

# 基于级联光纤 Bragg 光栅的外腔半导体激光器三波长同时激射\*

马 军 山

(上海理工大学 光学与电子信息工程学院, 上海 200093)

**摘 要:**实现了使用 3 个级联的光纤 Bragg 光栅外腔半导体激光器 3 波长同时激射. 3 条谱线的峰值波长取决于光纤 Bragg 光栅的峰值反射波长, 分别为 1 531.5 nm、1 549.4 nm 与 1 554.8 nm. 注入电流为 52 mA 时, 激光器总输出功率为 1 mW. 该激光器的主要优点包括, 由于输出波长被锁定在光纤 Bragg 光栅的 Bragg 波长上, 因此输出波长稳定, 谱线窄, 成本低. 可应用于多波长干涉测量以及全光通信等领域中.

**关键词:**外腔激光器; 光纤光栅; 多波长激射

**中图分类号:** TN248

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2008)07-1305-4

## 0 引言

多波长激光器在精密测量及光纤通信领域中具有重要应用. 例如, 在多波长干涉测量技术中, 就需要使用两个或两个以上波长光束, 以克服单波长干涉法测量台阶轮廓时存在的模糊性问题<sup>[1-2]</sup>. 在未来的全光通信网络中, 这种可同时产生多波长的光源也具有广阔的应用前景, 如在基于半导体光放大器交叉增益调制效应的波长转换器中<sup>[3]</sup>, 作为探测光注入到转换器件中, 可以将信号同时转换到几个不同的波长上.

目前, 以掺铒光纤为增益介质的多波长光纤激光器已成为国内外研究热点之一. 由于增益谱较宽, 稀土掺杂离子寿命比较长, 以及与光纤有天然的兼容性, 掺铒光纤(EDF)比较适合制作多波长激光器. 国际上已经提出多种方案, 并取得了重要进展<sup>[4-8]</sup>. 我国学者在这方面也进行了卓有成效的工作<sup>[9-13]</sup>. 光纤多波长激光器的优点是输出功率高, 有望在光谱分析及光纤通信中获得应用. 但由于掺铒光纤增益介质较强的均匀加宽特性, 要实现多波长同时输出必须要采取一些相应的措施, 另一方面, 光纤激光器相对比较昂贵, 在一定程度上限制了其应用范围. 因此, 探讨基于其它增益介质的多波长激光器具有重要的意义.

以半导体增益介质为基础的多波长激光器是一个新的研究方向, 器件采用电抽运, 结构简单, 成本低, 特别适合对输出功率要求不高的场合. Peter de Groot 早在 1993 年就提出过短外腔结构的多模半

导体激光器, 器件可以产生两个主模, 但边模抑制比小于 20 dB<sup>[14]</sup>. 近年来光纤光栅外腔半导体激光器受到瞩目, 它具有输出波长稳定、谱线窄、通过光纤光栅可以准确控制激光波长, 以及成本低等一系列优点<sup>[15]</sup>. 本文提出了使用 3 个级联光纤 Bragg 光栅作为外腔的半导体激光器 3 波长同时激射方案, 可在 3 个 Bragg 波长处同时获得窄线宽的激光输出.

## 1 器件结构与工作原理

图 1 为 3 波长工作的光纤光栅外腔半导体激光器的结构. 器件由 1.55 μm 波段 F-P 腔半导体激光器管芯与 3 个级联的光纤 Bragg 光栅耦合构成. 半导体激光器与光纤光栅耦合一侧的腔面经过光学增透处理, 剩余反射率约为  $4 \times 10^{-4}$ . 后两个光栅通过活动连接器连接, 存在 25% 的连接损耗. 光栅等间隔分布, 三个外腔长度分别为 5 cm, 10 cm, 15 cm.

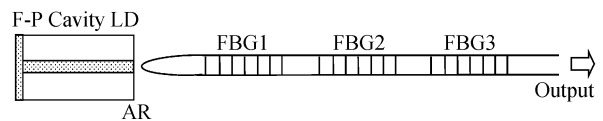


图 1 基于级联光纤光栅的外腔半导体激光器  
Fig. 1 Schematic diagram of the external cavity laser diode based on cascaded fiber Bragg gratings

对于 3 波长工作的半导体激光器, 有源层中载流子密度  $N$  与光腔中光子密度  $P_m$  的速率方程为

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{J}{ed} - \frac{N}{\tau_s} - \sum_{m=1}^3 v a_{\lambda_m} (N - N_t) P_m \quad (1)$$

$$\frac{\partial P_m}{\partial t} = v \Gamma a_{\lambda_m} (N - N_t) P_m + \frac{\Gamma \beta N}{\tau_s} - \frac{P_m}{\tau_{pm}} \quad (2)$$

式中:  $m$  为波长标记,  $m=1, 2, 3$ ,  $J$  为注入电流密度,  $d$  为增益区的厚度,  $\tau_s$  为载流子寿命,  $N_t$  为透明载流子密度,  $\Gamma$  为限制因子,  $\tau_{pm}$  为光腔中光子寿命,  $v$  为介质中光速,  $\beta$  为进入激光模式的自发辐射分

\*上海市重点学科发展基金(T0501)资助

Tel: 021-55270283 Email: junshanma@163.com

收稿日期: 2006-08-22

量,  $a_{\lambda_m}$  为波长  $\lambda_m$  处的增益系数, 可以表示为

$$a_{\lambda_m} = \frac{a}{1 + (\lambda_m - \lambda_p)^2 / \Delta\lambda^2} \quad (3)$$

式中:  $\lambda_p$  为增益峰值波长,  $\Delta\lambda$  为 3 dB 增益谱宽,  $a$  为  $\lambda_p$  处增益系数.

由于在 3 个光纤光栅的峰值反射波长处, 辐射光能被高效反馈回半导体激活介质中, 半导体管芯未增透的一端与 3 个光纤光栅可分别构成光学谐振腔. 因此, 只要这 3 个波长处于激活介质的增益谱范围内, 就可能在这 3 个波长处同时形成激光振荡, 并且通过优化光纤光栅的峰值反射率及外腔长度, 可以得到最佳的光子寿命  $\tau_{pm}$ , 使得 3 个波长的输出功率在某一注入电流下达到均衡, 即有  $p_1 = p_2 = p_3 \neq 0$ . 光纤光栅具有很窄的线宽, 可以自由选择峰值反射波长, 来满足使用要求, 这是本器件的一个突出的优点.

需要指出的是, 由于半导体管芯靠近光栅的端面剩余反射率仅有  $4 \times 10^{-4}$ , 所以可以忽略管芯 F-P 腔的影响, 认为激光器谐振腔是由半导体管芯未增透的一端与光纤光栅构成的. 而在本方案中, 最短的谐振腔长度也有 5 cm, 所对应的 F-P 腔模间隔远远小于光纤光栅的反射谱线宽, 因此, 在每一输出谱线内都包含了大量的纵模, 并不是严格意义的单纵模输出.

## 2 实验结果及分析

### 2.1 光栅反射谱与器件增益谱测量

要实现 3 波长同时激光, 首先应使 3 个光纤光栅的峰值反射波长位于半导体器件的增益谱范围内, 并且具有合适的反射率. 因此, 首先对光纤光栅的反射谱和半导体器件的增益谱进行测量. 光纤光栅为采用 193 nm ArF 准分子激光器与相位掩模板技术制备的光纤 Bragg 光栅, 制备前对光纤进行了载氢敏化处理. 使用安立公司的 MS9710B 型光纤光谱分析仪对三根光纤光栅进行测量, FBG1 的峰值波长为 1531.5 nm, 峰值反射率为 50%, FBG2 的峰值波长为 1549.4 nm, 峰值反射率为 78%, FBG3 的峰值波长为 1554.8 nm, 峰值反射率为 90%. 由于 FBG2 与 FBG3 存在 25% 的连接损耗, 所以第二个与第三个外腔均存在一定的腔内损耗, FBG2 的反射率可等效为  $0.78 \times 0.75^2 = 0.44$ , FBG3 的反射率等效为  $0.9 \times 0.75^4 = 0.28$ . 如果使用光纤熔接机对光纤进行熔接, 则可以大大减小连接损耗, 几乎无腔内损耗. 对光纤光栅前端的光纤端面进行了球形处理, 激光器管芯与光纤的耦合效率约 10%.

图 2 为激光器管芯增透处理前的直流驱动时的

光谱, 可以看出激光器呈多纵模工作模式, 其阈值电流为 30 mA.

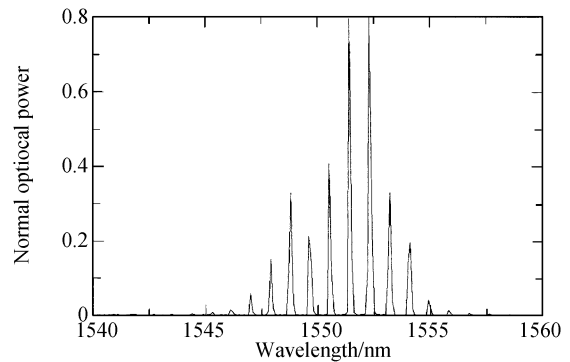


图 2 激光器管芯增透处理前的光谱

Fig. 2 The spectrum of the laser diode chip without coating

使用常规电子束镀膜机, 对激光器管芯前端面蒸镀  $ZrO_2$  进行增透处理, 图 3 为测量得到的激光器增透以后的辐射谱. 随着注入电流的增大, 器件的增益峰值波长将发生蓝移, 注入电流由 16 mA 增大到 58 mA, 峰值波长由 1569 nm 移动到 1527 nm, 但 3 个光纤光栅的峰值反射波长始终位于增益谱范围内. 增益谱峰值偏移是由于随着注入电流的增大, 载流子密度将提高, 器件的增益峰值波长向短波长移动, 其关系可表示为

$$\lambda_p = \lambda_0 - k_0(N - N_0) \quad (4)$$

式中:  $\lambda_0$  为透明时的峰值波长,  $k_0$  为经验值.

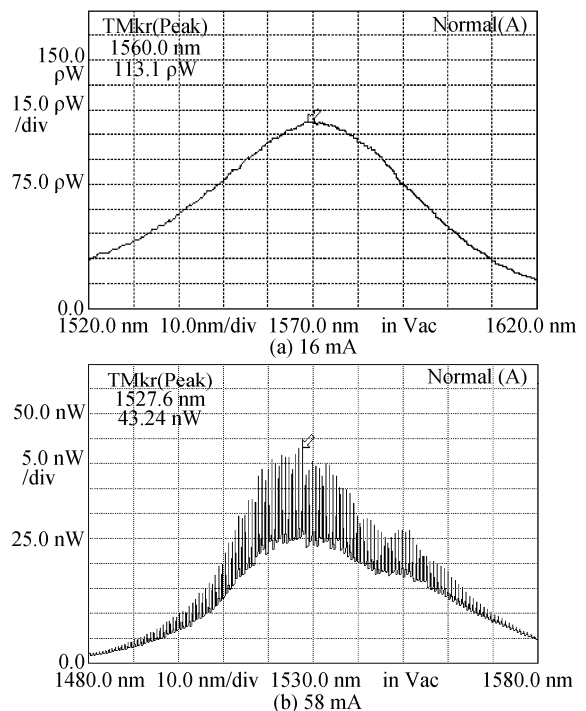


图 3 激光器管芯增透后在不同注入电流下的辐射谱

Fig. 3 The fluorescence spectrum of the laser diode chip AR coated with different injection current

另外, 随着注入电流的增大, 辐射谱逐渐变窄, 同时有腔模出现, 这是增透不够理想所致, 会导致外腔激光器出现边模. 可见, 在器件的设计中要考虑增

益峰随注入电流的变化影响。

## 2.2 实验与分析

本工作是在双波长同时激励的基础上进行的。首先将FBG1与FBG2连接到外腔中,调节激光器注入电流为47 mA时,在1 531.4 nm与1 549.4 nm处,已经实现双波长同时激励,如图4(a),1 549.4 nm输出功率较在1 531.4 nm波长处高。然后保持注入电流不变,将FBG3接入到外腔中,此时在1 554.8 nm处未见振荡出现,继续加大注入电流为50 mA,仍未激励,输出光谱如图4(b)。这是由于在1 531.4 nm与1 549.4 nm处已经建立起稳定的状态,占据主导地位,由于模式竞争的作用,在1 554.8 nm处已不可能达到阈值条件。将注入电流调到阈值以下,重新启动激光器,注入电流仍为50 mA,此时3个波长由于是同时参与模式竞争,对于前面所给出的激光器动力学方程式(1)与(2),3个波长模式具有相同的初始条件,功率将在3个波长处重新进行分配,结果均达到了阈值条件,实现了3波长同时激励。1 554.8 nm处功率相对较低,如图5(a)。将注入电流增加到52 mA时,1 549.4 nm处与1 554.8 nm处功率均有所提高,而1 531.4 nm处功率略有降低,输出光谱如图5(b),用光功率计测得激光器总的输出功率为1 mW。虽然注入电流增加,增益谱峰值向短波长方向移动,1 531.4 nm处功率应提高,但增益饱和作用也是不可忽略的,尤其是在存在3条谱线的情况下,结果就更复杂了。改变激光器注入

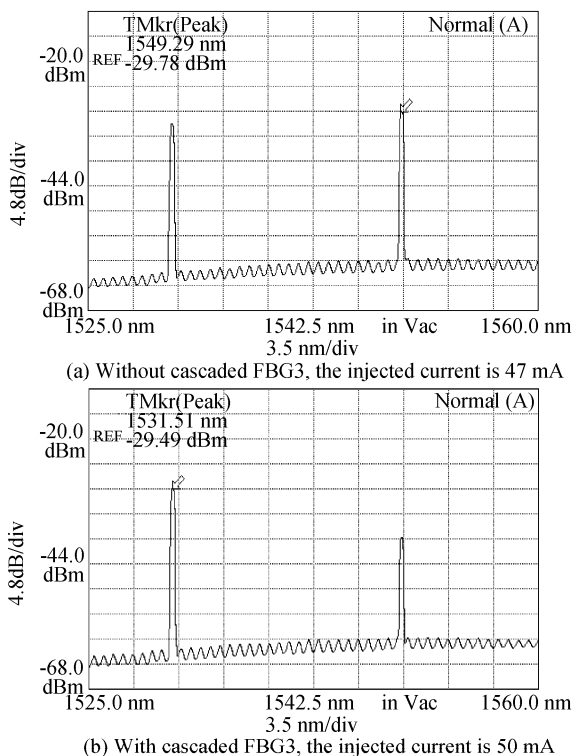


图4 双波长振荡谱

Fig. 4 Dual-mode spectra of the external cavity laser diode

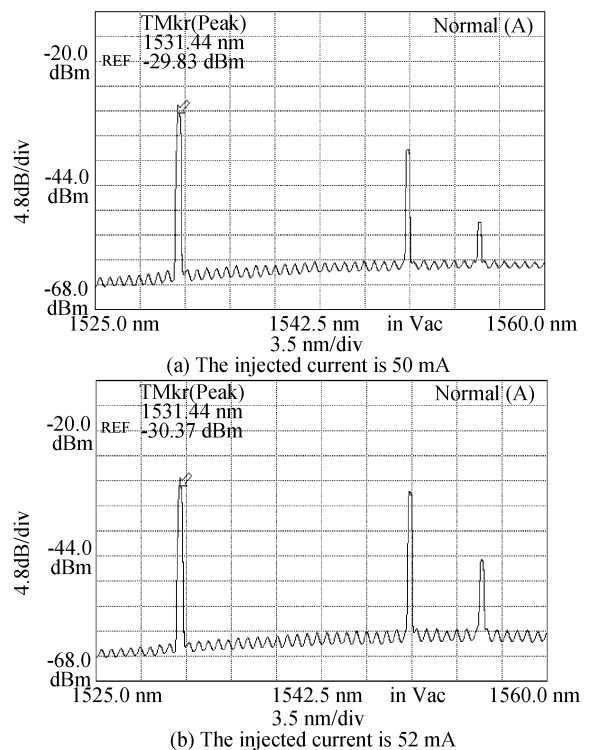


图5 不同注入电流下的3波长振荡谱

Fig. 5 Three-wavelength lasing spectra with different injection current

电流,由于各波长被锁定在所对应的光纤光栅的Bragg波长上,因此并没有产生变化,这是这种器件的优点之一。三波长工作时,器件的阈值电流为45 mA,比原管芯要高,这是由于耦合、连接损耗,以及三波长同时激励引起的。

由于半导体器件透侧还存在一定的剩余反射率,所以还有功率很低的半导体有源腔内腔模存在。但在注入电流为52 mA时,1 531.4 nm与1 549.4 nm处的边模抑制比已高达27 dB,1 554.8 nm处较低,仅为15 dB。这主要是由于FBG3存在6 dB的腔内损耗,等效反射率较低,因此输出功率低。另一方面,还需要考虑另一个参量-腔长,由于腔长相差很大(分别为10 cm与15 cm),这样在相同时间内,1 554.8 nm波长处的光子往返增益介质的次数就比1 549.4 nm的要少,所获得的增益就低,所以输出功率也相应较低。通过减小FBG3前端光纤的长度,或对FBG3用熔接机熔接以减小腔内损耗,都可以使1 554.8 nm波长处功率提高,达到3波长的等功率输出,1 554.8 nm波长处边模抑制比也会提高。

## 3 结论

使用3个级联的光纤Bragg光栅作为半导体激光器的外腔,成功实现了3波长同时激励。本文只是对光纤光栅外腔半导体激光器的3波长工作进行了演示实验,波长间隔比较大,尚未实现等功率输出。

但是,通过对不同位置上的光纤 Bragg 光栅反射率的优化设计,可以实现多波长激光的等功率输出. 使用取样光纤 Bragg 光栅,虽然比较容易获得多波长激光的等功率输出,但在波长数量、各波长数值的控制上,却是比较难以实现的.

**致谢:**上海光机所信息光学实验室光纤光栅研究小组为本实验提供了光纤光栅,在此表示感谢.

#### 参考文献

- [1] de PETER G. Three color laser diode interferometer[J]. *Appl Opt*, 1991, **30**(25):3612-3616.
- [2] MASAOKI A, YOUICHI K, Matsumoto, *et al.* Shape Measurement of rough step like surface using a laser Diode-the method with Three-wavelength phase shifting[J]. *J of Japan Society for Precision Engineering*, 1999, **65**(3):418-422.
- [3] TERJI D, BENNY M, CARSTEN J, *et al.* All-optical wavelength conversion by semiconductor optical amplifiers[J]. *J Lighwave Technology*, 1996, **14**(6):942-954.
- [4] BATTIATO J M, MORSE T F, KOSTUK R K. Dual-wavelength common-cavity codoped fiber laser [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett*, 1997, **9**(7):913-915.
- [5] CHOW J, TOWN G, EGGLETON B, *et al.* Multiwavelength generation in an erbium-doped fiber laser using in-fiber comb filters[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett*, 1996, **8**(1):60-62.
- [6] PARK N, WY SOCKI P F. 24-line Multiwavelength operation of erbium-doped fiber - ring laser[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett*, 1996, **8**(11):1459-1461.
- [7] LI S, CHAN K T. Electrical wavelength tunable and Multiwavelength actively mode-locked fiber ring laser [J]. *Appl Phys Lett*, 1998, **72**(16):1954-1956.
- [8] SHINJI Y, COWLE G J. Bidirectional 10-GHz optical comb generation with an intracavity fiber DFB pumped Brillouin/erbium fiber laser[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett*, 1998, **10**(6):796-798.
- [9] ZHAO Dong-hui, LIU Yun-qi, DONG Xiao-yi, *et al.* Multiwavelength fiber ring laser utilizing cooled erbium doped fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(2):201-203.  
赵东晖,刘云启,董孝义,等.利用冷却法得到多波长输出的光纤环形激光器[J]. *光学学报*, 2000, **20**(2):201-203.
- [10] ZHANG Jin-song, LI Tang-jun, XIE Zeng-hua, *et al.* 4-Wavelength, 8-Wavelength  $\sigma$ -figure cavity fiber laser[J]. *J of Chinese Laser*, 2001, **28**(1):15-18.  
张劲松,李唐军,谢增华,等.  $\sigma$ 形腔 4 波长和 8 波长光纤激光器[J]. *中国激光*, 2001, **28**(1):15-18.
- [11] LI Rao, FENG Xin-huan, SUN Lei, *et al.* Dual-wavelength fiber laser based on polarisation Hole-burning effect at room temperature[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2):173-175.  
李尧,冯新焕,孙磊,等.用偏振烧孔实现的室温双波长光纤激光器[J]. *光子学报*, 2005, **34**(2):173-175.
- [12] LI Jia-fang, FENG Ming, LI Yi-gang, *et al.* 48-line Linear Cavity Multi-wavelength Er-doped Fiber Laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(4):485-488.  
李家方,冯鸣,李乙钢,等.48-波长线形腔多波长掺铒光纤激光器[J]. *光子学报*, 2005, **34**(4):485-488.
- [13] WANG Zao-ying, HU Zhi-yong, BAO Huan-min, *et al.* Tunable Multi-wavelength fiber laser based on semiconductor optical amplifier[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(2):321-324.  
王肇颖,胡智勇,包焕民,等.基于半导体光放大器的可调谐多波长光纤激光器[J]. *光子学报*, 2006, **35**(2):321-324.
- [14] de GROOT P. Use of a multimode short-external-cavity laser diode for absolute-distance interferometry [J]. *Appl Opt*, 1993, **32**(22):4193-4198.
- [15] GENG Jian-xin, CAO Gen-di, LUO Ying, *et al.* Experimental study of a fiber grating external-cavity semiconductor Laser [J]. *J of Chinese Laser*, 2000, **27**(6):488-492.  
耿建新,曹根娣,罗颖,等.光纤光栅外腔半导体激光器的实验研究[J]. *中国激光*, 2000, **27**(6):488-492.

## 3-wavelength Operation of an External Cavity Laser Diode with Cascaded Fiber Bragg Gratings

MA Jun-shan

(Optics and Electronic Information Engineering College, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Received date: 2006-08-22

**Abstract:** The 3-wavelength operation of external cavity laser diode with cascaded fiber Bragg gratings is achieved. The peak wavelength of the 3-wavelength spectra are determined by the Bragg wavelength of three fiber Bragg gratings, and are 1 531 nm and 1 549 nm and 1 554. 8 nm respectively. At a bias of 52 mA, the total output power of the external cavity laser is 1 mW. The main advantages of the laser is that the wavelength of the laser is steady because of wavelength is lock at the Bragg wavelength of fiber grating, and linewidth is narrow, and cost is low. The laser can be used for interference measurement with multi-wavelength, and all-optical communication.

**Key words:** External cavity LD; Optic fiber grating; Multi-wavelength operation



**MA Jun-shan** was born in 1967. He received the Ph. D. degree from Department of Precision Instrument, Harbin Institute of Technology in 1999. He is a professor of University of Shanghai for Science and Technology. His research interests focus on optic communication and optical precision measurement.