

铯原子共振滤波器对XeCl/Pb蓝激光 脉冲的吸收和响应

辜红平 楼祺洪 霍芸生
(中国科学院上海光机所, 201800)

提要: 本文从理论上和实验上研究了充5 Torr Ar气的铯原子共振滤波器对自由振荡XeCl/Pb蓝激光脉冲(40 ns脉宽)的吸收和响应特性。从滤波器的侧向和纵向分别探测到脉宽为40 ns和150 ns的近红外荧光脉冲。

关键词: XeCl激光, 受激喇曼散射, 铯原子共振滤波器

Absorption and response of Cs atomic resonance filter to the XeCl/Pb blue laser pulses

Gu Hongping, Lou Qihong, Huo Yunsheng

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai)

Abstract: The absorption characteristics and the response time of the Cs atomic resonance filter (ARF) filled with 5 torr Ar buffer gas have been investigated theoretically and experimentally when ARF was irradiated with the free-run XeCl/Pb blue laser (pulse width: 40 ns). The near infrared fluorescence pulse with 40 ns and 150 ns (FWHM) pulse duration have been detected at the side of and behind the ARF respectively.

Key words: XeCl laser, stimulated Raman scattering, atomic resonance filter (ARF)

一、引 言

在研制能用于探测低信号水平的大视场窄带光学滤波器的过程中, 产生了原子共振滤波器。这种滤波器原则上具有 2π sr 的视场和超窄带 ($Q=10^5\sim 10^6$) 的特性。它能够从淹没在强噪声的背景中取出窄线宽的光信号。原子共振滤波器的线宽由多普勒线宽决定, 它的内转换效率很高。1978年, Marling 等人在实验上研究了铯原子共振滤波器在 Cs^{133} 的 455.5 nm 激发光谱的性质, 用可调激光照射, 观察到波长为 852.1 nm 和 894.3 nm 的近红外荧光^[1]。他们的工作揭示了铯原子共振滤波器用于水下通讯的可能性。

铯原子的另一条吸收激发光谱线 459.3 nm 与 XeCl 激光在铅蒸气中受激喇曼散射频移后的波长 459 nm 能很好地匹配。在用蓝绿激光的卫星潜艇通讯中, 使用铯原子共振滤波器使接收水平获得了很大的突破, 水下接收深度可增加到几百英尺^[2]。

铯原子共振滤波器由两块滤光片和一个 Cs 吸收池组成。入射口上的蓝光高通滤光片让蓝光进入 Cs 池, Cs 原子蒸气吸收极窄线宽内的信号光, 然后辐射出近红外荧光; 出射口上的红光低通滤光片挡住未吸收掉的蓝光及其它的高频部分, 只让近红外光透过, 最后由光电倍增管接收检测。滤波器的出入射滤光片的通光带不重合, 以及 Cs 原子的共振吸收特性确定了铯原子共振滤波器的超窄带特性。

本文用自己研制的 Cs 原子共振滤波器探测 XeCl/Pb 蓝激光脉冲, 研究它的吸收和时间响应特性。

二、理论分析

XeCl/Pb 蓝光的光谱特性是由 XeCl 准分子激光的光谱性质决定的。对于自由行程的 XeCl 激光器, 输出光主要由四条谱线组成, 它们相对于 XeCl 准分子的四个振动跃迁 $v'-v''$: (0-0)307.7 nm, (0-1)307.9 nm, (0-2)308.2 nm 和 (0-3)308.4 nm。其中 (0-1) 和 (0-2) 两条光谱线较强^[2]。当激光器输出光强足够大时, 每条谱线的光强都在铅蒸气受激喇曼散射的阈值以上, XeCl 激光通过喇曼转换后, 输出的蓝光仍由四条谱线组成(喇曼频移 10650 cm^{-1})。蓝光的四条谱线中, 中心波长为 459.3 nm 的谱线与 Cs 原子的 $6S_{1/2}-7P_{1/2}$ 跃迁共振。

在没有缓冲气体的情况下, Cs 原子的吸收线宽主要由多普勒加宽决定。铯池在 459.3 nm 处的吸收线宽 $\Delta\nu$ 由下式给出:

$$\Delta\nu = 2(\pi/4 \ln 2)^{1/2} \Delta\nu_D \simeq 2.1 \Delta\nu_D \quad (1)$$

式中 2 这个因子来自 Cs^{133} 原子 $7P_{1/2}$ 的核自旋-轨道相互作用而分裂成两条吸收线。因此, 滤波器所吸收的连续辐射光谱宽度在常温下可小至 $\sim 0.06\text{ cm}^{-1}$ 。实际上 Cs 池的共振吸收长度比较大, 吸收谱线宽度还要大些, 约 $10^{-2} \sim 10^{-3}\text{ nm}$ 量级。

Cs 池中充有缓冲气体后, 惰性气体原子与 Cs 原子碰撞, 引起碰撞加宽。碰撞加宽由下式给出^[4]:

$$\Delta\nu_L = (1/\pi c) \sigma_R \bar{v} N \quad (2)$$

其中 \bar{v} 是原子碰撞时的质心热平均速率, N 是惰性气体原子数密度, σ_R 是碰撞截面。对于 5 Torr 的 Ar 气, 室温下原子数密度为 $1.6 \times 10^{17}\text{ cm}^{-3}$ 左右。根据 $T=400\text{ K}$ 时的碰撞截面实验数据^[3] $\sigma_R = 1228 \times 10^{-16}\text{ cm}^2$, 估算出碰撞加宽为 $1.1 \times 10^{-2}\text{ cm}^{-1}$, 小于多普勒宽度 $\Delta\nu_D$ 。因此它对 Cs 原子的吸收线宽的影响不是主要的。激光的光谱性质和 Cs 原子蒸气的吸收线特性列于表 1 中。XeCl 激光在受激喇曼散射过程中, 由于增益压窄线宽效应^[2], 输出蓝光的线宽一般比 XeCl 激光的线宽窄(约同数量级)。从表中可知, 自由振荡的 XeCl 激光泵浦铅蒸气输出的蓝光, 只有一部分可被 Cs 原子蒸气共振吸收。设可被吸收的蓝光占整个光脉冲的 δ , 考虑铯蒸气池的温度 T 和池长 l , 那么 Cs 池的透过率可写为

$$F(\nu) = \exp\{-k_0 l \exp[-4 \ln 2(\nu - \nu_0)^2 / (\Delta\nu_D)^2]\} \quad (3)$$

蓝光脉冲对 Cs 池的透过率为

$$F = \int g(\nu) F(\nu) d\nu \quad (4)$$

式中 $g(\nu)$ 是蓝光脉冲的线型(如图 1 所示)。为简便起见, 可将它看成是非常窄的四条矩形光

Table 1 Laser spectral properties and the absorption characteristics of Cs atomic vapor

	spectral line(nm)	linewidth(nm)	Raman frequency shift spectral line(nm)
free-cavity laser	307.7, 307.9 308.2, 308.4	0.08~0.1	457.7, 458.2 458.8, 459.3
tunable laser	307.65~308.65	0.01~10 ⁻³	
Cs atomic vapor	459.3	10 ⁻² ~10 ⁻³	

谱线组成, 则(4)式可简化成

$$F = \delta \exp(-n \sigma_i l) + (1 - \delta) \quad (5)$$

其中共振吸收系数 $k_0 = \sigma_i n$, σ_i 是 Cs 原子对 459.3 nm 谱线的吸收截面。在不太高的温度范围内, 由 k_0 与温度的关系式^[4] 给出 $\sigma_i \approx 10^{-14} \sim 10^{-13} \text{cm}^2$ 。取 $l = 15 \text{cm}$, 当 Cs 蒸气对蓝光有强吸收时 ($\sigma_i n l = 1$), 所需原子数密度为 $10^{12} \sim 10^{13} \text{cm}^{-3}$ 的量级, 相对于 Cs 池的温度在 100°C 左右。由此分析可知, 蓝光通过 Cs 池后的吸收在 100°C 以上将趋于饱和。

铯原子共振滤波器的响应时间主要由原子系统的能级弛豫时间决定。若不存在非辐射衰减和外来的诱导辐射因素, Cs 原子从 $7P_{1/2}$ 通过中间态 $6P$ 衰减到 $6S$ 态的本征弛豫时间是 $0.30 \mu\text{s}$ 。充入惰性缓冲气体后, 铯原子与缓冲气体原子之间的碰撞, 扰乱了原子辐射的位相, 使谱线加宽, 从而减小了 Cs 原子从激发态跃迁到基态的时间。Cs 原子与惰性气体原子碰撞时的作用力是它们之间的 Van der Waals 相互作用力。这种力与碰撞原子的极化率有很强的关系, 并对高能态的影响较大。采用缓冲气体可大大降低激发态的寿命。

Cs 原子激发态的跃迁弛豫时间为

$$1/\tau = 1/\tau_{\text{rad}} + 2\pi \Delta\nu_L + 1/\tau' \quad (6)$$

式中 τ_{rad} 是 Cs 原子自发辐射寿命, τ' 是其它的诱导因素。在 Cs 池中充入 5 Torr Ar 气的情况下, 根据实验测得的碰撞截面数据^[4], 由(2)式算得 $6P-6S$ 跃迁的碰撞加宽 $\Delta\nu_L \approx 7.4 \times 10^7 \text{Hz}$ 。因此, 如果不考虑 τ' , 则 $6P \sim 6S$ 的弛豫时间为 2 ns, 其中 $\tau_{\text{rad}} = 31 \text{ns}$ 。这个弛豫时间远小于蓝光脉冲的宽度 40 ns。由于碰撞使铯原子 $6P$ 以上的激发态向下跃迁的寿命更短。根据 $7P_{1/2}-6S_{1/2}$ 的跃迁碰撞加宽截面实验数据估算的寿命为 0.5 ns。因此, 可以推断, 如果没有其他因素的影响, 充以 5 Torr Ar 气的铯池辐射出近红外荧光的脉冲宽度与吸收的蓝激光脉宽相等。

三、实验结果与分析

实验用 X 光预电离放电型的自由振荡 XeCl 激光泵浦高温铅蒸气。XeCl 激光器采用非稳腔输出结构, 焦点处的峰值功率高达 2000mW/cm^2 。泵浦条件远在喇曼转换的阈值之上。XeCl/Pb 系统输出蓝光的脉宽为 40 ns, 光谱分布如图 1 所示。Cs 池是长 15 cm、内径 28 mm 的石英玻璃柱泡, 内充有 5 Torr 的 Ar 气。实验装置如图 2 所示。在 Cs 原子共振滤波器后用快速强流光电管探测蓝光脉冲被吸收后的波形(滤波器后无滤光片的情况), 或用光电倍增管分别在纵向和侧向探测波长 852.1 nm 和 894.3 nm 的荧光脉冲。

在 Cs 池不同的温度下, 示波器屏幕上拍摄到的脉冲示于图 3 中。根据所拍摄到的波形的

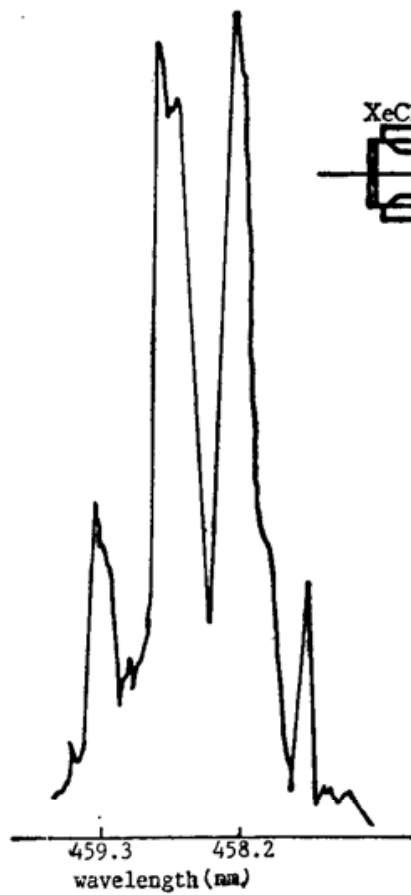


Fig. 1 Spectrum of Raman beam, which is obtained with a 1-m-plane grating spectrometer

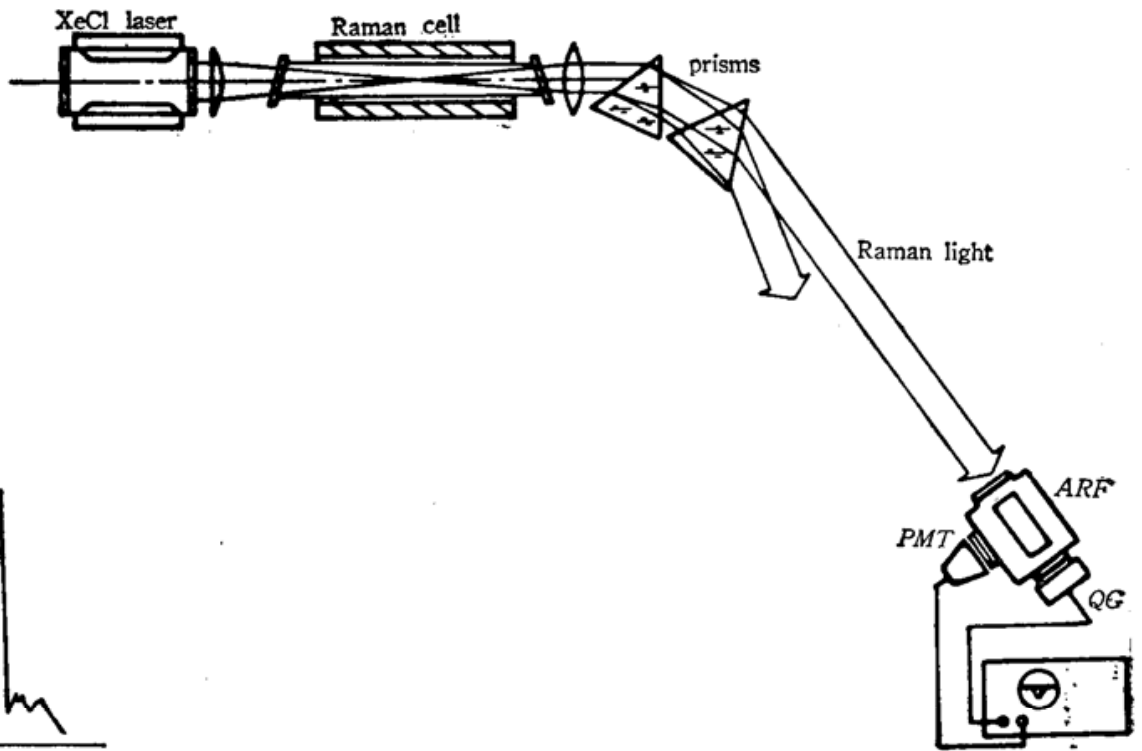


Fig. 2 Experimental setup for the detection of blue light. ARF: Cs atomic resonance filter, PMT: photomultiplier, QG: vacuum photocell.

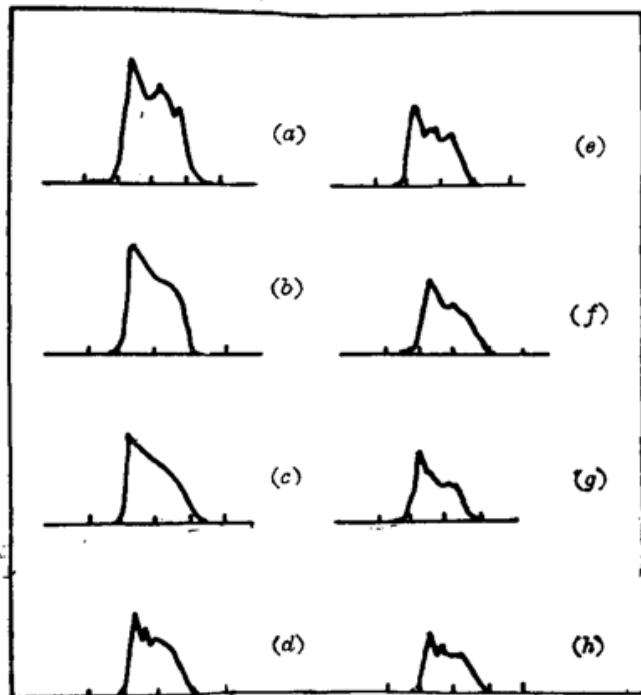


Fig. 3 Oscilloscope traces of blue light pulses after penetrating the Cs cell

Cs cell is maintained at temperatures: (a) 10°C, (b) 70°C, (c) 130°C, (d) 180°C, (e) 220°C, (f) 270°C, (g) 320°C and (h) 370°C, respectively

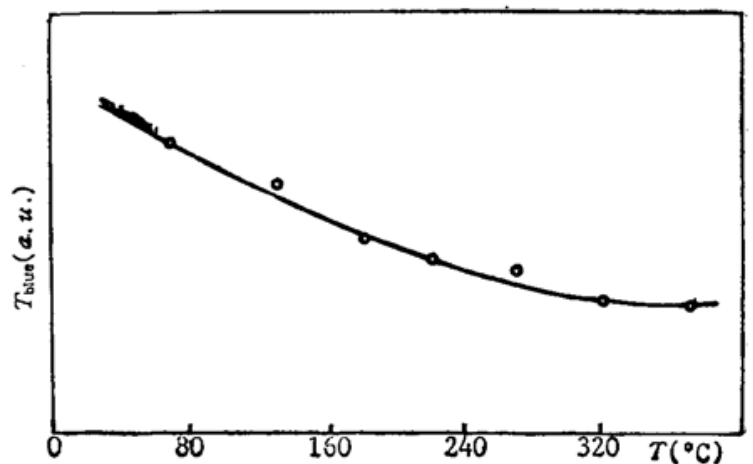


Fig. 4 Transmittance of blue light vs the temperature of Cs cell

高度和面积,估算出 Cs 池对蓝光的吸收情况由图 4 的透过率曲线给出。图中曲线在高温区明显表示出饱和状态。这与前面的理论分析结论是一致的。温度较高时($>100^{\circ}\text{C}$), 459.3 nm 峰的这部分光 δ 几乎全部被吸收,趋向饱和。

实验中,用光电倍增管探测近红外荧光。当铯原子共振滤波器的工作温度控制在 100°C 左右,分别从侧向和纵向探测到的荧光脉冲在图 5 中给出。在侧向探测到的荧光脉宽约为 40 ns ,与蓝光脉冲宽度相同。这个实验结果与理论得出的分析结论是一样的。纵向测到的荧光脉宽约为 150 ns ,大于蓝光的脉宽。

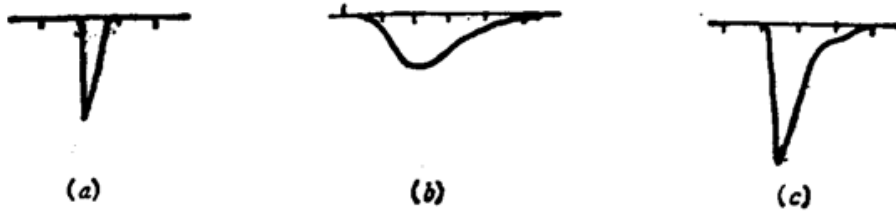


Fig. 5 Oscilloscope traces of the received light pulses: (a) blue light, (b) deep red light detected transversally and (c) deep red light detected longitudinally

Time scale: (a) 10 ns/div , (b) and (c) 50 ns/div

当光在原子蒸气中传播的距离比较长时,就会发生辐射囚禁现象(radiation trapping)。处于激发态的原子可以辐射一个光子跃迁到基态,也可以吸收相同类型的光子从基态跃迁到激发态。原子蒸气池中心的某个原子发射一个光子,这个光子传播一段短距离后,很可能被另一原子吸收掉。这个辐射和吸收光子过程的结果使原先的激发能量从一个原子传到另一个原子,最后由蒸气池壁附近的原子辐射出去。光子被原子接力式传递的辐射囚禁过程大大地延长了原子系统辐射荧光的时间,即增大了原子蒸气池的响应时间。铯原子的发射近红外光的振子强度 f_0 比吸收蓝光的振子强度 f_i 大($f_0/f_i=32$)。当 Cs 蒸气大量吸收蓝光光子时,它也吸收自己辐射出的近红外荧光光子。在 Cs 池的纵向,光传播的距离长,荧光光子被囚禁在蒸气内,极大地增大了共振发射的时间,从而从定性上解释实验中纵向探测到的脉冲 150 ns 脉宽的结果。

虽然本实验的铯原子共振滤波器的各通光口上都没有镀增透膜,当照射蓝光的脉冲能量小于 10^{-12} mJ/cm^2 时,仍能清楚地观察到近红外荧光脉冲信号。

作者对北京大学无线电电子学系在 Cs 池的制做上所给予的帮助表示感谢。对上海光机所魏运荣、董景星同志在实验上的帮助表示感谢。

参 考 文 献

- 1 J. B. Marling *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **50**, 610(1979)
- 2 H. Rieger, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-22**, 405(1986)
- 3 E. L. Lewis, *Phys. Rep.*, **58**, 1(1980)
- 4 H. Shimizu *et al.*, *Appl. Opt.*, **22**, 1373(1983)