

基于全介质薄膜法布里-珀罗滤光片的 1550 nm 可调谐外腔半导体激光器

鲁远甫¹ 肖 啸³ 刘文权² 冯广智² 龚小竞² 于文龙² 时华锋²
李 娇² 金 雷² 焦国华¹ 吕建成¹ 于峰崎³

¹中国科学院深圳先进技术研究院光电工程技术中心, 广东 深圳 518055
²中国科学院深圳先进技术研究院生物光子学研究中心, 广东 深圳 518055
³中国科学院深圳先进技术研究院集成电子技术研究中心, 广东 深圳 518055

摘要 提出并实现了一台基于单腔全介质薄膜法布里-珀罗滤光片的 1550 nm 可调谐外腔半导体激光器。介绍了其内部的光学元件及其工作原理,随后对该半导体激光器的纵模输出特性进行了理论分析,搭建了该可调谐外腔半导体激光器。在不同的实验条件下,对该可调谐外腔半导体激光器在调谐过程中的输出波长、线宽及功率进行了实时同步测量。由所测数据总结出最佳实验条件,并得到了此条件下可调谐外腔半导体激光器的各相关参数。该可调谐外腔半导体激光器有一个线性的无跳模波长调谐区域(1547.203~1552.426)nm,一个稳定的输出光功率范围(40~50) μ W,以及一个稳定的输出单纵模分布、线宽范围(100~150)MHz。该可调谐外腔半导体激光器可用于环境监测、原子与分子激光频谱研究、精确测量等领域。

关键词 激光器;法布里-珀罗滤光片;外腔半导体激光器;1550 nm 激光;可调谐

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s102002

1550 nm Tunable External Cavity Semiconductor Laser Based on Single Cavity All-Dielectric Thin-Film Fabry-Perot Filter

Lu Yuanfu¹ Xiao Xiao³ Liu Wenquan² Feng Guangzhi² Gong Xiaojing² Yu Wenlong²
Shi Huafeng² Li Jiao² Jin Lei² Jiao Guohua¹ Lü Jiancheng¹ Yu Fengqi³

¹Engineering Center for Optoelectronic Technologies, Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen, Guangdong 518055, China
²Research Center for Biophotonics, Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen, Guangdong 518055, China
³Research Center for Integrated Electronics, Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen, Guangdong 518055, China

Abstract A 1550 nm linearly tunable external cavity semiconductor laser (ECSL) based on single cavity all-dielectric thin-film Fabry-Perot filter is proposed and realized here. Its internal optical components as well as their operation mechanisms are introduced one by one first, and then its longitudinal mode output characteristic is analyzed theoretically. At last, the experiment platform for the output characteristics measurement of the tunable ECSL is set up; under different experimental conditions and with optical spectrum analyzer, scanning Fabry-Perot interferometer versus laser power meter, accurate and real-time measurements for the output wavelength, output line-width and output power of the tunable ECSL during its tuning process are executed. The optimal experimental condition from the measured datum is summed up, and the tunable ECSL relevant parameters under this condition is obtained. The tunable ECSL will have a linear mode-hop-free wavelength tuning region of 1547.203~1552.426 nm, a stable output

收稿日期: 2012-02-15; **收到修改稿日期**: 2012-03-08

基金项目: 中国科学院功能晶体与激光技术重点实验室开放课题资助课题。

作者简介: 鲁远甫(1981—),男,博士,助理研究员,主要从事全固态激光器及其非线性频率变换等方面的研究。

E-mail: yf.lu@siat.ac.cn

optical power in the range of 40~50 μW , and a stable output longitudinal mode distribution of a single longitudinal mode with a line-width in the range of 100~150 MHz. This tunable ECDL could be used in the application of environmental monitoring, atomic and molecular laser spectroscopy research, precise measurements, and so on.

Key words lasers; Fabry-Perot filter; external cavity semiconductor laser; 1550 nm laser; tunable

OCIS codes 140.2020; 140.3600; 310.6805; 310.6860

1 引 言

在相干光通信、原子与分子激光光谱学、精确测量以及环境监测等领域,可调谐外腔半导体激光器(ECSL)都发挥着十分重要的作用^[1]。当前,可调谐外腔半导体激光器中的两类主流结构是 Littrow 结构^[2~7]与 Littman-Metcalf 结构^[8~11],它们均采用衍射光栅作为色散元件。此外,还有其他包含不同类型色散元件的可调谐 ECSL 结构,如包含法布里-珀罗标准具^[12,13]、声光滤波器^[14,15]、电光滤波器^[16,17]等色散元件的可调谐 ECSL 结构。然而,基于法布里-珀罗标准具的可调谐 ECSL,其在应用领域的普及程度远远不及 Littrow 结构与 Littman-Metcalf 结构的可调谐 ECSL。一个相当主要的原因在于,早期空气隙标准具的性能不够好,且很难找到一个简单并有效的外腔调谐机制,以使得标准具的通带中心波长与某一个外腔纵模波长保持同步的改变。由于薄膜光学的发展,人们可以用一个由薄膜涂镀技术制造的高性能固体标准具来替代空气隙标准具。本文提出了一台基于单腔全介质薄膜法布里-珀罗滤光片的 1550 nm 单模窄线宽波长线性可调谐外腔半导体激光器^[18],其采用的单腔全介质薄膜法布里-珀罗滤光片正是一个由薄膜涂镀技术制造的高性能固体标准具。该可调谐 ECSL 采用了一种

新型的外腔调谐机制来实现色散元件(单腔全介质薄膜法布里-珀罗滤光片)的透射光中心波长与某个外腔纵模波长的同步变化。

2 1550 nm 可调谐 ECSL 的结构

激光器的结构如图 1 所示。将一个直径为 20 mm 的圆形单腔全介质薄膜法布里-珀罗滤光片插入到 ECSL 的外腔内,该滤光片垂直于水平面,但不垂直于光轴,它能够绕着自身的中心支点旋转。在该滤光片的一侧,涂镀有一层减反膜;在其另一侧,涂镀有一层膜系结构为 $\text{Air} | (\text{HL})^7 \text{H} - 2\text{L} - \text{H} (\text{LH})^7 | \text{Glass}$ 的薄膜涂层,其中“H”是折射率为 2.06 的高折射率介质 Ta_2O_5 层,“L”是折射率为 1.46 的低折射率介质 SiO_2 层,“Glass”是折射率为 1.5168 的基板介质 K9 玻璃。未考虑上述任何折射材料的色散,因为所研究的波段范围相对较小且上述折射材料在 1550 nm 附近的色散较低。同时,“H”层、“L”层、与“Glass”基板的物理厚度分别为 193.57、273.12、2 mm。该可调谐 ECSL 中的光源是一种特殊的激光二极管,被称为反射式半导体光放大器(RSOA),型号为 IPSAD1501-3500,由美国 INPHENIX 公司制造;在它的一侧,涂镀有一层反射率约为 90% 的高反膜,在其另一侧,涂镀有一层

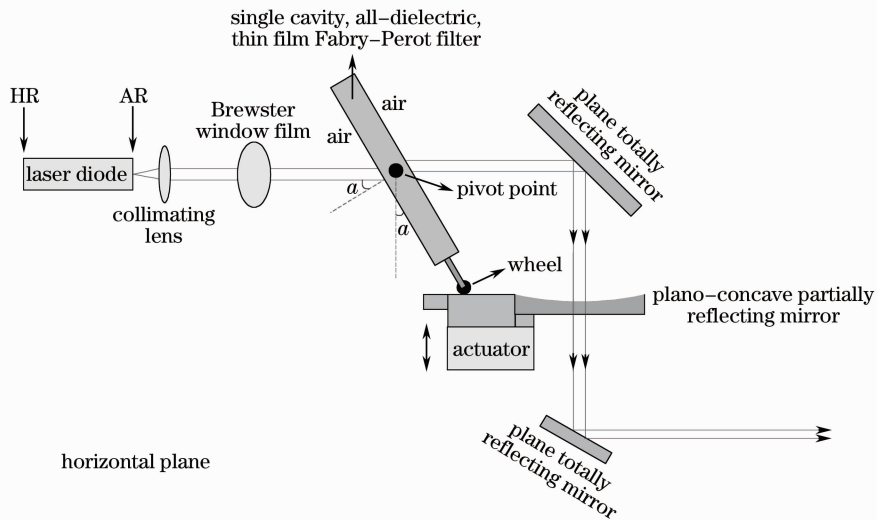


图 1 基于单腔全介质薄膜法布里-珀罗滤光片的 1550 nm 可调谐 ECSL 的原理结构图

Fig. 1 Schematic structure of the 1550 nm CW tunable ECSL based on single cavity all-dielectric thin film Fabry-Perot filter

反射率小于 0.01% 的减反膜；该 RSOA 的输出光束将从其涂镀有减反膜的一侧发射出来，且准直透镜也涂镀上了减反膜；该 RSOA 的输出光的中心波长为 1550 nm，3 dB 带宽为 60 nm，峰值波长处的小信号增益为 25 dB，且 RSOA 的阈值电流为 15 mA；该 RSOA 的输出功率典型值为 2 mW，其偏振相关增益为 12 dB，且其工作温度始终由热电制冷器 (TEC) 控制在 25 °C。由于 RSOA 的偏振相关增益为 12 dB，其输出主要是 TE 偏振光 (偏振方向垂直于水平面)，此外还有少量的 TM 偏振光 (偏振方向平行于水平面)。为了保证该可调谐 ECSL 的输出为纯的 TE 偏振光，将一块圆形的布儒斯特窗片插入到该可调谐 ECSL 的外腔中，以让 TE 偏振光通过，TM 偏振光被反射走。布儒斯特窗片由未镀膜的 K9 玻璃制成，直径为 20 mm，物理厚度为 2 mm，其所在平面与水平面的交线垂直于光轴，且该窗片与水平面的夹角为 33.4°，刚好使得 RSOA 的输出光束能以布儒斯特角 (56.6°) 的大小入射到该窗片上。在该可调谐 ECSL 的结构中，有两片相同的圆形平面全反射镜，当 RSOA 的输出光束以 45° 角入射到它们表面上时，它们的反射率均为 100%。在该可调谐 ECSL 的结构中，还配置有一片圆形的平凹部分反射镜，它垂直于光轴，由 K9 玻璃制成，直径为 25.4 mm；该平凹部分反射镜凹面部分的曲率半径为 500 mm，且在其上涂镀有一层部分反射膜，而在该平凹部分反射镜的平面部分则涂镀有一层减反膜；对于 RSOA 的输出光束而言，使用反射率为 60%、70%、80% 和 90% 的 4 种腔镜进行实验。

因此，RSOA 涂镀有高反膜的一侧与平凹部分反射镜的凹面构成了该可调谐 ECSL 的谐振腔。由激光谐振腔的原理可知，外腔纵模波长会随着外腔往返光程长度的改变而线性变化，当外腔往返光程长度减小时，外腔纵模波长会变短。然而，过长的腔长会使得纵模间的自由频谱范围减小，从而产生较高的纵模频谱密度。在光源的增益宽度下存在若干个纵模，将导致激光器产生多纵模输出或激光跳模的现象。为了滤除不想要的激光纵模，将一片上述的单腔全介质薄膜法布里-珀罗滤光片插入到可调谐 ECSL 的外腔中，利用滤光片的窄光谱透射带来筛选出单个想要的纵模。同时，理论研究表明，对于 1550 nm 波段范围内的 TE 偏振光而言，单腔全介质薄膜法布里-珀罗滤光片的光强峰值透射率波长与入射到其上的 TE 光的入射角余弦之间呈准线性关系，即随 TE 光入射角的增大，其余弦值逐渐减

小，滤光片的光强峰值透射率波长随余弦值线性地减小^[19]。因此，如果外腔往返光程长度的减小与 TE 光入射角余弦的减小能够同步进行，则通过一个合理的结构设计，这两个过程可以紧密地配合，从而产生出一个实质的无跳模激光波长调谐。

如图 1 所示，该可调谐 ECSL 使用了一个致动器来同时控制外腔长度与入射到滤光片上的光束入射角的改变。假定致动器的初始位置是入射到滤光片上的光束入射角为零时的位置，当致动器由初始位置开始向前运动时，外腔长度开始减小，且某个单纵模波长也随之线性减小；同时，由于致动器抵着“wheel”向前推进，它将驱动滤光片绕着自身的中央支点逆时针旋转，从而促使入射到滤光片上的光束入射角增大，入射角余弦减小，滤光片的光强峰值透射率波长将随入射角余弦准线性减小。若中央支点中心到“wheel”中心的距离被合理设置，则滤光片的光强峰值透射率波长会与某个给定的外腔纵模波长在一个有意义的范围内匹配得相当好，以获得无跳模激光波长调谐性能。

在上面所讨论的可调谐 ECSL 的结构中，设定中央支点中心到“wheel”中心的距离 L 为 81 mm，且初始位置时的外腔往返光程长度 L_{OP}^0 为 449.9 mm。通过理论计算，当致动器由初始位置开始向前推进时，对于 TE 偏振光而言，滤光片的光强峰值透射率波长所对应的分数 (纵) 模数将先增大后减小，如图 2 所示。图 2 中的曲线顶部有一个有限的平坦区域，其对应的分数 (纵) 模数是保持不变的，这表明，只有在该平坦区域内，TE 偏振光对滤光片的光强峰值透射率

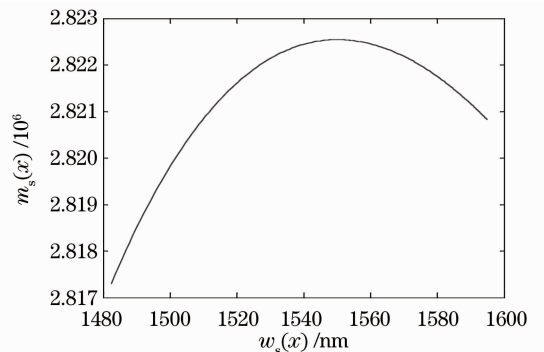


图 2 TE 偏振光对滤光片的光强峰值透射率波长与它所对应的分数 (纵) 模数之间的关系。入射到滤光片上的 TE 偏振光的入射角变化范围为 0~37°， $L=81$ mm， $L_{OP}^0=449.9$ mm

Fig. 2 Relationship between $\omega_s(x)$ and $m_s(x)$. The TE wave incident angle at s-AFPF varies from 0 ~ 37°, $L=81$ mm, $L_{OP}^0=449.9$ mm

波长才有可能与某个固定的外腔纵模的波长保持同步的变化,该区域也因此被称为无跳模波长调谐区域;理论上,无跳模波长调谐区域覆盖着 1547.3~1552.6 nm 的范围,相应的致动器由初始位置开始向前运动的位移量为 5.9~6.7 mm,且被锁定与输出的外腔纵模的模数为 282 和 254。若令致动器由初始位置开始向前运动的位移量为 x ,TE 偏振光对滤光片的光强峰值透射率波长为 $\omega_s(x)$,TE 偏振光对滤光片的光强峰值透射率波长所对应的分数(纵)模数为 $m_s(x)$,则在图 2 中曲线顶部的平坦区域内, x 、 $\omega_s(x)$ 与 $m_s(x)$ 的理论仿真值见表 1。

表 1 在图 2 中曲线顶部的平坦区域内, x 、 $\omega_s(x)$ 与 $m_s(x)$ 的变化情况

Table 1 Variation of x , $\omega_s(x)$, and $m_s(x)$ in the flat region on top of the curve in Fig. 2

x /mm	$\omega_s(x)$ /nm	$m_s(x)$
5.898108	1552.6	282253.8
6.004483	1551.9	282254.1
6.111771	1551.1	282254.3
6.219972	1550.3	282254.4
6.329085	1549.6	282254.3
6.439107	1548.8	282254.2
6.550038	1548.0	282254.0
6.661875	1547.2	282253.6

3 1550 nm 可调谐 ECSL 的输出性能测试

对于前面提及的 1550 nm 可调谐 ECSL,其输

出性能的测试是指对其波长调谐、纵模模式、输出功率这三个指标所进行的测量。

其中,输出波长与输出功率的测试原理图如图 3(a)所示。在该可调谐 ECSL 的外部使用了一片平面部分反射镜将激光器的输出激光束分割成两部分:一部分先经过一个平面全反射镜组的反射,然后进入光学频谱分析仪;另一部分则先经过一个平面全反射镜的反射,然后进入激光功率计的探头。对于入射角为 45° 、波段范围在 1550 nm 附近的入射光来说,上述平面部分反射镜的反射率接近 90%。光学频谱分析仪由德国 Bruker 公司制造,为 VERTEX 80V 真空傅里叶变换-红外光谱仪,由于缺乏合适的波长计,用它来测量激光器的输出激光波长;使用以色列 Ophir 公司制造的 NOVA II 激光功率表头及 PD300-IR 激光功率探头来监测激光器的输出功率。

同时,输出线宽及纵模模式的测试原理图如图 3(b)所示。同样使用一片平面全反射镜,将激光器的输出激光束反射到一片焦距为 200 mm 的会聚透镜上,经会聚透镜聚焦后,激光束进入到一台扫描法布里-珀罗干涉仪中,会聚透镜的焦点大致位于该扫描法布里-珀罗干涉仪的腔体中心处。该扫描法布里-珀罗干涉仪由美国 Thorlabs 公司制造,它由扫描法布里-珀罗干涉仪 SA200-12B 与扫描法布里-珀罗控制器 SA201 组成,用来测量激光器的输出线宽及纵模模式。

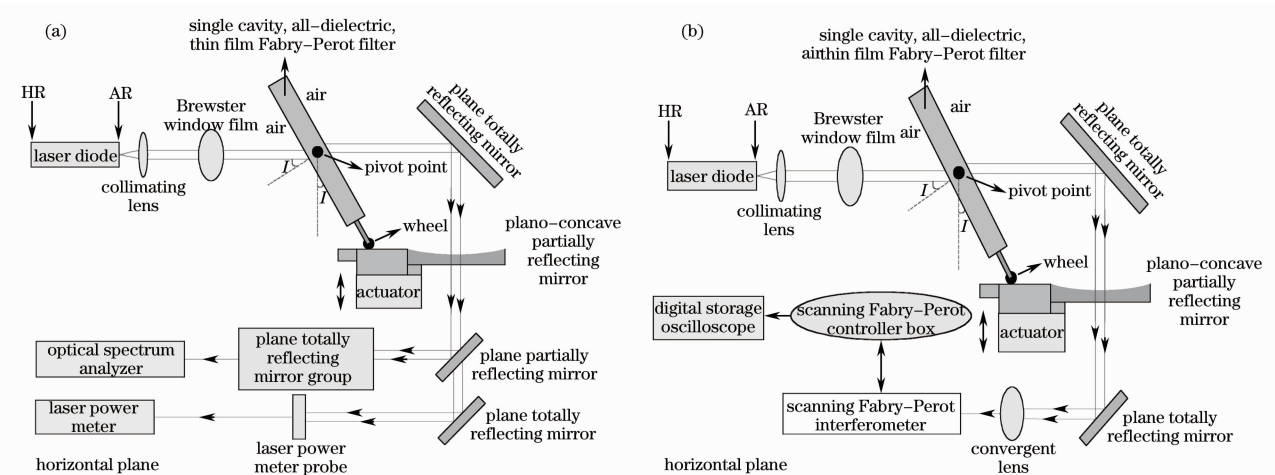


图 3 基于单腔全介质薄膜法布里-珀罗滤光片的 1550 nm 可调谐 ECSL 的输出性能测试原理图。(a)输出波长及输出功率的测试原理图;(b)输出纵模模式及线宽的测试原理图

Fig. 3 Schematic diagram for the output characteristics measurement of 1550 nm tunable ECSL based on s-AFPF. (a) Output central wavelength versus output optical power measurement of 1550 nm tunable ECSL; (b) output longitudinal mode distribution and line-width measurement of 1550 nm tunable ECSL

在该可调谐 ECSL 的输出性能测试的过程中，设定室温为 25 °C，相对湿度 RH 为 60%；RSOA 的驱动电流为 230 mA；对于 RSOA 的输出光束，平凹部分反射镜凹面部分的反射率分别为 60%、70%、80% 和 90%；其他实验条件及参数与相同。

随着致动器由初始位置开始向前运动的位移量 x 的改变，1550 nm 可调谐 ECSL 的实际输出中心波长 λ 与输出光功率 p 也将发生变化。令 x 的取值范围为 5.9~6.7 mm，取值间隔为 0.04 mm，且平凹部分反射镜凹面部分的反射率依次为 60%、70%、80% 和 90%。则能够绘制出图 4(a) 中的“ $\lambda-x$ ”曲线与图 4(b) 中的“ $p-x$ ”曲线，从中可以看到，“ $\lambda-x$ ”曲线与“ $p-x$ ”曲线均会随着激光器的平凹输出镜的反射率的不同而不同。图中的 1、2、3、4 分别代表反射镜反射率为 60%、70%、80% 和 90% 的

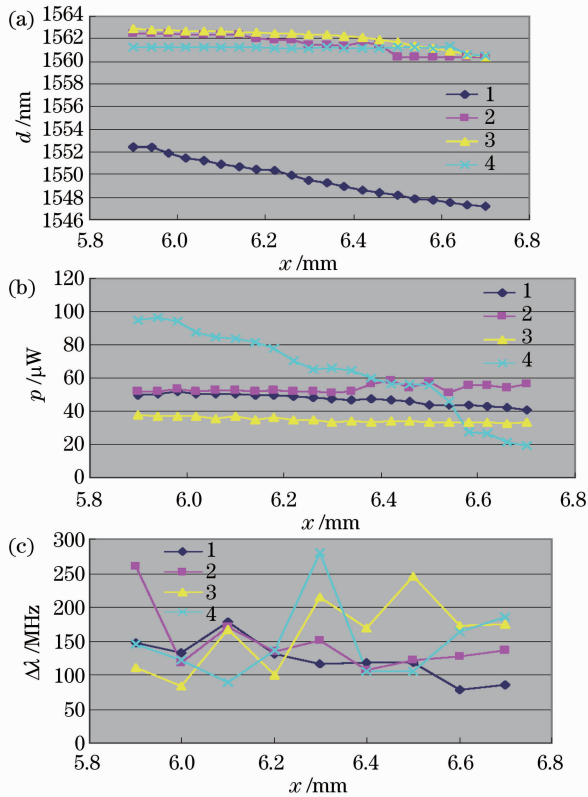


图 4 基于单腔全介质薄膜法布里-珀罗滤光片的 1550 nm 可调谐 ECSL 的输出性能测试曲线。(a) 输出中心波长随致动器位移量的变化；(b) 输出光功率随致动器位移量的变化；(c) 输出纵模线宽随致动器位移量的变化

Fig. 4 Output characteristics measurement result of the tunable ECSL. (a) Output central wavelength measurement result; (b) output optical power measurement result; (c) output longitudinal mode line-width measurement result

情况。

随着 x 的改变，可调谐 ECSL 的输出纵模分布与线宽 $\Delta\lambda$ 也在发生着改变。令 x 的取值范围为 5.9~6.7 mm，取值间隔为 0.1 mm，且平凹部分反射镜凹面部分的反射率依次为 60%、70%、80% 和 90%。则能够绘制出图 4(c) 中的“ $\Delta\lambda-x$ ”曲线，从中可以看到，“ $\Delta\lambda-x$ ”曲线也会随着激光器的平凹输出镜的反射率的不同而不同。

此外，图 5 (彩图见网络电子版) 给出了在平凹部分反射镜凹面部分的反射率依次为 60%、70%、80% 和 90% 的情况下，该可调谐 ECSL 的输出纵模模式随致动器位移量变化的测试波形图。图中，激光器的输出纵模模式 (黄色波形图) 是由扫描法布里-珀罗干涉仪所测得的，扫描法布里-珀罗干涉仪外加的周期性锯齿波电压 (绿色波形图) 驱动着其内部的压电致动器往复运动，从而使其内部的腔镜间距发生周期性改变，以达到光波长扫描的目的。图 5 中，周期性锯齿波电压在一个周期内的上升沿刚好能使扫描法布里-珀罗干涉仪扫过两个自由频谱范围 (FSR)。因此，经由扫描法布里-珀罗干涉仪输出到示波器上显示的激光纵模模式为两个重复的单纵模，其中任意一个即为激光器的实际输出纵模。

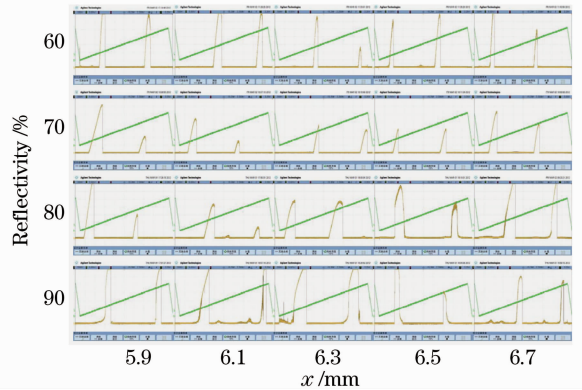


图 5 可调谐 ECSL 的输出纵模模式
Fig. 5 Measurement result of output longitudinal mode of the ECSL

4 结 论

由测试结果可以看出：1) 对于反射率为 60% 的平凹部分输出镜，当致动器位移量在 5.9~6.7 mm 的范围内变化时，激光器的输出波长将在 1547.203~1552.426 nm 的范围内呈现出基本的线性变化，与理论预测的情形相符合，激光器的输出功率将较为稳定地保持在 40~50 μ W 之间，激光器的输出纵模模式始终为单纵模，其线宽也较为稳定地保持在 100~

150 MHz 之间;2) 对于反射率为 70% 与 80% 的平凹部分输出镜,当致动器位移量在 5.9~6.7 mm 的范围内变化时,激光器的输出波长将较为稳定地保持在 1560~1563 nm 之间,激光器的输出功率也分别较稳定地保持在 50~60 μW 与 30~40 μW 之间,激光器的输出纵模模式均始终为单纵模,但线宽均有较大幅度的波动,不够稳定;3) 对于反射率为 90% 的平凹部分输出镜,当致动器位移量在 5.9~6.7 mm 的范围内变化时,激光器的输出波长将较为稳定地保持在 1560~1561 nm 之间,激光器的输出功率将在 100~20 μW 之间发生较大幅度的波动,激光器的输出纵模模式基本上始终为单纵模,但线宽有较大幅度的波动,还不够稳定。基于这些参数,可对该 1550 nm 单模窄线宽波长线性可调谐 ECSL 进行封装及定型。

参 考 文 献

- 1 C. Ye. Tunable External Cavity Diode Lasers[M]. Singapore: World Scientific Publishing Co Pte. Ltd. , 2004
- 2 M. de Labachellerie, G. Passedat. Mode-hop suppression of Littrow grating-tuned lasers[J]. *Appl. Opt.* , 1993, **32**(3): 269~274
- 3 M. Bagley, R. Wyatt, D. J. Elton *et al.*. 242 nm continuous tuning from a GRIN-SC-MQW-BH InGaAsP laser in an extended cavity[J]. *Electron. Lett.* , 1990, **26**(4): 267~269
- 4 H. Tabuchi, H. Ishikawa. External grating tunable MQW laser with wide tuning range of 240 nm[J]. *Electron. Lett.* , 1990, **26**(11): 742~743
- 5 F. Favre, D. Le Guen, J. C. Simon *et al.*. External-cavity semiconductor laser with 15 nm continuous tuning range[J]. *Electron. Lett.* , 1986, **22**(15): 795~796
- 6 F. Favre, D. Le Guen. 82 nm of continuous tunability for an

- external cavity semiconductor laser[J]. *Electron. Lett.* , 1991, **27**(2): 183~184
- 7 L. Levin. Mode-hop-free electron-optically tuned diode laser[J]. *Opt. Lett.* , 2002, **27**(4): 237~239
- 8 K. Liu, M. G. Littman. Novel geometry for single-mode scanning of tunable lasers[J]. *Opt. Lett.* , 1981, **6**(3): 117~118
- 9 I. Shoshan, N. N. Danon, U. P. Oppenheim. Narrowband operation of a pulsed dye laser without intra-cavity beam expansion[J]. *J. Appl. Phys.* , 1977, **48**(11): 4495~4497
- 10 M. G. Littman, H. J. Metcalf. Spectrally narrow pulsed dye laser without beam expander[J]. *Appl. Opt.* , 1978, **17**(14): 2224~2227
- 11 P. McNicholl, H. J. Metcalf. Synchronous cavity mode and feedback wavelength scanning in dye laser oscillators with gratings[J]. *Appl. Opt.* , 1985, **24**(17): 2757~2761
- 12 R. P. Salathe. Diode lasers coupled to external resonators[J]. *Appl. Phys.* , 1979, **20**(1): 1~18
- 13 M. G. Boshier, D. Berkeland, E. A. Hinds *et al.*. External cavity frequency-stabilization of visible and infrared semiconductor lasers for high resolution spectroscopy [J]. *Opt. Commun.* , 1991, **85**(4): 355~359
- 14 T. Hidaka, T. Nakamoto. Electric tuning of semiconductor laser using acousto-optic device[J]. *Electron. Lett.* , 1989, **25**(19): 1320~1321
- 15 G. A. Coquin, K. W. Cheung. Electronically tunable external-cavity semiconductor laser[J]. *Electron. Lett.* , 1988, **24**(10): 599~600
- 16 J. R. Andrews. Electronically tunable single-mode external-cavity diode laser[J]. *Opt. Lett.* , 1991, **16**(10): 732~734
- 17 G. Greiner, B. Boggs, T. Wang *et al.*. Laser frequency stabilization by means of optical self-heterodyne beat-frequency control[J]. *Opt. Lett.* , 1998, **23**(16): 1280~1282
- 18 H. A. Macleod. Thin-Film Optical Filters [M]. London: Institute of Physics, 1999
- 19 Xiao Xiao, Fengqi Yu. Investigation of a linearly tunable external cavity diode laser in a configuration with single cavity all-dielectric thin-film Fabry-Perot filter[J]. *Opt. Engng.* , 2011, **50**(3): 034201

栏目编辑:马 沂