

利用空间多普勒调谐技术冷却原子 及其速度单一化

陈洪新 束 伟 王育竹

(中国科学院上海光机所量子光学(联合)开放实验室, 上海 201800)

提要 本文理论计算了用圆锥管内多次全反射激光而产生的多普勒频移来冷却原子束的机制。给出了最佳冷却原子束的圆锥管的夹角、长度、反射次数及激光入、出射角等参数。理论计算了原子束经过圆锥管冷却的速度分布情况。数值计算结果表明:采用两个长 130 cm 的锥形管来冷却原子束,选用合适的失谐量可使极大部分速度小于 1200 m/s 的原子冷却到 81m/s,并且可得到单一速度的高亮度的原子束。

关键词 空间多普勒频移,激光冷却

1 引 言

在考虑速度变化的多普勒频移情况下,当光子被原子吸收并以自发辐射形式释放能量时,其反冲动量形成光压力。由于光压力可使原子的速度增加、减少或偏转^[1,2],因而在同位素分离、原子的冷却和捕俘^[1~3]等许多方面得到重要应用。目前,随着原子光学的发展,人们希望能获得单色冷原子束来进行原子干涉等实验。

本文从理论上提出了利用激光角度变化的光场实现原子束激光冷却的模型,得到了用圆锥管内多次全反射光产生的多普勒频移来冷却原子束的技术^[4],理论分析并计算了原子束经过圆锥管冷却后原子速度分布演变情况。结果表明:在考虑原子多普勒效应情况下,当原子通过圆锥管时,原子将被减速,减速后的原子将进一步与下一个较小夹角的光场作用继续减速(管内激光场与原子束夹角不断减小),利用这种技术可以使相当宽速度范围的原子得到减速,最终原子速度可以减速到 81 m/s,且速度宽度小于 20 m/s。

2 冷却光场的实现

实现原子束减速,原则上采用频率低于原子共振频率 ω_0 的行波激光束对着原子运动方向照射原子束,就可以靠散射力实现减速。激光频率 $\omega < \omega_0$ 是为了克服多普勒频移以满足: $\omega = \omega_0(1 - v/c)$ 对有夹角的激光照射原子束时,共振作用条件为

$$\omega = \omega_0(1 - v/c \cdot \cos\theta) \quad (1)$$

其中 c 为光速, θ 为光场与原子束的夹角。但是要有效地实现连续减速, 首先要解决的问题是连续补偿多普勒频移。这里我们利用固定频率的激光在空间方向角度的变化来补偿多普勒频移^[4,5]。图 1 中, 当激光从右边射入夹角为 2ψ 的锥形全反射管时, 激光在管内多次全反射后从左边出射, 原子束从左边圆锥形管的中心轴线射入, 由共振条件(1) 式可知: 当激光与原子夹角 θ 减小时, 为满足共振条件, 原子速度将减小。设原子在第 i 次反射光处满足共振条件及激光与原子束夹角为 θ_i , 则有

$$\omega_0(v_{i-1}/c) \cos\theta_i = \Delta\omega \tag{2}$$

其中:

$$\theta_i = \theta_{i-1} - 2\psi \tag{3}$$

$$Z_i = D/\sin\theta_{i-1} \tag{4}$$

式中 v_{i-1} 为原子经过第 $i-1$ 个反射光线后的原子速度。 ψ 为锥形管夹角的一半, D 为光束直径, Z_i 为第 i 次激光反射点到第 $i+1$ 反射点的距离。 ω_0 为原子共振频率, $\Delta\omega$ 为失谐量。利用式(3), (4) 关系可计算得到锥形管总长度为

$$L = \sum_i l_i \tag{5}$$

其中

$$l_i = 2d_i \cos(\theta_{i-1} - \psi) / \sin(\theta_{i-1} - 2\psi) \tag{6}$$

$$d_{i+1} = \frac{d_i [1 + 2 \sin\psi \cos(\theta_{i-1} - \psi)]}{\sin(\theta_{i-1} - 2\psi)} \tag{7}$$

式中 d_i 为激光第 i 次反射处到原子束的垂直距离, $d_0 = d$ 为原子束入射处反射镜边与原子束的垂直距离

利用(3), (5), (6) 和(7) 式可得到图 1 这种技术的反射次数、管长及光线的入出射角等参数(如表 1)。

Table 1 Numerical illustrations of various parameters of the total reflecting cone tube

Mirror Angle (degree)	Angle of deparature (degree)	Angle of incidence (degree)	Mirror Length (cm)	Number of reflections	Mirror separation (cm)
0.08	80	28.9	146.7	638	0.42
0.22	80	15.0	139.1	294	0.78
0.50	75	7.8	136.8	134	1.59
1.00	75	4.5	137.3	70	3.69
1.30	75	4.2	132.1	53	5.34
2.40	75	4.2	83.1	30	18.50

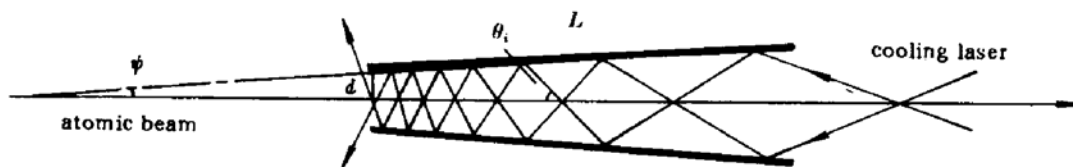


Fig. 1 Skeptch figure for the action between the atomic beam and the repeatedly reflecting lights along the total reflecting cone tube

利用这个表的参数可以设计出不同类型的锥形管来冷却原子束。表 1 中参数的优点是利用有限的管长度来获得多反射次数, 这样可以用一定的失谐量使相当宽的速度范围的原子都

获得有效冷却。下面我们将以第三组数据为例计算原子的冷却情况。

3 理论分析

考虑一个二能级原子与图 1 光场作用,原子运动方向与光线方向成 θ 角,这时原子在运动方向上所受的力为^[6]

$$F = \frac{hk\gamma G}{(1 + G + (\Delta + kv \cos\theta)^2/\gamma^2)} \quad (8)$$

其中 τ 为上能级原子寿命 $\gamma = 1/\tau$, Δ 为失谐量。设原子与第 i 个反射激光的相互作用距离为 Z_i , 则原子经过 Z_i 距离后被减速的速度由(8) 可得^[5]

$$v_i = (v_{i-1}^2 - 3h\Delta v Z_i/m\tau)^{1/2} \quad (9)$$

其共振条件为

$$\gamma_0(v_{i-1}/c) \cos\theta_i = \Delta v \quad (10)$$

其中, Δv 为失谐量,由(3), (4) 及(9), (10) 数值计算可得图 2, 图 3 曲线。可见用一具有合适的失谐量的激光来冷却原子束,相当宽速度范围内的原子都将被减速到一个特定的速度。这主要是由于在这一速度范围内的原子与激光共振作用不是同时发生的,速度大的原子将首先发生共振作用而被减速,而速度较小的原子(在减速速度范围内的原子)将较后与激光发生共振作用而减速(图 2),而不在这一范围内的原子将几乎不与管内的所有光符合共振条件,所以将不会被减速,因此出射的原子束的速度分布将在这一“平台”速度上高度聚束。设原子束初始平衡分布为^[7]

$$f(v) = 2/a^4 \cdot v^3 \exp(-v^2/a) \quad (11)$$

式中

$$a = (2kT/m)^{1/2}$$

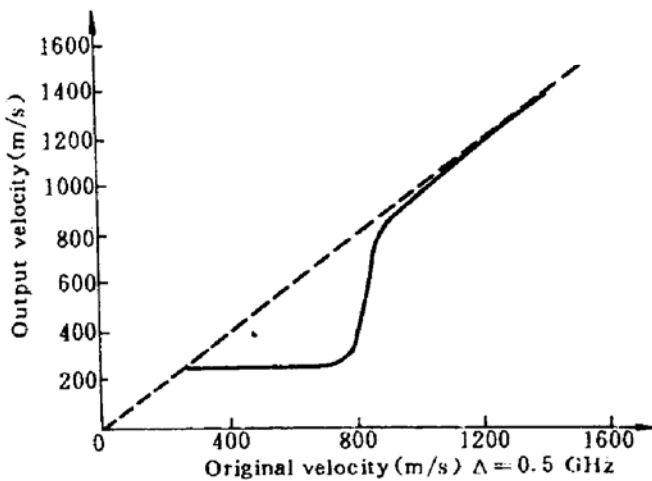


Fig. 2 Diagram of the initial velocity of atomic beam vs the cooled velocity after it slowed by resonantly interacted with the repeatedly reflecting lights.
 $\Delta = -200$ MHz

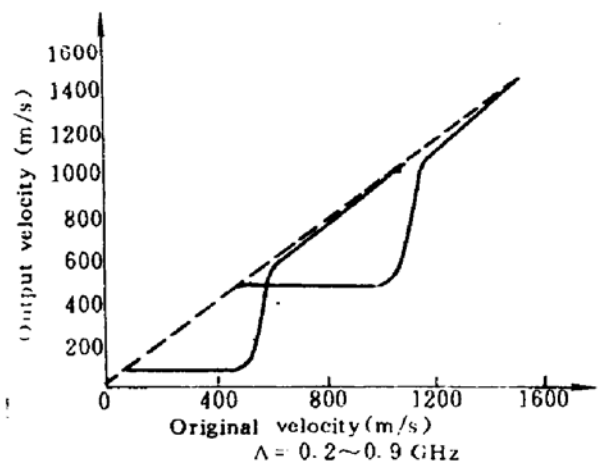


Fig. 3 Diagram of the initial velocity vs the cooled velocity at the detuning of -200 MHz, -900 MHz

在反射次数足够多,作用时间 $t \gg \tau$, $I \gg I_{sat}$ 的情况下,原子都将遵从(9), (10) 式而被减速。图 4 给出这种情况下速度分布的数值计算结果,图中表示不同失谐量的情况下原子减速后的分布情形。由图可见不同范围内的速度将用不同的失谐量的激光来减速,而且得到的速度分

布曲线聚速点的亮度很大,宽度很窄。

由以上图 3、图 4 可知如果用二个锥形全反射管来冷却原子束,完全可以把极大部分气体原子(v 从 0 至 1200 m/s)冷却至 81 m/s。图 5 给出了失谐量与冷却聚速点速度的关系,可见只要适当地调谐激光频率即可得到合适速度的聚速原子束,而且可以从激光频率得到冷却原子的速度。

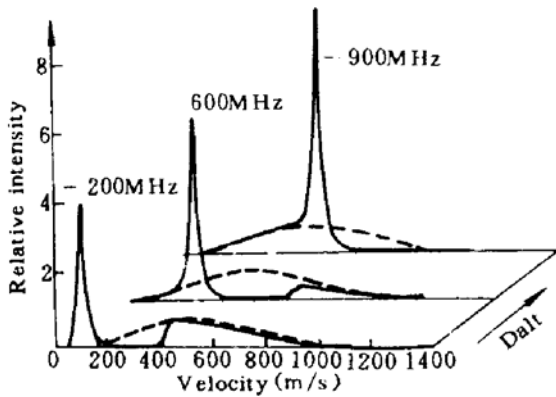


Fig. 4 Diagram of velocity distribution of the slowing atoms beam at the different detunings. $\Delta = -900$ MHz, -500 MHz, -200 MHz. The dashed line is the initial velocity distribution

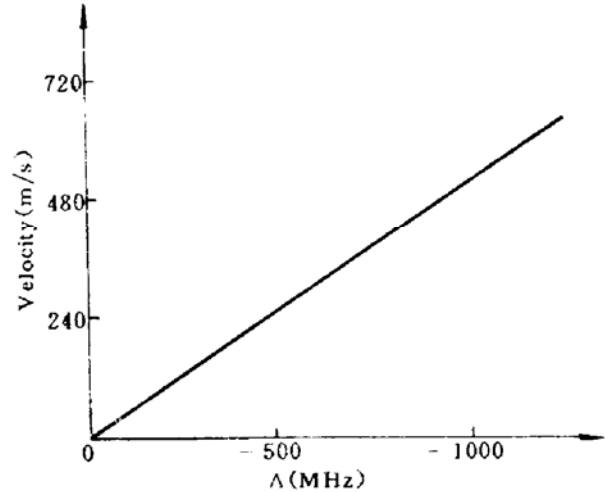


Fig. 5 Relation between detuning and accumulating point slowing velocity position

4 计算结果与讨论

在激光冷却中一个关键问题是怎样补偿由于冷却过程中原子速度变化产生的多普勒频移。目前已成功实现激光冷却的方法主要有:梯形磁场产生的 Zeeman 能级补偿多普勒频移,激光频率扫描补偿多普勒频移^[8,9],王育竹教授在 1979 年曾提出了用漫反射光来补偿多普勒频移^[5],这里我们基于类似的思想,利用激光在锥形管内多次反射以获得角度变化的光场方向的方法来补偿多普勒频移,在此情况下,要实现有效的激光冷却,必须使失谐量处在大的负失谐状态。计算表明:要使 Na 原子从 800 m/s 冷却至 280 m/s 左右,必须使失谐量在 500 MHz。

由上面的理论分析、计算表明,采用表 1 及图 1 所示的技术来冷却原子束,能使相当大的速度范围内的原子得到减速。例如,对使用图 3 所示的方法来冷却原子束,可用两个锥形管,分别射入 -900 MHz 与 -200 MHz 的激光,由图 3 可知第一个锥形管可使 500 m/s 至 1200 m/s 内的原子都减速到 490 m/s,然后用第二个锥形管把原子冷却至 81 m/s。可见用这种技术从原理上来讲是完全可以把极大部分原子冷却至很低速度(如 81 m/s),而且可以用这种技术来获得并控制某一点速度处高亮度的特定速度的原子。图 4 反映出不同的失谐量可得到不同速度处的高亮度聚束原子,且 $\Delta v < 20$ m/s。这种速度分布的原子为原子光学的研究提供了可靠的原子源。

在实验上对 Na 原子束,利用一连续染料激光扫描探测原子速度分布,同时利用另一连续染料激光经过 EOM 调制出 1772 MHz 边频射入图 1 的反射镜区后作用于原子来减速原子速度。

5 小 结

对于上面给出的角度变化冷却机制和理论分析是很有价值的。因为这一机制冷却原子束,不需要采用频率扫描或者梯形磁场来补偿多普勒频移变化,就有可能实现原子气体的冷却,且可获得很低速度的原子气体。

参 考 文 献

- 1 J. E. Bjorkholm. *Appl. Phys. Lett.*, 1975, 27 : 534
- 2 V. S. Letokhov. *Opt. Commun.*, 1976, 19 : 72
- 3 A. Ashkin. *Opt. Commun.*, 1971, 4 : 161
- 4 Jan. Omezn, Fujio Shimizu. *Jap. J. of Appl. Phys.*, 1985, 24(12) : 1655
- 5 王育竹 等. *中国科学*, 1984, A5 : 467
- 6 P. D. Lett *et al.*. *JOSA*, 1989, B16(11) : 2084
- 7 陈洪新,刘亮,王育竹. *光学学报*, 1993, 13(12) :
- 8 V. I. Balykin. *Opt. Commun.*, 1984, 49 : 248
- 9 W. Phillips, H. Metcalf. *Phys. Rev. Lett.*, 1982, 48 : 596

Theory and New Method of Laser Cooling of Atoms by Spatial Doppler Tuning and Effects of Monochromatic Velocity

Chen Hongxin Shu Wei Wang Yuzhu

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

Abstract A new method to cool atoms is proposed and discussed in theory. The parameters on this method are also given. The atomic beams slowed by repeatedly crossing a resonant laser beam at a conical angle. The results show that not only almost all the atoms below 1200 m/s are cooled to 81 m/s, but also a high density monochromatic velocity atomic beam can be obtained.

Key words spatial Doppler tuning, laser cooling