

文章编号: 1001-3806(2005)04-0361-03

## 光纤光栅外腔半导体激光器的理论及实验研究

王丽丽<sup>1</sup>, 任建华<sup>1\*</sup>, 赵同刚<sup>1</sup>, 徐大雄<sup>1</sup>, 饶 岚<sup>1</sup>, 吴 炜<sup>2</sup>, 郭永新<sup>2</sup>

(1. 北京邮电大学 电子工程学院, 北京 100876; 2. 辽宁大学 物理系, 沈阳 110036)

**摘要:** 对影响光纤光栅外腔半导体激光器特性的几个重要因素(光纤光栅长度、耦合系数、内腔反射系数)进行了理论分析和数值模拟。从实验上进行了验证, 实测了不同反射率情况下激光器的激光光谱, 得到了带宽为 0.1 nm、出纤功率达 417.4 μW、边模抑制比高达 37.9 dB 的激光谱线。验证的结果表明, 理论分析、数值模拟、实验结果是吻合的。

**关键词:** 外腔半导体激光器; 光纤光栅; 数值模拟; 模耦合

**中图分类号:** TN248.4 **文献标识码:** A

### Theoretical and experimental study on a fiber grating external-cavity semiconductor laser

WANG Li-li<sup>1</sup>, REN Jian-hua<sup>1</sup>, ZHAO Tong-gang<sup>1</sup>, XU Da-xiong<sup>1</sup>, RAO Lan<sup>1</sup>, WU Wei<sup>2</sup>, GUO Yong-xin<sup>2</sup>

(1. Department of Electronic Engineer, Beijing University of Post and Telecommunication, Beijing 100876, China; 2. Department of Physics, Liaoning University, Shenyang 110036, China)

**Abstract:** Several important factors (length of fiber grating, coupling coefficient, reflectivity of internal cavity) which strongly affects the characteristics of fiber grating external cavity semiconductor lasers are analyzed. The analytical theory is confirmed by the following numerical simulations and experimental results. Then the spectrums of FBG-ECL with different reflectivity of fiber gratings are examined and the perfect spectrum with 0.1 nm of bandwidth, power of 417.4 μW, 37.9 dB of side-mode suppression ratio are got. The results demonstrate that theoretical analysis, numerical simulations are in agreement with the experimental observations.

**Key words:** external cavity semiconductor laser; fiber grating; numerical solution; mode coupling

## 引 言

光纤光栅是光纤通讯系统中的重要器件, 其制作是利用光纤的光敏性, 用紫外写入的方法形成一维的布喇格光栅 (FBG), 具有窄带的反射特性, 而且由于普通光纤光栅的热稳定性为 0.01 nm / °C, 比普通 DFB 激光器的热稳定性高一个量级, 因此, 选用 FBG 作为 LD 的外腔反射镜, 就可以构成光纤光栅外腔半导体激光器 (FBG-ECL)<sup>[1,2]</sup>。这样既可以实现激光器的选频和线宽压缩<sup>[3~7]</sup>, 同时又具有很好的热稳定性, 从而使得光谱稳定性好。这种光纤光栅外腔半导体激光器的特点是: 激光器的激光波长取决于光栅的反射波长, 通过调节光栅的反射波长就可以实现可调谐的激光输出 (主要方法是利用应力及温度来改变光栅的周期), 这一点在目前的全光网络中的波长变换技术中有着重要的应用; 同时由于这种激光器的结构, 工作时不需考虑

载流子的注入引起的折射率变化, 因此, 对啁啾具有很强的抑制作用。

## 1 理论分析与数值模拟

光纤光栅外腔激光器的关键技术<sup>[1]</sup>一是光纤光栅本身; 二是腔面的增透膜; 三是管芯同光纤光栅的耦合。

光纤光栅的模耦合方程<sup>[8]</sup>为:

$$\begin{cases} \frac{dR}{dz} = i\phi R + iKS \\ \frac{dS}{dz} = -i\phi S - iKR \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $R$  和  $S$  分别代表光纤中的两个模式, 直流耦合系数  $\phi = \delta + \sigma - \frac{1}{2} \frac{d\phi}{dz}$ , 失谐量  $\delta = \beta - \frac{\pi}{\Lambda} = 2\pi n_{\text{eff}} \times \left[ \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_B} \right]$ ,  $\beta$  为光栅中模式的传输常数,  $n_{\text{eff}}$  为光栅的折射率,  $\sigma = \frac{2\pi}{\lambda} \delta n_{\text{eff}}$ ,  $\frac{d\phi}{dz} = \frac{2\pi n_{\text{eff}} z d\lambda_B}{\lambda_B^2 dz}$ , 代表光栅的周期啁啾引入的耦合系数, 在均匀单模光纤中其值等于 0; 交流耦合系数  $K = \frac{\sigma \nu}{2} = \frac{\pi}{\lambda} \nu \delta n_{\text{eff}}$ ,  $\nu$  为调制深度, 其取值

作者简介: 王丽丽 (1978-), 女, 博士研究生, 目前主要从事光纤通信及光电子器件的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: r\_jh2000@sohu.com

收稿日期: 2004-06-01; 收到修改稿日期: 2004-07-09

范围一般小于 1,  $\Delta n_{\text{eff}} = \delta n_{\text{eff}} \left[ 1 + \nu \cos \left( \frac{2\pi}{\lambda} L \right) \right]$ , 式中,  $\delta n_{\text{eff}}$  为本底折射率的平均改变量, 从下面的模拟结果中可以看到, 本底折射率的改变量大小直接影响着光栅的反射特性,  $\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$ , 是光栅的中心波长, 由式中也就可以看到中心波长由光栅的周期决定。对 (1) 式进行解析求解可得:

$$\begin{bmatrix} R(z) \\ S(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R(0) \\ S(0) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cosh(rz) - \sinh(rz) i \frac{\phi}{r} & \frac{iK}{r} \sinh(rz) \\ i \frac{K}{r} \sinh(rz) & \cosh(rz) + \sinh(rz) \frac{i\phi}{r} \end{bmatrix} \quad (2)$$

并定义反射系数  $r_g = \frac{S(0)}{R(0)}$ , 利用边界条件  $R(0) = 1$ ,  $S(L) = 0$  ( $L$  为光栅的长度) 及 (2) 式, 可以求得光栅的反射率:

$$R_g = r_g \cdot r_g^* = \frac{K^2 \sinh^2}{K^2 \cosh^2} \frac{K^2 - \phi^2 L}{K^2 - \phi^2 L - \phi^2} \quad (3)$$

图 1 所示为对光栅反射率的数值模拟结果, 其中  $\lambda_B = 1550\text{nm}$ 。从图中可以看到, 光栅的长度及本底折射率的改变量均对光栅的反射率有很大的影响, 本底折射率的改变主要是由于光纤内包含的未与紫外激光发生作用的氢分子, 逐步向外扩散而导致的。另外, 温度的影响、辐射时剂量的大小、光纤载氢敏化的时间和在空气中暴露的时间以及辐照后的时效和热处理工艺, 都会对光栅的反射波长有影响。

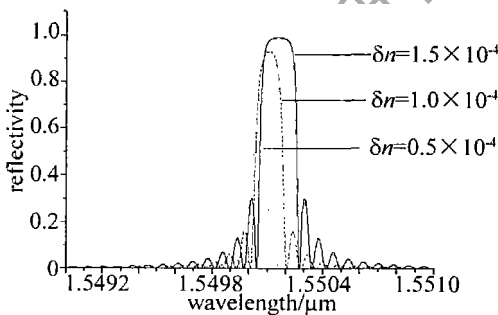


Fig 1 Fiber grating reflectivity of different  $\delta n$  ( $L = 1\text{cm}$ ,  $n = 1.45$ )

在数值解析 (3) 式时, 可得到当直流耦合系数  $\phi = 0$  时, 光栅有最大反射率, 此时满足:

$$\phi = 2\pi n_{\text{eff}} \left( \frac{1}{\lambda_{\text{max}}} - \frac{1}{\lambda_B} \right) + \frac{2\pi}{\lambda_{\text{max}}} \delta n_{\text{eff}} = 0 \quad (4)$$

式中,  $\lambda_{\text{max}}$  为最大反射率点对应的波长。解得:

$$\lambda_{\text{max}} = \lambda_B \left( 1 + \frac{\delta n_{\text{eff}}}{n_{\text{eff}}} \right) \quad (5)$$

结合图 1 可以看到,  $\lambda_{\text{max}}$  由于受  $\delta n_{\text{eff}}$  改变量的影响, 会相对  $\lambda_B$  有一个微小偏移, 这一点, 通过图 1 也可以很好地验证 (5) 式。

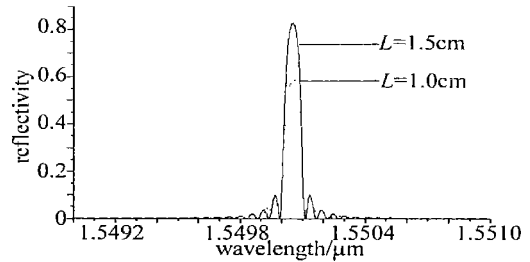


Fig 2 Fiber grating reflectivity of different  $L$  ( $\delta n = 5 \times 10^{-5}$ ,  $n = 1.45$ )

从图 2 可以看出, 随着长度的增加, 光栅的峰值反射率逐渐增大, 在实际应用过程中, 可根据不同的需要选择光栅的长度。当光纤光栅在系统中用作滤波器件时, 此时要求光栅的峰值反射率要尽可能的大, 因此应选择长度较长的光栅。而当光纤光栅用作外腔半导体激光器的反馈元件时, 由于光是从光纤端输出, 考虑器件输出功率及边模抑制比的要求, 其峰值反射率通常设计在 0.5~0.9 之间<sup>[9]</sup>。

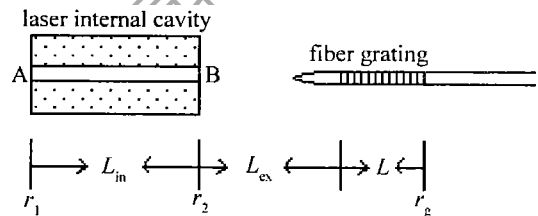


Fig 3 Structure of FBG-ECL

FBG-ECL 的结构如图 3 所示,  $r_1$  和  $r_2$  分别为激光器解理面 A 和 B 端的振幅反射率,  $r_g$  为光栅的反射系数, 通过对激光器的解理面 B 端镀增透膜从而提高内腔模的激射阈值, 从而使得增益阈值小于内腔模增益阈值的外腔模谐振起来。通常在处理外腔激光器问题时, 可将其简化为 F-P 激光器进行分析, 即采用等效腔近似的方法, 引入等效反射系数  $r_{\text{eff}}$ :

$$r_{\text{eff}} = \frac{r_2 + \eta r_g \exp(-i4\pi L_{\text{ex}}/\lambda)}{1 + \eta r_2 r_g \exp(-i4\pi L_{\text{ex}}/\lambda)} \quad (4)$$

$r_{\text{eff}}$  考虑了  $r_2$  的影响以及激光器与外腔的耦合系数  $\eta$ ,  $\eta$  指外腔反射回来的光进入有源区的比例, 这样 FBG-ECL 可等效为一个 LD, 其左端面的反射率为  $r_1$ , 而右端面的反射率等效为  $r_{\text{eff}}$ 。当 LD 的解理面 B 端镀增透膜后,  $r_2$  很小, 内腔模在增益中心处的振荡条件为:

$$g = \gamma + \frac{1}{2L_{\text{in}}} \ln \frac{1}{r_1 r_2} \quad (5)$$

$\gamma$  为有源区内部损耗系数, 由 (4) 式可以看出, 内腔模的阈值变大, 在增益达到阈值之前, 内腔模不会形成激光振荡。当耦合外腔后, 在光栅的反射波长处, 外腔模的增益阈值条件为:

$$g' = \gamma + \frac{1}{2L_{\text{in}}} \ln \frac{1}{r_1 / r_{\text{eff}}^2} \quad (6)$$

对比 (5) 式和 (6) 式, 可以很明显地看出, 对于具有一定反射系数的光栅, 等效反射率  $|r_{\text{eff}}|^2 \gg r_2$ , 从而使得外腔模的增益阈值  $g'$  远远小于内腔模的增益阈值  $g$ ,

外腔模将先于内腔模达到阈值而谐振起来,为了提高外腔激光器的单模输出功率,要尽量地增加内腔模的增益阈值,同时尽量地减小外腔模的增益阈值,所以可以通过减小  $r_2$ ,增加  $|r_{\text{eff}}|^2$  来实现。根据实验研究,反射端面的残余反射率  $r_2$  至少要降至  $10^{-3}$  以下,这也是外腔激光器的制作工艺中的一个难点。通过 (4) 式可以看到,  $|r_{\text{eff}}|^2$  的大小  $R_{\text{eff}}$  除了与光栅的反射系数  $r_g$  有关外,还与耦合系数  $\eta$  及剩余反射率  $r_2$  有关,数值模拟的结果如图 4 和图 5 所示。

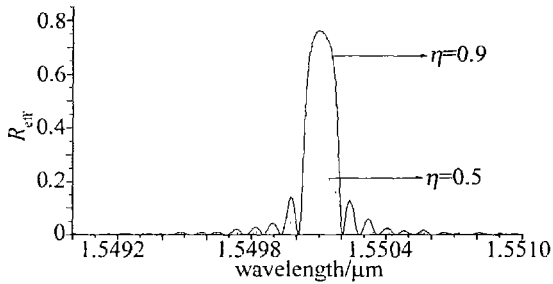


Fig 4 Fiber grating equivalent reflectivity of different  $\eta$  ( $r_2 = 0.02, L_{\text{ex}} = 1 \text{ cm}, L = 1 \text{ cm}, n = 1.45$ )

由图 4 可以看出,耦合效率直接影响着等效腔的反射率,从而间接地影响着激光器的特性,耦合系数  $\eta$  越高,峰值反射率越大,阈值  $g$  增益越低,相应的,器

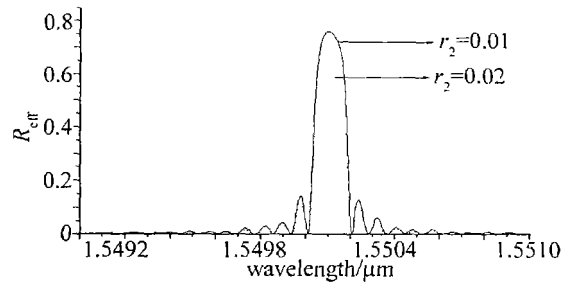


Fig 5 Fiber grating equivalent reflectivity of different  $r_2$  ( $L_{\text{ex}} = 1 \text{ cm}, L = 1 \text{ cm}, n = 1.45, \eta = 0.8$ )

件阈值电流减小,输出功率增加,提高耦合效率是 FBG-ECL 激光器制备的关键技术之一。在制作外腔激光器的工艺中,为了尽可能地提高耦合效率,最佳的光纤头应该具有旋转双曲线圆锥形状,这样使得管芯端点发出的各个方向的光线,进入光纤后折射的方向均都沿着光纤的轴线方向,从而有效地提高了外腔激光器的激光功率。实际工艺中很难按照双曲线圆锥形状加工,因此耦合效率较低。

## 2 实验结果

图 6 为实验所用外腔激光器的光谱特性,光纤光栅一端与半导体激光器耦合作为外腔,腔长 101 cm;另一端作为输出端,采用安立公司 MS9710C 光谱分析仪

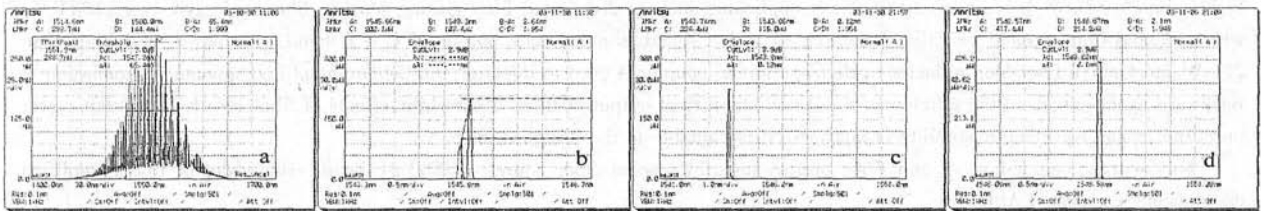


Fig 6 a—fluorescence spectrum after coating b—spectrum of LD ( $R_g = 0.19, I = 60 \text{ mA}$ ) c—spectrum of LD ( $R_g = 0.3, I = 40 \text{ mA}$ ) d—spectrum of LD ( $R_g = 0.5, I = 40 \text{ mA}$ )

记录。图 6a 为  $r_2$  镀增透膜的荧光光谱,由上面的分析可知其激励阈值较大,所以激光不容易起振,因此只有自发辐射谱。图 6b 为加上光栅后的激光谱线,此时因为光栅的反射率较低,出现多模振荡的结果,随着光栅反射率的增加,激光器出现单模振荡。图 6c 为注入电流为 40 mA,光纤光栅反射率为 0.3 时,外腔激光器的输出功率达 224.2  $\mu\text{W}$ 。图 6d 为理想的单模激光谱线,其布喇格波长为 1.548  $\mu\text{W}$ ,带宽为  $\Delta\lambda = 0.1 \text{ nm}$ ,偏置电流为 40 mA 时出纤功率达 417.4  $\mu\text{W}$ ,边模抑制比高达 37.9 dB,可以和 DFB 激光器相比。因此在良好的工艺条件下,光纤光栅外腔半导体激光器完全可以达到现有 DFB, DBR 的激光器水准,甚至有些特性(如线宽、稳定性等)还要优于 DFB, DBR 激光器,因此,外腔激光器具有很好的研究及应用价值。

## 3 结论

理论分析了影响光纤光栅外腔半导体激光器特性

的几个重要因素,研究了外腔反射率、耦合系数、端面剩余反射率等因素对其特性的影响,并且进行了实验验证,实验上用光纤光栅与镀增透膜的半导体激光器耦合形成光纤光栅外腔半导体激光器,在静态工作条件下得到了线宽小于 0.1 nm,边模抑制比高达 37.9 dB 的激光输出。研究的结果表明,理论分析、数值模拟、实验结果是一致的。

## 参考文献

- [1] 耿建新,曹根娣,罗颖 *et al* 光纤光栅外腔半导体激光器的实验研究 [J]. 中国激光, 2000, A27(6): 488~492
- [2] 罗颖,曹根娣,耿建新 *et al* 光纤光栅外腔半导体激光器纵模特性研究 [J]. 光学学报, 2000, 20(3): 357~362
- [3] L DU K Y, JHEE Y K, EISENSTEN G *et al* Line width characteristics of fiber-extended-cavity distributed-feedback lasers [J]. A P L, 1986, 48(16): 1039~1041.
- [4] MA X Y, LIF Y, ZHANG M. Experimental study of FM fiber ring resonator in resonator fiber optic gyroscope [J]. SPIE, 1998, 3555: 363~367.

(下转第 394 页)

$\Delta$ 为以  $F_1$  为起点计算到  $F_2$  的距离,由左向右为正。由图 4b可以看出,只要第 2个透镜放在第 1个透镜的焦距内,就可使  $\Delta$ 值大于任意透镜的焦距,从而使组合系统的焦距值缩小。

该方案中,激光发散角的选择是根据丰源激光产业公司的激光器技术参数确定的,显然,如果所取的激光器发散角较大,则更易实现上述光斑的调整。采用上述装置后,通过一种旋转传动机构,连续改变两个直角棱镜的位置和相对距离,即可调节光斑的直径;同时通过推导传动关系式,可以以标尺的形式较精确地控制光斑直径。

2.2.3 激光功率的确定 在激光器功率的选择上,应该保证不会造成被照射者眼睛的硬损伤,因而照射极限(MPE)的选择必须谨慎。激光在大气传输中是逐渐衰减的,设激光发散角为  $\phi$ 、出射功率为  $P$ 、出射光束直径为  $a$  的高斯光束传输距离  $z$  后,其平均辐照度为<sup>[5]</sup> (其中,  $\mu$  为特定波长在一定天气状况下的大气衰减系数):

$$E = \frac{1.27P \cdot e^{-\mu z}}{(a + z\phi)^2} \quad (5)$$

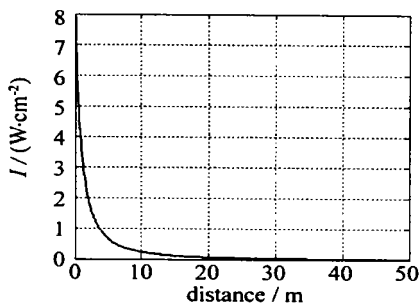


Fig 5 Laser irradiation as a function of distance (wavelength = 532nm,  $P = 1W$ )

图 5为发散角 2mrad,波长 532nm 的激光传输 50m 距离的平均辐照度曲线。大气衰减系数取介于晴天和标准天气之间的天气状况,532nm 与 650nm 的大气衰减系数分别近似为  $2.2 \times 10^{-6} / \text{cm}$  和  $1.8 \times 10^{-6} / \text{cm}$ <sup>[5]</sup>。

由图中可见,如果 50m 距离上正好达到照射极限,则在较近距离上必然会超过照射极限数十倍。同时,由于要求光斑直径可调,因而直径在 0.15m 时的平均光照度比 1.8m 时大 144 倍。因此,考虑到实际应用的距离一般会小于 50m,而且照射一群目标可以通过扫射的方式,以及空气质量的影响因素等,本方案确定劝阻器在 50m,直径 0.15m 时平均辐照度应为眼照射极限的 20%。如对于警用装备,应该选择更小。

根据上述的条件,在(5)式中直接用光斑的直径来计算,并设劝阻器各调节机构的透过率为 90%,可得 532nm 与 650nm 的情况下,激光器的功率分别应取 54mW 和 60mW。

上述的计算值是指白天一般使用的情况,如果夜间使用或对方带有观察辅助设备,如望远镜、微光夜视镜等,应当附加一个衰减片。

### 3 结论

讨论了激光劝阻器功能的简单实现,实际研究中还需考虑隐蔽、携带、天气影响等诸多因素。激光劝阻器照射到对方的眼睛上,会使其视线模糊,或失去方向感,难以逃跑或反抗,为使用人员控制局面、制服对手提供了时间。而且其体积小,使用方便,从而增加了突然性和成功率。可以想见,研究具有实际应用价值的激光劝阻器对于军事战术的实施、司法部门的执法辅助以及反恐怖行动等都是十分有意义的。

### 参考文献

- [1] 阎吉祥. 激光武器 [M]. 北京:国防工业出版社,1996. 223~232.
- [2] GB 7247-1995,激光产品的辐射安全、设备分类、要求和用户指南 [S].
- [3] 孙承伟. 激光辐照效应 [M]. 北京:国防工业出版社,2002. 436~462.
- [4] GJB 1099-1991,激光安全防护术语 [S].
- [5] GJB 470A-1997,军用激光器危害的控制和防护 [S].

(上接第 363 页)

- [5] BIRD D M, ARMSTRONG J R, KASHYAP R M A *et al* Narrow line semiconductor laser using fiber rating [J]. Electron Lett, 1991, 27 (13): 1115~1116.
- [6] MORTON PA, MIZRAHIV, KOSINSKIS G *et al* Hybrid soliton pulse source with fiber external cavity and Bragg reflector [J]. Electron Lett, 1992, 28 (6): 561~562.

- [7] RIZVIN H, GOWER M C, GOODALL F C *et al* Excimer laserwriting of submicrometre period fibre Bragg gratings using phase-shifting mask projection [J]. Electron Lett, 1995, 31 (11): 901~902.
- [8] 彭江德. 光电子技术基础 [M]. 北京:清华大学出版社,1988. 306~313.
- [9] 夏光琼,吴正茂,陈建国. 光纤光栅的长度对其峰值反射率的影响 [J]. 激光技术,2002,26(2): 106~107.