

反常色散原子滤光器斜入射机理及特性研究

王江波, 汤俊雄, 段明浩, 李吉红

(北京大学电子学系, 区域光纤网与新型光通信系统国家重点实验室, 北京 100871)

摘 要: 本文首次对反常色散原子滤光器在斜入射($0 \sim \pi/2$) 条件下的透过率、带宽和频移等特性进行了理论研究; 本文还进行了斜入射的滤光器透射谱实验研究, 与理论分析符合较好; 这些为原子滤光器在卫星及空间光通信领域的宽视场角接收方案奠定了基础, 该方案有利于空间瞄准及捕捉。

关键词: 反常色散原子滤光器; 斜入射; 透射谱

中图分类号: TN24 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2000) 12-0038-03

Research on the Mechanism and Performances of Anomalous Dispersion Atomic Optical Filter with Off-axis Incident Beam

WANG Jiang-bo, TANG Jun-xiong, DUAN Ming-hao, LI Ji-hong

(Dept. Of Electronics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: This paper reports the theoretical study on the transmission efficiency, bandwidth and frequency shift of anomalous dispersion atomic optical filter with off axis incident beam. The experimental transmission spectrum of anomalous dispersion atomic optical filter with off axis incident beam is given in this paper, which agrees well with the theoretical result. The results will give the theoretical foundation for the use of anomalous dispersion atomic optical filter in a wide field of view acquisition approach of inter satellite or free space laser communications, which will be propitious to the pointing and acquisition in free space.

Key words: anomalous dispersion atomic optical filter; off axis incidence; transmission spectrum

1 引言

Faraday 型反常色散原子滤光器(Faraday Anomalous Dispersion Optical Filter, 简称 FADOF) 作为一种超窄带滤光器, 九十年代以来国内外对其进行了深入的理论分析和实验研究^[1,2]. 由于 FADOF 具有高透过率、窄带宽和高噪声抑制比等优点, 目前被广泛地应用于空间光通信和卫星光通信等领域^[3~6]. 1994 年 Kazuyuki Muroo 等对 Rb 共振 Voigt 效应的谱特性进行了理论研究^[7], 但迄今还未见到关于反常色散滤光器的斜入射机理以及 Voigt 型反常色散原子滤光器(Voigt Anomalous Dispersion Optical Filter, 简称 VADOF) 的工作机理进行理论分析的报导。

FADOF 工作机理为 Faraday 共振效应(典型工作条件是入射光波矢方向平行于外加磁场方向), 然而实际应用中入射光在一定的视场角范围内入射到 FADOF 中, 不可能完全与磁场方向平行, 此时 Faraday 效应和 Voigt 效应(典型工作条件是入射光波矢方向垂直于外加磁场方向)同时存在, 因此有必要对斜入射条件下(入射光的传播方向与外加磁场方向成一定的角度)的工作机理和各种特性进行研究, 这将对 FADOF 的宽视场角应用有非常重要的实际意义, 在卫星光通信链路中宽

视场角接收方案可以减小捕捉时间。

本文提出了一种简单有效的算法, 在 FADOF 的理论基础上对斜入射原子滤光器的理论模型进行了详细分析; 对斜入射条件下的各种性能, 包括传输特性、带宽和调谐能力等进行了理论计算; 本文还进行了滤光器斜入射的实验研究. 本文的研究为反常色散原子滤光器在光通信领域的应用奠定了理论基础。

2 反常色散原子滤光器斜入射理论分析

在恒定磁场 B (沿 z' 轴方向) 中放置原子汽室, 汽室前后为相互正交的偏振器 P_1 和 P_2 , 入射光沿 z 轴传播, 经过偏振器 P_1 后, 偏振方向被起偏为在 xy 平面内并与 y 轴成 45° 角, 如图 1 所示, 入射光方向与磁场方向的夹角为 θ . 此时磁场可以分解为与光的传播方向平行和垂直的两个分量, 可知此时 Faraday 效应和 Voigt 效应同时存在. 光场在介质中传播可以表示为:

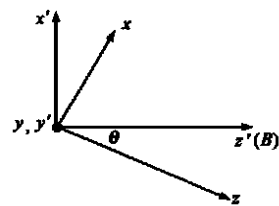


图 1 斜入射滤光器系统示意图

$$\mathbf{E} = E_x \exp \left[i \left(\frac{\omega}{c} n_1 z - \omega t \right) \right] \mathbf{e}_x + E_y \exp \left[i \left(\frac{\omega}{c} n_2 z - \omega t \right) \right] \mathbf{e}_y \quad (1)$$

其中 n_1, n_2 为导致偏振面旋转的两个不相等的折射率, 根据 $P1$ 和 $P2$ 的偏振方向, 设原子介质长度为 L , 则该系统的透过率可表示为:

$$Tr = \frac{1}{2} \{ \cosh(2kL\Delta n^{(i)}) - \cos[2(kL\Delta n^{(r)})] \} \cdot \exp(-2kL\bar{n}^{(i)}) \quad (2)$$

其中 $\Delta n = (n_1 - n_2)/2$, $\bar{n} = (n_1 + n_2)/2$, $\Delta n^{(i)}$ 、 $\Delta n^{(r)}$ 分别为 Δn 的虚部和实部, $\bar{n}^{(i)}$ 为 \bar{n} 的虚部, $k = \omega/c$.

根据量子力学和电磁学知识可知, 当入射光强不太大时, 介质的极化张量与入射光场无关. 对于置于某一方向磁场中的介质, 其极化张量与入射光波的传播方向无关, 所不同的是

$$[\chi]_{xyz} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \cos^2 \theta (x_{++} + x_{--}) + \sin^2 \theta x_{00} & \frac{i}{2} \cos \theta (x_{+-} - x_{-+}) - \sin \theta \cos \theta \left[\frac{(x_{++} + x_{--})}{2} - x_{00} \right] \\ -\frac{i}{2} \cos \theta (x_{+-} - x_{-+}) & \frac{1}{2} (x_{++} + x_{--}) & \frac{i}{2} \sin \theta (x_{+-} - x_{-+}) \\ -\sin \theta \cos \theta \left[\frac{(x_{++} + x_{--})}{2} - x_{00} \right] & \frac{i}{2} \sin \theta (x_{+-} - x_{-+}) & \frac{1}{2} \sin^2 \theta (x_{++} + x_{--}) + \cos^2 \theta x_{00} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中 x_{++}, x_{--} 和 x_{00} 的推导计算可见文献[10].

根据电磁理论中的麦克斯威尔方程:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} [\epsilon \mathbf{E}] \quad (5)$$

设入射光为:

$$\mathbf{E} = E_x \exp[i(Kz - \omega t)] \mathbf{e}_x + E_y \exp[i(Kz - \omega t)] \mathbf{e}_y \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)可得:

$$\begin{cases} E_x \left\{ \epsilon_{xx} - \frac{K^2 c^2}{\omega^2} \right\} + \epsilon_{xy} E_y = 0 \\ E_y \left\{ \epsilon_{yy} - \frac{K^2 c^2}{\omega^2} \right\} + \epsilon_{yx} E_x = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中令 E_x/E_y 相等有:

$$\left[\frac{K^2 c^2}{\omega^2} \right]_{1,2} = \frac{1}{2} (\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}) \pm \sqrt{\frac{1}{4} (\epsilon_{xx} - \epsilon_{yy})^2 + \epsilon_{xy} \epsilon_{yx}} \quad (8)$$

可知 $n = Kc/\omega$, 根据 $\epsilon = 1 + \chi$ 进行一定的简化可得

$$n_{1,2} = 1 + \frac{1}{4} \{ (\chi_{xx} + \chi_{yy}) \pm [(\chi_{xx} - \chi_{yy})^2 + 4\chi_{xy}\chi_{yx}]^{1/2} \} \quad (9)$$

将式(4)代入式(9)中可以得出斜入射条件下的两个折射率的关系表达式为:

$$\begin{aligned} \bar{n} &= \frac{1}{2} (n_1 + n_2) = 1 + \frac{1}{4} \{ \sin^2 \theta \left[\frac{1}{2} (x_{++} + x_{--}) + x_{00} \right] \\ &\quad + \cos^2 \theta (x_{++} + x_{--}) \} \\ \Delta n &= \frac{1}{2} (n_1 - n_2) = \frac{1}{4} \{ \sin^4 \theta \left[\frac{1}{2} (x_{++} + x_{--}) - x_{00} \right]^2 \\ &\quad + \cos^2 \theta (x_{+-} - x_{-+})^2 \}^{1/2} \end{aligned} \quad (10)$$

将式(10)代入式(2)即可求出斜入射原子滤光器的透过率. 根据前面所推导的斜入射条件下的极化率张量式(4), 对斜入射原子滤光器的透射谱进行理论计算, 可绘出其透射谱. 图2为 $B = 150\text{Gs}$, $T = 140^\circ\text{C}$ 时 Rb FADOF 在 45° 斜入射条件下的透射谱, 可以看出与 FADOF 类似, 为多峰结构, 其中边翼透射率 > 90%.

对于不同传播方向的光波对应于不同坐标系下的极化张量. 因此, 对于 FADOF、VADOF 和斜入射条件下介质的极化张量在一定的磁场下是相同的, 只是对于 FADOF 在球谐坐标系下比较容易研究, 而对于斜入射和 VADOF 的极化张量在 xyz 坐标系下比较容易研究. 要获得斜入射条件下介质的极化张量, 只需对 FADOF 的极化张量进行坐标变换即可.

由文献[8]可知 FADOF 的极化张量为:

$$[\chi]_{+-0} = \begin{bmatrix} x_{++} & 0 & 0 \\ 0 & x_{--} & 0 \\ 0 & 0 & x_{00} \end{bmatrix} \quad (3)$$

对其进行坐标变换可以获得斜入射在 xyz 坐标系下极化张量的表达式:

由式(10)可知, 斜入射原子系统的折射率与入射角 θ 有关, 因此斜入射时原子滤光器的透过率、频移和带宽都与入射角有关. 图3为 Rb 原子滤光器 $T4$ 峰透过率、频移和带宽与入射角的关系. 可以看出随着斜入射的角度增大, 原子滤光器透射谱的透过率、频移和单峰半值线宽都变小. 其中入射角为 0° 时对应于 FADOF, 入射角为 90° 时对应于 VADOF.

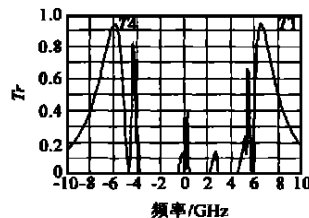


图2 斜入射原子滤光器透射谱

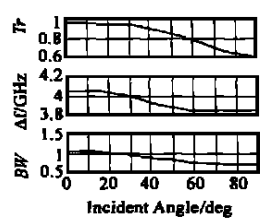


图3 斜入射原子滤光器透射谱 $T4$ 峰透过率、频移和带宽与入射角的关系(上、中、下)
($B = 150\text{Gs}$, $T = 100^\circ\text{C}$)

3 斜入射反常色散原子滤光器实验研究

根据上面的理论推导对部分实验进行了研究. 实验系统示意图如图4所示. 半导体激光器 LD(HITACHI HL7852G) 发射出的 $\lambda \sim 780\text{nm}$ 的激光经过分束镜 BS 后, 一束经偏振器 $P1$ 以 $\pi/10$ 的角度入射到长 5cm , 直径 2cm 的 Rb 汽室 $C2$ 中(汽室 $C2$ 置于纵向磁场 B 中), 然后经检偏器后被光电探测器 $D1$ 接收; 另一束光通过 Rb 汽室 $C1$ 后被光电探测器 $D2$ 接收(检测 RbD_2 超精细吸收谱线用以定标). 两个探测器接收到的信号最终输入存储示波器 OSC 显示纪录.

实验中激光器工作电流 90mA , 扫描激光器注入电流(扫描范围 $\pm 2\text{mA}$, 周期 50ms), 使激光波长扫过 RbD_2 线, 从而得到透射谱如图5所示.

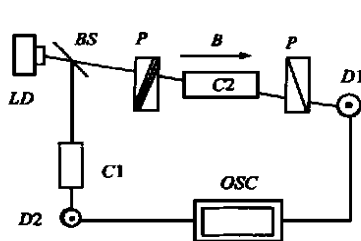
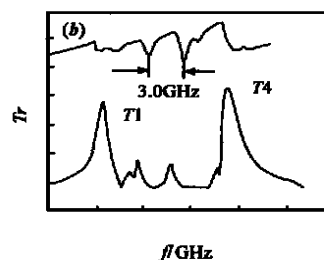
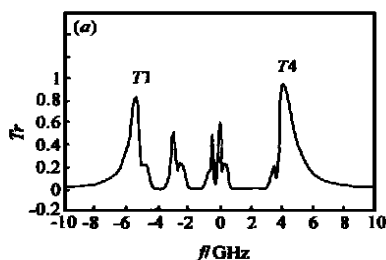


图4 斜入射实验方块图

图5 斜入射原子滤光器(入射角 18°)谱线图。(a)理论值,(b)实验值

从实验结果可以看出:

(1) 斜入射的实验结果与理论符合的较好,说明本文采用的计算方法是正确的

(2) 实验测得T4峰的透过率为31.2%,理论计算T4峰的透过率 $> 90\%$,这主要是由于原子汽室及保温窗片的菲涅尔损耗,而采取镀增透膜的办法可以在相当大的程度上克服该损耗。

4 总结

卫星光通信链路中已经在探讨使用反常色散原子滤光器^[3,6],采用原子滤光器的宽视场角接收方案得到了国内外的广泛研究。通过上述论证,从理论上对斜入射原子滤光器有了深入的理解,这对原子滤光器的实际应用有着非常重要的意义。同时,关于斜入射反常色散原子滤光器的理论分析适用于两种极端情况,FADOF和VADOF(入射角为 0° 和 90°),因此具有一定的普遍意义。

根据斜入射的理论分析,可知两种极端的原子滤光器各有特点,例如:

(1) 在汽室温度比较低或外加磁场比较低时,FADOF的透过率明显要比VADOF透射峰的透过率大;当汽室温度和外加磁场都比较大时,两种原子滤光器的透过率逐渐接近,并且都大于 90% ;

(2) 在汽室温度比较低或外加磁场比较低时,两种原子滤光器的频移能力基本相同约为 3.5 MHz/Gs ;当汽室温度和外加磁场都比较大时,FADOF的频移能力明显要比VADOF大,此时FADOF的频移能力约为 10 MHz/Gs ,VADOF的频移能力约为 7 MHz/Gs ,因此在卫星间多普勒频移相对较大时使用FADOF较为有利;

(3) 当磁场固定时,两种原子滤光器的带宽在 $90^\circ \sim 100^\circ$ 之间有一个最小值;当汽室温度和外加磁场较大时,两者的单峰线宽与汽室温度和磁场大致成线性变化,FADOF比VADOF的变化更快一些;VADOF的单峰线宽要比FADOF窄,当 $T = 110^\circ\text{C}$, $B = 200\text{ Gs}$ 时,FADOF的单峰线宽为 1.3 GHz ,VADOF为 0.8 GHz 。VADOF具有更强的滤光能力,在条件合适时使用能够使激光通信的接收信噪比得到提高;

(4) 由于横向的固定磁场容易获得,VADOF的结构可以设计的非常简单,易于实现原子滤光器的小型化和工程化,这对于器件上卫星有其优势。

总之,两种原子滤光器各有特点,应该根据实际应用的要求,选取相对合适的滤光器,使原子滤光器有更广阔的应用前

景。

参考文献:

- [1] Yin B, Shay T M. Theoretical model for a Faraday anomalous dispersion optical filter [J]. Opt. Lett., 1991, 16(20): 1617-1619.
- [2] 陈怀林, 彭玉峰, 汤俊雄等. 一种新型原子共振滤光器研究 [J]. 光学学报, 1992, 12(9): 841-845.
- [3] E. Korevaar, et al. Status of SDIO/IS&T lasercom test bed program [J]. Free Space Laser Communication Technologies V, 1993, SPIE, 1866: 116.
- [4] 鲁学军, 汤俊雄. 新型两路空间光通信系统研究 [J]. 电子学报, 1996, 24(1).
- [5] 段明浩, 孔建坤, 汤俊雄. 采用原子滤光器的新型激光信标方案研究 [J]. 光学学报, 1997, 17(10): 1362-1367.
- [6] 肖海桥, 张量, 汤俊雄. 卫星光通信链路新型宽视场角捕捉方案探讨 [J]. 电子学报, 1999, 27(8): 56-59.
- [7] Kazuyuki Muroo. Resonant Voigt effect spectrum of the Rb D2 transition [J]. Opt. Soc. Am. 1994, 11(3): 409-414.
- [8] Yeh P. Dispersive magneto-optic filters [J]. Appl. Opt., 1982, 21(11): 2069-2075.

作者简介:



王江波 1975年出生,1997年获北京大学电子学系理学学士学位,2000年年中完成硕士论文工作。自1997年开始在北京大学电子学系从事卫星激光通信及新型量子器件方面的研究。



汤俊雄 北京大学教授,博士生导师,主要研究领域为卫星激光通信及新型量子器件。