

原子共振滤波器研究的发展

张 华 迎 春 于 俊 华

(哈尔滨工业大学光电子技术研究, 哈尔滨, 150001)

摘要: 介绍了原子共振滤波器的发展历史及研究进展情况, 并指出了原子共振滤波器的未来发展前景。

关键词: 原子共振滤波器 工作波长 通频带 内部光子转换效率 响应时间

Development for the atomic resonance filter

Zhang Hua, Ding Yingchun, Yu Junhua

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

Abstract: In this paper, we introduce the history and research state of atomic resonance filter and point out it's developing future.

Key words: atomic resonance filter operating wavelength filter passband internal photon conversion efficiency response time

引 言

在开放通道传送光信号的光传输与光接收系统中, 不可避免地面临在太阳的强宽带连续背景光下接收微弱窄带光信号问题。背景光的干扰给接收光信号带来很大的困难。滤除背景光的影响, 改善接收系统的信噪比对提高灵敏度, 降低发射激光的峰值功率要求, 扩大使用范围, 甚至对整个系统能否实现应用都是至关重要的。通常使用的薄膜干涉滤光片, 其带宽还难以做得很窄, 且随着带宽的变窄, 透过率和接收视角都明显变小, 还存在中心波长随温度漂移问题。因而, 对传输来的线宽非常窄的激光信号来说, 干涉滤光片已不能胜任。

- 3 Petithon A, Boquet L, Desart D. *Surface Coating and Technology*, 1991;49: 57
- 4 Zaplatynsky I. *Thin Solid Films*, 1982; 95: 275
- 5 Tsai P C, Tsai H L, Tu D C. *Materials Science and Engineering*, 1993; 165A: 167
- 6 Sivakumar R, Mordike B L. *Surface Engineering*, 1988; 4: 127
- 7 Lopez V, Escudero M L, Bello J M. *Materials Science and Engineering*, 1993; 172A: 189
- 8 Gravanis G, Tsetsekou A, Zambetakis Th *et al.* *Surface Coating and Technology*, 1991; 45: 245
- 9 Yang Y Zh, Liu Zh Y, Zhuang Y Zh. *Surface Coating and Technology*, 1997; 89: 97
- 10 Duley W W. *Laser processing and analysis of materials*. New York: Pleum Press, 1983: 130
- 11 Bass M. *Laser materials processing*. Amsterdam: North Holland, 1983: 83
- 12 捷米金科[苏], 马志春译. 高级耐火复合涂层. 北京: 冶金工业出版社, 1984: 36~ 38

作者简介: 杨元政, 男, 1966 年 10 月出生。博士, 副教授。目前主要从事等离子喷涂、激光强化等表面处理技术及纳米材料的制备与开发等科研工作。

70 年代末期开始研究发展了原子共振滤波器技术。原子共振滤波器(Atomic Resonance Filter, 简写成 ARF) 是一种超高 Q 值($10^5 \sim 10^6$) 的光学滤波器, 具有超窄带宽(0.001nm), 各向同性, 全视角接收(接收角接近 180°), 其中心波长对环境因素不敏感等特点。尤其适用于低能窄带辐射的检测。例如, 连续背景光(如太阳光)下微弱窄带(如激光信号)信号的检测。ARF 的工作波长可由近紫外、可见到近红外谱区。它的应用范围很广, 可用于水下通信, 激光雷达, 空间激光通信, 气象雷达, 卫星跟踪, 激光遥感与测绘, 火箭排烟与诊断, 燃烧研究等等。

1 原子共振滤波器的发展历史

ARF 是利用原子跃迁制造出的超窄带滤波装置。具有原子跃迁线(波长)的入射光子在共振线被含在蒸气炉中的原子吸收, 然后这些原子以另外波长重新辐射, 替代了入射波长中允许通过的发射光, 同时阻止了入射波长中的其它辐射。在 ARF 方案设计时, 应考虑原子的蒸气压问题, 即在较低的温度下, 该原子应具有较高的蒸气压, 因此, ARF 对原子和原子跃迁的选择是非常严格的, 到目前为止, 发表的所有 ARF 中的原子都是碱金属、碱土金属和铷。

原子共振滤波器的研究, 国外起步较早, 从 70 年代到现在, 已经对十几种 ARF 方案进行了研究, 取得了很大成就。ARF 也从单一波长发展到波长可调谐, 并且有了主动和被动之分。最早做出的是主动式 Na-ARF^[1], 是 1978 年由 Gelbwachs, J A 等人所做的用于红外谱段检测的, 当时还不叫原子共振滤波器, 而叫原子蒸气量子计数器。由 Bloembergen 提出在红外光子转换成容易探测的可见光子, 可见光子用光电倍增管探测。但是这种探测方法有很多缺点: (1) 对热背景的过分响应。(2) 由于 IR 吸收的小截面, 使得 IR 光子转换到可见光子效率很低。(3) 需要较高的泵浦强度。(4) 低的响应速率。为了克服这些缺点, Gelbwachs 等人用原子蒸气代替了以上的转换介质, 发现有很多的优点: (1) 原子蒸气跃迁截面很大。(2) 中等激光功率就可以达到饱和强度。(3) 可以快速响应(激发态寿命是 10^{-7} s)。尽管当时还没有马上意识到这种装置的广泛用途, 但为后来滤波器的发展提供了一个良好的开端。在随后的 10 年中, 由 Marling J B, Flusberg A 和 Huennnekens J 等人研究发表了近 10 种 ARF, 其中包括 K-ARF^[2], Rb-ARF^[2] 和 Cs-ARF^[3,4] 等, 但这时的研究处于初级阶段, 除了探测输出辐射以外, 主要研究信号光的吸收是否与吸收截面、接收角、噪声源、背景抛弃、响应时间等因素有关。总之, 1988 年以前, ARF 的研究只限于检验方案的可行性, 研究的不是非常明确的, 研究中所考虑的问题也都是片面的, 并没有对原子共振滤波器产生一个完整的概念, 也没有考虑一个比较理想的 ARF 应该有哪些性能参数。从 1988 年以后, ARF 的技术趋于成熟, 滤波器方案设计具有明确的目的性, 开始利用一些自然条件(工作波长选在夫琅和费暗线就是一个例子), 并能对影响滤波器性能的参数进行详细地定量地研究。从 1988 年到现在, Chung Y C, Chan Y C, Gelbwachs 等人又研究发表了 Rb-ARF^[5,6], Mg-ARF^[7], Ca-ARF^[8-10], Tl-ARF^[11] 和 Sr-ARF^[12] 等, 并对滤波器的重要性能指标如内部光子转换效率、响应时间、通频带进行了大量地、详细地、定量地研究, 为滤波器作成器件奠定了坚实的理论和实验基础。

国内有关蓝绿激光通信与探潜的研究起步较晚。像哈工大、北大、湖北中科院物理所等对 ARF 都进行了一定的研究, 并取得了一定的成果。哈工大和北大 1989 年合作研究了 Cs-ARF, 并取得了很好的实验结果。综上所述, 从 70 年代末到现在, 已经对十几种 ARF 方案进行了研究, 取得了很大成就, 其中比较有前途的主动式滤波器包括 Na, Tl, Rb, Mg, Ca, 被动式滤波器包括 Rb, Cs, Ca, Sr。

2 原子共振滤波器的最新进展状况

2.1 碱金属原子共振滤波器

从 ARF 的研究开始到现在,大多数 ARF 的介质都是利用碱金属原子蒸气,主要是由于碱金属原子在较低温度下蒸气的饱和蒸气压较高。在现有的 ARF 方案中,碱金属 ARF 是最多的,也是最早开始研究的。ARF 可分为主动式和被动式两种。主动式 ARF 需要动力源,通常是以光辐射的形式在两个不同的能级之间实现粒子数的转移,被动式原子共振滤波器不需要动力源,但操作波长非常受限。在碱金属 ARF 中,有主动式 Na -ARF、主动式和被动式 K -ARF,几种主动式和被动式 Cs -ARF 和 Rb -ARF。从目前研究来看,有两种主动式 Rb -ARF 是比较有前途的。第一种是工作波长在 572.6nm,可用 Ar^+ 激光泵浦环形染料激光来实现,而主动泵浦用半导体激光,半导体激光用于泵浦 ARF,代表有意义的技术发展,因为简单的、可信赖的、有效的半导体激光使得 ARF 可在实验室以外的环境中实现。第二种是工作波长在 532.4nm。这是一种有代表性的主动式 ARF,用宽带半导体激光器提供泵浦光,铷原子吸收倍频 Nd:YAG 激光器的 532.4nm 的信号光,并发出 420nm 的荧光辐射。这种滤波器的优点是:(1)无论泵浦光还是信号光都是可信赖的激光源。(2)铷原子的蒸气温度较低,大约在 100℃ 左右。(3)输出辐射在 UV 谱区,在该谱区可用大面积、低噪声、快速响应的商用光电倍增管探测。(4)利用辐射自陷可以减少激发铷原子蒸气的激光强度。这种滤波器的缺点是:(1)转换效率低,因为辐射输出经过两步衰减,第一步衰减到 6p 态,分支速率是 21%,第二步从 6p 衰减到 6s,分支速率是 33%,所以,总的内部光子转换效率是 70%。(2)由于精细和超精细分裂,有两个 $5p_{1/2}$ 组分和 4 个 $5p_{3/2}$ 组分,这样, Rb -ARF 就有两个背景通道。

2.2 碱土金属和铷原子共振滤波器

近年来,碱土金属原子共振滤波器的研究进展很快,已经研究发表了主动式 Mg -ARF, Sr -ARF 和几种 Ca -ARF,这几种 ARF 都是比较有前途的。其中主动式亚稳 Mg -ARF 工作波长是 518nm,转换成 UV (384nm) 输出,内部光子转换效率大于 50%,这种滤波器可以快速响应 (< 10ns),低泵浦功率需要,低噪声、高光学带通。这种滤波器的最大优点就是工作波长与太阳的夫琅和费暗线重叠,使太阳背景噪声得到抑制。夫琅和费暗线是最小的太阳光谱区,它是由太阳外层中的一些化学元素对太阳的强烈吸收造成的,这些暗线对窄带辐射是自然的低背景通道,操作在夫琅和费暗线的超窄带滤波器,在激光通信中比操作在太阳全背景下更有实际意义。由于窄的谱带和极尖锐原子共振跃迁(0.001nm),所以,想任意设计一种滤波器与夫琅和费暗线重叠是不可能的,故这种能够操作在夫琅和费暗线的滤波器更有研究价值和应用前景。在已发表的 3 种 Ca -ARF 中,第一种主动式亚稳钙滤波器,工作波长在 534.9nm,它的优点是:(1)工作波长与倍频 Nd:BEL 输出相匹配。(2)工作波长与太阳的夫琅和费暗线重叠,提供了 70% 的太阳背景抑制,这种滤波器具有极好的特性,高通频带、低泵浦功率、快速响应、低噪声。第二种是主动式钙滤波器,工作波长在 422.7nm,转移辐射输出在 UV 谱区,这种滤波器的优点是:(1)工作波长与太阳夫琅和费暗线重叠,提供了 40 倍的太阳背景衰减。(2)激光发射机可用倍频半导体激光器组,这是很吸引人的,因为半导体激光是有效的、小型的、可信的激光源。(3)在这个谱区,光可以极好的穿透清洁水,例如海水和湖水。(4)水的非弹性散射可以被忽略。(5)单背景通道,多数 ARF 具有发射太阳光的多重吸收线,这些吸收线来源于轨道角动量与电子自旋和核自旋的相互作用产生的精细和超精细结构,这些线通常混在信号

光中,不能被通常的滤波器阻止,因此附加了噪声通道,降低了滤波器的性能,碱金属滤波器多是多噪声通道的。 Ca-ARF 中由于信号光能级的核自旋和总的电子自旋的值为 0,所以仅有一个背景通道。第三种是被动式滤波器,工作波长在 422.7nm,通过与缓冲气体的碰撞能量转移输出 657.3nm 荧光。优点是除了与太阳夫琅和费暗线重叠提供了 40 倍太阳背景抑制,单噪声通道外,辐射自陷效应被用做提高内部光子转换效率的方法。碱土金属中比较具有代表性的是被动式 Sr-ARF 。它的工作波长是 460.7nm,经过与缓冲气体碰撞能量转移后的输出辐射是 689.3nm。这种滤波器的优点是:(1)工作波长与太阳的夫琅和费暗线重叠,这样使得太阳背景光减少了 50%,提高了信噪比。(2)由于锶原子中提供信号光能级的电子总自旋为 0,且核自旋为 0,因此,这种滤波器具有单噪声通道。(3)工作波长恰好处于海水的最佳透视波段,所以, Sr-ARF 用于海底探潜和通讯,可以大大提高作用距离。(4)通频带可调谐。通过调节冲入热管炉中的缓冲气体的压力,可以调节它的通频带。这种滤波器的缺点是:(1)热管炉的加热温度较高。(2)响应时间较长。被动式 ARF 和主动式 ARF 相比,主动式 ARF 需要动力源,通常是光辐射的形式维持它的运转,增加了复杂性和花费,减少了可信性,但主动式 ARF 增加了波长转移的灵活性,扩展了辐射输出的范围。而被动式 ARF 输出辐射的波长比较固定,因而限制了输出波长的选择。除了碱金属和碱土金属作为滤波器的介质外,还有一种金属就是铯。它的工作波长是 535nm,正好与倍频 Nd:BEL 固体激光器重叠,输出辐射在 UV 谱区的 378nm,它的优点是 $6^2_{p_{3/2}}$ 亚稳能级具有很长的寿命,即使是在一个很小的蒸气炉也是如此。

3 结束语

尽管近几十年来对原子共振滤波器进行了大量地详细地理论和实验研究,但还没有广泛应用,据报道,美国机载激光研究中用到了铷原子共振滤波器,滤波器的工作波长是 532nm,除此之外,还未见有其它原子共振滤波器的器件应用的报道。主要原因是:(1)滤波器的内部光子转换效率太低。(2)滤波器的响应时间太长。通过几年来对原子共振滤波器的研究,我们认为原子共振滤波器还是有前途的。只要我们根据需求牵引,选择合适的参数,原子共振滤波器就能够在很多领域得以应用。

参 考 文 献

- 1 Gelbwachs J A, Klein C F, Wessel J E. IEEE J Q E, 1978; 14(1): 77~ 79
- 2 Marling J B, Nilsen J, West L C *et al.* J A P, 1979; 50(7): 610~ 614
- 3 Flusberg A. J A P, 1983; 54(12): 6036~ 6037
- 4 Huenekens J, Wu Z, Walker T G. Phys Rev(A), 1985; 31(2): 196~ 209
- 5 Chung Y C, Shay T M. IEEE J Q E, 1988; 24: 709
- 6 Shay T M, Chung Y C. Opt Lett, 1988; 13: 443
- 7 Chan Y C, Tabat M D, Gelbwachs J A. Opt Lett, 1989; 14: 722
- 8 Gelbwachs J A. Opt Lett, 1990; 15(20): 1165~ 1167
- 9 Gelbwachs J A. Opt Lett, 1990; 15(4): 236~ 238
- 10 Gelbwachs J A, Chan Y C. Opt Lett, 1991; 16(5): 336~ 338
- 11 Oehry B P, Schupita W, Magerl G. Opt Lett, 1991; 16(20): 1620~ 1622
- 12 Gelbwachs J A, Chan Y C. IEEE J Q E, 1992; 28(11): 2577~ 2581

*

*

*

作者简介:张 华,男,1962年1月出生。在读博士生,研究员。现正从事铯原子共振滤波器的研究工作。