

碘分子在 $^3\text{He}-^{22}\text{Ne}$ 激光辐射 640 nm 范围内的超精细结构谱线及初步分类*

赵克功 李 梓
(中国计量科学研究院) (西北大学物理系)

提 要

碘吸收室处于 $^3\text{He}-^{22}\text{Ne}$ 激光谐振腔内。当对激光辐射的 640 nm 波长扫描时, 观测到碘分子的强的超精细吸收谱线。在 640 nm 范围碘蒸气压为 27 Pa 时, 相对饱和吸收峰高可达 10%。在 612 nm 范围内的饱和吸收很弱。

一、引 言

Bennett 和 Cérez 及赵克功、Gläser 和 Helmcke 利用饱和吸收技术于 1979 年曾观测过 $^{127}\text{I}_2$ 和 $^{129}\text{I}_2$ 在 $^3\text{He}-^{20}\text{Ne}$ 激光辐射 612 nm 和 640 nm 范围内的超精细结构谱线。碘在 640 nm 范围内的吸收系数小, 只有当碘蒸气压高达 35 Pa、吸收室管壁温度增至 270°C 时, 才观测到相对峰高为 0.2% 和 0.5% 的吸收线。但在 612 nm 范围他们得到了 $^{127}\text{I}_2$ $X \rightarrow B$ 电子态跃迁 $R(47)9-2$ 带 21 条和 $^{129}\text{I}_2$ $X \rightarrow BP(110)10-2$ 带 28 条强超精细吸收谱线, 相对峰高分别可达 10% 和 7%^[1,2]。这比碘在 633 nm 范围的吸收约强 250 倍。利用 $^{127}\text{I}_2$ $R(47)9-2$ 带的“0”分量和 $^{129}\text{I}_2$ $P(110)10-2$ 带的 a_1 和 a_2 分量^[3]对激光进行稳频, 频率稳定性达到 2×10^{-13} , 复现性优于 1×10^{-12} 。由赵克功等人研制的碘稳定 612 nm $^3\text{He}-^{20}\text{Ne}$ 激光系统已被推荐为直接复现新的米定义**的国际波长标准^[4,5]。

作者于 1982 年 6 月初, 在中国计量科学院实验室中再次利用饱和吸收技术, 首次观测了 $^{127}\text{I}_2$ 在 $^3\text{He}-^{22}\text{Ne}$ 激光辐射 640 nm 波长范围的 15 条超精细结构谱线^[6]。碘在这一波段的吸收系数较大, 可以利用这些稳定的强吸收谱线作为参考, 实现对 640 nm $^3\text{He}-^{22}\text{Ne}$ 激光频率的稳定, 建立新的 640 nm 国际波长标准。

二、碘稳定 640 nm $^3\text{He}-^{22}\text{Ne}$ 激光装置

He-Ne 激光器采用了外腔管结构。在腔内加棱镜作为色散元件, 得到了 612 nm、630 nm、633 nm 和 640 nm 四种不同波长的激光输出, 它们分别对应着 Ne 原子从 $3S_2$ 能

收稿日期: 1982 年 10 月 31 日; 收到修改稿日期: 1983 年 1 月 31 日

* 本文在 '83 ICL (中国, 广州) 上宣读

** 新的米定义^[5](1982 年 6 月第七届国际米定义咨询委员会批准推荐): “米是光在真空中在 $1/299792458$ 秒时间间隔内行走的长度”。

级到 $2P_6$ 、 $2P_5$ 、 $2P_4$ 和 $2P_2$ 的辐射跃迁。我们对 $^3\text{He}-^{20}\text{Ne}$ 增益管进行了参数测量, 结果见表 1。

表 1 $^3\text{He}-^{20}\text{Ne}$ 多谱线激光器部分参数

Table 1 The partial characteristics of the $^3\text{He}-^{20}\text{Ne}$ laser with multi-wavelength output

激光输出波长 $\lambda(\text{nm})$	小信号增益系数 G (管长 $l=430\text{ nm}$, 直径 $d=1.4\text{ mm}$, 充气 $^{20}\text{He}=8:1$)	饱和参量 $I_0(\text{W/m}^2)$	
		非平均加宽	均匀加宽
611.9703	0.017	3.07×10^5	
629.5480	0.023		
632.9909	0.200		2.3×10^5
640.2839	0.066		

为了得到与 $^3\text{He}-^{20}\text{Ne}$ 激光输出不同的增益波长范围, 我们使用了 $^3\text{He}-^{22}\text{Ne}$ 激光管。由于 Ne 的同位素线移, 其输出的激光频率向高频端偏移约千兆赫。激光增益管长 350 mm, 吸收室长 90 mm, 吸收室内分别充有 $^{127}\text{I}_2$ 和 $^{129}\text{I}_2$ 。吸收室处于 20°C 的室温。利用 SF_{10} 色散棱镜进行波长选择。激光器腔长 550 mm, 两端反射镜的反射率均为 99.8%, 曲率半径为 1.2 m。

由表 1 可知 640 nm 激光增益是 612 nm 激光增益的 4 倍左右, 因此激光管还可进一步缩短。装置如图 1 所示。

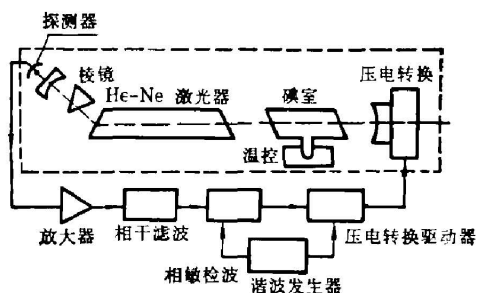


图 1 碘稳定 640 nm $^3\text{He}-^{22}\text{Ne}$ 激光器方框图

Fig. 1 Diagram of 640 nm $^3\text{He}-^{22}\text{Ne}$ laser stabilized by iodine absorption line



图 2 $^{127}\text{I}_2$ 吸收室处于 $^3\text{He}-^{22}\text{Ne}$ 激光谐振腔内的功率调谐曲线
(碘室温度为 20°C , 碘蒸气压力为 27 Pa, 吸收峰相对高度约为 10%)

Fig. 2 The power modulation curve of the $^3\text{He}-^{22}\text{Ne}$ laser with $^{127}\text{I}_2$ absorption cell in the cavity (The temperature of the cell is 20°C , the vapor pressure is 27 Pa and the contrast of the absorption peaks is about 10%)

三、 $^{127}\text{I}_2$ 在 $^3\text{He}-^{22}\text{Ne}$ 激光辐射 640 nm 范围内的超精细结构谱线

图 2 是 $^3\text{He}-^{22}\text{Ne}$ 激光器 640 nm 波长输出一个纵模间隔内的功率调谐曲线, $^{127}\text{I}_2$ 吸收

室置于激光腔内。图中强的反兰姆凹陷尖峰即对应着 $^{127}\text{I}_2$ 分子的饱和吸收超精细结构谱线。扫过不同的纵模间隔, 初步找到 15 条谱线, 它们可作为激光稳频的参考谱线。由于这些谱线比 $^{127}\text{I}_2$ 在 633 nm 范围的吸收谱线要强 200 倍左右, 且吸收室不用致冷, 因此可望在较为简易的实验装置上进行稳频实验, 并达到高于 10^{-12} 的稳定性。

四、对所观测超精细结构谱线的初步分类

分类分析的第一步是判断谱线属于哪一电子跃迁振转带。计算分子电子基态和激发态上的振转能级, 可以得到振转谱线的光谱项值, 进而能够分析在选定波长的激光增益线宽内可能出现的振转谱线。

采用 Dunham 展开式的位能表示, 振动转子的振动项值和转动项值分别为^[7]

$$T_v = \sum_{l=1} G_l (v+1/2)^l, \quad (1)$$

$$T_R = \sum_{L=1} (-1)^{L+1} J^L (J+1)^L \sum_{K=0}^L B_{LK} (v+L/2)^K, \quad (2)$$

其中 v 、 J 分别是振动及转动量子数, G_l 、 B_{LK} 是分子的振转常数, 由实验测定给出。

电子态跃迁振转谱线的光谱项值是

$$T = (T'_v - T''_v) + (T'_v - T''_v) + (T'_R - T''_R), \quad (3)$$

角标 “'” 和 “''” 分别标志激发态和基态的对应值。 T_e 是电子态能量, 亦由实验测定。这里对应的碘分子电子跃迁是由 $X^1\Sigma_g^+ \rightarrow B^3\Pi_{u,2}^+$ 态的跃迁。

对于 $^{127}\text{I}_2$ 分子, 当 $0 \leq v'' \leq 9$ (基态)、 $1 \leq v' \leq 62$ (激发态) 和 $J \leq 150$ 时, 用 Luc^[8] 提供的一组电子态能量 T_e 及分子振转常数 G_l 、 B_{LK} 代入 (1)、(2)、(3) 式计算得到的谱线光谱项值与实验观测的绝对偏差小于 4×10^{-7} 。

对于碘的同位素分子 $^{129}\text{I}_2$ 和 ^{127}I 、 ^{129}I 分子, (1)、(2)、(3) 式分别为

$$T_v = \sum_{l=1} \rho^l G_l (v+1/2)^l, \quad (4)$$

$$T_R = \sum_{L=1} (-1)^{L+1} \rho^{2L} J^L (J+1)^L \sum_{K=0}^L \rho^K B_{LK} (v+L/2)^K, \quad (5)$$

其中

$$\rho_{(^{129}\text{I}_2)} = 0.992210002, \quad \rho_{(^{127}\text{I}^{129}\text{I})} = 0.995945386^{[9]}.$$

用 (4)、(5) 式计算可得到振转能量的同位素修正。

电子态能量的同位素修正较为复杂。碘的正常质量修正量级约为

$$\frac{\Delta E_e}{E_e} \cong -\Delta \left(\frac{m}{M} \right) = \frac{m}{M} \Delta M \cong \frac{2}{1840 \times 127^2} \cong 6.7 \times 10^{-8}, \quad (6)$$

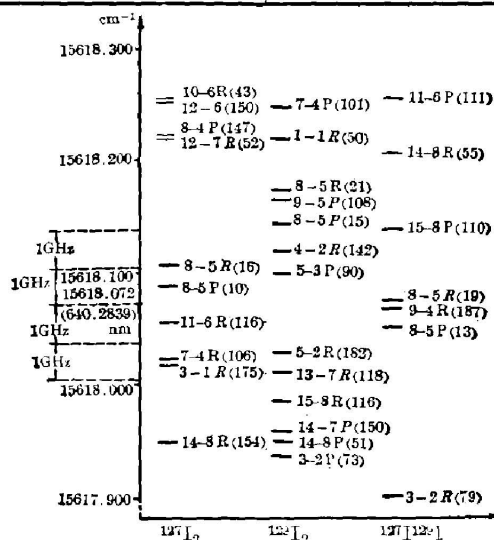
其中 m 、 M 分别为电子及核的质量。设反常质量移动和体积效应移动是同量级, 则电子态能量的同位素修正约在 10^{-8} 量级。由于振转谱项值的计算误差在 10^{-7} 量级, 这里可以略去电子态能量的同位素修正。

用上述公式分别计算得到的 $^{127}\text{I}_2$ 、 $^{129}\text{I}_2$ 及 $^{127}\text{I}^{129}\text{I}$ 分子在 He-Ne 激光器输出的 640 nm 波长附近可能出现的振转带如表 2 及图 3 所示。

根据上述计算结果和 ^{23}Ne 相对于 ^{20}Ne 向高频端的同位素线移, $^{127}\text{I}_2$ 在 $^3\text{He}-^{22}\text{Ne}$ 激光辐射 640 nm 范围内的 15 条超精细结构谱线, 可能对应着 $^{127}\text{I}_2$ 分子 $P(10)8-5$ 带或 $R(16)8-5$ 带的跃迁。

表 2 $^{127}\text{I}_2$, $^{127}\text{I}^{129}\text{I}$ 和 $^{129}\text{I}_2$ 在 He-Ne 激光辐射 640.28 nm范围可能出现的 $X \rightarrow B$ 电子跃迁振转带Table 2 The possible vibration-rotation bands of $^{127}\text{I}_2$, $^{127}\text{I}^{129}\text{I}$ and $^{129}\text{I}_2$ $X \rightarrow B$ transition at 640.28 nm output from He-Ne laser

	$v'-v''$	(J'')	$T(\text{cm}^{-1})$	$\lambda(\text{nm})$		$v'-v''$	(J'')	$T(\text{cm}^{-1})$	$\lambda(\text{nm})$
$^{127}\text{I}_2$	14-8	R(54)	15617.9489	640.2889	$^{129}\text{I}_2$	3-2	R(73)	15617.9402	640.2893
	3-1	R(175)	15618.0175	640.2861		14-8	P(51)	15617.9524	640.2888
	7-4	R(106)	15618.0209	640.2860		14-7	P(150)	15617.9611	640.2884
	11-6	R(116)	15618.0540	640.2846		15-8	R(116)	15617.9881	640.2873
	8-5	P(10)	15618.0877	640.2833		13-7	R(118)	15618.0134	640.2863
	8-5	R(16)	15618.1065	640.2825		5-2	R(182)	15618.0299	640.2856
	12-7	R(52)	15618.2187	640.2779		5-3	P(90)	15618.1010	640.2827
	8-4	P(147)	15618.2205	640.2778		4-2	R(142)	15618.1209	640.2819
	12-6	P(150)	15618.2500	640.2766		8-5	P(15)	15618.1465	640.2808
	12-6	R(43)	15618.2539	640.2764		9-5	P(108)	15618.1657	640.2801
$^{127}\text{I}^{129}\text{I}$	3-2	R(79)	15617.9035	640.2908		8-5	R(21)	15618.1736	640.2797
	8-5	P(13)	15618.0518	640.2847		1-1	R(50)	15618.2203	640.2778
	9-4	R(187)	15618.0655	640.2842		7-4	P(101)	15618.2485	640.2767
	8-5	R(19)	15618.0753	640.2838					
	15-3	P(110)	15618.1408	640.2811					
	14-8	R(55)	15618.2074	640.2783					
	11-6	P(111)	15618.2560	640.2764					

 $^{20}\text{Ne } 3S_2 \rightarrow 2P_2$ 跃迁波长 640.2839 nm, 折合波数 15618.072 cm^{-1} 1 GHz $\approx 0.0334 \text{ cm}^{-1}$ 图 3 $^{127}\text{I}_2$, $^{129}\text{I}_2$ 和 $^{127}\text{I}^{129}\text{I}$ 分子在 He-Ne 激光辐射 640.28 nm可能出现的 $X \rightarrow B$ 跃迁振转带图示Fig. 3 The possible vibration-rotation bands of $^{127}\text{I}_2$, $^{129}\text{I}_2$ and $^{127}\text{I}^{129}\text{I}$ at 640.28 nm output from He-Ne laser

五、讨 论

本文报导了由作者首先观测到的 $^{127}\text{I}_2$ 在 $^3\text{He}-^{22}\text{Ne}$ 激光辐射 640 nm 范围内的超精细结构谱线,并对它们进行分类的初步计算。根据计算,它们可能是属于 $X^1\Sigma_g^+ \rightarrow B^3\Pi_{ou}^+$ 电子态跃迁 $P(10)8-5$ 带或 $R(16)8-5$ 带的跃迁。在对超精细谱线间隔进行高精度测量并对超精细结构进行计算之后,可以得出谱线分类的最终结论。

为了选择良好的激光稳频参考谱线,还将对谱线线型、线宽进行测量和分析。这些工作将逐步进行和发表。

参 考 文 献

- [1] S. J. Bennett, P. C6rez; *Opt. Commun.*, 1978, **25**, No. 3 (Jun), 343.
- [2] K. Dschao, M. Glaser *et al.*; *IEEE Trans Instrum. & Measu.*, 1980, **IM-29**, No. 4 (Dec), 354.
- [3] M. Glaser, K. Dschao *et al.*; *Opt. Commun.*, 1981, **38**, No. 2 (Jul), 119.
- [4] *Comité Consultatif pour la Definition du Metre*, 7e Session (3~4, Juin 1982).
- [5] *Com. Int. Poids Mes.*, CODM 7e Session, 1982, Recomam, M1 and M2.
- [6] 赵克功, 许捷等; *计量学报*, 1982, **3**, No. 4 (10月), 322.
- [7] G. Herzberg; *Molecular Spectra and Molecular Structures*, (D. van Nostrand Company, New York, Second Edition, 1950), Vol. 1, 107.
- [8] P. Luc; *J. Mol. Spectrosc.*, 1980, **80**, No. 1 (Mar), 41.
- [9] M. Tesic, Yoh-Han Pao; *J. Mol. Spectrosc.*, 1975, **57**, No. 1 (Jul), 75.

Hyperfine structure of iodine at 640 nm $^3\text{He}-^{22}\text{Ne}$ laser wavelength and identification*

ZHAO KEGONG

LI HUA

(National Institute of Metrology, Beijing) (Department of Physics, North-Western University Xian)

(Received 31 October 1982, revised 31 January 1983)

Abstract

The strong hyperfine structure lines of iodine-127 at 640 nm is observed by saturated absorption technique. The $^{127}\text{I}_2$ cell is placed in a $^3\text{He}-^{22}\text{Ne}$ laser cavity, while the laser is modified to operate at 640 nm. The observed saturated absorption peaks have a contrast of 10% at pressure of 27 Pa. The saturated absorption at 612 nm is weak.

* This paper was presented at '83 ICL (Guangzhou, China)