

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 1-0110-04

# Cs 852 nm 法拉第反常色散光学滤波器研究

刘双强 掌蕴东 何竹松

(哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要** 法拉第反常色散光学滤波器(FADOF)作为一种高效、超窄带宽的光学滤波器,一直受到国内外广泛的关注。在前人建立的理论模型的基础上,对 Cs 852 nm FADOF 的光学滤波特性进行了理论计算,并对磁场和温度这两个主要影响因素对体系的影响给予了定性的分析,初步得到了 Cs 852 nm FADOF 的最佳工作条件。据此安排实验,并做出了可以实际应用的小型化器件。

**关键词** 超窄带光学滤波器; 法拉第反常色散; 塞曼效应; 开放空间通信

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL200936s1.0110

## Study on Cs 852 nm Faraday Anomalous Dispersion Optical Filter

Liu Shuangqiang Zhang Yundong He Zhusong

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology,  
Harbin, Heilongjiang 150080, China)

**Abstract** As an ultra-narrow bandwidth optical filter with unique character of high efficiency, Faraday anomalous dispersion optical filter (FADOF) has been focused on by both international and domestic researchers in recent years. In this thesis the theoretical and experimental studies on Cs 852 nm FADOF were done on the base of reviewing the domestic and international development. A qualitative analysis on the magnetic field and temperature of the two main factors was given and the best working conditions were obtained. Hereby experiment was planned and at last a small-scale device was made.

**Key words** ultra-narrow bandwidth optical filter; Faraday anomalous dispersion; Zeeman effect; laser communication in free space

## 1 引言

由于法拉第反常色散滤光器(FADOF)不仅具有原子共振滤波器的优点,而且还具有高透射、高噪声抑制能力、快响应和可成像等优点,一经提出就得到了迅速的发展<sup>[1~9]</sup>。本单位也已经在这方面做出了大量的研究<sup>[10~14]</sup>。FADOF 的滤波机制是利用原子能级在磁场中的分裂,以及在原子共振吸收线附近的 Faraday 反常色散机制进行滤波。FADOF 系统是由一个轴向磁场和两个相互正交的偏振片以及置于中间的样品池组成。在磁场作用下,色散样品原子能级发生塞曼分裂,使得原子共振吸收线发生改变,跃迁谱线由  $\nu_0$  变为  $\nu_1$  和  $\nu_2$ 。当一束与共振介质共振频率相同的激光信号沿着磁场方向入射到 FADOF 系统中时,由起偏器将入射光变为线偏振

光,在 Zeeman 分裂的作用下,线偏振光分解为左旋和右旋偏振光,由于在介质共振吸收线附近有较强的法拉第反常色散现象,即左旋偏振光和右旋偏振光具有不同的复折射率,从而实现偏振光的偏振面旋转,最终从检偏器输出。当选择适当的工作温度和磁场强度时,可以使偏振光旋转  $\pi/2$  或者  $\pi/2$  的奇数倍,因而共振吸收线附近线偏振光在工作介质吸收较弱的频率上可以获得最大的透射,从而达到滤波的目的;与此相反,当入射光频率离共振吸收线较远时,法拉第反常色散效应表现不明显,偏振光的偏振面旋转非常缓慢,以至于难以达到  $\pi/2$  的奇数倍旋转,而被截止;或者,虽然偏振面旋转角度达到了  $\pi/2$  或者  $\pi/2$  的奇数倍,但是由于对该频率的光具有强烈的吸收,而不能通过,也达到了滤波的作用。

**基金项目:** 可调谐(气体)激光技术国防科技重点实验室基金资助课题。

**作者简介:** 刘双强(1985—),男,博士研究生,主要从事光谱技术方面的研究。E-mail: kunwick@126.com

**导师简介:** 掌蕴东(1957—),男,博士,教授,主要从事可调谐激光技术方面的研究。E-mail: ydzhang@hit.edu.cn

可见,法拉第反常色散光学滤波器是基于 Zeeman 效应和 Faraday 反常色散效应的原子滤波器。

## 2 Cs 852 nm FADOF 的数值计算

### 2.1 计算方法

Cs 852 nm FADOF 的相关能级分别是  $6S_{1/2}$  和  $6P_{3/2}$  能级,由于电子自旋角动量和轨道角动量相互作用,产生原子精细结构能级,在磁场的作用下发生塞曼分裂,磁量子数  $m_F$  的取值范围为  $F, F-1, \dots, -F$ 。由这样的复杂结构的体系构成的滤波

器,必须充分考虑塞曼能级对滤波器工作特性的影响,对每一条跃迁线的极化强度进行计算,然后求出总的极化强度,最终得到 FADOF 体系的理论透射谱。因而,FADOF 的理论计算包括三个主要的计算过程:1、磁场作用下,超精细 Zeeman 能级的分裂裂距;2、计算每一条跃迁线的极化强度,然后求出总的极化强度;3、将极化强度同体系透射率结合起来,计算透射谱。

### 2.2 理论模型

原子体系总的极化率为

$$\chi_{\pm} = i \frac{3 \sqrt{\ln 2} e^2}{4 \sqrt{\pi} m_e \epsilon_0 \omega_0} \sum \frac{N_n f(J' \leftarrow J)}{\Delta \nu_{Dn}} (2J+1)(2F+1)(2F'+1) \times \begin{bmatrix} F' & 1 & F \\ m_F & \pm 1 & m_F \mp 1 \end{bmatrix}^2 \begin{Bmatrix} F' & 1 & F \\ J & I & J' \end{Bmatrix}^2 W(\delta \nu_n \mp \delta \nu_{mj} + i a_n), \quad (1)$$

式中  $f(J' \leftarrow J)$  是振子强度,  $N_n$  是基态上不同的 Zeeman 子能级上的粒子数密度,  $W(\delta \nu_n \pm \delta \nu_{mj} + i a)$  是等离子体色散函数,求得总的极化强度以后,就可以求出平均吸收因子,圆二色性,磁旋本领等项,进而求得系统透射率。他们之间的关系可以用以下的关系式表达:

平均吸收系数

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{2}(\alpha_+ + \alpha_-) = \frac{\omega}{2c} \text{Im}(\chi_+ + \chi_-);$$

圆二色性:

$$\rho = \frac{\omega}{2c} (n_+ - n_-) = \frac{\omega}{4c} \text{Re}(\chi_+ - \chi_-);$$

磁旋本领:

$$\Delta \alpha = \frac{1}{2}(\alpha_+ - \alpha_-) = \frac{\omega}{2c} \text{Im}(\chi_+ - \chi_-);$$

则得到系统透射率:

$$T = \frac{1}{2} \exp(-\bar{\alpha} L) [\cosh(\Delta \alpha L) - \cos(2\rho L)]. \quad (2)$$

### 2.3 计算结果

图 1 为磁场强度为 0.06 T,温度为 330 K,色散介质长度为 0.025 m 的 Cs 852 nm FADOF 的透射谱图。从图 1 可知,在这种较强磁场和较高温度下,整个滤波系统共有六个通频带,分为三对,透射谱图中的两个强烈的吸收带对应于基态的精细结构分裂,吸收带之间的间隔为 8.62 GHz,与基态精细结构的分裂基本符合。每侧两个较高的吸收峰其实是一个透射峰的线翼工作方式。在最高的那个透射峰中,单峰带宽很窄,只有 0.7 GHz。

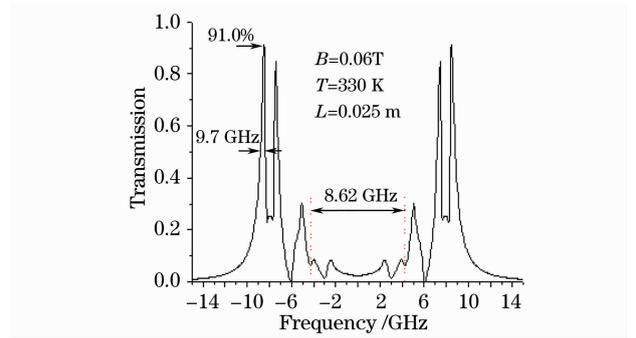


图 1 Cs 852 nm FADOF 的透射谱

Fig. 1 Transmission of Cs 852 nm FADOF

为定量的分析 FADOF 的工作机理,图 2 给出了关于透射率、旋转角和吸收因子之间的理论计算结果,根据计算结果讨论产生高透射的工作条件。其中图 2(a)是 Cs 852 nm FADOF 透射谱图,图 2(b)是

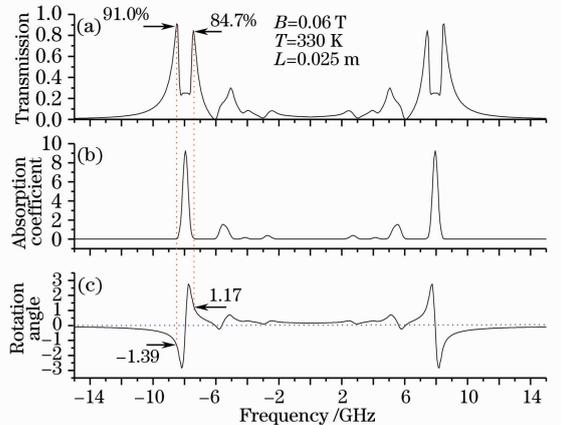


图 2 Cs 852 nm FADOF 理论计算结果

Fig. 2 The calculated results of Cs 852 nm FADOF

Cs 852 nm FAODF 的吸收因子,图 2(c)是 Cs 852 nm FADOF 的旋转角。

由透射率公式(2)可知,当  $\alpha \rightarrow 0, \Delta\alpha L \rightarrow 0$  时,透射率公式可以近似地写成  $T(\nu) = \sin^2(\rho L)$  即透过率近似为旋转角的正弦函数的平方。表 1 给出了旋转角、理论计算透过率以及近似透过率的对照表。

表 1 理论计算透过率以及近似透过率的对照表

Table 1 Comparative of between theoretically calculated transmission and approximate transmission

Rotation angle /rad	-1.39	1.17
Theoretical transmission /%	91.0	84.7
Approximate transmission /%	94.8	84.8

从表 1 可以看出,近似透过率与理论分析获得的透射率符合得很好,近似透射率比严格理论计算得到的透射率略高一些,是由于在近似计算过程中引入的误差。因此,近似计算公式在一定程度上反映了在获得极大透射的条件:对一定频率的线偏振光,当它在 FADOF 池中传播的时候,如果 FADOF 系统对该频率的激光的吸收因子很小,旋转角接近  $\pm\pi/2$  或接近  $\pm\pi/2$  的奇数倍,则该频率的线偏振光可以获得极大透射。只有满足上述两个条件的偏振光才能通过滤波器,而其他的不满足这样条件的光信号,则不能通过检偏器。

## 2.4 FADOF 的稳定性研究

尽管磁场强度和温度对 FADOF 的滤波特性有很大的影响,但是 FADOF 作为一只量子光学滤波器,仍然具有很好的工作稳定性。本文对磁场强度和温度的微小变化对 FADOF 的工作特性的影响予以了考察。图 3 和图 4 分别给出了温度和磁场有微小变化的透射谱图。

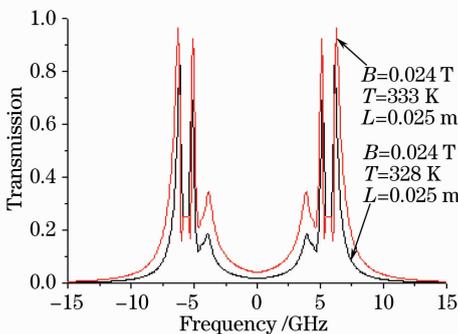


图 3 温度有微小变化的 FADOF 透射谱

Fig. 3 Calculated spectra of FADOF when a little change in temperature

图 3 中温度的变化为 5 K,从图中可以看出,虽然温度变化的仅仅 5 K,滤波器的透过率已经显著增加,这说明 FADOF 的温度调谐特性较显著。

图 4 中,磁场强度的变化为 0.002 T (20 G),可以看出这样大小的磁场变化不能影响透射谱的主要工作特性,微小的磁场强度的变化对滤波器的工作特性没有明显的影响。

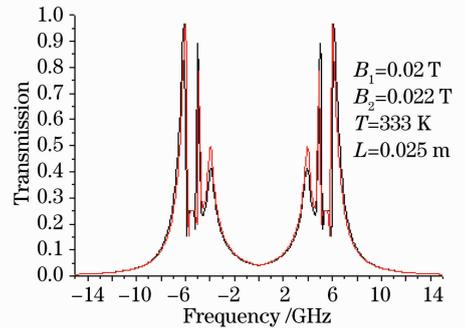


图 4 磁场有微小变化的 FADOF 透射谱

Fig. 4 Calculated spectra of FADOF when a little change in magnetic field

## 3 器件的制作

### 3.1 器件总体设计制作

根据上述安排,设计并做出了 FADOF 器件,器件外壳为不锈钢制作,规格为 60 mm×60 mm×60 mm。铯池长度为 25 mm,直径为 25 mm。通光孔直径为 10 mm。器件采用恒定 5 V 的直流稳压电源供电。做成的器件结构图如图 5 所示,其中,1 和 6 是两个格兰棱镜,2 是永磁体,3 是铯池,4 是保温层,5 是加热装置。

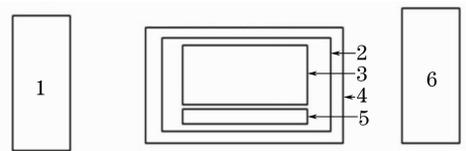


图 5 器件结构图

Fig. 5 Structure of the device

### 3.2 器件性能测试

在做出器件后,对器件的性能做出了测试,即将器件放在实验光路中,测得实验数据。测试光路如图 6 所示,其中,M1 是半反半透镜片,M2 和 M3 是

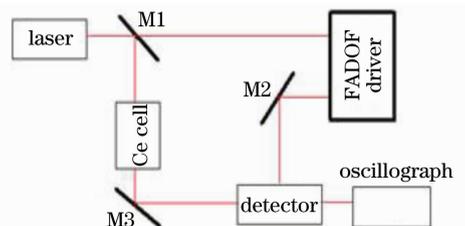


图 6 器件性能测试电路

Fig. 6 Testing circuit of the device performance

全反射镜片。

实验中所用的光源为半导体激光器,正常输出波长为 852.36 nm,输出波长范围在 816.4 nm 到 860.2 nm 之间连续可调。输出激光线宽 2 MHz。实验前,当磁场为零时,仔细调整两个偏振片使他们正交,以确保测量结果与理论计算的可比性。实验中先将半导体激光器调至所需波长 852 nm 附近,由 DL100 发出的激光被 50% 的分束片分为相等的两束,第一路为主光路,进入 Faraday 反常色散系统,输出的光信号被探测器接收;第二路为参考光路,用于监测激光器是否工作在铯原子的共振波长下。

实验中,先将 FADOF 器件接通电源,调节温度设定电阻,将温度控制在 60 °C,同时将激光器波长调至 852 nm 附近,等温度稳定后记录实验数据。从图中可以看出,器件在该条件下的最大透过率达到了 78.4%,实验与理论计算曲线有些区别,原因在于圆柱形永磁体内部磁场不均匀所致。总的来说,器件达到了较大的透过率(90%,图 7)和较小的单峰带宽(<2 GHz)。

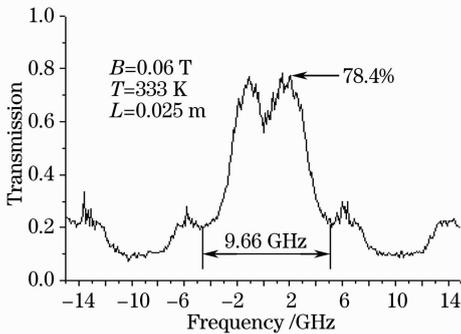


图 7 FADOF 器件透射谱图

Fig. 7 Transmission of FADOF device

## 4 结 论

通过对 Cs 852 nm FADOF 的研究,认为 FADOF 是一种理想的超窄带滤波器,对其进行深入的研究无论是在基础研究领域还是在应用研究领域都有着广泛的发展空间,有着重要的意义。

## 参 考 文 献

- 1 R. I. Billmers, S. K. Gayen, M. F. Squicciarini *et al.*. Allocca experimental demonstration of an excited-Faraday filter operating at 532 nm[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(10): 106~108
- 2 Liang Zhang, Junxiong Tang. Experimental study on optimization of the working conditions of excited state Faraday filter[J]. *Opt. Commun.*, 1998, **152**(4~6): 275~279
- 3 C. Y. She. Faraday filter for daytime observation of the mesopause region[J]. *European Space Agency*, 1997, **397**: 135~138
- 4 R. Paschotta, J. Nilsson, L. reekie *et al.*. Single-frequency ytterbium-doped fiber laser stabilized by spatial hole burning[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(1): 40~42
- 5 She Chiaoyao, Chen Songsheng. Potassium faraday filter based narrowband lidar for day and night observation of the mesopause region[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics, Seoul, 1999. 943~944
- 6 H. Takesue, F. Yamamoto, Horiguchi *et al.*. Stable lightwave frequency synthesis over 1-THz span using Fabry-Perot cavity containing polarization-rotation elements and actively controlled tunable bandpass filter[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(1): 79~81
- 7 S. Q. Yu, J. X. Tang, H. Q. Xiao. Novel inter-satellite laser communication acquisition scheme approach with tunable Faraday anomalous dispersion optical filter[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2001, **29**(3): 423~425
- 8 R. D. Rallison, D. Sorensen. Hoe Enhanced 355 nm multichannel direct detection Doppler lidar[C]. *SPIE*, 2001, **4291**: 33~42
- 9 L. D. Turner, V. Karaganov, P. J. O. Teubner *et al.*. Sub-Doppler bandwidth atomic optical filter[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(7): 500~502
- 10 Zhang Y D, Jia X L, Ma Z G *et al.*. Optical filtering characteristic of potassium Faraday optical filter[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2001, **37**(3): 372~375
- 11 Zhang Y D, Jia X L, Ma Z G *et al.*. Potassium Faraday optical filter in line-center operation[J]. *Opt. Commun.*, 2001, **194**(1~3): 147~150
- 12 Zhang Y D, Jia X L, Bi Y *et al.*. Filter performance of a cesium Faraday optical filter at 852 nm[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2002, **19**(6): 807~809
- 13 Wang Qi, Jia Xiaoling, Zhang Yundong *et al.*. A study on the potassium tunable ultra-narrow bandwidth optical filter at 532 nm [J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, **52**(5): 1151~1156
- 14 王 骐,贾晓玲,掌蕴东等. 钾原子 532 nm 可调谐超窄带光学滤波器的研究[J]. *物理学报*, 2003, **52**(5): 1151~1156
- 15 Zhang Yundong, Yuan Ping, Bi Yong *et al.*. Ultranarrow band optical filter[J]. *Laser Technology*, 1999, **23**(5): 257~261
- 16 掌蕴东,袁 萍,毕 勇等. 超窄带光学滤波器[J]. *激光技术*, 1999, **23**(5): 257~261