

二元混合体系的光抽运响应分析*

李潮锐, 唐 强, 刘小伟

(中山大学物理科学与工程技术学院, 广东 广州 510275)

摘 要: 研究二元体系光抽运响应规律有助于了解体系之间原子相互作用和提供光抽运响应时间控制的可能性。利用 Rb 同位素⁸⁵Rb 和⁸⁷Rb 组成自然二元体系, 通过双通道加法器选择控制 2 路射频信号并采用 10 Hz 方波调制场, 实现单一体系或混合体系的光抽运响应观测。基于简化三能级模型, 采用单一指数函数准确地描述⁸⁷Rb 和⁸⁵Rb 二元混合体系和独立一元体系的响应弛豫。由混合体系与独立单元之间弛豫时间关系, 也可获得混合体系中独立单元浓度及对系统弛豫时间的贡献。

关键词: 光抽运; 核磁共振; 二元体系; 响应

中图分类号: O482.53 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579(2009)06-0038-04

Responsibility to Optical Pumping for Binary Mixtures of Rb Isotope

LI Chaorui, TANG Qiang, LIU Xiaowei

(School of Physics & Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Investigation of optical pumping for binary mixtures may provide information on the interaction between atomic systems and open up possibility to control response time. Considered Rb isotope ⁸⁵Rb and ⁸⁷Rb as binary mixtures, optical pumping response can be observed with using square modulated field at 10Hz and two channels of RF sources for NMR of ⁸⁵Rb and ⁸⁷Rb respectively. Based on proposed model of three energy levels, unitary system or binary mixtures of ⁸⁵Rb and ⁸⁷Rb can be accurately described with an exponential function. According to the relation of response time between binary and unitary, the response time for mixtures is contributed from unitary ones and their concentrations.

Key words: optical pumping, nuclear magnetic resonance, binary mixtures, responsibility

光抽运技术在磁共振、自旋交换、原子频标、激光冷却和俘获等研究领域扮演着重要角色^[1-13], 但是主要侧重于单一原子体系物理过程分析及作用。文献 [14] 基于简单三能级模型定量研究了 Rb 同位素⁸⁵Rb 和⁸⁷Rb 混合体系中各自独立的光抽运响应过程, 实验结果显示采用指数关系可准确描述单一原子体系的响应弛豫机制。事实上, 进一步深入研究二元(混合)体系光抽运响应规律有助于了解体系之间原子相互作用和实现(宏观)系统响应时间控制。

由于 Rb 同位素⁸⁵Rb 和⁸⁷Rb (分别占 72.15% 和 27.85%) 在外磁场作用下的能级超精细结构不

同, 文献 [14] 利用磁共振技术将两者的光抽运信号分离, 达到研究单一原子体系光抽运响应的目的。本文则将通过双光子激发核磁共振技术, 研究由⁸⁵Rb 和⁸⁷Rb 所组成的二元混合体系光抽运。仍采用简化的三能级模型建立二元混合体系与独立一元体系之间物理参数的内在联系, 并由实验观测结果分析它们之间的光抽运响应弛豫关系。

1 原理与技术

本文仅研究 Rb 基态 $5^2S_{1/2}$ 与激发态 $5^2P_{1/2}$ 之间光抽运响应。由于 Rb 同位素⁸⁵Rb 和⁸⁷Rb 核自旋量

* 收稿日期: 2009-01-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10505033, 10675175)

作者简介: 李潮锐(1962年生), 男, 博士, 副教授; E-mail: zdstlcr@mail.sysu.edu.cn

子数分别为 $I=5/2$ 和 $I=3/2$, 因此, ^{85}Rb 基态 $J=1/2$ 具有 $F=3$ 和 $F=2$ 两个能态, 而 ^{87}Rb 基态则具有 $F=2$ 和 $F=1$ 能级。量子数 F 所描述的原子磁矩与弱磁场作用, 形成一系列由 m_F 表征的能级超精细结构。由于 Rb 同位素基态 F 量子数不同, ^{85}Rb 和 ^{87}Rb 的朗德因子 g_F 差异体现在相同弱磁场作用下超精细结构子能级间隔不相等, 因而在同一外磁场中 ^{85}Rb 和 ^{87}Rb 产生磁共振所对应的射频场频率不同, 或同一射频场频率可在不同外磁场中产生对应于 ^{85}Rb 和 ^{87}Rb 核磁共振吸收。利用这一物理事实, 文献 [14] 实现了对 ^{85}Rb 或 ^{87}Rb 单一原子体系光抽运研究。本文将采用满足 ^{85}Rb 和 ^{87}Rb 核磁共振吸收的不同频率双光子同时激发, 则可观测二元混合体系光抽运响应过程。

将光抽运过程中基态粒子数只增不减子能级称为“亚稳态”, 而 $5^2P_{1/2}$ 所有子能级“简并”为“激发态”。采用三能态模型, 单一原子体系抽运光强度随时间变化关系可表示为

$$\frac{dI}{dt} = -kI \quad (1)$$

式中 k 为与体系中原子跃迁几率相关的物理参数。对上式积分, 可得

$$I = A\rho \exp(-t/\tau) \quad (2)$$

式中 ρ 表示单一体系的原子浓度, A 为与入射光强及光强检测传感性能相关的比例常数, 而弛豫时间 $\tau = 1/k$ 。

对于二元混合体系, 若它们之间不存在相互作用, 则抽运光强度随时间变化关系可表示为

$$\frac{dI}{dt} = -(\rho_1 k_1 + \rho_2 k_2) I \quad (3)$$

式中 ρ 和 k 物理意义与式 (1) 和 (2) 相同, 下标 1 和 2 分别代表体系中两种原子。考虑归一化条件, 上式中 ρ_1 和 ρ_2 必须满足

$$\rho_1 + \rho_2 = 1 \quad (4)$$

对式 (3) 积分, 可得

$$I = I_0 \exp[-(\rho_1 k_1 + \rho_2 k_2) \cdot t] = I_0 \exp(-t/\tau) \quad (5)$$

式中

$$\frac{1}{\tau} = \rho_1 k_1 + \rho_2 k_2 = \frac{\rho_1}{\tau_1} + \frac{\rho_2}{\tau_2} \quad (6)$$

上式说明二元混合体系对光抽运响应弛豫与独立一元响应弛豫和它们的浓度有关。本文通过对独立单一体系和二元混合体系光抽运响应实验数据处理分析, 研究上述理论模型的合理性和科学性。

基本实验仪器和测量方法已于文献 [14] 中

详述, 本工作对标记为 1 号、2 号和 3 号共 3 个样品进行一系列相同实验观测。针对本文实验研究的特殊要求, 实验技术改进包括: 双通道加法器输入端分别与提供满足 ^{85}Rb 和 ^{87}Rb 磁共振吸收射频信号源连接, 且直接作用于二元混合体系; 先借助三角波调制场观测光泵磁共振信号确定最佳实验点, 随后切换为 10 Hz 方波调制场并选择控制 2 路射频信号而实现单一体系或二元混合体系光抽运响应实验观测。

2 结果及分析

调节励磁电流设定稳恒外磁场强度, 仅开启加法器通道 1 并改变与其连接的输入射频信号频率, 直至获得图 1 信号。维持外磁场不变, 仅开启加法器通道 2 且调节与其连接的另一输入射频信号频率, 在出现类图 1 结果之后继续增加频率直至得到图 2。保持外磁场强度和 2 个射频信号源输出信号不变, 同时开启加法器通道 1 和 2, 可观测到图 3 实验结果。根据外磁场强度和射频频率关系, 可获得朗德因子 g_F 从而得知图 1 和 2 分别为 ^{85}Rb 和 ^{87}Rb 单一体系独立响应信号, 而图 3 显然为 ^{85}Rb 和 ^{87}Rb 二元混合体系响应信号。

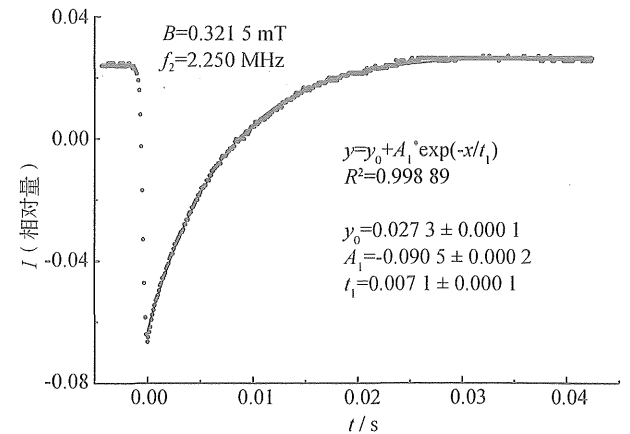


图 1 ^{87}Rb 单一独立体系的光磁共振信号及数据分析
Fig. 1 Optical pumping signal and its data analysis
on ^{87}Rb unitary system

由这些实验记录可见, 单一体系和二元混合体系抽运光强变化都经历了 2 个物理阶段, 即核磁共振吸收和光抽运过程。针对光抽运响应过程, 采用式 (2) 对图 1 和 2 实验数据进行处理, 而利用式 (5) 分析图 3 实验结果。

由图可见, 采用式 (2) 或式 (5) 单一指数函数可以很准确地描述 ^{87}Rb 和 ^{85}Rb 光抽运物理现

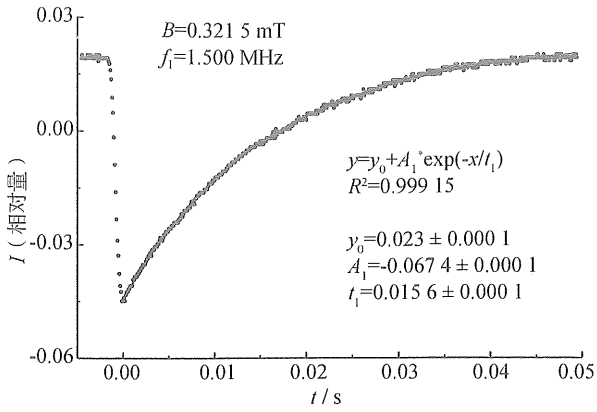


图 2 ⁸⁵Rb 单一独立体系的光磁共振信号及数据分析
Fig. 2 Optical pumping signal and its data analysis on ⁸⁵Rb unitary system

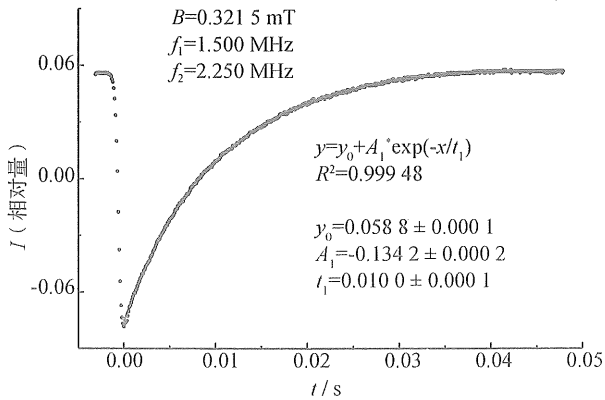


图 3 ⁸⁵Rb 和 ⁸⁷Rb 混合体系光磁共振信号及数据分析
Fig. 3 Optical pumping signal and its data analysis on ⁸⁵Rb and ⁸⁷Rb binary mixtures

象。在外磁场强度 $B=0.312\ 5\ \text{mT}$ 时, 图 1 和 2 对应的 ⁸⁵Rb 和 ⁸⁷Rb 单一体系曲线拟合结果为 $A_1\rho_1 = 0.067\ 4$, $\tau_1 = 0.015\ 6\ \text{s}$, $A_2\rho_2 = 0.090\ 5$, $\tau_2 = 0.007\ 1\ \text{s}$ 。由于采用同一抽运光和检测传感器, 可以认为 A_1 与 A_2 相同, 即 $A_1 = A_2 = A$ 。因此, $A\rho_1$ 或 $A\rho_2$ 数值直接反映了产生光抽运响应所对应单一

原子体系的浓度。图 3 所示, ⁸⁵Rb 和 ⁸⁷Rb 二元混合体系拟合结果为 $I_0 = 0.134\ 2$, $\tau = 0.010\ 0\ \text{s}$ 。可以表示为 $I_0 = A\rho$, 而 ρ 不妨理解为二元混合体系产生光抽运响应的“等效”浓度。对于图 3 实验结果, 尝试强制使用图 1 和 2 拟合结果的叠加进行数值分析, 但是最终拟合结果也回归为图 3 所示的单一指数形式。

利用归一化条件, 由式 (4) 可获参数 $A = 6.333\ 1$, 从而得到 ⁸⁵Rb 和 ⁸⁷Rb 单一体系的响应浓度分别为 $\rho_1 = 0.426\ 9$ 和 $\rho_2 = 0.573\ 1$ 。可见, $\rho_1/\rho_2 \approx 0.75$ 与 Rb 同位素自然丰度比值有较大差异。由于同一温度的 ⁸⁵Rb 和 ⁸⁷Rb 饱和蒸汽压不同, 在实验所选定的样品温度下不能确保 ⁸⁵Rb 和 ⁸⁷Rb 均完全汽化, 从而光抽运响应浓度并不能完全代表 Rb 同位素自然丰度比值。由参数 A 可得二元混合体系的“等效”浓度 $\rho = 0.852\ 6$ 。数据分析发现, 由归一化条件式 (4) 上述所得 ρ_1 、 ρ_2 、 τ_1 、 τ_2 和 τ 很好满足式 (6)。从表 1 所列出的不同磁场强度同一样品实验结果可以看出, $(\rho_1\tau_1^{-1} + \rho_2\tau_2^{-1})\tau \approx 1$ 说明了式 (6) 正确描述二元混合体系与单一体系之间的光抽运响应关系。为便于说明物理参数之间的定量关系, 表中数据保留多 1 位有效数字。

上述分析了 1 号样品实验观测及数据处理结果。为检验本文理论分析的正确性和数据处理方法的合理性, 采用相同实验技术对 2 号和 3 号样品进行一系列类似测量分析。尽管在相同磁场强度条件下, 不同样品的 ρ_1 、 ρ_2 、 τ_1 、 τ_2 和 τ 略有差异, 但是它们都能很好地满足式 (6) 关系。从表 1 也可得知, 在本项工作选定的实验条件下所获得 τ_1 、 τ_2 和 τ 均小于 20 ms, 说明采用 10 Hz 方波调制场具有足够长周期抽运时间间隔而不影响原子体系的光抽运响应观测。实验数据显示, 同一温度但不同磁场强度时 ρ_1 、 ρ_2 、 τ_1 、 τ_2 和 τ 也略有变化, 但这一问题的定量描述有待进一步研究。

表 1 不同磁场强度下二元体系与独立单元的响应参数

Tab. 1 Response parameters of binary mixtures under various magnetic field

B/mT	ρ_1	τ_1	ρ_2	τ_2	$\rho_1\tau_1^{-1} + \rho_2\tau_2^{-1}$	τ	$(\rho_1\tau_1^{-1} + \rho_2\tau_2^{-1})\tau$
0.428 7	0.417 0	0.016 3	0.583 0	0.007 6	102.29	0.010 2	1.043 4
0.321 5	0.426 9	0.015 6	0.573 1	0.007 1	108.08	0.010 0	1.080 8
0.214 4	0.404 2	0.015 9	0.595 8	0.007 7	102.80	0.009 9	1.017 7
0.142 9	0.414 4	0.015 7	0.585 6	0.007 3	106.61	0.010 1	1.076 8
0.107 2	0.425 8	0.016 1	0.574 2	0.007 6	102.00	0.010 3	1.050 6
0.071 5	0.423 9	0.015 7	0.576 1	0.007 3	105.92	0.010 1	1.069 8

3 结 论

Rb 同位素⁸⁵Rb 和⁸⁷Rb 组成自然二元体系, 通过双通道加法器输入端分别与提供满足⁸⁵Rb 和⁸⁷Rb 磁共振吸收射频信号源连接, 选择控制 2 路射频信号并采用 10 Hz 方波调制场, 实现单一体系或混合体系的光抽运响应观测。实验记录显示, 单一体系和二元混合体系抽运光强变化都经历了 2 个物理阶段, 即核磁共振吸收和光抽运过程。采用单一响应弛豫模型可以很准确地描述⁸⁷Rb 和⁸⁵Rb 二元混合体系或独立单元的光抽运物理机制。

基于光抽运过程物理分析, 采用简化三能级模型建立了二元混合体系和单一独立体系之间物理参数与响应弛豫的理论关系。假设独立单元间不存在相互作用, 混合体系光抽运响应过程并非由独立单元响应的简单叠加。理论分析得知, 混合体系响应弛豫时间由独立单元弛豫时间及其浓度共同确定, 满足 $\rho_1 + \rho_2 = 1$ 归一化条件时存在 $\tau^{-1} = \rho_1\tau_1^{-1} + \rho_2\tau_2^{-1}$ 关系。尽管 ρ_1/ρ_2 不能完全表示⁸⁵Rb 和⁸⁷Rb 自然丰度, 但却体现了它们对混合体系光抽运响应弛豫的贡献。虽然 τ_1 和 τ_2 完全由独立体系固有性质所确定, 由于 ρ_1 和 ρ_2 的可调性而能实现混合体系抽运响应的可控操作。

参考文献:

- [1] KASEVICH M, CHU Steven. Laser cooling below a photon recoil with three level atoms [J]. Phys. Rev. Lett., 1992, 69(12): 1741 - 1744.
- [2] KASEVICH Mark A, RIIS Erling, CHU Steven. et al. RF spectroscopy in a atomic fountain [J]. Phys. Rev. Lett., 1989, 63(6): 612 - 615.
- [3] BOUYER P, LEMONDE P, DAHAN M B, et al. An atom trap relying on optical pumping [J]. Europhys. Lett., 1994, 27(8): 569 - 574.
- [4] VOLD T G, RAAB F J, HECKEL B, et al. Search for a permanent electric dipole moment on ¹²⁹Xe atom [J]. Phys. Rev. Lett., 1984, 52(25): 2229 - 2232.
- [5] SKALLA J, WAKERLE G, MEHRING M. Coherence transfer between atomic transitions of different g-factor by modulated optical excitation [J]. Optics Communications, 1996, 127: 31 - 36.
- [6] 汪盛烈, 赵明信, 孙献平, 等. 光抽运自旋极化固态¹²⁹Xe[J]. 激光技术, 1999, 23(3): 186 - 188.
- [7] WANG Shenglie, ZHAO Mingxin, SUN Xianping, et al. Nuclear polarized solid ¹²⁹Xe by laser pumping [J]. Laser Technology, 1999, 23(3): 186 - 188.
- [8] 李森麟, 唐天容, 孙献平, 等. 在⁸⁷Rb 原子中¹²⁹Xe 核自旋弛豫的研究[J]. 科学通报, 1987(23): 1780 - 1783.
- [9] 魏石岗, 邱元武, 杨昆, 等. 惰性气体核的自旋交换光抽运中的物理[J]. 激光与光电子学进展, 2006, 43(2): 63 - 67.
- [10] WEI Shigang, QIU Yuanwu, YANG Kun, et al. Physics in the spin-exchanging optical pumping of noble gas nuclei [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2006, 43(2): 63 - 67.
- [11] 张萍, 张迅, 黄晓, 等. 缓冲气体对光抽运远红外激光器频谱特性的影响[J]. 中国激光, 2004, 31(7): 780 - 784.
- [12] ZHANG Ping, ZHANG Xun, HUANG Xiao, et al. Effects of buffer gas on the spectrum characteristics of optically pumped miniature cavity far-infrared laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2004, 31(7): 780 - 784.
- [13] 保延翔. 缓冲气体对超辐射光抽运远红外激光器的影响[J]. 中国激光, 2003, 30(2): 117 - 119.
- [14] BAO Yanxiang. Effects of buffer gas on superradiant optically pumped far-infrared laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2003, 30(2): 117 - 119.
- [15] SKALLA J, WAKERLE G, MEHRING M et al. Optical magnetic resonance imaging of Rb vapor in low magnetic fields [J]. Physics Letters A, 1997, 226: 69 - 74.
- [16] ZHAO K, WU Z. Atomic resonance behavior in laser-induced Rb atom desorption — the effect of ambient gas atoms and molecules [J]. Physics Letters A, 2002, 299: 73 - 78.
- [17] DANCHEVA Y, ALZETTA G, CARTALEVA S et al. Coherent effects on the Zeeman sublevels of hyperfine states in optical pumping of Rb by monomode diode laser [J]. Optics Communications, 2000, 178: 103 - 110.
- [18] 李潮锐, 刘小伟. 光磁共振研究 Rb 同位素光抽运响应[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2008, 47(1): 29 - 32.
- [19] LI Chaorui, LIU Xiaowei. Responsibility to optical pumping for Rb isotope with magnetic resonance [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatsni, 2008, 47(1): 29 - 32.