

用脉冲半导体激光观察铷原子 基态塞曼能级的相干共振

杨 世 琪

(华南师范大学物理系, 广州 510631)

M. Tetu, N. Cyr M. Guy

(加拿大拉瓦尔大学 电机系 光学和激光光电子中心)

提 要

用半导体激光脉冲序列泵浦汽泡铷原子, 观察其基态能级的 $\Delta m=1$ 和 $\Delta m=2$ 的塞曼 (Zeeman) 相干. 利用直接调制激光二极管注入电流的增益开关技术, 在波长 780 nm 处产生约 200 ps 的激光脉冲. 对 $\Delta m=1$, 用偏振光谱学方法检测; 而对 $\Delta m=2$, 则直接使用前向散射光谱学方法检测.

关键词 脉冲激光, 塞曼相干共振.

1 引 言

由周期性的激光脉冲序列所激发的原子基态能级间的赫兹相干^[1] (超精细和塞曼相干), 已被证明是一种高分辨波谱学的研究方法^[2]. 这种纯光学的技术可以探测几乎是简并的能级和子能级, 而不受通常光学跃迁的多普勒增宽和寿命增宽的影响, 同时达到能与通常射频方法媲美的精度. 如果所产生的激光脉冲足够窄, 还有可能以比较低的脉冲频率来探测微波范围的超精细相干共振, 而无需通常以射频方法探测时所必需的微波设备.

目前, 利用锁模染料激光脉冲, 人们已观察到钠原子基态能级间 $\Delta m=1$ 的赫兹相干共振^[2~6], 利用半导体激光脉冲亦观察到铷和铯原子基态超精细能级间的相干共振^[7, 8]和铯原子塞曼磁子能级间的相干共振^[9].

本文报道利用直接调制半导体激光器的注入电流所产生的光脉冲序列激发铷原子基态时所观察到的 $\Delta m=1$ 和 $\Delta m=2$ 的塞曼相干共振.

2 塞曼相干的产生和探测

理论和实验已证明^[2, 4, 5], 对于如图 1 所示的 Λ 形三能级系统, 如果使用频率为 ω_{13} 和 ω_{23} 的激光, 同时使能级 $|1\rangle$ 和 $|2\rangle$ 与能级 $|3\rangle$ 耦合起来, 则在 $|1\rangle$ 和 $|2\rangle$ 能级之间将产生相干现象.

为了了解原子基态能级中的塞曼相干, 考虑图 2(a) 所示的实验原理图. 如图所示, 一

束调谐于铷原子 D_2 线的圆偏振泵浦光被重复频率为 ν_m 、宽度为 τ 的脉冲所调制, 沿着 x 方向传播(其电向量 \mathbf{E} 在 YOZ 平面上), 与磁场垂直的方向通过铷原子样品. 这样一束圆偏振泵浦光包含着 σ^+ 、 σ^- 和 π 的光跃迁成份, 它们将同时激发从 $5s_{1/2}$ 基态的 $m-1$ 、 m 、 $m+1$ 磁子能级至 $5p_{3/2}$ 激发态的磁子能级 m 的相应的光跃迁, 如图 2(b) 所示. 结果在基态 $\Delta m=1$ 和 $\Delta m=2$ 的塞曼能级之间便产生相干. 若激发态的弛豫速率小于调制脉冲的重复频率 ν_m , 且脉冲宽度 τ 满足 $2\pi\tau\nu_z \ll 1$ (其中 ν_z 为塞曼分裂的频率, $\nu_z = |\Delta m| \nu_L$, ν_L 为拉摩进动频率), 则每当 ν_m 或其谐波 $N\nu_m$ ($N=0, 1, 2, 3, \dots$) 等于 ν_z 时, 由每个光脉冲所产生的相干便将同步地相互加强, 从而出现非常尖锐的共振.

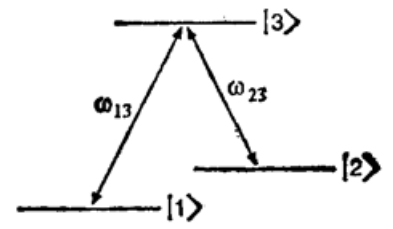
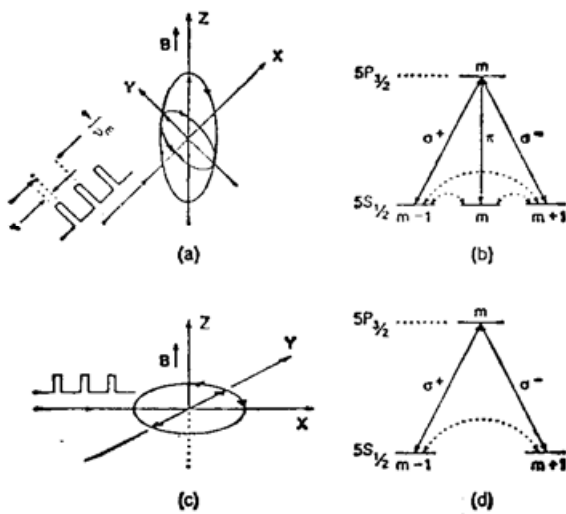


Fig. 1 Δ type three-level system



- (a) Circularly polarized pump beam propagating along X axis;
- (b) Simultaneous excitation of σ^+ , σ^- and π optical transitions producing $\Delta m=1$ and $\Delta m=2$ Zeeman coherences;
- (c) Linearly polarized pump beam propagating along the X axis with \mathbf{E} -field along Y axis;
- (d) Simultaneous excitation of σ^+ , σ^- optical transitions producing $\Delta m=2$ Zeeman coherences

Fig. 2 Optical pumping geometries used for the generation of Zeeman coherences in the ground state. Quantification axis Z.

另一方面, 如图 2(c) 和图 2(d) 所示, 如果脉冲的泵浦光是线偏振(其电向量 \mathbf{E} 垂直于量子轴 z), 则只能激励起 σ^+ 和 σ^- 的跃迁, 每当 $N\nu_m = \nu_z = 2\nu_L$ 时, 就只能产生 $\Delta m=2$ 的塞曼相干.

当原子汽泡室中产生塞曼相干时, 通过汽泡室传输的泵浦光的强度将以 ν_z 的频率受调制, 且其平均光强亦将发生变化. 如果脉冲重复频率满足共振条件, 则其光强的调制幅度及其平均光强的变化将最大. 这样, 传输的泵浦光便可直接用于探测所感生的相干. 探测相干的另一种方法是利用偏振光谱技术^[10]. 这种技术使用了另一束较弱的线偏振光作为探测激光. 当这束激光通过已被泵浦的样品时, 其偏振方向将发生改变, 改变量与所感生的相干的各向异性有关, 利用正交检偏器, 其后再接一个光电探测器, 便可以容易地测出其偏振方向的任何变化. 这时所探测出的光强变化亦是以 ν_z 的频率调制的. 这种探测方法由于其本底电平为零, 故具有很高的灵敏度.

3 实验安排及其结果

3.1 二极管激光短脉冲序列的产生

众所周知, 利用锁模、增益开关和 Q 开关技术可以产生半导体超短激光脉冲. 然而, 通

过控制半导体激光器的注入电流而实现的增益开关技术, 由于其简单, 是很有吸引力的, 利用这种技术, 已产生 30 ps 的半导体激光脉冲^[11,12]. 本文所使用的就是这种技术.

实验中所用的是商品激光二极管 ML4402A 型. 它工作于单模时的线宽约 20 MHz, 发射线型为洛伦兹型. 图 3 示出产生周期性光脉冲的实验电路安排. 如图所示, 重复频率为 ν_m 的电脉冲序列, 经 $47\ \Omega$ 的串联电阻后, 被加在激光二极管上, 二极管低于阈值工作. 通过适当地调节偏置电流、电调制脉冲的宽度和幅度, 可以获得短的光脉冲序列. 应该指出, 利用增益开关技术所能得到的最短的光脉冲是与激光二极管的弛豫振荡频率也就是与管子本身的结构密切相关的, 在上述型号管子的情况下, 可以得到约 200 ps 的光脉冲. 图 4 给出了当偏流为 34.8 mA, 电调制脉冲为 1 V, 1 MHz, 933 ps 时所得到的 197 ps 的光脉冲. 这样的光脉冲宽度对于研究 0.01 T 磁场下的塞曼相干是足够短的.

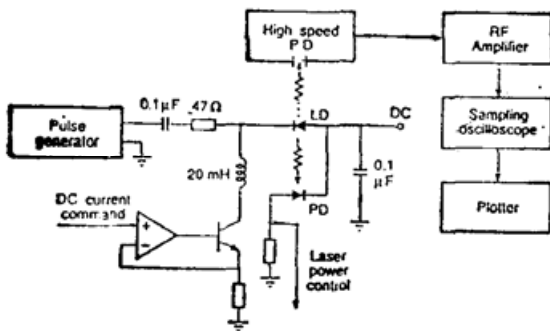


Fig. 3 Schematic of the electronic circuit used to control, bias and pulse the laser diode

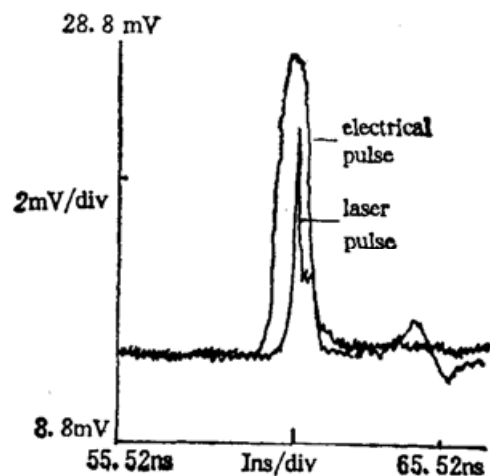


Fig. 4 Optical pulse of 197 ps duration, produced by gain switching of the laser diode: bias current 34.8 mA, electrical pulse: 933 ps, 1 MHz, 1 V

3.2 $\Delta m = 1$ 的塞曼相干的观察

图 5(a) 表示 ^{85}Rb 和 ^{87}Rb 的超精细能级, 图 5(b) 表示铷原子 D_2 线的超精细成份及其相应的吸收线型. 实验时, 激光就调谐于 D_2 线.

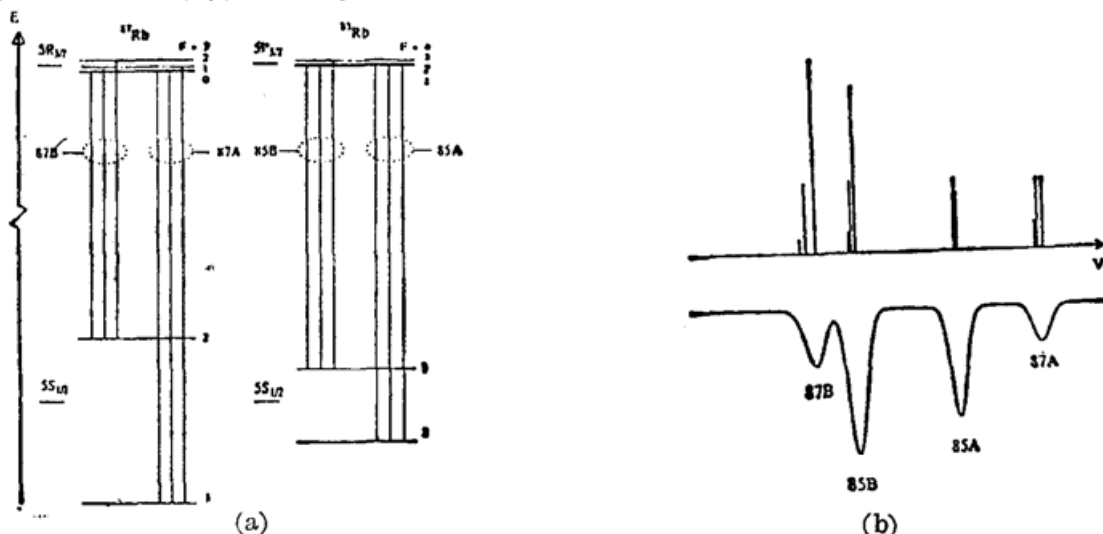


Fig. 5

- (a) Hyperfine structure of the $5S_{1/2}$ and $5P_{3/2}$ states of Rb;
- (b) Hyperfine structure components and linear absorption profile of the D_2 -line.

产生和探测 $\Delta m=1$ 的塞曼相干的实验安排如 6 所示。由图可知,从激光二极管出来的光束被分成两束:一束是强的圆偏振泵浦光,另一束是弱的、沿 Y 轴的线偏振探测光。这两束直径约为 5 mm 的光以很小的角度相交于长约 20 mm 的天然铷汽泡室的中心,探测光通过样品后进入正交检偏器,相干信号被光电二极管探测,并自动地记录下来。在实验中,为了得到稳定的相干共振信号,激光二极管需恒温至 10^{-3}°C 的精度,注入电流亦应恒定在 10^{-2}mA 的量级。

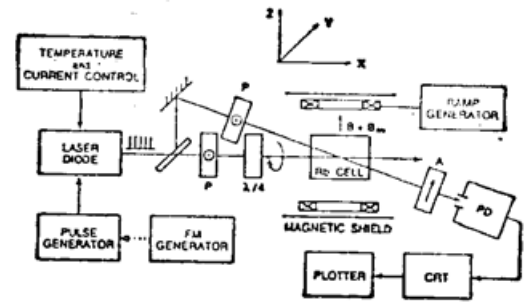


Fig. 6 Schematic of the experimental setup used to produce and observe $\Delta m=1$ Zeeman coherences in the Rb ground state

塞曼相干共振的谱线可用扫描磁场或扫描重复频率 ν_m 的方法得到。图 7 表示当激光调谐于 85 A 的吸收线时,用扫描磁场的方法得到的塞曼相干磁共振谱线。对 85 B、87 A 和 87 B 亦观察到类似的谱线。图中每个共振峰上面标出的数表示相应的谐波数。

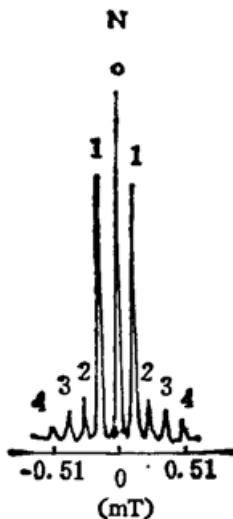


Fig. 7 $\Delta m=1$ Zeeman coherence signal obtained by scanning the magnetic field
B. The laser is tuned to 85A

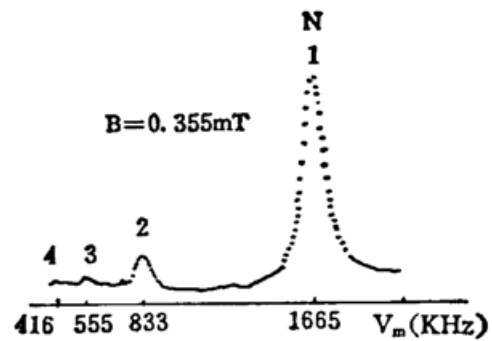


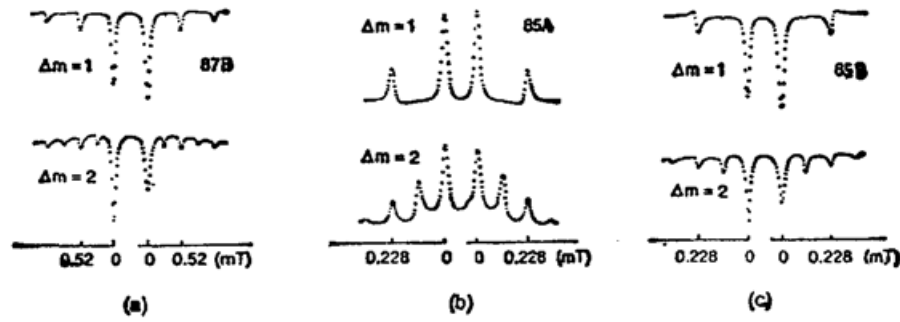
Fig. 8 $\Delta m=1$ Zeeman coherence signal obtained by scanning the pulse repetition rate ν_m . The static magnetic field is set to 0.355 mT ($\nu_L=1.665\text{MHz}$) and the laser is tuned to 85A

图 8 表示当激光调谐于 85A 线时,在 0.355 mT 磁场下,用扫频的方法得到的相干共振谱线。测得的拉摩进动频率为 1.665 MHz。

每条共振谱线的线宽约为 50 kHz,这是比较大的,它主要来自磁场不均性增宽和渡越时间增宽。改善静磁场的均匀性和采用缓冲气体,并适当扩展激光的光束,可使共振谱线的线宽大大变窄。

3.3 $\Delta m=2$ 的塞曼相干的观察

为了产生 $\Delta m=2$ 的塞曼相干,在图 6 的实验安排中去掉 $\lambda/4$ 片,即可获得所需的泵浦光束。当磁场沿 z 方向时,被泵浦光照射后的样品就像一个以频率 ν_c 绕着磁场旋转的偏振片^[7],直接监测通过样品后的泵浦光,便可探测出相干共振信号。图 9(a)和(b)表示当二极管激光器分别调谐于 85A 和 85B 谱线时,用三角波扫场方法得到的相干共振的信号。为了比较起见,图中还给出了当再度放入 $\lambda/4$ 片产生圆偏振光作泵浦时观察到的 $\Delta m=1$ 的



The laser is tuned to: (a) 87B; (b) 85A; (c) 85B

Fig. 9 $\Delta m=2$ Zeeman coherence signals obtained by scanning the magnetic field B

塞曼相干共振信号。显然, $\Delta m=2$ 的共振信号的数目正好等于 $\Delta m=1$ 的两倍, 这是预料中的。这是因为对 $\Delta m=1$, $\nu_L = N\nu_m$, 而对 $\Delta m=2$, 则 $\nu_L = N(\nu_m/2)$ 。

4 结 束 语

通过直接调制半导体激光器注入电流的方法, 本文得到了宽度约为 200 ps 的周期性激光脉冲序列。利用这种简单的脉冲激光源, 观察到了铷原子基态磁子能级间 $\Delta m=1$ 和 $\Delta m=2$ 的塞曼相干磁共振信号。在实现一种全光学的磁场测量仪方面, 这种简易的塞曼相干技术有可能得到应用; 再者, 若进一步缩短光脉冲的宽度, 例如短至 50 ps 左右, 并使圆偏振光的传播方向与磁场平行, 还可用于研究 ^{85}Rb 的基态超精细结构中在场无关的 $\Delta m=0$ 的微波范围的相干共振, 而无需使用微波源和有关的微波谐振腔, 从而可能导致实现一种全光学化的新的原子频标。

参 考 文 献

- [1] E. Wolf ed., Progress in Optics, Vol. 5. Amsterdam: North-Holland publishing Company, 1966: 1~81
- [2] J. Mlynek, W. Lange, H. Harde, et al., High-resolution Coherence Spectroscopy using pulse trains. *Phys. Rev. A*, 1981, **24** (2): 1099~1102
- [3] J. Mlynek, W. Lange, A Simple Method of Observing Coherent Ground State Transients. *Opt. Commun.*, 1979, **30** (3): 337~340
- [4] Y. Fukuda, J. Hayashi, K. Kondo et al., Synchronized Quantum Beat Spectroscopy using Periodic Impact Excitations with CW Mode-Locked Laser Pulses *Opt. Commun.*, 1981, **38** (5, 6): 357~360
- [5] H. Harde, H. Burggraf, Ultrahigh-Resolution Coherence Spectroscopy by Means of Periodic Excitation with picosecond pulses. *Opt. Commun.*, 1982, **40** (6): 441~445
- [6] Y. Fukuda, K. Yamada, T. Hashi, Sublevel Echoes Induced by Resonant Light Pulses: Quantum Beat Echoes. *Opt. Commun.*, 1983, **44** (4): 297~300
- [7] Y. Prior, A. Ben-Reuven, M. Rosenblum ed., Methods of Laser Spectroscopy, New York: plenum Publishing Corporation, 1986: 105~108
- [8] L. Mandel, E. Wolf ed., Coherence and Quantum Optics V. New York: Plenum Publishing Corporation, 1984: 993~1000
- [9] T. Mishina, Y. Fukuda, T. Hashi, Optical Generation and Detection of $\Delta m=2$ Zeeman Coherence in the Cs Ground State with a Diode Laser *Opt. Commun.*, 1988, **66** (1): 25~30
- [10] G. Weiman, T. W. Hansch, Doppler-Free Laser Polarization Spectroscopy. *Phys. Rev. Lett.*, 1976, **36** (20): 1170~1173
- [11] J. Auyeung, Picosecond Optical Pulse Generation at Gigahertz Rates by Direct Modulation of a Semiconductor Laser. *Appl. Phys. Lett.*, 1981, **38** (1): 308~310
- [12] H. Ito, H. Yokoyama, S. Murata, et al., Generation of Picosecond Optical pulses with Highly RF Modulated AlGaAs DH Laser. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1981, **QE-17** (5): 663~670

Observation of Zeeman coherences within the ground state of rubidium atoms using pulsed diode laser

YANG SHIQI

(Dept. of Physics South China Normal University, 510631)

M. TETU N. CYR M. GUY

(Centre d'Optique, Photonique et Lasers Dept. de Genie électrique Université
Laval Québec G1K7P4 Canada)

(Received 13 January 1992)

Abstract

Zeeman coherences with $\Delta m=1$ and $\Delta m=2$ are observed in the ground state of natural rubidium vapor optically pumped with a laser diode pulse train. The laser pulse of approximately 200ps at 780 nm are produced by gain-switching through direct modulation of the inject current of the laser. $\Delta m=1$ coherences are detected by a probe beam using the polarization spectroscopy technique, while the forward scattering spectroscopy technique is used to detect the $\Delta m=2$ coherences.

Key words pulsed laser, Zeeman coherence resonance.