

钾原子 532nm 可调谐超窄带光学滤波器的研究*

王 骥 贾晓玲 掌蕴东 马祖光

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所 309 # 哈尔滨 150001)

(2002 年 7 月 12 日收到, 2002 年 9 月 18 日收到修改稿)

对钾原子(4P_{1/2}→4S_{1/2})态 532nm 可调谐超窄带光学滤波器(T-ESFADOF)进行了理论和实验研究,建立了外电场中 T-ESFADOF 的理论模型,编程计算了 T-ESFADOF 透射谱,实验测得不同电场强度下 T-ESFADOF 透射谱,给出 T-ESFADOF 透射谱中心频率频移量随电场变化的分布曲线,并于理论计算曲线进行了比较.

关键词:钾,线芯透射,可调谐超窄带滤波

PACC:3260 A225J,4230Q

1. 引 言

以往我们对于 Faraday 反常色散滤波器(FAD-OF)的研究^[1-5]以及文献[5-13]表明,FADOF 的工作方式一般有两种,线芯和线翼方式,然而,线芯工作 FADOF 透射峰的中心频率不可调谐,线翼工作被动式 FADOF 透射峰的中心频率虽可调谐,但调谐的范围很小,而在星潜通信中由于卫星的高速飞行相对缓慢运动潜艇一般要产生 11.5GHz 的 Doppler 频移,星间通信要产生约 75GHz 的 Doppler 频移,线翼工作 FADOF 透射峰的小范围调谐显然难于满足需求.

另外,随着 Nd:YAG 固体激光器的日趋成熟,这种激光器的应用范围越来越广,但是到目前为止,还没有一种可以与它的二倍频光(532.4nm)相匹配的窄带滤波器.

基于以上几点,本文开展了钾原子 4P_{1/2}→8S_{1/2} 532.33nm 可调谐超窄带滤波器(tunable excited state faraday anomalous dispersion optical filter, T-ESFADOF)的理论和实验研究.本文首先将电场引入 FADOF 体系中,建立了外电场中钾原子 4P_{1/2}→8S_{1/2} 态可调谐超窄带 T-ESFADOF 的理论模型,编程计算了 T-ESFADOF 透射谱,其次在理论研究的指导下,开展了

相应的实验研究,观测了不同强度电场中 T-ESFADOF 的透射谱,给出了透射谱中心频率调谐量随电场强度变化的分布曲线,与相应的理论计算曲线进行了比较,分析并讨论了两者之间偏差的主要来源.

2. 钾原子 4P_{1/2}→8S_{1/2} 532nm T-ESFADOF 的理论模型和数值计算

T-ESFADOF 主要由恒定磁场、电场、样品池和两个相互正交的格兰·汤姆逊棱镜组成.它是采用气体介质对频率在其吸收线附近的 Faraday 反常色散效应来进行滤波的.考虑到外加电场和磁场远远小于原子内部场强,其与原子相互作用导致的原子能级分裂基本与原子自身的超精细分裂相当,因此,将外磁场和电场对原子的作用能与原子自身的超精细分裂一并视为原子精细结构基础上的微扰.

对于加了外电场进行频率调谐的主动式 FAD-OF 体系,其微扰 Hamilton 算符应为

$$\Delta H = \Delta H_{\text{hfs}} + \Delta H_{\text{m}} + \Delta H_{\text{E}}, \quad (1)$$

其中 ΔH_{hfs} , ΔH_{m} 和 ΔH_{E} 分别为原子的超精细作用项,磁场与原子的相互作用项以及电场与原子的相互作用项.对于钾原子的 4P_{1/2} 和 8S_{1/2} 态,将 Hamilton 算符向每个能态做展开时,选用 $|IJm_l m_j\rangle$ 做基矢,则有

$$\begin{aligned} \langle IJm_l m_j | \Delta H_{\text{hfs}} | IJm'_l m'_j \rangle = & \left[A + \frac{3}{2} \frac{B}{K(2I-1)K(2J-1)} \right] \left\{ m_l m_j \delta_{m_l m'_l} \delta_{m_j m'_j} \right. \\ & \left. + \frac{1}{2} \sqrt{[K(I+1) - m_l(m_l+1)] [K(J+1) - m_j(m_j-1)]} \delta_{m_l m'_l+1} \delta_{m_j m'_j-1} \right\} \end{aligned}$$

$$+ \frac{1}{2} \sqrt{[K(I+1) - m_I(m_I-1)][K(J+1) - m_J(m_J+1)]} \delta_{m_I m'_I - 1} \delta_{m_J m'_J + 1} \} , (2)$$

其中 A, B 分别为磁偶极矩和电四极矩常数.

$$\begin{aligned} \langle I m_I m_J | \Delta H_m | I m'_I m'_J \rangle &= \langle I m_I m_J | \mu_B g_J J \cdot B - \mu_N g_I I \cdot B | I m_I m_J \rangle \\ &= \mu_B B_z g_J m_J \delta_{m_I m'_I} \delta_{m_J m'_J} - \mu_N B_z g_I m_I \delta_{m_I m'_I} \delta_{m_J m'_J} , \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $\mu_B = 1.4\text{MHz/G}$ 为 Bohr 磁子, $\mu_N = 0.00076\text{MHz/G}$ 是原子核磁子, g_J 和 g_I 分别为总轨道角动量和原子核自旋的旋磁因子. 由于 $\mu_N \ll \mu_B$, 因此, 通常上式中的第二项可忽略.

$$\begin{aligned} \langle I m_I m_J | \Delta H_E | I m_I m_J \rangle \\ = -\frac{1}{2} \alpha_0 E^2 - \frac{1}{2} \alpha_2 \frac{3m^2 - K(J+1)}{K(2J-1)} E^2 , \end{aligned} \quad (4)$$

其中 α_0 和 α_2 为原子某能态的标量电极化率和张量电极化率, 编程计算钾原子 $8S_{1/2}$ 态的 α_0 和 α_2 值分别为

$$\alpha_0 = 160.5\text{MHz}(\text{kV} \cdot \text{cm}^{-1})^{-2}, \alpha_2 = 0.$$

应用以上 Hamilton 矩阵元, 通过求解久期方程, 可获得强磁场下计及超精细分裂和 Zeeman 分裂后各子能级的位置. 余下对透过率的求解过程在文献 [1—4, 10—13] 中均有报道, 为避免重复, 在此不做详细叙述.

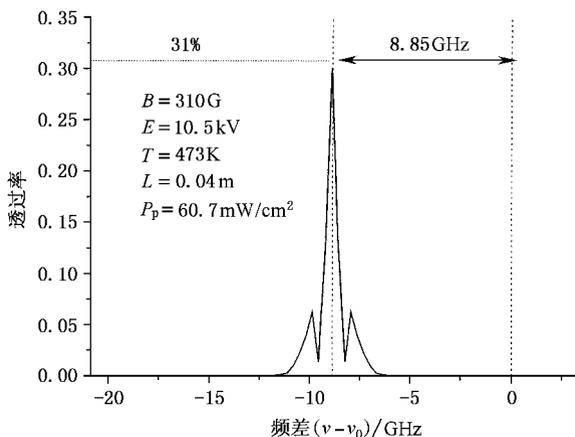


图 1 电场强度为 10.5kV 时钾原子 532nm 可调谐主动式 FADOF 透射谱

在以上理论模型的基础上, 对于钾原子 ($4P_{1/2} \rightarrow 8S_{1/2}$) 态可调谐交叉场超窄带光学滤波器的透射谱进行了计算, 所得结果如图 1 所示.

图 1 给出了典型的 532nm 可调谐超窄带滤波器的理论计算透射谱. 当外磁场为 0.031T, 工作温度为 473K, 样品池长为 0.04m 时, 透射谱图呈现出线

芯透射, 峰值透过率达 31%, 带宽约为 500MHz, 除中心透射峰外, 还有两个侧峰存在, 外加电场强度为 10.5kV 时, 透射谱的频率量约为 8.85GHz.

图 2 给出 T-ESFADOF 中心频率频移量随电场变化的分布曲线. 如图 2 所示, 随着电场强度的增大, 频移量负向增大, 即滤波器的透射谱频率将向低频方向移动, 输出波长将增大. 当电场强度较小时, 调谐量也相对较小, 随着电场强度的增大, 调谐量迅速增加, 能级的频移量与电场强度的平方成正比关系, 这一点对于实现可调谐主动式 FADOF 的输出波长大范围调谐非常有利. 图 2 显示, 当外加电场强度达到 12kV 时, 透射谱的频移量约达 11.56GHz.

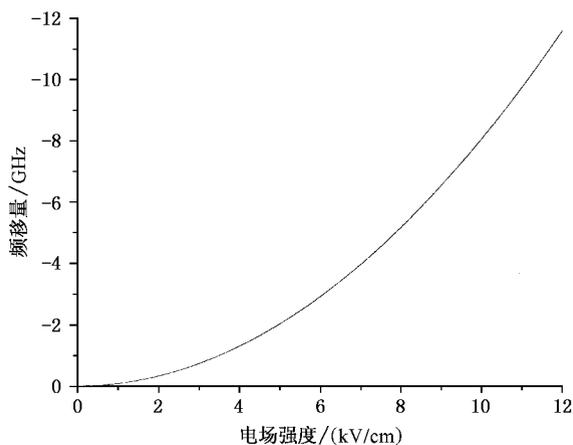


图 2 钾原子 532nm 可调谐主动式 FADOF 透射谱频移随电场强度变化的分布曲线

3. 实验研究

在钾原子基态到第一激发态 766, 770nm 超窄带滤波器的实验装置基础上^[1—5], 设计并建立了对于钾原子 532nm 可调谐主动式 T-ESFADOF 的实验装置, 其中, 样品池是核心元件之一, 本文按照实验要求, 自行设计并加工了样品池, 为避免高压放电对实验结果的影响, 实现较强电场, 以获得体系输出波长的尽可能大范围调谐, 同时还要保证样品池中具有高纯度的滤波介质, 样品池采用双层结构, 内层为方

形结构,其具体尺寸为 $3.5\text{cm} \times 4.0\text{cm} \times 0.9\text{cm}$,抽真空后充入高纯钾,外层中封入一对电极板,电极板是根据张氏电极原理设计并加工的^[14],尺寸为 $3.0\text{cm} \times 4.0\text{cm}$,间隔为 1.0cm ,材料为无磁性不锈钢,接线柱采用钨杆,以确保其能够耐较高的温度,另外电极板在加工工艺上要求边缘光滑、表面光洁、平整,以避免电压较高时出现尖端放电现象,且在封接电极板时应尽量保证两电极板间平行,以获得分布相对均匀的静电场.为了在两电极板间加上尽可能高的电压,以便增大电场强度,从而实现滤波器输出波长的更大范围调谐,在样品池的外层中充入高纯度氮气,当气压约为 $6.67 \times 10^4\text{Pa}$,可实现的电场强度为 12kV/cm .

如图 3 所示,采用德国 TuiOptics 公司的 DL100

半导体激光器作为抽运光,美国 Continuum 公司生产的 OPO (optics parameter oscillator) 激光器作为探测光,OPO 激光器的输出波长范围从 426nm 到 2000nm 连续可调,输出激光脉宽 5ns ,单纵模输出,线宽 500MHz ,激光重复频率 10Hz ; G_1 和 G_2 为两个相互正交的格兰·汤姆逊棱镜,其消光比优于 10^5 ,所用磁场为可变磁场,磁场强度在 $0\text{—}1700\text{G}$ 范围内连续可调, D_1 和 D_2 是 Newport 公司生产的 PIN 快响应光电探测器,用于将光信号转化为电信号;4400 BOX-CAR 为美国 EG&G PARC 公司生产的数字信号平均器,用于信号的采集和平均;WA4500 是美国 Burleigh 公司生产的脉冲波长计,其测量精度为 1.5GHz ,用于监控波长.样品池工作温度由日本 Oemren 公司生产的温控仪控制,其精度为 0.1K .

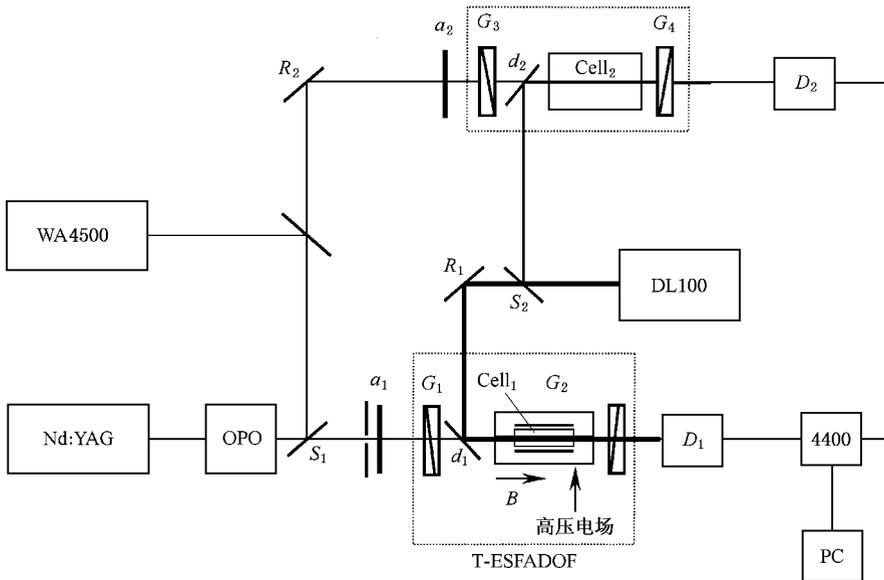


图 3 T-ESFADOF 系统实验装置图

实验光路主要包括两部分,其中主光路部分用于钾原子 532nm 可调谐 T-ESFADOF 透射谱的测量,另外一个光路用于电场为零时钾原子 532nm ($4P_{1/2} \rightarrow 8S_{1/2}$) T-ESFADOF 透射谱的测量,以便对透射谱对应频率和调谐量进行定标.实验中,DL100 激光器输出光被 S_2 分束器分成两束,一束经全反镜 R_1 和二色片 d_1 (对 532nm 的光全透,对 770nm 的光全反) 后入射到样品池 1 中,用于将钾原子由其基态抽运到第一激发态,从而在参与滤光的下能级 $4P_{1/2}$ 上形成粒子数布居,另一束光经全反镜 R_1 后入射到样品池 2 中,用于测量电场为零时透射谱;由 OPO 输

出的光被分成三束,第一束光经衰减片 a_1 和格兰棱镜 G_1 起偏后入射到样品池 1 中,透射信号经二色片 d_1 和格兰棱镜 G_2 后被探测器 D_1 接收并转化为电信号后传递给 4400 的通道 1,由它来对信号进行采集和平均,实验中应调节 S_1 , R_1 和 d_1 的位置和角度,使得抽运光和探测光在样品池 1 中重合;OPO 输出的第二束光经分束器 S_3 后被 WA4500 脉冲波长计接收,用于波长的监测;第三束光经全反镜入射 R_2 和衰减镜 a_2 后入射到样品池 2 中,经二色片 d_2 后被探测器 D_2 接收后传递给 4400 的通道 2,用于测量无电场时 T-ESFADOF 透射谱.

实验中,首先将 DL100 激光器输出波长调节到共振抽运波长上,将 OPO 激光器输出波长调节到 532nm 附近,然后将样品池 1、2 加热到相同温度,并在样品池 1 处加上一定的磁场和电场,最后将 OPO 输出光在 532nm 附近一定范围内慢步长扫描,在 4400 的通道 1 处可获得加电场调谐后的钾原子 532nm T-ESFADOF 透射谱,在通道 2 处可获得电场为零时钾原子 532nm T-ESFADOF 透射谱,将两谱图进行比较,可获得电场对于 T-ESFADOF 透射谱的调谐量.

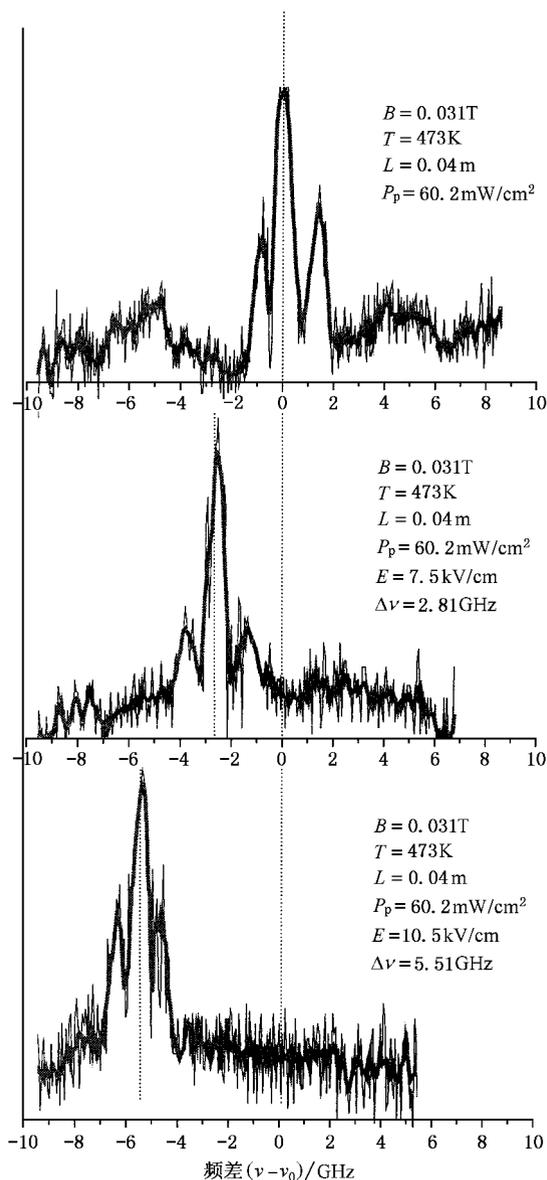


图 4 不同电场强度下钾原子 532nm T-ESFADOF 透射谱

图 4 给出磁场、温度、样品池长和抽运光强等工作条件相同,电场强度不同时实验观测到的 T-ES-

FADOF 透射谱.其中图 4(b)和(c)分别是电场为 7.5kV 和 10.5kV 时 T-ESFADOF 透射谱,图 4(a)是电场为零时 T-ESFADOF 透射谱.观察图 4 可知,在不同的电场强度下,透射谱的整体结构并未发生根本变化,仍然呈现单峰透射,其原因在于钾原子 532.33nm T-ESFADOF 体系用于滤光的原子上能级为 $8S_{1/2}$ 态,它的张量极化率 α_2 为零,仅有标量极化率 α_0 存在,而在同一电场中, α_2 的作用在于它使得具有相同 J 值,不同 $|m|$ 值的各子能级间彼此发生分裂,而 α_0 的作用在于它使得具有相同 J 值的所有子能级移动相同的频移量,由于钾原子 $8S_{1/2}$ 态的 α_2 为零,因此,电场的引入,仅使得 $8S_{1/2}$ 的所有子能级发生相同的频移,而并未引起各子能级之间的相对移动,因此,电场的引入没有改变 T-ESFADOF 透射谱结构,这一点仅对钾原子 532.33nm T-ESFADOF 体系成立,并不具有普遍意义.图 4(b)和(c)表明,当电场分别为 7.5kV 和 10.5kV 时,T-ESFADOF 透射谱向低频方向移动,其频移量分别为 2.81GHz 和 5.51GHz.

图 5 给出 T-ESFADOF 透射谱频移量的绝对值随电场变化的分布.图 5 表明透射谱的频移量绝对值随着电场的增强呈现增大趋势,对实验数据进行拟合,获得的拟合方程为

$$F_s = 0.05024E^2, \quad (8)$$

其中 F_s 代表透射谱频移量, E 是所加的外电场强度,可知,实验测得的谱线频移量与外加电场强度平方成正比,与理论分析一致.

将(8)式写成与(4)式相同的形式,

$$F_s = \frac{1}{2} \times 0.10048E^2. \quad (9)$$

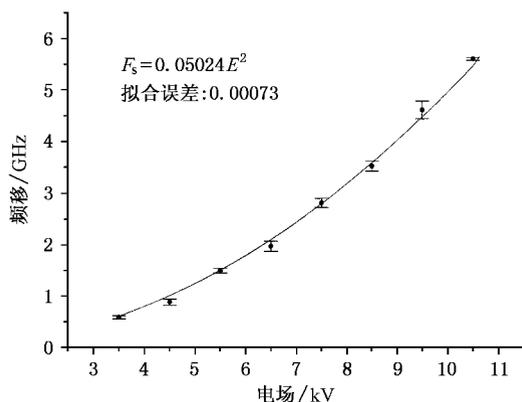


图 5 钾原子 532nm 可调谐主动式 FADOF 透射谱频移随电场强度变化的分布曲线

与(4)式对比可知,实验测得钾原子 $8S_{1/2}$ 态的标量极化率 α_0 为 $0.10048 \text{ GHz} (\text{kV} \cdot \text{cm}^{-1})^{-2} = 100.48 \text{ MHz} (\text{kV} \cdot \text{cm}^{-1})^{-2}$, 其理论计算值为 $160.5 \text{ MHz} (\text{kV} \cdot \text{cm}^{-1})^{-2}$, 以电场强度为 $10 (\text{kV} \cdot \text{cm}^{-1})$ 为例, 由其引起 T-ESFADOF 透射谱频移量的实验和理论值分别为 5.024 GHz 和 8.025 GHz , 两者存在着一定的偏差, 分析其原因, 有以下几个方面.

1) 实验中用于测量波长的 WA4500 脉冲波长计的精度为 1.5 GHz , 用其对透射谱的频移量进行测量存在着一定的误差.

2) 用作探针的 OPO 输出光带宽为 500 MHz , 对透射谱频移量的观测亦造成了一定的误差, 从而决定了用它来对 T-ESFADOF 透射谱频移量更为精确的测量无法进行.

3) 实验中, 为实现较强电场, 样品池采用了双层结构, 在内层中充入滤波介质, 在外层中封入两电极板, 并充入高纯度氮气, 这样的结构使得两电极板与滤波介质之间隔着两层石英和氮气气垫, 导致实际

加到滤波介质上的电场强度小于两电极板间的电场强度(即实验中电压表上的读数); 另外, 实验中所用的两个平板电极尺寸有限, 不可能做到无限大, 其产生的电场并非均匀电场, 也对实验结果造成了一定的影响, 从而最终导致实验测得的透射谱频移量普遍小于相应的理论结果.

4. 结 论

本文对钾原子 532.33 nm 可调谐超窄带光学滤波器 T-ESFADOF 进行了理论和实验研究, 建立了外电场中 T-ESFADOF 的理论模型, 编程计算了 T-ESFADOF 透射谱以及 T-ESFADOF 透射谱中心频率频移量随电场变化的分布曲线, 实验上测得了不同电场强度下 T-ESFADOF 透射谱, 给出 T-ESFADOF 透射谱中心频率频移量随电场强度变化的分布曲线, 并与理论计算进行了对比, 分析了两之间偏差的主要来源.

[1] Zhang Y D , Jia X L , Ma Z G and Wang Q 2001 *IEEE Journal of Quantum Electronics* **37** 372
 [2] Zhang Y D , Jia X L , Ma Z G and Wang Q 2001 *Optics Communication* **194** 147
 [3] Zhang Y D , Jia X L , Bi Y , Ma Z G and Wang Q 2002 *Chin. Phys. Lett.* **19** 807
 [4] Zhang Y D *et al* 2001 *Acta Opt. Sin.* **21** 1377 (in Chinese) 掌蕴东等 2001 *光学学报* **21** 1377]
 [5] Jia X L *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2489 (in Chinese) 贾晓玲等 2002 *物理学报* **51** 2489]
 [6] Menders J , Searcy P , Roff K and Korevaar E 1992 *Opt. Lett.* **17** 1388
 [7] Hu Z L , Sun X P , Zeng X Z 1993 *Opt. Comm.* **101** 175

[8] Chen H , She C Y , Searcy P and Korevaar E. 1993 *Opt. Lett.* **18** 1019
 [9] Hu Z L , Sun X P , Liu Y P , Fu L P , Zeng X Z 1998 *Opt. Comm.* **156** 289
 [10] Yin B and Shay T M 1992 *Opt. Comm.* **94** 30
 [11] Dressler E T , Laux A E and Billmers R I 1996 *J. Opt. Soc. Am. B* **13** 1849
 [12] Peng Y F *et al* 1993 *Acta Opt. Sin.* **13** 419 (in Chinese) 彭玉峰等 1993 *光学学报* **13** 419]
 [13] Zhang L *et al* 1999 *Acta Opt. Sin.* **19** 989 (in Chinese) 张 量等 1999 *光学学报* **19** 989]
 [14] Chang T Y 1973 *The Review of Scientific Instruments* **44** 703

A study on the potassium tunable ultra-narrow bandwidth optical filter at 532nm

Wang Qi Jia Xiao-Ling Zhang Yun-Dong Ma Zu-Guang

(*Institute of Opto-electronics ,Harbin Institute of Technology ,Harbin 150001 ,China*)

(Received 12 July 2002 ; revised manuscript received 18 September 2002)

Abstract

Potassium tunable ultra-narrow bandwidth optical filter at 532nm was studied theoretically and experimentally (T – ESFAD-OF). The theoretical model of T-ESFADOF was proposed and the transmission spectrum of T-ESFADOF was calculated. The transmission spectra under different electric fields were measured. The experimental frequency shift of T-ESFADOF versus electric field and the comparison with the corresponding theoretical curve have been given

Keywords : potassium , line-center operation , tunable ultra-narrow bandwidth filter

PACC : 3260 , 4225J , 4230Q