

激光冷却在原子束六极磁透镜技术中的应用*

李传文 蔡惟泉 王育竹

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

摘 要 分析了由六极磁场构成的原子束磁透镜的原理及像差。在比较了热原子束和单色冷原子束的会聚效果后得出结论: 影响它成像的主要因素是色差。应用激光冷却技术能使这一影响减小, 从而使磁透镜在原子光学领域得到更广泛的应用。

关键词 激光冷却, 原子束, 六极磁透镜。

1 引 言

原子束透镜是原子光学领域的重要器件, 目前比较成熟的技术只有利用空心光束来会聚原子束, 但它不能使原子束成像。六极磁场磁透镜能完善这一功能, 实现原子束成像。但长期以来, 人们只有速度分布很宽的热原子束可供使用, 而磁透镜本身的色差严重, 致使成像效果很差, 限制了这一技术的发展。近几年来, 激光冷却中性原子的技术发展迅速, 已经能产生平均速度小、速度分布窄的冷原子束, 磁透镜才又重新得到了重视。

本文分析了六极磁透镜的原理, 并对不同速度分布的原子束成像过程进行数值模拟, 据此对冷原子束和热原子束成像的像差, 主要是色差进行对比, 得出结论: 激光冷却技术大大改善了原子束磁透镜的成像效果。这将使其能够在原子光刻及原子光学的其它领域得到广泛应用。

2 原子束磁透镜原理

为分析六极磁透镜的像差, 首先对其原理进行分析。如图1所示, 六极磁场由三对磁极均匀排布而成, 磁场分布形式为近似的抛物线型。

忽略原子间相互作用, 由电磁学理论^[2]及磁场的具体分布形式^[3]可导出原子受到的力

$$F = -\mu_{\text{eff}} \frac{\partial H}{\partial r} = -2\mu_{\text{eff}} H_0 \frac{r}{r_0^2} [1 - 8(\frac{r}{r_0})^6 + o(\frac{r}{r_0})^{12}], \quad (1)$$

式中: H 为磁场强度, H_0 是磁铁极尖处的磁场强度, r_0 为磁铁极尖所在处圆的半径, μ_{eff} 为原子的有效磁矩。

由上式及图1(b)可见, 在六极磁场的近轴区域内 ($\frac{r}{r_0} \ll 1$), 原子受到的力具有回复力的

* 国家自然科学基金(No. 69678009, No. 19774060)及上海市科学技术发展基金的资助项目。

收稿日期: 1999-01-11; 收到修改稿日期: 1999-03-11

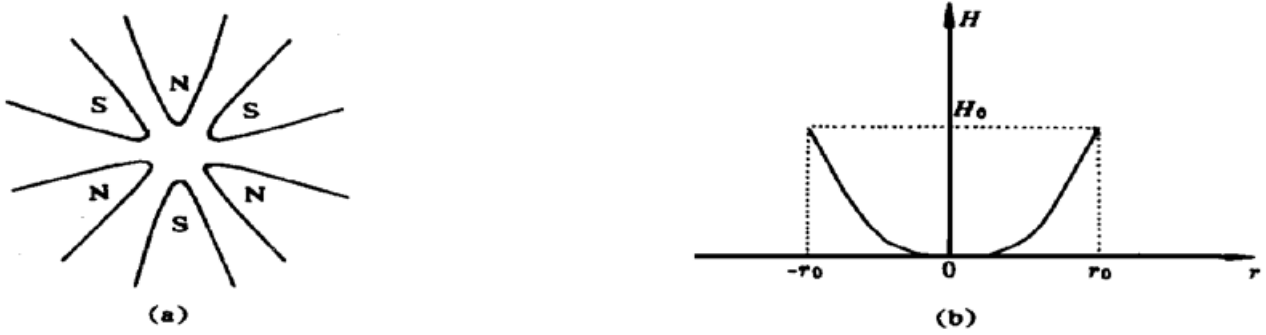


Fig. 1 Diagram of hexapole magnetic field. (a) The construction of a hexapole magnetic field, (b) Radial distribution of a hexapole magnetic field

性质, 原子将作简谐振动。这时原子束会聚的性能很好, 磁场具有与光学薄透镜相似的成像性质。

图2是磁透镜成像的原理图。

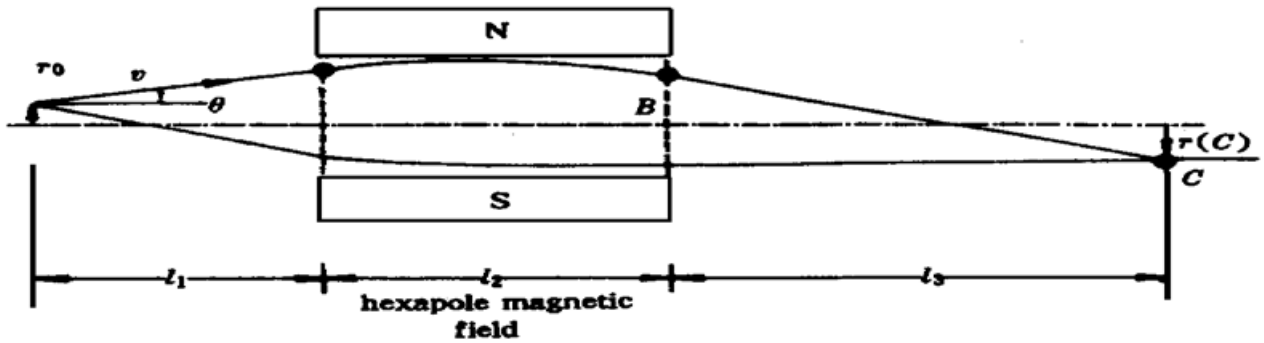


Fig. 2 Diagram showing the formation of image with a magnetic lens

为求磁透镜的放大倍数, 本文没有像文献[4]那样取轴上点进行计算, 而令 $r_0 > 0$ 。由此解得, 当 θ 较小时, 任意像平面上的像斑大小 $r(C)$ 为

$$\begin{aligned}
 r(C) &= r(B) - \frac{V_r(B)l_3}{v}, \\
 r(B) &= r_0 \cos \frac{l_2}{l_T} + \theta(l_T \sin \frac{l_2}{l_T} + l_1 \cos \frac{l_2}{l_T}), \\
 v_r(B) &= \omega[-r_0 \sin \frac{l_2}{l_T} + \theta(l_T \cos \frac{l_2}{l_T} - l_1 \sin \frac{l_2}{l_T})], \\
 l_T &= \frac{v}{\omega}, \quad \omega = \sqrt{\frac{2\mu_{\text{eff}}H_0}{mr_0^2}}, \tag{2}
 \end{aligned}$$

式中 l_3 为像平面到磁铁出口的距离, $v_r(B)$ 是原子的径向速度, l_T 是成像的特征长度, 不同的速度对应不同的特征长度, m 为原子质量。令(2)式中 $r(C)$ 对 θ 在 B 点微分为0, 即可解出透镜焦点到磁铁出口的距离(可称为焦距)

$$f = -l_T \frac{l_T \sin \frac{l_2}{l_T} + l_1 \cos \frac{l_2}{l_T}}{l_T \cos \frac{l_2}{l_T} - l_1 \sin \frac{l_2}{l_T}}. \tag{3}$$

这与文献[4]的结果是一致的。同时可以得到成像放大倍数 A

$$A = \frac{h}{h_0} = \cos \frac{l_2}{l_T} - \frac{l_T \sin \frac{l_2}{l_T} + l_1 \cos \frac{l_2}{l_T}}{l_T \cos \frac{l_2}{l_T} - l_1 \sin \frac{l_2}{l_T}} \sin \frac{l_2}{l_T}. \quad (4)$$

(3)式和(4)式就是原子束理想成像关系式。

考虑磁场分布的高次项后,会引入其它像差。但是在原子束半径小于0.3倍的 r_0 时,力的高次非谐项仅为简谐项的0.8%左右^[3],影响很小,相应的磁透镜像差可以忽略,成像可以认为是理想的。

3 激光冷却原子束减小磁透镜的色差的影响

虽然磁透镜其它的像差可以忽略,但色差影响还与原子速度有关,并不能忽略。以一般热原子束为例进行分析,取磁场的参数为

$$H = 0.7 \text{ T}, \quad l_1 = 0.1 \text{ m}, \quad l_2 = 0.1 \text{ m}, \quad r_0 = 0.5 \text{ mm},$$

原子束为炉温500 K的Na原子束。由(2)~(4)式可求得,对应最可几速率 v_p 的特征长度 $l_T(v_p) = 0.16 \text{ m}$,焦距 $f = 38 \text{ cm}$,放大倍数 $A = 1$ 。由(2)式求出不同速度的原子成像位置后,按原子的速度分布进行统计,就得到了像平面上的原子密度分布。图3绘出了在此条件下在对应于原子束最可几速率的像平面上的 $r(C)$ 随 v 的变化和此时原子束中的速度分布。

如图4所示,在原子束速度分布相当宽的情况下,像点发散度达毫米量级。原子束中原子的速度分布对应于光学中光的单色性,速度分布造成的影响则对应于光学中的色差。可见热原子束磁透镜成像的主要影响是色差。

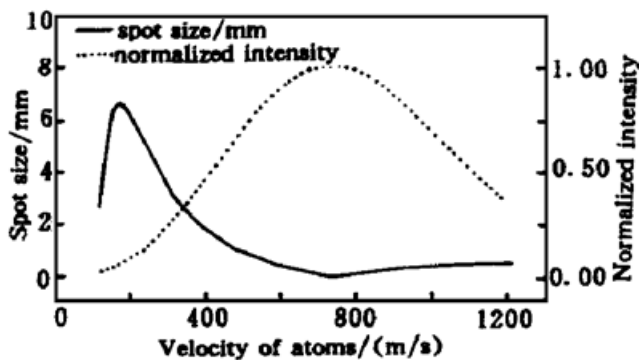


Fig. 3 Spot size $r(C)$ as a function of different velocity for hot atoms. Dashline: velocity distribution of the thermal atomic beam

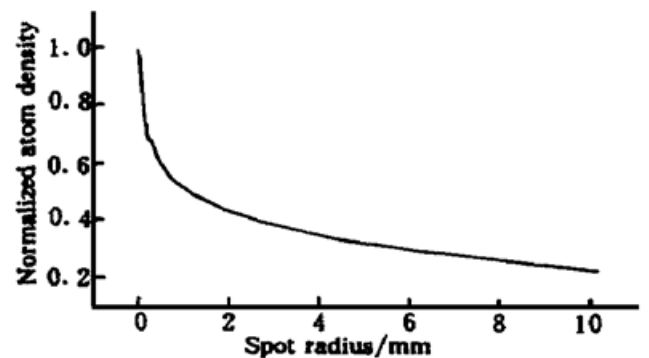


Fig. 4 Atomic density on the focus spot for thermal atomic beam

应用激光冷却技术可以压缩原子束的速度分布,从而减小色差的影响。下面就两种常见的冷却方案进行分析。

3.1 加横向激光冷却

横向激光冷却指在垂直于原子束的方向上加红移近共振并具有偏振梯度的光场,依靠自发辐射力和偏振梯度力直接减小原子束的横向速度。它能在不损失原子束流量的情况下减小原子束的发散角^[5]。而对一般热原子束而言,发散角由原子束喷嘴及准直孔大小和两者间的距离决定,减小发散角的同时将损失原子束的流量。

现在以 $r_0 = 0$ (轴上点源)情况为例分析色差。将(4)式对速度求微分,可得到色差的表达

式

$$\Delta r = -\frac{\theta}{\omega_l^2} \left(l_2 l_r \cos \frac{l_2}{l_r} + l_1 l_3 \sin \frac{l_2}{l_r} + l_2 l_3 \sin \frac{l_2}{l_r} - l_1 l_2 \sin \frac{l_2}{l_r} - l_r l_2 \sin \frac{l_2}{l_r} - \frac{l_1 l_2 l_3}{l_r} \cos \frac{l_2}{l_r} \right) \Delta v. \quad (5)$$

可见, 色差的影响正比于 θ 。在前述实验条件下, 按文献[5] 的计算结果, 取 $\theta = 2.5$ mrad 时能获得的原子束流量, 若应用激光冷却技术, 在 $\theta = 0.2$ mrad 时即可获得。因而, 色差对应的影响减小为冷却前的8%左右。由此可见, 使用横向激光冷却技术能减小色差对成像的影响。

3.2 使用单色原子束

经横向冷却后的原子束的成像效果并不够理想, 为此可使用纵向速度分布也很窄的原子束。这样的原子束可以通过使用塞曼(Zeeman) 调谐和红移行波激光冷却而获得^[6]。因为其速度分布很窄, 可以认为是单色原子束。

这类原子束的速度分布一般可近似为高斯分布, 宽度比热原子束窄得多。根据文献[6] 的实验数据, 取最可几速度 $v_p = 220$ m/s, 速度分布的宽度为6.8 m/s, 按照前文分析热原子束像差的方法对其成像进行了模拟。为与以上结果进行比较, 设磁场为 $H = 0.1$ T, 以使 l_r 保持不变, 由(2) 式可知焦距也不变。图5 绘出了原子束速度分布和计算出的 $r(C)$ 与 v 的关系, 图6是计算出的单色原子束像平面上的原子密度分布。

计算表明, 色差对单色原子束的影响已经在微米量级, 比热原子束的情况减小了几个数量级! 这时, 在原子束成像中, 色差和其他传统像差影响已经很小, 而原子波动性引起的衍射效应导致的分辨率限制上升到主要地位。

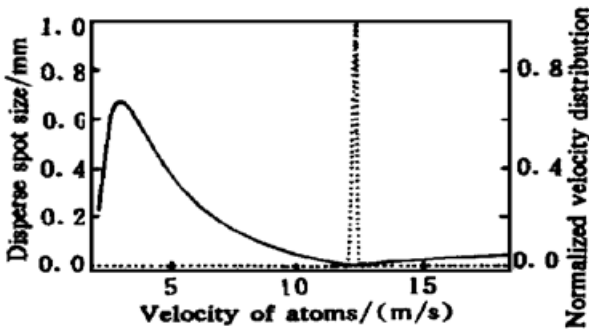


Fig. 5 Spot size $r(C)$ as a function of different velocity for cold atoms. Dashline: velocity distribution of the cold atomic beam

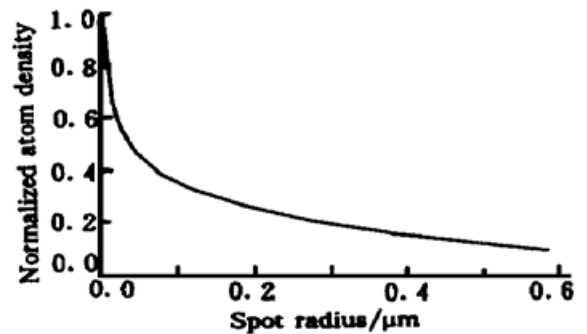


Fig. 6 Atomic density on the focus spot for cold atomic beam

结 论 从本文的分析可以看到, 使用原子束磁透镜时主要受色差影响。采用激光冷却技术能有效地压缩速度分布, 提高原子束的单色性, 从而大大改善磁透镜的成像质量。磁透镜与激光冷却技术的结合将会成为一种非常有用的技术手段。利用这一手段, 可以象使用光学透镜那样对原子束使用磁透镜。比如, 用于实现任意形状的原子的刻印, 观测原子的干涉, 衍射等现象, 甚至还可将光学全息术引入原子光学, 这将丰富原子光学的研究内容并促进其向应用目标的发展。

本文第一作者曾得到上海天文台翟造成教授、王庆华博士、张为群博士的帮助, 特此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Friedburg H. Optische abbildung mit neutralen atomen. *Zeitschrift für Physik*, 1951, **130**(4) ·493~ 512
- [2] 王义道, 王庆吉, 傅济时等. 量子频标原理, 北京: 科学出版社, 1986.
- [3] Bergeman T, Erez G, Metcalf H J. Magnetostatic trapping fields for neutral atoms. *Phys. Rev. (A)*, 1987, **35**(4) ·1535~ 1546
- [4] 彭玉琴, 张为群, 翟造成. 氢原子钟原子束光学系统设计及其最佳化. 计量学报, 1989, **10**(4) ·306~ 310
- [5] McClelland J J, Scholten R E, Palm E C *et al.*. Laser-focused atomic deposition. *Science*, 1993, **262** (5135) ·877~ 880
- [6] Molenaar P A, van der Straten P, Heideman H G M *et al.*. Diagnostic technique of Zeeman-compensated atomic beam slowing: Technique and results. *Phys. Rev. (A)*, 1997, **55**(1) ·605~ 614

Application of Laser Cooling in Atomic Beam Imaging by a Hexapole Magnetic Lens

Li Chuanwen Cai Weiquan Wang Yuzhu

(*Laboratory for Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800*)

(Received 11 January 1999; revised 11 March 1999)

Abstract The principle of the atom lens using a hexapole magnetic field and its aberration has been discussed. Comparison of the focusing results of a hot atomic beam with a monochromatic cold atomic beam shows that the main factor affecting the imaging quality of the magnetic lens is chromatic aberration. The use of laser cooling atomic beam technique can greatly reduce this aberration and makes the magnetic lens a useful tool in the field of atomic optics.

Key words laser cooling, atomic beam, hexapole magnetic lens.