

超窄带光学滤波器

掌蕴东 袁 萍 毕 勇 常志文 马祖光

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 哈尔滨, 150001)

摘要: 叙述了超窄带光学滤波器的基本原理, 总结了目前超窄带光学滤波器的发展现状, 指出这两种光学滤波器的不足, 并提出今后的发展前景。

关键词: 原子共振滤波器 Faraday 反常色散光学滤波器 信噪比

Ultranarrow-band optical filter

Zhang Yundong, Yuan Ping, Bi Yong, Chang Zhiwen, Ma Zuguang

(Institute of Opto-Electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001)

Abstract: The fundamental principles of ultranarrow-band optical filters were described in the paper. The development of optical filters was summarized at present. Meanwhile, the shortages of the both of optical filters were indicated.

Key words: atomic resonance filter Faraday anomalous dispersion optical filter signal noise ratio

引 言

太阳宽带连续背景下接收窄带微弱光信号是一个非常棘手的问题。背景光的噪声干扰给接收信号带来很大困难, 如何改善系统的信噪比对提高接收灵敏度, 降低发射激光的峰值功率要求, 甚至对整个系统能否实现应用确是至关重要的。

通常使用的干涉滤光片, 其带宽难以做得很窄, 同时还要保证一定的透过率和大的接收视角, 因而对线宽很窄的激光信号来说, 干涉滤光片已无法胜任。70 年代末期开始发展了原子共振光学滤波器(atomic resonance filter 简称为 ARF)技术^[1,2], 90 年代初开始了 Faraday 反常色散光学滤波器(Faraday anomalous dispersion optical filter 简称为 FADOF)研究^[3,4]。

1 原子共振滤波及发展现状

原子共振滤波是利用窄的原子共振跃迁来进行信号光的超窄带(0.001nm)滤波^[5], 它具有超高 Q 值($10^5 \sim 10^6$), 各向同性, 接收角接近 $\pm 1/2$, 内部量子转换效率较高, 其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, 其工作波长可以由近紫外, 可见光, 到近红外。一个典型的利用 ARF 进行通讯的激光系统如图 1 所示。

在原子共振滤波器内部, 原子蒸气对信号的吸收, 经过弛豫, 辐射出不同于入射光的荧光物理过程, 如图 2 所示, 下标“i”, “o”和“p”分别代表输入、输出和泵浦参数。

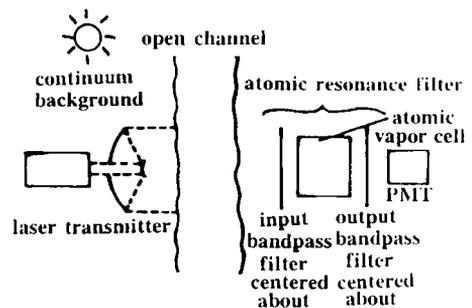


图 1 在连续背景条件下利用 ARF 通讯的激光系统

原子共振滤波器工作方式,可以被动或主动,在被动模式中,信号光的吸收产生于基态,则能够选择的被动式滤波器的工作波长受到了限制,在主动模式中,信号吸收跃迁可以从激发态开始,这一激发态可以是亚稳态,这样可选择的主动式滤波器的工作波长可以丰富得多。

原子共振滤波器的内部转换效率,根据典型原子能级图

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

a 是两项乘积,第一项用 c 来表示能级 2 上的原子数级联跃迁到能级 3 上的原子数之比,第二项是与 3 4 辐射衰减相关的相对于能级 3 总衰减之比,这后一项由下式决定

$$A_{34} / (1/\tau_{3r} + K_{3Q}) \quad (2)$$

式中, A_{34} 是 3 4 跃迁的 Einstein 系数, τ_{3r} 是能级 3 的辐射寿命, K_{3Q} 是考虑这一能级可能的非辐射淬灭。在不存在淬灭情况下,这个比值简化为分支比 β_{34} , β_{34} 指从能级 3 跃迁到能级 4 的粒子数比例。即: $a = c [A_{34} / (1/\tau_{3r} + K_{3Q})]$ (3)

实际上,系统的转换效率还需将(3)式乘以一个由具体的样品池形状、镀膜情况等参数决定的几何搜集系数,它是反映光电接收器端的光子数与 ARF 以 λ_o 出射光子数之比的几何搜集效率,一个远小于 1 的系数。

原子共振滤波器的响应时间决定了它的最大信息传输速率^[5],而最大信息传输速率是激光通讯的主要参量。对原子共振滤波器来说,其响应时间的决定因素是原子系统的弛豫速率。对图 2 所示的系统,弛豫时间将是能级 2 级联到能级 3 所用时间加上能级 3 的衰减时间。最快的速率要求或者是级联过程非常快,或者是能级 2 和能级 3 在同一能级,后一种情况的响应时间由能级 3 的衰减时间所决定。对于一般的原子共振滤波器系统,响应时间接近毫微秒以上,就意味着信息速率在 1MHz,甚至更小。表 1 给出了已发表的 ARF 的工作波长。

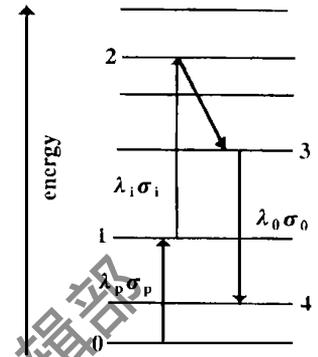


图2 ARF 中使用的典型原子能级图

表 1 已发表的 ARF 工作波长

原子	信号波长	输出波长	泵浦源	备注
Ca	422.7nm	272nm	半导体激光器	主动 Fraunhofer 暗线
	534.9nm	422.7nm	672nm	被动 ^[6,7]
	422.7nm	657.3nm	457.5nm	
Sr	460.7nm	689.3nm		被动 Fraunhofer 暗线 ^[8]
Cs	456nm, 459nm	852nm, 894nm		被动 ^[2]
Rb	487nm ~ 776nm 尤其倍频	311nm ~ 420nm	半导体激光器 780nm, 795nm	主动 ^[2,9,10]
	Nd: YAG 532nm			
Mg	516nm, 517nm, 518nm	383nm	光泵	主动 Fraunhofer 暗线 ^[11]
Tl	535nm	378nm	光化学或碰撞能量转移	重叠在倍频 Nd:BEL ^[12]
Na	1.48μm, 2.34μm, 3.42μm	489nm, 569nm, 616nm	光泵	第一台 ARF ^[1] 主动
K	10.6μm	497nm	光泵 310nm	可调谐 ^[2,13,14]

原子共振滤波器的原理最初是由 N. Bloembergen 于 1957 年提出,当时仅仅做为一般概念性研究,当时称它为量子计数器^[15]。直到 1977 年 J. A. Gelbwachs 等人做出了第一台用于红外谱段检测的 Na-ARF^[11],1978 年 J. B. Marling 等人给出了 K-ARF, Cs-ARF, Rb-ARF 的方案,同时提出可见光范围内的被动与主动滤波器概念,并指出这一类 ARF 可用于水下通讯^[2],1979 年 J. A. Gelbwachs 等人做出了可调谐的与 CO₂ 激光器相匹配的红外波段 K-ARF^[11],80 年代中期, T. M. Shay 等人做出了可望与倍频 Nd:YAG 激光器相匹配的 Rb-ARF^[2,9,10],同时 C. S. Liu 等做出了 Ti-ARF,目的是与倍频 Nd:BEL 激光器相匹配^[12],1990 年 J. A. Gelbwachs 于 2 月和 9 月分别提出了两种 Ca-ARF 方案^[6,7],还有其它一些应用研究^[16]。

国内北京大学和哈工大^[17]首先开展了 Cs-ARF 的合作研究,他们对 Cs-ARF 的荧光过程进行了较深入的探讨,哈工大又进行了缓冲气体对 Cs-ARF 的滤光效果,响应时间等方面的研究^[18~20],北京大学、上海光机所等单位先后开展了 Cs-ARF^[21], Rb-ARF 的研究,得到了一些很有意义的结果。直到 1992 年 J. A. Gelbwachs 也仍有一部分工作继续通过加缓冲气体来缩短 Ca, Mg 和 Sr-ARF 响应时间的研究^[22]。其中 Gelbwachs 小组在 Ca-ARF 和 Sr-ARF 方案一些工作上,提出了利用太阳的 Fraunhofer 暗线工作的 Ca422.7nm-ARF 和 Sr460.7nm-ARF^[6~8],这无疑会有利于太阳光的背景衰减,提高接收信噪比。

然而,尽管上述各种 ARF 方案各有其特色,但如前所述,做为激光通讯应用的光学滤波器,ARF 尚存在一些缺欠和困难。

(1) 由于原子共振滤波器是利用原子对信号光的吸收,转移(碰撞、辐射跃迁、无辐射跃迁等以及其它方式),辐射出新的波长再被接收,因此,受原子内部结构的影响,辐射通道的增加,量子转换效率很低(如 Cs-ARF,理论上最高的内部量子转换效率为 60%),系统效率(即所谓的透射率)远小于 50%。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,因而,它的量子转换效率无法达到很高。

(2) 同样,由于受原子内部结构的影响,它也会受到原子内部不同相关能级的寿命影响,能级寿命的限制,它的响应时间很长(如 Cs-ARF 的响应时间约为微秒量级,被动式 Ca-ARF 的响应时间约为毫秒量级),从而延长了系统的响应时间。响应时间过长则无法进行实时工作,对于高数据率通讯是非常不利的。

2 Faraday 反常色散滤波

由于原子共振滤波器具有以上的不足,90 年代初,人们开始利用 Faraday 反常色散机制作为滤波器的研究, Faraday 反常色散光学滤波机制是线偏振光沿着在磁场作用下变成光学各向异性的原子蒸气池传播时,发生了偏振旋转^[23],适当调节工作条件,就可以得到具有很窄带宽的最大透射。如图 3 所示。

由于 Faraday 反常色散光学滤波器不仅具有原子共振滤波器的优点,而且还具有(1)高透射率,(2)高的噪声衰减能力,(3)快响应,可实时工作,(4)是成像滤波器^[4]。因此,受到格外重视,同时也推动了对它的研究与发展。

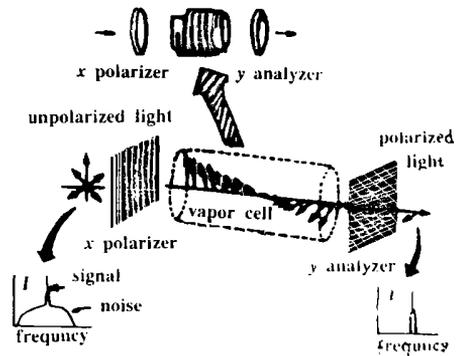


图 3 实际的 Faraday 反常色散光学滤波器的工作原理图

3 Faraday 反常色散光学滤波器的发展现状和存在的问题

Faraday 反常色散效应从光谱方面研究已有很长时间,国际上许多小组一直在从事光谱方面的研究。Faraday 反常色散效应做为超窄带滤波器研究,是 60 年代初期由美国国家标准局的 K. G. Kessler 等人首次用水银为介质,波长 253.7nm,当时,他们称之为 Zeeman 滤波器^[23],此后没有更多的进展。

由于 FADOF 具有高透射、快响应等特点,90 年代初利用 Faraday 反常色散机制滤光得到了迅速的发展。1991 年,美国新墨西哥州立大学电气和计算机工程系的 T. M. Shay 小组重新研究了 Faraday 反常色散效应用于光学滤波,首次提出了 Rb5s-5p 780nm 的 FADOF,同时, Thermo Electron Technologies 公司的 J. Menders 等研究人员提出 Cs-852nm 的 FADOF,他们的文章同时发表在“Optics Letters”的同一期上,说明这一项研究是国际前沿性的工作,他们也给出了有关概念模型和实验演示。1992 年, J. Menders 等人又给出了弱磁场下 Cs Faraday 和 Voight 磁光滤波器^[25], Colorado 州立大学的 H. Chen 提出了强场条件下 Na-FADOF 的实验演示^[26~29],其研究不仅仅具有学术意义,而且呈现出线芯工作,呈现出高透射,快响应,高信噪比等优良性能,这就为实用化打下了一个良好的基础,后来发展成能够在白天正常工作性质优良的超窄带滤波器,达到实用程度^[30]; Yat Ching 和 J. A. Gelbwachs 于 1993 年,做出了 Fraunhofer 暗线的 Ca-422.7nm 磁光滤波器,这一蓝紫色波长尽管对水下通讯并不太合适,但对它的研究意义显然在于它处于 Fraunhofer 暗线,对于消除太阳背景,提高系统的接收信噪比是非常有利的。J. A. Gelbwachs 等人又提出了波长更靠近水下窗口的 Sr 460.7nm 磁光滤波器^[31]。

国内,1991 年北京陈怀林、王庆吉小组做出了 Rb-780nm 的 FADOF 透射谱^[32,33],这是国内首先开展的这方面研究。1992 年哈尔滨工业大学光电子技术研究所开始了 Cs-FADOF 的理论与实验研究,1994 年中科院武汉物理所的胡志林等人发表了 Cs 459nm FADOF 的特性分析^[34],对 Cs 459nm FADOF 精细结构体系进行了理论计算,北京大学汤俊雄^[35]等人继续在 Rb 的高激发态上做 FADOF 研究。表 2 总结了目前窄带滤波器的发展现状和特点。

表 2 目前一些窄带光学滤波器的性能

	干涉滤光器	双折射滤光器	ARF	FADOF
透过率	0.5	0.2	0.1~0.5	>0.8
噪声衰减因子	20~30 dB	35 dB	40~60 dB	50~60 dB
视场角	$\pm 2.5^\circ \sim 30^\circ$	$\pm 30^\circ$	$\pm 90^\circ$	$\pm 90^\circ$
带宽(nm)	0.2	0.33	0.01~0.001	0.001~0.005
响应时间(ns)	0.00004~0.0004	500	10~10000	0.2~1
成像	可以	可以	不可以	可以
调谐	不可以	可以	可以	困难

尽管 FADOF 具备许多方面的优点,但是做为一种性能优良的光学滤波器,还存在着调谐范围小的不足,希望在滤波机制上能够有所改进,以适应激光通讯中不同场合的需求。哈尔滨工业大学光电子技术研究所在这方面做了一定的尝试,虽然目前其调谐的范围很小,但毕竟已观察到调谐谱^[36]。如果进一步改进实验条件,增大它的调谐范围,无疑会推动这一方面的研究,取得更好的结果。

4 结 论

作者论述了超窄带光学滤波器的基本原理,总结了当前这些滤波器的国内外发展现状,以及这两种超窄带光学滤波器的不足,提出了进一步的发展前景。

参 考 文 献

- 1 Gelbwachs J A, Klein C F, Wessel J E. IEEE J Q E, 1978; QE14: 77 ~ 79
- 2 Marling B, Nilson J, West L C *et al.* J A P, 1979; 50: 610 ~ 614
- 3 Menders J, Benson K, Bloom S H *et al.* Opt Lett, 1991; 16(11): 846 ~ 848
- 4 Dick D J, Shay T M. Opt Lett, 1991; 16(11): 867 ~ 869
- 5 Gelbwachs J A. IEEE J Q E, 1988; QE24(7): 1266 ~ 1277
- 6 Gelbwachs J A. Opt Lett, 1990; 15(4): 236 ~ 238
- 7 Gelbwachs J A. Opt Lett, 1990; 15: 1165
- 8 Gelbwachs J A, Chang Y C. IEEE J Q E, 1992; 28: 2577 ~ 2581
- 9 Chang Y C, Shay T M. IEEE J Q E, 1988; QE24(5): 709
- 10 Shay T M, Chang Y C. Opt Lett, 1988; 13(6): 443
- 11 Chang Y C, Tabat M D, Gelbwachs J A. Opt Lett, 1989; 14: 722 ~ 724
- 12 Liu S, Chang P J, Chen C L. SPIE, 1986; 709: 132 ~ 138
- 13 Gelbwachs J A, Klein C F, Wessel J E. IEEE J Q E, 1980; QE16: 137
- 14 Shay T M. Ultrahigh Resolution K Laser-excited Optical Filter for Double Nd Lasers. LEOS '88 Proc. New York: IEEE, 1988: 243 ~ 245
- 15 Bloembergen N. Phys Rev Lett, 1959; 2: 84 ~ 85
- 16 Shimizu H, Lee S A, She C Y. Appl Opt, 1983; 22: 1373 ~ 1381
- 17 邓立群, 王庆吉, 郑乐民. 光学学报, 1991; 11(10): 896 ~ 900
- 18 吕志伟, 于俊华, 掌蕴东 *et al.* 中国激光, 1992; 19(9): 690 ~ 693
- 19 掌蕴东. 蓝绿激光探测及通讯系统中关键技术——原子共振滤光器的研究. 哈尔滨工业大学硕士研究生学位论文, 1991
- 20 Zhang Y D, Yu J H, Lu Zh W *et al.* SPIE, 1993; 1979: 779
- 21 辜红平, 楼祺洪, 霍芸生. 中国激光, 1991; 18(4): 298 ~ 302
- 22 Gelbwachs J A, Chang Y C. A Fast Response Time Atomic Filter at 423nm. Proc Laser '92. New York: IEEE, 1992: 824 ~ 828
- 23 Jenkins F A, White H E. Fundamentals of Optics. New York: Mc Graw-Hill Book Co., 1957: 599 ~ 601
- 24 Kessler K G, Schweitzer W G. J O S A, 1965; 55(3): 284 ~ 288
- 25 Mender J, Searcy P, Roff K *et al.* Opt Lett, 1992; 17: 1388 ~ 1390
- 26 Chen H, She C Y. Opt Lett, 1993; 18(12): 1019 ~ 1390
- 27 Alvarez J, Caldwell L M, Li W H *et al.* J Atmospheric and Oceanic Technology, 1990; 7: 876
- 28 Lehman F J, Lee S A, She C Y. Opt Lett, 1986; 11: 563
- 29 She C Y, Latifi H, Yu J R *et al.* Geophysical Research Letters, 1990; 17: 929 ~ 932
- 30 Chen H, White M A, Krueger D A *et al.* Opt Lett, 1996; 21(15): 1093 ~ 1095
- 31 Gelbwachs J A, Chang Y C. Passive and Magneto-Optic Atomic Filter at 422.7nm and 460.7nm. 15th. Inter. Conf. on lasers. Houston, Dec. 1992, TX, 7-10, New York: IEEE, 1992: 649 ~ 656
- 32 陈怀林, 彭玉峰, 汤俊雄 *et al.* 光学学报, 1992; 12(9): 841 ~ 845
- 33 彭玉峰, 汤俊雄, 王庆吉 *et al.* 光学学报, 1993; 13(5): 421 ~ 424
- 34 胡志林, 孙献平, 曾锡之 *et al.* 光谱学与光谱分析, 1994; 1: 21 ~ 24
- 35 Duan M H, Li Y M, Tang J X *et al.* Opt Commun, 1996; 127: 210 ~ 214
- 36 掌蕴东, 毕勇, 姜心 *et al.* 中国激光, 1996; 23(10): 959

作者简介: 掌蕴东, 男, 1957年3月出生。副教授。主要从事激光光谱, 尤其是高分辨率激光光谱、非线性光学等研究。目前从事超窄带光学滤波器研究。

收稿日期: 1998-12-07