频, 分布布拉格反射, 光纤激光器。

1 引 言

密集波分复用光纤通信技术中,为了提高码率和充分利用 1.55 μm 波段的带宽,研究波长精确、性能优良的激光源是人们关切的课题。目前光纤通信系统中主要采用半导体激光器作为发射源,其发射过程伴随着有源区内自由载流子的浓度变化导致啁啾效应,不能满足高速率密集波分复用系统的发展要求。近年来,掺铒光纤激光器由于温度稳定性好,不存在啁啾效应,成为高速光通信和光缆电视光传输系统理想光源的候选者之一。光纤激光器的研究可分行波腔结构^[1]和线形腔结构^[2]两类。但是,行波腔光纤激光器由于腔长较长而不易稳定,跳模现象较严重。在线形腔掺铒光纤激光器的研究中,应用紫外激光直写光纤光栅反射器的分布布拉格反射和分布反馈(DFB)结构光纤激光器引起人们极大的兴趣^[3, 4],其特点是激射波长可以精确确定,能够实现稳定的窄线宽单频运作和宽带调谐^[5]。但是,为了满足单频运作的要求,这种激光器腔长较短,因此功率较小,一般约为 100 μW 左右。

本文报道我们研制的分布布拉格反射掺铒光纤激光器。该激光器体积小,结构简单,易与光纤系统接续,有利于实现全光纤通信系统。与行波腔结构激光器^[1]和已有的线形腔激光器^[2, 3]相比,我们研制的光纤激光器具有稳定的单纵模输出和较大的输出功率。

2 单频分布布拉格反射光纤激光器单模工作条件

实验中采用掺铒光纤作为增益介质。利用铒元素相关能级的速率方程得出单频分布布拉格反射光纤激光器单模工作的条件。

* 国家自然科学基金(批准号: 69637050、69777008)资助项目。

收稿日期: 1999-01-11; 收到修改稿日期: 1999-04-05

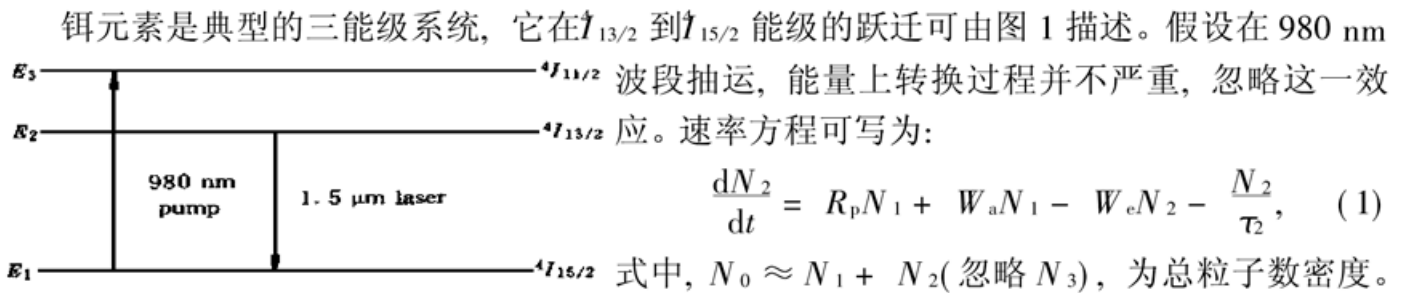


Fig. 1 Simplified energy diagram for erbium

由于铒元素的增益带宽比光纤光栅的反射带宽大得多。因此，可以认为在光栅的反射带宽内铒元素对激光器内各纵模的增益是均匀的，所以模式选择机制只能来自于光纤光栅。光栅的窄带反射特性限制了分布布拉格反射腔中很窄波长范围内行进的光才能得到增益，一旦偏离这个范围，损耗将急剧增加而不能满足激射条件。

根据耦合波理论，在弱波导的情况下，光纤光栅的反射率与波长的关系可以写为：

$$R(\lambda) = \frac{\Omega^2 \sinh^2(SL_g)}{\Delta\beta^2 \sinh^2(SL_g) + S^2 \cosh^2(SL_g)} \quad (\Omega^2 > \Delta\beta^2), \quad (2)$$

式中 λ 为波长， L_g 为光栅长度， Ω 为耦合系数， $\Delta\beta = \beta - (\pi/\Lambda)$ ， β 为本征传播常数。 Λ 为光栅周期， $S = (\Omega^2 - \Delta\beta^2)^{1/2}$ 。

激光的主模将会落在光纤光栅反射带宽的中央即布拉格波长处，其他模式将对称地分布在主模两边。由于上面已提到增益介质对于这些纵模的增益是相同的，且光纤光栅的反射谱是对称的，因此考虑实现单模运作时，只需分析与主模相隔一个纵模间距 $\Delta\beta_0$ 的模式即可。

而 $\Delta\beta_0 = \frac{\pi}{L_c}$ ， L_c 为激光器腔长。当此模式由于损耗大于增益不能激射时，除了主模外的其他纵模由于腔内损耗更大也不能激射，因此就可得出单纵模工作的条件。

令(1)式中 $dN_2/dt = 0$ ，求稳态解。然后经过推导，可以得到分布布拉格反射光纤激光器的单模运作的条件为^[6]

$$\gamma_2 > \frac{1}{3}\alpha_0 + \frac{2}{3}\gamma_1, \quad (3)$$

式中 γ_1 、 γ_2 分别代表“损耗最小”的两个模的损耗， α_0 代表模式增益。在这一条件得到满足后，模式 1 即主模将会工作在稳态，而模式 2 由于损耗大于增益，受到了抑制，于是激光器就处于单模工作状态。

根据(3)式，可以求出分布布拉格反射光纤激光器的单模工作区域，图 2 中的黑色条状区就是根据该条件并结合实验中的参数得出的单模工作区域。其中下边缘代表了激光器的阈值曲线，上边缘代表了单模与多模的区分曲线。经过计算发现，增益系数越大，黑色条状区越宽。因此用增益系数较大的掺铒光纤作为增益介质，可增大激光器的单频工作区域，有利于器件选择。

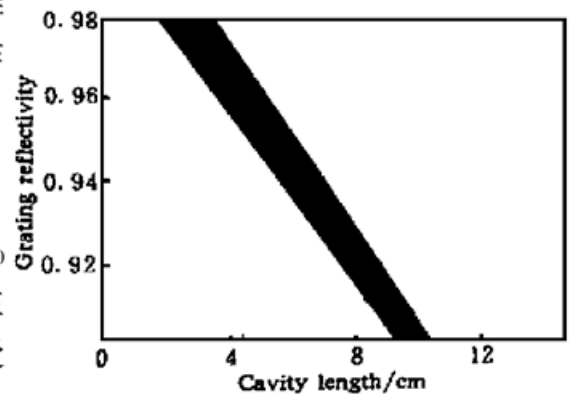


Fig. 2 The single mode operation domain for DBR fiber lasers. (provided that the reflectivities of two fiber gratings in the fiber laser are the same.) The small signal gain coefficient of the Er-doped fiber is $G = 4.7$ dB/m

3 实验与讨论

采用紫外激光直写的方法把光纤光栅制作在经过载氢敏化的 Corning SMF-28 标准通信光纤上, 所用 KrF 准分子激光器波长为 248 nm, 直接写入两个光栅, 它们峰值反射波长一致, 为 1556.91 nm。光栅 1 峰值反射率约为 99.7%, 带宽 0.19 nm; 光栅 2 峰值反射率约为 85.3%, 带宽为 0.10 nm。

根据前面提到的分布布拉格反射光纤激光器单频运作条件及所采用光纤光栅的反射率, 把光纤光栅与一段长度约为 5.3cm 的掺铒光纤(掺杂质量分数为 0.01) 熔接起来, 分布布拉格反射光纤激光器的结构如图 3 所示。抽运源是波长为 975.50 nm 的半导体激光器, 在分布布拉格反射激光器后部加入一隔离器, 以消除光反馈对激光器的影响。

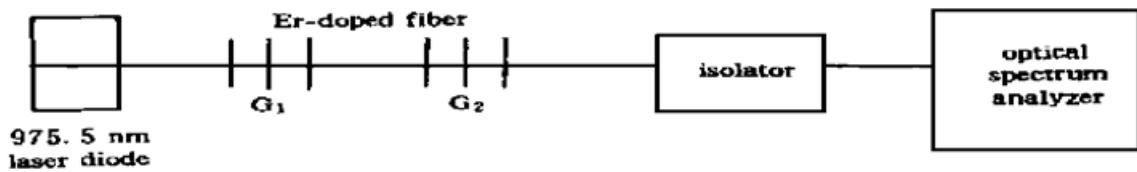


Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup

激光器的输出特性如图 4 所示, 阈值抽运功率为 5.35 mW, 激光器的最大输出功率为 1.43 mW(抽运功率为 55.35 mW 时), 输出光功率相对于有效抽运功率的斜率效率为 2.7%。阈值高是抽运光波长与铒离子 980 nm 的吸收带有偏离, 以及普通光纤与掺铒光纤熔接损耗大等原因造成的。

图 5 展示了激光器输出光谱, 用 ANDO AQ6315A 光谱仪测得, 分辨率为 0.05 nm。激光发射中心波长为 1556.91 nm。

用 Newport 的 Supercavity (model SR-170-OPT, 自由光谱区为 6 GHz, 细度 5000, 频宽分辨率 1.2 MHz) 测量了激光器的纵模工作特性。测量的结果如图 6 所示, 在自由光谱区内没有发现有别的模式存在, 制作的激光器输出激光是严格的单纵模, 其频宽小于 1.2 MHz(受仪器分辨率限制)。

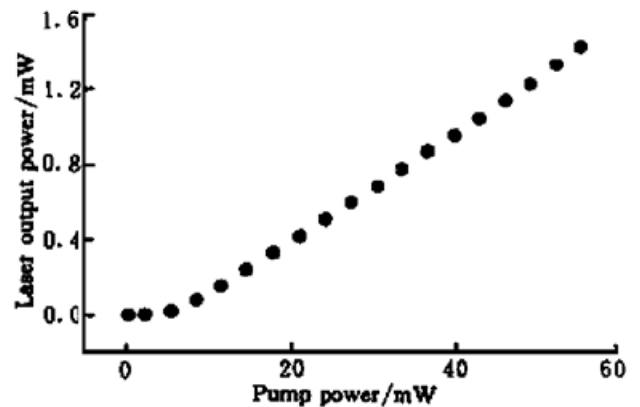


Fig. 4 Laser output as function of pump power

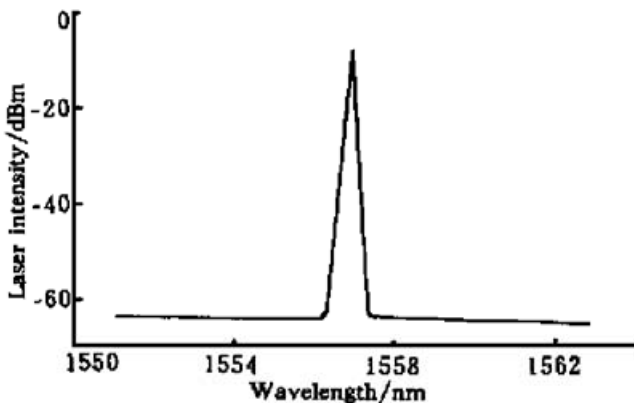


Fig. 5 Fiber laser output spectrum

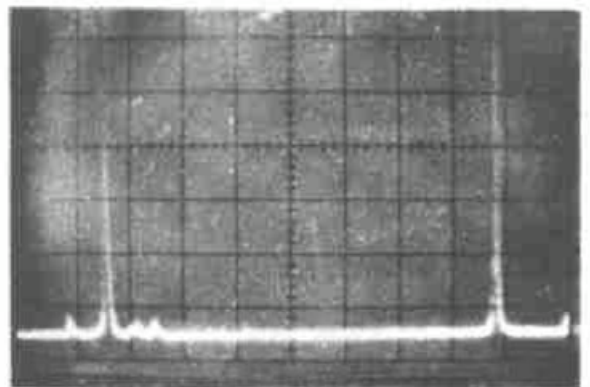


Fig. 6 Diagram of supercavity

结 论 短腔的单频分布布拉格反射光纤激光器有很多优点, 这是因为激光器只有一个模式激光, 激光输出的稳定性就较容易得到保证。本文报道单频窄线宽分布布拉格反射光纤激光器的设计方法, 在此基础上, 得出激光单频工作的最佳腔长, 制成了一个单频窄线宽分布布拉格反射光纤激光器, 其激光波长为 1556.91 nm, 阈值抽运功率为 5.35 mW, 激光器的最大输出功率为 1.43 mW, 斜率效率为 2.7%, 频宽小于 1.2 MHz。

参 考 文 献

- [1] Morkel P R, Cowlte G L, Payne D N. Traveling π -wave erbium fiber ring laser with 60 kHz linewidth. *Electron. Lett.*, 1990, **26**(10) : 632~ 634
- [2] Zyskind J L, Mizrahi V, DiGiovanni D J *et al.*. Short single frequency Er-doped fiber laser. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(15) : 1385~ 1387
- [3] Ball G A, Glenn W H. Continuously tunable single-mode erbium fiber laser. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(6) : 420~ 422
- [4] Storoy H, Sahlgren B, Stubbe R. Single polarisation fiber DFB laser. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(1) : 56~ 58
- [5] Hsu K, Loh W H, Dong Liang *et al.*. Efficient and tunable Er/Yb fiber grating lasers. *J. Lightwave Technology*, 1997, **15**(8) : 1438~ 1441
- [6] Ball G A, Glenn W H. Design of a single-mode linear-cavity erbium fiber laser utilizing Bragg reflectors. *J. Lightwave Technology*, 1992, **10**(10) : 1338~ 1343

Narrow-Linewidth Single-Mode DBR Fiber Lasers

Xue Yiyuan An Honglin Fu Libin Lin Xiangzhi Liu Hongdu

(*Department of Physics, Peking University, Beijing 100871*)

(Received 11 January 1999; revised 5 May 1999)

Abstract A narrow-linewidth single-mode distributed Bragg reflection (DBR) fiber laser is discussed. Through theoretical analysis, the single longitudinal mode operation domain is obtained. Then according to this theoretical result, a single-mode DBR fiber laser is fabricated. This laser is pumped by a semiconductor laser at 975.50 nm and the operating wavelength is 1556.91 nm. Its output power reaches 1.43 mW and the lasing linewidth is less than 1.2 MHz (instrument resolution limited). The measurement shows that the laser operates at single-mode.

Key words single-mode, distributed Bragg reflection, fiber lasers.