

用微波调制的半导体激光观测 ^{87}Rb 超精细能级的相干共振

杨世琪

(华南师范大学物理系, 广州 510631)

摘 要 用微波调制的半导体激光泵浦 ^{87}Rb 汽泡室原子, 直接观察到其基态超精细能级间 $\Delta m_F = 0, \pm 1$ 和 ± 2 的能级相干共振信号, 其中 $O - O(F = 2, m_F = 0 \leftrightarrow F = 1, m_F = 0)$ 能级相干共振信号可用作原子钟的参考标准.

关键词 超精细相干共振, 微波调制的半导体激光.

直接用调制的激光泵浦原子, 产生能级间的相干共振, 从而探测原子能级的新方法, 不必另加射频激励, 已被证明是高分辨率的探测原子基态超精细能级的有效方法^[1-3]. 作者曾报道用脉冲调制的激光直接观察 ^{87}Rb 原子基态塞曼能级间相干共振的实验结果^[4]. 指出, 激光脉冲的宽度 τ 必须足够窄, 满足 $1/\tau \gg 2\pi\nu_{12}$ (ν_{12} 是待相干的两能级的跃迁频率). 对于塞曼能级相干, 这一条件是容易做到的, 而对于超精细能级相干, ν_{12} 一般在微波范围, 要求 τ 短至 $10^{-11} \sim 10^{-12}$ sec 的量级, 这对于特定的半导体激光器, 并不容易. 本文将报道用连续微波调制的半导体激光泵浦 ^{87}Rb 原子, 产生基态超精细相干共振的方法及实验结果.

本实验拟观测如图 1 所示的 Λ 形的三能级系统在频率为 ν_{13} 和 ν_{23} 的共振激光的泵浦下, 在超精细能级 $|1\rangle$ 和 $|2\rangle$ 间产生的相干共振. 由于塞曼效应, 超精细结构分裂成若干个磁子能级. 在 $\Delta F = 1$ 的超精细能级之间, 可能产生 $\Delta m_F = 0, \pm 1, \pm 2$ 的能级相干, 取决于入射泵浦光的偏振特性和它相对于外加磁场的传播方向, 如下表所示:

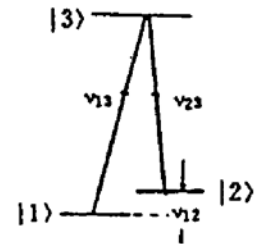


Fig. 1 Λ type three-level system

direction between light and magnetic field	polarization	circular σ	linear π
parallel		coherence $\Delta m_F = 0$	
perpendicular		coherence $\Delta m_F = \pm 1$	coherence $\Delta m_F = \pm 2$

图 2 的 ^{87}Rb 基态超精细能级中, 以三组箭头分别示出在上表安排下可能产生的相干共振.

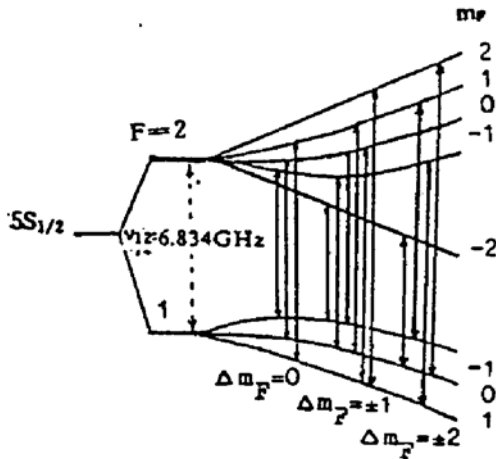


Fig. 2 Hyperfine structure in ground state of ⁸⁷Rb and coherences between the level pairs with $\Delta m_F = 0, \pm 1, \pm 2$

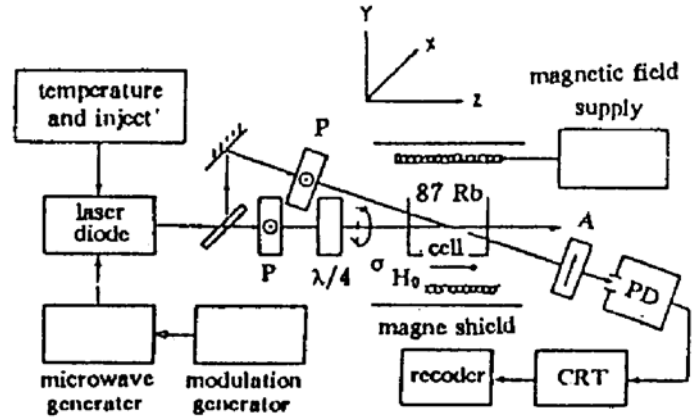


Fig. 3 Schematic of the experimental setup used to produce and observe $\Delta m_F = 0$ hyperfine coherences in ground state of ⁸⁷Rb

图 3 是观测 $\Delta m_F = 0$ 的超精细相干共振的实验安排. 实验所用的半导体激光器为 ML4402 型, 其单模工作时的带宽约 50 MHz, 可在室温工作, 其温度和注入电流引起的激光频率变化实测分别约为 30 GHz/°C 和 6 GHz/mA. 通过适当调节温度和注入电流, 把激光器调至所需的⁸⁷Rb的 D₂ 线 780 nm 的波长, 然后用适当幅度和所需频率 ν_m 的正弦微波信号调制激光器的注入电流, 实现对激光的调频, 其频谱为 $\nu_l \pm n\nu_m$ (其中 ν_l 是⁸⁷Rb D₂ 线相应的中心频率, n 为 1, 2, 3, ... 的整数). 调节 ν_m , 并选取适当的 n , 使 $n\nu_m = \nu_{12}$ (单边带) 或者 $[n - (-n)]\nu_m = \nu_{12}$ (双边带), 以满足相干共振. 实验中, 以⁸⁷Rb 的超精细间距频率 6834 MHz/2, 即 3417 MHz 作微波调制频率 ν_m . 通过已调制激光与另一稳定的未调制的半导体激光在高速光电二极管中进行差拍, 再用快速频谱分析仪测量拍频的频谱, 观察到含有 $\pm 1 \nu_m$ 的两条光边频, 被用作同时激发自基态一对超精细能级至光激发态的跃迁所需的两条共振光.

泵浦光的功率约 0.1 mW, 束径约 3 mm, 与另一束线偏振探测光约成 2°角相交于⁸⁷Rb泡室中心, 泡内未充缓冲气体(去掉缓冲气体的负作用), 内壁涂石蜡, 工作于 45°C. 用正交检偏器检测探测光束通过相干的原子系统后偏振方向的改变来测相干共振. 为了观察到稳定的相干共振信号, 激光器的工作温度和注入电流分别稳定在优于 10⁻²°C 和 10⁻² mA 的精度.

图 4(a)给出了用扫描微波调制频率 ν_m 通过共振区的方法得到的⁸⁷Rb基态两个超精细能级 $F = 1$ 和 $F = 2$ 间 $\Delta m_F = 0$ 的三条相干共振谱线, 其中中间的一条是与场无关的 O-O 能级 ($F = 2, m_F = 0 \leftrightarrow F = 1, m_F = 0$) 相干共振线, 它有特别重要的意义, 可作原子钟的参考标准.

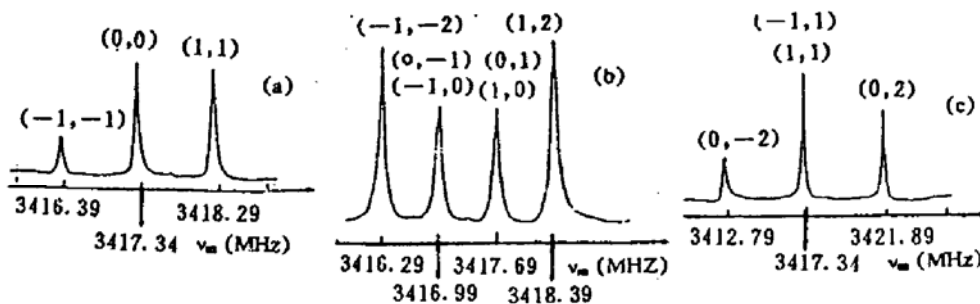


Fig. 4 Hyperfine coherence resonance signals in the ground state of ⁸⁷Rb by scanning ν_m ;

a: $\Delta m_F = 0, H_0 = 0.136$ mT; b: $\Delta m_F = \pm 1, H_0 = 0.10$ mT; c: $\Delta m_F = \pm 2, H_0 = 0.65$ mT

根据前面所述产生 $\Delta m_F = \pm 1$ 和 ± 2 的超精细相干的方法, 选取适当的泵浦光偏振特性和它相对于外磁场的传播方向, 在上述实验安排的基础上作适当调整, 同样可以观察到相应的相干共振谱线, 其结果分别示于图 4(b)和(c). 在 $\Delta m_F = \pm 1$ 的相干共振谱线中, 由于 $(0, -1)$ (即 $F = 1, m_F = 0 \leftrightarrow F = 2, m_F = -1$) 和 $(-1, 0)$ 以及 $(0, 1)$ 和 $(1, 0)$ 的相干共振频率相同而彼此重合, 只出现四条谱线; 同样, 在 $\Delta m_F = \pm 2$ 的情形下, $(-1, 1)$ 和 $(1, -1)$ 亦相重在一起而只有三条谱线.

结 语 作为探测原子基态超精细能级的一种新方法, 本文成功地观察到用连续微波调制的半导体激光泵浦 ^{87}Rb 原子系统时产生的超精细结构中 $\Delta F = 1, \Delta m_F = 0, \pm 1, \pm 2$ 的能级相干共振信号, 具有高的信噪比. 其中 $O-O$ 能级相干共振峰的获得, 可望为一种全光学化的原子钟的研制提供新途径; 本实验以 $(\nu_{12}/2)$ 的调制频率实现了对 ν_{12} 跃迁频率的检测. 若适当调节激光器的调制指数, 实现以更低的调制频率来检测微波范围的超精细能级的相干是可能的.

由于实验中的铷原子泡室未充缓冲气体, 原子在泡内自由快速的运动使得与泵浦光束的作用时间很短, 产生相当大的渡越时间增宽, 导致出现 50 KHz 的共振谱线线宽. 估算表明, 在 3 mm 泵浦光束直径情况下, 其渡越时间增宽与此同量级. 已有研究指出^[3], 当泡室充以适当缓冲气体并扩大与样品作用的泵浦光束直径时, 可大大降低谱线的宽度.

感谢加拿大 Laval 大学 M. Tetu 教授和 N. Cyr 先生对本研究的支持和合作.

参 考 文 献

- [1] J. Mlynek, W. Lange, H. Harde *et al.*, High-resolution coherences spectroscopy using pulse trains. *Phys. Rev. (A)*, 1981, 24(2): 1099~1102
- [2] L. Mandel, E. Wolf ed., *Coherence and Quantum Optics V*. New York: plenum publishing Corporation, 1984: 993~1000
- [3] Y. Prior, A. Ben-Reuven, M. Rosenblum ed., *Methods of Laser Spectroscopy*, New York: plenum publishing Corporation, 1986: 97~100
- [4] 杨世琪, M. Tetu, N. Cyr 等, 用脉冲半导体激光观察铷原子基态塞曼能级的相干共振. *光学学报*, 1992, 12(11): 992~996

Observation of Hyperfine Coherence Resonances in ^{87}Rb with Microwave Modulated Semiconductor Laser

Yang Shiqi

(Department of Physics, South China Normal University, Guangzhou 510631)

(Received 16 August 1993; revised 5 November 1993)

Abstract Hyperfine coherence resonances with $\Delta m_F = 0, \pm 1, \pm 2$ are observed in ^{87}Rb vapor optically pumped with a microwave modulated semiconductor laser. The $O-O$ ($F = 2, m_F = 0 \leftrightarrow F = 1, m_F = 0$) hyperfine coherence resonance may be used as a reference of the atomic clock.

Key words hyperfine coherence resonance, microwave modulated semiconductor laser.