论文

单透射峰 Faraday 反常色散原子滤光器中检偏器角度的影响

陶智明^{①②}, 孙钦青^①, 薛潇博^①, 洪叶龙^①, 陈景标^{①*}^① 北京大学信息科学技术学院, 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 量子电子研究所, 北京 100871;^② 毕节学院物理系, 毕节 551700

*联系人, E-mail: jichen@pku.edu.cn

收稿日期: 2012-01-10; 接受日期: 2012-06-13; 网络出版日期: 2012-11-27

国家自然科学基金资助项目(批准号: 10874009, 11074011)

摘要 本文研究了工作在 Rb 原子 D_2 线($5S_{1/2} \rightarrow 5P_{3/2}$)780 nm 单透射峰的法拉第反常色散原子滤光器(Faraday Anomalous Dispersion Optical Filter, FADOF)中检偏器角度变化对单透射峰的影响, 在室温时, 发现检偏器角度每增加 1° , 峰值透射率平均增加 0.21%, 从相对值来说, 从 90° – 89° 时, 等效透射率增加一倍. 同时测量了检偏器角度变化对传统多透射峰 FADOF 的影响, 以及铷泡温度、长度变化对透射率的影响.

关键词 法拉第反常色散原子滤光器, 单透射峰, 检偏器角度

PACS: 32.30.-r, 32.70.Fw, 32.80.-t

doi: 10.1360/132012-36

从 20 世纪 90 年代以来, 国内研究组就对法拉第反常色散原子滤光器(Faraday Anomalous Dispersion Optical Filter, FADOF)进行了系统的理论分析和实验研究^[1,2]. 由于其利用了原子共振吸收线附近的反常色散特性, 所以具有带宽窄、通带内高透射、通带外高抑制、响应时间快等优点^[3–5]. FADOF 在水下通信、自由空间光通信、深空通信、遥感、激光雷达等领域都有广泛的应用^[6–9]. 用 FADOF 制成的外腔半导体激光器, 由于对电流和温度不敏感, 还可用于激光稳频^[10].

以前研究中实现的钠原子、钾原子、铯原子、铷

原子基态的 FADOF 大多具有多透射峰特性^[11–15]. 为了实现单透射峰, 有人将两个 FADOF 串联起来, 放在不同的工作条件下, 前级 FADOF 某透射峰与后级 FADOF 某透射峰对准, 而前级和后级的其他透射峰之间都有相对频移, 这样可以将其他透射峰消除掉而获得单透射峰^[16,17]; 还可以将塞曼吸收泡与 FADOF 连接起来构成复合型滤光器, 利用原子共振吸收线附近的塞曼频移将多余的透射峰消除掉而得到单透射峰^[18]. 最近, 本研究组采用将惰性气体充入碱金属泡的方式来实现单透射峰, 但是, 检偏器角度的细微变化对 FADOF 的影响还未见报道.

引用格式: 陶智明, 孙钦青, 薛潇博, 等. 单透射峰 Faraday 反常色散原子滤光器中检偏器角度的影响. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2012, 42: 1346–1351
Tao Z M, Sun Q Q, Xue X B, et al. The effect of an analyzer angle on the Faraday anomalous dispersion optical filter with single transmission peak (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2012, 42: 1346–1351, doi: 10.1360/132012-36

将 FADOF 用于激光稳频时, 希望透射峰是单一的, 同时希望单透射峰处的透射率尽可能高, 而对通带外的抑制比要求不高. 在此应用条件下, 我们可以适当改变检偏器的角度来优化这种应用条件^[10]. 为此, 本文就检偏器角度的细微变化对单(多)透射峰 FADOF 的影响做了研究, 发现检偏器角度每增加 1° , 峰值透射率平均增加 0.21%, 从相对值来说, 从 90° – 89° 时, 等效透射率增加一倍.

1 实验

如图 1 的实验系统中, PBS1 是起偏器、PBS2 是检偏器. M1 和 M2 是中间空的环形永久磁铁, 两个平行放置, 可以产生轴向磁场; PBS1, M1, CELL1 和 M2 及 PBS2 构成 FADOF 即法拉第反常色散原子滤光器. 实验中激光被分束镜 BS 分为两束. 一束光经棱镜 PBS1 起偏, 以线偏振光通过磁铁 M1 后, 照射到 CELL1, 与充氩铷泡的原子相互作用后, 穿过磁铁 M2, 经棱镜 PBS2 检偏后由光电探测器 PD1 检测. 另一束光经全反射镜 R 反射, 照射到 CELL2(自然铷泡), 与铷原子相互作用, 经铷原子吸收后, 由 PD2 检测, 这束光显示自然铷的 4 个吸收峰, 用作频率参考.

2 分析与讨论

在测出单峰的透过率之前, 必须考虑两个偏振棱镜及铷泡管壁带来的损耗. 入射光功率为 1.69 mW, 将两个偏振棱镜调到平行时, 出射光功率最大, 此时

图 1 (网络版彩图)实验原理图

DL 为 780 nm 的半导体激光器; BS 为分束镜; R 为全反射镜; PBS1, PBS2 为格兰-泰勒棱镜; M1, M2 为中间空的环形永久磁铁; CELL1 为充了氩气的铷泡, 长 2 cm、直径 2 cm. CELL2 为自然铷泡, 长 3 cm、直径 2 cm; PD1, PD2 为光电探测器; OSC 为示波器

Figure 1 (Color online) Setup of the experiment. DL is semiconductor laser with a wavelength of 780 nm. BS is beam splitter. R is total reflection mirror. PBS1 and PBS2 are Glan-Taylor prisms. M1 and M2 are two pieces of permanent magnets. CELL1 is Rb cell filled with argon atoms, whose length and diameter are both 2 cm. CELL2 is a natural Rb cell whose length and diameter are 2, 3 cm, respectively. PD1 and PD2 are photoelectric detectors. OSC is an oscilloscope.

出射光功率是 1.28 mW, 系统损耗率是 24.3%.

在确定的泡长时, 铷泡的温度变化会直接影响铷原子密度, 这方面已有详细的研究^[19]. 我们在此仅通过比较室温(23°C)与 48°C 时的透射率变化, 来说明较大的透射率可以通过简单地增加铷泡温度而达到.

我们先调节 PBS1, 使得透射光功率最大, 固定它, 然后调节 PBS2, 使两个偏振棱镜正交, 此时的情况是通带内高透射, 通带外高抑制. 便于对比, 我们在磁场 300 Gs ($1\text{ Gs}=10^{-4}\text{ T}$), 室温(23°C)和将充氩铷泡加热到 48°C 时做两组实验. 如图 2 所示, 室温下正交时的峰值透射率是 0.126%. 当温度升高到 48°C 时, 峰值透射率增加到 9.9%, 峰值透射率增大了将近 80 倍. 说明温度升高, 铷泡中总的原子数密度增大, 处于基态的原子数密度随之增大, 从而导致透射率提高.

实验中还发现, 在旋转检偏器棱镜时, 室温和

图 2 充氩铷泡透射图

从上到下依次是自然铷泡的参考光谱图, 温度为 23°C , 48°C 时的充氩铷泡透射光谱图

Figure 2 These spectra are the reference spectrum of a natural Rb cell, and the transmission spectrum of Rb cell filled with argon atoms at 23°C , 48°C , respectively.

48°C 时的光谱特性是一样的. 为了方便, 下面我们只测量与讨论室温时的透射率随检偏器角度的变化影响.

当两个偏振棱镜正交时, 角度设为 90° . 以此为检偏器转角参考基点旋转检偏器, 逆时针旋转, 也就是角度越来越小时, 出现透射峰. 随着角度的减小, 偏振棱镜的消光比越来越差, 不再是正交时的通带内高透射, 通带外高抑制. 此时通带内及通带外的透射光都逐渐增强.

如图 3 所示, 正交(90°)时, 带内和带外的光透射达到最小, 此时, 带外光基本上没有透过, 峰值透射率是 0.126%. 在 90° – 87° 之间时, 峰值透射率几乎均匀增大, 从 90° 的 0.126% 增大到 87° 的 0.605%. 而在 87° – 86° 之间时, 峰值透射率变化较大, 可能是由于转角标定不准确所致. 从 87° 的 0.605% 增大到 86° 的 1%. 之后随着角度的增大, 峰值透射率又几乎均匀增大(图 4) 85° 时, 峰值透射率达到 1.18%. 总的来说, 检偏器角度每增加 1° , 峰值透射率平均增加 0.21%. 从相对值来说, 从 90° – 89° 时, 峰值透射率增加了一倍, 这对基于外腔反馈激光器是很有利的^[10].

带外光的变化规律和带内光一样. 90° 时, 带外光透射率几乎为 0, 89° 时, 透射率是 0.038%, 随着角度的减小, 透射率逐渐变大, 在 87° 时, 透射率是 0.206%. 而在 87° – 86° 之间时, 透射率变化较大. 从 87° 的 0.206% 增大到 86° 的 0.482%. 之后随着角度的增大, 透射率又几乎均匀增大. 这对基于 FADOF 的

图 3 (网络版彩图) 充氩铷泡透射图

从上到下依次是自然铷泡的参考光谱图, 角度为 85° – 90° 充氩铷泡的透射光谱图

Figure 3 (Color online) These spectra are the reference spectrum of a natural Rb cell, and the transmission spectrum of Rb cell filled with argon atoms with the analyzer angle of 85° – 90° , respectively.

图 4 透射率随检偏器角度变化图

70°– 90° 为峰值透射率随检偏器角度的变化

Figure 4 The peak transmission varies with the analyzer angle of 70° – 90° .

外腔激光器的带外透射率是可以容忍的.

如图 5 所示, 当检偏器顺时针旋转时, 也就是说角度大于 90° 时, 在 780 nm 附近开始有吸收. 在 90° – 91° 之间, 光既有透射, 也有吸收. 为了更好地研究光谱特性, 我们来看看相对带外吸收率, 即相对带外吸收率 = $1 - \text{带内光} / \text{带外光}$. 在这个区间, 带内光透射逐渐减弱, 吸收逐渐增强. 91° 时, 相对带外吸收率大于 99%. 随着角度的增大, 相对带外吸收率逐渐减小, 而带外光的透射率却越来越大. 96° 时, 相对带外吸

图 5 (网络版彩图) 充氩铷泡透射图

从上到下依次是自然铷泡的参考光谱图, 角度为 91° – 96° 充氩铷泡的透射光谱图

Figure 5 (Color online) These spectra are the reference spectrum of a natural Rb cell, and the transmission spectrum of Rb cell filled with argon atoms with the analyzer angle of 91° – 96° , respectively.

收率减小到 63.5%, 带外光透射率达到 0.91% 左右.

为了与多峰 FADOF 作比较, 我们用自然铷泡做了另一组检偏器角度影响的实验. 如图 6 所示, 85°–90° 出现透射峰, 轮廓和参考光谱差不多, 只不过一个是吸收, 一个是透射. 在参考光谱里最强的峰, 在透射光谱里依然是最强的. 参考光谱里峰值的强弱与透射光谱里的峰值强弱一一对应. 我们可以看到, 90° 时, 在频率值 2.3 GHz 附近, 出现一个小小的尖峰. 随着角度的减小, 那个尖峰趋于平滑. 最大的透射峰处的透射率随角度的减小有较大的增加, 当然带外光的透射率也随之增加.

如图 7 所示, 91°–96° 开始出现吸收峰, 这个区间既有透射也有吸收. 透射逐渐减弱, 吸收逐渐增强. 91°–96° 出现多峰形状, 随着角度的增加, 许多弱峰消失. 从透射转变成吸收, 过程比充氩铷泡缓慢. 当角度大于 97° 后, 自然铷泡的吸收峰和参考光谱的吸收

图 6 自然铷泡透射图

从上到下依次是自然铷泡的参考光谱图, 角度为 85°–90° 自然铷泡的透射光谱图

Figure 6 These spectra are the reference spectrum, and the transmission spectrum of a natural Rb cell with the analyzer angle of 85°–90°, respectively.

图 7 自然铷泡透射图

从上到下依次是自然铷泡的参考光谱图, 角度为 91°–96° 自然铷泡的透射光谱图

Figure 7 These spectra are the reference spectrum, and the transmission spectrum of a natural Rb cell with the analyzer angle of 91°–95°, respectively.

峰轮廓很相似, 出现 4 个吸收峰.

无论是单峰还是多峰, 向左或向右旋转检偏器, 都会使透射率变大. PBS1 与 PBS2 的透振方向如图 8 所示. 入射光经过 PBS1 后, 偏振方向与 PBS1 透振方向一致. 当两偏振片正交时, 通带外的光由于没有旋转全部被 PBS2 挡住. 通带内只有旋转了 $\pi/2$ 奇数倍的光才能全部透过 PBS2, 旋转了其他角度的光会以分量的形式透过 PBS2, 这就是我们上面所看到的 90° 的情形, 通带内高透射, 通带外高抑制.

设通带外光的初始光强为 I_0 , 当 PBS2 逆时针旋转 θ 时, 此时检偏器与起偏器的角度为 α . 带外光透过 PBS2 的强度为 $I_0 \cos^2 \theta = I_0 \sin^2 \theta$, 可以看出 θ 越大, 带外光透射光强越大, 透射率也就越大. PBS2 顺时针旋转时的规律及通带内光的透射率规律与此类似.

按照法拉第效应, 磁场的大小、铷泡的长度都可能会对透射率产生影响. 在不同的磁场, 发现检偏器

图8 检偏器 PBS2 逆时针旋转图

Figure 8 The analyzer rotates counterclockwise.

角度的变化会引起类似的结果。为了更清楚地了解铷泡长短会对透射率产生什么样的影响。我们用长度为 5 cm, 直径为 1.5 cm 的充氪铷泡来做了一组实验。发现在相同的磁场(300 Gs)下, 在 89° – 90° 之间时, 长

泡的透射率比短泡略微大点。其他区间则是短泡的透射率大。实验中还发现, 短泡透射峰的线宽比长泡的稍窄。这可能是因为磁场不是匀强磁场的缘故。

3 结论

无论是充氪铷泡还是自然铷泡, 检偏器角度的细微变化都会对其透射峰及吸收峰产生影响。同时铷泡的温度、长度也会影响 FADOF 的透射率。对于应用于外腔反馈激光稳频的 FADOF, 适当改变检偏器的角度, 可以较大地增加 FADOF 峰值透射率, 而同时有限增加的带外透射对于稳频外腔反馈激光是可以接受的。本文的研究结果对于 FADOF 的激光稳频应用有重要的参考价值。

参考文献

- 1 Yin B, Shay T M. Theoretical model for a Faraday anomalous dispersion optical filter. *Opt Lett*, 1991, 16: 1617–1619
- 2 Chen H L, Peng Y F, Tang J X, et al. A new atomic resonance filter (in Chinese). *Acta Opt Sin*, 1992, 12: 841–845 [陈怀林, 彭玉峰, 汤俊雄, 等. 一种新型原子共振滤光器研究. *光学学报*, 1992, 12: 841–845]
- 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: 846–848
- 4 Shan X, Sun X P, Luo J, et al. Ultranarrow-bandwidth atomic filter with Raman light amplification. *Opt Lett*, 2008, 33: 1842–1844
- 5 Guo H, Dang A H, Han Y Q, et al. Faraday anomalous dispersion optical filter (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2010, 55: 527–533 [郭弘, 党安红, 韩耀强, 等. Faraday 反常色散滤光器. *科学通报*, 2010, 55: 527–533]
- 6 Yu S Q, Tang J X. An approach using multi-peak and tunable characteristic of atom filter in inter-satellite laser link acquisition system (in Chinese). *Acta Opt Sin*, 2001, 21: 861–865 [俞水清, 汤俊雄. 原子滤光器多峰及可调谐特性在卫星光链路捕捉系统中应用探讨. *光学学报*, 2001, 21: 861–865]
- 7 Tang J X, Wang Q J, Li Y M, et al. Experimental study of a model digital space optical communication system with new quantum devices. *Appl Opt*, 1995, 34: 2619–2622
- 8 Yu S Q, Tang J X, Xiao H Q. A novel inter-satellite laser communication acquisition scheme approach with tunable Faraday anomalous dispersion optical filter (in Chinese). *Acta Electron Sin*, 2001, 29: 423–425 [俞水清, 汤俊雄, 肖海桥. 采用原子滤光器可调谐特性的新型卫星光通信捕捉方案研究. *电子学报*, 2001, 29: 423–425]
- 9 Yang Y, Cheng X W, Li F Q, et al. A flat spectral faraday filter for sodium lidar. *Opt Lett*, 2011, 36: 1302–1304
- 10 Miao X Y, Yin L F, Zhuang W, et al. Demonstration of an external-cavity diode laser system immune to current and temperature fluctuations. *Rev Sci Instrum*, 2011, 82, 086106: 1–3
- 11 Harrell S D, She C Y, Yuan T, et al. Sodium and potassium vapor Faraday filters revisited: Theory and applications. *J Opt Soc Am B*, 2009, 26: 659–670
- 12 Zhang Y D, Jia X L, Ma Z G, et al. Optical filtering characteristic of potassium faraday optical filter. *IEEE J Quantum Electron*, 2001, 37: 372–375
- 13 Hu Z L, Sun X P, Zeng X Z, et al. Experimental study of Cs 455 nm FADS with YAG pulse laser (in Chinese). *Acta Opt Sin*, 1995, 15: 1042–1045 [胡志林, 孙献平, 曾锡之, 等. 脉冲光下 Cs 455 nm 法拉第反常色散谱研究. *光学学报*, 1995, 15: 1042–1045]
- 14 Yin B, Shay T M. Faraday anomalous dispersion optical filter for the Cs 485 nm transition. *IEEE Photonic Tech*, 1992, 4: 488–490
- 15 Peng Y F, Tang J X, Wang Q J. Study of Rb Faraday resonance optical filter (in Chinese). *Acta Electron Sin*, 1995, 23: 45–48 [彭玉峰, 汤俊雄, 王庆吉. 铷原子法拉第共振滤光特性研究. *电子学报*, 1995, 23: 45–48]
- 16 Li Y M, Zhang L, Tang J X, et al. Study of linked Faraday anomalous dispersion optical filter (in Chinese). *Acta Electron Sin*, 1996, 24: 38–40 [李义民, 张量, 汤俊雄, 等. 级联法拉第反常色散滤光器研究. *电子学报*, 1996, 24: 38–40]

- 17 Liu L, Wang J B, Yu S Q, et al. A novel inter-satellite laser link system with linked atomic optical filter (in Chinese). *Acta Opt Sin*, 2004, 24: 1590–1594 [刘璐, 王江波, 俞水清, 等. 采用级联原子滤光器的新型卫星激光链路系统研究. *光学学报*, 2004, 24: 1590–1594]
- 18 Yin B, Alvarez L S, Shay T M. The Rb 780-nanometer Faraday anomalous dispersion optical filter: Theory and experiment. *TDA Prog Rep*, 1994, 42: 71–85
- 19 Zhang L, Tang J X. Experimental study on optimization of the working conditions of excited state Faraday filter. *Opt Commun*, 1998, 152: 275–279

The effect of an analyzer angle on the Faraday anomalous dispersion optical filter with single transmission peak

TAO ZhiMing^{1,2}, SUN QinQing¹, XUE XiaoBo¹, HONG YeLong¹ & CHEN JinBiao^{1*}

¹ State Key Laboratory of Advanced Optical Communication System and Network, Institute of Quantum Electronics, School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China;

² Department of Physics, Bijie University, Bijie 551700, China

The effect of an analyzer angle on the Faraday anomalous dispersion optical filter with single transmission peak operating on the Rb D₂ line 780 nm ($5S_{1/2} \rightarrow 5P_{3/2}$) is presented. As comparison, the effects of the analyzer angle on the conventional Faraday anomalous dispersion optical filter with multiple transmission peaks are also studied. When the analyzer angle increases by one degree at room temperature, the peak transmission rate averagely increases by 0.21%. Judged from the relative value, when the analyzer angle is changed from ninety degree to eighty-nine degree, the equivalent transmission rate will be doubled. Moreover, the influences of cell temperature and cell length on the transmission are also introduced.

Faraday anomalous dispersion optical filter, single transmission peak, analyzer angle

PACS: 32.30.-r, 32.70.Fw, 32.80.-t

doi: 10.1360/132012-36