

利用共振辐射压力获得准单一速度原子束*

陈洪新 蔡惟泉 束 伟 李佛生 刘亚淑 王育竹

(中国科学院上海光学精密机械研究所量子光学(联合)开放实验室, 上海 201800)

摘 要 报道了利用行波场的共振辐射压力获得准单一速度原子束的实验研究结果, 并进行了理论分析. 实验上利用斜入射失谐为-100 MHz 行波光场共振作用原子束可使准单一速度原子束偏转 1.7 mm, 速度宽度小于 58 m/s.

关键词 共振辐射压力, 准单一速度原子束.

1 引 言

原子在共振光场中的运动已被人们广泛的研究, 而且取得了很大进展^[1,2], 近年来人们试图利用辐射场与原子相互作用来获得单一速度的原子束, 以满足原子光学研究对原子单速性的要求, 原子的单速性越好, 原子波包的相干长度越长^[3~5], 对此作者曾提出了利用漫射光来冷却原子并得到单色原子束^[6], 用来进行原子干涉的实验研究. 本文提出利用斜入射行波光场的共振辐射压力进行选择速度的原子束偏转来获得准单一速度的原子束, 并进行了实验获得了速度宽度为 58 m/s 的准单一速度的原子束, 并进行了理论分析.

2 理论考虑

考虑一个二能级原子束沿 Z 方向运动, 激光束沿着与原子束轴线成 θ 角的方向照射原子束, 如图 1 所示. 当激光频率补偿了原子的多普勒频移后与原子共振时, 原子将在激光方向吸引光子而获得动量, 然后自发辐射放出光子而获得反冲. 使原子在负 X 方向有一个速度分量而使这一部分原子束发生偏转. 在激光场很强时, 即拉比(Rabi)频率 $\Omega \gg \beta$ 时 ($\beta = A/2$ 为半爱因斯坦系数), 其偏转量为^[7]:

$$\langle x \rangle = \frac{\hbar k L t}{2 \tau m v} \sin^2 \theta \quad (1)$$

其中 \hbar 为普朗克常数, $k = 2\pi/\lambda$ 为传播常数, τ 为原子激发态寿命, L 为原子飞行到探测区的距离. v 为原子飞行速度, t 为原子受激光照射时间, 把 $t = D/v \sin \theta$ 代入(1)式得共振原子的偏转量与原子速度的关系式:

$$\langle x \rangle = \frac{\hbar k L D}{2 \tau m^2} \sin \theta \quad (2)$$

* 国家自然科学基金部分资助项目

收稿日期: 1993年6月15日

式中 D 为激光照射区, 必须指出的是(2)式仅在共振条件下才成立, 共振条件为:

$$v_0 \frac{v}{c} \cos \theta = \Delta v \tag{3}$$

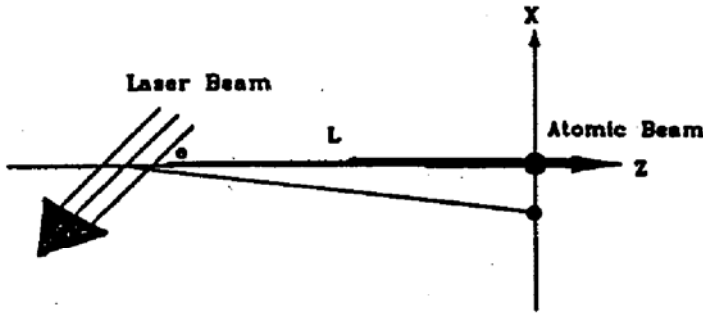


Fig. 1 Schematic diagram of experimental arrangement for deflection of an approach monochromatic velocity atomic beam using travel-wave field resonance-radiation pressure

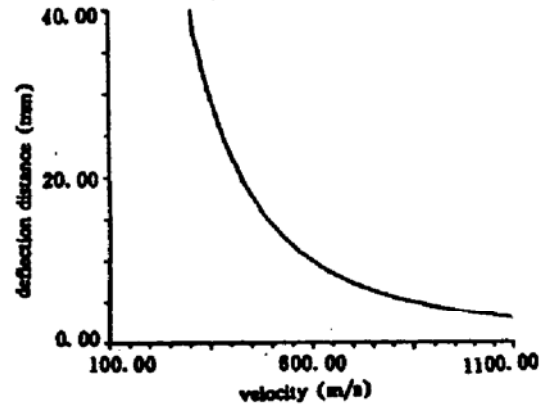


Fig. 2 The distance of deflection for Na atoms VS velocity at $L = 100$ cm, $D = 3.5$ mm and $\theta = 83$ degree

式中 Δv 为 $v_0 - v_1$, v_0 为原子跃迁频率, v_1 为激光频率, 图 2 为钠原子 D_2 线, 在 $L = 1$ m, $\theta = 83^\circ$ 条件下原子偏转量与速度的关系, 可见速度小的原子可有很大的偏转量. 这样实验上测出被偏转原子束的偏转量即可得到被偏转原子的中心速度.

由于激光和原子共振吸收光子都具有一定的线宽, 符合共振条件(3)的原子速度将有一宽度, 亦即被偏转的原子束速度将有一宽度. 把(3)式代入(2)式得:

$$\langle x \rangle = \frac{\hbar k L D v_0^2}{2\tau m c^2 (\Delta v)^2} \cos^2 \theta \sin \theta \tag{4}$$

对(4)式微分可得由于激光频率线宽而引起的原子束偏转的最大宽度:

$$\Delta \langle x \rangle = \frac{\hbar k L D v_0^2}{\tau m c^2 (v_0 - v_1)^3} (|\Delta v_1| + |\Delta v_0|) \cos^2 \theta \sin \theta \tag{5}$$

由共振条件可得 $|\Delta v_1| + |\Delta v_0| \cong v_0 (\Delta v / c) \cos \theta$, 所以(5)式为:

$$\Delta \langle x \rangle = \frac{\hbar k L D v_0^3}{\tau m c^3 (v_0 - v_1)^3} \cos^3 \theta \sin \theta \Delta v \tag{6}$$

其中 Δv 为由于激光线宽和原子吸收线宽引起的被偏转原子束速度宽度.

当考虑原子束发散时, 则在发散角为 ψ 时的原子束最大偏转量宽度为:

$$\Delta \langle x(\psi) \rangle = \frac{\hbar k L D v_0^3}{\tau m c^3 (v_0 - v_1)^3} \cos^3 (\theta - \psi) \sin (\theta - \psi) \Delta v - (L + l) \sin \psi \tag{7}$$

式中 l 为原子束源到作用光之间的距离. 原子束在 X 方向上的原子数密度分布为: $n(\psi) = n_0 \exp(-mv^2 \sin^2 \psi / 2kT)$, 所以最终原子束偏转宽度为:

$$\Delta \langle x \rangle_{\text{end}} = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} n(\psi) \Delta \langle x(\psi) \rangle \cos \psi d\psi \tag{8}$$

由(7)(8)式可见只要测出原子偏转的宽度即可计算被偏转原子束的速度宽度.

3 实验与结果

原子束装置是一个长约 200 cm, 直径为 22 cm 的圆柱形真空系统, 真空度为 2.67×10^{-4} Pa, 如图 3 所示. 钠原子从一个约 500 μm 的小孔中逸出形成原子束. 在相距炉孔 40 cm 处有一个直径小于 500 μm 的准直孔. 计算可知原子束经准直孔后的发散角小于 2×10^{-5} rad. 在作用区有一个几乎平行于

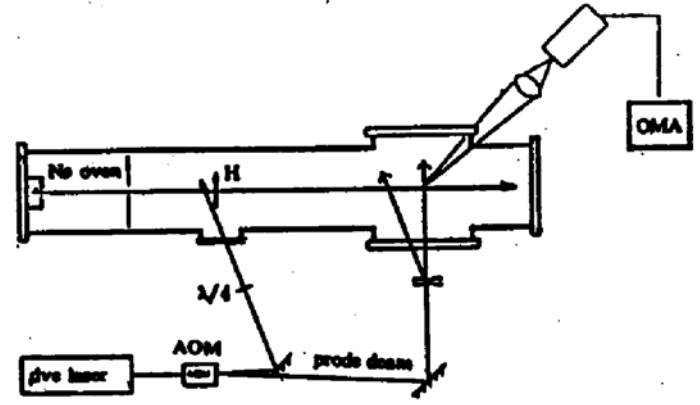


Fig. 3 Experimental setup

激光束的 3×10^{-5} T 的磁场 H, 作用光与原子束夹角为 83° . 所用激光器为环型连续染料激光器, 线宽近似为 10 MHz, 而钠原子的吸收线宽为 10 MHz, 行波场的激光功率为 6.4 mW. 用单色仪、钠吸收池和原子束荧光来确定激光频率, 使激光频率与钠原子束准确共振.

为了使斜入射的行波光场能与一定速度的原子共振, 用一声光调制器(AOM)调制光频率, 使作用光与探测光之间相差 -100 MHz. 同时为了消除光抽运效应, 采用了圆偏振激光束, 作用宽度为 3.5 mm. 当作用激光与原子束共振而观察到荧光时, 这一共振的原子将发生偏转. 偏转的那部分原子和未偏转的原子在相距作用区 100 cm 的探测区内用激光诱导荧光法探测, 并用 OMA-I 记录荧光的空间分布.

实验结果: 图 4 是无偏转原子的空间荧光分布曲线及斜入射行波场作用于原子束后, 一部分原子发生偏转后的空间荧光分布曲线, 左边的小峰为被偏转的准单一速度的原子束. 从实验曲线的两峰值间距可得到这一准单一速度原子束偏转量为 1.7 mm, 偏转原子束半宽度为 0.4 mm. 由共振条件及(7)、(8)式计算可得, 这部分被偏转的原子束中心速度为 647 m/s, 速度宽度为 58 m/s. 这种单色性较佳的原子束将对许多物理实验的研究具有重要意义.

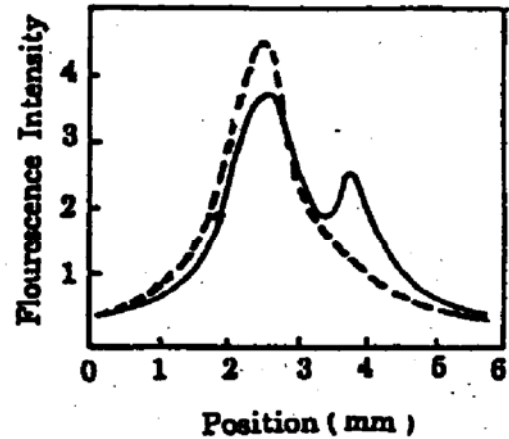


Fig. 4 The initial fluorescence from the atomic beam at X direction; (a) with no interaction light, (b) with detuning -100 MHz, power 6.4 mW, θ 83 degree

4 讨 论

实验得到了准单色原子束的偏转量为 $\langle x \rangle_{\text{exp}} = 1.7$ mm, 而理论计算的偏转量为 $\langle x \rangle_{\text{theory}} = 1.9$ mm. 实验结果和理论值基本符合. 同时在实验上可以很精确的测定偏转原子束的荧光宽度, 再由(7)、(8)式 $\Delta v = \alpha \Delta \langle x \rangle_{\text{end}}$, (α 为比例系数), 可以直接得到这一原子束的速度宽度. 从实验测量结果图 4 可推知被偏转的原子束中心速度为 647 m/s, 原子束速度宽度为 58 m/s. 这一速度宽度较窄的原子束再经过积分球进一步压窄其速度宽度^[7]可得到 Δv 小于几米/秒的单一速度原子束. 同时由图 4 可见 $I_{\text{det}}/I_{\text{total}} = 0.71$, 显然这一偏转的原子束亮度还是相当高的.

以上分析讨论表明, 这样的实验将是很有意义的, 单色性较好的原子束将在研究原子光

学实验中得到重要应用,同时对同位素分离也很有价值.

参 考 文 献

- [1] V. Letokhov, V. Mingin, Light radiation pressure on atoms. *Phys. Rep.*, 1981, 73: 1~32
- [2] P. D. Lett, W. D. Phillips, S. L. Rolston *et al.*, Optical molasses. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1989, B6(11): 2084~2107
- [3] David W. Keith, Christopher, R. E. Kstrom *et al.*, An interferometer for atoms. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, 66(21): 2693~2696
- [4] Y. Z. Wang, S. W. Fang, X. J. Wang *et al.*, A configuration of atomic lens by TEM₀₀ model, *Program 97 WeHeraeus-Seminar*, June 10-12, 1992, Germany
- [5] Gregg M. Gallatin, Phillip L. Gould, Laser focusing of atomic beam. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1991, B8(3): 502~508
- [6] 陈洪新, 刘 亮, 王育竹, 单频漫射光产生的辐射压力及对原子束的冷却与单色效应. *光学学报*, 1993, 13(12)待发表
- [7] 王育竹, 共振光压作用下单一速度原子束的偏转. *光学学报*, 1982, 2(6): 531~534

An Approach Monochromatic Velocity Atomic Beam Obtained by Resonance-Radiation Pressure

Chen Hongxin Cai Weigiang shu Wei Zhou Shangyu
Li AFosheng Liu Yashu Wang Yuzhu

((Joint) Laboratory for Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Academia Sinica, Shanghai 201800)

(Received 15 June 1993)

Abstract The experimental observation of deflection of an approach monochromatic velocity atomic beam using travel-wave field resonance-radiation pressure is reported and the theory analysis is presented in this paper. In experiment, the deflection distance of the approach monochromatic velocity atomic beam is about 1.7 mm when the atomic beam interacts with a oblique incident travel-wave laser beam with detuning -100 MHz and the Δv is less than 58 m/s.

Key words resonance-radiation pressure, approach monochromatic velocity atomic beam.