

文章编号: 1001-3806(2005)05-0497-04

掺镜双包层光纤激光器多波长输出性能分析

汪帆¹, 潘炜^{1,2*}, 罗斌¹, 熊悦¹, 许江衡¹

(1. 西南交通大学 计算机与通信工程学院, 成都 610031; 2 电子科技大学 宽带光纤传输与通信系统技术国家重点实验室, 成都 610054)

摘要: 从理论上分析了由 F-P 滤波器实现的多波长双包层光纤激光器 (DCFL) 的边界条件和输出功率, 在考虑了 F-P 滤波器中双色镜反射率的波长依赖关系的前提下, 对影响多波长输出功率和消光比的参数如双色镜和光纤出光端面的反射率、抽运功率等进行了研究。结果表明, 光纤出光端面的反射率存在一个最佳值, 再配合适当的双色镜反射率, 能使多波长输出的功率和消光比达到很好的均衡。适当增大抽运功率也能优化多波长输出功率和消光比。通过控制 F-P 滤波器的腔长, 能够调节多波长输出的数目。

关键词: 双包层光纤激光器; 多波长; F-P 滤波器; Yb³⁺ 掺杂

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A

Performance analysis of multiwavelength Yb-doped double-clad fiber lasers

WANG Fan¹, PAN Wei^{1,2}, LUO Bin¹, XIONG Yue¹, XU Jiang-heng¹

(1. Department of Computer and Communication Engineering Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China 2 National Key Laboratory of Broadband Fiber Transmission and Communication Network Technology, University of Electronic Science and Technology, Chengdu 610054, China)

Abstract The performance of multiwavelength Yb-doped double-clad fiber lasers (DCFL) is analyzed based on a Fabry-Perot (F-P) filter and the wavelength dependence of reflectivity of dichroic mirror in the filter has been taken into account. It is found that the reflectivity of DCF facets and dichroic mirror can obviously influence the performance, and there is an optimal value of the reflectivity of DCF facets. Using this optimal value, satisfying output power and extinction ratio can be achieved. And high pump power will improve the output power and extinction-ratio. By controlling the length of F-P filter, the multiwavelength number can be adjusted.

Key words double-cladding fiber lasers; multiwavelength; F-P filter; Yb-doped

引 言

多波长输出的激光源在光通信、光传感及光谱测量中有着广泛的应用, 因此, 一直是人们的研究热点^[1,2]。掺镜双包层光纤激光器是近几年发展起来的新型高功率激光器, 由于它具有发射谱和增益带宽大、转换效率高以及光束质量好等优点, 因此, 适合用作多波长激光输出, 具有潜在的应用价值^[3]。

目前有多种方法可以获得双包层光纤激光器 (double-clad fiber lasers, DCFL) 的多波长输出^[4-6], 利用 F-P 标准具作为梳状滤波器是其中的一种, 即由光纤出光端面和双色镜构成 F-P 腔来选择波长^[4]。在过去的研究中, 为了处理问题方便, 常将双色镜的反射率作为常数对待, 但实际上其反射率是与波长有关的。

所以, 为了更好地描述 DCFL 的多波长输出特性, 有必要考虑双色镜反射率对波长的依赖关系。

本文中分别考虑双色镜的反射谱为洛伦兹型和高斯型, 在这两种情况下分析了 DCFL 多波长输出的特性, 对影响多波长输出功率和信号消光比的几个典型参数, 如光纤出光端面和双色镜的反射率、抽运功率等进行了分析, 并优化了这些参数的取值, 使得 DCFL 多波长输出的功率和消光比得到较好的均衡。

1 理论模型

1.1 F-P 滤波器的等效反射率

图 1 是多波长输出的 DCFL 结构示意图。图中,

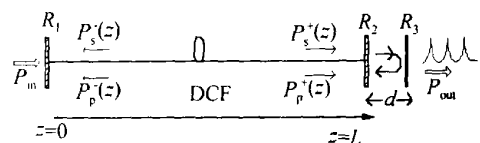


Fig 1 Schematic illustration of multiwavelength double-clad fiber laser. 抽运光从 DCFL 的前端面注入, 信号光通过光纤出光端面与双色镜构成的 F-P 滤波器输出。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10174057)

作者简介: 汪帆 (1982-), 男, 硕士研究生, 主要从事光通信和光器件研究工作。

* 通讯联系人。E-mail: weipan80@sohu.com

收稿日期: 2004-07-20 收到修改稿日期: 2004-08-20

假设 R_1, R_2, R_3 分别为前腔镜、光纤出光端面和双色镜对信号光的反射率。双色镜的反射率 R_3 是与波长(频率)相关的,文中考虑到实际光束的线型,分别令 R_3 为洛伦兹分布和高斯分布,则:

$$R_3(\nu) = \frac{R_0}{1 + 4(\nu - \nu_0)^2 / \Delta\nu^2} \text{ (洛伦兹分布) } \quad (1)$$

或:
 $R_3(\nu) = R_0 \exp[-2 \ln 2 (\nu - \nu_0)^2 / \Delta\nu^2]$ (高斯分布) (2)

式中, R_0 是常数, $\nu = c/\lambda$ 是激光频率, c 是光速, λ 是激光波长, ν_0 是反射谱的中心频率, $\Delta\nu = c\Delta\lambda/\lambda_0^2$ 是双色镜的反射带宽。

DCFL 产生的激光是垂直进入由光纤出光端面和双色镜构成的 F-P 腔滤波器的,根据多波束干涉理论,滤波器的等效反射率为^[7]:

$$\frac{N_2(z)}{N} = \frac{\frac{[P_p^+(z) + P_p^-(z)] \sigma_{ap} \Gamma_p}{h\nu_p A} + \frac{[P_s^+(z) + P_s^-(z)] \sigma_{as} \Gamma_s}{h\nu_s A}}{\frac{[P_p^+(z) + P_p^-(z)] (\sigma_{ap} + \sigma_{ep}) \Gamma_p}{h\nu_p A} + \frac{1}{\tau} + \frac{[P_s^+(z) + P_s^-(z)] (\sigma_{es} + \sigma_{as}) \Gamma_s}{h\nu_s A}} \quad (5)$$

$$\pm \frac{dP_p^\pm(z)}{dz} = -\Gamma_p [\sigma_{ap} N - (\sigma_{ap} + \sigma_{ep}) N_2(z)] P_p^\pm(z) - \alpha_p P_p^\pm(z) \quad (6)$$

$$\pm \frac{dP_s^\pm(z)}{dz} = \Gamma_s [(\sigma_{es} + \sigma_{as}) N_2(z) - \sigma_{as} N] P_s^\pm(z) - \alpha_s P_s^\pm(z) \quad (7)$$

方程中“ \pm ”表示沿光纤正、反向传播。 h 是普朗克常量, ν_p, ν_s 是抽运光和信号光的频率, A 是纤芯的截面积, N 是总的纤芯掺杂浓度, τ 是增益介质的荧光寿命, $\sigma_{es}, \sigma_{as}, \sigma_{ep}, \sigma_{ap}$ 分别是信号光和抽运光的发射截面和吸收截面, Γ_p 和 Γ_s 是功率填充因子, α_p 和 α_s 是抽运光和信号光的散射损耗系数。

图 1 所示的 DCFL 中的信号光满足下列边界条件:

$$P_s^+(0) = R_1 P_s^-(0) \quad (8)$$

$$P_s^-(L) = R_3 P_s^+(L) \quad (9)$$

所不同的是,不同的波长具有不同的等效反射率,边界条件也不尽相同,这就使得满足干涉极大条件的光波能够以较高的功率输出,其它波长的信号光的输出功率则要低一些,从而产生多波长输出。

通过解该速率方程组,并结合边界条件(8)式和(9)式,可以得到 DCF 中传播的正、反向信号光功率 $P_s^\pm(z)$,当然 $P_s^\pm(z)$ 也是与波长有关的。不难得到 DCFL 的与波长相关的输出功率为:

$$P_{out}(\lambda) = (1 - R_{eff}) P_s^+(L) \quad (10)$$

2 模拟计算

基于上述模型,对该 DCFL 的多波长输出特性进行了模拟计算。计算中所用的 F-P 腔掺 Yb 双层光纤激光器的参量为^[6]: $\lambda_s = 1090\text{nm}$, $\lambda_p = 920\text{nm}$, $\sigma_{ap} = 6 \times 10^{-21} \text{cm}^2$, $\sigma_{ep} = 2.5 \times 10^{-23} \text{cm}^2$, $\sigma_{es} = 2 \times 10^{-21} \text{cm}^2$,

$$R_{eff}(\nu) =$$

$$1 - \frac{(1 - R_2)(1 - R_3)}{(1 - \sqrt{R_2 R_3})^2 + 4 \sqrt{R_2 R_3} \sin^2(2\pi nd/\lambda)} \quad (3)$$

式中, n 是 F-P 滤波器腔内介质的折射率, d 是滤波器腔长。

在 DCFL 末端加上一个 F-P 滤波器后,DCFL 输出的连续宽带光谱将被分割成一系列分立的窄带光谱。不难得到各个分立谱之间的距离为:

$$\Delta\lambda_m = \lambda^2/2d \quad (4)$$

1.2 DCFL 多波长输出功率

在强抽运情况下,可忽略自发辐射的影响,连续波抽运双层光纤激光器与时间无关的稳态速率方程组为^[8,9]:

激光技术编辑部

$\sigma_{as} = 1.4 \times 10^{-23} \text{cm}^2$, $\Gamma_p = 0.0012$, $\Gamma_s = 0.82$, $A = 5 \times 10^{-7} \text{cm}^2$, $N = 4 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$, $\alpha_p = 3 \times 10^{-5} \text{cm}^{-1}$, $\alpha_s = 5 \times 10^{-5} \text{cm}^{-1}$, $\tau = 1\text{ms}$, $L = 50\text{m}$, $R_1 = 0.98$, $\Delta\lambda = 30\text{nm}$.

图 2 是双色镜反射率的线型分别为洛伦兹和高斯

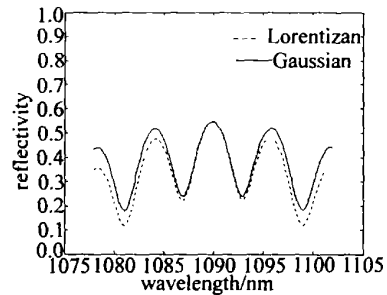


Fig 2 Reflection spectrum of F-P filter with different shape of R_3

型时, F-P 腔滤波器等效反射率 R_{eff} 的形状,可看出前者的反射率略高于后者。由于 R_3 与波长相关,因此 R_{eff} 在不同的波长处有不同的值,它以 1090nm 为中心,向两边对称分布。图中 R_{eff} 在 25nm 范围内有 4 个极小值,从(10)式可以看出,在这些波长处的激光将获得比较高的输出功率,从而形成输出功率峰。

图 3 是双色镜反射率 R_3 取不同线型时 DCFL 的多波长输出功率。图中,共存在 4 个输出功率峰,它们之间的间隔约为 6nm,并且 R_3 为高斯分布时的输出功率要略小于 R_3 为洛伦兹分布时。这个结果与 R_{eff} 的形状是相符的。由于实际的掺镱光纤属于非均匀展宽,

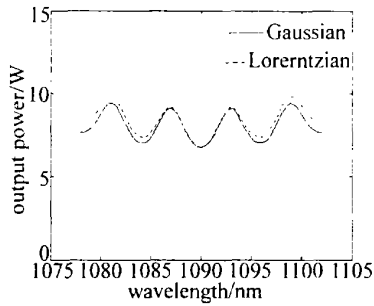


Fig 3 Output power of multiwavelength DCFL with different shape of R_3

它的输出光谱符合高斯分布,因此, R_3 采用高斯型要更恰当一些,后面的分析中 R_3 均采用高斯型分布。

要引起注意的是, DCFL 的前端面实际上也是一个双色镜,它对抽运光高透,对信号光高反,因此它的反射率 R_1 也与波长有关。假设 R_1 分别为常数和高斯函数,则多波长输出功率见图 4 显然前者的输出功率峰值略高于后者,两者差值较小。这个结果说明,在实际应用中可以假设 R_1 是与波长无关的常数,这并不会对性能有太大影响。

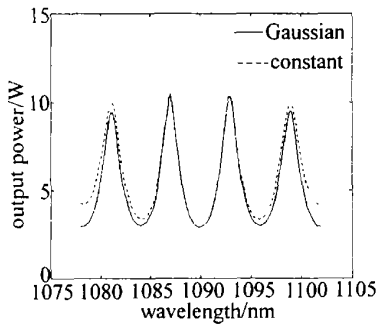


Fig 4 Output power of multiwavelength DCFL with different shape of R_1

输出功率和消光比是多波长激光器的两个重要性能指标,它们会直接影响到接收端的复杂程度和精度等。DCFL 多波长输出的性能,在很大程度上受双色镜和光纤出光端面反射率的影响。图 5 是光纤出光端

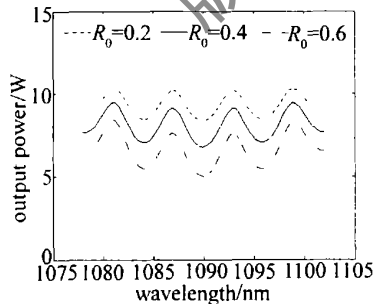


Fig 5 Output power of multiwavelength DCFL with different R_3

面的反射率 $R_2 = 0.04$ 时,双色镜反射率 R_3 与 DCFL 多波长输出功率的关系。图中, R_3 越高,输出功率越低,但是消光比能得到一定的提高。可以发现,如果仅仅调节 R_3 ,很难得到满意的多波长输出性能。

事实上,可以通过镀膜等方法改变光纤出光端面的反射率,从而提高输出性能。图 6 是 R_2 取不同值时

的输出功率。如图所示, R_2 从 0.2 升高到 0.5 时,峰值功率无明显变化,但消光比改善了很多。 R_2 上升到 0.9 后,发现峰值功率有了大幅度的下降。因此,从输出性能上考虑,应当选择一个合适的 R_2 ,使得峰值输出功率和消光比达到均衡。

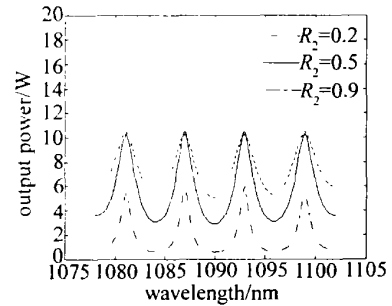


Fig 6 Output power of multiwavelength DCFL with different R_2

图 7 是峰值输出功率与光纤出光端面反射率 R_2 的关系。从图中看出, R_2 存在一个最佳值,在该点处

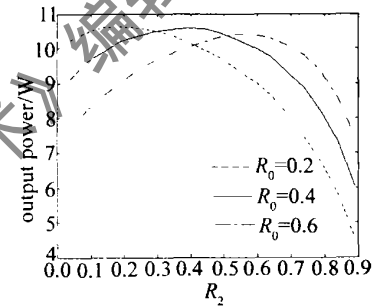


Fig 7 Peak of output power of multiwavelength DCFL as a function of R_2

对应的峰值输出功率最大,而且这个最佳值会随着双色镜反射率 R_3 的增大而增大。因此,可以利用该特性来优化 DCFL 多波长输出的性能,即将 R_2 的值取在该最佳值附近,以获得高峰值功率。结合文中考虑的情况,从图 5 和图 6 可以看出, R_2 取 0.5 是一个比较合适的值,此时的输出功率大,消光比也较高。

影响信号输出功率和消光比的,还有其它一些因素,抽运功率就是其中之一。抽运功率的变化会影响激光器的输出线宽,但是变化值很小,因此可以忽略线宽的变化^[10]。图 8 表示的是在不同的抽运功率下

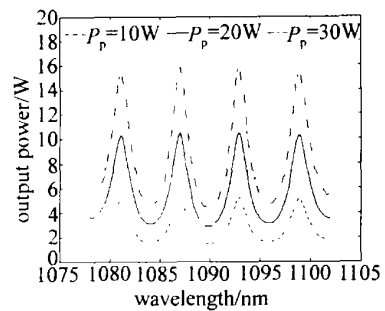


Fig 8 Output power of multiwavelength DCFL with different pump power

DCFL 的多波长输出功率。从图中可以发现,随着抽运功率的增大,峰值输出功率变大,消光比也明显升

高。因此,在实际应用中,适当地提高抽运功率有助于改善 DCFL 多波长输出的性能。

输出的多波长数目可以通过 F-P 滤波器的长度 d 来调节,以适应不同的应用。图 9 表示的是 DCFL 多

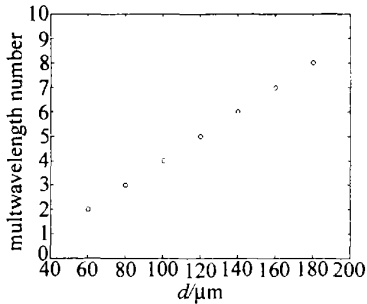


Fig 9 Number of multiwavelength as a function of d

波长输出的数目与 d 的关系。从图中可看到,在 F-P 腔的长度小于 $40\mu\text{m}$ 时,滤波器的选频特性较差,无法形成明显的输出峰。随着腔长度的增加,开始出现输出峰,并且输出峰的数目和长度 d 成近似的线性关系。输出峰的数目也不能无限制地增加,因为输出峰数目的增加会使得自由谱域值减小,对接收端的要求会变得很高。

3 结 论

在考虑反射率的波长依赖性前提下,对基于 F-P 滤波器的多波长掺镜 DCFL 进行了理论研究,得到了

与参考文献 [4] 相吻合的结果。结果表明,可以通过调节光纤出光端面和双色镜的反射率来优化 DCFL 多波长输出的性能。光纤出光端面的反射率存在一个最佳值,再配以合适的双色镜反射率,就可获得满意的输出功率和消光比。适当增大抽运功率也能改善输出功率和消光比。另外,通过控制 F-P 滤波器的腔长,能够调节多波长输出的数目。

参 考 文 献

- [1] 迟荣华,吕可诚,陈胜平 *et al*. 单一偏振的多波长环形腔掺镜光纤激光器 [J]. 中国激光, 2003, 30(12): 1061~1064
- [2] 杨先波,刘德明,黄德修. 光纤喇曼激光器及多波长输出的分析 [J]. 激光技术, 2003, 27(5): 409~414.
- [3] ZENTENO L. High-power double-clad fiber lasers [J]. IEEE J Light wave Technol 1993, 11(9): 1435~1446
- [4] 项阳,许兆文,宁鼎 *et al*. 掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器的多波长输出 [J]. 中国激光, 2004, 31(3): 403~406
- [5] 孙军强,刘德明,黄德修 *et al*. 窄线宽多波长掺铒光纤激光器 [J]. 中国激光, 2000, 27(9): 773~776.
- [6] LOVSETH S W, SPEKANOVA D Y. Analysis of multiple wavelength DFB fiber lasers [J]. IEEE J Q E, 2001, 37(6): 770~780
- [7] 徐建华,张位在,干福熹. 法布里珀罗干涉仪外腔半导体激光器的选模和锁模特性研究 [J]. 中国激光, 1995, 22(2): 85~90
- [8] HARDY A, ORON R. Signal amplification in strong pumped amplifiers [J]. IEEE J Q E, 1997, 33(3): 307~313
- [9] KILSON I, HARDY A A. Strongly pumped fiber lasers [J]. IEEE J Q E, 1998, 34(9): 1570~1576.
- [10] 聂秋华. 光纤激光器和放大器技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1997. 305~313

(上接第 496 页)

种新兴的非声制导技术。激光对舰船尾流中不易消溶和扩散的微气泡非常敏感,当激光在尾流区域内、外传输时,其前向或后向散射光光强在时域、频域和空域中的光学特性都极为不同,可通过比较散射激光光学参数的变化来快速、准确地判别鱼雷是否进入或穿出尾流并引导鱼雷沿目标舰船的航迹靠近目标。在目标消声性能和对抗技术及诱饵技术不断进步的今天,激光尾流制导鱼雷必然会成为现代鱼雷的一个发展方向。特别是上视激光尾流制导鱼雷与前向散射激光尾流制导鱼雷相比,又具有航程短、航行深度较深、隐蔽性好、可靠性高等优点,因而具有更加美好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 李溢池,王树宗. 现代鱼雷——水下导弹 [M]. 北京: 海洋出版社, 1995. 107~109

- [2] 冀邦杰,周德善,张建新. 基于舰船尾流光效应的制导鱼雷 [J]. 鱼雷技术, 2000, 31(3): 40~43.
- [3] 周德善. 舰船气泡尾流几个特征参数的研究 [R]. 西安: 西安 705 研究所, 2001. 140~152
- [4] CARRICA P M, BONETTO F J, DREW D A. The interaction of background ocean air bubbles with a surface ship [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids 1998, 28(5): 571~600.
- [5] 蔡平,朱代柱,惠俊英. 水面船尾流的声散射实验研究 [J]. 声学学报, 2000, 25(1): 10~15.
- [6] ZHANG X D, LEW F M, JOHNSON R. Influence of bubbles on scattering of light in the ocean [J]. Appl Opt 1998, 37(27): 6525~6536
- [7] 张建新. 尾流的光学特性研究与测量 [D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2001. 99~101
- [8] 张建新,刘健康,冀邦杰. 激光通过实验室模拟尾流的衰减特性 [J]. 西安工业学院学报, 2001, 21(6): 283~287.
- [9] 刘继芳,刘海洋,冀邦杰. 气泡光散射谱强度分布研究 [J]. 鱼雷技术, 2003, 42(2): 17~19.