

原子束激光诱导荧光法测锂原子 $2^2P \leftarrow 2^2S$ 跃迁的超精细结构和同位素位移

李明光 王荫德 王崇业 李 丽 史方永 余世英
黄上俊 蔡增良 李君翔 冯 泽 张 一 朱清时

(中国科学院青海盐湖研究所)

提要: 发散角为 4.7×10^{-3} 弧度, 残余多谱勒宽度 7 兆赫的原子束与线宽 6 兆赫的可调谐染料激光正交, 激光频率在 30 千兆赫范围扫描, 测得 ${}^6\text{Li}$ 和 ${}^7\text{Li}$ 的 2^2P 能级的精细结构分裂分别为 9.7 ± 0.4 和 10.5 ± 0.5 千兆赫, $2^2P_{1/2}$ 能级的同位素位移为 10.7 ± 0.6 千兆赫。激光频率作 2.5 千兆赫扫描, 测得 ${}^7\text{Li}$ 的 $2^2P_{1/2} \leftarrow 2^2S_{1/2}$ 跃迁的四条超精细结构谱线的间距依次为 88 ± 11 、 730 ± 73 和 92 ± 7 兆赫, 当光强为 4 毫瓦/厘米² 时, 记录的谱线宽度为 22 兆赫。对影响谱线宽度、相对强度及测量精度的一些因素也进行了讨论。

Measurement of fine and hyperfine structures and isotope shift in $2^2P \leftarrow 2^2S$ transition of lithium by laser induced fluorescence of atomic beams

*Li Mingguang, Wang Yinde, Wang Chongye, Li Li, Shi Fangyong, Yu Shiyong,
Huang Shanjun, Cai Zengliang, Li Junxiang, Feng Ze, Zhang Yi, Zhu Qingshi*

(Qinghai Institute of Salt Lake, Academia Sinica)

Abstract: When a CW tunable dye laser beam with a linewidth of 6 MHz and a divergence of 4.7×10^{-3} radian irradiated across a Li atomic beam at right angle and scanned at the 30 GHz range, we recorded the fine and hyperfine structure of the transitions. Fine splittings in 2^2P terms of ${}^6\text{Li}$ and ${}^7\text{Li}$ have been measured to be 9.7 ± 0.4 GHz and 10.5 ± 0.5 GHz, respectively, and the isotope shift of $2^2P_{1/2}$ term being 10.7 ± 0.6 GHz. With a scanning range of 2.5 GHz, spacings of the successive lines of ${}^7\text{Li}$ $2^2P_{1/2} \leftarrow 2^2S_{1/2}$ transitions have been measured to be 88 ± 11 MHz, 730 ± 73 MHz and 92 ± 7 MHz, respectively. With a laser intensity of 4 mW/cm^2 and the oven temperature of 460°C , the recorded linewidth was about 22 MHz. A number of factors affecting the linewidth, the relative strength of lines and the accuracy of measurement are discussed.

在原子束激光光谱学中, 最常用来检测激光与原子束相互作用的方法之一是荧光法。利用这种方法已对 Na、K、Rb 等碱金

属及其它金属元素的超精细分裂作了详细研究。Li 是碱金属中电子结构最简单的元素,

收稿日期: 1981 年 7 月 31 日。

但由于各种原因,对它的研究比对其它碱金属要困难。H. Walther^[1]和他的同事用两个连续染料激光分步激发荧光监测的方法,对Li的 3^2D 能级的超精细结构进行了测定。R. Mariella, Jr^[2]利用Li原子束空间分辨的激光荧光和饱和吸收法对Li的 2^2P 态进行了观测。

我们利用原子束激光诱导荧光法观测了 ^6Li 和 ^7Li 的 $2^2P \leftarrow 2^2S$ 跃迁的超精细结构,本文给出了主要的实验结果。

实验装置及方法

图1为实验装置示意图。

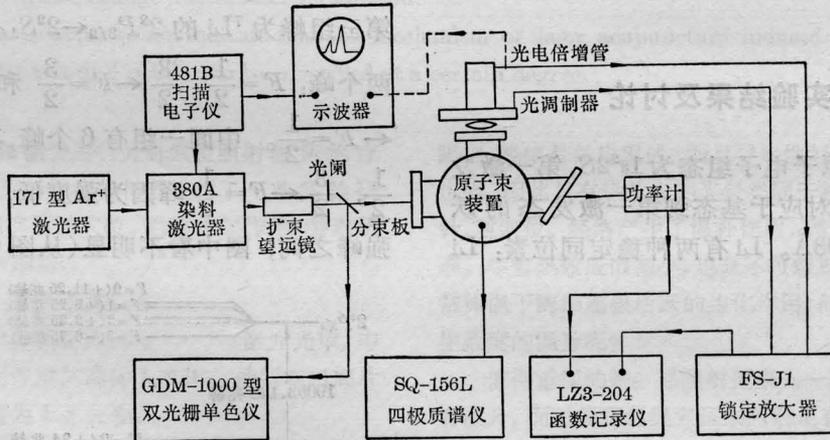


图1 实验装置示意图

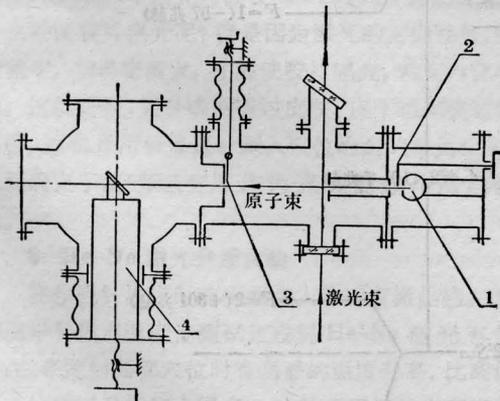


图2 原子束装置主体示意图

1—炉体; 2—挡板; 3—插板阀;
4—SQ156L四极质谱仪探头

原子束装置由炉室、束室和质谱室组成(图2)。三个室分别用三个机组抽真空,残余气压分别小于 8×10^{-6} 、 2×10^{-6} 和 3×10^{-7} 托。炉室内有真空钼丝加热的不锈钢锂炉,炉内置一盛放金属Li的不锈钢坩锅,炉侧面有高3毫米、宽0.3毫米出射狭缝,Li原子蒸气由此狭缝出射,经一个连通小孔进入束室,再经一高3毫米、宽0.3毫米的准直狭缝准直成束,两狭缝相距135毫米。束室安有激光窗口,激光通过窗口射入束室而与原子束正交;激光出射窗口成布儒斯特角,以消除反射光对荧光信号的干扰。在原子束与激光作用区的正上方有荧光接收窗口。束室与质谱室之间有微型插板阀,打开插板阀,原

子束可进入质谱室。可移动的四极探头用来测原子束的束形、发散角及束中同位素丰度比。Li原子束发生、检测的详细结果已在[3]中讨论。本实验用天然丰度金属锂。

使用美国光谱物理公司制造的380A环形染料激光器,由该公司171-09型 Ar^+ 激光器泵浦。激光染料为DCM^[4],浓度 2.5×10^{-3} 莫尔,溶剂为80%乙二醇,20%二甲亚砷。为了初步确定激光的波长,使用一台分辨率 0.5 厘米^{-1} 的GDM1000型双光栅单色仪。为了消除杂散光干扰,提高荧光的信噪比,在荧光区加置了一个涂黑的铝管,其结构

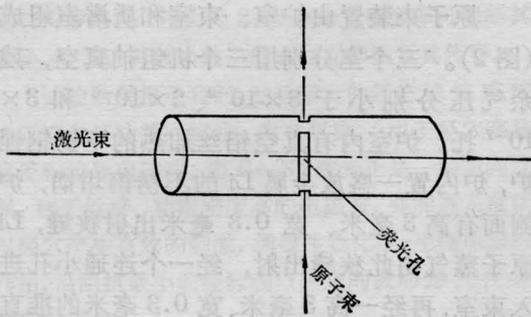


图3 涂黑的铝管

如图3。荧光窗口上端为一焦距4.5厘米的聚焦透镜，荧光信号经过调制器(96赫)后，被光电倍增管(9818B型)接收，经锁定放大器(FS-J₁型)放大，最后由函数记录仪或示波器输出。透射激光强度用404型功率计进行监测。

实验结果及讨论

基态锂原子电子组态为 $1s^2 2S$ ，第一激发态为 $1s^2 2P$ ，对应于基态到第一激发态的跃迁波长为 6708\AA 。Li有两种稳定同位素： ${}^7\text{Li}$

的丰度为92.6%，其核自旋 $I=3/2$ ； ${}^6\text{Li}$ 丰度7.4%，核自旋 $I=1$ 。考虑到同位素位移和超精细结构， 6708\AA 线实际上是由若干条线组成的。光谱学家们已用能级交叉法，光学-射频双共振等方法对Li的基态和 2^2P 态的能级进行了详细的测定^[2,5~7]。根据这些数据绘出了关于 ${}^6\text{Li}$ 和 ${}^7\text{Li}$ $2^2P \leftarrow 2^2S$ 跃迁的超精细结构能级图(图4)以及各条谱线的中心频率和相对强度(图5b)。

图5a为锂炉温度 640°C ，激光强度22毫瓦/厘米²时，在30千兆赫范围内对 ${}^6\text{Li}$ 和 ${}^7\text{Li}$ 的 $2^2P \leftarrow 2^2S$ 跃迁的一次全扫描结果。由图可见，一次扫描得到了三组峰。频率最低的一组峰对应于 ${}^6\text{Li}$ $2^2P_{1/2} \leftarrow 2^2S_{1/2}$ ；中间一组对应于 ${}^6\text{Li}$ $2^2P_{3/2} \leftarrow 2^2S_{1/2}$ 和 ${}^7\text{Li}$ $2^2P_{1/2} \leftarrow 2^2S_{1/2}$ ；第三组峰为 ${}^7\text{Li}$ 的 $2^2P_{3/2} \leftarrow 2^2S_{1/2}$ 。第一组有两个峰： $F = \frac{1}{2}, \frac{3}{2} \leftarrow F = \frac{3}{2}, \frac{1}{2}$ 和 $F = \frac{1}{2}, \frac{3}{2} \leftarrow F = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}$ 。中间一组有6个峰，其中 ${}^6\text{Li}$ $F = \frac{1}{2}, \frac{3}{2} \leftarrow F = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}$ 峰因为强度低，又夹在两个强峰之间，图中看不明显(从图6a中可以较

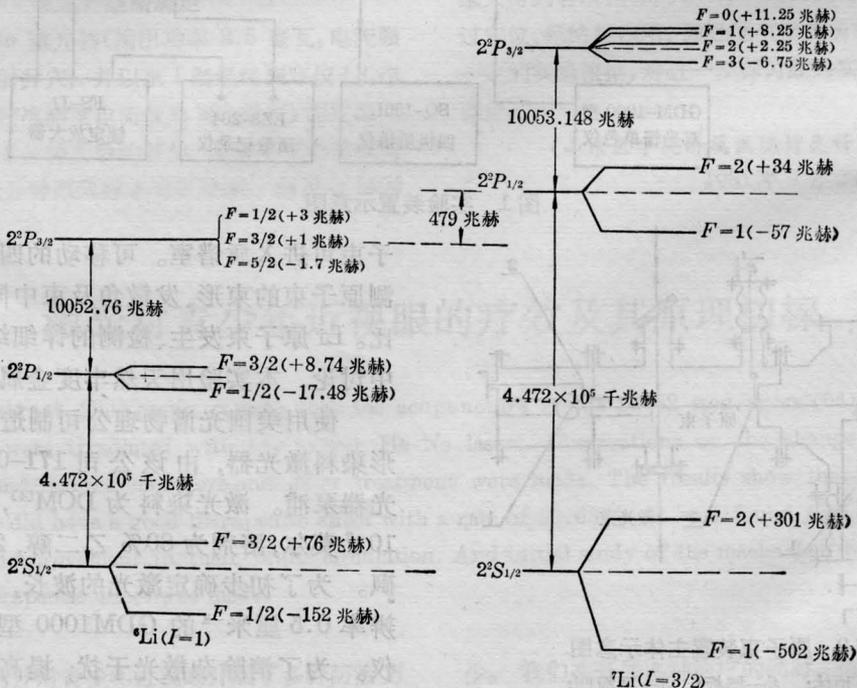


图4 ${}^6\text{Li}$ 、 ${}^7\text{Li}$ $2^2S_{1/2}$ 、 $2^2P_{1/2,3/2}$ 态超精细能级图

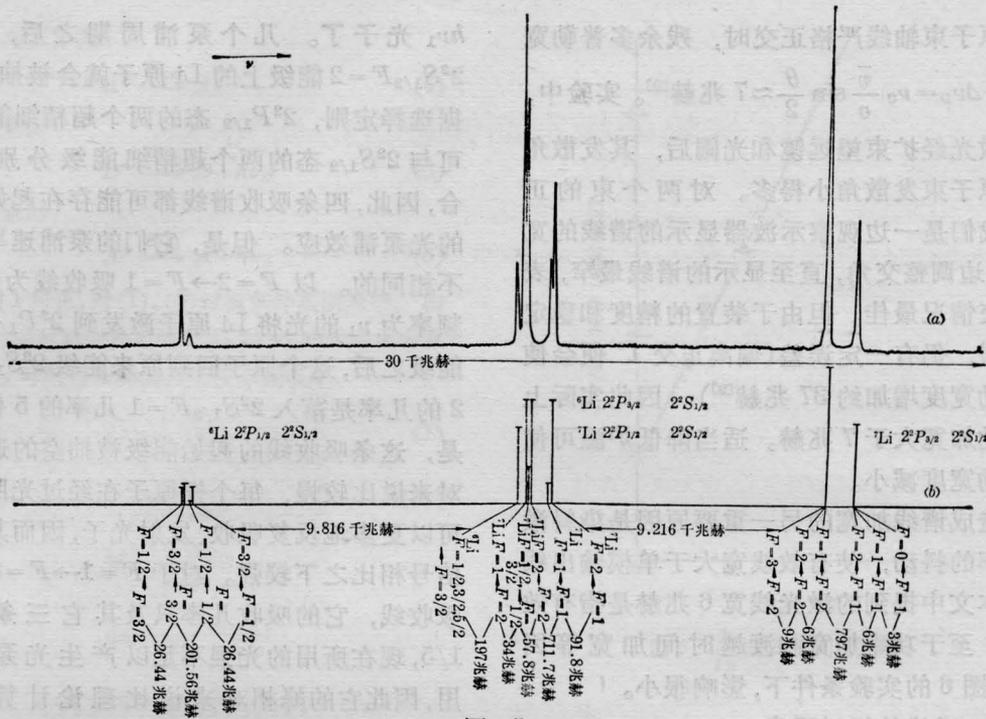


图 5

(a) 锂原子 $2^2P \leftarrow 2^2S$ 跃迁全谱图

(b) 文献结果: 1—各线的高度比即是谱线的相对强度比。凡相距甚近无法分开画出的相邻谱线, 则将它们的高度相加后绘出; 2—属于 ^6Li 的谱线峰高和属于 ^7Li 的谱线峰高之间没有关系, 只是一种定性的表示; 3—第三组峰是按 $\frac{1}{3}$ 的比例画出的

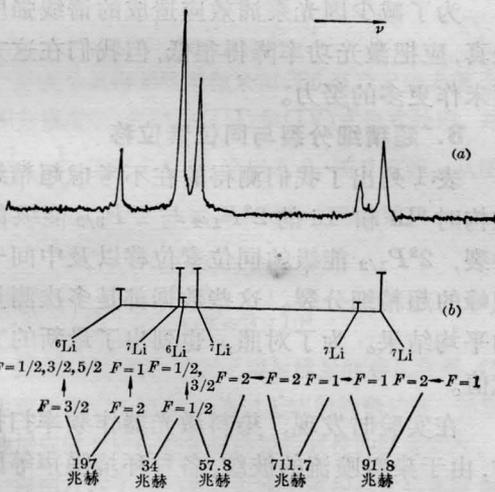


图 6

(a) 第二组峰谱图(扫描范围 2.5 千兆赫)

(b) 文献结果

清楚地看出)。最后一组峰分别对应 ^7Li $2^2P_{3/2} F=3, 2, 1 \leftarrow 2^2S_{1/2} F=2$ 和 $2^2P_{3/2} F=2, 1, 0 \leftarrow 2^2S_{1/2} F=1$, 扫描到这组峰时, 将

锁定放大器放大倍数降低到前面的 $\frac{1}{3}$ 。

图 6 为炉温 460°C , 光强 4 毫瓦/厘米² 时, $^7\text{Li} 2^2P_{1/2} \leftarrow 2^2S_{1/2}$ 和 $^6\text{Li} 2^2P_{3/2} \leftarrow 2^2S_{1/2}$ 的一组峰, 各谱线的平均宽度为 22 兆赫。

下面就谱线的宽度、相对强度及超精细分裂和同位素位移的数值加以讨论。

1. 谱线宽度

Li 原子 2^2P 态的自发辐射寿命为 27 毫微秒^[6], 因此其自然线宽约为 6 兆赫。由图 6 可见, 我们测得的谱线宽度的平均值为 22 兆赫。在本实验中, 谱线增宽的主要原因是多普勒加宽以及激光频率在扫描过程中的抖动。

我们的原子束装置的准直比为 $450:1$, 其发散角 θ 的计算值为 4.5×10^{-3} 弧度, 当锂炉温度 600°C 时, 用可移动的四极探头实测的发散角为 4.7×10^{-3} 弧度。因此, 当激光束的发散角远小于原子束发散角, 且激光

束与原子束轴线严格正交时, 残余多普勒宽度是: $\Delta\nu_D = \nu_0 \frac{\bar{v}}{c} \sin \frac{\theta}{2} \approx 7$ 兆赫^[9]。实验中, 染料激光经扩束望远镜和光阑后, 其发散角确实比原子束发散角小得多。对两个束的正交, 我们是一边观察示波器显示的谱线的宽度, 一边调整交角, 直至显示的谱线最窄, 表明正交情况最佳。但由于装置的精度和稳定性所限, 仍有一定误差(偏离正交 1° 便会使多普勒宽度增加约 37 兆赫^[9])。因此实际上多普勒加宽大于 7 兆赫。适当降低炉温可使多普勒宽度减小。

造成谱线加宽的另一重要原因是染料激光频率的抖动, 使有效线宽大于单模输出线宽, 本文中提到的激光线宽 6 兆赫是指有效线宽。至于功率加宽和渡越时间加宽等因素, 在图 6 的实验条件下, 影响很小。

2. 谱线的相对强度

图 6(a) 中, ${}^7\text{Li}$ 的 $2^2P_{1/2} \leftarrow 2^2S_{1/2}$ 跃迁有 4 条超精细结构吸收谱线, 它们之间的理论线强度之比依次为 100:100:20:100^[8]; 但实验结果与这个比值不符。我们认为, 导致这种结果的主要原因是能级的光泵浦效应。如图 7 所示, 当激光频率调谐到 ν_1 时, 处于 $2^2S_{1/2} F=2$ 态的 Li 原子吸收一个 $h\nu_1$ 光子跃迁到 $2^2P_{1/2} F=1$ 态。当自发辐射返回基态时, 它既可能发射一个相同频率的光子回到原来的能级, 也可能发射一个频率为 ν_2 的光子而落到 $2^2S_{1/2} F=1$ 能级。回到原来能级的 Li 原子可以继续吸收 $h\nu_1$ 光子, 而落到 $2^2S_{1/2} F=1$ 能级上的 Li 原子就不能再吸收

$h\nu_1$ 光子了。几个泵浦周期之后, 处于 $2^2S_{1/2} F=2$ 能级上的 Li 原子就会被抽空。根据选择定则, $2^2P_{1/2}$ 态的两个超精细能级都可与 $2^2S_{1/2}$ 态的两个超精细能级分别相耦合, 因此, 四条吸收谱线都可能存在起始能级的光泵浦效应。但是, 它们的泵浦速率是各不相同的。以 $F=2 \rightarrow F=1$ 吸收线为例, 当频率为 ν_1 的光将 Li 原子激发到 $2^2P_{1/2} F=1$ 能级之后, 这个原子回到原来能级 $2^2S_{1/2} F=2$ 的几率是落入 $2^2S_{1/2} F=1$ 几率的 5 倍, 于是, 这条吸收线的起始能级被抽空的速率相对来说比较慢, 每个锂原子在经过光照区时更多地反复吸收、发射光子, 因而其荧光信号相比之下较强。对于 $F=1 \rightarrow F=1$ 这条吸收线, 它的吸收几率只及其它三条线的 1/5, 现在所用的光强不足以产生光泵浦作用, 因此它的峰相对来说比理论计算的比值高。

在其它两组吸收谱线中也存在类似的情况, 但因邻近谱线相互重叠, 谱图上表现不明显。

为了减少因光泵浦效应造成的谱线强度失真, 应把激光功率降得很低, 但我们在这方面未作更多的努力。

3. 超精细分裂与同位素位移

表 1 列出了我们测得的在不考虑超精细结构时 ${}^6\text{Li}$ 和 ${}^7\text{Li}$ 的 $2^2P_{1/2}$ 与 $2^2P_{3/2}$ 能级的分裂, $2^2P_{1/2}$ 能级的同位素位移以及中间一组峰的超精细分裂。这些数据都是多次测量的平均结果。为了对照, 也列出了最新的文献值。

在实验时发现, 染料激光器作频率扫描时, 由于染料喷流的波纹、各种环境噪声等因素, 会引起输出激光模的抖动, 这是导致精细和超精细结构分裂测量误差的主要原因。激光频率扫描非严格线性, 记录仪走纸速度不完全均匀也要带来误差。采用示波器, 适当加快扫描速度可使情况部分得到改善。

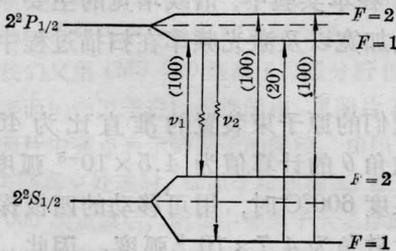


图 7 能级光泵浦示意图

(下转第 433 页)

在较为稳固的基本原理的基础之上；并可看出它们可能的计算精度和必须的近似条件。

参 考 文 献

- [1] A. Mactland, M. H. Dunn; *Laser Physic*, North-Holland Publishing Campany Amsterdam-London, 1969, p.366~367.
 [2] B. B. Baker, E. T. Capson; *The Mathematical*

- Theory of Huygens Principle*, Oxford, 1950.
 [3] Fox Li; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1966, **QE-2**, No. 12, 774~783; D. B. Rensch; *Appl. Opt.*, 1974, **13**, No. 11, 2546~2561; A. E. Siegman *et al.*; *Appl. Opt.*, 1974, **13**, No. 12, 2775; A. E. Siegman *et al.*; *Appl. Opt.*, 1975, **14**, No. 8, 1874~1889; Clark *et al.*; *AIAA Paper*, 1972, No. 72~708; 吴中祥;《物理学报》,1980, **29**,No. 3, 882; 394.

(上接第 438 页)

表 1

	本实验结果	文献值
${}^6\text{Li } 2^2P_{1/2}$ 和 $2^2P_{3/2}$ 能级分裂	9.7 ± 0.4 千兆赫	10.053 千兆赫
${}^7\text{Li } 2^2P_{1/2}$ 和 $2^2P_{3/2}$ 能级分裂	10.5 ± 0.5 千兆赫	10.053 千兆赫
$2^2P_{1/2}$ 能级同位素位移	10.7 ± 0.6 千兆赫	10.532 千兆赫
${}^6\text{Li } 2^2P_{3/2}F = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2} \leftarrow 2^2S_{1/2}F = \frac{3}{2}$ 线与 ${}^7\text{Li } 2^2P_{1/2}F = 1 \leftarrow 2^2S_{1/2}F = 2$ 线的间距	223 ± 22 兆赫	197 兆赫
${}^7\text{Li } 2^2P_{1/2}F = 1 \leftarrow 2^2S_{1/2}F = 2$ 线与 $2^2P_{1/2}F = 2 \leftarrow 2^2S_{1/2}F = 2$ 线的间距	88 ± 11 兆赫	91.8 兆赫
${}^7\text{Li } 2^2P_{1/2}F = 2 \leftarrow 2^2S_{1/2}F = 2$ 线与 $2^2P_{1/2}F = 1 \leftarrow 2^2S_{1/2}F = 1$ 线的间距	730 ± 73 兆赫	711.7 兆赫
${}^7\text{Li } 2^2P_{1/2}F = 1 \leftarrow 2^2S_{1/2}F = 1$ 线与 $2^2P_{1/2}F = 2 \leftarrow 2^2S_{1/2}F = 1$ 线的间距	92 ± 7 兆赫	91.8 兆赫

参 考 文 献

- [1] Herbert Walther *et al.*; "Laser Spectroscopy", Second International Conference, Megeve, June 1975, 23~27.
 [2] R. Mariella, Jr., *Appl. Phys. Lett.*, 1979, **35**, No. 8, 580~582.
 [3] 王荫德等;《真空科学与技术》, 1982, No2. 73~76.
 [4] P. R. Hammond; *Opt. Commun.*, 1979, **29**, No.

- 2, 331.
 [5] H. Orth *et al.*; *Z. Physik*, 1975, **A273**, 221.
 [6] K. C. Brog *et al.*; *Phys. Rev.*, 1967, **153**, No. 1, 91.
 [7] G. J. Ritter; *Can. J. Phys.*, 1965, **43**, 770.
 [8] E. U. Condon, G. H. Shortley; "The Theory of Atomic Spectra", Cambridge, 1957.
 [9] K. Shimoda; "High-Resolution Laser Spectroscopy", Springer - Verlag, Berlin, Heidelberg New York 1976.