

doi: 10.3788/lop47.042301

# 原子滤光及鉴频技术在光电探测中的应用

龚顺生<sup>1,2</sup> 程学武<sup>1,2</sup> 李发泉<sup>1</sup> 杨国韬<sup>1,2</sup> 杨 勇<sup>1,3</sup> 王嘉珉<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院武汉物理与数学研究所, 湖北 武汉 430071; <sup>2</sup>中国科学院空间天气学国家重点实验室, 北京 100190)  
<sup>3</sup>中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要** 原子滤光器是一种新型的光频选择与光频鉴别器件, 由于该器件工作频率由原子的跃迁频率所决定, 使之具有中心频率极稳、工作带宽极窄、以及带外抑制强、透射效率高等诸多优点。近年来, 该器件在激光雷达、激光通信等多种光电探测领域获得了越来越广泛的应用, 并由此大大提升了光电系统的能力和水平。介绍了几种典型的原子滤光及鉴频器件的原理、结构及其研制状况, 并介绍这些原子滤光或鉴频器件在若干重要光电探测系统中的应用技术及应用效果。

**关键词** 原子滤光; 原子鉴频; 激光雷达; 激光通信

中图分类号 O433.1 OCIS 230.5160 140.3460 文献标识码 A

## Applications of Atomic Spectra Filtering and Atomic Frequency Discrimination in Optoelectronic Systems

Gong Shunsheng<sup>1,2</sup> Cheng Xuewu<sup>1,2</sup> Li Faquan<sup>1</sup> Yang Guotao<sup>1,2</sup>  
Yang Yong<sup>1,3</sup> Wang Jiamin<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)  
<sup>2</sup>State Key Laboratory of Space Weather, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China  
<sup>3</sup>Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** Atomic filter is an optoelectronic device used for optical spectra filtering and optical frequency discrimination. As the working frequency of this device is determined by atomic or molecular transitions, the atomic filter has ultra-high stability of working frequency, ultra-narrow working band-pass, good out-of-band suppression, high transmission, and so on. Therefore, the atomic filters are widely used in the fields of lidar and optical communication, and have enhanced the performance of lidar and optical communication systems. The principle, structure, development and some applications of the atomic filters are introduced and discussed.

**Key words** atomic filtering; atomic discrimination; lidar; optical communication

## 1 引言

在许多光电探测系统中, 对背景光干扰抑制和对信号光频率变化检测的要求越来越高。典型的例子是: 在远距离自由空间激光通信系统和全天时激光雷达系统中对强烈太阳光干扰的有效抑制, 以及在远距离或高空激光测速系统中对微小多普勒频移的准确探测。通常, 高分辨率的光学器件, 如干涉滤光片, 法布里-珀罗标准具等被用来实现对光频率的选择(滤光)和鉴别(鉴频)。然而, 随着光频选择和鉴别要求的不断提高, 使用单个高分辨率滤光或鉴频器件已不能满足相应的技术要求, 不得不采取多个高分辨率光学器件的

收稿日期: 2009-07-20; 收到修改稿日期: 2009-10-03

基金项目: 国家自然科学基金(10978003)和国家重点实验室专项基金(08262CAA3S, 082628A98S)资助课题。

作者简介: 龚顺生(1942—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光探测和激光遥感等方面的研究。

E-mail: gongss@wipm.ac.cn

联用, 如干涉滤光片加一个或多个法布里-珀罗标准具<sup>[1,2]</sup>。其结果, 不但使光电系统的结构和调试变得非常复杂, 更重要的是由于多个高分辨率光学器件各自的频率漂移, 使系统的总体性能变得极不稳定。

原子滤光(或鉴频)器则是一种全新的光频选择或鉴别器件, 它在光电系统中的使用效果虽然是“光学”的, 但它的工作原理却是“原子”的<sup>[3,4]</sup>。因为原子滤光(鉴频)器的工作是基于原子内部的能级跃迁, 而这种原子跃迁频率具有自然的确定性和稳定性, 从而使它具有工作频率极稳和工作带宽极窄的独特优点。此外, 和某些具有很高分辨的光学器件(如双折射滤光器)相比, 它还具有接收视场大, 透射率高等优势。因此, 原子滤光(鉴频)器的出现, 为某些高性能光电探测系统提供了一种新的选择, 其应用必将有利于提高这些光电探测系统的工作能力和技术水平。本文介绍几种原子滤光器的原理、性能、结构及其在几种典型光电探测系统中的应用和效果。

## 2 原子滤光(或鉴频)器

原子滤光(鉴频)器的原理虽然都基于原子内部的能级跃迁, 但按照其通过原子跃迁实现滤光(鉴频)方式的不同, 可分为多种形式, 常见的有荧光型、电离型、法拉第偏振旋转型等<sup>[5-7]</sup>。本文以结构较为简单、应用较为广泛的法拉第旋光型为例, 介绍原子滤光(鉴频)器的工作原理、性能和结构。

图 1 所示即为一种典型法拉第旋转型原子滤光器(FADOF)的结构示意图。它由一个置于适当恒温及轴向磁场中的原子泡及置于两端的一对正交偏振镜所组成。从左边输入的光, 若其频率不能准确地激发原子泡中原子的某个能级跃迁, 则会被正交安置的一对偏振镜所阻挡(衰减至  $10^{-4} \sim 10^{-6}$ ); 而对于能激发泡中原子跃迁的光, 则经泡中原子与相应磁场的联合作用, 可将其偏振方向旋转  $90^\circ$  或其奇数倍, 就可以顺利通过正交安置的偏振镜对。如果光电系统的信号光就是这种能激发泡中原子跃迁的光, 则信号光就会被挑选出来, 从而实现了“原子”滤光。

典型的 FADOF 透射曲线如图 2 所示。其透射带宽  $\Delta f$  通常在吉赫兹量级( $1 \text{ GHz} \approx 0.0011 \text{ pm}@589 \text{ nm}$ ), 其中心频率  $f_0$  主要取决于原子跃迁, 其稳定性极高。如果将信号光的频率置于图 2 所示透射曲线的左右斜边的中心处, 即  $f_0 \pm 1/2\Delta f$  处, 则当信号光频率由于某种物理原因发生微小改变时(如由目标运动所产的多普勒频移或其所处磁场改变所导致的塞曼频移等), 则信号光的透射会增加或减小(视信号光频率是提高或降低而定)。经与参考光强比较, 可获得信号光频率变化的信息, 从而实现了“原子”鉴频。

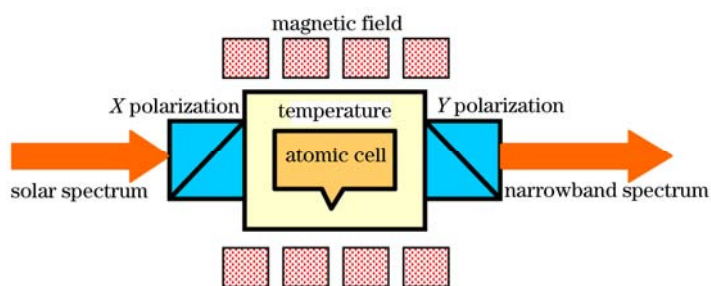


图1 法拉第型原子滤光(鉴频)器原理

Fig.1 Principle of FADOF atomic filter (frequency discriminator)

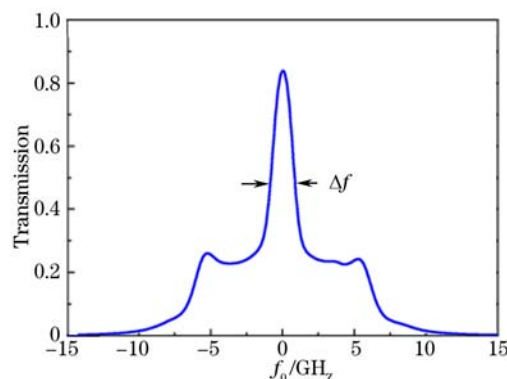


图2 原子滤光(鉴频)器典型透射曲线

Fig.2 Transmission curve of atomic filter (frequency discriminator)

原子滤光(鉴频)器的性能虽好, 但其对工作频率的选定非常严格。特别是对于在光电探测系统中普遍使用的  $532 \text{ nm}$  光(Nd:YAG 激光二倍频), 没有从基态跃迁的原子频率与其重合。为此, 人们又发展出从原子激发态跃迁的原子滤光(鉴频)器。首先采用某种方法把原子激发到某个激发态, 再从该激发态到更高激发态的跃迁频率中寻找与  $532 \text{ nm}$  重合的跃迁频率。由于原子高激发态能级密度大, 这种重合的可能性较高。目前已知的有 Rb 原子的  $5^2P_{1/2}-10^2S_{1/2}$  跃迁和 K 原子的  $4^2P_{1/2}-8^2S_{1/2}$  跃迁等<sup>[8,9]</sup>。

由于这类原子滤光(鉴频)器是从激发态开始工作, 需要预先将原子从基态激发到相应的初始激发态, 因此称之为主动型原子滤光(鉴频)器。而直接从基态开始跃迁的原子滤光(鉴频)器, 则称为被动型原子滤光(鉴频)器。图3所示为中国科学院武汉物理与数学研究所正在研制的 Rb 原子主动型原子滤光(鉴频)器原理, 其中图 3(a)为其结构示意图, 图 3(b)为所用能级。可见, 与图 1 所示被动型原子滤光器不同的是, 增加了一束抽运激光, 波长为 795 nm, 用来将泡中的 Rb 原子从基态( $5^2S_{1/2}$ )预先抽运到第一激发态( $5^2P_{1/2}$ ), 为进一步的 532 nm 信号光的跃迁做准备。目前, 用于 532 nm 的原子滤光(鉴频)在原理上已实现, 为将其推向实用化, 还需要在增加透射效率和抑制固有噪声等方面下功夫。图 4 所示为中国科学院武汉物理与数学研究所多年来研制成功的几种原子滤光(鉴频)器的实物照片。

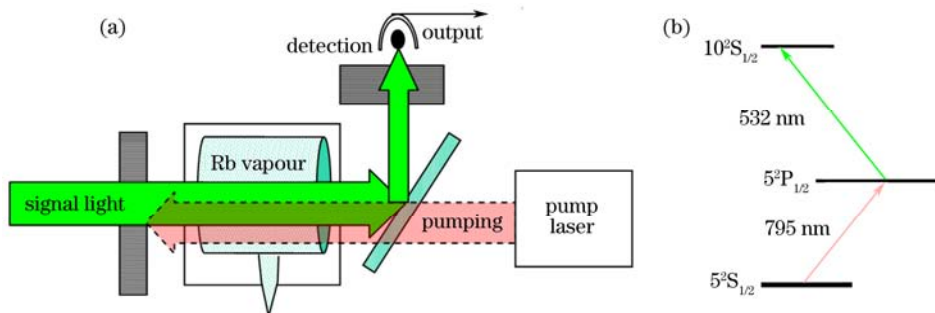


图 3 Rb 原子主动型原子滤光(鉴频)器原理  
Fig.3 Principle of active Rb atomic filter (frequency discriminator)



图 4 几种原子滤光(鉴频)器的实物照片  
Fig.4 Photos of several kinds of atomic filters (frequency discriminators)

### 3 原子滤光在激光通信系统中的应用

在远距离自由激光通信系统中, 由于信号光强减弱, 对背景光(尤其是白天强烈的太阳光背景)的有效抑制是一个需要考虑的重要问题。而且, 在卫星激光通信或是水下激光通信中, 由于通信双方快速捕获跟踪的需要或是海水对信号光散射导致的分散, 都要求激光通信系统接收光学的视场要大, 从而对接收系统背景光抑制的要求更高。采用原子滤光技术就可解决这种矛盾。

图 5 所示为一种卫星激光通信信标系统的原理框图, 该信标系统主要负责卫星激光通信双方的捕获和跟踪(即 ATP 系统)<sup>[10]</sup>。为了在太空中实现通信双方的快速捕获, 要求其发射激光的发散角和接收光学的视场角都要大, 导致信号光减弱和背景光增强。为改善系统信噪比, 在其接收系统中采用了原子滤光技术。由于滤光带宽极窄, 使得发射激光的频率漂移成为影响系统工作的关键问题。因此在其发射系统中, 对发射激光也需要采用相应的原子稳频。由于相同原子跃迁频率的固有的一致性, 使相距很远的收发双方能实现长期稳定的收发频率匹配。这种原子稳频的激光发射和原子滤光的光学接收就构成了一种基于原子跃迁频率的激光信道。

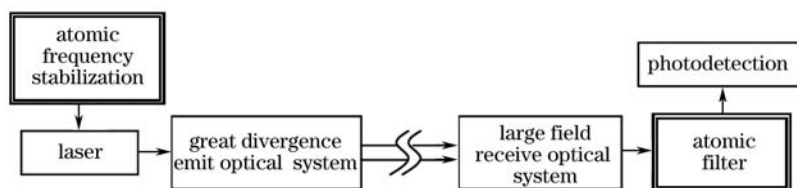


图 5 卫星激光通信信标系统的原理框图  
Fig.5 Scheme of satellite laser communication beacon system

中国科学院武汉物理与数学研究所曾研制出这种基于原子跃迁控制的激光信道, 作为自由空间激光通信的演示系统, 如图 6 所示。该系统以 Cs 原子 852 nm 跃迁为频率基准, 在接收端采用 Cs 原子 FADOF<sup>[11]</sup>, 在发射端采用由相同 FADOF 构成的腔内反馈稳频器<sup>[12]</sup>。该系统可以在强激光或强灯光直接照射干扰下, 实现稳定可靠的声像信号传输。

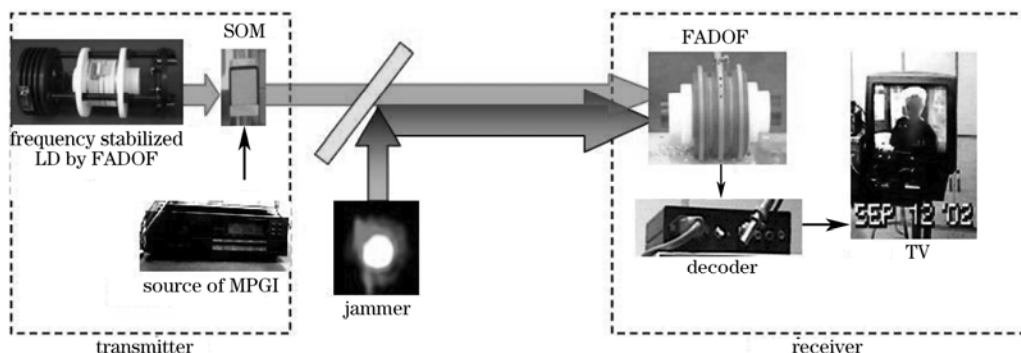


图 6 原子信道自由空间激光通信演示系统原理

Fig.6 Demonstration system for free space communication controlled by atomic transition

#### 4 原子滤光在全天时高空探测激光雷达中的应用

与低空探测激光雷达相比, 高空探测激光雷达的回波信号要弱得多(通常以单光子形式出现)。因此, 实现高空激光雷达白天探测(即全天时探测)在技术上难度很大。图 7 所示为中国科学院武汉物理与数学研究所全天时钠层探测激光雷达的原理框图。该激光雷达用于探测处于 80~110 km 的高空钠原子层, 工作波长 589 nm。其回波信号极弱, 仅能以单光子形式探测。但是, 当在其接收系统采用钠原子滤光器(采用双通道形式, 以利用两正交偏振光, 达到信号近似倍增的效果), 在其发射端对脉冲染料激光器采用钠原子智能稳频后, 就实现了对我国高空钠层的全天时探测<sup>[13]</sup>。

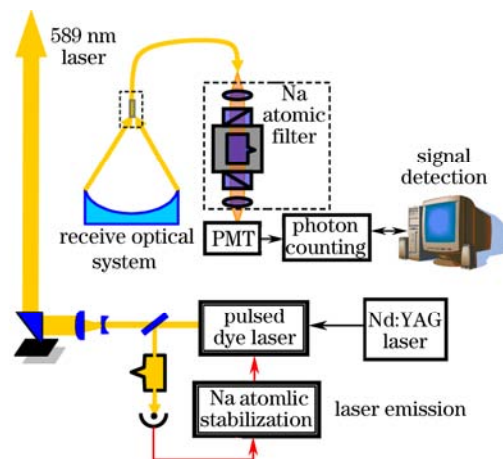


图 7 全天时钠层荧光激光雷达

Fig.7 Daytime sodium fluorescence lidar

图 8 所示即为该激光雷达在一天中的 4 个典型时段的回波信号。由图可见, 即使是在正午太阳当顶的时段, 该激光雷达仍然可以探测到高空钠层的形态和结构。和世界上此前仅有的一台全天时钠层荧光激光雷达不同<sup>[14]</sup>, 是在多模激光(更简单、可靠)和更低纬度的城市环境(背景光更强)条件下实现了全天时探测。

目前对中、高层大气的探测多用 532 nm 激光作为发射光源(即瑞利散射激光雷达)。如能将主动型 532 nm 原子滤光器发展成实用化器件, 将有可能实现对中、高层大气的全天时探测。

#### 5 原子鉴频在激光测速系统中的应用

利用运动目标对探测激光的多普勒频移来遥测目标的运动速度, 是一种常用的光电探测技术。当对速度测量精度的要求提高时, 传统采用光学器件鉴频的技术就遇到了测量精度和系统复杂程度及稳定性、可



靠性的矛盾。由于原子鉴频器具有高分辨率(窄带宽)和高稳定性(原子跃迁)相统一的优势,使其在激光鉴频系统中的应用受到关注。

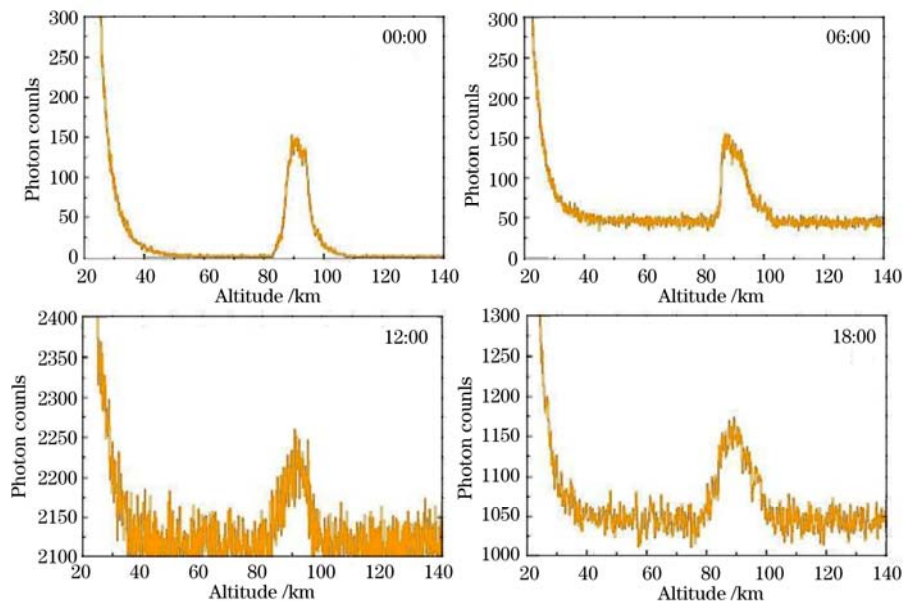


图 8 全天 4 个典型时段的回波信号  
Fig.8 Lidar returns at four typical times in a day

中国科学院武汉物理与数学研究所研制的基于原子鉴频的多普勒测速演示系统示于图 9<sup>[15]</sup>,其中图 9(a)为其结构与原理,图 9(b)为系统实物照片。其工作波长为 852 nm,在接收通道采用 Cs 原子鉴频器,在发射通道采用 Cs 原子稳频器。适当调整发射激光频率在原子鉴频曲线上的位置,即可实现多普勒频移鉴别。该演示系统以转动的传送带模拟运动目标,其速度为已知。通过比较激光多普勒频移测速系统的测量结果和已知的目标运动速度,可以评价该系统的工作性能。

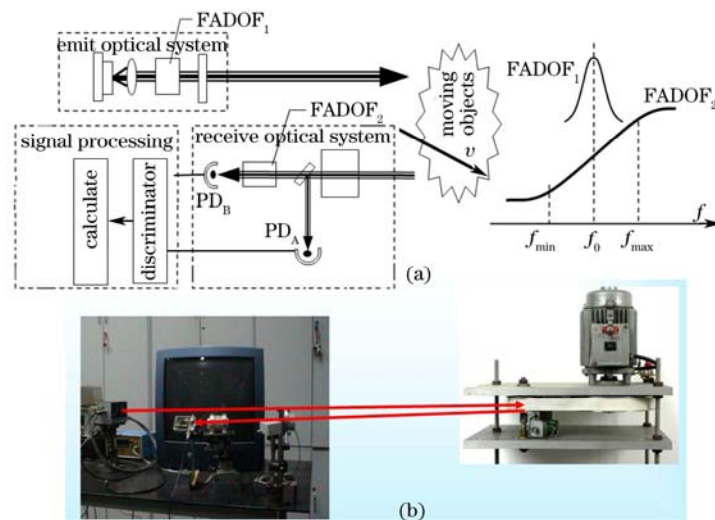


图 9 基于原子鉴频的多普勒测速演示系统。(a)原理;(b)系统照片

Fig.9 Demonstration system of Doppler velocimeter based on atomic discriminator. (a) principle; (b) picture of system

近年来,陆续出现了多种基于原子鉴频探测大气风场,以及探测海水温度场的原理和实验的报道<sup>[16,17]</sup>。可以预计,随着这方面研究工作的进展,原子鉴频技术在光电探测系统中的应用将会进一步普及,并获得更好的效果。

## 6 原子鉴频在太阳高分辨成像观测中的应用

太阳是离地球最近的恒星,是地面天气,特别是空间灾害性天气的源头。对太阳的高分辨成像探测,可获得太阳全日面物质运动(通过太阳谱线的多普勒频移)和磁场变化(通过太阳谱线的塞曼频移)等重要信

息。因此,这种观测研究既有重要的学术意义,又有重要的应用价值。利用原子鉴频高分辨率和高稳定性统一的特点,可使传统的太阳高分辨成像系统结构更简单,性能更稳定。该技术经多年研究已逐步走向实用,并取得了良好的效果<sup>[18]</sup>。

以太阳多普勒成像观测(太阳物质运动观测)为例,图10为其基本工作原理。图10上部的宽谱线为太阳原子谱线(Na, K, Ca等),图10下部两条窄谱线为原子鉴频器的双峰透射曲线。当不存在太阳谱线的多普勒频移时,两者的相对位置即正如图10所示。这时,原子鉴频器左、右两峰对太阳谱线的透射强度  $I_r$  和  $I_b$  相等,其比值为1。当太阳物质因运动而使其谱线产生多普勒频移时,  $I_r$  和  $I_b$  会发生相应变化,使其比值大于或小于1,经反演可获得太阳物质运动速度的信息。可见,在该方法中,必须有单独探测原子鉴频器左、右峰透射光强的技术(即选支技术),该技术可通过利用两峰透射光的偏振或频率特性实现。

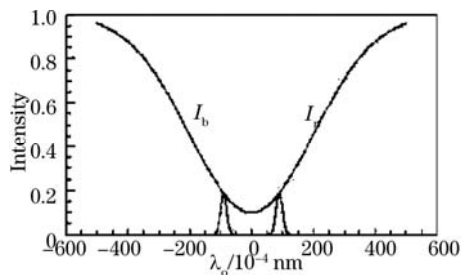


图10 原子鉴频太阳多普勒成像原理  
Fig.10 Principle of solar Dopplergrams

利用钠原子鉴频技术获得太阳多普勒成像的结果如图11所示。图11(a)和(b)分别为  $I_r$  和  $I_b$  的成像;图11(c)为  $I_r/I_b$  的成像,即太阳物质总运动速度成像;图11(d)为扣除太阳与地球(观测者)之间固有运动后的图像,即太阳内部物质净运动速度成像。

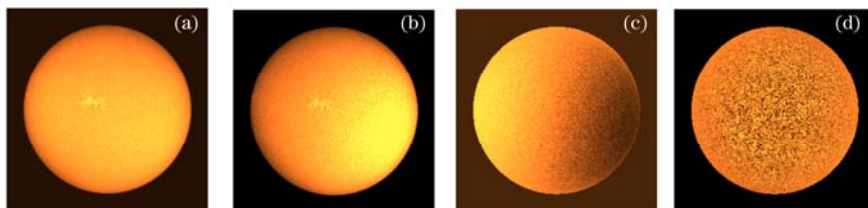


图11 钠原子鉴频太阳多普勒成像  
Fig.11 Solar Dopplergrams obtained by atomic discriminator

图12为中国科学院武汉物理与数学研究所研制成功的、拟用于高分辨太阳成像观测的、大间距双峰原子鉴频器的透射曲线(a)和实物照片(b)。

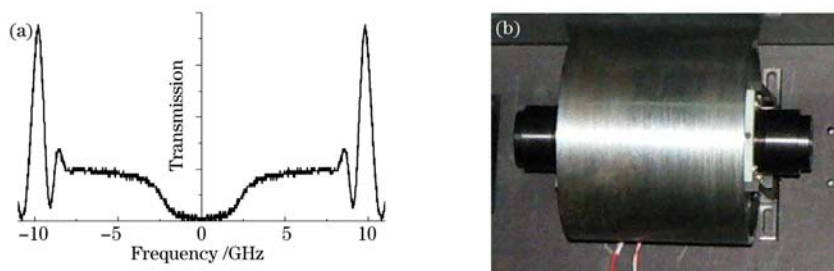


图12 用于太阳高分辨成像的钠原子鉴频器。(a)透射曲线;(b)实物照片

Fig.12 Na atomic frequency discriminator used for solar high resolution imaging. (a) transmission curve; (b) picture of the filter

## 7 结 论

原子滤光(或鉴频)器是一种全新的高分辨率器件,它的效果是“光学”的,其原理却是“原子”的。与传统的光学高分辨率器件相比,它具有高分辨率和高稳定性相统一的独特优点。原子滤光(鉴频)器件已经在一些高性能的光电探测系统中成功应用,并取得了良好的效果。随着原子滤光(鉴频)器件技术的发展,它必将在光电探测系统中获得更为广泛的应用。

## 参 考 文 献

- 1 D. Rees, U. Von Zahn, G. Von Cossart *et al.*. Daytime lidar measurements of the stratosphere and mesosphere at the alomar observatory[J]. *Advances in Space Research*, 2000, **26**(6): 893~902
- 2 C. Souprayen, A. Garnier, A. Hertzog *et al.*. Rayleigh-mie Doppler wind lidar for atmospheric measurements. I. Instrumental setup, validation, and first climatological results[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(12): 2410~2421
- 3 D. J. Dick, T. M. Shay. Ultrahigh-noise rejection optical filter[J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(11): 867~869
- 4 H. Chen, C. Y. She, Paul Searcy *et al.*. Sodium-vapor dispersive Faraday filter[J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(12): 1019~1021
- 5 J. A. Gelbwachs. Atomic resonance filters[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **QE-24**(7): 1266~1277
- 6 Gong Shunsheng, Wang Jiamin, Liu Bingmo *et al.*. Experimental study of a Na yellow light atomic filter by electric field ionization[J]. *Chinese J. Lasers*, 1993, **A20**(8): 581~584  
龚顺生, 王嘉琪, 刘柄模 等. 钠黄光场电离原子滤光器方案的实验研究[J]. 中国激光, 1993, **A20**(8): 581~584
- 7 B. Yin, T. M. Shay. The stark anomalous dispersion optical filter: the theory[J]. *JPLTDA Prog. Rep.*, 1994, **42-118**:14~21
- 8 Monica Minden, Hans Bruesselbach. Detection of 532 nm frequency-doubled Nd:YAG radiation in an active rubidium atomic resonance filter[J]. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(7): 384~386
- 9 R. I. Billmers, S. K. Gayen, M. F. Squicciarini *et al.*. Experimental demonstration of an excited-state Faraday filter operating at 532 nm[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(1): 106~108
- 10 Eric Korevaar, John Schuster, Prasanna Adhikari *et al.*. Description of STRV-2 lasercom flight hardware[C]. *SPIE*, 1997, **2990**(60): 38~49
- 11 Cheng Xuewu, Li Faquan, Lin Zhaoxiang *et al.*. Properties and applications of Faraday anomalous dispersion optical filter[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2003, **1**(1): 41~43  
程学武, 李发泉, 林兆祥 等. 法拉第原子滤光器的特性及应用[J]. 光学与光电技术, 2003, **1**(1): 41~43
- 12 Li Faquan, Wang Yuping, Cheng Xuewu *et al.*. Faraday anomalous dispersion optical filter atomic frequency-stabilized semiconductor laser through optical feedback [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(10): 1317~1320  
李发泉, 王玉平, 程学武 等. 半导体激光器的原子法拉第反常色散光学滤波器光反馈稳频[J]. 中国激光, 2005, **32**(10): 1317~1320
- 13 Cheng Xuewu, Gong Shunsheng, Li Faquan *et al.*. 24 h continuous observation of sodium layer over Wuhan by lidar[J]. *Sci. China G*, 2007, **50**(3): 287~293
- 14 H. Chen, M. A. White, David A. Krueger *et al.*. Daytime mesopause temperature measurements with a sodium-vapor dispersive Faraday filter in a lidar receiver[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(15): 1903~1905
- 15 Gong Shunsheng, Li Faquan, Cheng Xuewu *et al.*. Laser Doppler Velocimetry for Frequency Discrimination and Stabilization using Atomic Faraday Effect[P]. Invention Patented, CN02154135.3, 2003  
龚顺生, 李发泉, 程学武 等. 原子法拉第效应鉴频和稳频的激光多普勒测速仪[P]. 发明专利CN02154135.3, 2003
- 16 Wentao Huang, Xinzhaohu, B. P. Williams *et al.*. Na double-edge magneto-optic filter for Na lidar profiling of wind and temperature in the lower atmosphere[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(2): 199~201
- 17 K. Schorstein, G. Scheich, A. Popescu *et al.*. A fiber amplifier and an ESFADOF: developments for a transceiver in a Brillouin lidar[J]. *Laser Phys.*, 2007, **17**(7): 975~982
- 18 A. Cacciani, S. M. Jefferies, W. Finsterle *et al.*. Mapping the sound speed structure of the sun's atmosphere[J]. *Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplement*, 2003, **2**: 190~194