

文章编号: 1001-3806(2005)05-0476-02

外腔长度变化对光纤光栅外腔 LD 激射波长的影响

周寒青¹, 夏光琼^{1,2}, 邓 涛¹, 吴正茂^{1,2*}

(1. 西南师范大学 物理学院, 重庆 400715; 2 重庆大学 教育部光电技术与系统重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 密集波分复用 (DWDM) 光纤通信系统对光源的波长稳定性有很高的要求。主要就可供 DWDM 系统选用的光源之一光纤光栅外腔半导体激光器 (FGESL) 的波长稳定性进行讨论。通过计及半导体激光器 (LD)、外腔及光纤光栅 (FG) 三者的共同作用, 根据光纤光栅外腔半导体激光器的相位条件确定 FGESL 的激光纵模分布后, 理论上研究了 FGESL 的激射波长随 FG 外腔长度的变化。结果表明, 外腔较短时, 外腔长度的微小变化可以导致 FGESL 的激射波长产生显著的变化; 外腔较长 (大于 10cm) 时, 外腔长度的变化对 FGESL 的激射波长基本没有影响。

关键词: 光纤通信; 光纤光栅外腔半导体激光器; 激射波长; 外腔长度

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A

Influence of external cavity length variation on the lasing wavelength of the fiber grating external cavity semiconductor laser

ZHOU Han-qing¹, XIA Guang-qiong^{1,2}, DENG Tao¹, WU Zheng-mao^{1,2}

(1. School of Physics, Southwest Normal University, Chongqing 400715, China; 2 The Key Laboratory for Optoelectronic Technology & System of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The development of the dense wavelength division multiplexing (DWDM) technology requires that the lasing wavelength of the light source have high accuracy and stability. The lasing wavelength stability of the fiber grating external cavity semiconductor lasers (FGESLs) is focused on. After taking into account the joint contribution of semiconductor laser, external cavity and fiber grating (FG) to the phase condition, the mode distribution of the FGESLs can be determined. As a result, the effect of the FG external cavity length on the lasing wavelength of the FGESL is investigated theoretically. Numerical simulations show that for a relative short external cavity, a slight change of the external cavity length will result in an obvious variation of the lasing wavelength; and for a long external cavity (>10cm), the change of the external cavity length gives almost no effect on the lasing wavelength.

Key words: fiber optical communication; fiber grating external cavity semiconductor laser; lasing wavelength; external cavity length

引 言

近些年来, 光纤光栅外腔半导体激光器 (FGESL) 作为密集波分复用 (DWDM) 系统可供选用的光源之一, 已受到国内外学者的广泛关注并已开展了一些相关研究^[1~9]。一般认为, FGESL 的激射波长是由光纤光栅 (FG) 的布喇格波长确定的。实际上这只对长外腔且 FG 的反射谱分布在其 3dB 带宽内较陡峭时近似成立, 而当 FG 的反射谱分布在其 3dB 带宽内较平坦时, 已有研究表明, FGESL 的激射波长总是偏离 FG 的

布喇格波长^[1]; 对于短外腔, 在引入了 FG 的位相贡献后, 由于在 FG 的反射带宽内 FGESL 的激光纵模波长通常都偏离 FG 的布喇格波长, 因此, 其激射波长也与 FG 的布喇格波长不一致^[2]。目前, 人们对 FGESL 的激射波长随注入电流、温度等的变化已进行了一些研究^[3~5], 但对外腔长度的变化对 FGESL 激射波长的影响并未见报道, 本文中就将这个问题进行讨论。

1 理论分析

图 1 为光纤光栅外腔半导体激光器的结构示意图。FGESL 是由一个半导体激光器 (LD) 管芯和一个

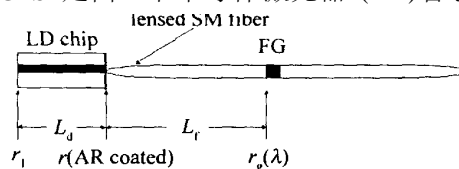


Fig 1 Schematic of a fiber grating external cavity semiconductor laser

基金项目: 教育部科学技术重点资助项目 (03140); 重庆市应用基础研究资助项目 (2003-7983)

作者简介: 周寒青 (1978-), 女, 硕士, 助教, 主要从事光通信方面的教学和科研工作。

* 通讯联系人。E-mail: zmwu@swnu.edu.cn

收稿日期: 2004-07-05; 收到修改稿日期: 2004-09-02

FG 外腔构成。LD 的长度为 L_d , 外腔长度为 L_f , LD 面向 FG 的一端通常镀有增透膜, 其剩余反射系数为 r , LD 的另一端及 FG 的反射系数分别为 r_l 和 $r_g(\lambda)$ 。

由等效腔法或射线法均可证明外腔半导体激光器的阈值条件为: $G \exp(-i\Phi) r_l + \eta r_g(\lambda) \times$

$$\exp(-i\theta) - \eta G \exp[-i(\Phi + \theta)] r_l r_g(\lambda) = 1 \quad (1)$$

式中, G 为净增益因子, 考虑到光纤光栅的反射带宽远远小于激光器的增益带宽, 所以, 此处不考虑 G 随波长的变化, η 为激光器与光纤之间的耦合效率, 以及:

$$\Phi = \frac{4\pi n_d L_d}{\lambda}, \quad \theta = \frac{4\pi n_f L_f}{\lambda} \quad (2)$$

式中, λ 为波长, n_f, n_d 分别为光纤和 LD 的折射率。

由于 LD 面向 FG 的一端通常镀有增透膜, 其剩余反射系数很小, 为方便讨论, 本文中假设 $r=0$, 则 (1) 式中的相位条件和振幅条件可分开为:

$$\Delta\Psi = \theta + \Phi - \arg[r_g(\lambda)] + \pi = 2m\pi \quad (m \text{ 取整数}) \quad (3a)$$

$$G_{th} = [r_l r_g(\lambda)]^{-1} \quad (3b)$$

式中, $\Delta\Psi$ 为 FGESL 的往返相移 (包含了半波损), 函数 \arg 代表取辐角, G_{th} 是不同波长振荡所需的阈值净增益。

如果采用均匀光纤光栅作为外腔, 则其反射系数为^[10]:

$$r_g(\lambda) = \frac{i\kappa \sin(qL_g)}{q \cos(qL_g) - i\delta\beta \sin(qL_g)} \quad (4)$$

式中, L_g 是光纤光栅的长度, κ 是耦合因子, $q = [(\delta\beta)^2 - \kappa^2]^{1/2}$, 其中 $\delta\beta = \beta(\omega) - \beta_g$, $\beta(\omega)$ 是不同波长 λ 对应的传播常数, β_g 为光纤光栅布喇格波长 λ_g 对应的传播常数。

这样, 对于给定的 FG, 其反射系数 $r_g(\lambda)$ 可由 (4) 式得到; 把所得的 $r_g(\lambda)$ 代入 (3a) 式, 可求出满足相位条件的各激光纵模的波长 λ_m ; 结合 (3b) 式, 不同 λ_m 所需的阈值增益可求出, 阈值增益取得最小时所对应的纵模波长即为 FGESL 的激光波长。

2 结果与讨论

在以下计算过程中使用的数据为: $L_d = 380\mu\text{m}$, $n_d = 3.4$, $n_f = 1.43$, $r_l = 0.92$, $\eta = 0.5$, $\kappa = 0.96$, $L_g = 1.3\text{mm}$, $\lambda_g = 1550\text{nm}$ 。

图 2 中给出了 FGESL 激光波长随外腔长度的变化关系。从图中可以看出: 对于较短的外腔, 外腔长度发生微小变化会引起 FGESL 的激光波长发生显著的改变; 外腔越短, 激光波长变化的幅度越大; 随着外腔长度的逐渐增加, 激光波长变化的幅度逐渐减小, 当外腔长度达到 10cm 以后, 外腔长度的变化对 FGESL 激光波长的影响很小基本可以忽略。这是因为引入了 FG 的位相贡献后, 激光纵模间距不再是个定值; 外腔较短的时候, FG 反射带宽内只存在一个 (或几个) 纵

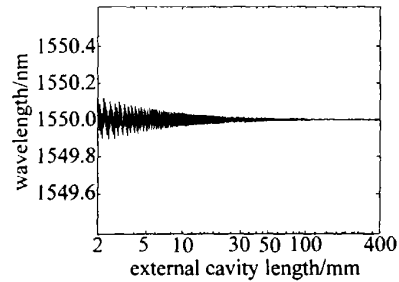


Fig 2 Lasing wavelength vs external cavity length

模, 这个纵模 (如有几个, 则更靠近 FG 布喇格反射波长的纵模) 对应的波长即为 FGESL 的激光波长; 当外腔长度 L_f 发生变化的时候, 有另外的满足位相条件的激光纵模产生; 由于短外腔的激光纵模间距较大, 因此, L_f 变化后的激光纵模通常与 L_f 变化前的激光纵模有较大偏离, 从而出现图中激光波长的显著改变。随着外腔长度的逐渐增加, 在 FG 的反射带宽内存在的纵模越来越多, 模式间距越来越小, 因此, 激光波长变化的幅度逐渐减小。当外腔长度达到 10cm 以后, 此时的激光纵模间距已很小, FG 反射带宽内存在非常多的纵模, 尽管在这种情况下, L_f 的变化也会影响激光纵模分布, 但由于此时激光纵模间距很小, L_f 变化后的激光纵模跟 L_f 变化前的激光纵模几乎重合, 因而 FGESL 的激光波长基本维持不变。

在目前的 FGESL 实际设计中, 短外腔^[3,4]和长外腔^[9]都有。由于结构紧凑、体积小是器件的发展方向, 因而短外腔更具吸引力。如果短外腔 FGESL 用作 DWDM 的光源, 而 DWDM 系统对光源激光波长的稳定性有很高的要求, 则通过以上分析可以看出, 由于短外腔 FGESL 的激光波长受外腔长度微小变化的影响较大, 而外腔长度容易受外界或 LD 所处的环境而发生微小变化, 因此, 短外腔 FGESL 的设计应对环境的影响给予特别关注。

3 结论

提出了一个可用于分析 FGESL 的激光波长随外腔长度变化的理论模型, 并进行了数值研究和讨论, 得到的结果对 FGESL 器件的设计具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] WU Zh M, XIA G Q. Oscillation wavelength of fiber Bragg grating semiconductor lasers [J]. Optik, 2002, 113 (8): 348~350.
- [2] HASHIZUME N, NASU H. Mode hopping control and lasing wavelength stabilization of fiber grating lasers [J]. Furukawa Review, 2001, 20: 7~10.
- [3] TMOFEEV FN, BAYVEL P, MIKHAILOV V *et al*. 2.5 Gbit/s directly modulated fibre grating laser for WDM networks [J]. Electron Lett, 1997, 33 (16): 1406~1407.
- [4] SATO T, TAKAGIT, HAMAKAWA A *et al*. Fiber-grating semiconductor laser modules for dense-WDM systems [J]. IECE Trans Elec-

(下转第 490 页)

率随工作电流变化情况。从图2中可以看出,激光器的阈值功率约为0.45A,当抽运功率1.8A(对应抽运功率为1.6W)时,获得593.5nm橙黄色激光输出功率为84mW。

图3是用示波器在功率为84mW时检测593.5nm

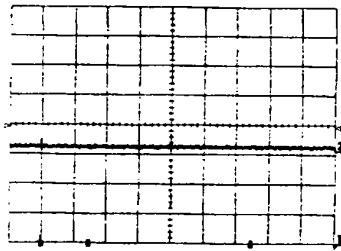


Fig 3 593.5nm output power under noise operation

的噪声特性,并且观察到输出信号始终处于低噪声工作。其原因是由于Nd:YVO₄晶体发射的1064nm和1342nm两个基频光波长都为相同方向的线偏振输出,由于在LBO I类和频过程中,和频光的偏振态都不改变,仅有一个偏振方向,不会发生由于不同偏振模式之间耦合引起模式竞争。

图4是采用Photon Inc公司生产的光束轮廓仪测

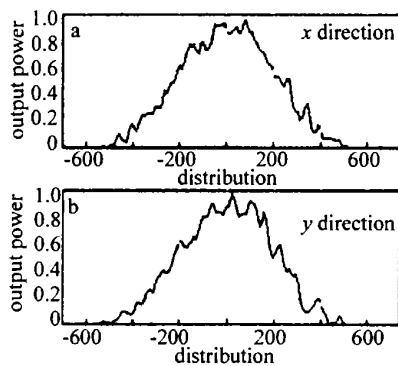


Fig 4 Far-field spot energy distribution 593.5nm laser

量的橙黄色激光的远场光斑能量分布图,说明激光光斑是很好的TEM₀₀输出。

4 结论

研究了采用2W的LD抽运Nd:YVO₄晶体,采用LBO I类临界相位匹配腔内和频,获得了84mW的593.5nm连续橙黄色激光输出,光-光转换效率为5.3%。实验结果表明,采用LD抽运腔内和频是获得593.5nm

橙黄色激光一种有效和频方法,若该方法应用Nd:YVO₄晶体的其它谱线或具有多条谱线的其它激光增益介质进行腔内和频,可获得更多波长的全固态腔内和频单谱线激光器。故LD抽运的腔内和频技术,为实现新波长全固态连续波激光器的发展提供了方向。

参考文献

- [1] 赵致民,李隆,田丰 *et al* 高功率端面泵浦内腔倍频瓦级绿光激光器 [J]. 激光技术, 2003, 27(4): 331~333.
- [2] 郭明秀,陆雨田. Nd:YVO₄/KTP全固态倍频激光器的研究 [J]. 激光技术, 2003, 27(6): 236~238.
- [3] 李朝阳,王勇刚,黄骝. I类临界相位匹配LBO腔外倍频660nm效率的研究 [J]. 激光技术, 2003, 27(5): 428~430.
- [4] 王涛,姚建铨,李幸福. 红光(660nm)准连续Nd:YAP内腔倍频激光器 [J]. 中国激光, 2002, A29(6): 108~110.
- [5] 李瑞宁,于建华,来引娟 *et al* LD抽运的Nd:YAP内腔倍频全固态蓝光激光器 [J]. 中国激光, 2002, A29(6): 105~107.
- [6] PIERROU M, KARLSSON H, KELLNER T *et al* Generation of 740mW of blue light by intracavity frequency doubling with a first-order quasi-phase-matched KTiOPO₄ crystal [J]. Opt Lett, 1999, 24(4): 205~207.
- [7] NADTOCHEEV V E, NAN L O E Two-wave emission from a cw solid-state YAG:Nd³⁺ laser [J]. Sov J Q E, 1989, 19(4): 444~446.
- [8] SHEN H Y, ZENG R R, ZHOU Y P *et al* Comparison of simultaneous multiple wavelength lasing in various neodymium host crystals at transitions from ⁴F_{3/2}-⁴I_{1/2} and ⁴F_{3/2}-⁴I_{3/2} [J]. A P L, 1990, 56(20): 1937~1938.
- [9] CHEN Y F, CW dual-wavelength operation of a diode-end-pumped Nd:YVO₄ laser [J]. Appl Phys, 2000, B70: 475~478.
- [10] SHEN H Y. Oscillation condition of simultaneous multiple wavelength lasing [J]. Chinese Physics Letters, 1990, 7(4): 174~176.
- [11] HENDERSON G A. A computational model of a dual-wavelength solid-state laser [J]. J A P, 1990, 68(11): 5451~5455.
- [12] CHEN Y F. Efficient generation of continuous-wave yellow light by single-pass sum-frequency mixing of a diode-pumped Nd:YVO₄ dual-wavelength laser with periodically poled lithium niobate [J]. Opt Lett, 2002, 27(20): 1809~1811.
- [13] VANCE J D, SHE C Y, MOOSMULLER H. Continuous-wave, all-solid-state, single-frequency 400mW source at 589nm based on doubly resonant sum-frequency mixing in a monolithic lithium niobate resonator [J]. Appl Opt, 1998, 37(21): 4891~4896.
- [14] KRETSCHMANN H M, HEINE E. All solid-state continuous-wave doubly resonant all-intracavity sum-frequency mixer [J]. Opt Lett, 1997, 22(19): 1661~1663.
- [15] OKA M, KUBOTA S. Stable intracavity doubling of orthogonal linearly polarized mode in diode-pumped Nd:YAP lasers [J]. Opt Lett, 1988, 13(10): 805~807.

(上接第477页)

- tion, 1999, E82-C(2): 357~359.
- [5] SATO T, YAMAMOTO F, TSUJI K *et al* A uncooled external cavity diode laser for coarse-WDM access network systems [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2002, 14(7): 1001~1003.
 - [6] LAY T S, CHEN M H, YANG H M *et al* 1.55μm non-anti-reflection-coated fiber grating laser for single-longitudinal mode operation [J]. Opt & Quantum Electron, 2002, 34(7): 687~696.
 - [7] MIKHA LOV T V, BAYVEL P, WYATT R *et al* Fibre grating laser-

based pulse source for 40Gbit/s OTDM transmission systems [J]. Electron Lett, 2001, 37(14): 909~910.

- [8] WU Zh M, XIA G Q, CHEN J G. Influence of the reflectivity distribution of fiber grating on the output characteristics of fiber grating external cavity diode lasers [J]. J Opt Commun, 2003, 24(1): 22~24.
- [9] 周凯明,葛璜,安贵仁 *et al* 用光纤光栅作外反馈的可调谐外腔半导体激光器 [J]. 中国激光, 2001, A28(2): 113~115.
- [10] AGRAWAL G P. Nonlinear fiber optics [M]. Second Edition, San Diego: Academic Press, 1995. 455.