

文章编号: 0253-2239(2001)11-1377-04

# 钾色散光学滤波器的滤波特性

掌蕴东 贾晓玲 毕 勇 王 骐 马祖光

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 从理论和实验两个方面对强磁场中钾  $D_2$  线法拉第反常色散滤波器的特性进行了研究, 在不同工作条件下, 获得线芯和线翼两种工作方式的法拉第反常色散滤波器, 并讨论了温度对其滤波特性的影响。

**关键词:** 钾; 线芯工作方式; 线翼工作方式; 滤波特性

中图分类号: TN929.1 文献标识码: A

## 1 引 言

在自由空间光通信中, 为了提高整个系统的信噪比, 窄带光学滤波器起着不可替代的作用。传统的干涉滤光片, 不能同时达到高透射和具有大的视场角及窄带宽。70 年代末出现的原子共振滤波器 (ARF) 技术的缺点在于它的响应时间较长, 且内部量子转换效率较低, 因此, 这两种滤波器都不能满足空间光通信需求。由于法拉第反常色散滤波器 (FADOF) 具有高透射、超窄带宽、大视角、高噪声抑制比以及可成像等优点, 目前被认为是一种较为理想的光学滤波器。

1982 年, Yeh<sup>[1]</sup> 在铯原子精细结构基础上建立了法拉第反常色散滤波器的理论模型, 1991 年, Dick 和 Shay<sup>[2]</sup> 重新把金属蒸气的法拉第反常色散效应用于光学滤波器的研究, 并且在原子的超精细结构基础上建立了法拉第反常色散滤波器理论模型。自此, 对法拉第反常色散滤波器的理论和实验研究相继开展起来, 工作介质包括: Cs<sup>[3-5]</sup>、Rb<sup>[2, 6, 7-9]</sup>、K<sup>[10, 11]</sup>、Na<sup>[12, 13]</sup>、Ca<sup>[14]</sup> 等。然而, 这些法拉第反常色散滤波器研究大部分是在弱磁场情况下进行的, 均为线翼工作方式, 只有文献[7, 12, 13] 对强磁场中法拉第反常色散滤波器的特性进行了研究, 其中文献[12, 13] 中获得了线芯工作的 Na 法拉第反常色散滤波器。本文在原子超精细结构基础上, 从理论和实验两个方面进行了强磁场中钾  $D_2$  线法拉第反常色散滤波器的特性研究。研究表明, 强场中的 K-法拉第反常色散滤波器工作在线芯或线翼方式, 理论和实验结果符合得很好。

## 2 理论计算

由于法拉第反常色散滤波器的理论模型已有多篇文献报道<sup>[1, 2, 4, 7, 8, 11]</sup>, 这里不再重复, 仅简略给出其表达式。为了给下面的实验研究以理论指导, 采用非耦合表象  $|IJm_I m_J\rangle$  进行了理论计算。

法拉第反常色散滤波器的透射谱为

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

其中,  $\bar{\alpha}$  为平均吸收系数,  $\Delta\alpha$  为圆二色性,  $\rho$  为磁旋本领, 其表达式为

$$\begin{aligned} \bar{\alpha} &= \frac{1}{2}(\alpha_+ + \alpha_-) = \frac{\omega}{2c} \text{Im}(x_+ + x_-), \\ \Delta\alpha &= \frac{1}{2}(\alpha_+ - \alpha_-) = \frac{\omega}{2c} \text{Im}(x_+ - x_-), \\ \rho &= \frac{\omega}{4c} \text{Re}(x_+ - x_-) = \frac{\omega}{2c}(n_+ - n_-). \end{aligned}$$

由圆频率为  $\omega$  的入射光产生的感生偶极矩所对应的单位体积内原子的极化率张量为

$$x_q = \frac{iN_{\nu M'} \sqrt{\pi} 2 \sqrt{\ln 2}}{\epsilon_0 h \Delta\nu_D} \times \sum_{\nu M, \nu M'} S_q(\nu M, \nu M') w [\delta\nu \mp \delta\nu_{\nu M, \nu M'} + i\alpha], \quad (2)$$

式中

$$\begin{aligned} \delta\nu &= 2 \sqrt{\ln 2} \left[ \frac{\nu - \nu_0}{\Delta\nu_D} \right], \\ \delta\nu_{\nu M, \nu M'} &= 2 \sqrt{\ln 2} \frac{\Delta\nu_{\nu M, \nu M'}}{\Delta\nu_D} = 2 \sqrt{\ln 2} \frac{E_{\nu'} - E_{\nu}}{\Delta\nu_D}, \\ \alpha &= 2 \sqrt{\ln 2} \cdot \left[ \Delta\nu_N / \nu_D \right], \end{aligned}$$

$N_{\nu M'}$  为个基态子能级上的粒子数密度,  $\epsilon_0$  为真空介电常数,  $\nu_D$  为多普勒展宽,  $\Delta\nu_N$  为自然展宽,  $S_q$  为每个塞曼子能级间跃迁对应的线强度,  $q = \pm 1$  代表左

旋和右旋偏振分量。

### 3 实 验

对钾  $D_2$  线 766 nm 法拉第反常色散滤波器透射谱进行实验研究的装置如图 1 所示。

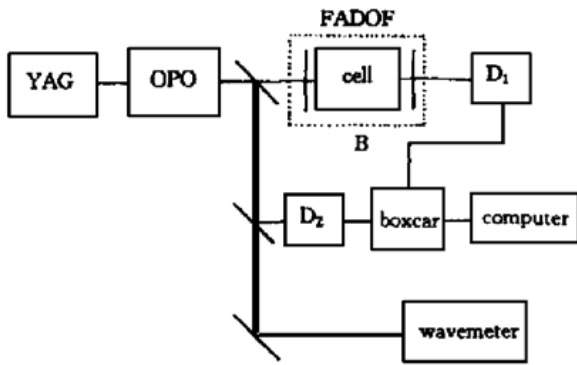


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

实验中所用激光器为 Continuum 公司的 Mirage 500 光学参变振荡(OPO)激光器,单纵模输出,线宽约为 500 MHz,脉宽约为 5 ns,重复频率为 10 Hz。磁场强度在 0~ 0.17 T 范围内连续可调,格兰-汤姆逊棱镜的消光比为  $10^{-5}$ ,样品池工作温度由一个温控仪控制,其精度为 0.1 K。实验中将光学参变振荡器输出的光分成三束:第一束光进入主光路,经法拉第反常色散滤波器后被探测器  $D_1$  接收后传递给 4400 型数字平均器(Boxcar),它对信号进行采集和平均,并将结果传给计算机;第二束光被探测器  $D_2$  接收作为 4400 型数字平均器的触发信号;第三束由 WA4500 型波长计监测其波长。实验中首先将光学参变振荡器输出波长调至 766 nm 处,在一定范围内扫描,即可观察到其透射谱。

Table 1. Experimental and theoretical characteristics of K-DADOF at  $D_2$  line in an axial magnetic field of 0.0815 T

temperature	peak transmission / %		side peak / %		FWHM of central peak / GHz	
	theor.	exp.	theor.	exp.	theor.	exp.
400 K	68	58	24	21	1.8	2.1
403 K	79	68	32	27	1.6	1.8
407 K	83	71	38	32	1.5	1.6

如图 2 所示,温度为 407 K、磁场为 0.0815 T、池长为 10mm 时,理论计算透射峰值和带宽分别为 83% 和 1.5 GHz,由于各种损耗的存在,实验透射谱的峰值为 71%。观察表 1 中的数据可知,当温度从 400 K 上升至 403 K 和 407 K 时,实验透射谱中心频率处的峰值分别为 58%, 68% 和 71%,侧峰峰值分别为 21%, 27% 和 32%,呈上升趋势,对应带宽分

### 4 结果与讨论

在强磁场中,采用不同的工作参数,分别获得了线芯和线翼工作的法拉第反常色散滤波器。

#### 4.1 线芯工作的法拉第反常色散滤波器

当磁场保持为 0.0815 T、样品波长为 10 mm 时,在不同的工作温度下,获得了一系列线芯工作法拉第反常色散滤波器的透射谱。由于不同温度下线芯工作透射谱具有相似的结构,在此仅将温度为 407 K 的实验测量和理论计算的谱示于图 2,其余透射谱的有关数据见表 1。

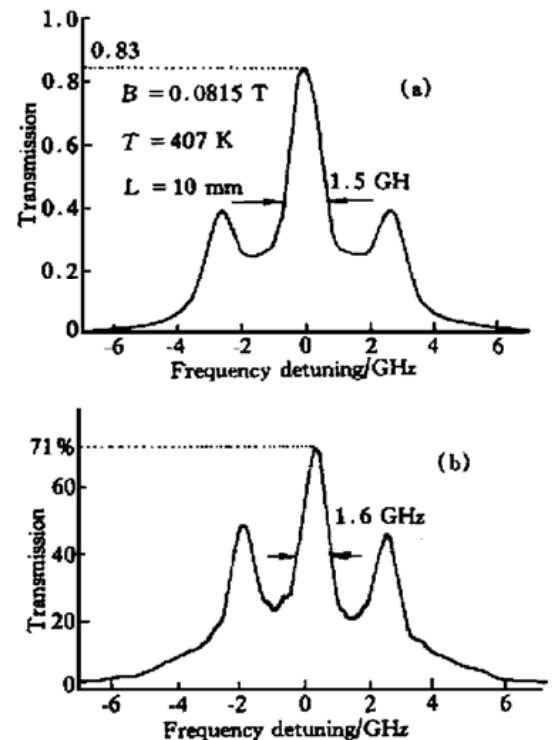


Fig. 2 (a) The theoretical and (b) experimental filter transmissions for  $D_2$  line in an axial magnetic field of 0.0815T with a 10 mm cell at 407 K

别为 2.1 GHz、1.8 GHz 和 1.6 GHz,呈下降趋势。相应的理论计算峰值和带宽随温度变化呈现相同趋势。温度的升高导致参与滤波过程的粒子数增加,因而对应透过率增大。在一定范围内,可通过提高温度来增加法拉第反常色散滤波器的透过率。但是,过高的温度将使原子对光的吸收增强,从而导致透过率下降,并且将使样品池的寿命缩短。因此,盲

目地提高法拉第反常色散滤波器的工作温度是不可取的。

### 4.2 线翼工作的法拉第反常色散滤波器

强磁场中的法拉第反常色散滤波器并不都是线芯工作方式,它的工作方式主要取决于其工作参数。通过改变工作参数,可获得线翼工作的法拉第反常色散滤波器,实验和相应的理论计算透射谱如图 3 所示。

观察理论计算曲线可知,当磁场为 0.0815 T、样品池长为 10 mm、温度为 415 K 时,法拉第反常色散滤波器的透射峰出现两翼,中心频率处的透射率近似为零,理论曲线峰值约为 70%,线宽为 1.0 GHz,两峰之间的间隔为 5.7 GHz;相应的实验曲线峰值透过率、线宽以及两峰之间的间隔分别为 57%、1.1 GHz 和 6.3 GHz。由于所用激光的线宽较宽(约为 500 MHz),实验测得透射谱带宽和两透射峰之间频率间隔略大于理论计算值,总体看来,理论与实验符合得相当好。

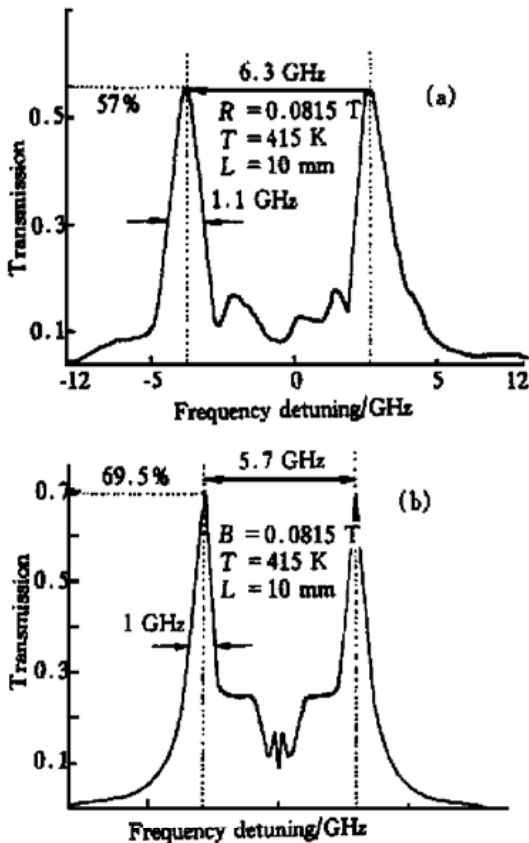


Fig.3 (a) The experimental and (b) theoretical filter transmissions for  $D_2$  line at a magnetic field of 0.0815 T with 10 mm cell at 415 K

为了说明法拉第反常色散滤波器线翼和线芯工作方式的原理,进行如下讨论:

图 4(a) 和图 4(b) 分别为线翼工作法拉第反常色散滤波器的吸收系数和旋转角随频率变化的分布曲线。在强场中,强塞曼效应使左旋和右旋圆分量

所对应的吸收峰彼此分开,中心频率处的吸收近似为零,因此透过率的分布情况主要取决于其所对应的旋转角。

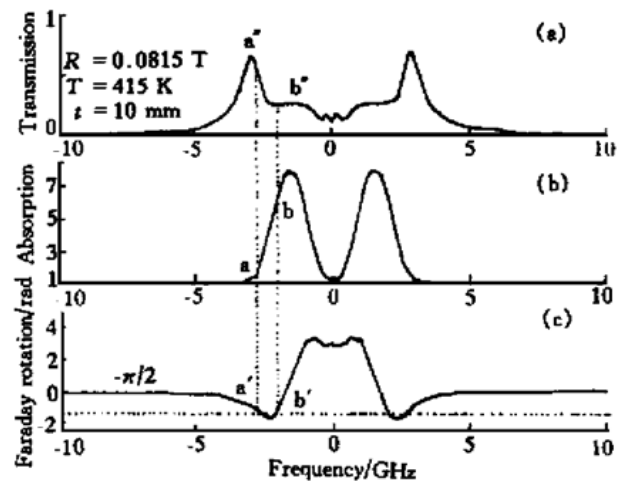


Fig.4 The Faraday rotation and (b) the adsorption coefficient for line wing operation FADOF at a magnetic field of 0.0815 T with a 10 mm cell at 415 K

如图 4 所示,在中心频率处,虽然吸收很小,但由于对应的旋转角近似为  $\pi$ ,信号光被第二个格兰-汤姆逊棱镜完全滤除掉,透过率出现极小;在  $a''$  处出现透射极大是因为此处的旋转角近似为  $-\pi/2$ ,而且吸收很小;在  $b''$  处,转角为  $-\pi/2$ ,但有一定的吸收,因此出现第二个透过率峰值;由于吸收的存在,使得  $T_{rb''}$  远小于  $T_{ra''}$  ( $T_{ra''}$ 、 $T_{rb''}$  分别为  $a''$ 、 $b''$  处的透过率);线芯情况与此相类似,由于中心频率处的旋转角近似为  $\pi/2$ ,而且对应的吸收几乎为零,因此透射最大的出现在线芯处。

### 4.3 温度对法拉第反常色散滤波器滤波特性的影响

图 5 为法拉第反常色散滤波器的主峰和侧峰处透过率随温度变化的分布曲线。由于条件所限,仅给出温度在 395 K~420 K 之间的分布曲线。结果表明,当磁场和样品池长固定时,对线芯工作的法拉第反常色散滤波器而言,温度存在一个最佳值,称之为温度的平衡点,平衡点处所对应的透过率最大。如图 5 所示,当温度低于平衡温度  $T_a$  时,主峰和侧峰透过率随着温度的升高而升高,直到平衡温度  $T_a$  处出现主峰透过率最大值为止。若温度高于平衡温度  $T_a$ ,侧峰透过率继续随着温度的升高而升高,而主峰的透过率随着温度的升高呈现下降趋势。温度达到  $T_b$  时,主峰和侧峰的透过率相等,若温度再继续升高,超过  $T_b$ ,侧峰的透过率将超过主峰,法拉第反常色散滤波器从线芯逐渐过渡到线翼。

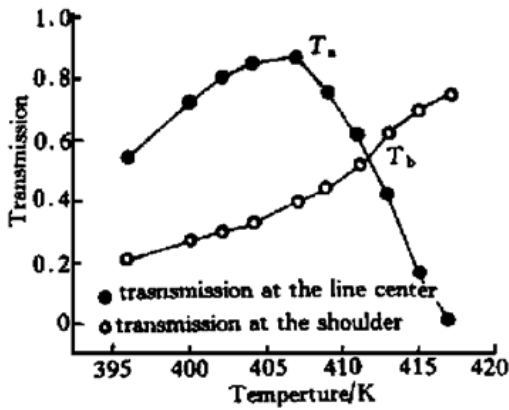


Fig. 5 The transmissions at the line center and the shoulder versus working temperatures at a fixed magnetic field of 0.0815 T with a 10 mm cell

**结论** 对强磁场中钾  $D_2$  线法拉第反常色散滤波器进行了理论和实验研究。结果表明, 钾  $D_2$  线法拉第反常色散滤波器不仅具有高透过、窄带宽等优点, 而且可通过其工作参数的选择, 使其工作在线芯或线翼方式, 以适应不同情况的需求。

### 参 考 文 献

[1] Yeh P. Dispersive magnetooptic filters. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(11): 2069~ 2075  
 [2] Dick D J, Shay T M. Ultrahigh-noise rejection optical filter. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(11): 867~ 869  
 [3] Menders J, Benson K, Bloom S H *et al.*. Ultranarrow line filtering using a Cs Faraday filter at 852 nm. *Opt. Lett.*,

1991, **16**(11): 846~ 848  
 [4] Yin B, Shay T M. Theoretical model for a Faraday anomalous dispersion optical filter. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(20): 1617~ 1619  
 [5] Menders J, Searcy P, Roff K *et al.*. Blue cesium Faraday and Voigt magnetooptic atomic line filters. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(19): 1388~ 1390  
 [6] Hu Zhilin, Sun Xianping, Zeng Xizhi. Rb 780 nm Faraday anomalous dispersion optical filter in a strong magnetic field. *Opt. Commun.*, 1993, **101**(3, 4): 175~ 178  
 [7] 彭玉峰, 汤俊雄, 王庆吉等. 强磁场中 Rb  $D_2$  线法拉第反常色散滤光器特性研究. *光学学报*, 1993, **13**(5): 419~ 424  
 [8] 张 量, 李义民, 汤俊雄. 法拉第反常色散滤波器透射谱的普遍计算方法. *光学学报*, 1999, **19**(7): 988~ 992  
 [9] 陈怀林, 彭玉峰, 汤雄等. 一种新型原子共振滤光器研究. *光学学报*, 1992, **12**(9): 841~ 845  
 [10] Yin B, Shay T M. A potassium Faraday anomalous dispersion optical filter. *Opt. Commun.*, 1992, **94**(13): 30~ 32  
 [11] Dressler E T, Laux A E, Billmers R L. Theory and experiment for the anomalous Faraday effect in potassium. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1996, **13**(9): 1849 ~ 1858  
 [12] Chen H, She C Y, Searcy P *et al.*. Sodium-vapor dispersive Faraday filter. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(12): 1019~ 1021  
 [13] Hu Zhilin, Sun Xianping, Liu Yiping *et al.*. Temperature properties of Na dispersive Faraday optical filter at  $D_1$  and  $D_2$  line. *Opt. Commun.*, 1998, **156**(46): 289~ 293

## Filtering Feature of Potassium Faraday Dispersion Optical Filter

Zhang Yundong Jia Xiaoling Bi Yong Wang Qi Ma Zuguang  
 (Institute of Optoelectronics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)  
 (Received 21 July 2000; revised 8 September 2000)

**Abstract:** The characteristics of the potassium Faraday anomalous dispersion optical filter (FADOF) at  $D_2$  line were studied theoretically and experimentally, and the FADOF's operating ways in line-center and line-wing were obtained under the different working conditions. The effect of temperature on the feature of the FADOF was discussed.

**Key words:** potassium; line-center operation; line-wing operation; filtering feature