

文章编号: 0258-7025(2004)08-0967-04

单光子探测条件下 Rb 法拉第反常色散 滤波器的研究

李若虹, 孙献平*, 罗 军, 曾锡之, 詹明生

(中国科学院武汉物理与数学研究所波谱与原子分子物理国家开放实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要 报道了单光子探测条件下的法拉第反常色散滤波器(FADOF)滤波特性的实验结果。测量结果表明,工作在 D_2 共振线的 Rb 原子 780 nm 法拉第反常色散滤波器的翼谱透射率为 28%, 滤光带宽为 0.7 GHz, 以及最小可探测激光功率为 0.16 pW/cm^2 。由于使用了单光子探测器测量法拉第反常色散滤波器物理参数的方法, 极大地提高了实验测量的探测灵敏度。通过实验数据分析, 给出了相关的讨论。在日光情况下, 如果使用这种 780 nm Rb 法拉第反常色散滤波器代替干涉滤波片, 将极大地降低背景光噪声和减少误码率, 使得在单光子水平的激光通信更接近于实用。

关键词 光电子学; 单光子探测; 弱激光; 法拉第反常色散

中图分类号 O 436.4 **文献标识码** A

Study of Rubidium Faraday Atomic Dispersive Optical Filter with the Single Photon Detector

LI Ruo-hong, SUN Xian-ping, LUO Jun, ZENG Xi-zhi, ZHAN Ming-sheng

(Laboratory of Magnetic Resonance and Atomic and Molecular Physics, Wuhan Institute
of Phys. & Math., The Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract A 780 nm Rb Faraday atomic dispersive optical filter (FADOF) that operates in the wings of Rb D_2 resonance line is experimentally studied with a single photon detector. The measure result shows that the maximum transmission of the 780nm Rb FADOF is 28% and the full width at half maximum is 0.7 GHz. A minimum detectable laser power of 0.16 pW/cm^2 is obtained with the signal-to-noise ratio of transmission spectrum of 2. Therefore, the detection sensitivity of Rb FADOF is remarkably increased when a single photon detector is used. If the Rb FADOF is used to replace a interferential optical filter in laser communication, it can lead to a lower bit error ratio and the system that operates with single photon detector is able to work during daytime when optical background is much larger.

Key words optoelectronics; single photon detector; faint laser; Faraday dispersive

1 引 言

当一束共振线偏振光通过置于纵向磁场的原子蒸气时, 入射光的偏振面会发生旋转, 这就是著名的共振法拉第效应。基于这一原理的原子法拉第反常

色散滤波器(FADOF)具有高透射率、超窄带宽、大接收角、响应速度快、工作频率在一定范围内可调谐等特点。因此被广泛应用于激光通信、激光雷达和高速光调制等领域^[1~5]。Rb 原子 780 nm 法拉第反常色散滤波器的工作波长位于大气层高透射窗口

收稿日期: 2003-04-15

基金项目: 国家 973 计划(2001CB309300)和中国科学院知识创新工程项目经费(KGCX2-SW-103)资助项目。

作者简介: 李若虹(1979—), 女, 中国科学院武汉物理与数学研究所硕士研究生, 主要从事法拉第反常色散滤波器方面的研究。

* 通信联系人。E-mail: xpsun@wipm.ac.cn

770 nm 附近,在大气激光通信中用于抑制阳光、月光和星光的背景光辐射,提高信噪比,具有非常重要作用。

但是,文献[1~5]的实验研究都是在较强的入射光情况下进行的,而现行的激光通信也需要在弱光乃至单光子水平条件下对信号进行保真传送。在弱光的情况下,由于背景光相对较强,光学滤波成为一个非常关键的问题。本文基于 Rb 原子 780 nm 法拉第反常色散滤波器体系,对单光子探测条件下法拉第反常色散谱进行了实验研究。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示。光源为半导体激光器(TUIOPTIC DL100),线宽 ~ 30 MHz。法拉第反常色散滤波器由天然 Rb 样品泡和两个正交的

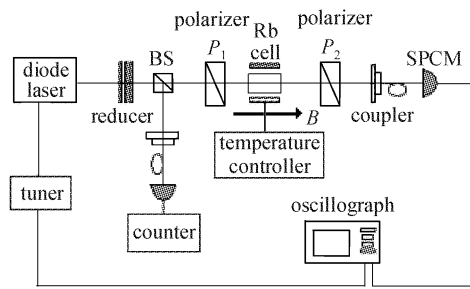


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental setup

Glan-Thompson 棱镜构成。Glan-Thompson 棱镜正交的消光效率为 10^5 。Rb 样品泡长 4 cm,直径 2 cm。内壁的有机硅涂层用于减少原子与内壁碰撞引起的弛豫效应,从而延长原子基态的寿命。样品泡的温度由一恒温电路控制,控温精度为 $\pm 0.035^\circ\text{C}$ 。对产生法拉第反常色散滤波器纵向磁场的磁铁及结构,参考文献[6]已作了详细描述。法拉第反常色散滤波器的透射光经过光耦合器进入多模光纤之后,由单光子探测模块(SPCM;EG&G part number SPCM-AQR 14-FC)测量。较小的光纤直径限制了接受立体角的范围,从而极大地削弱了耦合到单光子探测模块中的背景光。双通道计数器(EG&G Module 994 Dual Counter / Timer)用来测量单位时间内入射光子数,由此可以得到入射光强值。法拉第反常色散滤波器的工作点锁定在 1.45×10^{-2} T 磁场和 79.54°C 的蒸气温度下。在压电陶瓷(PZT)上加载 $-10 \sim +10$ V 的扫描电压,使激光频率在 Rb 法拉第反常色散滤波器的一侧翼峰附

近扫描。在单光子探测模块输出的 TTL 信号经优化后输入数字存储示波器(Tektronix TDS 2014)得到法拉第反常色散滤波器的透射谱。示波器的信号平均功能(最大 128 次)可以有效地提高信噪比。

实验测量分两步进行。首先,在较强的入射光强下找到 Rb 780 nm 法拉第反常色散滤波器其中一个侧翼峰的透射谱;然后,再用中性密度滤光片(Neutral-density filters)衰减为弱光源,在相同的实验情况下使用单光子计数器测量弱光下的透射峰。

3 实验结果及讨论

由于单光子探测器可测量的光强范围非常小,不方便比较测量值。因此,为了比较,首先使用一个硅光电池探测器,测量得到光强为 $798 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 时 Rb 780 nm 法拉第反常色散滤波器一个翼峰的谱图,如图 2 所示。其最大透射率为 38%,峰的半高宽(FWHM)为 2.2 GHz。

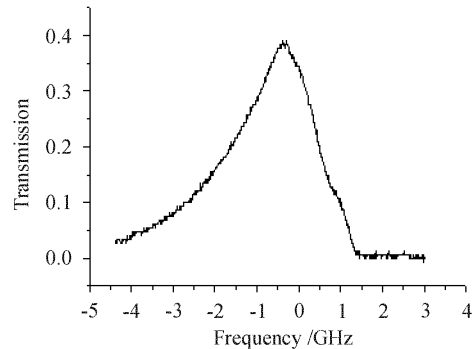


图 2 入射光强为 $798 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 时的法拉第反常色散滤波器透射谱

Fig. 2 Experimental transmission spectra of FADOF with the incident light power $798 \mu\text{W}/\text{cm}^2$

在弱磁场小于 2×10^{-2} T 情况下, (F, m_F) 为好量子数,在磁场中的能量平移为

$$\Delta E = h\mu_B B (m_{F2} g_{F2} - m_{F1} g_{F1}) \quad (1)$$

系统的透射率可表示为^[7]

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

其中 $\bar{\alpha}$, $\Delta\alpha$ 和 ρ 分别表示平均吸收系数、圆二向色性和磁旋本领。表示式为

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

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

$$\rho = \frac{\omega}{4c} \text{Re}(\chi_+ - \chi_-) \quad (3)$$

χ_{\pm} 为考虑麦克斯韦速率分布和多普勒效应后左右旋圆极化谱线的电极化率

$$\chi_{\pm} = i \frac{3 \sqrt{\ln 2} e^2}{4 \sqrt{\pi} m \epsilon_0 \omega_{21}} \sum \frac{N_n f(2 \rightarrow 1)}{\Delta \nu_{Dn}} \times (2J_1 + 1)(2J_2 + 1)(2F_2 + 1) \begin{Bmatrix} F_2 & 1 & F_1 \\ -m_F & I & J_2 \end{Bmatrix}^2 \times \begin{Bmatrix} F_2 & 1 & F_1 \\ -m_F & \pm 1 & m_F \mp 1 \end{Bmatrix}^2 W(\partial \nu_n \mp \partial \nu_{sj} + i\alpha_n) \quad (4)$$

式中 $\Delta \nu_{Dn} = 7.16 \times 10^{-7} \nu_n \sqrt{T/M}$, $\partial \nu_n = 2 \sqrt{\ln 2} [(\nu - \nu_n) / \Delta \nu_{Dn}]$, $\partial \nu_{sj} = 2 \sqrt{\ln 2} (\Delta \nu_{sj} / \Delta \nu_{Dn})$, $\alpha_n = \sqrt{\ln 2} (\Delta \nu_N / \Delta \nu_{Dn})$, $W(\partial \nu_n \mp \partial \nu_{sj} + i\alpha_n) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(-t^2)}{\partial \nu_n \pm \partial \nu_{sj} + i\alpha_n - t} dt$.

由(1)~(4)式得到弱场下的 Rb-法拉第反常色散滤波器的理论透射曲线,如图 3 所示。

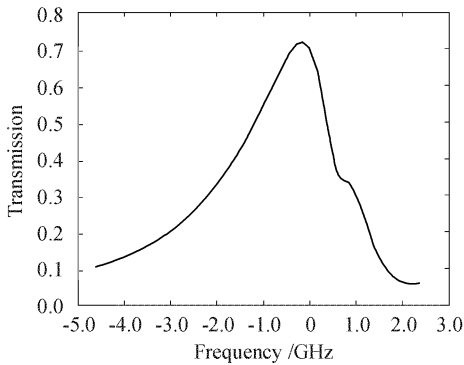


图 3 理论计算的法拉第反常色散滤波器透射谱
Fig. 3 Theoretical transmission spectra of FADOF

由图 3 可见,理论的 Rb-法拉第反常色散滤波器最大透射率为 72%,FWHM 为 2.2 GHz,这与使用较强光的图 2 实验测量情况基本吻合。其差别仅仅在实验测量的透射率值中,包括有由于各级光学镜面的光损耗和 Rb 样品泡吸收产生的影响。图 4 是实验测量的光强为 12.4 mW/cm² 时的法拉第反常色散滤波器透射谱,其给出最大透射率为 54%,FWHM 为 2.9 GHz。

当入射光强为 2.2 pW/cm² (考虑了单光子计数模块在 780 nm 波长 61% 的探测效率和 60% 的光纤耦合效率及各级镜片衰减),使用单光子探测器测量得到 Rb 780 nm 法拉第反常色散滤波器的透射谱,如图 5 所示。其最大透射率为 28%,FWHM 仅为 0.7 GHz。

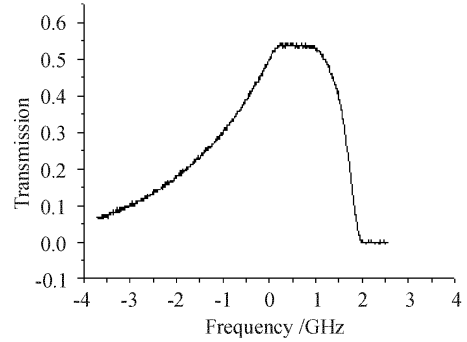


图 4 入射光强为 12.4 mW/cm² 时的法拉第反常色散滤波器透射谱

Fig. 4 Experimental transmission spectra of FADOF with the incident light power 12.4 mW/cm²

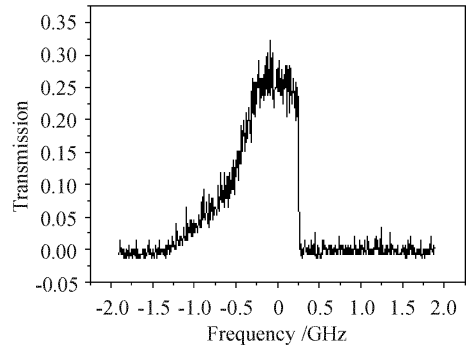


图 5 入射光强为 2.2 pW/cm² 时的法拉第反常色散滤波器透射谱

Fig. 5 Experimental transmission spectra of FADOF with the incident light power 2.2 pW/cm²

比较图 2,图 3,图 4 和图 5,不同光强实验下的测量表明,当入射光强变弱时,法拉第反常色散滤波器的透射率降低,线宽却变窄。这是因为在实验中使用了较低的法拉第反常色散滤波器工作温度,此时 Rb 蒸气样品为光学薄的。在弱光情况下,光子与 Rb 原子相互作用平均概率减少,从而法拉第反常色散滤波器透射率下降。当使用较强入射光强时,饱和增宽效应使线宽也相应增大。同时可以看到,当入射光强很强时透射谱的谱型与皮瓦量级光入射时较为相似,谱线右侧的小峰都被湮没了。原因在于入射光变强时,在原子蒸气密度一定的情况下,强入射光与极弱光强情况一致。

在图 5 测量的基础上,使用中性密度滤光片进一步衰减激光的光强,直到透射谱的信噪比为 2:1,如图 6 所示。由此得到 Rb 780 nm 法拉第反常色散滤波器的最小可探测激光功率为 0.16 pW/cm²。由于使用了单光子探测器测量法拉第反常色散滤波

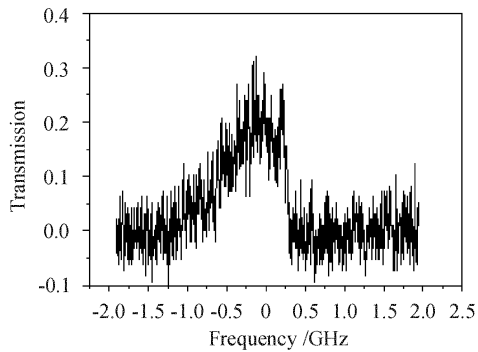


图 6 入射光强为 0.16 pW/cm^2 时的法拉第反常色散滤波器透射谱

Fig. 6 Experimental transmission spectra of FADOF with the incident light power 0.16 pW/cm^2

器物理参数的方法,与我们以前的工作^[5]相比,极大地提高了探测灵敏度。

由于实验条件的限制,单光子探测的信号平均仅为 128 次,同时磁场和入射光的方向也不能严格重合,从而存在一定测量误差。由理论计算(1)~(4)式可知,改变 Rb 780 nm 法拉第反常色散滤波器的蒸气密度、磁场强度或者蒸气泡尺寸,将可能提高它的滤光效率。

在卫星激光通信中,信息误码大多来自背景噪声。以 300 km 近地卫星轨道为例,日光下各辐射源的背景辐射为 $10^{22} \text{ photons}/(\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{str} \cdot \mu\text{m})$ 。在月光下为 $4 \times 10^{16} \text{ photons}/(\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{str} \cdot \mu\text{m})$ 。如果用纳米量级带宽的干涉滤波片,则在 5 rad 的接收角上,产生误码 $9 \times 10^{-5} \sim 10^{-3}$ (月光),而在日光情况下,信号已湮没于噪声中。如果改用 Rb 780 nm 法拉第反常色散滤波器,由我们的实验结果,滤

光带宽仅为 0.7 GHz,即为 $1.4 \times 10^{-3} \text{ nm}$ 。那么误码可以控制在 $1.2 \times 10^{-7} \sim 10^{-5}$ (月光)和 $2.4 \times 10^{-2} \sim 10^{-1}$ (日光),将极大地减少误码率,使得激光通信更接近于实用。

4 结 论

基于 Rb 原子 780 nm 法拉第反常色散滤波器体系,研究了单光子探测条件下法拉第反常色散滤波器的滤波特性。实验结果表明工作在弱激光下的法拉第反常色散滤波器具有大于 20% 透过率,0.7 GHz 滤光带宽和 0.16 pW/cm^2 的最小可探测激光功率。相应的分析表明其可能在单光子水平的激光通信中具有应用前景。

参 考 文 献

- 1 D. M. Camm, F. L. Curzon. The resonant Faraday effect [J]. *Can. J. Phys.*, 1972, **50**(17):2866~2880
- 2 B. Yin, T. M. Shay. Theoretical model for a Faraday anomalous dispersion optical filter [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(20):1617~1619
- 3 D. J. Dick, T. M. Shay. Ultrahigh-noise rejection optical filter [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(11):867~869
- 4 Peng Yufeng, Tang Junxiong, Wang Qingji. Study of Faraday anomalous dispersion spectra of the hyperfine structure of Rb D_2 lines [J]. *Acta Physica Sinica (overseas edition)*, 1993, **2**(1):1~8
- 5 Zhilin Hu, Xianping Sun, Xizhi Zeng *et al.*. Rb 780 nm Faraday anomalous dispersion optical filter in a strong magnetic field [J]. *Opt. Commun.*, 1993, **101**(3~4):175~178
- 6 Zhilin Hu, Xianping Sun, Yiping Liu *et al.*. Temperature properties of Na dispersive Faraday optical filter [J]. *Opt. Commun.*, 1998, **156**(4~6):289~293
- 7 P. Yeh. Dispersive magneto-optical filters [J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(11):2069~2075