

(15)

棱镜色散腔的自动调谐及计算机控制系统

269-273

詹杰 王正林 王佩琳

TN248.1

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 国家 863 计划大气光学重点实验室 230031 合肥)

TP273

摘要 本文对棱镜色散腔自动调谐的原理及实现方法以及计算机控制系统作了较为详细的阐述。该自动调谐系统适用于固体可调谐激光器, 实验中该调谐方法用于 Nd:YAG 锁模激光 (532 nm) 泵浦的钛宝石激光器^[1], 能实现 680~980 nm 范围的波长自动调谐输出。

关键词 棱镜色散腔, 钛宝石激光器, 自动调谐

计算机控制系统

1 引言

在激光器的发展过程中, 全固化可调谐激光器得到越来越广泛的发展和应。调谐方法已不只局限于手动调谐, 作者对固体可调谐激光器的调谐智能化进行了深入细致的研究, 论证并设计了一种简单且实用的调谐控制系统, 利用 ZF5 玻璃的色散特性和几何光学方法论证了固体可调谐激光器的腔体后反镜的空间位置与输出波长的一一对应关系, 并设计了步进电机驱动的精密传动机构, 在计算机控制下实现了波长的自动调谐输出。实验结果与理论计算相吻合。

2 脉冲钛宝石激光器自动调谐原理及精密传动机构设计

2.1 棱镜色散法调谐原理

可调谐钛宝石激光器的调谐方法主要有四种 (棱镜色散法、双折射滤光片法、光栅法、F-P 标准具法), 本实验采用棱镜色散法。光路图如图 1 所示, 其中, 钛宝石晶体端面切成布氏角。M1: 输出镜, (1)750~850 nm, 透过率为 25%, (2)730~920 nm, 透过率为 40%~50%。M2: 后反镜, 640~860 nm 全反。三棱镜: 重火石玻璃材料 ZF5, 顶角为 60°。泵浦光脉宽约为 30 ps(FWHM), 由五甲川染料被动锁模 Nd:YAG 振荡级加一级放大和倍频产生。

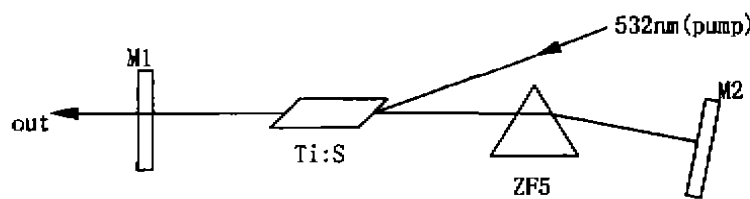


Fig.1 Tunable laser system of prism dispersion

研究表明对钛宝石 ($\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$) 晶体吸收和增益所引起的折射率变化可以忽略^[2], 因此, 端面以布氏角切割的钛宝石晶体可看成是两端面平行的“玻璃”介质, 所以对一定波长的光线在入射、出射该介质时的光线一定平行。不同波长的光经 ZF5 后折射本领不一样, 要得到不同波长的激光输出, 只要调整后反镜 M2 使之与该波长的光线垂直即可, 因此 M2 是调谐的工具,

收稿日期: 1999-06-17; 修改日期: 1999-10-15

自动调谐的过程就是根据 λ_i 而调整 M2 的偏转角度, 使 M2 与 λ_i 垂直, 从而得到 λ_i 的激光输出。

实验中, 先调整 M2 使中心波长 790.0 nm 的激光输出。光路调整后, 只要调整 M2 使之与 λ_i 光线垂直就可得到 λ_i 的激光输出。设中心波长 λ_0 与其它任一波长 λ_i 经 ZF5 后的偏转角为 $\Delta\phi_i$, 对不同的 λ_i , $\Delta\phi_i$ 不同, 即 $\Delta\phi_i$ 与 λ_i 是一一对应的, 如图 2 所示。在自动控制过程中, 把 λ_i 输入计算机通过程序计算 $\Delta\phi_i$, 根据 $\Delta\phi_i$ 计算步进电机的步数 STP, 驱动电机前进 STP 步, 从而被电机传动的精密传动机构把 M2 带到相应位置, 便能实现 λ_i 的激光自动输出。

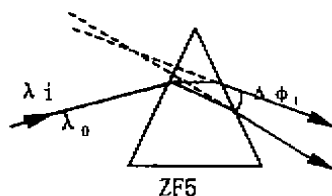


Fig.2 Deflection angle $\Delta\phi_i$ between λ_i and λ_0

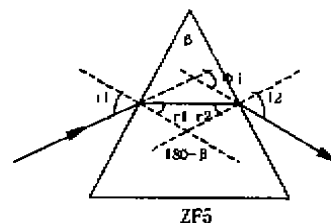


Fig.3 Sketch map of calculating $\Delta\phi_i$

2.2 ZF5 色散方程及 $\Delta\phi_i$ 的计算

要计算 $\Delta\phi_i$, 必须求出不同波长的光在 ZF5 中的折射率, 即色散方程。从有关资料中查找 ZF5 的折射率参数^[3] 及经过最小二乘拟合合成曲线得到 ZF5 的色散方程如下:

$$n = A + B/\lambda^2 + C/\lambda^4 = 1.70715 + 0.01148379/\lambda^2 + 0.000756465/\lambda^4 \quad (\lambda: \mu\text{m}). \quad (1)$$

实验中, 中心波长 $\lambda_0=790.0$ nm, 以布氏角入射棱镜, 如图 3 所示。即 $i_1 = \text{tg}^{-1}n_0 = 59.8824^\circ$ (实验时取 60°), ZF5 顶角 $\beta = 60^\circ$, 对任一波长 λ_i 以 i_1 入射棱镜:

$$r_1 = \sin^{-1}[\sin i_1/n_i], \quad (2)$$

$$r_2 = 180^\circ - (180^\circ - \beta) - r_1 = \beta - r_1, \quad (3)$$

$$i_2 = \sin^{-1}[n_i \cdot \sin r_2]. \quad (4)$$

设 ϕ_i 为任一波长 λ_i 经 ZF5 后的偏转角, 则:

$$\phi_i = (i_1 - r_1) + (i_2 - r_2) = i_1 - r_1 + i_2 - (\beta - r_1) = i_1 + i_2 - \beta. \quad (5)$$

以 $\lambda_0=790.0$ nm 为中心波长, 任一波长 λ_i 经 ZF5 后与 λ_0 经 ZF5 后的光线夹角为 $\Delta\phi_i$, 则:

$$\begin{aligned} \Delta\phi = \phi_i - \phi_0 &= (i_1 + i_{2i} - \beta) - (i_1 + i_{20} - \beta) = i_{2i} - i_{20} = \\ &= \sin^{-1}[n_i \cdot \sin(\beta - r_{1i})] - \sin^{-1}[n_0 \cdot \sin(\beta - r_{10})], \end{aligned} \quad (6)$$

其中: ϕ_i 、 ϕ_0 为 λ_i 、 λ_0 对应的 ϕ 。 i_{2i} 、 i_{20} 分别为 λ_i 、 λ_0 光经 ZF5 后的出射角, r_{1i} 、 r_{10} 分别为 r_i 、 r_0 对应的折射角, 由 (2) 式确定。

在可调谐范围内 (700~1000 nm) 估计 $\Delta\phi_{\text{max}}$:

$$\Delta\phi_{\text{max}} = (\phi_{1000} - \phi_{790}) + (\phi_{790} - \phi_{700}) = \phi_{1000} - \phi_{700} = 1.33^\circ,$$

由 $\Delta\phi_{\max}$ 可确定精密传动机构的有关参数。

2.3 精密传动机构及其参数的确定

精密传动机构如图 4 所示, 它由转动平台 P、连接杆 C、精密螺母 B、精密丝杆 A、减速齿轮组 Z、步进电机 Y 组成。为确定传动机构的有关参数, 参考示意图 5。实验时, 对应 $\lambda_0(790\text{ nm})$ 处, C 与 A 轴垂直, 且此时转台 P 的转轴通过 M2 的中心。转台轴心到丝杆 A 轴距离 $L=150.00\text{ mm}$, 即在可调谐范围内, 对应丝杆 A 行程为:

$$S_1 S_2 = L \cdot (\text{tg}\Delta\phi_{1\max} + \Delta\phi_{2\max}) \approx 3.5\text{ mm}.$$

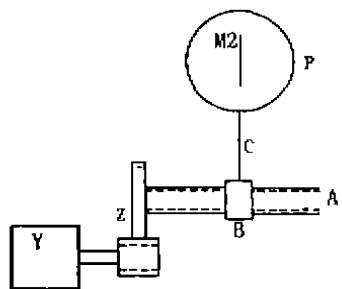


Fig.4 Sketch map of precision gearing

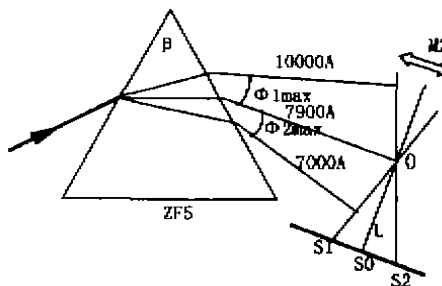


Fig.5 Sketch map of calculating deflection angle

精密传动机构的设计: 齿轮组模数 $m=0.5$, 大齿轮齿数 $Z_1=95$, 小齿轮齿数 $Z_2=25$, 传动比 $Z=Z_1/Z_2=3.8$ 。丝杆、螺母的螺距 0.5 mm 。步进电机步距角为 1.5° , 三相六拍, 电机转一周对应的步数为 240 步, 电机每走一步对应丝杆位移: $0.5/(3.8 \times 240) = 0.0005482 \approx 0.00055(\text{mm})$ 。从 S_1 到 S_2 , 步进电机总的步数: $STP=S_1 S_2 / 0.00055=7687(\text{步})$ 。因此, 该系统能将近 300 nm 调谐范围的波长一一分开。计算 λ_i 所对应的电机步数: $STP=L \cdot (\text{tg}\Delta\phi_{i0})/0.00055$, $\Delta\phi_{i0}$ 是 λ_i 与 λ_0 经 ZF5 折射后的夹角。通过程序计算、控制, 使电机前进 STP 步到达此位置即可实现波长为 λ_i 的激光输出。

3 软件设计

控制主程序用 QBASIC 编写, 用计算机的打印口

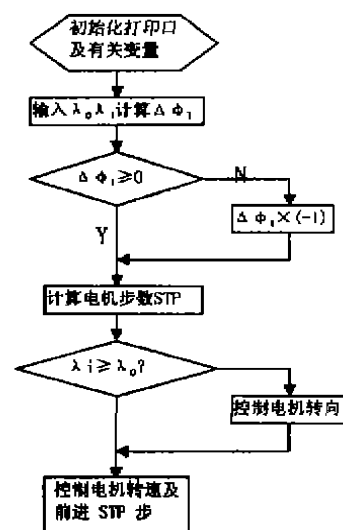


Fig.6 Flow chat of main program

[4] 控制电机的步数和转向。主程序根据要输出的波长输入 λ_i , 计算 n_i 和 STP, 并驱动电机前进, 自动实现调谐过程。如果需要改变输出波长 λ_i , 计算机自动使电机回到 λ_0 对应的中心位置后重新计算出 STP 而实现所需波长的激光输出。主程序流程图如图 6:

4 实验结果及误差分析

实验中, 用光栅单色仪读取波长值, 单色仪在不同波段需定标校正。当 $\lambda_i < 790\text{ nm}$ 时,

直接用单色仪读数; 当 $\lambda_i > 790 \text{ nm}$ 时, 经 BBO 倍频晶体倍频后用单色仪读数, 不同波段单色仪校正值及波长计算公式如下:

$$\begin{aligned} 790.0 \text{ nm} & (278), & \lambda_i &= (D + 278) \times 2, \\ 632.8 \text{ nm} & (280), & \lambda_i &= (D + 280) \times 2, \\ 532.0 \text{ nm} & (283), & \lambda_i &= (D + 283) \times 2, \\ 400.0 \text{ nm} & (286), & \lambda_i &= (D + 286) \times 2 \times 2, \quad (D \text{ 为单色仪读数}). \end{aligned}$$

λ_i (nm)	STP	DS1	DS2	D	λ (实)	$\Delta\lambda$
865.0	194.5	187.0	187.8	187.4	864.0	1.0
860.0	180.5	185.7	186.8	186.3	859.6	0.4
855.0	170.4	184.4	185.6	185.0	854.4	0.6
850.0	158.4	183.2	184.2	183.7	849.2	0.8
845.0	147.2	182.0	182.8	182.4	844.0	1.0
840.0	135.7	180.8	181.8	181.3	839.6	0.4
835.0	124.0	179.6	180.6	180.1	834.8	0.2
830.0	110.6	178.2	179.4	178.8	829.6	0.4
825.0	96.4	177.1	177.8	177.5	824.4	0.6
820.0	83.8	175.7	177.1	176.4	820.0	0
815.0	72.4	174.7	175.6	175.2	815.2	-0.2
810.0	57.1	173.4	174.5	173.9	810.0	0
805.0	44.8	172.1	173.2	172.7	805.2	-0.2
800.0	29.4	170.8	172.0	171.4	800.0	0
795.0	14.1	169.6	170.6	170.1	794.8	0.2
790.0(倍频)	0	168.3	169.5	168.9	790.0	0
790.0	0	366.6	367.8	367.2	790.0	0
785.0	16.9	364.0	365.3	364.6	784.8	0.2
780.0	32.8	361.6	363.0	362.3	780.2	-0.2
775.0	49.3	359.0	360.4	359.7	775.0	0
770.0	65.3	356.4	358.0	357.2	770.0	0
765.0	84.3	353.5	355.1	354.3	764.6	0.4
760.0	99.6	351.2	353.0	352.1	759.8	0.2
755.0	117.8	348.6	350.6	349.6	754.8	0.2
750.0	134.3	346.8	348.3	347.5	750.6	-0.6
745.0	153.1	344.2	345.8	345.0	745.6	-0.6
740.0	172.9	341.4	343.1	342.3	740.2	-0.2
735.0	191.8	338.8	340.5	339.7	735.0	0
730.0	209.8	336.7	338.4	337.5	730.6	-0.6

λ_i —输入计算机波长值, STP— λ_i 对应的电机步数, DS1— λ_i 对应的单色仪的一边读数,
DS2— λ_i 对应的单色仪的另一边读数, D — λ_i 对应的单色仪的读数 (DS1、DS2 的平均值),
 λ (实)—实际输出激光波长, $\Delta\lambda = \lambda_i - \lambda$ (实)

受前、后腔镜 M1、M2 适用范围的限制, 得到数据范围为 730.0~865.0 nm, 每隔 5.0nm 取样一次, 结果如表所述。

实验中的误差主要来源于以下几个方面: 系统误差: (1) 在中心波长附近调谐的精确度较远离中心波长的调谐精度高, 这主要是由于 ZF5 色散的非线性造成的, 更好的办法是把 ZF5 色

散曲线分为几个波长范围而不是一个, 在每一个小的波长范围内分别计算色散而不是在整个波长范围内进行色散曲线的拟合。(2) 精密传动机构存在的加工误差和回程差, 尽量选择高精度的传动机构来减小误差。测量误差: 单色仪读数误差等。

参 考 文 献

- 1 王正林. 脉冲 Ti:Al₂O₃ 激光器的宽光谱和自锁模研究. 学位论文, 1994.
- 2 Lin J M, Chee J K. Passive mode-locking of cw Nd:YLF laser with a nonlinear coupled cavity. *Opt. Lett.*, 1990, 15: 685~687
- 3 王之江等. 光学技术手册 (上册). 北京: 机械工业出版社, 1987. 724
- 4 高登芳等. 微型计算机实用测控接口技术. 北京: 北京科学技术出版社, 1990.

Self-tuning of Prism Chromatic Dispersion Cavity and it's Computer Control System

Zhan Jie Wang Zhenglin Wang Peilin

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanic, Academia Sinica Hefei 230031)

Abstract In this paper, the theory and experimental method of self-tuning of prism chromatic dispersion cavity are discussed in detail. The computer control system for self-tuning is also elaborated. This tuning method can apply to solid tunable laser. In experiment, this tuning system is used in Ti: sapphire laser pumped with 532 nm of Nd:YAG mode-locking laser. It can realize output of wavelength range from 680 nm to 980 nm.

Key words prism chromatic dispersion cavity, Ti: sapphire laser, self-tuning

詹 杰 男, 30 岁, 硕士, 从事大气光学及自动化控制研究。