

超窄带滤光技术研究进展

Development of Ultra-Narrow Band Filter Technique

王 锋 胡晓阳 叶一东

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 绵阳 621900)

WANG Feng HU Xiaoyang YE Yidong

(Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900)

摘 要 对自适应光学中激光导星的基本原理及系统中所需的超窄带滤光技术作了简单的介绍。重点介绍了一些有望应用于激光导星系统上的滤光技术,如:原子共振光学滤光器、双折射滤光器、法拉第反常色散滤光器、法布里-珀罗滤光器等。针对以上滤光技术各自的特点,阐明了它们的基本原理,给出了部分主要参数,并且对各滤光技术的发展现状和不足作了简要阐述。

关 键 词 激光技术;滤光器;窄带;激光导星

Abstract A short introduction was given about the principles of laser guide star (LGS) in adaptive optics, and the ultra-narrow band filter techniques used in the application. The techniques which would be possible to be used in laser guide star were presented in detail, such as atomic resonance filter, birefringent filter, Faraday anomalous dispersion optical filter and Fabry-Perot filter. Based on the characteristics of each technique, the principles and major parameters were illustrated. Also, the disadvantages and state of each technique were elucidated.

Key words laser technique; filter; narrow band; laser guide star(LGS)

中图分类号 O439

1 引言

自适应光学是应用光学的前沿领域之一,在天文和国防领域有着广阔的应用前景,目前世界上科学技术先进的国家都在开展这方面的研究工作^[1,2]。其中,基于瑞利导星和钠导星的自适应光学系统在地基天文望远镜中得到了成功的应用。

激光导星技术可用于地基自适应光学天文望远镜,它的基本原理为^[2]:由地面向空中目标发射脉

冲激光,利用低空大气的瑞利散射或钠层的共振散射产生的回光作为波前传感的人工信标。激光在大气传输过程中的光束发散,以及很低的瑞利散射效率和钠共振发射效率,使得最终接收到的光的信噪比较低,很难探测^[3]。因此,提高强背景噪声下对弱光的探测能力是这一技术的关键。

除了距离选通法,采用滤光器也是激光导星实验中能提高信噪比的有效途径之一。原本噪声

较大的返回光,在经滤光片滤光后,噪声被削弱。在抑制噪声的过程中,若滤光片的通光带宽远远大于信号光的宽度,那么经过滤光后进入探测器的光将可能含有较大的噪声,从而引起探测器不能较好地成像。激光器的输出功率密度不可能是无限的,在有限的激光能量输出下,如果能够找到带宽足够窄、中心波长透过率足够高的滤光器,将会在一定程度上解决激光导星系统中对弱光

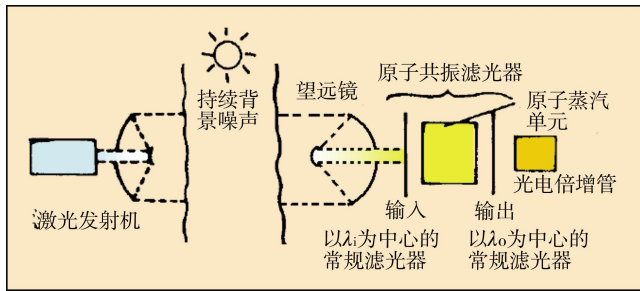


图1 在背景噪声下系统原子共振滤光器原理图

的回光探测问题。

2 窄带滤光技术

激光导星所要接收的返回光较弱,因此即便是夜晚,也存在天光背景噪声,这些对回光探测是很不利的。因此,削弱无用光,留下信号光,尽可能地提高信噪比是回光探测首要解决的问题。各种滤光技术成为解决这一问题的重要途径,以下将介绍一些典型的滤光器。

2.1 原子共振滤光器^[4]

普通滤光片的半高全宽(FWHM)、中心透过率、接收视角难以兼顾,不易有效地对返回光进行滤光。而原子共振滤光器(Atomic Resonance Filter)有可能弥补它的不足。

原子共振滤光器是利用原子共振跃迁对信号光进行超窄带滤光^[5],其带宽可达0.001 nm。具有超高Q值($10^5 \sim 10^6$)、各向同性、接收角接近 $\pm\pi/2$ 、中心波长对环境因素不敏感(尤其对温度起伏变化不大)等特点,适用于低强度、超窄带辐射的检测。原子共振滤光器的主要原理是信号光进入原子共振滤光器内部后被原子蒸气吸收,原子蒸气经过弛豫,辐射出不同于信号光的特定波长的荧光,从而实现滤光。原子共振滤光器有被动和主动两种工作方式。被动工作模式中对

λ_i 信号光的吸收产生于基态,主动工作模式中信号吸收跃迁可以从激发态开始。一个典型的利用原子共振滤光器进行滤光的系统如图1所示。

内部转换效率和响应时间是原子共振滤光器的重要参数,内部转换效率 η_a 可以用下式表示:

$$\eta_a = \frac{N_o}{N_i} \frac{\text{输出光子数(以 } \lambda_o \text{ 输出)}}{\text{输入光子数(以 } \lambda_i \text{ 输入)}} \quad (1)$$

式中,从基态吸收光子跃迁到高能级的原子数为 N_i ,从高能级无辐射跃迁至亚稳定能级的原子数为 N_o 。响应时间决定了原子共振滤光器的最大信息传输速率,而原子系统的弛豫速率又决定了响应时间。下标“i”,“o”和“p”分别代表输入、输出和抽运参数, η_a 是两项乘积,以图2所描述的系统为例,第一项是能级2上的原子数与跃迁到能级3上的原子数之比,第二项是与能级3辐射衰减到能级4相关的衰减相对

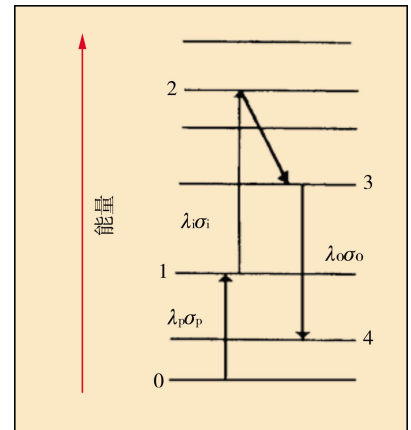


图2 原子共振中使用典型原子能级图

于能级3总衰减之比;弛豫时间是指从能级2辐射跃迁到能级3所用时间加上能级3的衰减时间^[6]。

N.Bloembergen在1957年最早提出原子共振滤光器(量子计数器)的原理。1992年,针对响应问题,J.A.Gelbwachs^[7]开展了通过加缓冲气体来缩短Ca、Mg、Sr-ARF响应时间的研究。2000年俄罗斯激光物理研究所Ig.V.Bagrov等^[8]在此原理基础上做了实验,利用光离解碘激光器的反转介质放大了像的亮度,实验光路如图3所示。被测物体的亮度在调Q方式和自由振荡方式情况下分别放大了1600倍和250倍。实验结果表明了利用光离解碘激光器的反转介质记录、放大亮度很弱的被

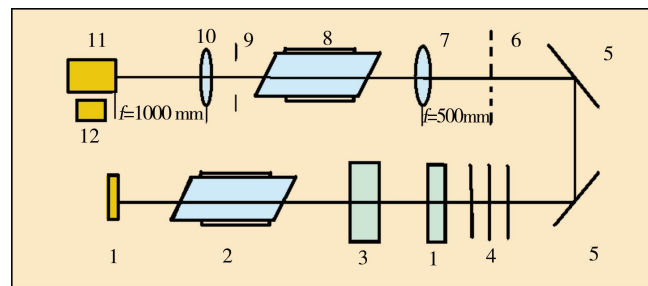


图3 实验布局图(1:腔镜;2:主谐振部分;3:Q开关;4:滤光片;5:旋转镜;6:被测目标;7,10:透镜;8:放大部分;9:小孔;11:带有相机的光电转换器;12:光电探测器)

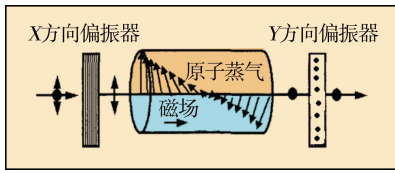


图4 法拉第反常色散光学滤光器的工作原理图

照明物体的可行性。哈尔滨工业大学和北京大学等单位在原子共振滤光器方面的研究较为深入。丁迎春等^[9]证明了内部光子转换效率随氙气压的增加而增加,在温度的变化关系中存在着最佳温度值。

原子共振滤光器近几年的研究进展较为缓慢,虽然它具有高放大率、窄带宽等优点,但仍未被广泛应用,这是由其自身不足所决定的:1) 原子共振滤光器利用的是原子共振跃迁,受原子内部结构的影响,它的量子转换效率很低(如Cs-原子共振滤光器,理论上最高的内部量子转换效率为60%)。尤其是碱金属原子具有众多的允许辐射跃迁,必然有部分信号通过其它的辐射通道而损失,这不利于激光导星后向返回光的滤光。2) 原子共振滤光器也会受到原子内部不同相关能级的寿命影响和限制,它的响应时间很长(如被动式Ca-原子共振滤光器的响应时间约为毫秒量级),这对于激光导星校正光路的实时性是不利的^[6]。

2.2 法拉第反常色散滤光器

利用法拉第反常色散机制研制出的法拉第反常色散滤光器(Faraday Anomalous Dispersion Optical Filter, FADOF)弥补了原子共振滤光器实时性差的不足。FADOF的滤光机制是:磁场的作用使原子蒸气变为光学各向异性,线偏振光在此原子蒸气池中

传播时偏振方向发生了旋转,适当调节工作条件,就可以得到针对某一中心波长具有很窄带宽的最大透射^[9]。如图4所示,原子蒸气处于轴向磁场中,在两端放置两个正交的偏振片。偏振方向为x方向的非单色光入射原子蒸气池,只有偏振方向经过原子蒸气池后旋转了 $(N+1/2)\pi$ (N为整数)角度的特定波长的光能够透过FADOF。

FADOF的透射波长准确且可以被微调。由于FADOF的透射峰值点总是以原子跃迁谱线的波长为基准的,与普通干涉滤光片及法布里-珀罗标准具相比,FADOF的透射峰更准确,也不会随寿命和震动影响而发生透射波长的漂移。但这并非意味着透射峰固定不变,通过升高FADOF的工作温度,可以使原子密度增大,原子吸收峰加宽,最终导致FADOF的透射峰逐渐靠拢,直至合并为一个宽峰。温度是影响法拉第反常色散滤光器中心波长(峰值波长)的重要因素,它既使得FADOF具有中心波长能够微调的特点,又产生了中心波长漂移的可能。但是,以原子跃迁谱线为基准的FADOF的中心波长,其稳定性要大大优于双折射滤光器、镀膜滤光片、可调谐声光滤光器等。

因FADOF具有的高透性、高噪声抑制比(优于 10^{-5})、高传输效率、快速反应能力等优点,使得其在远程雷达探测^[10]和光通讯领域被广泛应用。Dick和Shay^[11]重新研究了FADOF在铷5s-5p(780 nm附近)超精细跃迁下的透射。Mender^[12]随后证明了FADOF在852 nm的跃迁(Cs的6s-6p跃迁)。1982年,P.Yeh^[13]给出了精细结构下的FADOF理论模型。B.

Yin和T.M.Shay^[10]于1991年证明了超精细结构下的这一模型。随后,一些研究小组^[14]证明了包括Ca的4s-4p的跃迁(422.7 nm附近)、Na的D₂线的跃迁(589.0 nm)等。2001年,哈尔滨工业大学先后对铯(460.7 nm)^[15]、钾(766 nm, 532 nm)^[16]FADOF进行了理论和实验研究,得出了它们的滤光特性;北京大学^[17]进行了FADOF多峰及可调谐特性在卫星光链路捕捉系统中应用的研究,提出了在考虑到多普勒频移的情况下利用原子滤光器多峰、可调谐的特点,产生带宽最多不超过0.02 nm的方案。目前,对于钠、钾、铷等FADOF,透过率一般都在80%以上,带宽小于2 pm。

尽管FADOF是一种具备多种优点的成像滤光器,但还存在着可调谐范围小的不足。目前FADOF已被用于激光通讯卫星中^[6]。但是,针对激光导星系统的FADOF还有待发展。

2.3 双折射滤光器

利用双折射效应设计的双折射滤光器(birefringent filter, 双折射滤光器)主要分为Solc型和Lyot型两种滤光器,比较普遍的是Lyot型滤光器。Lyot型滤光器由多个Lyot型滤光单元组成,每个单元的基本结构如图5所示。B为单轴晶体,P₁、P₂为透偏方向相

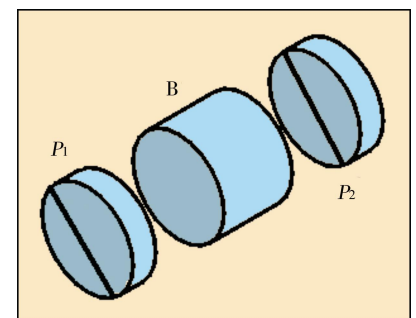


图5 Lyot型滤光单元

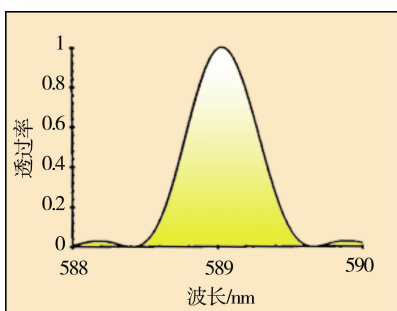


图 6 Lyot 型滤光器透射曲线

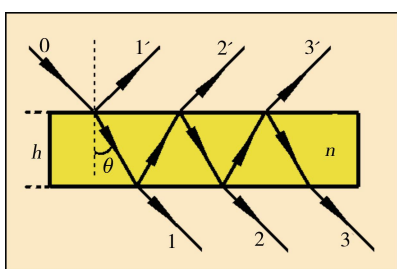


图 7 多光束干涉示意图

互平行的偏振片。入射光经过 P_1 后变为线偏振光，线偏振光入射到单轴晶体 B 上，由于晶体的双折射效应，入射光在单轴晶体内分成寻常光和非寻常光，它们经过单轴晶体后形成一定的光程差，经过偏振片 P_2 发生干涉，导致波长有选择性的透过。

单级 Lyot 型滤光单元的透射谱线近似呈现出周期性，它的半峰全宽与自由光谱范围 (FSR) 之比较大，一般不能很好地滤光(用于激光器的例外)。而这一周期与单轴晶体的厚度成反比，如果将厚度不同的滤光单元有机地串联起来，便可形成半峰全宽较窄、自由光谱范围较大的 Lyot 型滤光器。单轴晶体的厚度是整个滤光器透射谱线特性的决定因素之一。例如：第一级晶体的厚度为 3.1035 mm、各级晶体厚度比为 1:2:5:9 的四级 Lyot 型滤光器(中心波长为 589 nm，自由光谱范围为 5 nm，半峰全宽为 0.5 nm)，透射曲线如图 6 所示^[18]。

双折射滤光器的透射谱线本质上决定于光线经过各级晶体后形成的光程差，当光程差受误差的影响与设计值出现偏差时，将会引起其中心透射率下降、透射中心波长漂移等。以温度变化为例，1.973 mm 厚的石英晶体，温度增加 1℃，对波长为 632.8 nm 光的相位延迟会偏差 1.03°，透过率也会由 50.6% 降至 49.7%。可以看出，晶体折射率和晶体厚度随温度的变化对双折射滤光器中心波长的影响不可忽略，温度变化引起了双折射滤光器的中心波长的明显漂移。在实际应用中，环境温度的变化使双折射滤光器的中心波长不稳定，它是引起双折射滤光器中心波长漂移的主要因素。因此，双折射滤光器对温度控制的要求是苛刻的。温控的精度要求随滤光器带宽的不同而不同。

南京天文台制造的一台中心波长为 532.4 nm、带宽为 0.01 nm 的滤光器是目前带宽较窄的双折射滤光器之一。超窄带双折射滤光器存在峰值透过率低(一般小于 5%)、调谐范围小、温控精度要求高等不足^[19]。双折射滤光器在激光器方面的应用也十分广泛，长春光机所^[20]通过在激光二极管端面抽运 Nd:YVO₄ 的驻波腔中加入双折射滤光器，成功实现了瓦级单频绿光稳定输出的目标(8 W 的抽运功率下连续输出 1.12 W 单频绿光)。

双折射滤光器在对太阳观测方面的应用比较成熟。但是若将双折射滤光器应用于激光导星系统，精确、有效地控制晶体温度以及处理好滤光器带宽与中心波长透过率的关系，将是应用过程中面临的首要问题。

2.4 法布里-珀罗滤光器

法布里-珀罗滤光器 (Fabry-

Perot Filter) 基于多光束干涉原理。如图 7 所示，光束 0 入射折射率为 n 、厚度为 h 、表面反射率为 R 的膜时，入射光在上表面分割为反射光束 1' 和折射光束 (折射角为 i)，折射光束在下表面反射的同时，还有一部分能量透射过去，形成透射光束 1。当从下表面反射回来的光再次透过上表面形成光束 2' 的同时，也还是有一部分能量反射回去，在下表面形成透射光束 2。如此反复的折射和反射形成无穷多的反射光束 1'、2'、3'……和无穷多的透射光束 1、2、3……

在利用几何光学计算出各透射光束的光程差后，运用合成振幅的方法最终可以求得透射光的强度为

$$T = \{1 + [4R \sin^2(2\pi n h \cos \theta / \lambda)] / (1-R)^2\}^{-1} \quad (2)$$

由上式可以看出， m 为整数时，能够全部透射的波长必定满足以下条件

$$2nh \cos \theta = m \lambda_m \quad (3)$$

显然，在确定整数 m 后，通过选定 n 、 h 、 θ ，可以在以 λ_m 为中心波长的条件下进行滤光。此时，法布里-珀罗滤光器的半峰全宽为

$$\text{FWHM} = \lambda_m (1-R) / (\pi m \sqrt{R}) \quad (4)$$

上式表明，反射率 R 越高，或法布里-珀罗腔的长度越长 (m 越大)，滤光器的带宽越窄。

目前，人们普遍采用其它材料来替代法布里-珀罗腔中的空气间隙，构成单个滤光器的膜层也由单层膜变为多层介电膜，自由光谱范围和中心透过率也因此大大增加。由于环境温度变化会引起法布里-珀罗腔中固体材料的折射率温度系数发生变化以及产生温度应力等问题，整个器件中心波长会因此发生微小偏移。这种偏移在一般情况下可以忽略，但在密

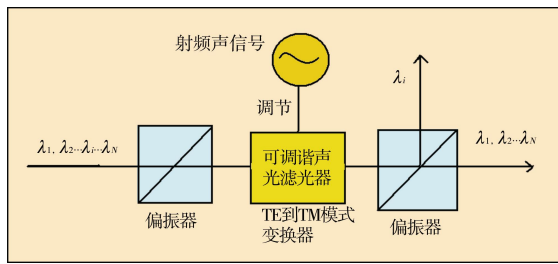


图 8 AOTF 示意图(其类似于夹在两个正交偏振片之间的一个 TE-TM 模式变换器,由射频信号完成对波长的调节)

集波分复用系统的使用中,信道间隔仅有 0.8 nm 甚至更小,任何微小的偏移都将导致器件无法正常工作。因此,应用于密集波分复用系统中的法布里-珀罗滤光器需要使用温控器件以保证中心波长的稳定性。

近年来,以液晶为腔内物质的液晶法布里-珀罗滤光器受到各国研究部门的关注。2003 年,云茂金等^[20]结合双折射滤光器和法布里-珀罗滤光器的特点,设计了利奥型液晶电光调谐滤光器,并且从实验上证明了其可行性。围绕液晶可调谐法布里-珀罗滤光器,浙江大学现代光学仪器国家重点实验室也开展了深入地研究。陈海星等^[21]于 2004 年设计出了功耗小、可用于波分复用系统的可调谐液晶滤光片,并进行了实验验证。吕玮阁等^[22]利用液晶的双折射效应,解决了连续调谐过程中“透射峰跳跃”的问题。

设计紧凑的法布里-珀罗滤光器可以提供很高的光通量和光谱分辨率。但是,它的通带被大量的级数所困扰。传统的解决方法是将仅允许一个级数光通过的阻挡滤光片与法布里-珀罗滤光器组合起来,或者用前后两个法布里-珀罗滤光器组合滤光。但这两种方法都降低了法布里-珀罗滤光器的峰值透过率。具有大的自由光谱范围、中心波长透过率较

高、能应用于激光导星系统上的法布里-珀罗滤光器仍有待进行更深入地研究。

2.5 可调谐声光滤光器

可调谐声光滤光器(acousto-optical tunable filter, AOTF)建立在光在各向异性媒质中的声学衍射基础上,它由粘合在双折射晶体上的压电传感器组成。AOTF 滤光器的结构如图 8 所示。当传感器被射频信号激励后,在介质中会产生声波。传播中的声波对介质折射率产生周期性的调制。这就提供了一个移动的光栅,此光栅可在合适的条件下衍射部分入射光。在一定的声学频率下,只有有限频率波段的光才能满足相位匹配条件而被积累、衍射。当射频的频率发生改变时,通光波段的中心点也相应地发生改变。各向异性的声光衍射包括一个衍射波的 90° 旋转偏振平面,只有那些波长在 AOTF 通光带之内的光偏振状态才会发生改变,完成从 TE 到 TM 模式的转换。

1969 年斯坦福大学的 S.E. Harris 和 R.W. Wallace^[24]首次提出了用体声波与光波作用来进行滤波,并实现 0.2 nm 的滤波线宽和 500~700 nm 的可调范围。近年来,国外 AOTF 在多光谱成像和物体识别领域的应用发展迅速。国内,虽然也有一些进展(如:天津大学精密仪器学院研制的

AOTF 牛奶品质分析仪;浙江大学研制的基于 AOTF 的面光谱探测系统),但由于起步较晚,大都处在实验研究阶段,与国外还有一定的差距。

尽管可调谐声光滤光器具有设计紧凑、耐震动、大视场、高光通量(对于偏振光大于 95%)等优点,但也存在着不少的缺点:1) 由于声光相干长度的原因,可调谐声光滤光器的通带在红外波段的分辨率仅能达到几个纳米。2) 可调谐声光滤光器对环境温度的变化比较敏感,这使 AOTF 中心波长变得不稳定。在一定条件下,以采用铌酸锂晶体的 AOTF 为例,晶体的温度每上升 1℃,其中心波长漂移 0.8 nm^[25]。另外,AOTF 还存在制造成本高、调谐时切换速度慢等不足。这些都限制了 AOTF 的应用发展。

3 结束语

目前,国内半峰全宽为 10 nm 左右的滤光器的中心波长透过率已经能达到一个较高的水平,回光探测系统的信噪比在此基础上亦有了较大提高。但是,随着对激光导星系统的回光探测能力要求的提高,目前的滤光器已不能很好的满足需要。本文基于此,对几种有望实现超窄带滤光的技术的基本原理、优缺点和国内外发展现状做了比较详细地介绍。

收稿日期:2007-01-23

作者简介:王锋(1981-),男,新疆人,中国工程物理研究院应用电子学研究所硕士研究生,主要从事激光导星技术研究。

E-mail: yuan13381338@163.com

导师简介:叶一东(1969-),男,四川人,研究员,博士,从事激光和光学工程研究。

E-mail: yidongye@163.com

参考文献

- 1 周仁忠, 阎吉祥, 俞信等. 自适应光学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.1~15
- 2 熊耀恒. 用于自适应光学系统的激光引导星[J]. 天文学进展, 2000, **18**(1):1~8
- 3 D. G. Voelz, J. F. Belsher, Laura Ulibarri *et al.*. Ground to space laser imaging: review 2001[C]. *SPIE*, 2002, **4489**:35~47
- 4 Gelbwachs J. A. Atomic resonance filters [J]. *IEEE J. Quantum Electronics*, 1988, **24**(7):1266~1277
- 5 Gelbwach J. A., C. F. Klein, J. E. Wessel. Infrared detection by an atomic vapor quantum counter [J]. *IEEE J. Quantum Electronics*, 1978, **14**(2): 77~79
- 6 掌蕴东, 袁萍, 毕勇等. 超窄带光学滤波器 [J]. 激光技术, 1999, **23**(5):257~261
- 7 Y. C. Chan, J. A. Gelbwachs, M. D. Tabat. Experiment demonstration of internal wavelength conversion in the magnesium atomic filter[J]. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(14):722~724
- 8 Ig. V. Bagrov, O. B. Danilov, S. A. Tuskii *et al.*. Amplification of image brightness by means of the photodissociative iodine laser[C]. *SPIE*, 2001, **4351**:86~91
- 9 丁迎春, 张华, 赵晓彦等. 铯原子共振滤光器内部光子转换效率的研究[J]. 光学学报, 2000, **20**(1):94~97
- 10 B. Yin, T. M. Shay. Theoretical model for a Faraday anomalous dispersion optical filter[J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(20): 1617~1619
- 11 D. J. Dick, T. M. Shay. Ultrahigh-noise rejection optical filter [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(11):867~869
- 12 J. Menders, K. Benson, S. H. Bloom *et al.*. Ultranarrow line filtering using a Cs Faraday filter at 852 nm[J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(11): 846~848
- 13 P. Yeh. Dispersive magneto-optic filters[J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(11):2069~2075
- 14 H. Chen, C. Y. She, Paul Searcy *et al.*. Sodium vapor dispersive Faraday filter[J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(12): 1019~1021
- 15 掌蕴东, 贾晓玲, 胡勇等. 铯 460.7 nm 法拉第色散光学滤波器的滤波特性分析[J]. 光学学报, 2001, **21**(5):597~599
- 16 王骥, 贾晓玲, 掌蕴东等. 钾原子 532 nm 可调谐超窄带光学滤波器的研究[J]. 物理学报, 2003, **52**(5):1151~1156
- 17 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[J]. 光学学报, 2001, **21**(7):861~865
- 18 乔金元, 王兴龙, 王学理等. 利用双折射效应设计的窄带滤光系统[J]. 量子电子学报, 1997, **14**(5):453~457
- 19 李挺, 毛伟军, 陆海天等. 中国出口双折射滤光器[J]. 天文学进展, 2001, **19**(3): 331~335
- 20 王军营, 郑权, 薛庆华等. 利用双折射滤光片技术获得瓦级单频绿光输出 [J]. 光子学报, 2005, **34**(3): 321~324
- 21 云茂金, 李国华, 吴福全等. 利奥型可调谐液晶电光滤波器的特性分析 [J]. 光学学报, 2003, **23**(5): 627~631
- 22 陈海星, 黄腾超, 沈伟东等. 一种用于密集波分复用系统中的可调谐液晶法布里珀罗滤光片 [J]. 光学学报, 2004, **24**(8): 1095~1098
- 23 吕玮阁, 陈海星, 顾培夫等. 可调谐液晶滤波器的调谐性能研究 [J]. 光学学报, 24(11): 1538~1542
- 24 S. E. Harris, R. W. Wallace. Acousto-optic tunable filter[J]. *Journal of the optical society of America*, 1969, **59**(6): 744~747
- 25 唐多强, 张海斌, 胡鸿璋等. 集成光学声光可调谐滤波器的温度特性及其精密数字控制[J]. 中国激光, 2003, **30**(7): 629~632

(上接第 42 页)

征文要求:

将 500~800 字摘要(用于审稿)和 300 字提要(用于出版)各一份,以电子邮件附件的形式发送至:Laser2007@hit.edu.cn,摘要应能准确反映研究成果的创新点,包括研究目的、方法结果、结论等内容。不引用参考文献、数学公式和化学式。不接受已在国内外正式出版刊物上发表过的论文,提交截稿日期为 2007 年 5 月 31 日。

来稿需注明论文题目、作者姓名、单位、通讯地址(包括邮编、电话、E-mail 等)、关键词 3~6 个。题目用小三号黑体,摘要用宋体小四号字按 word 格式编排,务必在左上角标明所属**征稿范围**的第几类。一般不接受书面邮信件。经审稿录用的论文,将由《中国激光》出版。

会议秘书组联系人及联系电话:

陈德应 0451-86402837; 何伟明 0451-86412710-214; 程元丽 0451-86402920; 王春晖 0451-86402910
王瑞环 0451-86413164

传 真:0451-86413164 E-mail:Laser2007@hit.edu.cn 网 页:www.Laser2007.hit.edu.cn 邮 编:150001

地 址:黑龙江哈尔滨南岗区一匡街 2 号哈工大科学园 3031 信箱(王瑞环收)

中国光学学会激光专业委员会
中国电子学会量子电子学与光电子学分会
哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室
哈尔滨工业大学光电子技术研究所(代章)
2007 年 1 月 22 日