

用声光调制器进行差拍饱和光谱学的实验研究

刘玲玲 U.Brand*

(中国计量院长度处,北京 100013)

提要: 分别用声光晶体对氩离子激光 515nm 谱线作幅度和频率调制,实验研究了碘吸收的差拍饱和吸收信号。用频率调制方法得到斜率极陡的一阶微商饱和吸收信号,并将它作为鉴频曲线把氩离子激光频率稳到 $^{127}\text{I}_2$ 分子的 $P(13)43-0$ 的 a_3 线上。通过与一稳定到相同精细分量上的稳频氩离子激光器拍频,给出激光频率稳定性优于 $\pm 4.7 \times 10^{-12}$ 。

关键词: 声光调制, I_2 分子差拍饱和吸收, 氩离子稳频激光

Experimental investigation on two methods of heterodyne saturation spectroscopy by means of acousto-optic modulator

Liu Lingling

(National Institute of Metrology, Beijing)

U. Brand

(Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, Germany)

Abstract: A single-mode Ar^+ laser at 515nm is modulated in amplitude and frequency by an acousto-optic modulator respectively, the heterodyne saturation absorption signals in I_2 are investigated experimentally. A first derivative-like saturation absorption signal with very steep slope obtained from the FM method is used as a discriminator to stabilize Ar^+ laser frequency to hyperfine component a_3 of the $P(13)43-0$ of $^{127}\text{I}_2$. With the beat frequency between the stabilized Ar^+ laser and other stabilized Ar^+ laser stabilized to the same line, the stability of the Ar^+ laser is better than $\pm 4.7 \times 10^{-12}$.

Key words: acousto-optics modulator, heterodyne saturation absorption in I_2 , Ar^+ stabilized frequency lasers

频率调制与相敏检测相结合的方法是光谱学中测量弱吸收信号的最有力的技术之一。它可以把窄谐振和宽背景很好地分开。激光光源的幅度噪声大部分集中在低频区,在 kHz 处比在 1~2 MHz 处,其噪声水平要高几个数量级^[1]。因此在相敏检测技术中提高调制频率将会降低稳频激光的噪声水平,提高频率稳定性。本工作中所用调制频率在 10~130 kHz。此外,由

收稿日期:1990年11月19日;修改稿收到日期:1991年1月15日。

* 德国技术物理研究所,布伦瑞克。

于在实验中不完善的光学隔离在激光输出镜与系统之间的光反馈可使饱和泵束的一小部分进入接收器与探测束产生相干背景噪声。而改善光学隔离的代价是昂贵的。采用高频调制背景则只需简单的电子学滤波器就可将信号与背景分开。因此可以大大减少干扰信号,提高饱和吸收信号的信噪比。

据此采用声光调制器对 Ar^+ 激光— I_2 吸收系统进行了差拍饱和光谱术中二种方法的实验研究。首先对激光光束做幅度调制^[2],而后做频率调制^[3],据近简并的四波混频原理可得到谐振的饱和吸收信号。用频率调制法可获得计量学上感兴趣的斜率极陡的谐振信号,利用它进行了稳频。借助于与第二个稳频的参考氩激光器^[4]的拍频,给出初步的频率稳定性结果。两种方法在实验原理、装置上相近,只是调制方法不同,结果也不同。

一、原 理

根据四波混频原理,三个光场 ω_1 , ω_2 和 ω_3 同时作用在非线性吸收介质上,由于介质的三阶极化率作用产生第 4 个光场 ω_4 。其中 ω_1 和 ω_2 频率相近且是被调制的,作用的结果是当激光频率与介质谐振时,在第 4 个场中感应到调制信号。它与探测场差拍后,用常规的相敏检测法可解调出谐振信号——饱和吸收信号。

幅度调制法(AM):

泵束通过一被注入调幅波(射频 Δ 被低频 Ω_m 调制)的行波声光调制器 AOM 后,频移 Δ , 同时幅度被调制,调制频率为 Ω_m , 其光场为

$$E_s = \frac{E_0}{2} \{ \sin[(\omega + \Delta + \Omega_m)t] + \sin[(\omega + \Delta - \Omega_m)t] \},$$

其中 ω 是激光频率。因此,三个光场频率分别为 $\omega_1 = \omega + \Delta + \Omega_m$, $\omega_2 = \omega + \Delta - \Omega_m$ 和 $\omega_3 = \omega$, 这里 ω_1 和 ω_2 是泵束在 $+z$ 方向, ω_3 是探测束在 $-z$ 方向。由四波混频原理知 ω_4 在 $-z$ 方向,且其谐振条件为 $\omega = \omega_0 - \frac{\Delta}{2} \pm \frac{3}{2} \Omega_m$, ω_0 是吸收介质的谐振频率。从探测束方向 ω_3 和 ω_4 的差拍信号在 Ω_m 小于谱线的自然宽度时,用相敏检测法可解调出其饱和吸收的色散及吸收谐振信号。

频率调制法(FM):

泵束通过一被注入调频的行波 AOM 后,频移 Δ 且频率被调制,调制频率为 Ω_m , 调制深度为 δ , 即

$$E_s = E_0 \sin \left[(\omega + \Delta)t + \frac{\delta}{\Omega_m} \sin \Omega_m t \right],$$

展开为

$$E_s = E_0 \left[\sum_{n=0}^{\infty} J_n(M) \sin(\omega + \Delta + n\Omega_m)t + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_n(M) \sin(\omega + \Delta - n\Omega_m)t \right],$$

$J_n(M)$ 是 n 阶贝塞尔函数, $M = \delta/\Omega_m$ 是调制指数。上述展开中有若干频率分量,考虑幅度最大的两个第一阶边带。因此在四波混频中三个光场频率同上表示,也可产生第 4 个波 ω_4 , 并与 ω_3 差拍并被解调出谐振信号。分析指出当调制频率 Ω_m 小于谱线的自然宽度时,色散形式的谐振信号近似为一阶微商形式^[5]。

二、装 置

示于图 1 的实验装置是一个具有两个相反方向行进, 偏振方向相互垂直的波的环形结构。分束器 SP , 反射大部分激光输出作泵束, 透射作探测束。泵束被行波声光调制器 AOM 频移 40 MHz 并同时作幅度或频率调制。它通过一 $\lambda/2$ 波片偏振方向转 90° , 然后通过偏振分束器 PSP 进入碘室。从相反方向行进的垂直偏振的探测束通过碘吸收室被 PSP 反射到接收器 1。这两束光在碘室中反向行进并严格重合。光束半径约 3 mm。吸收室两窗片有减反增透膜。I₂ 压力为 4.12 Pa, 其温度控制在 $0^\circ\text{C} \pm 0.02^\circ\text{C}$ 。接收器 1 接收的信号输入给锁定放大器 1, 后者的输出加到示波器和记录仪。

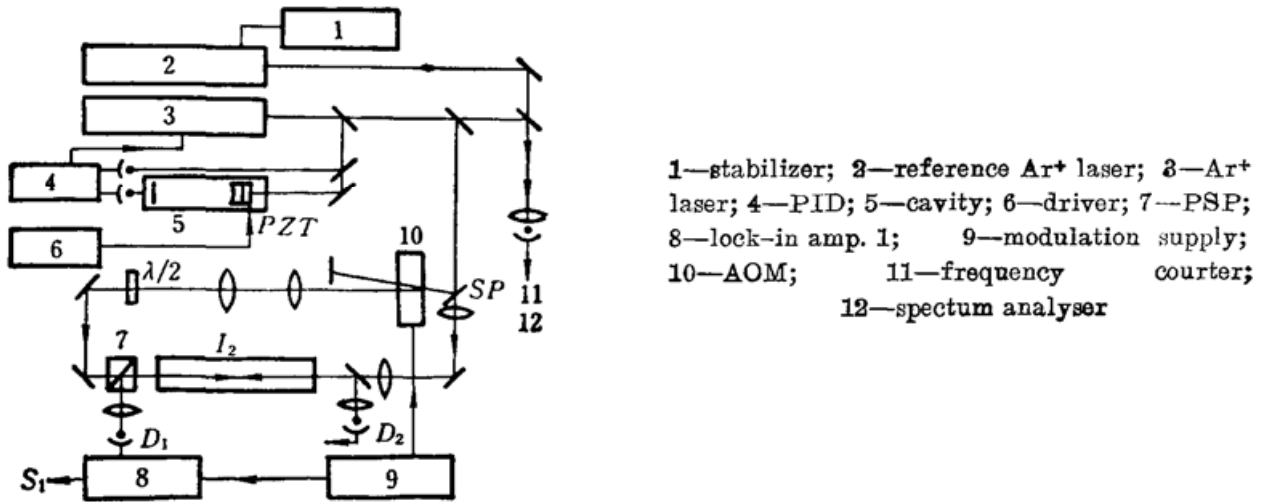


Fig. 1 Block diagram of the experimental arrangement

氩激光频率通过 PID 线路被稳定到参考谐振腔的透射峰的一半处, 以改进它的短期稳定性。

参考腔是半共焦型的。它是由一熔石英间隔器及两个可拆卸的熔石英腔镜组成, 其中一个带有 PZT 片堆。腔放置在一室中, 两端有密封窗。腔体与室内壁之间塞满隔声减震的材料。腔的自由光谱范围约 150 MHz, 透射峰宽约 480 kHz。通过手动或信号发生器的扫描电压可改变加在 PZT 上的电压, 通过 PID 稳频线路改变激光的频率。

参考 Ar⁺ 激光是用三次谐波锁定到同一 I₂ 的超精细分量上的。此碘稳定的 Ar⁺ 激光系统的不确定性和重复性优于 $\pm 4 \times 10^{-11}$ ^[4]。借助上述两激光系统的拍频可测待研究的 Ar⁺ 激光系统的频率稳定性。

两种调制实现的区别在于: 在 AM 中, AOM 是一幅度调制器。调制源是由一 RF 信号发生器和一功率放大器组成, 射频信号的幅度被一低频信号调制。在 FM 中, AOM 是一频率调制器。调制源组成相同, 但射频信号的频率被低频信号调制。RF 的调幅由混频器完成。RF 的调频是由压控振荡器完成。在 AM 光谱学中, 当调制频率高于谱线自然宽度时, 这 HFS 信号降低, 所以在本实验中, 调制频率被限制在低于 130 kHz^[2, 3]。

三、结 果

幅度调制

接收到的 ω_3 和 ω_4 的差拍信号被锁定放大器 1 以 Ω_m 为参考频率检测出, 其形式为: 当与参考信号同位相时得吸收信号, 当 90° 位相时, 得色散型信号, 示于图 2。实验中发现当增加调制频率时, 色散信号的幅度随之增加。当调制频率为 1 MHz 时, 吸收、色散信号都将分裂 $3\Omega_m$ 成双线形式^[2], 这种信号适宜作频率差的标记。

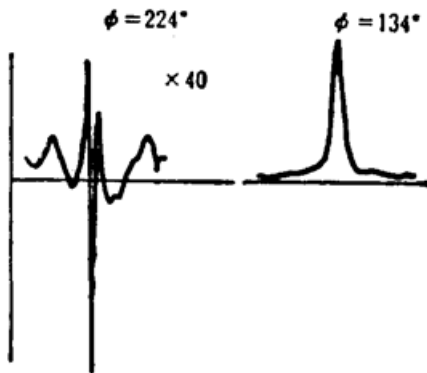


Fig. 2 With AM method, the obtained heterodyne saturated signals of component a_3 for $P(13)43-0$ of $^{127}\text{I}_2$ for $\Omega_m = 125\text{kHz}$, on the left at phase $\phi = 224^\circ$ the vertical scale of the dispersion signal is enlarged 40 times, the absorption signal when $\phi = 134^\circ$ on the right

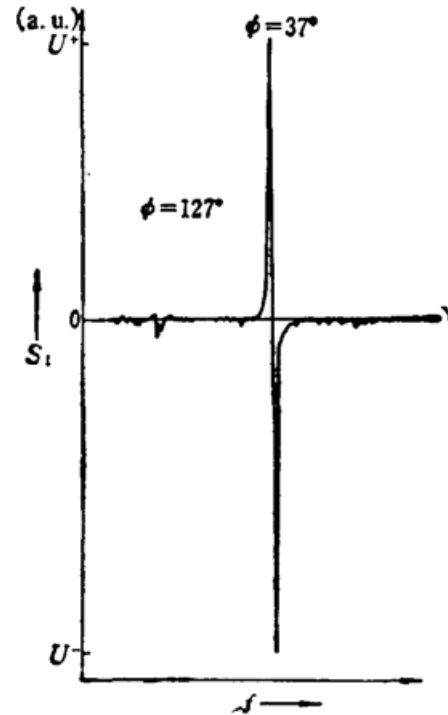


Fig. 3 With FM method, the obtained heterodyne saturated signal of component a_3 of $P(13)43-0$ of $^{127}\text{I}_2$

频率调制

从探测束方向接收到的差拍信号以调制频率 Ω_m 作为参考信号, 从锁定放大器输出中得到 $^{127}\text{I}_2$ 分子的 $P(13)43-0$ a_3 超精细分量的饱和吸收信号, 在相位 $\phi = 127^\circ$ 时, 吸收信号幅度很小, 在 $\phi = 37^\circ$ 时, 信号呈一阶微商形式, 示于图 3。可看出它具有十分陡的斜率, 是理想的稳频用鉴频曲线。但该曲线的正负幅度不等, 同时零点没有偏移, 这将使稳频后有少量频偏, 必须排除。

可证明 FM 信号的不对称原因是在 FM 中有残存的幅度调制(简称 RAM)引起的。用接收器 D_2 和锁定放大器 2 监视泵束信号, 可测得在泵束 FM 中有 1~3% 调制度的 RAM, 见图 4。图中示出在同一调制频率 Ω_m 下, 调制深度 δ 越大, 测得的 RAM 的调制度 M_i 越大。由前面幅度调制结果可知, 当激光频率满足谐振条件时, 系统会产生如图 2 所示形式的谐振吸收信号, 当这 RAM 的吸收信号与 FM 的谐振信号相叠加时, 则会产生正负幅度不等且零点并不偏移的信号结果。

通过精细地微调 AOM 的入射角, 同时保证泵束和探测束在吸收室内很好重合且反向,

Table 1

Incident angle of AOM	$\theta - (\sim 2\alpha)$	$\theta - \alpha$	θ	$\theta + (\sim \alpha)$	$\theta + (\sim 2\alpha)$
Amplitude RAM signal (V)	+7.25	+6.3	0	-5.3	-7.25
Amplitude of FM signal	A+(V)	0.85	1.0	1.55	1.6
	A-(V)	1.1	1.2	1.55	1.4
Power of pump beam (mW)	2.2	2.4	3.65	3.7	3.55

α —the small angle; θ —the diffraction angle, which satisfies the formula $2\Delta\sin\theta = \lambda/n$ [6], there Δ —acoustic wavelength, λ —optical wavelength, n —refractive index of the AOM. $\theta \cong (5.4)'$ for flint glass.

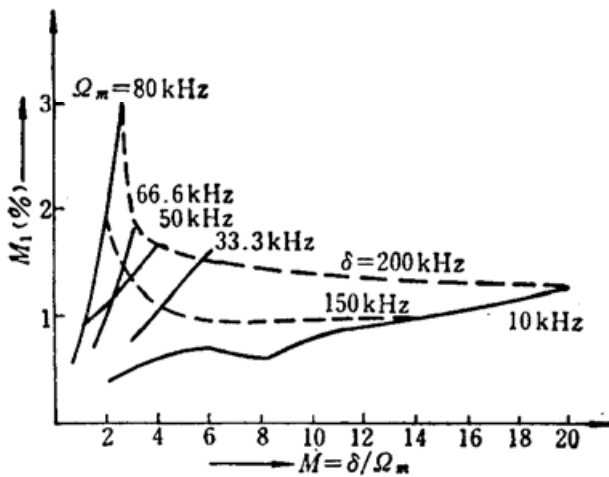


Fig. 4 Measured residual amplitude modulation in FM, the horizontal axis expresses the modulation index M of the FM, the vertical axis the level M_1 of amplitude modulation of RAM

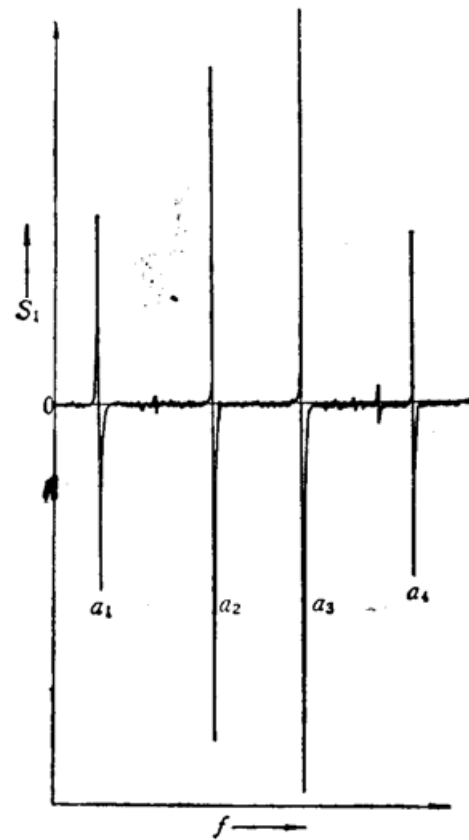


Fig. 5 Hyperfine components a_1 , a_2 , a_3 and a_4 of $P(13)43-0$ of $^{127}\text{I}_2$ in low-frequency regime, modulation frequency $\Omega_m = 50$ kHz, modulation depth $\delta = 200$ kHz

可几乎完全排除 RAM, 从而获得对称的 FM 信号(见表 1)。从表 1 看出, 在入射角严格为声波的一级衍射角 θ 时^[6], 非谐振的 RAM 信号幅度为零, 此时 FM 信号的正负幅度相等, 泵束功率接近 +1 级衍射最大功率。表中入射角为 θ 时功率不是严格的最大功率是因为两束光路调整仍不是最佳状况。

在 AOM 和 PSP 前面各放一 $\lambda/4$ 波片, 用两个分开位置的 $\lambda/4$ 波片代替一 $\lambda/2$ 波片, 同时克服了 AOM 的第一个面带来的光反馈。最终获得的 FM 信号的信噪比约为 100(在 0.1 μ s 取样时间)残余的噪声主要是散粒噪声类型。图 5 示出在入射角为 θ 时, 即没有 RAM 信号时, $^{127}\text{I}_2$ 分子的 $P(13)43-0$ 的 a_1 , a_2 , a_3 , a_4 超精细分量的 FM 饱和吸收信号。

使用上述 FM 信号作为鉴频曲线将工作 Ar^+ 激光频率稳在 $^{127}\text{I}_2$ 分子的 $P(13)43-0$ 的 a_3

线上,借助与参考稳频氩离子激光之间的拍频,得到该激光的频率稳定性。在泵束功率约 3.6 mW,探测束功率约 0.54 mW, AOM 频移 $\Delta=40.000$ MHz,调制频率 $\Omega_m=50$ kHz,调制深度 $\delta=200$ kHz,两激光系统碘室压力均为 4.12 Pa 时,锁定放大器的积分时间为 300 ms,测得拍频平均值为

$$\bar{\nu}=20.0037 \text{ MHz} \pm 83 \text{ kHz} \quad (\tau=0.15 \text{ s}, N=1000)$$

在取样时间分别为 $\tau=1.5$ s, 15 s 和 150 s,测量次数 N 分别为 100, 100 和 10 时,阿仑方差分别为 $\pm 1.5 \times 10^{-11}$, $\pm 4.7 \times 10^{-12}$, 和 $\pm 1.4 \times 10^{-12}$ 。上述结果中 $\tau=0.15$ s 的频率稳定性明显变坏是因为参考激光系统中参考腔预稳线路部分工作状态不佳。

感谢 Prof. Dr. Helmcke 和 Dr. Riehle 提供的实验方便和有益讨论。

参 考 文 献

- 1 J. L. Hall *et al.*, *Journal De Physique*, **38**, C8~59(1981)
- 2 J. J. Snyder *et al.*, *Opt. Lett.*, **5**(4), 163(1980)
- 3 G. Came *et al.*, *Rev. Phys. Appl.*, **17**, 357(1982)
- 4 F. Spiewecke, PTB-Mitteilungen 91 5/81 p.336; F. Spieweck, *IEEE Trans.on Instr. & Measur.*, **IM-27** (4), 398 (1978)
- 5 G. Came *et al.*, *Opt. Commun.*, **41** (5), 325 (1982)
- 6 Amnon Yariv, *Optical Waves in Crystals*, 330