

文章编号: 0253-2239(2001)05-0597-03

铯 460.7 nm 法拉第色散光学滤波器的 滤波特性分析

掌蕴东 贾晓玲 胡勇 毕勇 马祖光 王骥
(哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 哈尔滨 150001)

摘要: 分析了处于夫琅禾费暗线的 Sr 460.7 nm 法拉第色散光学滤波器线翼和线芯工作的滤光特性, 研究了磁场、温度和池长对滤波特性的影响, 讨论了在其最佳的工作条件下, 线芯透射率为 95%, 线宽为 1.47 GHz。

关键词: 法拉第色散效应; 超窄带滤波; 夫琅禾费暗线

中图分类号: TB851 文献标识码: A

1 引言

法拉第色散光学滤波器^[1-3]是一种超窄带宽、大视场角、高透射、快响应的光学滤波器。它在自由空间激光通信系统中, 对消除背景噪声、提高接收信噪比起着重要作用。Sr 460.7 nm 法拉第色散光学滤波器的波长位于水下窗口, 所以在水下应用中尤为重要; 而且其波长 460.7 nm 是处于太阳的夫琅禾费暗线之中, 使来自太阳的连续背景可以衰减掉约 50%。

本文详细地讨论了 Sr 460.7 nm 法拉第色散光学滤波器的滤光特性。

2 理论考虑

铯 460.7 nm 法拉第色散光学滤波器的工作原理如图 1 所示。

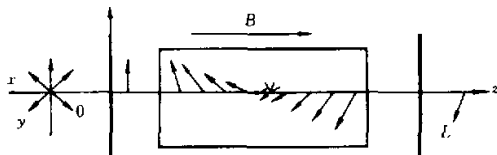


Fig. 1 The configuration of Faraday dispersion optical filter

它利用均匀磁场中铯原子共振吸收线附近反常色散特性, 入射光的偏振面发生旋转, 使入射光中的信号光得以透过, 旁带噪声得到抑制。由于铯(单态 $5s^1 S_0 - 5p^1 P_1$) 的核自旋为零, 总的电子自旋为

零, 不存在精细分裂和超精细分裂, 因此 Sr 460.7 nm 法拉第色散光学滤波器仅有一个噪声通道^[4]。其透射率为

$$T = \frac{I_1}{I_0} = \frac{|E_1|^2}{|E_0|^2} = \frac{1}{2} \exp(-\alpha L) [\cosh(\Delta\alpha L) - \cos(2\rho L)], \quad (1)$$

式中 I_1 、 I_0 分别为透射和入射光强, E_1 和 E_0 分别为透射和入射偏振光的振幅, L 为池长, α 为平均吸收系数, $\Delta\alpha$ 为圆二色性, ρ 为磁旋本领^[3]。圆偏振光的极化率张量 χ_{\pm} 为

$$\chi_{\pm} = \frac{3e^2(2J+1)f}{4m\epsilon_0\omega_0(\omega_0 \pm \Delta\omega_s - \omega - i\Gamma/2)} \times \begin{pmatrix} J' & 1 & J \\ -M_j & \pm 1 & M_j \end{pmatrix}^2, \quad (2)$$

式中圆括号号为 $3-j$ 符号, ω_0 、 $\Delta\omega_s$ 、 ω 、 r 分别为无外场时原子的跃迁中心角频率、塞曼频移、入射光频率和自然加宽。符号'表示末态, J 、 M_j 分别为总角动量子数和其在 Z 方向的投影分量的量子数。考虑到原子运动的多普勒效应和麦克斯韦速率分布, 得到体系的极化率张量为

$$\chi_{\pm} = i\sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \frac{Ne^2 f}{2m\epsilon_0\omega_0\Delta\nu_D} W(\delta\nu\mu\delta\nu_s + ia), \quad (3)$$

其中 N 为基态粒子数密度, f 为振子强度, $\Delta\nu_D$ 为多普勒加宽, m 、 e 、 ϵ_0 、 ω_0 分别为电子质量、电子电量、真空介电常数,

$$W(x+iy) = \frac{i}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(-t^2)}{x+iy-t} dt$$

为等离子体色散函数, $\Delta\nu_s = \mu_B B$ 为塞曼裂距, μ_B 为

玻尔磁子,其他各参量分别表示如下:

$$\left. \begin{aligned} \delta\nu &= 2\sqrt{\ln 2} \frac{\nu - \nu_0}{\Delta\nu_D}, \\ \delta\nu_s &= 2\sqrt{\ln 2} \frac{\Delta\nu_s}{\Delta\nu_D}, \\ a &= \sqrt{\ln 2} \frac{\Gamma}{\Delta\nu_D}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中 ν, ν_0 分别为入射光频率和零场时的跃迁频率。各参量的详细含义见文献[3,6]。

3 滤波特性

3.1 线翼透射率 T

图2为相关的 Sr 能级图。由(1)式~(4)式可计算 Sr 460.7 nm 法拉第色散光学滤波器的透射谱、旋转角和吸收系数。由(1)式可知,线翼方式一般是双峰透射,如图3所示。最大透射率出现在频率为共振吸收线的外侧,旋转角接近 $\rho L = \pm \frac{(2k+1)\pi}{2} (k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$, 而且没有吸收。从图3可见,只有频率在透射峰 A 和 B 附近的光才有可能透过,其它频率的光都被滤掉。线翼方式对双通道工作的系统^[6](如光通信系统)是很有利的。

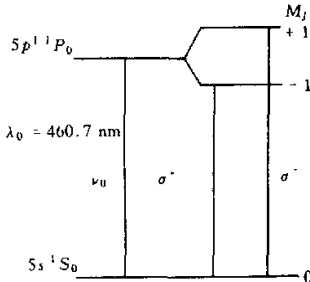


Fig.2 Relevant energy levels of Sr

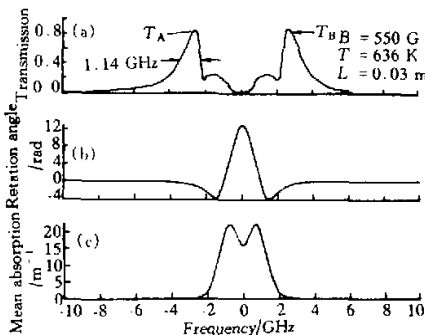


Fig.3 Calculated transmission, rotation angle (rad), mean absorption of Sr 460.7 nm Faraday dispersion optical filter (FADOF)

3.2 透射率与磁场、温度和池长的关系

Sr 色散光学滤波器的高透射取决于其工作条件。即:其透射谱 T 是磁场、温度和池长的函数,从图4中可以看出:透射率随磁场的增大而增大,最后达到饱和。而透射谱随温度的变化如图5所示。总的趋势随温度的增高而增加,达到饱和。但是随温度的增加,透射率曲线有振荡表现,尤其在低温区振荡明显,相当于温度对透射率进行了调制。图5说明,在一定的磁场和池长条件下,温度的增高并不能总是使透射率增加,有时温度的增高反而使透射率下降;这说明透射率对磁场、温度、池长的依赖在某一范围内有最佳的选择。在高温区,透射率是增加到饱和后保持平缓。图4中透射率随磁场变化的曲线1也有类似情形。

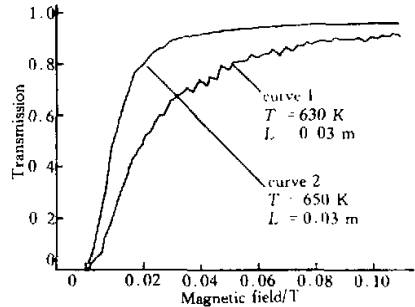


Fig.4 Calculated transmission of Sr Faraday filter as a function of magnetic field

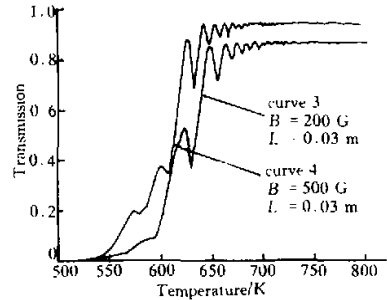


Fig.5 Calculated transmission of Sr Faraday filter as a function of temperature

3.3 线芯透射率

强磁场条件下,由于强磁场使 σ^+ 和 σ^- 跃迁的间隔加大,其吸收峰距离变大,线芯处无吸收,使 Sr 法拉第色散光学滤波器呈线芯工作方式。这对光学滤波非常有利,因为这种方式没有噪声通道,而且其有最佳工作条件。

图6是线芯工作的透射谱,主峰 a 的透射率达到 95.1%,其线宽为 1.47 GHz,稍宽于线翼透射峰的线宽;次透射峰 b 和 c 的大小及线宽可以通过 T.

作条件来改变。图 7 给出了不同磁场、温度及池长的线芯透射谱。曲线 A、B、C 的主透射峰分别为 92.8%、88.3%、77.2%，线宽分别为 $\Delta\nu = 1.38\text{GHz}$ 、 1.43GHz 、 2.28GHz ，次透射峰分别为

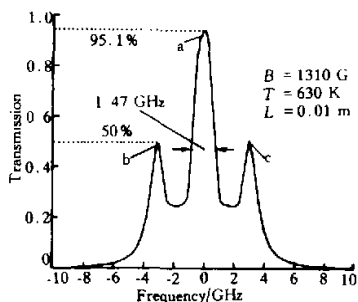


Fig. 6 Calculated transmission of Sr Faraday filter with central operation

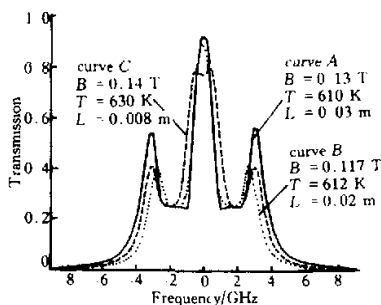


Fig. 7 Transmission of Sr Faraday filter with different conditions

57%、41.3%、40.9%。由此可见，不同的工作条件，线芯透射曲线也相差很大。

结论 由于 Sr 法拉第色散光学滤波器的工作波长与太阳的夫琅和费暗线相匹配，来自太阳的连续背景光被衰减了 50%，而且与线芯透射峰相对应；同时，Sr 法拉第滤波器属于碱土金属滤波器，没有精细结构和超精细分裂，因此没有众多的背景通道，非常有利于背景噪声的衰减和提高信噪比。

Sr 法拉第色散光学滤波器工作波长处于水下透射的最佳窗口 ($480 \pm 30 \text{ nm}$)，而且无论线翼工作还是线芯工作，它都能保持高透射、窄带宽的特性，因此 Sr 法拉第色散光学滤波器是一种理想的、可用于水下波段、高效、实时工作的超窄带光学滤波器。

参 考 文 献

- [1] 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
- [2] Dick D J, Shay T M. Ultrahigh-noise rejection optical filter. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(11):867~869
- [3] Yeh P. Dispersion magneto-optic filters. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(11):2069~2075
- [4] Gelbwachs J A, Chan Y C. Passive Fraunhofer-wavelength atomic filter at 460.7 nm. *IEEE. J. Quant. Electron.*, 1992, **QE-28**(11):2577~2581
- [5] Tang Junxiang, Wang Qingji, Li Yimin *et al.*. Experimental study of a model digital space optical communication system with new quantum devices. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(15):2619~2622

Analysis of Filtering Characteristics of Sr Faraday Dispersion Optical Filter at 460.7 nm

Zhang Yundong Jia Xiaoling Hu Yong Bi Yong Ma Zuguang Wang Qi
(Institute of Opto-Electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

(Received 12 August 1999; revised 21 February 2000)

Abstract: The Sr Faraday dispersion optical filter at 460.7 nm in Fraunhofer dip was analyzed. The filtering properties of the filter at line wing and central operation were analysed respectively. The influence of magnetic field, temperature and cell length on the filter operation was discussed. Under the best operation conditions the transmission at line centre is up to 95%, and bandwidth is about 1.47 GHz.

Key words: Faraday dispersion effect; ultra-narrowband filtering; Fraunhofer dip