

文章编号: 0258-7025(2006)02-0190-05

# 用于腔量子电动力学研究的铯原子双磁光阱

闫树斌, 耿涛, 张天才, 王军民\*

(山西大学光电研究所量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西太原 030006)

**摘要** 建立了铯原子双磁光阱(MOT)系统用来制备腔量子电动力学(Cavity-QED)实验所需的处于超高真空(UHV)环境中的冷原子。采用一束聚焦的连续激光束将气室磁光阱从背景铯蒸气中冷却并将俘获到的冷原子有效地输运到超高真空磁光阱,实现了铯原子双磁光阱。实验中研究了输运光束的失谐量对于超高真空磁光阱中的稳态冷原子数的影响,同时对气室磁光阱和超高真空磁光阱的装载过程作了分析。气室磁光阱和超高真空磁光阱的典型气压分别约为 $1 \times 10^{-6}$  Pa和 $8 \times 10^{-8}$  Pa,典型的稳态冷原子数分别约为 $5 \times 10^7$ 和 $5 \times 10^6$ ,冷原子等效温度约 $72 \pm 4$   $\mu$ K。

**关键词** 量子光学;双磁光阱;冷原子;铯原子;腔量子电动力学

**中图分类号** O 431.2 **文献标识码** A

## Cesium Double Magneto-Optical Trap for Cavity-Quantum Electrodynamics

YAN Shu-bin, GENG Tao, ZHANG Tian-cai, WANG Jun-min

(State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices,

Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

**Abstract** A cesium double magneto-optical trap (MOT) system is established to prepare the cold atoms in the ultra-high-vacuum (UHV) chamber for cavity quantum electrodynamics (Cavity-QED) experiment. Utilizing a focused weak continuous-wave laser beam, the cold cesium atoms, which are cooled and trapped from the slow tail of cesium vapor at room temperature, are continuously transferred from vapor-cell MOT to UHV MOT. The effect of the transfer laser detuning upon the steady-state atoms number in UHV MOT, and loading process of double MOT are experimentally investigated. Typical pressures of the vapor-cell MOT and UHV MOT are  $\sim 1 \times 10^{-6}$  Pa and  $\sim 8 \times 10^{-8}$  Pa, respectively. Normally  $\sim 5 \times 10^7$  and  $\sim 5 \times 10^6$  cold cesium atoms with effective temperature of  $72 \pm 4$   $\mu$ K are loaded into the vapor-cell MOT and UHV MOT.

**Key words** quantum optics; double magneto-optical trap; cold atoms; cesium atoms; cavity quantum electrodynamics

## 1 引言

腔量子电动力学(Cavity-QED)主要研究在微型谐振腔提供的特殊边界条件下光场与原子(离子)的相互作用<sup>[1,2]</sup>。该领域的研究促进了人们对光和物质间相互作用过程更深入的理解。1946年 Purcell 指出腔量子电动力学系统中原子的自发辐射会被共振效应所增强<sup>[3]</sup>。1985年 Kleppner 在 MIT 的研究小组利用间距为 0.2 mm 的法布里-珀罗

腔成功地抑制了其中的 Rydberg 原子的自发辐射,使寿命增加到真空中寿命的 20 倍<sup>[4]</sup>。随着高反射率镀膜技术以及冷原子技术的发展,单原子与单光子相互作用的实验研究成为现实。2000年 Rempe 小组在高精细度微腔中利用单光子实现了单原子的俘获<sup>[5]</sup>。2003年 Kimble 小组利用腔内俘获的单原子研究了单原子激光<sup>[6]</sup>。

中性原子的激光冷却与俘获技术在 20 世纪 80

收稿日期:2005-06-14;收到修改稿日期:2005-09-28

基金项目:国家自然科学基金(60578018,10434080,10374062)、教育部科学技术研究重点项目(204019)及山西省高校青年学术带头人科研经费资助课题。

作者简介:闫树斌(1975—),男,山西交城人,山西大学光电研究所博士研究生,主要从事冷原子物理及量子光学等方面的实验研究工作。E-mail:sbyan2001@sxu.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail:wwjjmm@sxu.edu.cn

~90 年代得到迅猛发展,尤其是磁光阱<sup>[7,8]</sup>技术能够方便地直接从处于室温下麦克斯韦-玻耳兹曼分布的稀薄原子蒸气中冷却并俘获慢速原子,可相对简单而有效地实现冷原子样品的制备,成为许多实验研究,如玻色-爱因斯坦凝聚(BEC)、冷原子碰撞、光学晶格、原子喷泉、腔量子电动力学得以进一步开展的基础。由于气室磁光阱(MOT)中背景气压仍较高,背景气体对于原子-腔系统的碰撞扰动较严重。气室磁光阱+超高真空(UHV)磁光阱的双磁光阱结构可以解决上述问题。将光学微腔置于超高真空环境中,可大大降低背景气体对原子与腔模相互作用的影响。在双磁光阱中实现冷原子的输运有很多种方法,基本思想是设法产生不平衡辐射压力,从而将冷原子由气室磁光阱推出,形成指向超高真空磁光阱的冷原子束流,进而实现冷原子在超高真空磁光阱中的再俘获。典型的方案有以下几种:低速原子源<sup>[9]</sup>、金字塔式磁光阱<sup>[10,11]</sup>、连续激光输运方案<sup>[12,13]</sup>、自由落体方案<sup>[14]</sup>、运动光学粘团<sup>[15]</sup>、磁导引<sup>[16]</sup>等等。

为了开展铯原子腔量子电动力学及相关的实验研究,建立了铯原子双磁光阱系统以及高精度光学微腔系统<sup>[17]</sup>。在铯原子双磁光阱中采用聚焦的连续激光束将冷原子由气室磁光阱有效地输运到了超高真空室中实现了再次冷却与俘获,满足了下一步腔量子电动力学实验的要求。

## 2 实验装置

铯原子双磁光阱系统如图 1 所示,上下两个真空腔体均采用无磁不锈钢加工,铯池通过金属阀与上方的气室磁光阱腔体相连。为了保持上下腔体有足够的压力差,中间由长 100 mm,上下内径分别为 4 mm 和 10 mm 的锥形压差管连接。上方的气室磁光阱腔体由抽速为 40 L/s 的一台二级式离子泵维

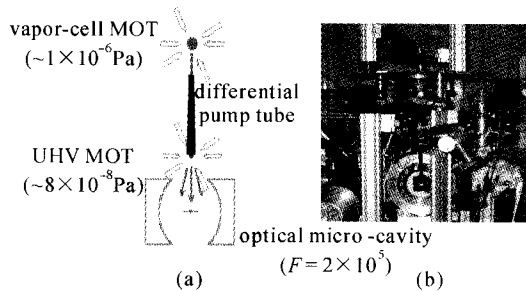


图 1 铯原子双磁光阱示意图(a)及实物照片(b)

Fig. 1 Schematic diagram (a) and photo (b) of the cesium double MOT

持。下方的超高真空磁光阱腔体中,已经先期放入了腔长约 48  $\mu\text{m}$ ,精细度约  $2 \times 10^5$  的光学微腔<sup>[17]</sup>,由于光学微腔、微腔底座、压电陶瓷及导线等各个器件放气的影响,所以采用了抽速为 300 L/s 的一台三级式离子泵维持。系统典型压力为:下方的超高真空磁光阱腔体约  $8 \times 10^{-8}$  Pa,上方的气室磁光阱腔体由于铯蒸气的存在,压力约  $1 \times 10^{-6}$  Pa,可以较快地从铯原子蒸气背景中冷却慢速原子,并装载到气室磁光阱中。

气室磁光阱的梯度磁场由一对反向亥姆霍兹线圈产生,电流 1.2 A 时典型的轴向磁场梯度为  $1 \times 10^{-3}$  T/cm;超高真空磁光阱的梯度磁场由另一对反向亥姆霍兹线圈产生,电流 1.6 A 时典型的轴向磁场梯度为  $0.8 \times 10^{-3}$  T/cm。为减弱磁场之间的相互干扰,在气室腔上方、超高真空腔下方分别放置一组轴对称的环形线圈。同时,为了消除地磁以及实验系统周围的杂散磁场干扰,在系统周围相互垂直的三个方向上搭建了三组正方形的磁场补偿线圈。

铯原子双磁光阱的激光系统如图 2 所示。气室磁光阱、超高真空磁光阱的冷却/俘获光以及连续输运激光束,由主振荡-功率放大型(MOPA)半导体激光器 SDL-TC-40 产生,该激光器典型线宽约 500 kHz。再抽运光由分布布拉格式(DBR)半导体激光器 SDL-5712-H1 产生,其典型线宽约 3 MHz。采用饱和吸收技术对激光系统进行频率锁定<sup>[18,19]</sup>,1 min 内激光器典型的频率起伏小于 1 MHz。气室磁光阱和超高真空磁光阱均采用相互垂直的三束冷却/俘获激光束往返对射的方案<sup>[20]</sup>。SDL-TC-40 激光的频率通过声光频移器 AOM1 及铯饱和吸收技术锁定到相对于铯原子  $6S_{1/2}F_g = 4-6P_{3/2}F_e = 4,5$  交叉线负失谐 51.5 MHz 处;分束后分别往返两次通

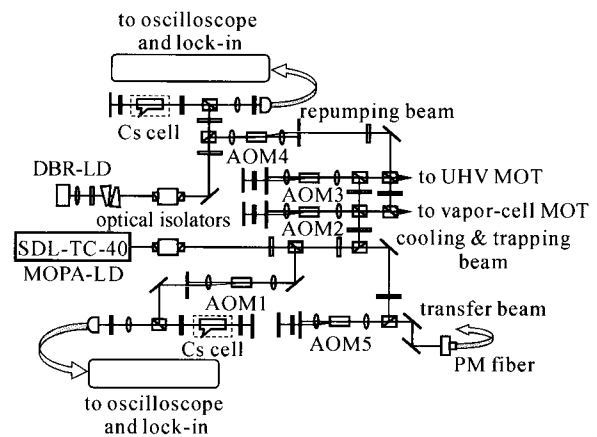


图 2 铯原子双磁光阱光路示意图

Fig. 2 Layout of optical system of cesium double MOT

过声光频移器 AOM2 和 AOM3, 用作气室磁光阱和超高真空磁光阱的冷却与俘获光, 可以方便地使激光频率相对于铯原子  $6S_{1/2}F_g = 4-6P_{3/2}F_e = 5$  循环跃迁的失谐量在  $0 \sim -5\Gamma$  进行调节,  $\Gamma = 5.2$  MHz 为  $F_g = 4-F_e = 5$  循环跃迁的自然线宽。再抽运分布布拉格式激光器频率锁定到铯原子  $6S_{1/2}F_g = 3-6P_{3/2}F_e = 3, 4$  交叉线上, 经声光频移器 AOM4 移至与  $F_g = 3-F_e = 4$  超精细跃迁共振, 避免铯原子在基态  $6S_{1/2}F_g = 3$  累积; 同时, 可以实现对再抽运光的快速开关控制。再抽运光通过  $\lambda/2$  波片和偏振分束棱镜与冷却/俘获激光束在扩束望远镜系统前进行合束。

从 SDL-TC-40 激光器分出一束作为连续运输光束, 通过声光频移器 AOM5 可在铯原子  $6S_{1/2}F_g = 4-6P_{3/2}F_e = 5$  循环跃迁附近  $\pm 30$  MHz 范围内调节。运输光束由保偏光纤导引到气室磁光阱正上

方, 经过凸透镜使之聚焦在气室磁光阱中心上方约 16 cm 处。运输光束到气室磁光阱俘获区的光斑直径  $w$  约为 1 mm。实验中通过横向放大率已先期校准的成像系统将冷原子团的荧光收集并成像到 CCD 摄像机上, 测得冷原子云的高斯直径约为  $700 \mu\text{m}$ 。运输光束在气室磁光阱冷原子处的光斑尺寸略大于冷原子云, 而光强与对应冷却/俘获光光强可比拟, 使冷原子在被推出俘获区的同时保持有效的横向冷却, 从而形成发散角较小的冷原子束流<sup>[12]</sup>。运输光束到超高真空磁光阱俘获区的光斑直径  $w$  约为 3 mm, 光强显著减小, 对于超高真空磁光阱的影响已很小。为了进一步降低这一影响, 通常将运输光束稍稍偏离超高真空磁光阱中心。

### 3 实验结果

表 1 为铯原子双磁光阱的典型实验参量。

表 1 铯原子双磁光阱的典型实验参量

Table 1 Typical parameters of cesium double MOTs

	Vapor-cell MOT	Ultra-high vacuum MOT
Frequency detuning /MHz	-12	-12
Cooling beam intensity /( $\text{mW}/\text{cm}^2$ )	5.3	12.7
Repumping power /mW	3	4
Magnetic field gradient /( $\text{T}/\text{cm}$ )	$1 \times 10^{-3}$	$0.8 \times 10^{-3}$
Beam diameter ( $1/e^2$ ) /mm	$\sim 12$	$\sim 10$
Typical pressures /Pa	$\sim 1 \times 10^{-6}$	$\sim 8 \times 10^{-8}$
Atom numbers	$\sim 5 \times 10^7$	$\sim 5 \times 10^6$

通过置于磁光阱中冷原子团正下方的细圆探测光的短程飞行时间吸收谱方法, 对冷原子的温度进行了测量<sup>[21, 22]</sup>。当同时关断冷却/俘获光、再抽运光和梯度磁场, 调节系统使冷原子自由下落, 记录到的典型的短程飞行时间 (TOF) 吸收谱信号见图 3, 对应的探测光与气室磁光阱中冷原子团中心的距离为  $h = 4$  mm, 6 mm。通过对飞行时间信号进行数值拟合可得到气室磁光阱中冷原子的等效温度约  $72 \pm 4 \mu\text{K}$ 。

研究了超高真空磁光阱中稳态时冷原子荧光与运输激光失谐量之间的关系。实验结果显示 (见图 4), 运输激光束功率取  $130 \mu\text{W}$  时, 在  $-12$  MHz 和  $+20.5$  MHz 出现两个峰值, 实验中选择运输光束的频率失谐为  $-12$  MHz。虽然图 4 中实验数据显示两个峰值, 且峰值高度几乎相等, 但是在失谐  $+20.5$  MHz 时对于频率变化更加敏感, 这一结果与

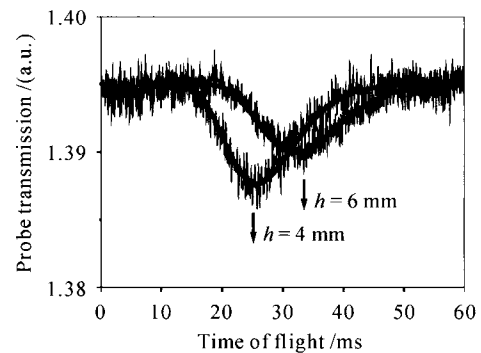


图 3 对应于  $h = 4$  mm 和 6 mm 典型的短程飞行时间吸收谱

(拟合得到的冷原子温度为  $72 \pm 4 \mu\text{K}$ )

Fig. 3 Typical short-distance time-of-flight (TOF) absorption signals for  $h = 4$  mm and 6 mm (the effective temperature of cesium cold cloud is  $72 \pm 4 \mu\text{K}$ )

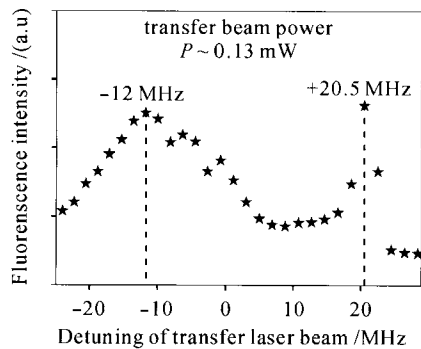


图 4 超高真空磁光阱中稳态冷原子荧光光强与运输光失谐量之间的关系

Fig. 4 Fluorescence intensity of cold cesium atoms in the UHV MOT, which is supposed to be proportional to steady-state atomic number recaptured in the UHV MOT, versus frequency detuning of the transfer beam

参考文献[12,13]所得结果类似。当运输激光束共振时,气室磁光阱中冷原子获得更大的冲量,因而冷原子获得的初始速度较大,在被推出气室磁光阱过程中不能得到有效的横向冷却,因而形成的冷原子束流具有较大的发散角和较高的速度,而不能被超高真空磁光阱有效地冷却和俘获<sup>[12]</sup>。研究结果表明,当运输光光强与气室磁光阱冷却/俘获光光强可比拟时,运输效果较好。不象玻色-爱因斯坦凝聚实验那样,由于后续的腔量子电动力学实验并不需要在超高真空磁光阱中俘获很多的冷原子,所以在实验中没有试图通过增大气室磁光阱冷却/俘获激光束的直径以及通过仔细优化气室磁光阱参量来实现更大数目冷原子的俘获;实验中也未对运输激光束的聚焦参量进行仔细的优化。

实验中还对气室磁光阱、超高真空磁光阱中冷原子的装载过程作了分析。当冷却/俘获光和再抽运光在  $t = 0$  时刻打开后,阱中俘获的冷原子荧光光强随时间逐渐增加达到稳态。磁光阱中所俘获的原子数  $N$  随时间  $t$  变化的方程<sup>[23]</sup> 为  $\frac{dN}{dt} = R - \frac{N}{\tau} - \beta \frac{N^2}{V_{\text{trap}}}$ , 式中  $R$  为俘获率,即单位时间内进入磁光阱中且可被磁光阱俘获的原子数; $N/\tau$  为由背景铯原子与磁光阱中的冷原子的碰撞所引起的碰撞损失率, $\tau$  为磁光阱中原子的平均寿命; $\beta N^2/V_{\text{trap}}$  为磁光阱中的冷原子之间的碰撞引起的碰撞损失率, $\beta$  为冷原子碰撞系数, $V_{\text{trap}}$  为冷原子样品的体积。当磁光阱内所俘获的原子数达到稳态后, $\beta N^2/V_{\text{trap}}$  项是限制磁

光阱中冷原子密度进一步提高的主要因素,但在磁光阱建立过程中当阱内原子数未达到稳态前,该项作用可近似忽略。

磁光阱建立过程中当阱内原子数未达到稳态,阱中的原子数  $N$  随时间  $t$  变化可近似表示为:  $\frac{dN}{dt} = R - \frac{N}{\tau}$ , 在  $N_{t=0} = 0$  的初始条件下方程的解为:  $N(t) = R\tau[1 - \exp(-t/\tau)]$ ,  $R\tau$  为稳态时磁光阱中俘获的原子数。冷原子的荧光光强与俘获原子数成正比,对于气室磁光阱、超高真空磁光阱冷原子的装载曲线见图 5(a)及(b),由上式对实验测量结果进行拟合,得到气室磁光阱、超高真空磁光阱中冷原子的典型寿命分别约为 2.6 s 和 7.9 s,相应的稳态原子数分别约为  $5 \times 10^7$  和  $5 \times 10^6$ 。

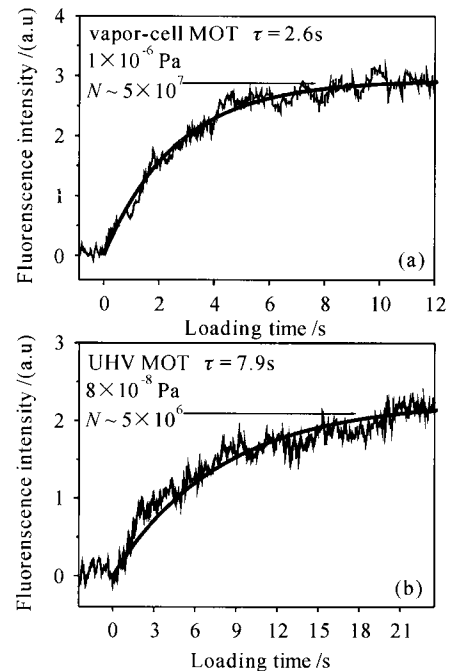


图 5 气室磁光阱(a)和超高真空磁光阱(b)中冷原子的装载曲线

$t = 0$  时刻冷却/俘获光及再抽运光同时打开,相应磁光阱中冷原子数逐渐增加达到稳态。典型的磁光阱寿命分别为 2.6 s, 7.9 s

Fig. 5 Typical loading process for the vapor-cell MOT (a) and UHV MOT (b)

The cooling and trapping beams as well as the repumping beams are turned on at  $t = 0$ , after which the atom numbers increased gradually and reach steady state finally. Typical lifetimes are 2.6 s for the vapor-cell MOT and 7.9 s for UHV MOT

真空腔体中背景原子的碰撞是影响磁光阱寿命的主要因素。为了研究少数原子乃至单原子与高精度光学微腔中光场的相互作用,期望增加相互作

用时间,因此背景原子的碰撞是考虑的主要因素之一。可以通过钛升华泵、吸气剂泵使超高真空腔体的压力进一步降低到约 $1 \times 10^{-8}$  Pa甚至更低,预计超高真空磁光阱的寿命将增加到数十秒甚至更长。

## 4 结 论

实现冷原子由气室磁光阱向超高真空磁光阱的输运后,可通过偏振梯度冷却过程进一步将冷原子温度降低到约 $10 \mu\text{K}$ ,释放冷原子可使其自由下落进入高精度度光学微腔,可进一步优化腔量子电动力学实验平台。根据先期已建立的高精度度光学微腔<sup>[17]</sup>的典型参量可推算,原子和腔场的耦合率 $g$ 约为 $2\pi \times 37 \text{ MHz}$ ,光学微腔衰减率 $\kappa$ 约为 $2\pi \times 7.6 \text{ MHz}$ ,而铯原子 $6S_{1/2}F_g = 4-6P_{3/2}F_e = 5$ 循环跃迁的自发辐射率 $\gamma = 2\pi \times 5.2 \text{ MHz}$ ,从而可计算得到 $g^2/\gamma\kappa$ 约为34.6,满足条件 $g^2/\gamma\kappa > 1$ ,这意味着可以进入腔量子电动力学的强耦合区。该光学微腔已经先期放入超高真空腔体中,其中心在超高真空磁光阱下方12 mm处。进行腔量子电动力学实验研究,还需要建立高灵敏探测系统,为此我们已搭建了一套差拍探测系统,得到的最小探测功率约3.6 fW,对应平均光子数为0.001<sup>[24]</sup>,可以满足对于单光子单原子水平相互作用过程探测的需要。

## 参 考 文 献

- 1 S. Haroche, J.-M. Raimond. Cavity quantum electrodynamics [J]. *Scientific American*, 1993, **268**(4):26~33
- 2 H. Mabuchi, A. C. Doherty. Cavity quantum electrodynamics; coherence in context [J]. *Science*, 2002, **298**(5597):1372~1377
- 3 E. M. Purcell. Spontaneous emission probabilities at radio frequencies [J]. *Phys. Rev.*, 1946, **69**(11-12):681
- 4 R. G. Hulet, E. S. Hifer, D. Kleppner. Inhibited spontaneous emission by a Rydberg atom [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1985, **55**(20):2137~2140
- 5 P. W. H. Pinkse, T. Fischer, P. Maunz *et al.*. Trapping an atom with single photons [J]. *Nature*, 2000, **404**(6776):365~368
- 6 J. M. K. Kerver, A. Boca, A. D. Boozer *et al.*. Experimental realization of a one-atom laser in the regime of strong coupling [J]. *Nature*, 2003, **425**(6955):268~271
- 7 E. L. Raab, M. Prentiss, Alex Cable *et al.*. Trapping of neutral sodium atoms with radiation pressure [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **59**(23):2631~2634
- 8 C. Monroe, W. Swann, H. Robinson *et al.*. Very cold trapped atoms in a vapor cell [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1990, **65**(13):1571~1574
- 9 Z. T. Lu, K. L. Corwin, M. J. Renn *et al.*. Low-velocity intense source of atoms from a magneto-optical trap [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **77**(16):3331~3334
- 10 J. J. Arlt, O. Maragò, S. Webster *et al.*. A pyramidal magneto-optical trap as a source of slow atoms [J]. *Opt. Commun.*, 1998, **157**:303~309
- 11 R. S. Williamson III, P. A. Voytas, R. T. Newell *et al.*. A magneto-optical trap loaded from a pyramidal funnel [J]. *Opt. Exp.*, 1998, **3**(3):111~117
- 12 W. Wohlleben, F. Chevy, K. Madison *et al.*. An atom faucet [J]. *Eur. Phys. J. D*, 2001, **15**(2):237~244
- 13 L. Cacciapuoti, A. Castrillo, M. de Angelis *et al.*. A continuous cold atomic beam from a magneto-optical trap [J]. *Eur. Phys. J. D*, 2001, **15**(2):245~249
- 14 A. Steane, P. Szriftgiser, P. Desbiolles *et al.*. Phase modulation of atomic de Broglie waves [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **74**(25):4972~4975
- 15 K. Gibble, S. Chang, R. Legere. Direct observation of *s*-wave atomic collisions [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **75**(14):2666~2669
- 16 C. J. Myatt, N. R. Newbury, R. W. Ghrist *et al.*. Multiply loaded magneto-optical trap [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(4):290~292
- 17 Li Liping, Liu Tao, Li Gang *et al.*. Measurement of ultra-low losses in optical supercavity [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(5):1401~1405  
李利平,刘涛,李刚等.高精度光学腔中低损耗的测量[J]. *物理学报*, 2004, **53**(5):1401~1405
- 18 Junmin Wang, Shubin Yan, Yanhua Wang *et al.*. Modulation-free frequency stabilization of a grating-external-cavity diode laser by magnetically induced sub-Doppler dichroism in cesium vapor cell [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2004, **43**(3):1168~1171
- 19 Yan Shubin, Wang Yanhua, Liu Tao *et al.*. Modulation-free laser frequency locking by AOM shifted cesium sub-Doppler spectra [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(10):1335~1338  
闫树斌,王彦华,刘涛等.声光偏频亚多普勒光谱无调制激光频率锁定[J]. *光学学报*, 2004, **24**(10):1335~1338
- 20 Yan Shubin, Liu Tao, Geng Tao *et al.*. Absorption spectroscopy of cold cesium atoms confined in a magneto-optical trap [J]. *Chinese Physics*, 2004, **13**(10):1669~1673
- 21 T. M. Brzozowski, M. Maczynska, M. Zawada *et al.*. Time-of-flight measurement of the temperature of cold atoms for short trap-probe beam distances [J]. *J. Opt. B: Quantum Semiclass. Opt.*, 2002, **4**(1):62~66
- 22 Geng Tao, Yan Shubin, Wang Yanhua *et al.*. Temperature measurement of cold atoms in a cesium magneto-optical trap by means of short-distance time-of-flight absorption spectrum [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(11):5104~5108  
耿涛,闫树斌,王彦华等.用短程飞行时间吸收谱对铯磁光阱中冷原子温度的测量[J]. *物理学报*, 2005, **54**(11):5104~5108
- 23 A. M. Steane, M. Chowdhury, C. J. Foot. Radiation force in the magneto-optical trap [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1992, **9**(12):2142~2158
- 24 Li Gang, Li Liping, Du Zhijing *et al.*. Ultra-low mean-photon-number measurement with balanced optical heterodyne detection [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2004, **21**(4):671~674