

基于铷原子双光子跃迁的原子谱线展宽机制教学演示

王铿淇 郭进先

(上海交通大学物理与天文学院, 上海 200240)

摘 要 测量原子光谱是揭示微观粒子微观结构与运动规律的重要手段, 因而从本科到研究生阶段都会涉及到相关领域的教学, 特别是光谱的相关教学。然而, 由多普勒效应等引起的非均匀展宽及原子碰撞等引起的均匀展宽极大限制了谱线的分辨精度。在科学技术的发展中, 为了获得更高的分辨精度, 消除原子谱线的展宽成为重点研究方向。而在相关教学方面, 碱金属原子体系由于其优异的能级特性, 成为了研究展宽机制的有效途径。而在目前的本科教学中, 缺乏除对多普勒展宽以外的多种原子谱线展宽机制的演示。因此, 本文利用铷原子 $5S_{1/2} \rightarrow 5P_{3/2} \rightarrow 5D_{5/2}$ 双光子跃迁谱线, 测量改变激光功率、原子池温度等条件下引起的原子谱线半宽变化, 验证双光子跃迁的同时, 重点演示了原子谱线展宽的机制以及谱线半宽的测量方法。通过本实验, 本科生一方面可以掌握原子谱线展宽与双光子跃迁的相关知识, 以更深刻地理解了理论知识的内涵, 另一方面通过自主搭建实验仪器锻炼了本科生的动手能力, 对提升物理专业本科学生的素养尤为重要。本文所展示的实验装置简单, 易于搭建, 适合课堂演示和实验教学。

关键词 原子谱线展宽; 双光子跃迁; 铷原子; 多普勒效应; 压力展宽; 功率展宽

TEACHING DEMONSTRATION OF SPECTRUM BROADENING IN TWO-PHOTON TRANSITION OF RB

WANG Kengqi GUO Jinxian

(School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

Abstract The measurement of atomic spectrum is an important tool to reveal the microscopic structure and pattern of motion of microscopic particles. Therefore, the teaching of related fields is involved from undergraduate to graduate stage, especially the teaching of spectroscopy. However, nonuniform broadening caused by Doppler effect and uniform broadening caused by atomic collision greatly limit the resolution of the spectral lines. In the development of science and technology, in order to obtain higher resolution, it is necessary to eliminate the broadening of atomic spectral lines. In the related teaching, two-photon transition in the alkali metal atomic system has become an effective way to study the broadening mechanism due to its excellent energy level characteristics. In the current undergraduate teaching, there is a lack of demonstrations of various atomic line broadening mechanisms besides Doppler broadening.

收稿日期: 2022-05-13

基金项目: 上海市科技英才扬帆计划(19YF1421800)和国家自然科学基金(11904227)资助。

通讯作者: 郭进先, 男, 助理研究员, 主要从事教学与科学研究工作, 研究方向为量子光学、原子分子物理, jxguo@sjtu.edu.cn。

引文格式: 王铿淇, 郭进先. 基于铷原子双光子跃迁的原子谱线展宽机制教学演示[J]. 物理与工程, 2023, 33(2): 119-125.

Cite this article: WANG K Q, GUO J X. Teaching demonstration of spectrum broadening in two-photo transition of Rb[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(2): 119-125. (in Chinese)

In this paper, the rubidium atom $5S_{1/2} \rightarrow 5P_{3/2} \rightarrow 5D_{5/2}$ two-photon transition spectral line is employed to measure the half-width change caused by changing the laser power, the temperature of the atomic cell and magnetic field strength. While verifying the two-photon transition, it focuses on demonstrating the mechanism of the atomic spectral line broadening and the measurement method of the half-width of the spectral line. Through this experiment, on the one hand, undergraduate students can grasp the relevant knowledge of atomic spectral line broadening and two-photon transition and understand the connotation of theoretical knowledge more deeply, and on the other hand, they have trained their hands-on ability by building experimental instruments independently, which is particularly important for improving the quality of undergraduate students majoring in physics. The experimental device shown in this paper is simple, easy to build, and suitable for classroom demonstration and experimental teaching.

Key words atomic spectral line broadening; two-photon transition; rubidium atom; Doppler effect; pressure broadening; power broadening

原子物理作为近代物理学的重要分支,主要研究微观粒子基本结构、运动规律及相互作用。它不仅孕育了量子力学的诞生,更加深了人们对微观世界的认识,甚至直接推动了20世纪至今全世界的科学技术发展,促进了人类社会的进步。因此,在大学物理专业的课程体系中,原子物理是物理学专业本科生必修的一门专业基础课。

回首人类认识微观粒子的过程,由于研究对象为微观结构,导致其运动规律不具有宏观物体运动的直观性。为了揭开微观世界的神秘面纱,通常需要借助光场激发原子从而获得相关信息^[1]。光场能够驱动原子在能级间跃迁,同时伴随着能量的吸收和辐射,由此绘制光的频率成分和光强分布的谱线图。然而,由于原子的热运动,使得该原子谱线出现多普勒展宽^[2],导致原子的精细结构被隐藏而无法观测到。为了克服这种展宽,人们常用两束反向传输的光同时与原子相互作用消除多普勒展宽^[3]。结合相干性高、方向性好、亮度高、单色性好的激光,如可调谐激光器,人们在实验上实现了多普勒消除的原子光谱^[4]。

近年来,随着人们对原子精细结构认识的加深,在碱金属原子体系中开展了无多普勒谱线展宽(Doppler free spectra)的教学演示工作越来越普遍。例如,利用饱和吸收谱获得铷原子 $5S_{1/2} \rightarrow 5P_{3/2}$ 的能级结构^[5] 和利用双光子吸收光谱获得铷原子 $5S_{1/2} \rightarrow 5P_{3/2} \rightarrow 5D_{5/2}$ 的能级结构^[6]。这些工作表明,多普勒展宽得到有效抑制。然而,除原子热运动引起的多普勒展宽外,激光光强、原子池温度以及磁场等因素,也会引起谱线展宽^[7]。目

前的教学工作,特别是实验教学工作却极少涉及上述因素对谱线影响的讨论^[8]。为了更好地观察原子的精细结构,帮助学生掌握谱线展宽机理,我们需要在本科实验中设计并增加相关实验完善学生对碱金属原子超精细结构的认识。

值得注意的是,由于双光子光谱技术具有灵活的能级跃迁选择性、跃迁至高能级的易实现性等优势,使其成为一种高分辨的光谱技术而被广泛使用^[9]。以铷原子(Rb)为例,其 $5S_{1/2} \rightarrow 5P_{3/2} \rightarrow 5D_{5/2}$ 双光子跃迁谱线线宽优良、频率稳定度高,被广泛用于光学频率标准,如原子钟^[10]。与此同时,铷原子 $5S_{1/2} \rightarrow 5P_{3/2} \rightarrow 5D_{5/2}$ 双光子跃迁谱线将会自发辐射产生420nm蓝光信号,可以广泛应用于激光显示技术和激光生物医疗领域^[11]。因此,将双光子光谱技术引入本科实验教学,对于培养学生科学思维能力和创造创新能力将显得十分迫切。

本论文将通过铷原子 $5S_{1/2} \rightarrow 5P_{3/2} \rightarrow 5D_{5/2}$ 双光子跃迁产生420nm蓝光,向学生展示双光子跃迁消除多普勒谱线展宽的实验技巧。与此同时,演示激光光强、原子池温度以及磁场等因素对双光子谱线的影响,让学生掌握原子物理基础知识的同时,掌握近代物理实验技巧。本实验装置简单,易于搭建,适合课堂演示和实验教学。相关实验演示实现了对原子物理和激光物理相关教学手段的补充,对课堂教学和实验教学都有重要作用。

1 双光子跃迁及其谱线展宽机制

在光谱测量技术中,碱金属原子(Li、Na、K、

Rb 和 Cs 等)被广泛用于原子精细结构的研究。一方面,他们最外层只有一个价电子,结构相对简单;另一方面,他们具有多种可光激发的能级结构,可以为能级跃迁提供丰富的谱线。如图 1 所示为⁸⁷Rb 和⁸⁵Rb 相关的超精细能级结构^[12]。其中,波长为 780nm 的激光可以调控原子从 5S_{1/2}~5P_{3/2} 的跃迁。波长为 776nm 的激光可以调控原子从 5P_{3/2}~5D_{5/2} 的跃迁。处于 5D_{5/2} 能级的原子寿命约在 240~260ns,其不稳定性导致原子重新跃迁至 6P_{3/2} 中间态,同时辐射出 5.2μm 的红外光。同理,处于 6P_{3/2} 能级的原子寿命约为 112ns,其不稳定性导致原子自发跃迁到 5S_{1/2},并产生 420nm 的蓝光。这种利用波长为 780nm 的控制光先将原子从基态 5S_{1/2} 激发到 5P_{3/2},再利用波长为 776nm 的信号光将原子从 5P_{3/2} 能级激发到 5D_{5/2} 的激发步骤被称为分步双光子跃迁。相比而言,更为简单的方法是直接双光子跃迁。利用波长为 778nm 控制光可以让原子从基态 5S_{1/2} 直接激发到 5D_{5/2}。这种方案相比而言所需激光波长较少,但是激发强度较低。因此,结合不同的双光子跃迁的方式,本论文将通过观察 420nm 蓝光信号谱线,研究双光子跃迁的展宽机制。

一般情况下,原子的自然谱线宽度与原子能级的寿命有关。然而,由于原子的状态,环境等的影响,使得最后测量的原子谱线宽度比自然谱线宽。根据展宽的机制不同,可以分为均匀展宽和非均匀展宽。其中,原子的热运动会引起多普勒效应,其引起的谱线展宽是最常见也是最主要的非均匀展宽之一^[7]。其他引起展宽的因素有多种,例如激光光强引起谱线的功率展宽^[13],原子碰撞引起谱线的碰撞展宽^[14],磁场造成原子的能级劈裂进而引起谱线的塞曼展宽^[15]。通常,光强越强,展宽也越大。原子池温度与磁场强度对展宽也有类似的效应。根据展宽机制的不同,我们详细论述其对应的消除或减弱方法。

1.1 多普勒展宽

多普勒展宽是由光源中发光原子的无规则运动引起的。如果不考虑每个发光原子的自然展宽,每个原子自发辐射的频率 ν 就精确等于原子的中心频率 ν_0 。但由于气体原子的无规则运动,各个原子具有不同方向、不同大小的热运动速度,故不同速度原子发出的频率是不同的,此时发生

了辐射谱线的多普勒展宽。由于这种展宽具有高斯函数的形式,所以得到的谱线也称为高斯展宽。这种展宽与原子热运动相关,其谱线半宽表达式为

$$\Delta\nu = 2\nu_0 \left(\frac{2kT}{mc^2} \ln 2 \right)^{\frac{1}{2}} = 7.16 \times 10^{-7} \nu_0 \left(\frac{T}{M} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

其中, M 为原子的摩尔质量^[14]。在 $T=100^\circ\text{C}$ 时计算铷原子的多普勒展宽为 $\Delta\nu=576\text{MHz}$ 。

为了消除这种运动带来的展宽,常用的方法有饱和吸收法和双光子跃迁。其中,双光子跃迁过程可以理解为一个原子从初态 i 同时吸收两个光子到达末态 f 的过程,对一个速度为 v 的原子,在反向传输的两束强度为 I_1, I_2 的激光作用下的双光子跃迁概率可以表示为

$$A_{if} \propto \frac{\gamma_{if} I_1 I_2}{[\omega_{if} - \omega_1 - \omega_2 - v \cdot (k_1 + k_2)]^2 + (\gamma_{if}/2)^2} \times \left| \sum_k \left(\frac{D_{ik} \cdot \hat{e}_1 \cdot D_{kf} \cdot \hat{e}_2}{\omega_{ki} - \omega_1 - v \cdot k_1} + \frac{D_{ik} \cdot \hat{e}_2 \cdot D_{kf} \cdot \hat{e}_1}{\omega_{ki} - \omega_2 - v \cdot k_2} \right) \right|^2 \quad (2)$$

其中, k_1, k_2 为这两束光的波矢,两束光的能量可以表示为 $\hbar\omega_1, \hbar\omega_2$, γ_{if} 为激发态的自然线宽, D_{ik}, D_{kf} 分别表征初态到中间态和中间态到末态的跃迁矩阵元。式子中 $v \cdot (k_1 + k_2)$ 部分为多普勒频移项。对于反向传输的两束光有 $k_1 = -k_2$,这将会导致两个多普勒频移项抵消,从而消除谱线多普勒展宽。消除多普勒展宽后,双光子跃迁光谱表现为线宽为 γ_{if} 的 Lorentz 线型^[3]。

1.2 功率展宽

当激发原子跃迁的激光功率过大时,原子对共振频率附近激光的吸收会减少,而对远离共振频率的光的吸收变化却很小,从而导致谱线线性变化,即功率展宽。功率展宽可以表示为

$$\Delta\nu = \nu_0 \left(1 + \frac{I}{I_{\text{sat}}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

其中, I 表示激光光强, I_{sat} 表示饱和光强^[13]。

根据理论分析,如果激光功率增大,引起功率展宽,则谱线半宽会随之增大,减小激光功率可以减弱功率展宽。

1.3 碰撞展宽

碰撞展宽(洛伦兹展宽)是由于进行光吸收(或发射)的原子与局外气体分子之间的相互作用

(碰撞)产生的。当具有激发能 E_i 的原子与局外分子相碰撞,分子发生跃迁而原子由 E_i 跃迁至 E_f 而无能量辐射,减少了受激原子数及所产生的有辐射跃迁,使得两能级的跃迁概率特别大,结果导致 E_i 的有效寿命被缩短,因此使辐射的宽度频率增大。

对于含有两种原子 A、B 的混合气体,可以推导出洛伦兹半高全宽为^[14]

$$\Delta\nu = \frac{1}{\pi} \sigma^2 n_B \left[2\pi RT \left(\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

其中, σ 是有效面积, M_A, M_B 分别是 A、B 两种物质的摩尔质量, n_B 为单位体积外界粒子的浓度。由公式可知,如果原子温度升高,发生碰撞展宽,则谱线半宽会随之增大,降低原子池温度可以减弱碰撞展宽。

1.4 塞曼展宽

原子在磁场中能级和光谱会发生分裂,即塞曼效应。塞曼效应与电子自旋有关。原子中的电子绕核转动产生的磁矩为 $\frac{e\hbar}{2\mu c}$ (μ 为电子与原子核的折合质量),则当外加磁场 B 时,原子的能级发生移动,辐射出的谱线频率为也随之发生移动

$$\nu = \nu_0 + \Delta M_{fi} \frac{eB}{2\mu c} \quad (5)$$

其中, ΔM_{fi} 为跃迁终态与初态的磁量子数差,只能为 0, ± 1 。故当存在外磁场时,谱线 ν_0 分裂为三条,谱线展宽(半高全宽)为^[15]

$$\Delta\nu = \frac{eB}{2\mu c} \quad (6)$$

根据理论分析,如果外磁场强度增大,发生塞曼展宽,则谱线半宽会随之增大,减小外磁场强度可以减弱塞曼展宽。

下面,我们将搭建实验装置,分别展示铷原子线宽展宽机制及其控制方法。

2 实验装置及方法

根据图 1 所示的能级结构,我们分别搭建了两利用不同双光子跃迁方式的实验装置如图 2 所示。

图 2(a) 的装置用以观测铷原子双光子跃迁谱线的多普勒展宽。左侧的 776nm 激光从光源发出,在偏振分束镜处与右侧 780nm 激光进行合

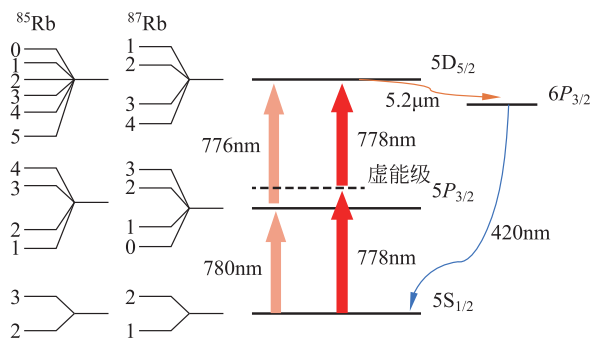


图 1 铷原子双光子跃迁相关的超精细能级结构

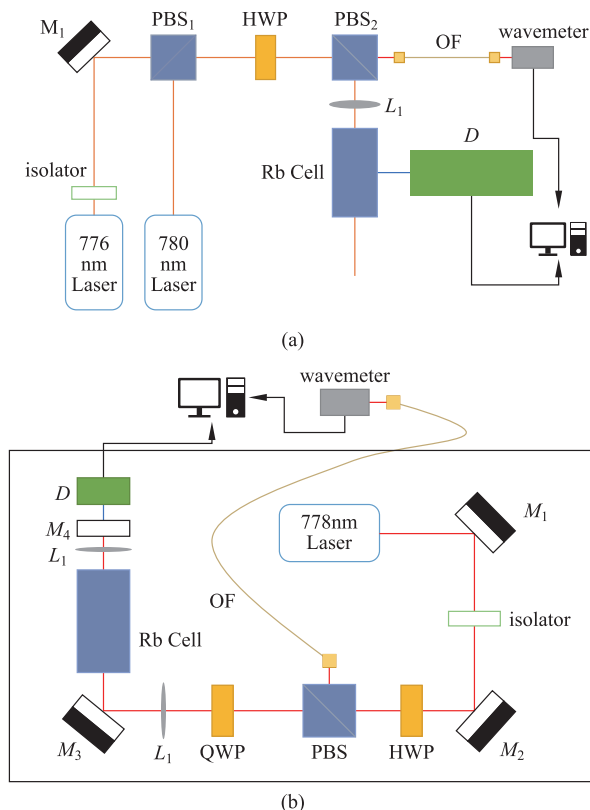


图 2 铷原子双光子跃迁实验装置图

HWP: 1/2 波片; QWP: 1/4 波片; PBS: 偏振分束镜; M: 反射镜; D: 光电探测器; L: 透镜(焦距为 50mm); OF: 光纤; wavemeter: 波长计; isolater: 隔离器; Rb Cell: 铷泡

束。合束后的光进入另一分束镜分成两部分,一部分打入波长计以检测两束光的波长,一部分进入原子池,激发双光子跃迁。激光从原子池打出后不再返回。原子池的侧边开设了一个小孔,正对探测器,用来测量双光子跃迁辐射出 420nm 蓝光信号。

图 2(b) 的装置利用对向传输的激光激发双光子跃迁,用以演示多普勒展宽的消除以及其他因

索引引起的展宽。图 2(b)中,778nm 激光从光源发出,通过隔离器后再经 1/2 波片和另一反射镜后在偏振分束镜处分为两部分。一部分打入波长计以测定精确的波长,另一部分经过 1/4 波片,再通过焦距为 50mm 的透镜会聚在原子池(铷泡)的正中心处,激发双光子跃迁。为了实现反向传播激光,我们在原子池后放置了另一个 50mm 透镜和一个双色反射镜 M_4 (反射 778nm 光,透射 420nm 光)将 778nm 激光原路打回。考虑到 778nm 跃迁相对于 780nm 和 776nm 能级均为远失谐,跃迁激发概率低,跃迁辐射出蓝光光强很小。我们将探测器放置于反射镜 M_4 之后以提高采集效率。灵敏度高,且要将装置与外界光屏蔽,以消除外界光对谱线的影响。实验中,我们扫描激光频率,并用示波器记录探测器的输出光电流。

根据上述实验装置,通过以下步骤完成相关实验并记录数据:

(1) 在图 2(a)装置中,扫描 780nm 信号光的频率,固定 776nm 控制光频率,调整 1/4 波片保证入射的两束激光功率大于 5mW,在示波器上记录双光子跃迁产生的 420nm 蓝光信号,结合扫描频率得到双光子跃迁光谱。

(2) 在图 2(b)装置中,将 778nm 激光功率调整为 45mW,原子池温度为 100℃,调整 1/4 波片角度以防止激光反射回激光器造成激光器损坏。扫描 778nm 激光频率,在示波器上观察到铷原子双光子跃迁光谱的波形并记录数据。

(3) 减小 778nm 激光频率的扫描范围,利用示波器记录 ^{87}Rb 低频的超精细结构光谱。调节 1/2 波片以改变激光强度,维持其他条件不变。测量不同光强下的 ^{87}Rb 低频的超精细结构光谱以测试光谱的功率展宽;

(4) 调节原子的温控装置以改变原子池温度,维持其他条件不变,测量不同温度下 ^{87}Rb 低频超精细结构光谱的碰撞展宽;

(5) 给原子池套上消磁后的波莫合金片,维持其他条件不变,测量磁场条件下 ^{87}Rb 低频超精细结构光谱的塞曼展宽;

(6) 数据处理,对得到谱线进行拟合,多普勒展宽为高斯拟合,其他展宽为洛伦兹拟合,从而获得谱线半高全宽。结合激光强度、原子池温度、磁场强度评估谱线半宽的变化,验证展宽机制。

3 实验结果及分析

根据以上实验装置和实验步骤,我们将获得如下实验结果。首先,在 780nm 激光功率为 10mW,776nm 激光功率为 15mW,原子池温度为 100℃时,我们得到图 3 所示的 ^{85}Rb 双光子跃迁光谱,可以观察到原子谱线中的多普勒展宽为 597.77MHz,与当前原子温度对应的多普勒带宽相吻合。此外,图 3 中我们扫描得到 2 个跃迁频率,分别对应 ^{85}Rb 两个 hyperfine 能级的跃迁,两个跃迁峰的频率间距为 3GHz。谱线中存在一些细节的跃迁峰,饱和吸收导致的精细谱线^[3],对应于多普勒消除时的精细峰。

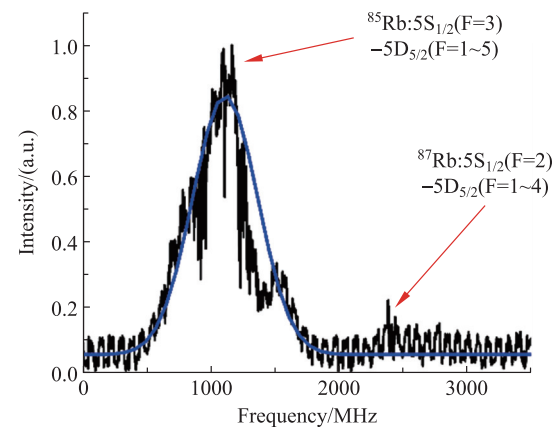


图 3 780nm 扫描双光子跃迁光谱图

图中 F 表示原子不同的超精细结构能级对应的总角动量子数。横坐标表示的频率并非实际数值,零点处对应的实际频率为 $3.84227975 \times 10^{11} \text{ kHz}$ 。

利用图 2(b)装置图,我们在激光功率为 45mW,原子池温度为 100℃时,得到图 4 中的铷原子双光子跃迁光谱。

可以看到,图 4 中的双光子跃迁具有很窄的半宽。图中的四个峰形分别对应 $^{87}\text{Rb}:5\text{S}_{1/2}(\text{F}=1) - 5\text{D}_{5/2}(\text{F}=1,2,3)$, $^{85}\text{Rb}:5\text{S}_{1/2}(\text{F}=2) - 5\text{D}_{5/2}(\text{F}=0,1,2,3,4)$, $^{85}\text{Rb}:5\text{S}_{1/2}(\text{F}=3) - 5\text{D}_{5/2}(\text{F}=1,2,3,4,5)$, $^{87}\text{Rb}:5\text{S}_{1/2}(\text{F}=2) - 5\text{D}_{5/2}(\text{F}=1,2,3,4)$ 的跃迁谱线。相比图 3 而言,谱线半宽被极大的压窄了,充分证明了对向传播光场能够极大抑制多普勒展宽的影响。

当我们减小激光器的扫描范围,可以得到超精细光谱结构,如图 5 所示。鉴于 ^{87}Rb 低频对应

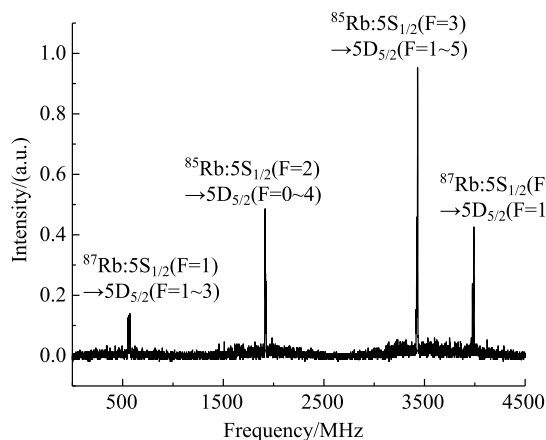


图4 铷原子的双光子跃迁光谱

横坐标表示的频率并非实际数值,零点处对应的实际频率为 $3.85281720 \times 10^{11}$ kHz。

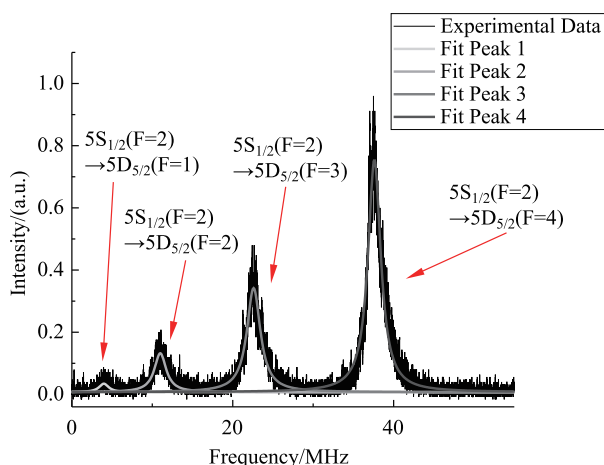


图5 对 ^{87}Rb 低频的超精细结构光谱 Lorentz 拟合示意图
横坐标表示的频率并非实际数值,零点处对应的实际频率为 $3.85284562 \times 10^{11}$ kHz。

的超精细结构 $5S_{1/2}(F=2) - 5D_{5/2}(F=2,3,4)$ 的几条光谱谱线容易分辨,我们以这一部分光谱为例进行 Lorentz 拟合,获得谱线半宽。具体拟合的 Lorentz 公式为

$$y = y_0 + \left(\frac{2A}{\pi}\right) \times \left(\frac{w}{4(x - x_c)^2 + w^2}\right) \quad (7)$$

其中, y_0 为谱线强度的截距, x_c 为中心频率, A 代表谱线的强度振幅, w 代表谱线的半高全宽 (FWHM), 即谱线半宽。

拟合后发现,在激光功率为 45mW, 原子池温度为 100°C 的条件下,我们获得 $5S_{1/2}(F=2) - 5D_{5/2}(F=2,3,4)$ 三条谱线的平均半宽为 1957.45kHz。而理论上的这些谱线的自然展宽在百千赫兹量

级^[12],说明激光功率、原子池温度、磁场强度等因素引起了谱线半宽的明显增大。接下来,我们根据上述实验步骤详细测量了谱线半宽随功率,温度和磁场的变化。

对于功率展宽,如图6所示,激光功率从 10mW 增大到 40mW 后,谱线半宽出现了明显的增大趋势,由 1600kHz 左右增大到了 1900kHz 左右,这种明显的增宽充分说明了光强引起的谱线展宽机制。

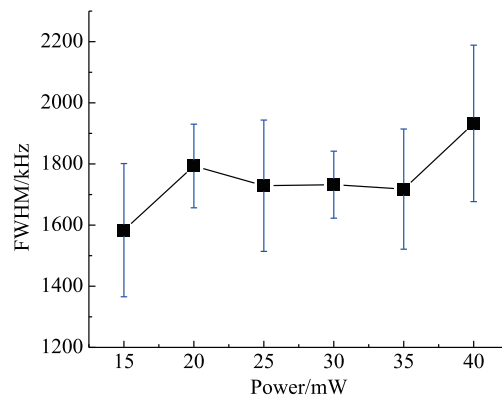


图6 平均谱线半宽随激光功率变化曲线图

考虑原子运动引起的碰撞展宽,我们测试了不同温度下 $5S_{1/2}(F=2) - 5D_{5/2}(F=2,3,4)$ 三条谱线的平均半宽的变化,如图7所示。原子池温度在 75°C 和 100°C 区间变动时,谱线半宽在 1800kHz 上下波动,并无明显变化。而根据式(4),温度从 $75 \sim 100^\circ\text{C}$,半宽的变化量约为 3.5%,完全在系统测量噪声内,与实验结果相符。说明碰撞展宽在当前系统条件下无法精确观测到。这是因为温度的变化范围太小,系统误差较大,无法形成准确的测量结果。

考虑塞曼展宽,我们测试了不同磁场条件下

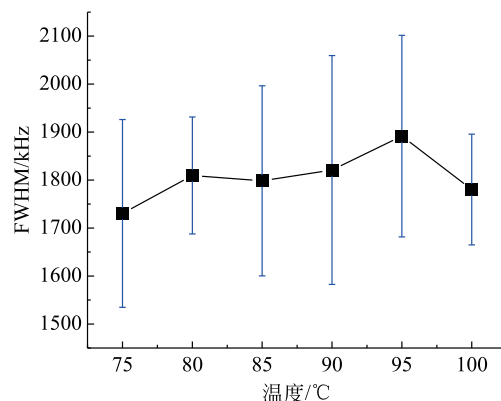


图7 平均谱线半宽随原子池温度变化曲线图

的半宽,见表1。我们利用了地磁场的作用,在未加磁屏蔽时,原子在地磁场的作用下发生了能级劈裂,造成了谱线展宽。在加上磁屏蔽后,原子池内的磁场强度减弱,谱线半宽也随之减小。由此可见,磁屏蔽明显屏蔽了地磁场的作用,从而压窄了谱线半宽。

表1 不同磁场条件下谱线半宽数据比较表(kHz)

谱线	未加磁屏蔽	加磁屏蔽
$5S_{1/2}(F=2)-5D_{5/2}(F=2)$	1865.01 (± 172.78)	1774.92 (± 290.73)
$5S_{1/2}(F=2)-5D_{5/2}(F=3)$	1611.32 (± 212.00)	1433.76 (± 130.04)
$5S_{1/2}(F=2)-5D_{5/2}(F=4)$	1291.92 (± 56.90)	1222.81 (± 189.35)

4 结语

本实验介绍了碱金属双光子跃迁的相关知识,测量铷原子双光子跃迁的超精细光谱结构,利用 Lorentz 拟合获得谱线半宽,从而探究激光功率、原子池温度、磁场强度等因素对原子谱线半宽的影响,直观并形象地展现了原子谱线的展宽机制。在影响铷原子双光子跃迁谱线半宽的各因素中,多普勒展宽极大影响了精细能级谱线的观测,激光功率确实引起了铷原子双光子跃迁的谱线功率展宽,原子运动引起的碰撞展宽的需要更高精度的测量及更大范围的温度变化,磁场对铷原子双光子跃迁的谱线塞曼展宽有明显影响。

通过本实验,本科生可以掌握铷原子双光子跃迁的实验装置,理解原子的双光子激发技术。更为重要的是,通过本实验,让本科生了解原子谱线展宽的机制以及相关的实验方法,为后续开展其他与原子光谱相关的实验研究提供了可能。此外,本实验充实了本科物理实验课程的内容,学生通过自主搭建实验仪器,完成实验数据的测量和分析,锻炼了动手能力,理解了理论知识的深刻内涵,对提升物理专业本科学生的素养尤为重要。

参 考 文 献

[1] 杨福家. 原子物理学[M]. 4版. 北京:高等教育出版社, 2008.

[2] 周炳琨. 激光原理[M]. 7版. 北京:国防工业出版社, 2014.

[3] 范鹏瑞,李一鸿,李少华,等. 利用铷原子双光子跃迁产生420nm蓝光的实验研究[J]. 量子光学学报. 2017, 23(2): 144-150.

FAN P R, LI Y H, LI S H, et al. Experimental investigation on the 420 nm blue light generated by two-photon transition of Rb[J]. Journal of Quantum Optics, 2017,23(02): 144-150. (in Chinese)

[4] PRESTON D W. Doppler-free saturated absorption: Laser spectroscopy[J]. American Journal of Physics, 1996,64(11): 1432-1436.

[5] 范鹏瑞. 基于铷原子双光子跃迁高分辨光谱研究[D]. 太原:山西大学,2017.

[6] DING D S, ZHOU Z Y, SHI B S, et al. Two-Photon atomic coherence effect of transition $5S_{1/2}5P_{3/2}4D_{5/2}(4D_{3/2})$ of ^{85}Rb atoms[J]. Chinese Physics Letters, 2012, 29(2): 24202-24202.

[7] GALATRY L. Simultaneous effect of Doppler and foreign gas broadening on spectral lines[J]. Physical Review, 1961, 122(4): 1218.

[8] KIENLEN M B, HOLTE N T, DASSONVILLE H A, et al. Collimated blue light generation in rubidium vapor[J]. American Journal of Physics, 2013, 81(6): 442-449.

[9] CAGNAC B. Doppler-free two-photon spectroscopy [J]. Hyperfine Interactions, 1985, 24(1): 19-41.

[10] LUDLOW A D, BOYD M M, YE J, et al. Optical atomic clocks[J]. Reviews of Modern Physics 87, No. 2 (2015): 637-701.

[11] 杨镇. 双光子泵浦碱金属蓝光激光研究[D]. 北京:北京邮电大学,2020.

[12] NEZ F, BIRABEN F, FELDER R, et al. Optical frequency determination of the hyperfine components of the $5S_{1/2}-5D_{3/2}$ two-photon transitions in rubidium[J]. Optics Communications, 1993.

[13] FOOT C J. Atomic physics[M]. New York: Oxford University Press, 2005.

[14] 张庆国,尤景汉,贺健. 谱线展宽的物理机制及其半高宽[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2008(1): 84-87.

ZHANG Q G, YOU J H, HE J. Physical mechanism and half-width of spectrum widening [J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2008(1): 84-87. (in Chinese)

[15] 林福忠. 原子塞曼效应分裂谱线的量子分析[J]. 龙岩学院学报, 2006(6): 34-35.

LIN F Z. Quantum analysis of splitting spectral lines by atomic Zeeman effect[J]. Journal of Longyan University, 2006(6): 34-35. (in Chinese)