

# 波长可调谐取样光纤光栅激光器的输出特性研究\*

刘艳<sup>†</sup> 汪磊石 陶沛琳 冯素春 尹国路 任文华 谭中伟 简水生

(北京交通大学光波技术研究所, 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

(2010年3月11日收到; 2010年4月20日收到修改稿)

建立了具有两个取样周期略有不同的取样光纤光栅反射镜的 Vernier 波长调谐机制的光纤分布布拉格反射式激光器的数值仿真模型, 对激光器的输出特性进行了分析. 研究了激光器输出特性随着激光器前后光栅反射镜波长以及前后光栅反射镜反射率的变化关系. 提出了对两取样光栅反射率的优化配置方案, 可以使输出激光的边模抑制比有所提高; 同时对波长调节方式也进行了探讨; 进行了实验研究.

**关键词:** 取样光纤光栅, 光纤激光器, 波长可调谐激光器

**PACS:** 42.55.Wd, 42.60.-v, 42.60.Lh

## 1. 引言

波长可调谐激光器以其输出激光波长具有灵活可调性等优点, 在密集波分复用(dense wavelength division multiplexing, DWDM)以及光纤传感等应用领域中备受青睐, 是近年来的研究热点<sup>[1-5]</sup>. 取样光栅具有波长间隔均匀的多个反射峰, 而且制作方法简单, 常被用于激光器中作为反射腔镜<sup>[6]</sup>. 以两个取样周期略有差别的取样光栅作为反射腔镜构成的分布布拉格反射(distributed Bragg reflection, DBR)式波长可调谐激光器是近年来出现的一种很吸引人的激光器结构, 其优点在于, 由于两取样周期不同的取样光栅的反射峰波长间隔是不相同的, 通过对两取样光栅取样周期的合理选取, 可以实现两光栅的多个反射峰之间只有一对反射峰波长相对应, 从而可以只在该波长处输出激光, 而由于两光栅各反射峰的波长之间是交错的, 所以当微调其中一个取样光栅的反射波长之后, 可以使波长相距较远处的另一对反射峰波长相对应, 从而使激光器的输出波长获得较大的波长调谐量, 其波长调谐机理类似于游标卡尺的原理<sup>[7]</sup>. 虽然目前基于这种结

构的半导体激光器已经有了商业化的产品, 但对于利用全光纤结构来实现该波长调谐机理的研究还比较少, 特别是相应波长调节特性的理论及仿真分析的工作尚未见报道. 而由于光纤激光器<sup>[8,9]</sup>具有的与光纤的良好兼容性并且易于制作等优点, 基于光纤结构的此类激光器也有着良好的应用前景<sup>[10,11]</sup>, 因此对其深入研究也是十分必要的.

本文中建立了具有两个取样光纤光栅反射腔镜的光纤 DBR 激光器的数值仿真模型, 并利用模型对激光器的输出特性进行了分析. 由于取样光纤光栅的多波长反射特性, 这种激光器的输出边模抑制比(SMSR)通常会下降比较严重, 通过仿真分析, 本文提出了对两取样光纤光栅反射率的优化配置方案, 可以使输出激光的边模抑制比有所提高; 同时对波长调节方式也进行了探讨; 对这种激光器的实施方案进行了实验验证.

## 2. 激光器的数值仿真与分析

### 2.1. 激光器的结构简介

本文所研究的波长可调谐激光器的结构示意图

\* 国家自然科学基金(批准号:60707007)、国家重点基础研究发展计划(批准号:2010CB328206)和国家高技术研究发展计划(批准号:2008AA01Z215)资助的课题.

<sup>†</sup>E-mail:bjtuly@163.com

图如图 1 所示. 其中 SG1 为光栅前镜, 而 SG2 为光栅后镜.

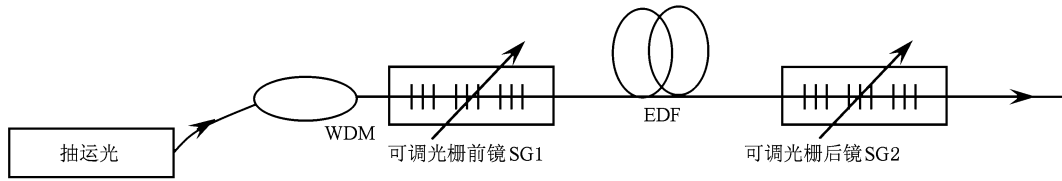


图 1 可选波长光纤激光器的结构示意图 SG: 取样光栅, EDF: 掺铒光纤

### 2.2. 激光器的数值仿真方法

对于这种结构激光器的仿真与传统线性腔激光器的仿真类似, 不同点是激光谐振腔的反射镜为具有多个反射峰的取样光纤光栅. 下面简要介绍本文采用的激光器的数值仿真方法, 重点阐述的是掺铒光纤放大特性的仿真以及考虑光栅的反射作用后激光器的仿真过程.

仅考虑光信号在掺铒光纤中单向传输的过程中, 速率方程理论是研究掺铒光纤放大特性的基本理论之一. 可以采用速率方程来描述铒离子上下能级间粒子的受激吸收、受激辐射和自发辐射, 并采用光传输方程来描述掺铒光纤中的光强分布. 对应于铒离子二能级系统中的粒子数反转比  $N_2$  以及第  $k$  束光通过掺铒光纤的传输方程可以表示为<sup>[12,13]</sup>:

$$N_2 = \frac{\bar{n}_2}{\bar{n}_1} = \frac{\sum_k \frac{P_k(z) \alpha_k}{h\nu_k \zeta}}{1 + \sum_k \frac{P_k(z) (\alpha_k + g_k)}{h\nu_k \zeta}}, \quad (1)$$

$$\frac{dP_k}{dz} = u_k (\alpha_k + g_k) \frac{\bar{n}_2}{\bar{n}_1} P_k + u_k g_k \frac{\bar{n}_2}{\bar{n}_1} m h \nu_k \Delta \nu_k - u_k (\alpha_k + l_k) P_k, \quad (2)$$

其中  $\bar{n}_1$  是掺铒光纤的平均铒离子粒子数,  $\bar{n}_2$  是处于

亚稳态的平均铒离子粒子数;  $\alpha_k$  为吸收系数,  $g_k$  为发射系数,  $l_k$  为光纤的背景损耗,  $\zeta$  是饱和参数, 光纤的特性可以完全由这四个参数表征, 它们通常被统称为 Giles 参数;  $h$  是普朗克常量;  $\nu_k$  是第  $k$  束光的频率;  $u_k$  表示了光传输的方向,  $u_k = 1$  表示向前,  $u_k = -1$  表示向后;  $\Delta \nu_k$  表示放大的自发辐射噪声 (ASE) 影响的带宽;  $m$  的数值表示模式数, 一般取 2, 因为对于单模光纤只允许传输  $LP_{01}$  模, 只能有两个正交的偏振方向.

如果同时考虑掺铒光纤在放大过程中产生的前向和后向 ASE, 由于后向 ASE 噪声不能预先确定, 所以上述方程不能直接用四阶 Runge-Kutta 法求解, 可以采用具有两端边值的松弛迭代法进行求解.

以上是对激光器中掺铒光纤放大特性的仿真, 对于本文研究的这种激光器, 利用取样光纤光栅作为反射腔镜且作为选频元件, 其边界条件为 (如图 2 所示)

$$P_L^+(0, \lambda) = R_1(\lambda) \cdot P_L^-(0, \lambda), \quad (3)$$

$$P_L^-(L, \lambda) = R_2(\lambda) \cdot P_L^+(L, \lambda), \quad (4)$$

其中 0 和  $L$  分别对应于激光谐振腔的两端,  $R_1(\lambda)$ ,  $R_2(\lambda)$  分别是光栅前镜 SG1 和光栅后镜 SG2 在所考察波长处的反射率.

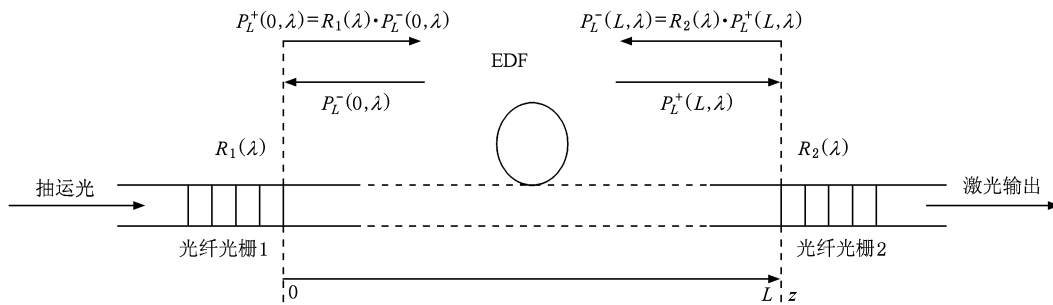


图 2 DBR 结构掺铒光纤激光器的边界条件示意图

对此类激光器进行仿真时, 可采用如下方法:

1) 设初始条件为  $P_L^+(0, \lambda) = 0, P_L^-(L, \lambda) = 0$ ,

$$P_L^+(0, \lambda_p) = P_{\text{pump}};$$

2) 固定  $P_L^-(z, \lambda) = 0$ , 利用松弛法推出  $P_L^+(z, \lambda)$ ; 固定  $P_L^+(z, \lambda)$  不变, 反向推出  $P_L^-(z, \lambda)$ ;

3) 重设初始条件, 令  $P_L^+(0, \lambda) = R_1(\lambda) \cdot P_L^-(0, \lambda)$ ,  $P_L^-(L, \lambda) = R_2(\lambda) \cdot P_L^+(L, \lambda)$ ,  $P_L^+(0, \lambda_p) = P_{\text{pump}}$ ;

4) 再重复第 2 步过程, 反复循环计算, 直至前后两次误差小于设定误差即可, 所监视参数可以是激光腔内前后向功率  $P_L^+(z, \lambda)$ ,  $P_L^-(z, \lambda)$ , 也可以是每次循环后得到的粒子数反转比  $N_2$ ;

5) 激光输出稳定后功率为  $P_{\text{out}}(\lambda) = (1 - R_2(\lambda)) \cdot P_L^+(L, \lambda)$ .

### 2.3. 激光器输出特性的仿真与分析

这种激光器的激光输出特性及激光波长的调谐特性受到很多因素的影响, 如取样光纤光栅的反射率, 取样波长间隔, 前后取样光纤光栅的波长间隔差, 或者取样光纤光栅的取样周期差等等. 下面对激光器的输出特性在这些因素影响下的变化规律进行分析.

图 3 中给出了利用上述方法仿真得到的激光器输出激光的光谱图, 从图中可以看出与普通 DBR 激光器相比, 此类激光器会有比较多的边瓣, 边瓣的存在会使激光器的边模抑制比下降, 这些边瓣是由掺铒光纤产生的后向 ASE 被取样光纤光栅前镜反射至输出端口所致.

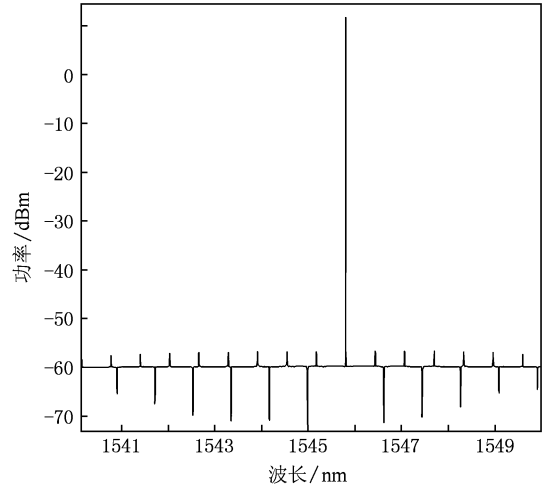


图 3 仿真得到的激光器输出激光光谱图

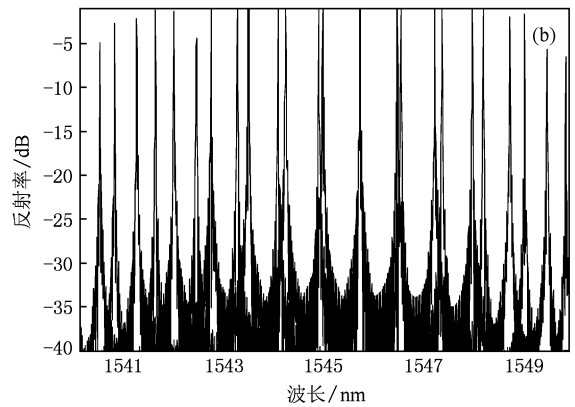
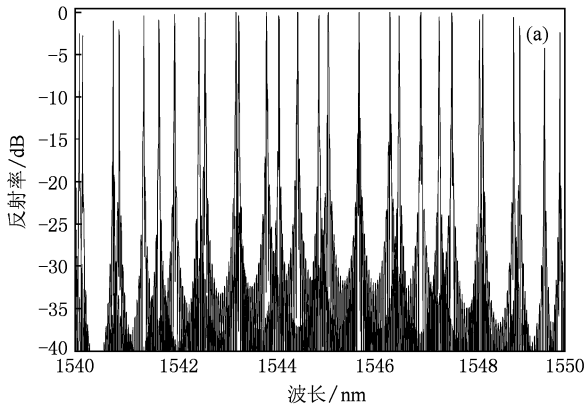


图 4 取样周期不同的两组取样光栅 (a)  $M=0.182$ , (b)  $M=0.584$

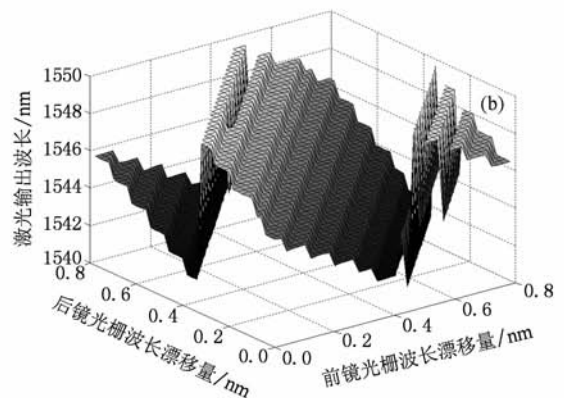
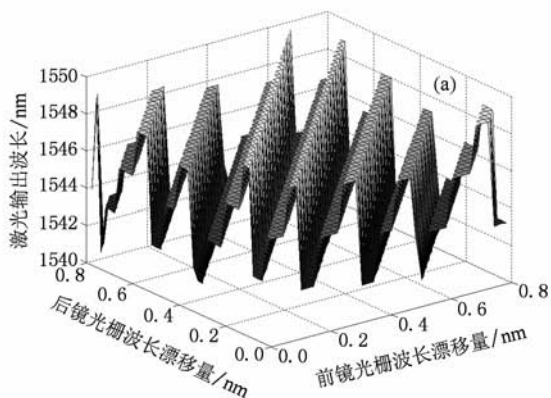


图 5 分别利用图 4 所示取样光栅作为激光器腔镜获得的激光输出波长随光栅波长的调谐特性 (a) 对应图 4(a), (b) 对应图 4(b)

通过改变光栅前镜和后镜的反射波长,可以仿真获得激光器的输出功率、SMSR 以及输出波长随着光栅反射波长的变化关系,也即在对激光器进行波长调谐时可以获得激光器输出变化的动态过程. 本文对比研究了激光器的光栅腔镜具有不同反射特性的两种情况,光栅的反射谱分别如图 4(a)和(b)所示. 从图 5 中可以看出,后镜光栅的波长变化范围为 0.8 nm 时,激光器的输出波长就可以获得约 8 nm 的波长调谐量,激光器的波长调谐能力正是因为 Vernier 调谐机理的引入而得到大幅提高;另外,对比图 5(a)和(b)中波长变化的阶梯状趋势可以

看出,以同样的光栅波长调谐量,图 5(b)所对应的激光器可以获得更多波长的激光输出,主要是因为相比于图 5(a),图 5(b)所对应的激光器中前后镜光栅组的反射波长在很大的波长范围内都没有第二对波长相对应,所以在对光栅的波长进行连续调节的时候,在很大波长范围内都不会出现第二个波长的激光,可以利用前后镜光栅反射波长间隔的最小公倍数  $M$  来对这种波长的调谐能力做简单衡量,如图 4(a)对应的  $M$  约为 0.182,而图 4(b)对应的  $M$  约为 0.584. 图 6 中给出了相应波长调谐量对应的激光输出的功率特性.

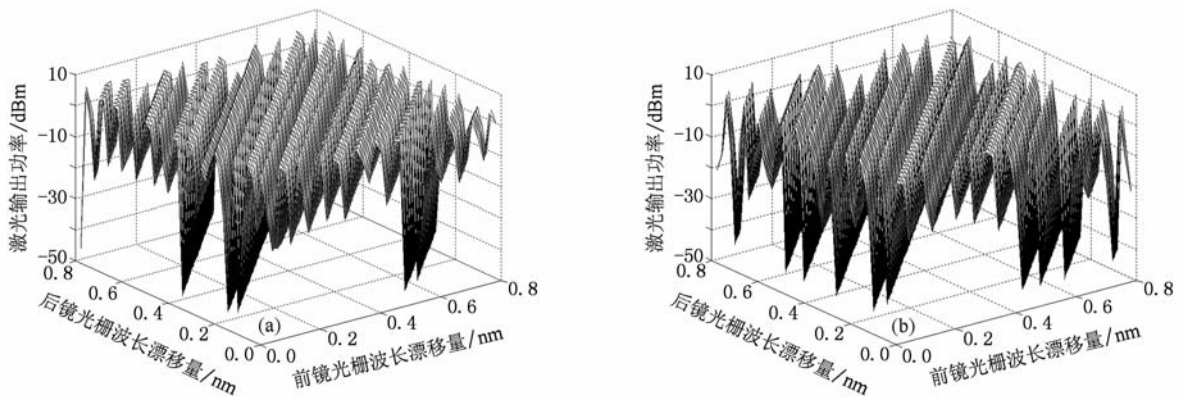


图 6 分别利用图 4 所示取样光栅作为激光器腔镜获得的激光输出功率随光栅波长的调谐特性 (a)对应图 4(a), (b)对应图 4(b)

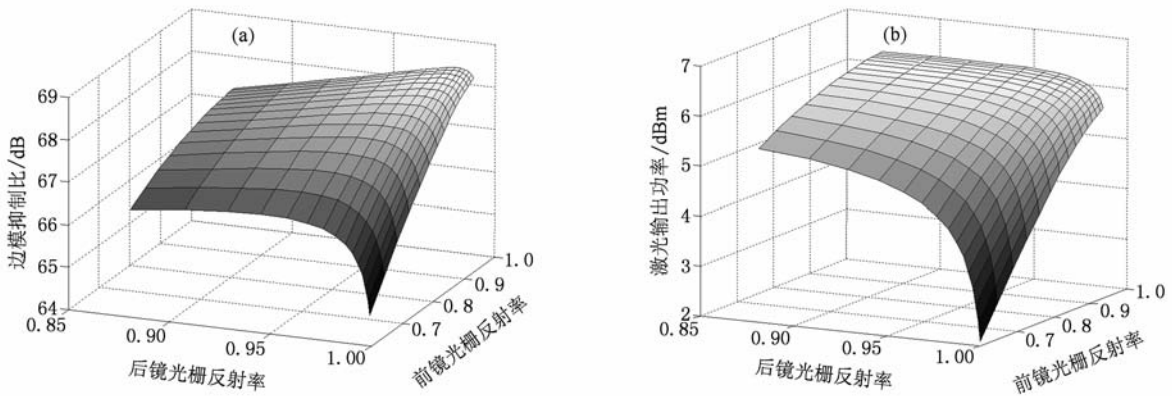


图 7 激光器边模抑制比(SMSR)及输出功率随前后光栅腔镜反射率的变化 (a)激光器 SMSR 随前后光栅腔镜反射率的变化关系, (b)激光器输出功率随前后光栅腔镜反射率的变化关系

通过改变前镜光栅和后镜光栅的反射率,可以获得激光器 SMSR 以及输出功率随光栅反射率的变化关系,如图 7 所示,图中的反射率值为取样光栅的最大反射率. 对比图 7 中(a)和(b)两图可以看出,在图中所考察的反射率范围内 ( $R_1 > 0.88, R_2 > 0.62$ ),当两光栅的反射率都较高时,激光器可以获

得较大的输出功率以及较大的 SMSR,但是随着  $R_1$  以及  $R_2$  增大到一定程度,激光器 SMSR 增大的趋势将会发生逆转.  $R_1$  不变,  $R_2$  增大到一定程度后,会使激光器的输出功率下降,所以 SMSR 减小,而  $R_2$  不变,  $R_1$  增大到一定程度后,由于光栅前镜对掺铒光纤上产生的后向 ASE 的反射作用增强,导致激光

器的边模功率增加,所以 SMSR 也会减小,此特点是这种激光器明显不同于普通 DBR 激光器之处,也是在设计此类激光器时必须要考虑的因素之一.

### 3. 实 验

实验所用的取样光栅是采用取样掩模板加相位掩模板在氢载光纤上通过紫外曝光写入的. 所制作的前镜光栅以及后镜光栅的反射谱如图 8 所示,反射峰之间的波长间隔分别约为 0.79 和 0.41 nm. 采用固定后镜光栅波长,调谐前镜光栅波长的方式可以较容易地实现波长的准连续调节,获得十几个波长的激光输出,其中一个波长的激光光谱以及多波长的激光光谱分别如图 9 所示. 激光波长的最小

间隔与后镜光栅反射峰的波长间隔基本一致,约为 0.41 nm. 前镜光栅的波长调谐由轴向拉力控制装置手动调谐实现. 不过,通过仔细观察图 10 也可以发现,输出各波长激光的波长间隔不是严格一致,存在一定的偏差,究其原因是有波长调谐装置不够理想,调谐前镜光栅时的波长调谐精度不够高,使激光未能形成于前镜和后镜两光栅反射率都为最高的波长处,如能引入更为精密的光栅波长调谐装置,则结果有望进一步改进. 同时,各波长激光输出功率的均衡度也有待提高,均衡度的不理想可以主要归因于取样光栅各反射峰的反射率均衡度不够理想,如能采用类似于相位取样光纤光栅<sup>[14]</sup>的反射率更为均衡的取样光纤光栅,则这一特性参数将得到有效提高.

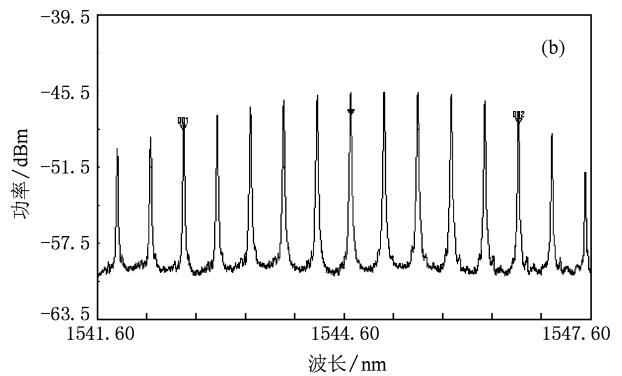
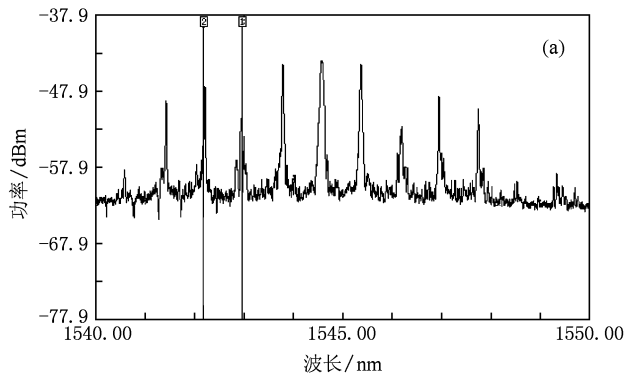


图 8 光栅反射谱 (a)前镜光栅反射谱, (b)后镜光栅的反射谱

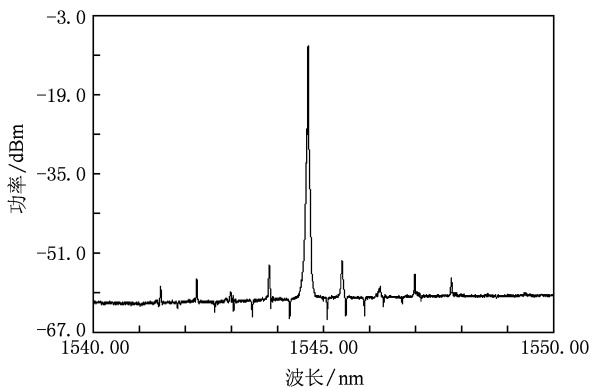


图 9 实验得到的其中一个激光的光谱

如果要想实现激光器波长的连续调谐,或者为了充分利用取样光栅中反射率较高的中间的几个反射峰来获得功率较高的激光输出时,也可以采用同时调节前后端取样光栅的方法,从而获得一定波长范围内任意波长位置处的激光输出,而且各波长激光输出功率的均衡度也会有所改善. 如果对激光器

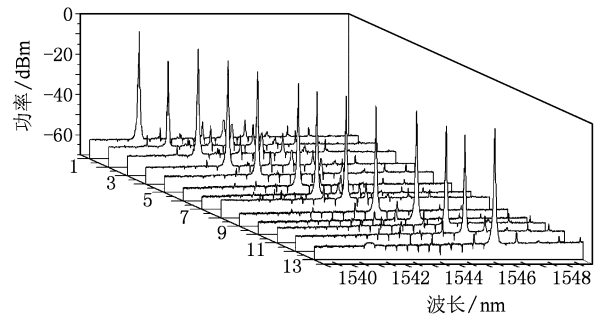


图 10 实验得到的 13 个波长的激光光谱

的波长调谐速度也有较高要求,可以采用电磁调谐或压电陶瓷调谐<sup>[15]</sup>等电控自动方式来实现自动快速的波长调谐及波长切换.

### 4. 结 论

建立了具有两个取样周期略有不同的取样光纤光栅反射镜的 Vernier 波长调谐机理的光纤 DBR 激光器

的数值仿真模型,对激光器的输出特性以及波长调谐特性进行了分析. 提出了对两取样光栅反射率的优化配置方案,可以使输出激光的边模抑制比有所提高;同时对波长调节方式也进行了探讨;并进行了实验研究.

仿真与实验结果表明,这种激光器可以利用光栅的较小调谐量获得很大的激光波长调谐量,同时,通过对光栅波长调节方式的优化,既可以实现波长的连续调节,又可以实现波长的准连续调节,十分灵活.

- [1] Bellemare A, Lemieux J F, Têtu M, LaRochelle S 1998 *European Conference on Optical Communication* Madrid September 20—24 153
- [2] Liaw S K, Lee C C, Ho K P, Chi S 1998 *Opt. Communi.* **155** 255
- [3] Feng X H, Liu Y G, Sun L, Yuan S Z, Kai G Y, Dong X Y 2005 *Chin. Phys.* **14** 779
- [4] Wang J, Zheng K, Li J, Liu L S, Chen G X, Jian S S 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7695 (in Chinese)[王静、郑凯、李坚、刘利松、陈根祥、简水生 2009 物理学报 **58** 7695]
- [5] Yang W, Liu Y, Xiao L F, Yang Z X, Pan J X 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1030 (in Chinese)[杨薇、刘迎、肖立峰、杨兆祥、潘建旋 2010 物理学报 **59** 1030]
- [6] Zhang X L, Zhang Y, Sun J Q, Liu D M, Huang D X 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2159 (in Chinese)[张新亮、张颖、孙军强、刘德明、黄德修 2003 物理学报 **52** 2159]
- [7] Bergonzo A, Jacquet J, De Gaudemaris D, Landreau J, Plais A, Vuong A, Sillard H, Fillion T, Durand O, Krol H, Accard A, Riant I 2003 *IEEE Photonics Technology Letters* **15** 1144
- [8] Dong S F, Zhan S B, Chen G F, Wang X H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3154 (in Chinese)[董淑福、占生宝、陈国夫、王贤华 2005 物理学报 **54** 3154]
- [9] Huang X J, Liu Y Z, Sui Z, Li M Z, Li X, Lin H H, Wang J J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1191 (in Chinese)[黄绣江、刘永智、隋展、李明中、李忻、林宏奂、王建军 2006 物理学报 **55** 1191]
- [10] Ren G J, Zhang Q, Wang P, Yao J Q 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3917 (in Chinese)[任广军、张强、王鹏、姚建铨 2007 物理学报 **56** 3917]
- [11] Sun J Q 1996 *Acta Phys. Sin.* **45** 1313 (in Chinese)[孙军强 1996 物理学报 **45** 1313]
- [12] Giles C R, Desurvire E 1991 *J. Lightwave Technol.* **9** 271
- [13] Yu Q 1999 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Tsinghua University) (in Chinese)[俞谦 1999 博士学位论文(北京:清华大学)]
- [14] Li H P, Sheng Y L, Li Y, Rothenberg J E 2003 *J. Lightwave Technol.* **21** 2074
- [15] Mohammad N, Szyszkowski W, Zhang W J, Haddad E I, Zou J, Jamroz W, Kruzelecky R 2004 *J. Lightwave Technol.* **22** 2001

## Output characteristics of wavelength tunable fiber lasers based on sampled Bragg gratings\*

Liu Yan<sup>†</sup> Wang Lei-Shi Tao Pei-Lin Feng Su-Chun Yin Guo-Lu Ren Wen-Hua

Tan Zhong-Wei Jian Shui-Sheng

1) (Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network of Ministry of Education, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

(Received 11 March 2010; revised manuscript received 20 April 2010)

### Abstract

A simulation model of the fiber DBR (distributed Bragg reflector) laser with two sampled Bragg gratings (SBGs) as reflectors is established, with which the characteristics of the laser are analyzed in detail. The analysis mainly focuses on the change of the laser output characteristics with the wavelength and reflectivity of the front and back sampled fiber gratings. Because of the multi-channel reflection of SBGs, the side mode of such laser is always very obvious. The method for improving the SMSR (side mode suppression ratio) is suggested. And the wavelength tuning mechanism is also studied. Experiment has been carried out to confirm the analysis.

**Keywords:** sampled fiber grating, fiber laser, wavelength tunable laser

**PACS:** 42.55. Wd, 42.60. - v, 42.60. Lh

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60707007), the National Basic Research Program of China (Grant No. 2010CB328206) and the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2008AA01Z215).

<sup>†</sup> E-mail: bjtuly@163.com