

实现玻色-费米混合气体量子简并的 四极 Ioffe 组合磁阱设计*

王鹏军 陈海霞 熊德智 于旭东 高峰 张靖

(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, 太原 030006)

(2007 年 12 月 21 日收到; 2008 年 3 月 12 日收到修改稿)

四极 Ioffe 组合磁阱 (QUIC 磁阱) 是由一对四极线圈和一个 Ioffe 线圈组合构成的一种 Ioffe-Pritchard 磁阱, 它已广泛应用在囚禁中性原子和实现蒸发冷却原子的实验中. 设计了两种不同结构的四极线圈和 Ioffe 线圈, 并对其进行了相应的数值模拟和测试. 通过比较获得了一种参数优化的 QUIC 磁阱, 这为 QUIC 磁阱线圈的优化设计提供了参考. 最后在优化的 QUIC 磁阱中, 采用射频蒸发冷却俘获⁸⁷Rb 原子, 实现了⁸⁷Rb 原子气体的玻色-爱因斯坦凝聚, 同时采用“共同冷却” (sympathetic cooling) 技术使费米气体⁴⁰K 达到量子简并.

关键词: 四极线圈, Ioffe 线圈, 四极 Ioffe 线圈组合磁阱, 原子冷却

PACC: 3280P

1. 引 言

近年来, 随着磁阱囚禁中性原子在冷原子物理各个领域的广泛应用, 人们提出了各种不同结构的磁阱. 到目前为止, 许多元素 (包括碱金属元素 Rb, Li, Na, H, K 及亚稳态 He) 的原子气体都在磁阱中实现了玻色-爱因斯坦凝聚 (Bose-Einstein condensation)^[1-6]. 由于磁阱自身的优点, 仅仅需要稳定线圈的电流就可以达到很高的磁场稳定性, 所以各种结构的磁阱已被应用在玻色-爱因斯坦凝聚的实验装置中, 其中最广泛的一类磁阱是 Ioffe-Pritchard 阱^[7]. 除了传统的 Ioffe-Pritchard 阱外, 还有很多变型, 如四叶阱 (clover-leaf trap)、棒球阱 (baseball trap)、四极 Ioffe 线圈组合磁阱 (quadrupole-Ioffe configuration trap, 简记为 QUIC 磁阱) 以及多种多样的微结构阱 (micro-chip trap)^[8-12], 其中 QUIC 磁阱与其他磁阱比较, 具有电流大小适中、关断较好、结构简单等优点. 在实验中, 用磁光阱俘获原子后, 经过光泵浦将原子抽运到所要求的自旋态上, 然后打开四极线圈将原子装入四极磁阱中. 由于磁光阱

和四极磁阱使用同一对线圈, 所以它们的空间位置完全重合, 这样就简化了线圈的几何结构, 可以很好地预装入原子. 最后打开 Ioffe 线圈, 形成 QUIC 磁阱, 将原子由四极磁阱转移到 QUIC 磁阱中. 因此, 磁光阱和 QUIC 磁阱在空间上是完全分离的.

本文设计了两组不同结构的四极线圈和 Ioffe 线圈组成的 QUIC 磁阱. 设计的线圈具有以下优点: (1) 体积小, 电流关断同步性较好, 易于控制; (2) 线圈采用漆包线绕制, 绕制时层层隔开, 减小了水阻, 散热迅速; (3) 外壳和骨架采用聚丙烯材料制成, 容易加工焊接. 我们数值计算了由四极磁阱到 QUIC 磁阱的变化过程, 同时对装入磁阱的原子进行吸收成像, 获得的实验结果与数值计算结果相符合.

2. 实验装置

实验采用的 QUIC 磁阱线圈, 空间位置如图 1 所示. 四极线圈沿 x 轴对称放置在真空玻璃气室 (气室外高为 40 mm, 宽为 40 mm; 内部高为 30 mm, 宽为 30 mm; 厚度为 5 mm, 长度为 120 mm) 的两侧, 距气室外壁 2 mm. Ioffe 线圈沿着 z 轴方向放置在真空玻

* 国家重点基础研究发展规划 (批准号: 2006CB921101)、国家杰出青年科学基金 (批准号: 10725416)、国家自然科学基金 (批准号: 60678029) 和教育部长江学者和创新团队发展计划 (批准号: IRT0516) 资助的课题.

通讯联系人, E-mail: jzhang74@sxu.edu.cn

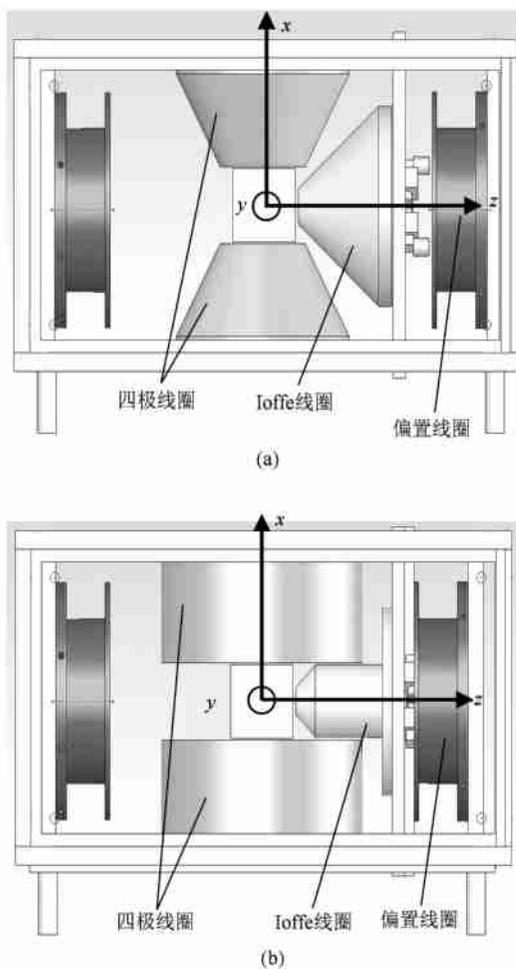


图 1 四极线圈和 Ioffe 线圈的组合示意图 (a) 第一组线圈, (b) 第二组线圈

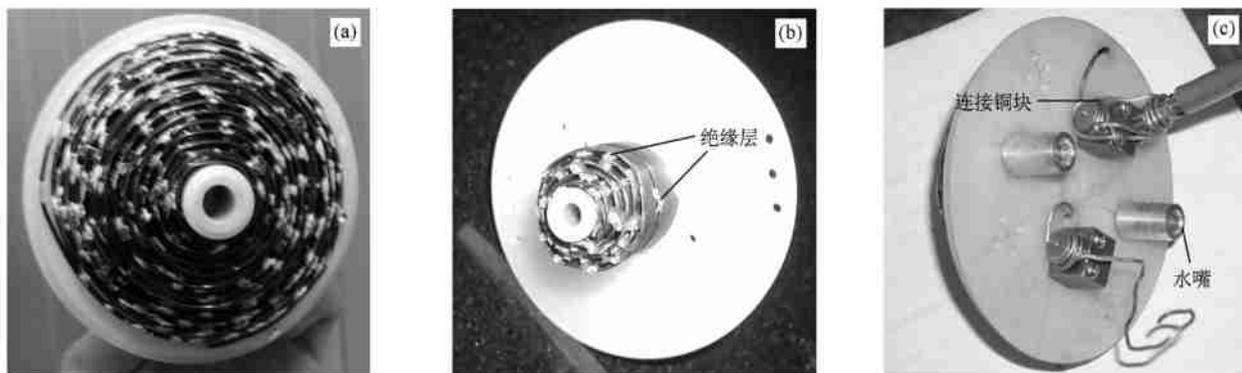


图 2 制作完成的 Ioffe 线圈照片 (a) 第一组 Ioffe 线圈, (b) 第二组 Ioffe 线圈, (c) 第一组 Ioffe 线圈的侧视图

3. 四极磁阱向 QUIC 磁阱的转变及结果分析

本文通过数值计算和实验测量 QUIC 磁阱轴向

璃气室的另外一侧, 距气室外壁 2 mm. 四极线圈和 Ioffe 线圈的轴线与真空玻璃气室的几何中心相交于一点.

我们先后设计了两种不同结构的线圈组合. 如图 1(a) 所示, 第一组的四极线圈由一对锥形线圈构成, 其内径为 30 mm, 前端外径为 52 mm, 末端外径为 102 mm, 长度为 60 mm, 绕线 124 匝, 漆包线直径为 2 mm. 四极线圈绕制成 12 层, 层间由厚度为 1 mm 的绝缘材料隔开, 这样有利于提高冷却效率. Ioffe 线圈也是锥形线圈(图 2(a)), 其内径为 10 mm, 前端外径为 14 mm, 末端外径为 110 mm, 长度为 60 mm, 共绕线 173 匝, 漆包线直径为 2 mm. Ioffe 线圈绕制成 16 层, 层间由厚度为 1 mm 的绝缘材料隔开.

第二组 QUIC 磁阱线圈如图 1(b) 所示, 四极线圈由一对圆柱形的线圈构成, 其内径为 20 mm, 外径为 60 mm, 长度为 42 mm, 绕线 288 匝, 漆包线直径为 2 mm. 四极线圈绕制成 12 层, 层间由厚度为 1 mm 的绝缘材料隔开, 每层有 24 圈, 用厚度为 3 mm 的绝缘材料分隔成 4 组. Ioffe 线圈为前端呈锥形的线圈, 其内径为 3 mm, 外径为 51.5 mm, 长度为 62 mm, 其中锥形前端长度为 11.9 mm, 共绕线 199 匝, 漆包线直径为 1.6 mm. 如图 2(b) 所示, Ioffe 线圈绕制成 6 层, 层间由厚度为 1 mm 的绝缘材料隔开, 除第一层外, 每层又用厚度为 3 mm 的绝缘材料分隔成 2 组. 在绕制过程中, 将线圈骨架固定在绕线机上, 绕制完成后与外壳焊接成一体, 内部通水以提高冷却效果.

磁场的变化, 研究四极磁阱向 QUIC 磁阱的变化过程, 并结合磁阱中原子的吸收成像进行对比分析. 首先我们采用 Mathematic5.0 软件数值计算 QUIC 磁阱的空间磁场分布. 由于研究区域离线圈很近, 线圈的大小、形状和结构的微小变化将对计算的磁场产生非常大的影响, 所以在计算中尽量模拟出线圈的真

实际情况. 我们在数值模拟时, 通过叠加单个通电线圈在空间一点的磁场来获得此点的磁感应强度.

单个通电线圈在空间形成的磁场可表示为^[19]

$$B_z = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{(R + \rho)^2 + (z - D)^2}} \times \left[K(k^2) + \frac{R^2 - \rho^2 - (z - D)^2}{(R - \rho)^2 + (z - D)^2} E(k^2) \right], \quad (1)$$

$$B_\rho = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{1}{\rho} \frac{z - D}{\sqrt{(R + \rho)^2 + (z - D)^2}} \times \left[-K(k^2) + \frac{R^2 + \rho^2 + (z - D)^2}{(R - \rho)^2 + (z - D)^2} E(k^2) \right], \quad (2)$$

其中

$$k^2 = \frac{4R\rho}{(R + \rho)^2 + (z - D)^2}.$$

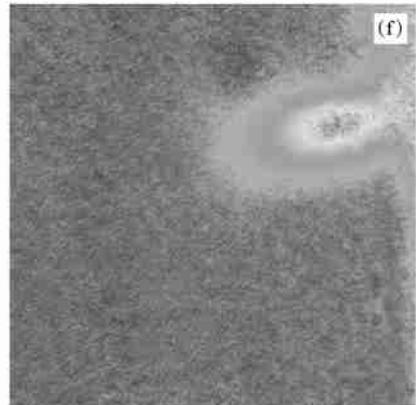
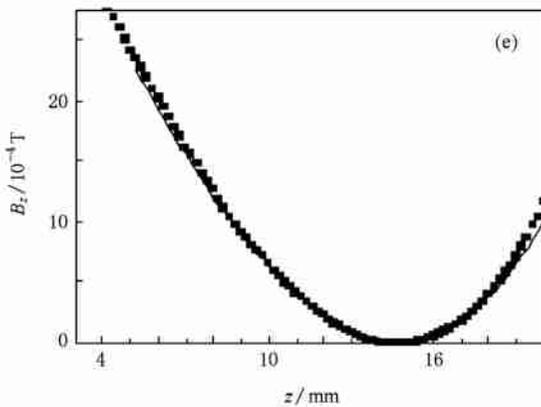
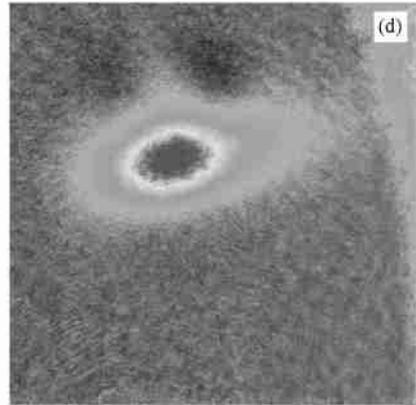
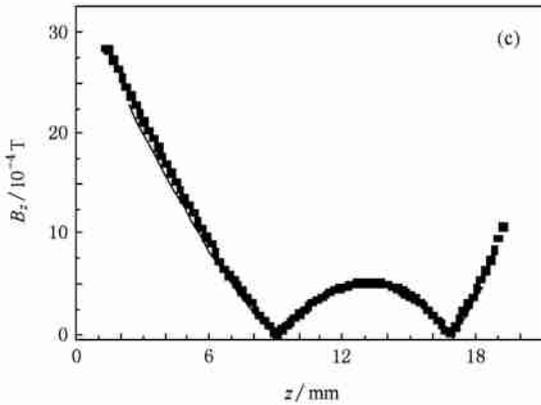
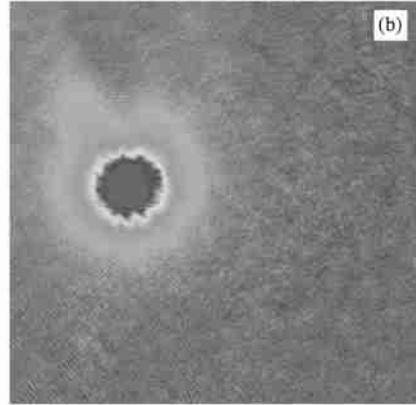
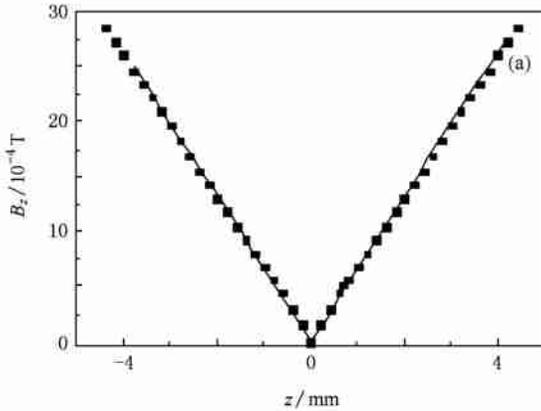


图3 四级线圈电流为 25.1 A 时, 第一组线圈组合的四极磁阱向 QUIC 磁阱的转变过程 (a), (c), (e) 为数值模拟结果(曲线)与实验结果(数据点)的对比; (b), (d), (f) 为与(a), (c), (e) 相应的原子吸收成像照片. Ioffe 线圈的电流从上而下分别为 0, 16.6 和 18 A. 相对于(a)图, (c)和(e)的成像系统分别移动了约 8 和 11 mm

(1) 式为磁感应强度轴向分量 B_z 的表达式, (2) 式为距离线圈 D 处的磁感应强度径向分量的表达式, 其中 $K(k^2)$ 和 $E(k^2)$ 分别是第一类和第二类完全椭圆积分^[13].

我们可以用 (1), (2) 式来计算 QUIC 磁阱中空间任意一点的磁感应强度. 因为 QUIC 磁阱中 z 轴上各点磁感应强度的 x, y 方向的分量都为零, 只需

考虑磁场 z 方向的分量变化就可以分析四极磁阱向 QUIC 磁阱的变化过程. 所以本文只计算了四极线圈和 Ioffe 线圈在 z 轴上各点 ($-20 \text{ mm} \sim 20 \text{ mm}$) 的磁感应强度变化, 并与实验测得的数据进行了比较.

采用第一组线圈组合时得到的结果如图 3 所示, 图中给出了在不同 Ioffe 线圈的电流下, 轴向磁场强度的变化和相应的原子吸收成像照片. 从图 3

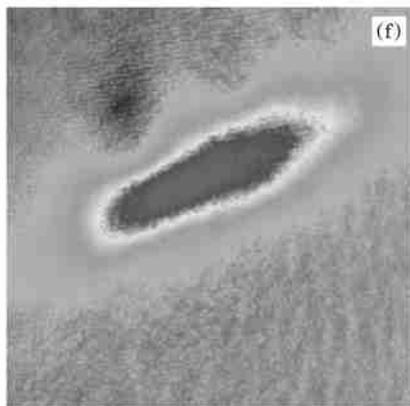
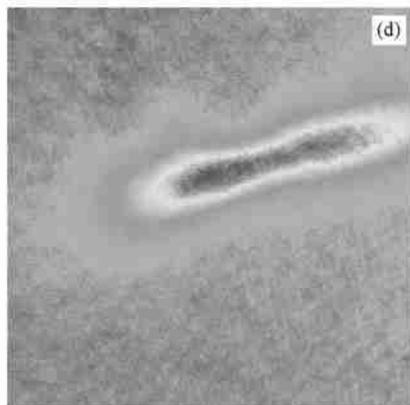
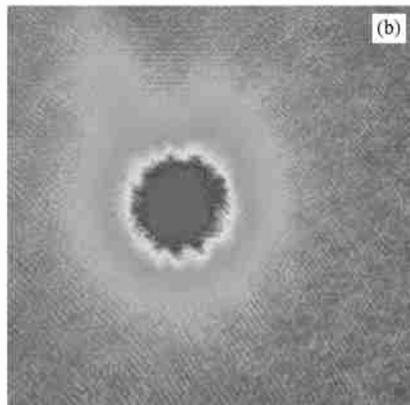
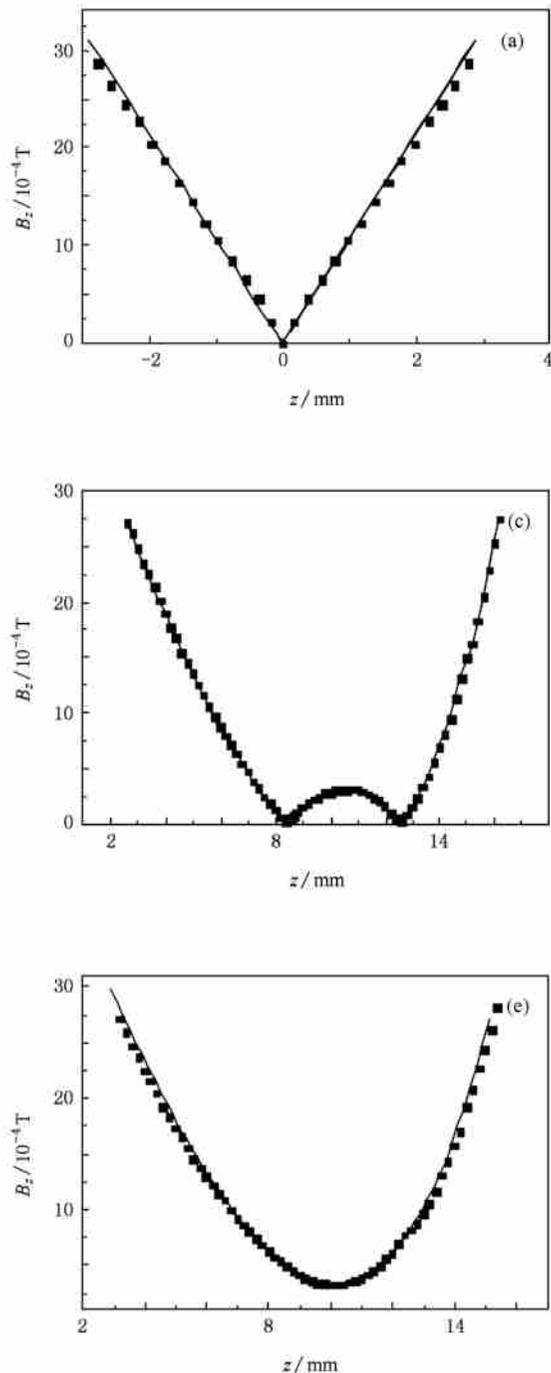


图 4 四极线圈电流为 25.1 A 时, 第二组线圈组合的四极磁阱向 QUIC 磁阱的转变过程 (a), (c), (e) 为数值模拟结果 (曲线) 与实验结果 (数据点) 的对比; (b), (d), (f) 为与 (a), (c), (e) 相应的原子吸收成像照片. Ioffe 线圈的电流从上而下分别为 0.33 和 35 A. 相对于 (a) 图, (c) 和 (e) 的成像系统分别移动了约 7 和 9 mm

可以看出,最后形成的 QUIC 磁阱的最低点距真空玻璃气室中心约 15 mm,这样在形成 QUIC 磁阱的过程中,原子会与真空玻璃气室壁碰撞立刻被加热到室温而从磁阱中逃逸出来.吸收成像结果如图 3(f) 所示,显示原子团有碰壁现象,所以第一组线圈在真空玻璃气室中无法形成可囚禁原子的 QUIC 磁阱.从数值模拟中发现四极磁阱在中心附近的磁场线性梯度区域太小,而导致了这样的结果.我们发现,当增大四极线圈的内径时,四极磁阱在中心附近的磁场线性梯度区域会增大,所以设计了第二组线圈组合.

采用第二组线圈组合时,两个电流源分别向四极线圈和 Ioffe 线圈供电,得到的结果如图 4 所示.当四极线圈的电流增加到 25.1 A 时,测得径向磁场梯度为 1.02×10^{-2} T/cm,数值模拟的梯度为 1.07×10^{-2} T/cm,如图 4(a) 所示.通过改变 Ioffe 线圈的电流来实现四极磁阱向 QUIC 磁阱的转变,当 Ioffe 线圈的电流为零时,磁场在 $z=0$ 处有一个零点,原子装载在四极磁阱中.当加大电流时,磁阱的零点向 Ioffe 线圈方向移动,俘获在磁阱中的原子团将随磁阱的最低点移动,磁阱的底部梯度变小,原子团的形状发生变化.所以在原子团的移动过程中,要求尽量缓慢以最大限度达到绝热移动,使原子不至于被加热而受到损失^[14].

当 Ioffe 线圈的电流加大到 20 A 时,磁场在 Ioffe 线圈附近出现了两个零点,形成一个双势阱结构.随着 Ioffe 线圈电流的加大,两个零点相互靠近,其间的势垒逐渐降低.当原子的能量不足以越过势垒时几乎没有原子损失.如图 4(c) 所示,当势垒降低到一定程度之后,处于第一势阱的原子会“流”向第二个势阱,这个过程不可逆.此时第二个势阱处于真空玻璃气室内壁的外侧,这样流过的原子就与处于室温的玻璃壁碰撞,碰撞后的原子几乎立刻被加热到室温而从磁阱中逃逸出来,这段时间称作四极磁阱向 QUIC 磁阱转变的“损失窗口”.在实验中,改进 Ioffe 线圈的电流时序,就减少了“损失窗口”时间和由此带来的原子损失.最后形成 QUIC 磁阱时, Ioffe 线圈的电流为 35 A,磁场在轴向呈抛物线分布, z 轴的磁场分布如图 4(e) 所示.

我们采用第二组线圈形成的 QUIC 磁阱,其中四极线圈的电流为 28 A, Ioffe 线圈的电流为 39.76 A,此时磁阱中磁场最小值为 1.5×10^{-4} T,磁场径向

梯度为 1.72×10^{-2} T/cm,轴向曲率为 1.622×10^{-2} T/cm².由此得知磁阱的径向和轴向角频率分别为 $2\pi \times 179.3$ Hz 和 $2\pi \times 16.3$ Hz.

在 ^{40}K - ^{87}Rb 原子冷却的半导体激光系统^[15] 和四极线圈构成的磁光阱中,通过磁光阱技术同时俘获 ^{87}Rb 和 ^{40}K 原子^[16],把俘获的原子最大限度绝热转移到 QUIC 磁阱中后, ^{87}Rb 的原子数约为 10^7 — 10^8 ,经过约 40 s 的射频蒸发冷却后,得到了原子数约为 1.64×10^5 的 ^{87}Rb 原子的玻色-爱因斯坦凝聚体.图 5 给出了飞行时间为 25 ms 时,玻色-爱因斯坦凝聚体的吸收成像照片,图 6 为此时的轴向光学厚度分布的实验数据和拟合结果.采用“共同冷却”(sympathetic cooling) 技术使费米气体 ^{40}K 达到量子简并^[17].

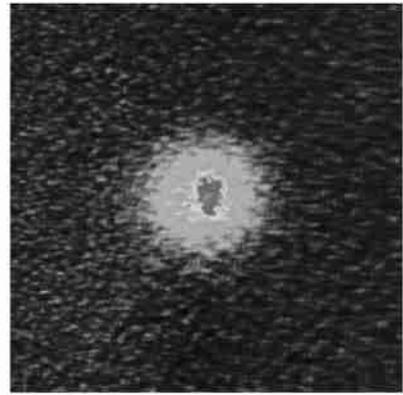


图 5 飞行时间为 25 ms 时,玻色-爱因斯坦凝聚体的吸收成像照片

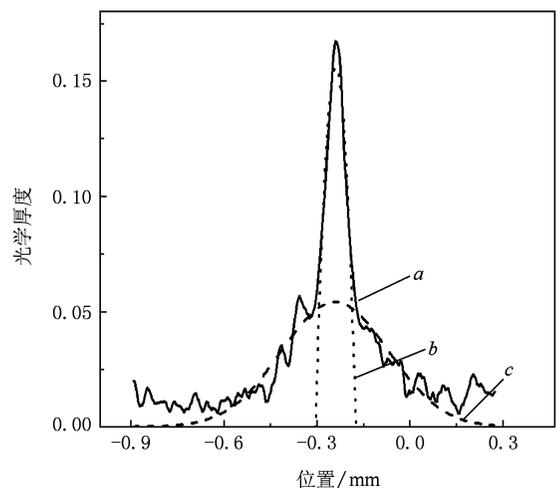


图 6 轴向的光学厚度分布的实验数据和拟合结果.曲线 a 为实验数据,曲线 b 为对凝聚体的抛物线拟合曲线,曲线 c 为对热原子的高斯拟合曲线

4. 结 论

我们对两组不同四极线圈和 Ioffe 线圈组合的 QUIC 磁阱进行了数值模拟和实验测量, 同时对磁阱中的原子进行吸收成像, 得到了一组优化的 QUIC

磁阱. 在 QUIC 磁阱中, 采用射频蒸发冷却实现了⁸⁷Rb 原子气体的玻色-爱因斯坦凝聚, 又采用“共同冷却”技术使费米气体⁴⁰K 达到量子简并, 这为今后开展玻色-费米混合物和费米气体的相关研究提供了良好的实验平台.

- | | |
|---|--|
| [1] Anderson M H, Ensher J R, Matthews M R, Wieman C E, Comell E A 1995 <i>Science</i> 269 198 | [11] Hansel W, Hommelhoff P, Hansch T W, Reichel J 2001 <i>Nature</i> 413 498 |
| [2] Bradley C C, Sackett C A, Tollett J J 1995 <i>Phys. Rev. Lett.</i> 75 1687 | [12] Schneider S, Kasper A, vom Hagen C, Bartenstein M, Engeser B, Schumm T, Baer-Joseph I, Folman R, Feenstra L 2003 <i>Phys. Rev. A</i> 67 023612 |
| [3] Davis K B, Mewes M O, Andrews M R, van Druten N J, Durfee D S, Kum D M 1995 <i>Phys. Rev. Lett.</i> 75 3969 | [13] John L, Murray R S 1999 <i>Mathematical Handbook of Formulas and Tables</i> (2nd ed) (New York: McGraw-Hill) p179 |
| [4] Fried D G, Killian T C, Willma L, Landhuis D, Moss S C, Kleppner D 1998 <i>Phys. Rev. Lett.</i> 81 3811 | [14] Chen S, Zhou X J, Yang F, Xia L, Wang Y Q, Chen X Z 2004 <i>Chin. Phys. Lett.</i> 21 2227 |
| [5] Modugno G, Ferrari G, Roati G, Brenna R J, Simoni A, Inguscio M 2001 <i>Science</i> 294 1320 | [15] Wei D, Chen H X, Xiong D Z, Zhang J 2006 <i>Acta Phys. Sin.</i> 55 6342 (in Chinese) [卫 栋、陈海霞、熊德智、张 靖 2006 物理学报 55 6342] |
| [6] Robert A, Srijean O, Browaeys A, Poupard J, Nowak S, Boiron D, Westbrook, Aspect A 2001 <i>Science</i> 292 461 | [16] Wei D, Xiong D Z, Chen H X, Wang P J, Guo L, Zhang J 2007 <i>Chin. Phys. Lett.</i> 24 1541 |
| [7] David E P 1983 <i>Phys. Rev. Lett.</i> 51 1336 | [17] Xiong D Z, Chen H X, Wang P J, Yu X D, Gao F, Zhang J 2008 <i>Chin. Phys. Lett.</i> 25 843 |
| [8] Mewes M O, Andrews M R, van Druten N J, Kum D M, Durfee D S 1995 <i>Phys. Rev. Lett.</i> 77 416 | |
| [9] Bergeman T, Erez G, Metcalf H J 1987 <i>Phys. Rev. A</i> 35 1535 | |
| [10] Esslinger T, Bloch I, Hansch T W 1998 <i>Phys. Rev. A</i> 58 R2664 | |

The design of quadrapole-Ioffe configuration trap for quantum degenerate Fermi-Bose mixtures*

Wang Peng-Jun Chen Hai-Xia Xiong De-Zhi Yu Xu-Dong Gao Feng Zhang Jing

(State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Optoelectronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

(Received 21 December 2007; revised manuscript received 12 March 2008)

Abstract

The quadrapole-Ioffe configuration (QUIC) trap consists of two identical quadrapole coils and one Ioffe coil, which has been applied widely to trap neutral atoms for evaporation cooling. We have designed two different structures of the QUIC trap. By the numerical calculation and experimental test, we obtained the optimized structure. In the QUIC trap, the magnetically trapped rubidium-87 atoms are cooled evaporatively to below the phase transition of Bose-Einstein condensation, at the same time, the potassium-40 atoms are cooled sympathetically to the Fermi degeneracy.

Keywords: quadrapole coil, Ioffe coil, quadrapole-Ioffe configuration trap, atomic cooling

PACC: 3280P

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2006CB921101), the National Natural Science Foundation for Distinguished Young Scholars of China (Grant No. 10725416), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60678029) and the Cheung Kong Scholars and Innovative Research Team Program in University from Ministry of Education, China (Grant No. IRT0516).