

脉冲光下 Cs 455 nm 法拉第反常色散谱研究*

胡志林 孙献平 曾锡之

(中国科学院武汉物理研究所波谱与原子分子物理国家重点实验室, 武汉 430071)

汤俊雄 张量 王庆吉

(北京大学无线电系, 北京 100871)

摘 要 首次报道利用 YAG 脉冲激光研究了 Cs 455 nm 的法拉第反常色散谱(FADS)。初步实验结果与理论计算一致。

关键词 脉冲激光, 法拉第反常色散谱。

1 引 言

早在 1972 年, Camm 和 Curzon^[1] 对等离子体的法拉第效应进行了研究。1982 年, Yeh^[2] 在精细结构条件下对 Cs 459 nm 的法拉第反常色散谱进行了研究。近年来开放式的激光通讯的发展, 人们希望有一种超窄带滤光器。法拉第反常色散光学滤波器(FADOF)是目前认为最理想的一种。因此对法拉第反常色散谱的研究在理论和应用方面都有重要意义。本文作者^[3] 对 Cs 459 nm 法拉第反常色散光学滤波器的重要参数与温度和磁场的关系已经作了详细的理论研究。Menders^[4], Bin 和 SHay^[5, 6] 对 Cs 在弱磁场和单模连续激光的条件下进行了实验研究, 并考虑超精细结构的条件绘制了理论谱图。本文作者^[7] 在强磁场范围和不同的温度下从实验和理论上研究了 Rb 780 nm 法拉第反常色散光学滤波器的几个重要参数与磁场和温度的关系。以上的实验研究都是在单模连续激光的条件下进行。用脉冲激光研究法拉第反常色散谱更接近开放式激光通讯的需要, 至目前为止, 用脉冲激光研究法拉第反常色散谱在国际上未见报道。本文给出脉冲激光的条件下 Cs 455 nm 法拉第反常色散谱透过率和线宽与磁场关系的实验研究和理论计算结果, 透过率与激光线宽关系的理论曲线。

2 实 验

实验装置如图 1 所示。用法国的 Quanled DATACHROM-500, Nd³⁺:YAG/DYE 激光器作为光源, 频宽 2.3 GHz, 扫描速度 0.008 A/sec, 脉冲频率 10/s, 脉冲宽度 10 ns, 功率抖动 50%。染料为香豆素-1(C460)。Cs 样品泡 $\phi = 20$ mm, $L = 50$ mm。偏振器为格兰-汤姆森棱

* 国家自然科学基金资助的课题。

收稿日期: 1994 年 1 月 28 日; 收到修改稿日期: 1994 年 8 月 29 日

镜。磁场由螺线管提供。实验中激光被分束镜 R 分为两束。一束照射到 Cs 泡 A 上用于寻找激光的频率位置。另一束经衰减器 D 再经过格兰-汤姆森棱镜 P₁ 起偏，以线偏振光照射到并通过置于磁场中的样品泡。出射光经其偏振方向与棱镜 P₁ 正交的棱镜 P₂ 检偏后由 PMT 转换成电信号经 BOXCAR 平均后由计算机采集数据。计算机采样与 Nd³⁺:YAD/DYE 扫描同步。激光扫描范围 40 GHz，照射样品泡的典型平均功率为 0.4 nW。泡温和磁场分别在 70~110 °C 和 0~650 × 10⁻⁴ T 范围改变。

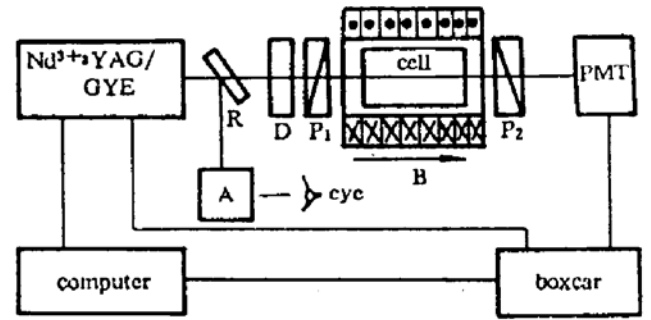


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

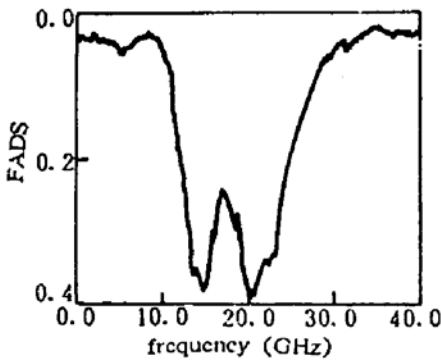


Fig. 2 FADS versus frequency. Temperatur $T = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$; Magnetic field $B = 310\text{ Gauss}$

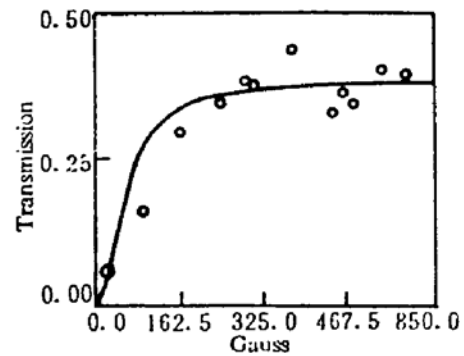


Fig. 3 Relations of the maximum transmission to the magnetic field at cell temperatur $T = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$ (a) dots are experimental results, (b) curve is theoretically calculated

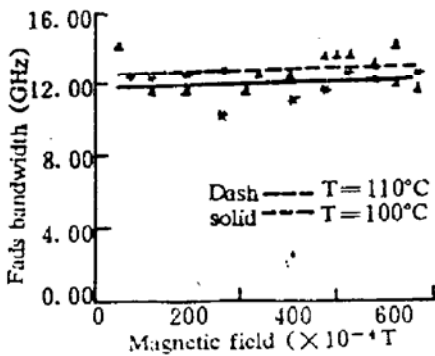


Fig. 4 Experimental results; The relations of the FADS bandwidth to the magnetic field at cell temperature $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $T = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$

3 理论分析

实验中超精细磁能级分裂所反应的谱线细节被激光 2.3 GHz 的线宽所淹没。没有文献 [4]、文献 [6]、文献 [7] 谱图中由超精细结构所体现的细致结构。在本实验条件范围内谱线宽度没有明显变化。对于研究法拉第反常色散谱透过率与磁场的关系，这里只需考虑能级的精细结构。图 5 给出 Cs 455 nm 在磁场中分裂的精细能级结构。磁场中的能级平移：

$$\Delta E = g_j M_j \mu_B B / 2m. \tag{1}$$

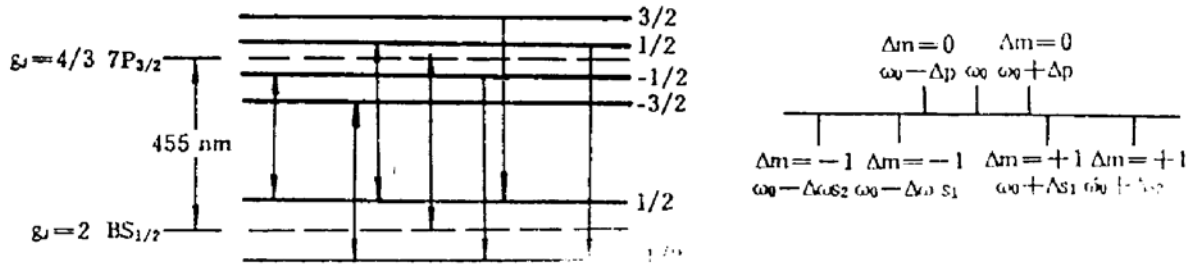


Fig. 5 Fine structure and Zeeman transition in a magnetic field

当入射激光源的频宽足够窄的情况下法拉第反常色散谱透过率 T_r 可表示为^[2]

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

式中 \bar{a} , $\Delta\alpha$ 和 ρ 分别为平均吸收系数, 圆二向色性和磁旋本领, 并表示为

$$\left. \begin{aligned} \bar{a} &= \bar{a}_0 [W_{Re}(\xi - \xi_{s1} + ia) + W_{Re}(\xi + \xi_{s1} + ia) + (1/3)W_{Re}(\xi - \xi_{s2} + ia) \\ &\quad + (1/3)W_{Re}(\xi + \xi_{s2} + ia)] \\ \Delta\alpha &= \alpha_0 [W_{Re}(\xi - \xi_{s1} + ia) - W_{Re}(\xi + \xi_{s1} + ia) + (1/3)W_{Re}(\xi - \xi_{s2} + ia) \\ &\quad - (1/3)W_{Re}(\xi + \xi_{s2} + ia)] \\ \rho &= (1/2)\alpha_0 [W_{Im}(\xi + \xi_{s1} + ia) + W_{Im}(\xi - \xi_{s1} + ia) + (1/3)W_{Im}(\xi + \xi_{s2} + ia) \\ &\quad - (1/3)W_{Im}(\xi - \xi_{s2} + ia)] \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

$$\xi = 2\sqrt{\ln 2} \Delta\omega/\Delta\omega_D, \quad \xi_s = 2\sqrt{\ln 2} \Delta\omega_s/\Delta\omega_D, \quad \Delta\omega_{s1} = eB/2m, \quad \Delta\omega_{s2} = (5/3)eB/2m$$

$$\alpha_0 = (3/4)(N^2 f/2mc\epsilon_0 \Delta\nu_D) \sqrt{(\ln 2/\pi)}, \quad \text{Log } N = 30.038 - 4041/T - 2.35 \text{ Log } T$$

$\Delta\omega_D$ 为 Cs 455 nm 的多普勒展宽, N 为铯原子蒸汽密度, $f(J = 3/2 \leftarrow J = 1/2) = 0.022$ 为铯原子振子强度。色散函数:

$$W(x + iy) = \frac{i}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} [\exp(-t^2)/(x + iy - t)] dt = W_{Re} + iW_{Im} \tag{4}$$

当考虑到 2.3 GHz 的激光线宽时, 必须对透过率公式(2)进行修正。考虑到脉冲激光的频率展宽为高斯线型:

$$\begin{aligned} \Gamma(\omega - \omega_0, \Delta) &= (2/\Delta \sqrt{\pi}) \exp\{-4(\omega - \omega_0)^2/\Delta^2\} \\ \Delta &= \Delta\omega/\sqrt{\ln 2}. \end{aligned} \tag{5}$$

式中 $\Delta\omega$ 为激光线宽。本实验所用 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}/\text{DYE}$ 的线宽 $\Delta\omega = 2.3 \text{ GHz}$, 将(2)式和(5)式进行卷积, 得到修正后的法拉第反常色散谱透过率 $T_r(\omega)$ 。表示为:

$$T_r(\omega) = \int_0^\infty \Gamma(\omega' - \omega, \Delta) T(\omega') d\omega' \tag{6}$$

综合(2), (5), (6)三式, 使用计算机在不同的温度和磁场点进行数值计算即可得到法拉第反常色散谱的最大透过率与泡温和磁场关系的理论值。图 3 中的理论曲线描述了在泡温 $T = 110 \text{ }^\circ\text{C}$ 时法拉第反常色散谱的最大透过率随磁场的变化关系, 与实验结果一致。图 6 给出泡温 $T = 110 \text{ }^\circ\text{C}$ 及磁场 $B = 660 \times 10^{-4} \text{ T}$ 时法拉第反常色散谱的最大透过率与入射光线宽关系的理论

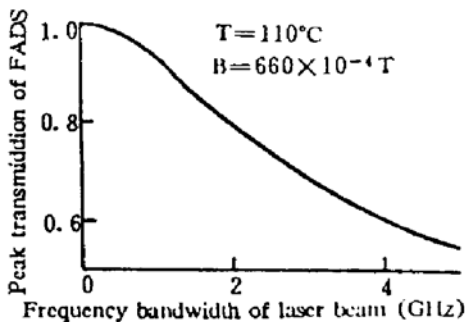


Fig. 6 Theoretical result of FADS peak transmission versus the frequency bandwidth of the incident laser

曲线, 容易看出透过峰随激光线宽的增加而减小, 且其变化率有区域性变化。综合上述工作得到下列结论:

- 1) 泡温 $T = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$, 当磁场强度 B 增强到 $300 \times 10^{-4}\text{ T}$ 左右时透过率随磁场的增加变化平缓。
- 2) 实验中得到在 $T = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $B = 380 \times 10^{-4}\text{ T}$ 时透过率为 47%。
- 3) 理论计算表明当入射光的线宽变窄时透过率增加, 当入射光线宽接近 50 MHz 时透过率趋于最大值。
- 4) 脉冲光下法拉第反常色散谱线宽随磁场和泡温的变化趋势以及透过率随磁场的变化趋势与在单模连续光下的情况基本一致。
- 5) 由于脉冲光的功率变化较大, 透过率随温度的变化关系有待进一步研究。
- 6) 本实验用样品泡长为 50 mm, 对于是 10 nm 脉宽的脉冲激光束, 在其理论分析上可以近似作为连续光处理, 如图 3 所示。

本工作的实验在北京大学物理系完成, 并得到夏宗炬教授的热情帮助, 在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] D. M. Camm, F. L. Curzon, The resonant faraday effect. *Canadian Journal of Physics*, 1972, 50: 2866~2880
- [2] P. Yeh, Dispersive magneto-optic filters. *Appl. Opt.*, 1982, 21(11): 2069~2075
- [3] 胡志林, 孙献平, 曾锡之等, Cs 原子 459 nm 法拉第反常色散光学滤波器特性分析. *光谱学与光谱分析*, 1994, 14(1): 21~24
- [4] J. Menders, K. Benson, S. h. Bloom *et al.*, Ultranarrow line filtering using a Cs Faraday filter at 852 nm. *Opt. Lett.*, 1991, 16(11): 846~848
- [5] B. Yin, T. M. Shay, Theoretical model for a Faraday anomalous dispersion optical filter. *Opt. Lett.*, 1991, 16(20): 1617~1619
- [6] B. Yin, T. M. Shay, Faraday anomalous dispersion optical filter for the Cs 455 nm transition. *IEEE Phot. Tech. Lett.*, 1992, 4(5): 488~490
- [7] Zhilin Hu, Xianping Sun, Xizhi Zeng *et al.*, Rb 780 nm Faraday anomalous dispersion optical filter in a strong magnetic filter. *Opt. Comm.*, 1993, 101: 175~178

Experimental Study of Cs 455 nm FADS with YAG Pulse Laser

Hu Zhilin Sun Xianping Zeng Xizhi

(Wuhan Institute of Physics, The Chinese Academy of Sciences, Laboratory of Magnetic Resonance and Atomic and Molecular Physics—One of the State Key Laboratories, Wuhan 430071)

Tang Junxiong Zhang Liang Wang Qingji

(Department of Radio-Electronics, Peiking University, Beijing 100871)

(Received 28 January 1994; revised 29 August 1994)

Abstract In this paper, we report the results of the first experimental demonstration of Cs 455 nm Faraday anomalous dispersion spectrum (FADS) with YAG pulse laser. The initial experiment results are in good agreement with the theoretical analyses.

Key words pulse laser, FADS.