

锶原子共振滤波器内部光子转换效率的研究

丁迎春 张 华 赵晓彦 赵旭光 于俊华
(哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 哈尔滨 150001)

摘 要 详细研究了温度及氩稀有气体压力对锶原子共振滤波器有效的内部光子转换效率的影响。证明了内部光子转换效率随氩气压的增加而增加, 在温度的变化关系中存在着最佳温度值。

关键词 锶单质, 原子共振滤波器, 内部光子转换效率。

1 引 言

原子共振滤波器(ARF)是一种超窄带宽、大视角、高 Q 值、各向同性的光学滤波器, 是适用于连续背景光条件下弱激光信号的检测的理想器件。

目前已发展了多种原子共振滤波器^[1~11], 其中锶原子共振滤波器是一种综合指标特性更优越的原子共振滤波器。它是一种被动式滤波器, 使结构紧凑可靠, 并具有通频带可调谐特性, 尤其是它具有单噪声通道, 工作波长与太阳的强夫琅和费暗线精确地重叠, 使太阳背景光得到了 50% 的抑制, 减少了背景噪声的特性。它的强共振吸收波长 460.7 nm 又恰好处于海水最佳透射波段, 所以采用这种滤波器进行海底探潜和通信是非常有利的。

被动的锶原子共振滤波器可以被模拟作为简单的三能级系统来处理, 能级如图 1 所示。

锶原子强烈地吸收波长为 460.7 nm 的信号光, 从 Sr ($5s^1S_0$) 跃迁到 Sr ($5p^1P_1$) 能级, 从而在能级 Sr ($5p^1P_1$) 上产生粒子数布居, 经过与有效的缓冲气体氩气的粒子的碰撞, 在能级 Sr ($5p^1P_1$) 与能级 Sr ($5p^3P_1$) 之间发生无辐射跃迁, 从而使粒子数的一部分由 Sr ($5p^1P_1$) 能级转移到亚稳态 Sr ($5p^3P_1$) 能级, 再经过 Sr 的内部多重态 Sr ($5p^3P_{J=0, 1, 2}$) 之间的混合, 最后由 Sr ($5p^3P_1$) 能级辐射 689.3 nm 荧光后原子返回到基态。

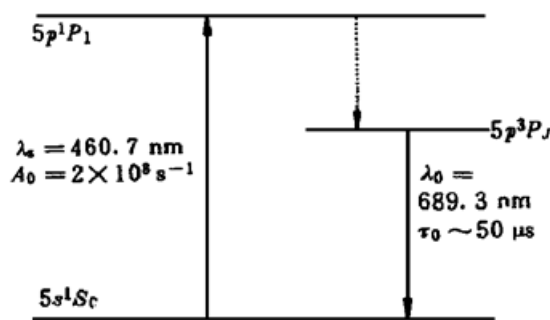


Fig. 1 Energy-level diagram of the passive strontium filter. A_0 is Einstein coefficient of spontaneous transition

2 实验系统

图 2 是测量内部光子转换效率的实验装置示意图。输入信号是由波长为 308 nm 的 XeCL

准分子激光器(EMG201MSC)的脉冲激光抽运盛有香豆素 47 的脉冲染料激光器(FL2002)并调谐到波长 460.734 nm 的激光输出, 输出能量用 ED200 能量计(焦耳/电压 = 1/6.67)经 TEK466 示波器监测 460.7 nm 信号激光能量的稳定性, 直径约为 0.5 cm 的近平行激光束与窗口直径为 $\Phi = 2$ cm 的热管轴线基本重合, 热管池中的激光感生 Sr 的荧光发射(波长为 460.7 nm 和 689.3 nm)用透镜($f = 3$ cm)聚焦并经过光纤耦合进入 SPEX1870 单色仪($f = 50$ cm), 经 CT53 光电倍增管转换成电脉冲信号, 并传送给数字示波器(TDS684A 带宽 1 GHz), 由示波器每次分别记录 4 个脉冲信号波形并存盘, 然后用计算机进行平均处理。

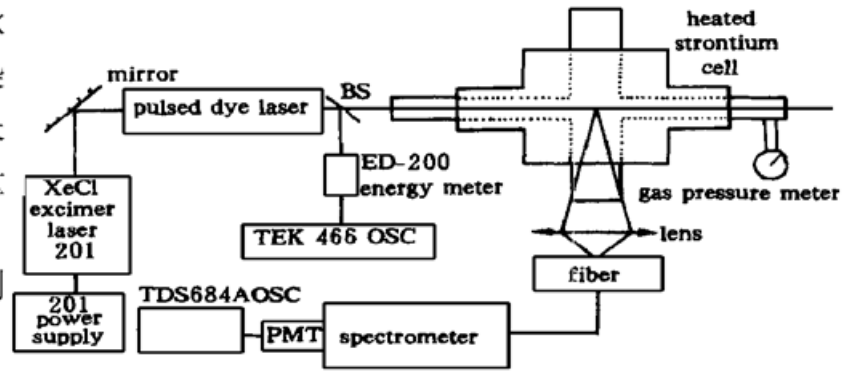


Fig. 2 Schematic representation of the experimental apparatus

3 实验结果与分析

3.1 内部光子转换效率与温度的关系

在波长为 460.734 nm、信号激光能量为 2 mJ、锶的纯度为 98% 的条件下, 改变加热温度 T 或氩气压 P_{Ar} 进行了 Sr 脉冲荧光谱强度的测试。在氩气保持在 47 kPa 的条件下, 改变加热温度值, 从 573 K 到 793 K 改变 7 个值, 每改变一个温度值需稳定 1 个小时, 以实现新的准热平衡。在每一温度值下, 用示波器 TDS684A 记录 Sr 的 460.7 nm 和 689.3 nm 各个脉冲荧光波形, 每一种波长都分别记录 4 个脉冲荧光强度波形, 记录下的波形经示波器处理后存盘, 然后在计算机上调出处理, 每一个脉冲峰值光强值都是同一波长 4 个值平均的结果。取温度 T 值为横坐标, 转换效率 η 值为纵坐标, 用最小二乘法拟合出转换效率随温度的变化关系曲线, 如图 3 所示。从图中可以看出在温度和转换效率的关系中应该有一个最佳温度值, 在上述条件下最佳温度值为 690 K 左右。如果氩气压值不同, 最佳温度值也不同。按照辐射自陷效应, 当温度升高时, 锶的粒子数增加, Sr ($5p^1P_1$) 能级自发辐射 460.7 nm 波长的回到基态的粒子有更多被重新吸收并再向 Sr ($5p^1P_1$) 聚集又得到与 Ar 粒子碰撞转移到 Sr ($5p^3P_J$) 的机会, 尤其是在热管内径为 2.0 cm、461 nm 信号激光束直径为 0.5 cm 近平行光的条件下, 使蓝光被限制在 Sr 蒸气中的光学厚度增长, 所以转换效率应该是随着温度的升高而升高, 同时由于辐射自陷效应增加了 Sr ($5p^3P_J$) 能级的有效寿命, 长寿命就会有更多的时间与缓冲气体和 98% 纯度的锶中随温度升高而增多的杂质发生无辐射碰撞淬灭, 所以从低温升高时, 辐射自陷效应起主要作用, 致使转换效率随温度的升高而升高。当温度很高时, 无辐射碰撞淬灭的因素起了决定性的作用, 所以转换效率又降低了。

3.2 内部光子转换效率与氩气压的关系

在加热温度为 793 K 的条件下, 改变氩缓冲气压 7 个值, 氩气压从 124 kPa 降到 47 kPa, 转换效率从 72.8% 降到 38.2%。以氩缓冲气压 P_{Ar} 值为横坐标, 以内部光子转换效率 η 值为纵坐标建立坐标系, 用最小二乘拟合出 η 随 P_{Ar} 的变化曲线, 如图 4 所示。从图中可以看出, η 随 P_{Ar} 的增加而增加, 这与理论是相符的。但随 P_{Ar} 再加大, η 上升趋向平缓, 这是由于过高 P_{Ar} 引起的 Sr ($5p^3P_J$) 态粒子的淬灭速率也增大(虽然 Sr-Ar 碰撞淬灭速率常数很小^[11])。

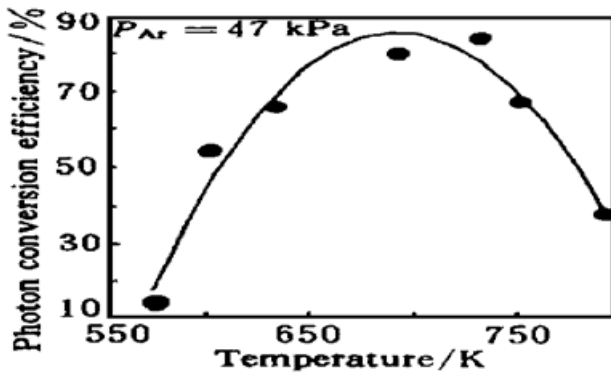


Fig. 3 Internal photon conversion efficiency plotted as a function of the temperature

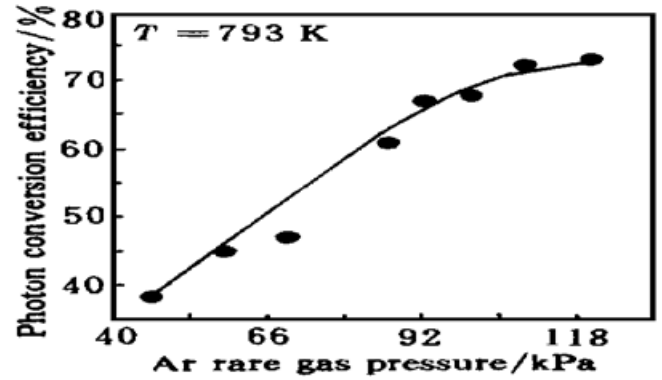


Fig. 4 Internal photon conversion efficiency plotted as a function of the Ar pressure

综观图 3 与图 4 中 T 与 P_{Ar} 对 η 的影响可以看出, P_{Ar} 在 47~92 kPa 的有限范围内, $\eta = f(P_{Ar})$ 的函数关系基本上线性的。因此对应一定的 P_{Ar} 及信号光束直径 φ 与 S_r 池内径 Φ 之比 φ/Φ 时, 只存在一个与 η_{max} 值相对应的温度最佳值。在本文的实验条件下取 $P_{Ar} = 47$ kPa, $\varphi/\Phi = 0.25$ 时, 对应的 $T_{opt} = 690$ K。应该指出, P_{Ar} 是在铯原子共振滤波器中起到影响 $Sr(5p^1P_1 - 5s^1S_0)$ 与 Ar(缓冲气体) 碰撞的共振吸收谱线 460.734 nm 展宽系数 k_b 的主要因素 [$k_b(Ar) > k_b(Kr) > k_b(He) > k_b(Ne)$], 且又是影响 η 的重要因素。在本实验中, 取 $P_{Ar} = 123$ kPa 时, 仍未见 η 有收敛趋势。而在此条件下, Sr 的 460.7 nm 共振吸收谱线展宽已高达 0.0062 nm(在 $T = 793$ K 时) 的值^[11]。可是由于原子共振滤波器比起其它类型的光学滤波器的优势就在于超窄线宽, 所以再提高 P_{Ar} 就无实用意义, 而且还会进一步增加真空密封的技术难度。当然, 如根据谱线展宽实际提高的要求, 当 $P_{Ar} > 47$ kPa 确定后, 若取 $\varphi/\Phi \leq 0.25$ 时, 可取得对应同一 η_{max} 值的 $T_{opt} < 690$ K 的值。这样取值有利于研制成实用铯原子共振滤波器器件。

总之, 本文主要在实验上对铯原子共振滤波器的重要技术指标——内部光子转换效率, 进行了全面的、更进一步的研究与测量, 与近期国外期刊所发表的结果^[11] 相比, 有新的进展。这为将来对铯原子共振滤波器进行更深一步的研究及研制成实用器件提供了重要的理论和实验依据。

本实验所用的单质 Sr 是由浙江大学物理系姚志欣教授提供, 深表谢意!

参 考 文 献

- [1] Gelbwachs J A. Atomic resonance filters. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1988, **QE-24**(7): 1266~ 1277
- [2] Marling J B, Nilson J, West L C *et al.*. An ultrahigh Q isotropically sensitive optical filter employ atomic resonance transitions. *J. Appl. Phys.*, 1979, **50**(2): 610~ 614
- [3] Shay T M, Chung Y C. Ultrahigh-resolution, wide-field-of-view optical filter for the detection of frequency doubled Nd:YAG radiation. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(6): 443~ 445
- [4] Oehry B P, Schupita W, Mager G. Lamp-pumped thallium atomic line filter at 535.046 nm. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(20): 1620~ 1622
- [5] Chan Y C, Tabal M D, Gelbwachs J A. Experimental demonstration of internal conversion in the magnesium atomic filter. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(14): 722~ 724
- [6] Gelbwachs J A. 422.7 nm atomic filter with superior solar background rejection. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(4): 236~ 238

- [7] Gelbwachs J A. Proposed Fraunhofer-wavelength atomic filter at 534.9 nm. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(20) : 1165~ 1167
- [8] Gelbwachs J A, Klein C F, Wessel J E. Infrared detection by an atomic vapor quantum counter. *IEEE. J. Quant. Electron.*, 1978, **QE-14**(2) : 77~ 79
- [9] Chung Y C, Shay T M. Experimental demonstration of a diode laser-excited optical filter in atomic Rb vapor. *IEEE. J. Quant. Electron.*, 1988, **24**(5) : 709~ 711
- [10] Gelbwachs J A, Wessel J E. Atomic vapor quantum counter: Narrow-band infrared upconverter. *IEEE Trans. Electron. Devices.*, 1980, **ED-27**(1) : 99~ 108
- [11] Gelbwachs J A, Chan Y C. Passive Fraunhofer-wavelength atomic filter at 460.7 nm. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1992, **QE-28**(11) : 2577~ 2581

Internal Photon Conversion Efficiency in the Strontium Atomic Resonance Filter

Ding Yingchun Zhang Hua Zhao Xianyan Zhao Xuguang Yu Junhua
(*Institute of Opto-Electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001*)

(Received 6 August 1998; revised 27 October 1998)

Abstract The effect of temperature and argon rare gas pressure on internal photon conversion efficiency (η) in the strontium atomic resonance filter (Sr-ARF) has been studied in detail. It is demonstrated that the η is augmented as Ar-pressure increased, and an optimal value exists during the variation of temperature.

Key words strontium simple substance, atomic resonance filter, internal photon conversion efficiency.