

文章编号:1001-5078(2016)10-1225-05

· 激光器技术 ·

光纤光栅外腔半导体激光器频率调谐技术研究

高 源

(空军航空大学飞行基础训练基地基础部实验中心,吉林 长春 130000)

摘 要:在分析了光纤光栅外腔半导体激光器(FBG-ECL)基本特性的基础上,调研了适用于该类型激光器的频率调谐方法,包括温度调谐法和应力调谐法,选取轴向应力调谐法改变光纤光栅的布拉格中心波长,进而实现频率调谐。利用压电陶瓷(PZT)来对光纤光栅施加轴向应力,通过调整PZT驱动电压值的大小来控制光纤光栅布拉格中心波长的变化量。实验结果表明,对于波长1550 nm的光纤光栅激光器,当PZT的驱动电压增加到126 V时,可实现0.8 nm,即100 GHz的调谐范围以及每周期2 ms的调谐速度。

关键词:频率调谐;光纤光栅;压电陶瓷;轴向应力调谐;线性化校正

中图分类号:TN216 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2016.10.011

Study on frequency tuning technology of fiber Bragg grating external cavity semiconductor laser

GAO Yuan

(Aviation University Air Force, Flight Base Training Foundation of Experimental Center, Changchun 130000, China)

Abstract:Based on the analysis of the basic characteristics of fiber Bragg grating external cavity semiconductor laser (FBG-ECL), the frequency tuning methods for this type of lasers are investigated, including temperature tuning method and stress tuning method. The center wavelength of fiber Bragg grating is changed by the axial stress tuning method to realize the frequency tuning. The piezoelectric ceramic (PZT) was used to exert an axial stress on the grating, and the amount of change in the center wavelength of the fiber Bragg grating was controlled by adjusting PZT drive voltage. The experimental results show that, for the FBG-ECL with wavelength 1550 nm, when the PZT drive voltage adds up to 126 V, tuning range can reach 100 GHz and tuning speed can reach 2 ms per cycle.

Key words: frequency tuning; fiber grating; piezoelectric ceramics; axial stress tuning; linearization correction

1 引 言

随着光电技术的飞速发展,激光光学仪器得到了广泛的应用,而激光器作为影响仪器性能的重要因素,得到了众多学者和研究人员的关注。

本系统是大尺寸三维形貌测量项目中的一个分支,要求调谐频率100 GHz,即0.8 nm,调谐速度每周期2 ms,可见系统对调谐频率的要求较

高。本文主要针对激光器的频率调谐技术展开研究,摒弃声光调谐、电光调谐、磁光调谐、温度调谐、电流调谐等传统的调谐技术^[1-3],以压电陶瓷(PZT)作为调谐的核心部件。采用光纤光栅外腔半导体激光器作为光源,将激光器出射端的光纤光栅与PZT粘接,通过PZT驱动电路电压值的改变来带动光纤光栅的拉伸,实现波长调

作者简介:高 源(1982-),男,硕士,主要从事光电检测方面的研究。E-mail:gaoyuanhkdx@163.com

收稿日期:2016-01-31

谐,即频率调谐。

2 光纤光栅外腔半导体激光器调谐理论

2.1 光纤光栅外腔半导体激光器

光纤光栅外腔半导体激光器(FBG-ECL)是在半导体激光器的基础上,外加光纤光栅、反射镜、FP标准具等外光反馈元件组成的^[4]。其具有输出稳定性好、易于调谐、输出线宽窄、啁啾小、对外界工作环境要求低等优势,在很多领域都有着广泛的应用。例如:高分辨率的光谱分析、医疗诊断、大气污染监测、现场工艺监控等;如果该外腔半导体激光器的功率足够大的话,还可以用在材料加工、医学手术、军事领域当中;如果波长处于可见光波段,也可用于高分辨率印刷、投影显示等^[5]。因此,光纤光栅外腔半导体激光器在研究领域所引起的重视度越来越高。

正是因为该类型的激光器具有很好的动态单模特性,以及很窄的输出线宽。当对光纤光栅施加外部应力或者温度变化的时候,它的布拉格波长就会发生相应的变化,以此方式对输出波长进行调谐,波长调谐量的大小取决于光纤光栅的伸缩量。

2.2 调谐方法比较

本文选取的是光纤光栅外腔半导体激光器,而这一类型激光器的调谐方式主要有两种^[6],一种是温度调谐,另一种是应力调谐,其中应力调谐又包含轴向应力调谐和径向应力调谐两种。这些方法的宗旨都是通过改变光纤光栅布拉格中心波长,来实现激光器的调谐。

布拉格反射波长 λ_B 是评价光纤光栅性能的重要指标,可表示为:

$$\lambda_B = 2n_{eff} \cdot \Lambda \quad (1)$$

其中, n_{eff} 是光纤光栅的有效折射率; Λ 为光栅周期。若要达到对激光器波长调谐的目的,应使其布拉格波长 λ_B 发生改变。而由式(1)可知,光栅周期 Λ 和光栅的有效折射率 n_{eff} 均可改变布拉格波长 λ_B 。具体实施方式分别为:改变光纤光栅的温度和对光纤光栅施加外部应力。

2.2.1 温度调谐法

温度调谐法的原理^[7]是:将光栅放在温度调节器中,而激光器的其他部分要放置于恒温箱中,当温度调节器中的温度升高时,激光器波长变长,反之亦然。

当采用温度调谐法时,由于热胀冷缩及光纤材料的热光效应,光栅周期会随温度的升高而增加,引

起波长 λ_B 向长波方向微量移动,其具体偏移量 $\Delta\lambda_r$ 为:

$$\Delta\lambda_r = [(\alpha + e) \cdot \Delta T] \cdot \lambda_B \quad (2)$$

式中, α 为光纤的热膨胀系数; $e = \frac{dn}{dT}/n$ 为光纤的热光系数; n 为光纤光栅的折射率; ΔT 为温度变化量。如果是采用典型的石英光纤,则有:

$$\frac{\Delta\lambda_r}{\lambda_B \cdot \Delta T} = 6.67 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \quad (3)$$

通过查找光纤特性参数可得, λ_B 为1550 nm的光纤,其温度敏感性仅为0.01034 nm/ $^\circ\text{C}$ 。若要达到1 nm的调谐范围,通过式(3)计算可知,温度需要变化100 $^\circ\text{C}$,如此高的一个温度对整个测试系统的可行性是一个考验,而且高温时,控制系统也极其复杂。因此,这种调谐方式的调谐范围较窄,且不能进行连续调谐,也无法实现更精密的测量,不适用于本系统。

2.2.2 应力调谐法

应力调谐法包括轴向应力调谐和径向应力调谐。轴向应力调谐法的原理^[8]是:将光纤光栅靠近激光器的一端与激光器耦合,构成一个不可移动的外腔,再使用步进电机对光纤光栅的另一端进行拉伸。而径向应力调谐法的原理是:在光栅外部包装保护装置,径向压力通过该保护装置施加到光栅上。

采用应力法进行调谐时,可以通过光纤沿轴向和径向的伸缩,来改变光栅周期和光纤的有效折射率。其原因除了光纤伸缩本身,还有光弹效应。这些因素都会使布拉格波长 λ_B 发生偏移,其具体偏移量 $\Delta\lambda_B$ 为:

$$\Delta\lambda_B = \left\{ \varepsilon_1 - \frac{n^2}{2} [p_1 \varepsilon_2 + p_2 (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)] \right\} \cdot \lambda_B \quad (4)$$

式中, ε_1 和 ε_2 分别表示沿光纤轴向的应变和沿光纤径向的应变; p_1 和 p_2 为光弹张量的Pockel系数。当光纤光栅施加的应变是各向同性的、且均匀的时候,式(4)可简化为:

$$\Delta\lambda_B = (1 - p_e) \cdot \varepsilon \cdot \lambda_B \quad (5)$$

式中, ε 为光纤光栅的应变变量; p_e 为光弹性常数,且有:

$$p_e = \frac{n^2}{2} \cdot [p_2 - \mu \cdot (p_1 + p_2)] \quad (6)$$

式中, μ 为泊松系数。若是典型的石英单模光纤,则光弹性常数 $p_e = 0.22$ 。因此,当波长 λ_B 为1550 nm时,由式(5)可以计算出,光纤光栅的应变敏感性为

0.0012 nm/ $\mu\epsilon$ 。如果对光纤光栅施加应变,应用最多的两种方式分别为:轴向拉伸和径向拉伸,其具体原理如图 1 所示。

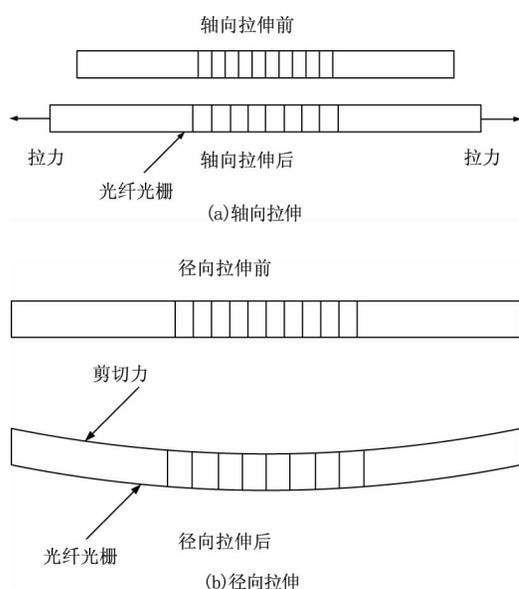


图 1 光纤光栅拉伸示意图

Fig. 1 Fiber grating drawing schematic

光纤光栅的轴向拉伸如图 1(a)所示,其调谐范围 $\Delta\lambda_1$ 为:

$$\Delta\lambda_1 = 0.78\varepsilon \cdot \lambda_B = 0.78 \cdot \frac{\Delta L}{L} \cdot \lambda_B \quad (7)$$

其中, ΔL 为轴向伸缩量; L 为布拉格光栅长度。从式(7)可以分析出,调谐范围 $\Delta\lambda$ 与伸缩量 ΔL 成正比,而与光栅长度 L 成反比。

光纤光栅的径向拉伸如图 1(b)所示,其调谐范围 $\Delta\lambda_2$ 为:

$$\Delta\lambda_2 = 0.78\varepsilon \cdot \lambda_B = 0.78 \cdot \frac{d^2}{2D^2} \cdot \lambda_B \quad (8)$$

其中, d 为径向拉伸范围; D 为被拉伸的光纤长度。从式(8)可以分析出,调谐范围 $\Delta\lambda$ 正比于径向拉伸范围的平方 d^2 ,反比于被拉伸光纤长度的平方 D^2 。

通过对式(7)和(8)的分析可以总结出:对于光纤光栅而言,无论是进行轴向拉伸还是径向拉伸,只要是拉伸状态,就会是使光纤光栅的布拉格波长向长波方向变化;相反,如果采用轴向压缩或径向压缩,则可以使布拉格波长向短波方向移动。

大量实验证明,相对温度调谐法而言,轴向应力调谐法最多能实现 5 nm 的波长偏移,具有结构简单、调谐范围宽、易于实现等优势。而径向应力调谐法的调谐范围窄,当对中心波长为 1550 nm 的光纤光栅进行 1 nm 范围的径向应力调谐时,其压力需要变化至少 300 MPa,这么大的压力操作和实现起来

是有一定难度的。因此,径向应力调谐法多用于传感器中,不适用于本系统。

综上所述,针对本设计的实际情况,选取轴向应力调谐较为适合,通过轴向拉伸和压缩,实现向长波长和短波长两个方向的调谐。为了实现轴向应力调谐,考虑将光纤光栅与 PZT 相粘接,并采用电驱动 PZT 来带动光纤光栅伸缩,通过 PZT 的驱动电压值来进行波长(即频率)的调谐。

3 PZT 调谐原理

3.1 PZT 的特性

PZT 是一种具有逆压电效应^[9]的光电器件,它的典型特性是能够在电场的作用下产生形变。本文结合 PZT 的这一特性,将其与激光器出射端的光纤光栅粘结,由 PZT 自带的驱动电路对其施加外部电压,使其产生不同程度的形变,进而实现对光纤光栅的拉伸。根据 PZT 的原理,当施加的外部电压在其弹性限度内时,光纤光栅的形变量与加在其上的外部电压呈线性关系。即:

$$\Delta L = \frac{t \times V \times L}{d} \quad (9)$$

式中, ΔL 为对光纤光栅施加的外部电压为 V 时,其产生的形变量; t 为压电应变常数; V 为在 PZT 上所施加的电压; L 为 PZT 的长度; d 为 PZT 的厚度。当施加电压为 V 时,光纤光栅的轴向应变为:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{t \times V}{d} \quad (10)$$

则光纤光栅的布拉格波长 λ_B 所产生的偏移量为:

$$\Delta\lambda_s = (1 - p_e) \cdot \varepsilon \cdot \lambda_B \quad (11)$$

将式(10)与式(11)联立,可求出在 PZT 的作用下,光纤光栅布拉格波长的漂移量为:

$$\Delta\lambda_B = \frac{\lambda_B(1 - p_e) \cdot t \cdot V}{d} \quad (12)$$

在 PZT 的实际应用中,可以根据其所需的伸缩量大小,选择单片 PZT 或者多片层叠结构 PZT。其中,前者的伸缩量比后者小,因此层叠式的结构多用于对伸缩量要求较大的测量中。我们可以把它看成是若干个单片 PZT 在机械上串联,在电路上并联。层叠结构总体伸缩量为:

$$\Delta l = \frac{n \times L \times t \times V^2}{d} \quad (13)$$

式中, Δl 为层叠结构的 PZT 产生的总伸缩量; n 为 PZT 的层数,即胶合片数; d 为每片 PZT 的厚度。由于本系统的调谐范围不大,但要保证调谐速度,因此采用单片 PZT 即可。

3.2 PZT 的非线性校正

由于 PZT 自身存在迟滞、蠕变等不良特性^[10], 使得输入电压与输出位移之间呈现非线性关系。若这种非线性大于某一阈值时, 则无法满足设计要求, 此时必须对其进行校正。

本文采用最小二乘法对 PZT 的控制电压 V 和测得的非线性位移 $S(V)$ 进行拟合, 以沿轴方向传播光束的谐振条件为理论依据, 即:

$$nl = q \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (14)$$

式中, n 为激活介质的折射率; l 为激光器谐振腔长度; q 为一正整数; λ 为振荡波长。由此可得其最小二乘法的正规方程为:

$$\begin{cases} (\sum_n V_i^4)A + (\sum_n V_i^3)B + (\sum_n V_i^2)C = [\sum_n V_i^2 \cdot S(V_i)] \\ (\sum_n V_i^3)A + (\sum_n V_i^2)B + (\sum_n V_i)C = [\sum_n V_i \cdot S(V_i)] \\ (\sum_n V_i^2)A + (\sum_n V_i)B + (\sum_n 1)C = [\sum_n S(V_i)] \end{cases} \quad (15)$$

式中, A 、 B 、 C 为 PZT 驱动电压与光纤光栅形变量的曲线拟合系数, 通过计算可得其曲线关系式为:

$$AV^2 + BV + C = S(V) \quad (16)$$

解得:

$$V = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4[C - S(V)] \cdot A}}{2A} \quad (17)$$

由式(16)可计算出在 PZT 驱动电压作用下, 光纤光栅的等间距变化位移量 $S(V)$, 以及其非等间距变化电压 V 。为了能使 PZT 在时间上的位移线性化更精确地实现, 需要对 $S(V)$ 进行多次重复测量, 并调节其非等间隔电压 V 。

4 实验验证

对于激光频率调谐技术, 国内外相关研究均是在探讨如何扩大调谐范围, 而对调谐速度没有过高的要求。本文恰好相反, 对调谐范围的要求不高, 但是追求调谐速度, 需要实现每个调谐周期 2 ms。在完成上述激光器调谐理论的基础上, 针对系统设计要求给出具体实验方案, 如图 2 所示。

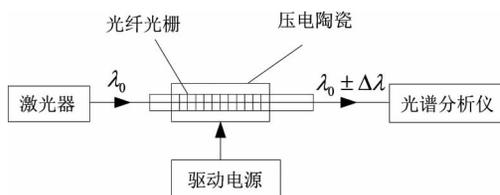


图2 压电陶瓷调谐方案实验原理图

Fig. 2 PZT tuner program experimental schematic

在图 2 中, 利用高强度结构胶 XH-11 将光纤光栅粘到 PZT 上, 根据 PZT 的逆压电效应, 由驱动电源来对 PZT 施加外部电压, 使其产生振动, 进而带动光纤光栅的拉伸或压缩, 实现激光器波长的改变。激光器的初始波长和经过调谐之后的波长均由光谱分析仪给出, 两者的差值即为波长调谐量, 再转换为激光频率变化量。PZT 作为应力调谐的直接驱动源, 其驱动电路主要有两方面作用: 一是改变输出电压值, 使 PZT 进行不同程度的伸缩; 二是控制系统的调谐速度, 实现每个周期 2 ms。一般也将 PZT 和其驱动电源组成的整体统称为 PZT 微位移器。如果想进行更高精度的测量, 即实现更大调谐范围以及纳秒级的调谐速度, 可以考虑采用差频干涉法进行测量。PZT 调谐的实验装置如图 3 所示。

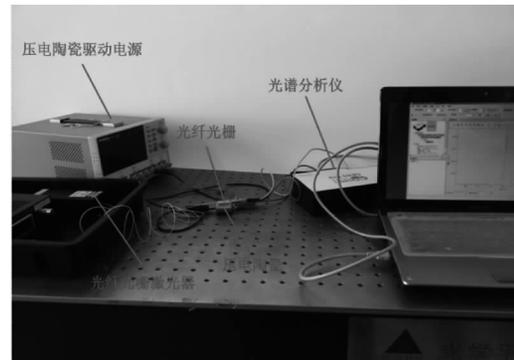


图3 压电陶瓷调谐实验装置

Fig. 3 PZT tuning experiments equipment

在图 3 中, 选取芯明天公司的管状 PZT 来实现光纤光栅的轴向拉伸, 谐振频率 (20 ± 1.5) kHz, 电容量 $(1000 \pm 20\%)$ pF, 谐振电阻 $\leq 500 \Omega$; PZT 外径 (20 ± 0.3) mm, 高度 (30 ± 0.5) mm。选取的 PZT 驱动电源的驱动电压范围为 0 ~ 200 V, 所能控制的最小电压变化量是 0.1 V。激光器出射端的光纤光栅长度为 25 mm, 中心波长 1550 nm, 带宽 0.432 nm, 由式(7) 计算可得其中心波长的最大变化量为 1.26 nm。实验中, 每隔 20 V 电压进行采点, 在每个电压处对光纤光栅的中心波长和带宽分别测量 50 次, 取 50 次测量的算术平均值进行数据分析, 实验结果如表 1 所示。

从上述的实验结果可以看出, 当 PZT 的驱动电压从 0 V 增加到 200 V 的过程中, 光纤光栅的中心波长从 1550 nm 增加到 1551.26 nm, 达到了 1.26 nm 的中心波长调谐量, 折算成频率为 158 GHz, 即 PZT 的驱动电压为 126 V 时, 调谐范围为 0.8 nm, 满足本设计 100 GHz 的调谐频率要求。

表1 激光调谐实验数据
Tab.1 Laser tuning experimental data

序号	PZT 驱动电压/V	光纤光栅 中心波长/nm	光纤光栅中心 波长变化量/nm
1	0	1550	0
2	20	1550.166	0.166
3	40	1550.253	0.253
4	60	1550.402	0.402
5	80	1550.511	0.511
6	100	1550.601	0.601
7	120	1550.699	0.699
8	140	1550.795	0.795
9	160	1551.023	1.023
10	180	1551.145	1.145
11	200	1551.26	1.26

5 结论

本文介绍了光纤光栅外腔半导体激光器的调谐特性,对各种调谐方法进行比较,选取轴向应力调谐法对光纤光栅进行轴向拉伸,改变光纤光栅的布拉格中心波长,进而达到频率调谐的目的。方案实施过程中,利用PZT驱动光纤光栅拉伸,可以得出PZT的驱动电压与调谐频率之间的关系。实验证明,当驱动电压变化126 V时,可实现0.8 nm(即100 GHz)的调谐范围以及每周期2 ms的调谐速度。

参考文献:

- [1] Seiichi Kakuma, Ryoji Ohba. Atomic transition spectra markers for accurate frequency-modulated continuous-wave laser distance-meterOriginal [J]. Research Article Optics Communications,2009,239(15):445-454.
- [2] JIN Jie,OUYANG Lixia,ZHANG Yan. Research on laser wavelength tuning method of fiber grating external cavity semiconductor[J]. Infrared and Laser Engineering,2006,35(4):437-440. (in Chinese)
金杰,欧阳丽霞,张妍. 光纤光栅外腔半导体激光器波长调谐方法研究[J]. 红外与激光工程,2006,35(4):437-440.
- [3] JM S,EA W, W L. Theoretical description of frequency modulation and wavelength modulation spectroscopy[J]. Applied Optics,2013,33(27):6294-6302.
- [4] D Yavuz D. High-frequency modulation of continuous-wave laser beams by maximally coherent molecules[J]. Physical review. A: Atomic, molecular and optical physics,2007,(1):1805.
- [5] LI Bin. Reserch of fiber grating external cavity semiconductor lasers intelligent tuning[D]. Tianjin:Tianjin University,2006. (in Chinese)
李彬. 光纤光栅外腔半导体激光器智能调谐的研究[D]. 天津:天津大学,2006.
- [6] Burianova L,Hana P,Pustka M. Non-linear properties of PZT ceramics in the wide temperature range[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2014,(12):2405-2409.
- [7] ZHAO Li,ZHUANG Ling,ZHANG Chunlin. Piezoelectric ceramics control system and its application in lasers[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics,2007,(5):550-552. (in Chinese)
赵丽,壮凌,张春林. 压电陶瓷控制系统及其在激光器中的应用[J]. 压电与声光,2007,(5):550-552.
- [8] Guyomar D,Aurelle N,Eyraud L. Piezoelectric ceramics nonlinear behavior. application to langevin transducer[J]. Journal de Physique III,1997,7(6):1197-1208.
- [9] Guyomar D,Aurelle N,Eyraud L. Piezoelectric ceramics nonlinear behavior. application to langevin transducer[J]. Journal de Physique III,2014,7(6):1197-1208.
- [10] Burianova L,Hana P,Pustka M, et al. Non-linear properties of PZT ceramics in the wide temperature range[J]. Journal of the European Ceramic Society,2005,25(12):2405-2409.