

研究。可以预料今后几年中,光悬浮将会得到更多的应用。

### 参 考 文 献

- [1] A. Ashkin, *Science*, **210** (1980), 1081.  
[2] A. Ashkin, *Sci. Am.*, **226** (1972), 63.  
[3] A. Ashkin, *Phys. Rev. Lett.*, **24** (1970), 156.  
[4] A. Ashkin and J. M. Dziedzic, *Appl. Phys. Lett.*, **19** (1971), 283.  
[5] A. Ashkin, *Biophys. J.*, **61** (1992), 569.  
[6] W. H. Wright, G. J. Sonek, and M. W. Berns, *Appl. Opt.*, **33** (1994), 1735.  
[7] A. Ashkin and J. M. Dziedzic, *Appl. Phys. Lett.*, **26** (1976), 333.  
[8] A. Ashkin and J. M. Dziedzic, *Appl. Phys. Lett.*, **24** (1974), 586.  
[9] A. Ashkin, J.M. Dziedzic, *Appl. Opt.*, **19**(1980), 660.  
[10] G. Roosen, *Can. J. Phys.*, **57** (1979), 1260.  
[11] A. Ashkin, J. M. Dziedzic, J. E. Bjorkholm et al., *Opt. Lett.*, **11** (1986), 288.  
[12] C. D'hehon, E. W. Dearden, H. Rubinsztein-dunlop et al., *J. Modern Optics*, **41**(1994), 595.  
[13] S. Sato, M. Ohyumi, H. Shibata et al., *Opt. Lett.*, **16** (1991), 282  
[14] Cheng Bingying, Hu Wei, Yang Junhui et al., *Acta Physica Sinica*, **3** (1994), 861.  
[15] 张道中, *物理*, **23-3**(1994), 141.  
[16] A. Ashkin, J. M. Dziedzic, *Science*, **235** (1987), 1517. A. Ashkin, J. M. Dziedzic, and T. M. Yamane, *Nature*, **330** (1987), 769.  
[17] T. N. Buican, M. J. Smith, H. A. Crissman et al., *Appl. Opt.*, **26** (1987), 5311.  
[18] R. Steubing, S. Cheng, W. H. Wright et al., *Cytometry*, **12** (1991), 505.  
[19] H. Liang, W. H. Wright, S. Cheng et al., *Exp. Cell Res.*, **204** (1993), 110.  
[20] M. Block, L. S. B. Goldstein, and B. J. Schanapp, *Nature*, **348** (1990), 348; A. Ashkin, K. Schultze, J.M. Dziedzic et al., *Nature*, **348**(1990), 346.

## 新型原子滤光器<sup>1)</sup>

孙献平 汪盛烈 曾锡之

(中国科学院武汉物理研究所波谱与原子分子物理国家重点实验室, 武汉 430071)

**摘要** 原子滤光器是基于原子的吸收、发射和内部能量转换的物理过程的一种量子滤光器件。与干涉滤光片(包括薄膜的、偏振的等)和双折射滤光片相比,原子滤光器具有大的接收角、更窄的带宽和更高的滤光效率等特点。文章简要介绍了近年来新型原子滤光器研究的新进展和它们的应用,以及一些原子滤光方案和物理特性的研究。

**关键词** 原子共振滤光器, 电离检测器, 法拉第反常色散

新型原子滤光器是一种理想的用于强的、连续本底光中探测微弱激光或者荧光信号的量子滤光器件。它可在紫外、可见和近红外光谱范围的许多分立的波长下工作。改变电场、磁场,或者使用一些特殊技术后,工作波长可调。它的优点来自于原子跃迁的窄线宽。在高光谱分辨激光雷达系统中,使用钡原子滤光器,利用原子蒸汽吸收系数、谱线线宽与温度的关系,能够远距离、高灵敏度地测量大气温度等多种大气参数,其高空气温测量的精度为 1K<sup>[1]</sup>;在激光对潜通信的演示中,已经成功地实现了机载氯化氙准分子激光器 308nm 波长激光经铅蒸

汽拉曼散射频移与 459nm 铯原子共振滤光器匹配,潜艇载倍频紫翠宝石激光器输出激光经氢池拉曼频移得到 455nm 波长激光,也实现了与飞机上铯原子共振滤光器(6S<sub>1/2</sub> → 7P<sub>3/2</sub>)的匹配。原子滤光器的应用,改善了信噪比,大大地加深了对潜通信的深度,使得卫星激光对潜通信方案成为可能<sup>[2]</sup>。由于原子滤光器在红外探测、遥感、激光雷达和空间激光通信等方面具有重要的和广泛的应用前景,因此,它的研究和发 展一直受到人们重视。

1) 1994年6月3日收到初稿,1995年3月22日收到修改稿。

## 1 荧光型原子共振滤光器 (ARF)

这种原子滤光器是根据原子内部能量转换,以探测转移辐射荧光方式来检测窄带微弱信号光的,称为荧光型 ARF (atomic resonance filter)。它具有超高 $Q$ 值( $10^5-10^6$ )、极窄带宽( $\sim 0.001\text{nm}$ )和 $180^\circ$ 的接收角等特点。它的研究和发展开始于70年代末期,随后在许多重要领域得到应用。对此,Gelbwacuhs 已经给出了评述<sup>[3]</sup>。荧光型 ARF 可以分为被动式和主动式。在被动式器件里,对于信号光的吸收发生在原子的基态能级,这样,实际可使用的器件的波长就受到限制。扩展器件的波长数目,能够通过研究和发展主动式 ARF 来实现。在主动式器件里,信号光的吸收是在原子的激发态。

工作在海水窗口(蓝绿光谱区)的铯原子滤光器是荧光型被动式 ARF 的一个典型例子,如图1所示。Marling 等人<sup>[4]</sup>在1978年用实验演示了铯 ARF,并建议将它应用于激光水下通信。铯 ARF 由红光截止带通滤光片、铯蒸汽泡和蓝光截止带通滤光片组成,输入和输出带通滤光片的光谱通带不重叠,工作在 $\sim 100^\circ\text{C}$ 的铯蒸汽吸收载有信息的455nm 或者459nm 信号激光后,铯原子从基态能级跃迁到7P能级,随后,7P态铯原子经由两条路线(7P $\rightarrow$ 7S $\rightarrow$ 6P和7P $\rightarrow$ 5D $\rightarrow$ 6P)衰减到6P能级,最后,由光电接收器接收载有原入射光信息的铯原子转换辐射的近红外852nm (6P $_{3/2} \rightarrow$ 6S $_{1/2}$ )和894nm (6P $_{1/2} \rightarrow$ 6S $_{1/2}$ )荧光。而与信号光同时照射在铯 ARF 上的太阳光,其中的能引起铯原子从6S $_{1/2} \rightarrow$ 7P态的波长,只是整个太阳光强中的极微弱部分。在原子吸收的极窄线宽里,信号光远远强于太阳光。因此,ARF 大大地抑制了强的背景太阳光。ARF 特性由铯原子本身决定。由于“自陷”(trapping)效应,理论上的铯 ARF 内部转换效应为 $\sim 100\%$ 。在纯铯蒸汽样品时,它的带宽典型地由原子吸收的多普勒宽度确定。ARF 的时间响应通常是

由应用于波长转换的原子能级的辐射寿命确定。在荧光型被动式铯 ARF 中,由与7P激发态到基态的两个级联辐射路程有关的爱因斯坦 $A$ 常数的计算,可以得到铯 ARF 响应时间为 $\sim 300\text{ns}$ ,即3.3MHz的通信带宽。由于非辐射衰减的影响和852nm 红外光子的辐射自陷,等效地延长了6P态的能级寿命,即响应时间变慢。在铯样品室中充入选定的缓冲气体和合适的气体压力,可以获得 FWHM (full widths at half maximum) 与激光脉冲宽度相当的6P $\rightarrow$ 6S 荧光时间分辨谱<sup>[5]</sup>,即通信重复速率被提高。实验的最小可探测激光功率小于40nW。

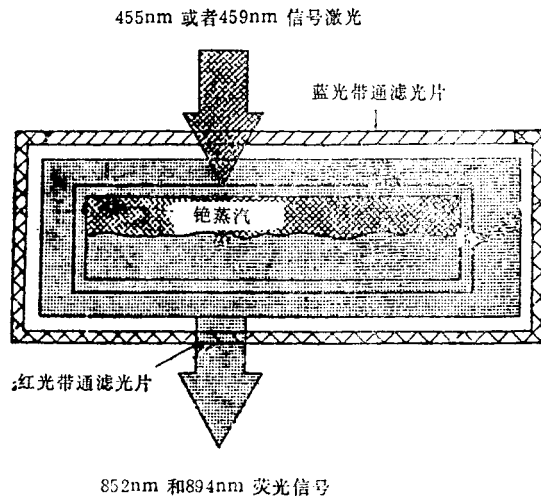


图1 荧光型被动式铯原子共振滤光器<sup>[4]</sup>

被动式铷420nm ARF和421nm ARF分别适合于倍频铷-YLF ( $E_1-B_2$ 跃迁)和( $E_1-B_3$ 跃迁)激光器。而被动式铯460nm ARF和钙422nm ARF则是探测吸收了信号光的原子与惰性气体原子碰撞转移集居到亚稳态后辐射的荧光。转换效率分别为45%和50%。

主动式铷 ARF 是荧光型主动式 ARF 的例子。这种滤光器是由激光抽运而产生在5P能级的粒子数稳态集居,铷蒸汽吸收信号光子后从5P能级跃迁到高激发态S或者D能级,然后,激发态铷原子辐射弛豫到 $nP$ 态( $n=6-11$ )。随后按照它的分支几率衰减到基态,大部

分发射光子的波长落在 420nm ( $6P \rightarrow 5S$ ) 到 311nm ( $11P \rightarrow 5S$ ) 的波长范围里。约有 20 余条从  $5P$  能级到高激发态  $S$  或者  $D$  能级的跃迁可以做成荧光型主动式 ARF 器件。这里, 工作波长为 532nm ( $5P_{1/2} \rightarrow 10S_{1/2}$ ) 的铷 ARF 是一个令人非常感兴趣的原子滤光器。因为这个跃迁位于倍频 Nd:YAG 激光器激光波长。两者的匹配是激光对潜通信的另一选择方案。1990 年, Monica Minden 等人第一次进行了荧光型主动式铷 ARF 直接接收转换固体倍频 Nd:YAG 激光器 532nm 激光信号光的实验<sup>[6]</sup>。半导体激光器作为泵浦源, 倍频 Nd:YAG 激光器 532nm 激光为信号光, 探测  $nP \rightarrow 5S_{1/2}$  ( $n=7, 8, 9$ ) 辐射荧光。实验时将 YAG 棒加热到 102°C, 依靠温度频移 Nd:YAG 激光波长, 再由 KD\*P 晶体倍频输出匹配于铷  $5P_{1/2} \rightarrow 10S_{1/2}$  共振谱线波长的激光。由于使用的是脉冲倍频 Nd:YAG 激光器 532nm 激光信号光, 实际上是模拟了潜通信激光通信。Shay 等人对铷 ARF 的理论计算表明<sup>[7]</sup>: 要求的泵浦激光功率大于  $3.6\text{mW}/\text{cm}^2$ ; 在考虑到 532nm 光子“自陷”效应情况下, 由铷原子  $10S_{1/2}$  能级辐射寿命确定铷 ARF 响应时间为  $\sim 47\text{ns}$ , 量子转换效率为 28%。

在荧光型主动式铯 ARF 中, 由光谱灯泵浦集居  $6^2P_{3/2}$  亚稳态, 信号光是倍频 Nd:BEL 的 535nm 激光, 输出 377nm 荧光, 转换效率为  $\sim 50\%$ 。工作波长位于太阳光 Fraunhofer 暗线区的镁 ARF, 对于太阳光本底噪声抑制能力可提高  $\sim 10$  倍<sup>[3]</sup>。主动式钙 ARF 也工作在 Fraunhofer 区, 并且能够与倍频半导体激光器 422 nm 波长匹配。对于钠 ARF, 是利用钠蒸汽将 IR 信号光转换为可见光输出, 实现高灵敏度 IR 检测, 等效噪声功率比常规方法减小 3—6 个数量级。并且, 其 Stark 调谐特性优于可见光 ARF。

一个理想的 ARF 特性为<sup>[3]</sup>: (1)信号光的完全吸收;(2)信号光到输出波长辐射具有高的内部转换效率;(3)在选择的 ARF 输出波长范围内, 光电接收器具有高的量子效率;(4)快的

响应时间;(5)低的噪声轮廓;(6)小的本底噪声通道;(7)窄的光谱线宽;(8)高的信噪比。另外, 还需要有工作波长与之匹配的合适激光器。

## 2 电离检测的原子滤光器

这种原子滤光器由于其工作特点, 结构上与检测信号的电子倍增器合为一体, 也称为原子滤光器/电离检测器 (atomic filter/ionization detector)。它与荧光型 ARF 的不同点是将信号光通过原子内部转换为电离信号输出。电离信号由光电离或者场电离产生。选择不同的原子蒸汽可以获得不同的工作波长。Tatsuo Okada 等人于 1989 年报道了光电离原子滤光器的实验结果<sup>[8]</sup>。他们使用钠原子选择激光双光子电离。密度为  $\sim 10^7\text{cm}^{-3}$  的钠原子束吸收 589nm 信号激光后从  $3S \rightarrow 3P$  态, 随后被抽运激光电离, 由电子倍增器探测光电离信号。实验得到这种原子滤光器的最小可探测信号光为  $\sim 10\text{pj}$  ( $\sim 3 \times 10^7$  光子), 并且当产生电离的激光功率为  $10\text{MW}/\text{cm}^2$  时, 钠  $3P$  能级的电离效率  $\sim 18\%$ 。从理论上讲, 在一个窄的探测带宽里, 它具有  $\sim 100\%$  的量子效率。这种滤光器可在 XUV  $\rightarrow$  IR 光谱范围里使用, 特别是在 VUV 和 XUV 范围内, 目前还没有其他合适的窄带滤光器。光电离原子滤光器具有快的响应时间 (ms, ns, 甚至 ps 量级), 这取决于所选择原子的寿命。然而, 在直接选择激光电离方式中, 对于快跃迁率, 显然要求相对强的信号光, 并且由此附带产生双光子电离噪声。而场电离方式, 在这方面具有更明显的优点。Tatsuo Okada 等人也给出了场电离检测的钠 589nm 原子滤光器方案和相应的理论分析。1990 年, Bloom 等人报道了第一个场电离检测的原子滤光器的实验结果<sup>[9]</sup>。他们使用一台 8mW 的 780 nm 稳频激光器激发蒸汽泡里的基态铷原子到  $5P_{3/2}$  态, 接着, 由氯化氙激光器泵浦的脉冲染料激光器, 激发  $5P_{3/2}$  态铷原子到半离散的 Stark 频移 Rydberg 能级, 外加电场在 1ns 时

间里产生场电离。然后,由电子倍增器探测离子/电子。他们的实验获得:场电离检测的原子滤光器具有快的响应时间(小于10ns)和高的量子效率(大于25%)。在那里,通过光抽运,场电离 Stark 频移的 Rydberg 态的电离截面与直接从  $5P_{3/2}$  态电离相比有显著增强。对于适合于激光雷达应用的器件,可以通过使用一个1KW 峰值功率和宽脉冲染料激光器作为抽运源 ( $1\text{mJ}/\mu\text{s}$ ) 来实现。电离检测的原子滤光器如图2所示,其研制者已在1991年申请了专利<sup>[10]</sup>。

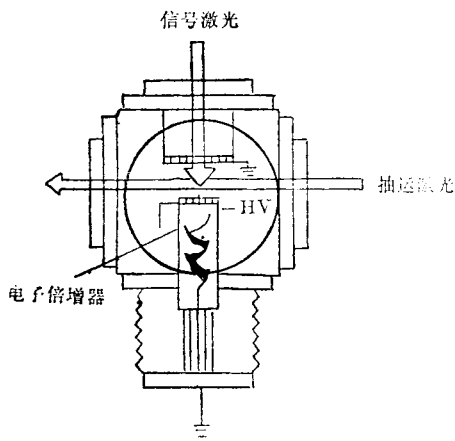


图2 场电离检测的原子滤光器<sup>[10]</sup>

参考文献[11]和[12]给出了使用铯原子束装置的选择激光电离和电场电离检测的原子滤光方案。在电场电离检测实验中,分别使用了直流电场电离和脉冲电场电离两种方式。脉冲的455nm 或者459nm 信号激光激发基态铯原子到  $7P$  态,然后再由脉冲的  $1.06\mu\text{m}$  激光激发。在直流电场方式中, $7P$  态铯原子集居到高 Stark 频移 Rydberg 态;在脉冲电场方式中, $7P$  态铯原子被激发选择集居到相应的高共振态。然后,电场电离产生电子或者离子。实验得到电场电离检测的原子滤光器响应时间为  $\sim 120\text{ns}$ (这里包括实验条件的影响),最小可探测光强为  $\sim 10\text{nJ}$ 。理论分析给出了这种滤光器的量子效率接近100%。在上述原子束方法研究的基础上,制作的蒸汽泡型电离检测的铯原子滤光器响应时间为  $\sim 50\text{ns}$ ,接近于理论分析

给出的小于10ns 的响应时间。由于方案中选择了能与现有激光器相匹配的铯原子谱线,而且,滤光器物理参数具有好的理论期望值,所以,用电场电离检测的铯原子滤光器显然具有实用意义。

### 3 法拉第反常色散原子滤光器

使用原子蒸汽作为工作介质的法拉第滤光器早已应用于<sup>[13]</sup>高速光调制,染料激光器频率锁定,太阳光钠D谱线的观测,安全光通信中作信号调制和解调器等方面。

法拉第反常色散原子滤光器 (faraday anomalous dispersion optical filter, 缩写为 FADOF) 由原子蒸汽泡加纵向磁场和位于蒸汽泡两边的两片偏振方向相互垂直的偏振片组成。其工作原理是利用磁场中原子共振线附近的反常色散特性,使得沿着纵向磁场方向的人射信号激光或者荧光偏振面发生偏转,在极窄原子线宽通带内产生高透射,而在通带外则对强的本底噪声产生高抑制。这种原子滤光器具有传输效率高(传输系数  $\sim 100\%$ ),响应时间快(仅由滤光器带宽确定,典型的为  $\sim \text{ns}$ ),  $\pm 45^\circ$  的大接收角,工作频率和带宽在一定范围内可调谐等特点。图3是 FADOF 原理图。其最大传输(在  $\pi/2$  转动角)时的频率由原子数密度  $N$ 、磁场强度  $H$  和蒸汽泡长度  $L$  给出。

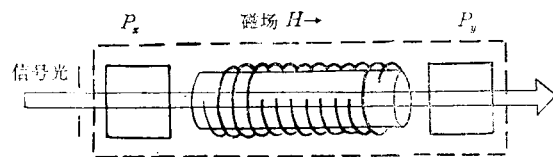


图3 法拉第反常色散原子滤光器原理图<sup>[13]</sup>  
( $P_x$  和  $P_y$  是偏振方向相互垂直的偏振片)

1982年, Yeh<sup>[14]</sup> 在考虑精细结构条件下给出了铯459nm 反常色散谱的理论计算。Menders 等人<sup>[13]</sup>1991年报道了0.02T 以下磁场中铯原子459nm FADOF 的参数和谱图的实验观测与理论计算。以后,他们的铯 FADOF 被

用于半导体激光器频率的锁定和调谐。参考文献[i5]报道了在25—170℃温度和0.005—0.3T磁场里铯原子D<sub>2</sub>线FADOF参数的理论计算。1991年, Shay等人<sup>[16]</sup>给出了考虑超精细结构的弱磁场条件下铯FADOF透射谱的理论分析。Dick等人<sup>[17]</sup>1991年使用780nm半导体激光器进行0.0047T磁场下的铷FADOF, 测量了铷D<sub>2</sub>线的超精细结构法拉第反常色散谱, 获得了1GHz的带通、63%的传输率和10<sup>5</sup>抑制比。参考文献[18]和[19]从实验上和从考虑超精细结构时的理论上研究了铷原子780nm FADOF, 在70—110℃原子蒸汽泡温度范围和低于0.17T磁场范围内, 获得一些参数及其与磁场和温度的关系, FADOF的透过率为~30% (包括光学镜片、炉子和蒸汽泡玻璃窗片等光损耗); 温度80℃时, 磁场对FADOF边峰的调谐能力为~80GHz/T; 边峰线宽的改变量为~60GHz/T。

另外, Chen等人<sup>[20]</sup>从理论和实验上研究了工作在共振谱线中心的钠色散法拉第滤光器。在0.175T磁场条件下, 获得最大传输率为85%, 0.002nm(1.9GHz)的FWHM, 本底传输为2×10<sup>-5</sup>。这个原子滤光器用于高光谱分辨钠荧光激光雷达, 能够全天候地探测高空大气钠温度。

设计一种具有特定用途的原子滤光器时, 除了要对原子滤光方案的选取、原子系统的选择和物理特性进行考虑外, 还要重视蒸汽泡的几何结构、光学的合理设计、探测器特性和选择匹配波长的合适激光器等。这里限于篇幅而没有介绍的其它滤光方案, 例如可调谐窄带烧孔滤光器、双蒸汽泡(串联或者并联)结构的原子

滤光器<sup>[13,14]</sup>等。另外, 这里的滤光器方案, 可以选择合适的分子(如碘分子等)作为工作物质, 因为分子具有更多可选择的谱线用以制作合适的滤光器, 当然, 这里需要使分子滤光器的噪声通道减至到最少。

## 参 考 文 献

- [1] H. Shimizu, S. A. Lee and C. Y. She, *Appl. Opt.*, **22** (1983), 1373.
- [2] Floyd C. Painter, *Defense Electronics*, **21-6** (1989), 82.
- [3] J.A. Gelbwachs, *IEEE J. Quantum Electron.*, **24** (1988), 1266.
- [4] J. B. Marling, J. Nilsen, L. C. West et al., *J. Appl. Phys.*, **50** (1979), 610.
- [5] Xianping Sun, Xizhi Zeng, Aiqiu Chen et al., *Opt. Comm.*, **111** (1994), 259.
- [6] Monica Minden and Hans Bruesselbach, *Opt. Lett.*, **15** (1990), 384.
- [7] T. M. Shay and Yun C. Chang, *Opt. Lett.*, **13** (1988), 443.
- [8] T. Okada, H. Andou, Y. Moriyama et al., *Opt. Lett.*, **14** (1989), 987.
- [9] S. H. Bloom, Eric Korevaar, M. Rivers et al., *Opt. Lett.*, **15** (1990), 294.
- [10] J. Curen, *Laser Abstract*, **27** (1991), 810.
- [11] 汪盛烈、孙献平、曾锡之等, 中国激光, **A21** (1994), 257.
- [12] 汪盛烈、孙献平、陈暖球等, 激光技术, **18**(1994), 352.
- [13] J. Menders, K. Benson, S. H. Bloom et al., *Opt. Lett.*, **16** (1991), 846.
- [14] P. Yeh, *Appl. Opt.*, **21** (1982), 2069.
- [15] 胡志林、孙献平、曾锡之等, 光谱学与光谱分析, **14** (1994), 21.
- [16] D. J. Dick and T. M. Shay, *Opt. Lett.*, **16** (1991), 867.
- [17] T. M. Shay, *Opt. Lett.*, **16** (1991), 1617.
- [18] Zhilin Hu, Xianping Sun, Xizhi Zeng et al., *Opt. Comm.*, **101** (1993), 175.
- [19] 彭玉峰、汤俊雄、王庆吉等, 光学学报, **13**(1993), 420.
- [20] H. Chen, C.Y. She, P. Searcy et al., *Opt. Lett.*, **18** (1993), 1019.