

^{87}Rb 玻色-爱因斯坦凝聚体的快速实验制备

陈良超 孟增明 王鹏军

Fast production of ^{87}Rb Bose-Einstein condensates

Chen Liang-Chao Meng Zeng-Ming Wang Peng-Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **66**, 083701 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.083701

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.083701>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I8>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于磁悬浮大体积交叉光学偶极阱的 Dimple 光阱装载研究

Investigation on loading of the Dimple optical trap based on a magnetically levitated large-volume crossed optical dipole trap

物理学报.2016, 65(8): 083701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.083701>

可控双空心光束的理论方案及实验研究

Theoretical and experimental study of a controllable double-dark-hollow beam

物理学报.2015, 64(5): 053701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.053701>

利用蓝失谐激光诱导微型光学偶极阱中冷原子间的光助碰撞提高单原子制备概率

Improving the single atom probability by using the blue-detuned laser-assisted-collisions between the cold atoms trapped in the far-off-resonance trap

物理学报.2014, 63(2): 023701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.023701>

可操控二种冷原子或冷分子样品的光学双阱新方案及其实验研究

Theoretical and experimental study of a novel double-well optical dipole trap for two-species of cold atoms or molecules

物理学报.2013, 62(23): 233701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.233701>

一种实现冷原子束聚集的微磁透镜新方案

A new mini-magnetic lens proposal for covering the cold atoms

物理学报.2012, 61(22): 223701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.223701>

ISSN 1000-3290

物理学报

Acta Physica Sinica

2017年 第66卷 第8期

[Http://wulixb.iphy.ac.cn](http://wulixb.iphy.ac.cn)

中国物理学会
中国科学院物理研究所
Chinese Physical Society
Institute of Physics, CAS

物 理 学 报

第 66 卷 第 8 期 2017 年 4 月

目 次

总论

- 080201 广义(3+1)维 Zakharov-Kuznetsov 方程的对称约化、精确解和守恒律 ... 张丽香 刘汉泽 辛祥鹏
080501 利用慢特征分析法提取层次结构系统中的外强迫 潘昕浓 王革丽 杨培才
080601 高精度光学参考腔的自主化研制
刘军 陈帛雄 许冠军 崔晓旭 白波 张林波 陈龙 焦东东 王涛 刘涛 董瑞芳 张首刚
080701 还原温度对氧化石墨烯结构及室温下 H₂ 敏感性能的影响 ... 陈浩 彭同江 刘波 孙红娟 雷德会

核物理学

- 082801 关于压水堆产武器级钚的模拟计算 ... 徐雪峰 付元光 朱剑钰 李瑞 田东风 伍钧 李凯波
082802 研究堆慢正电子源构建中的关键机理问题 王冠博 李润东 杨鑫 曹超 张之华

原子和分子物理学

- 083701 ⁸⁷Rb 玻色-爱因斯坦凝聚体的快速实验制备 陈良超 孟增明 王鹏军

电磁学、光学、声学、传热学、经典力学和流体动力学

- 084101 光子晶体传输特性的时域精细积分法分析 杨红卫 孟珊珊 高冉冉 彭硕
084102 时空非均匀等离子体鞘套中太赫兹波的传播特性 陈伟 郭立新 李江挺 淡荔
084201 利用含二面角误差的角锥棱镜阵列实现反射光束均匀发散的方法
..... 周晓凤 戚祖敏 罗向前 刘长安 朱建辉 王泽华 张轶 訾彦勇
084202 偏振双向衰减对光学成像系统像质影响的矢量平面波谱理论分析
..... 张敏睿 贺正权 汪韬 田进寿
084203 动态背景下基于光流场分析的运动目标检测算法 崔智高 王华 李艾华 王涛 李辉
084204 基于透射型体布拉格光栅的两通道 2.5 kW 光谱组束输出
..... 周泰斗 梁小宝 李超 黄志华 封建胜 赵磊 王建军 景峰
084205 低阈值单横模 852 nm 半导体激光器 刘储 关宝璐 米国鑫 廖翌如 刘振扬 李建军 徐晨
084206 光折变晶体 LiNbO₃:Fe 中的特殊散射现象 张燕 赵曰峰 赵丽娜 郑立仁 高垣梅
084207 室内可见光通信复合光学接收端设计与分析 王云 蓝天 倪国强
084208 蛋白石型光子晶体红外隐身材料的制备
..... 张连超 邱丽莉 芦薇 于颖杰 孟子晖 王树山 薛敏 刘文芳
084301 一种基于模态域波束形成的水平阵被动目标深度估计 李鹏 章新华 付留芳 曾祥旭
084302 流体-镀层基底界面波的传播特性 马琦 胡文祥 徐琰锋 王浩
084501 Birkhoff 系统的离散最优控制及其在航天器交会对接中的应用 孔新雷 吴惠彬
084701 脉冲激励下超音速混合层涡结构的演化机理 郭广明 刘洪 张斌 张庆兵

- 084702 高超声速飞行器磁控热防护霍尔电场数值方法研究 李开 柳军 刘伟强
- 084703 基于格子 Boltzmann 方法的自驱动 Janus 颗粒扩散泳力 周光雨 陈力 张鸿雁 崔海航
- 084704 电磁力滤波与快速反射镜光学补偿在潜航器光轴稳定控制中的应用
..... 刘宗凯 薄煜明 王军 崔珂
- 084705 激波/边界层干扰对等离子体合成射流的响应特性 ... 王宏宇 李军 金迪 代辉 甘甜 吴云

气体、等离子体和放电物理

- 085201 超强激光与固体气体复合靶作用产生高能氦离子 矫金龙
贺书凯 邓志刚 卢峰 张懿 杨雷 张发强 董克攻 王少义 张博 滕建 洪伟 谷渝秋

凝聚物质:结构、力学和热学性质

- 086101 光辐照精确调控金纳米星枝杈长度及其光热性能探究 史娜娜 赵艳 冯超 黄杰 徐佳宇
- 086201 基于数字图像相关法的 Mg 含量对 Al 合金 Protein-Le Chatelier 效应影响的实验研究
..... 杨素丽 符师桦 蔡玉龙 张迪 张青川
- 086301 Fe 基体中包含 Cu 团簇的 Fe-Cu 二元体系在升温过程中结构变化的原子尺度计算 ... 郑治秀 张林
- 086801 三氧化钨表面氢吸附机理的第一性原理研究 姜平国 汪正兵 闫永播

凝聚物质:电子结构、电学、磁学和光学性质

- 087101 二硫化钼/石墨烯异质结的界面结合作用及其对带边电位影响的理论研究
..... 危阳 马新国 祝林 贺华 黄楚云
- 087201 电场和温度对聚合物空间电荷陷阱性能的影响 李丽丽 张晓虹 王玉龙 国家辉
- 087301 基于 Ni 电极和 $ZrO_2/SiO_2/ZrO_2$ 介质的 MIM 电容的导电机理研究
..... 刘骥萱 王永平 刘文军 丁士进
- 087801 低温生长砷化镓的超快光抽运-太赫兹探测光谱
..... 樊正富 谭智勇 万文坚 邢晓 林贤 金钻明 曹俊诚 马国宏

物理学交叉学科及有关科学技术领域

- 088101 磁控溅射 Cl 掺杂 CdTe 薄膜的孪晶结构与电学性质 朱子尧 刘向鑫 蒋复国 张跃
- 088102 铝-金刚石界面电子特性与界面肖特基势垒的杂化密度泛函理论 HSE06 的研究
..... 吴孔平 孙昌旭 马文飞 王杰 魏巍 蔡俊 陈昌兆 任斌 桑立雯 廖梅勇
- 088201 一类阴离子自由基液态电极材料研究 余觉知 胡勇胜 李泓 黄学杰 陈立泉
- 088701 小波变换在太赫兹三维成像探测内部缺陷中的应用
..... 代冰 王朋 周宇 游承武 胡江胜 杨振刚 王可嘉 刘劲松

地球物理学、天文学和天体物理学

- 089201 台风“彩虹”(2015)高分辨率数值模拟及涡旋 Rossby 波特征分析
..... 焦亚音 冉令坤 李娜 高守亭 周冠博
- 089202 基于固体腔扫描法布里-珀罗干涉仪的大气温度绝对探测方法研究
..... 王骏 崔萌 陆红 汪丽 闫庆 刘晶晶 华灯鑫
- 089901 更正: 线焦斑 X 射线源成像 [物理学报 2016, 65, 219501]
..... 王研 刘鑫 黄万霞 易明皓 郭金川 朱佩平

^{87}Rb 玻色-爱因斯坦凝聚体的快速实验制备*

陈良超¹⁾²⁾ 孟增明¹⁾²⁾ 王鹏军^{1)2)†}

1) (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)

2) (山西大学, 极端光学协同创新中心, 太原 030006)

(2016年10月26日收到; 2017年2月12日收到修改稿)

采用二维磁光阱产生了一个快速 ^{87}Rb 原子流, 并在高真空的三维磁光阱中实现了 ^{87}Rb 原子的快速俘获, 进一步采用射频蒸发冷却技术实现了原子云的预冷却, 然后将原子转移到远失谐的光学偶极阱中蒸发得到了玻色-爱因斯坦凝聚体. 实验上可以在25 s内完成三维磁光阱的装载(约 1.0×10^{10} 个 ^{87}Rb 原子), 然后经过16 s的冷却过程最终在光学偶极阱中获得 5.0×10^5 个原子的玻色-爱因斯坦凝聚体. 实验重点研究了二维磁光阱的优化设计和采用蓝失谐大功率光束对四极磁阱零点的堵塞, 抑制四极磁阱中原子的马约拉纳损耗, 更加有效地对原子云进行预冷却.

关键词: 二维磁光阱, 四极磁阱, 马约拉纳损耗, 玻色-爱因斯坦凝聚体

PACS: 37.10.De, 37.10.Gh, 67.85.Hj, 67.85.-d

DOI: 10.7498/aps.66.083701

1 引言

超冷原子系统的高度人为可控性为研究许多物理问题提供了良好的实验平台, 例如实现量子模拟^[1-7]、研究强关联多体系统^[8-11]、研究光与物质的相互作用等^[12-15]. 在超冷原子系统中, 可以对囚禁在磁阱或光阱中的原子气体的各种物理量进行高度的控制和精确的测量, 例如外部束缚势^[16-22], 原子之间的相互作用^[23,24]和原子团的密度、温度、原子数目、动量分布等^[25,26]. 目前, 国内许多实验室都开展了超冷原子实验研究, 研究方向主要集中在极化分子^[27]、费米超流^[28,29]、自旋轨道耦合模拟^[30,31]等基础研究和实现光钟、精密测量^[32]等应用领域.

在实验上快速获得超冷原子有助于实验研究的简化, 制约超冷原子的获得主要有两个因素: 超冷原子在高真空中的俘获速度和将原子蒸发到量子简并的速度. 研究人员发展了许多实验技术用

于提高超冷原子的俘获速度^[33-36]. 例如两极磁光阱技术^[37]: 首先一极磁光阱(三维磁光阱, three-dimensional magneto-optical trap, 3D MOT)从背景气体中俘获原子, 然后采用脉冲推送光将原子推送到二极磁光阱实现原子的重新俘获冷却. 这个技术存在推送原子速度较慢的问题. 塞曼减速器^[38,39]也可以从低真空腔室俘获原子形成原子束为高真空3D MOT的装载提供原子源, 但塞曼减速器的磁场结构较为复杂, 且通常体积较大. 比较上述两种方案, 二维磁光阱^[40,41](two-dimensional magneto-optical trap, 2D MOT)为3D MOT提供了更高效的原子源, 并且结构较为紧凑. 在系统的低真空部分, 2D MOT从背景气体中俘获冷却原子. 这里, 俘获冷却作用发生在2D MOT的径向上, 在轴向上, 原子可以自由运动. 结合推送光的作用, 2D MOT可以为下一级磁光阱提供高效的原子流.

目前调节原子之间相互作用的主要手段是磁场诱导的Feshbach共振^[42,43], 因此有必要将预冷却的原子转移到远失谐的光阱中, 实现对所有自旋

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2016YFA0301602)、国家自然科学基金(批准号: 11234008, 11361161002, 11474188)和山西省自然科学基金(批准号: 2014011008.2)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: pengjun_wang@sxu.edu.cn

态的外部束缚和外部磁场的调控. 为了将预冷却的原子装载到光阱中, 人们发展了在光学黏团冷却之后, 采用大功率光束实现原子装载的方法^[44], 缺点是装载效率较低. 还有一种方法结合了磁场和光场的优势^[45], 这种方法就是在四极磁阱中俘获原子后采用蒸发冷却, 然后在磁场零点附近采用红失谐的光阱实现冷原子的俘获. 这里需要考虑蒸发过程中原子在磁场零点附近的马约拉纳损耗以及光阱与磁阱的空间模式匹配. 另外也有研究组在实验上兼顾磁阱的大体积优势, 将原子转移到QUIC阱中实现原子的预冷却, 再将原子转移到光阱中^[46,47]. 这种方法的优势在于: 在QUIC阱中进行的蒸发冷却可以实现大的预冷却原子数目和高的转移效率, 缺点是耗时较长.

本文介绍了光学偶极阱中⁸⁷Rb原子玻色-爱因斯坦凝聚体(Bose-Einstein condensates, BEC)的快速实验制备. 实验上2D MOT产生的快速原子流, 可以使3D MOT在25 s内俘获 1.0×10^{10} 个原子. 经过光学黏团冷却的原子, 再被绝热装载到磁阱中. 然后大功率蓝失谐光束聚焦在四极磁阱的零点, 以减少因自旋翻转造成的原子损失. 在光学堵塞的四极磁阱中进行射频蒸发冷却, 射频频率在11 s内由39 MHz扫描到2 MHz. 此时⁸⁷Rb原子的数目为 3×10^7 个, 原子气体被冷却到15 μ K. 被预冷却的原子进一步装载进1064 nm交叉光学偶极阱中, 装载效率约为50%. 在光学偶极阱中, 经过720 ms的蒸发冷却, 形成了⁸⁷Rb原子BEC, 原子数量为 5.0×10^5 个. 这为实验上下一步采用冷原子

实现量子模拟提供了良好的实验平台.

2 实验系统与预冷却过程

实验系统可分成2D MOT和3D MOT两个区域, 如图1所示. 2D MOT的真空度较低, 约为 1.0×10^{-8} Pa, 在背景气体中从两个方向(x 方向和 y 方向)实现原子的冷却俘获. 为了维持足够的背景气压, 原子源的温度保持在约58.2 °C. 在2D MOT中, 俘获的原子云在轴向(z 方向)可以进行自由扩散, 原子云在自身的流速下穿过差分管进入3D MOT, 实现原子的重新冷却俘获. 为了提高3D MOT的装载效率, 一束线偏振平行推送光沿着2D MOT轴向对原子云在 z 方向的流速施加控制. 如图2(b)所示, 推送光加快了3D MOT中原子的装载. 3D MOT所处真空腔室的真空度约为 1.0×10^{-10} Pa, 较高的真空度保证了原子与背景气体较低的碰撞率, 有利于提高原子在磁阱和光阱中的寿命.

2D MOT的磁场由围绕在真空腔室外面的四个矩形线圈产生. 磁场为二维四极场, 在径向平面(x - y 平面)内是四极场的结构, 中心磁场强度低, 向外逐渐增强, 而在轴向上磁场强度为零. 原子在磁场轴线上运动形成原子束, 原子的平均速率由冷却区域的长度决定^[41]. 四个矩形线圈由四个独立电源供电, 方便独立调节各个线圈的电流, 调节原子束的空间位置, 优化3D MOT的原子装载效率.

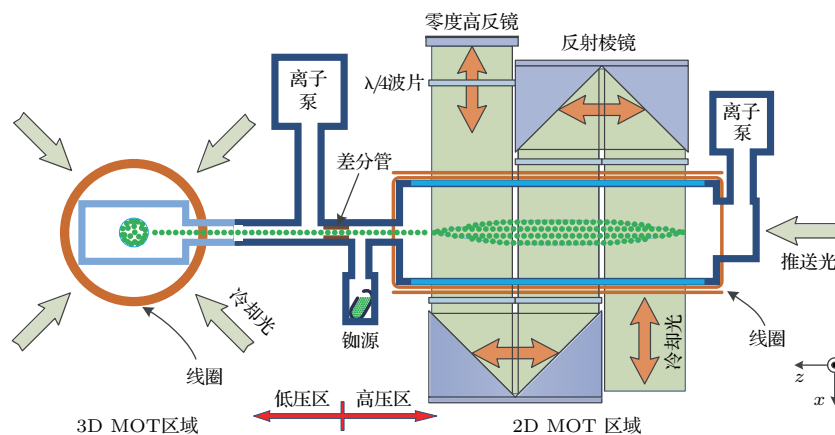


图1 实验系统示意图 实验系统为两级磁光阱的结构, 一级为二维磁光阱, 产生原子束; 二级为三维磁光阱, 产生原子团

Fig. 1. Experimental scheme. The system has a double-MOT structure, the first MOT produces an atomic beam, and the second MOT traps the atoms from the atomic beam to form a cloud of atoms.

2D MOT 的光路设计如图 1 所示. 冷却光和再抽运光混合在一起后再均分为两束, 经过扩束, 直径约为 30 mm, 用于水平方向 (x 方向) 和竖直方向 (y 方向) 的冷却俘获. 2D MOT 的冷却光锁定在 $5S_{1/2}, F = 2$ 到 $5P_{3/2}, F = 3$ 跃迁失谐 -14 MHz 处, 再抽运光锁定在 $5S_{1/2}, F = 1$ 到 $5P_{3/2}, F = 2$ 跃迁失谐 -0.45 MHz 处. 光束经过两个直角棱镜反射了两次后, 再被零度高反镜原路反射回去. 这种光路结构在 $x-z$ 平面上提供了 $30 \text{ mm} \times 90 \text{ mm}$ 的冷却区域, 并且由于光束多次与原子相互作用, 增加了光束的利用率. 同时直角棱角的反射面镀高反膜, 具有 99.99% 的反射率, 减少了光束的损耗. 为了保持冷却光较高的圆偏振率, 直角棱镜前放置了 $\lambda/4$ 波片, 补偿光束反射时的相位损失. 这种光路设计的缺点在于冷却光的反向光由于多次经过玻璃真空腔, 存在一定的损耗. 为了减小反向光与入射光的不平衡, 冷却光在扩束时, 保持了一定的会聚.

经过 25 s 的装载, 3D MOT 俘获了 1.0×10^{10} 个原子. 3D MOT 的光束直径约为 30 mm, 由冷却

光和再抽运光混合而成. 冷却光锁定在 ^{87}Rb 原子的 $5S_{1/2}, F = 2$ 到 $5P_{3/2}, F = 3$ 跃迁失谐 -21 MHz 处, 再抽运光锁定在与 $5S_{1/2}, F = 1$ 到 $5P_{3/2}, F = 2$ 跃迁失谐 -0.45 MHz 处. 经过压缩磁光阱和偏振梯度冷却后, 原子被冷却到 $15 \mu\text{K}$. 为了进一步提高原子的相空间密度, 原子被光抽运到 $|2, 2\rangle$ 态, 然后重新装载到磁阱中, 并在磁阱中对原子进行射频蒸发冷却, 实验时序如图 2 (a) 所示. 在射频蒸发过程中, 为了避免磁阱零点附近原子的马约拉纳损耗, 实验上用一束大功率蓝失谐光束沿水平方向堵塞在磁阱中心, 下一节将进行详细的分析. 射频蒸发冷却过程共 11 s, 其中包括两个蒸发过程, 首先在 5 s 内将射频频率由 39 MHz 扫描到 15 MHz, 然后在 6 s 内从 15 MHz 扫描到 2 MHz. 由于这时的磁阱为线性阱, 可以采用线性扫描射频的方法来进行蒸发冷却. 随着原子温度的进一步降低, 原子的密度升高, 所以采用两种不同的射频扫描速率. 经过蒸发冷却原子冷却到 $15 \mu\text{K}$, 此时原子样品的数目为 3×10^7 个, 为装载到远失谐的光学偶极阱中提供了基础.

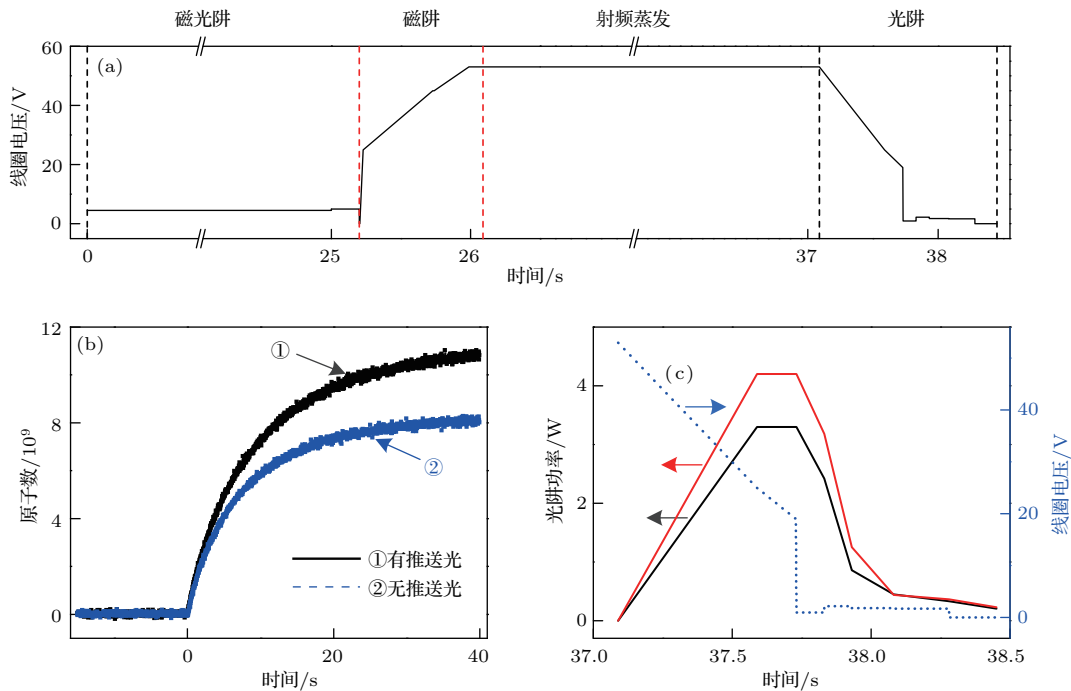


图 2 (网刊彩色) 实验时序 (a) 一个实验周期内, 四极线圈两端电压的变化; (b) 有推送光 (黑线) 和没有推送光 (蓝线) 两种情形下, 3D MOT 装载过程的比较; (c) 光阱的装载和蒸发冷却过程中, 两束 1064 nm 光束的功率变化 (黑色实线和红色实线), 蓝色虚线为降低四极线圈电压的过程

Fig. 2. (color online) Experimental sequence: (a) Voltage of quadruple magnetic trap coil; (b) loading of 3D MOT, the black line is the result with push beam, and the blue line is the result without push beam; (c) power of optical trap beams (1064 nm) (black solid and red solid), the blue dashed line shows the voltage of quadruple magnetic trap coil.

3 四极阱中原子损耗与光学堵塞

这一节主要讨论四极磁阱的磁场零点区域发生的马约拉纳损耗 (Majorana loss), 和采用大功率蓝失谐光束堵塞磁场零点减少原子损耗, 实现磁阱中原子有效预冷却的机制.

四极磁阱中磁场强度随位置不同而变化, 原子的自旋会绕着磁场强度方向进动, 所以原子的自旋在局域磁场强度方向上的投影可认为是不变量. 在磁阱中心磁场强度很弱, 自旋进动的拉莫尔频率很小. 如果磁场梯度很大, 自旋方向来不及随磁场强度改变, 低场趋近态的原子会因为自旋翻转变为高场趋近态, 无法被磁阱俘获以致从磁阱中泄漏出去^[48-50]. 由这种情况造成原子在磁阱中的损耗就是马约拉纳损耗, 速率为 $\Gamma_M = C/T^2$, 其中 $C \propto \hbar(\mu B')^2/(mk_B^2)$ 为与磁场梯度有关的量, T 为原子样品的温度^[50,51]. 由表达式可以看出, 四极磁场的梯度越大, 原子样品的温度越低, 都会使得磁阱中原子的密度越高, 从而导致损耗变大.

为抑制马约拉纳损耗, 实验上采用一束功率为 18 W, 聚焦后腰斑为 51 μm 的蓝失谐光束 (波长 532 nm) 沿水平方向堵塞在磁阱中心, 造成的势垒为^[52,53]

$$U = -\frac{3\pi c^2}{2\omega_{\text{eff}}^3} \frac{2P}{\pi w^2} \left(\frac{\Gamma_{\text{eff}}}{\omega_{\text{eff}} - \omega} + \frac{\Gamma_{\text{eff}}}{\omega_{\text{eff}} + \omega} \right), \quad (1)$$

式中 P , w 分别是光束的功率和腰斑大小; ω 是光束的频率; $\omega_{\text{eff}} = \frac{1}{3}\omega_{D1} + \frac{2}{3}\omega_{D2}$ 是 ^{87}Rb 原子的有效频率; $\Gamma_{\text{eff}} = \frac{1}{3}\Gamma_{D1} + \frac{2}{3}\Gamma_{D2}$ 是 ^{87}Rb 原子的有效自发辐射速率; ω_{D1} , ω_{D2} 分别是 ^{87}Rb 原子 D1 线和 D2 线的跃迁频率; Γ_{D1} , Γ_{D2} 分别是 D1 线和 D2 线的自发辐射速率. 计算得出蓝失谐光束的势垒为 259 μK , 可以有效地将原子从磁阱中心区域 (也就是原子的自旋翻转区域) 排斥开, 降低该区域的原子密度和原子的马约拉纳损耗.

在蓝失谐大功率光束和四极磁场的混合磁阱中, 由于原子自旋翻转导致的损耗速率可以表示为^[50]

$$\Gamma_{\text{opm}} = f\Gamma_M \exp[-U/(k_B T)], \quad (2)$$

其中, f 依赖于大功率蓝失谐光束的具体性质, 包括光束在磁阱中的位置、光斑形状等; Γ_M 为四极磁阱中原子的损耗率; U 表示蓝失谐光产生的有效排

斥势; $\exp[-U/(k_B T)]$ 可以理解为蓝失谐光束生成的势垒将原子从四极磁阱的损耗区域排斥出去所造成的损耗率的降低.

实验上通过测量束缚阱 (包括四极磁阱和混合磁阱两种情形) 中原子的寿命, 来获得束缚阱中原子的损耗率. 原子数目随时间的变化满足 $N = N_0 \exp(-\Gamma t)$, 其中原子在束缚阱中的寿命是 $\tau = 1/\Gamma$. 实验上首先将原子在束缚阱中采用射频蒸发冷却到一定的温度, 然后关闭射频信号, 测量原子云在束缚阱中保持一段时间 (1—60 s) 后的原子数. 通过拟合可以得到相应温度下原子云的寿命, 最后得出原子云的损耗率, 从而确定蓝失谐大功率光束产生的势垒对原子马约拉纳损耗的降低效果.

图 3(a) 给出了温度为 13 μK 的原子气体在束缚阱 (磁场梯度 $B' = 250 \text{ G/cm}$) 中原子数量随时间的变化, 可以看出原子数量随时间指数衰减. 比较四极磁阱和混合磁阱两种情形可以发现, 蓝失谐光束产生的势垒显著增大了原子气体的寿命, 图 3(a) 中的情形是原子寿命从 3.5 s 增加到 21.7 s. 图 3(b) 给出了不同温度的原子云在束缚阱中的损耗率. 可以看出, 在四极磁阱中, 随着温度的降低, 原子云的损耗率逐渐增加. 实验数据与公式 $\Gamma = C/T^2 + \Gamma_b$ 基本符合, 其中 Γ_b 表示由于背景气体或者杂散光造成的单体损耗率, 得到的拟合参数为 $C = 26.65 \mu\text{K}^2/\text{s}$, $\Gamma_b = 0.089 \text{ s}^{-1}$ (对应的原子云寿命为 11.2 s).

在蓝失谐大功率光束和四极磁场的混合磁阱中, 由于蓝失谐光束产生的排斥势抑制了原子的马约拉纳损耗, 原子的损耗率显著减小. 实验数据与公式 $\Gamma_{\text{opm}} = fCT^{-2} \exp[-U/(k_B T)] + \Gamma_b$ 很好地符合. 对实验数据进行拟合时, 所用的参数为 $f = 1.62$, $C = 26.65 \mu\text{K}^2/\text{s}$, $U = k_B \times 28.4 \mu\text{K}$, $\Gamma_b = 0.016 \text{ s}^{-1}$ (对应的原子云寿命为 62.5 s). 值得注意的是, 随着温度的降低 (从 60 到 13 μK), 原子的损耗率逐渐增加, 这一性质可以理解为原子云温度的降低导致原子的密度增加, 使得原子有更大的概率越过蓝失谐光束生成的势垒进入四极磁阱的损耗区域. 随着原子云温度的继续降低 (<13 μK), 原子的损耗效率出现了降低.

实验表明, 蓝失谐大功率光束和四极磁场的混合磁阱有效降低了原子云在磁场零点区域发生的马约拉纳损耗. 在混合磁阱中, 通过射频蒸发冷却

对原子云进行了有效的预冷却. 优化蓝失谐光束的空间位置, 四极磁场梯度和射频蒸发效率后得到温度为 $15 \mu\text{K}$ 的原子样品, 数量为 3×10^7 个, 为下一步将原子装载在远失谐的光学偶极阱中打下了基础.

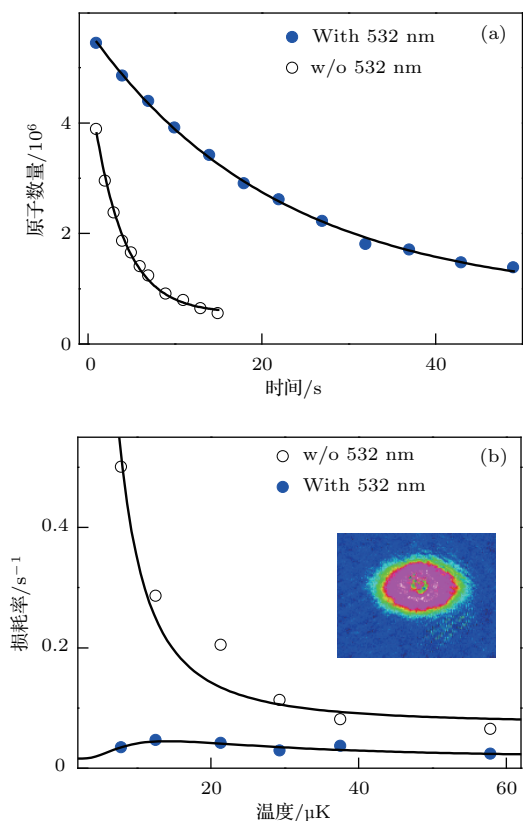


图3 (网刊彩色) 蓝失谐光束对四极阱漏洞的堵塞效果 (a) 原子在磁阱中的损耗, 蓝色实心圆点是有蓝失谐光束的情形, 黑色空心圆点是没有蓝失谐光束的情形; (b) 不同温度下原子在磁阱中的损耗率, 蓝色实心圆点是有蓝失谐光束的情形, 黑色空心圆点是没有蓝失谐光束的情形; 内插图是保持蓝失谐光束开启状态下, 原子气体的吸收成像图

Fig. 3. (color online) Plug effect of blue detuning beam on quadruple magnetic trap: (a) Loss of atoms in magnetic trap, the blue solid dots are the results with blue detuning beam, the black hollow dots are the results without blue detuning beam; (b) loss rate of atoms in different temperature, the blue solid dots are the results with blue detuning beam, the black hollow dots are the results without blue detuning beam. The inset is the absorption imaging picture with the blue detuning beam keeping on.

4 ^{87}Rb 玻色-爱因斯坦凝聚体的形成

为了实现原子的进一步冷却, 实验上将预冷却后的原子装载到由两束聚焦的远失谐光束(波长 1064 nm) 交叉构成的光学偶极阱中. 1064 nm

光束由一台最大输出功率为 18 W 的全固态激光器 (DPSS FG-VIII B, 太原山大宇光科技有限公司) 输出, 激光线宽为 100 kHz . 光束通过分束棱镜分为两束后, 分别被声光调制器移频 100 和 110 MHz , 以避免两束光在交叉处发生干涉, 然后耦合到高功率的单模保偏光纤中, 保证了光束指向性的稳定. 两束光经过透镜会聚到原子云处, 此时的腰斑分别约为 38 和 $49 \mu\text{m}$, 最大功率为 3.3 和 4.2 W , 估算此时的势阱深度为 $391 \mu\text{K}$, 保证了实验上可以实现 50% 的装载效率. 原子装载到光阱后, 通过 720 ms 的强制光学冷却过程对原子云实施蒸发冷却, 光阱中的蒸发冷却过程是通过逐步降低光学偶极阱的深度来实现的.

图4给出了随着光学偶极阱的深度逐渐降低, 玻色原子气体从正常态到玻色-爱因斯坦凝聚态的量子相变过程. 其中左侧显示的是原子气体的一维密度积分分布, 右侧显示的是原子云的吸收成像图, 成像时原子自由飞行 40 ms . 图4(a), 图4(e), 图4(b), 图4(f) 展示了在发生量子相变前, 原子云的动量分布服从玻尔兹曼分布, 可以采用高斯分布对原子云的信息进行拟合, 包括原子数目和温度. 如图4(c) 和图4(g) 所示, 当原子气体的温度进一步降低时, 形成了大量的凝聚体, 原子云的动量分布可以明显分为两部分, 未凝聚的原子云依然可以用高斯分布来拟合, 凝聚的原子部分可以用倒抛物线进行拟合. 这样的动量分布也称为双模结构, 是实验上观测 BEC 的直接证据. 随着进一步蒸发冷却, 得到了原子数为 5.0×10^5 的玻色-爱因斯坦凝聚体, 如图4(d) 和图4(h) 所示.

5 结 论

本文介绍了实验上快速制备 ^{87}Rb 玻色-爱因斯坦凝聚体的方法. 首先采用二维磁光阱对 ^{87}Rb 原子在两个方向上进行预冷却, 为三维磁光阱提供一个原子源, 提高了三维磁光阱的装载效率, 可实现在 25 s 内在三维磁光阱中装载 1.0×10^{10} 个原子. 然后经过光学黏团冷却, 以及蓝失谐大功率光束与四极磁场的混合磁阱中的射频蒸发冷却, 将原子云冷却到 $15 \mu\text{K}$. 进一步将原子装载到远失谐的光学偶极阱中, 经过 720 ms 的蒸发冷却, 实现了 ^{87}Rb 原子玻色-爱因斯坦凝聚体的制备, 原子数目

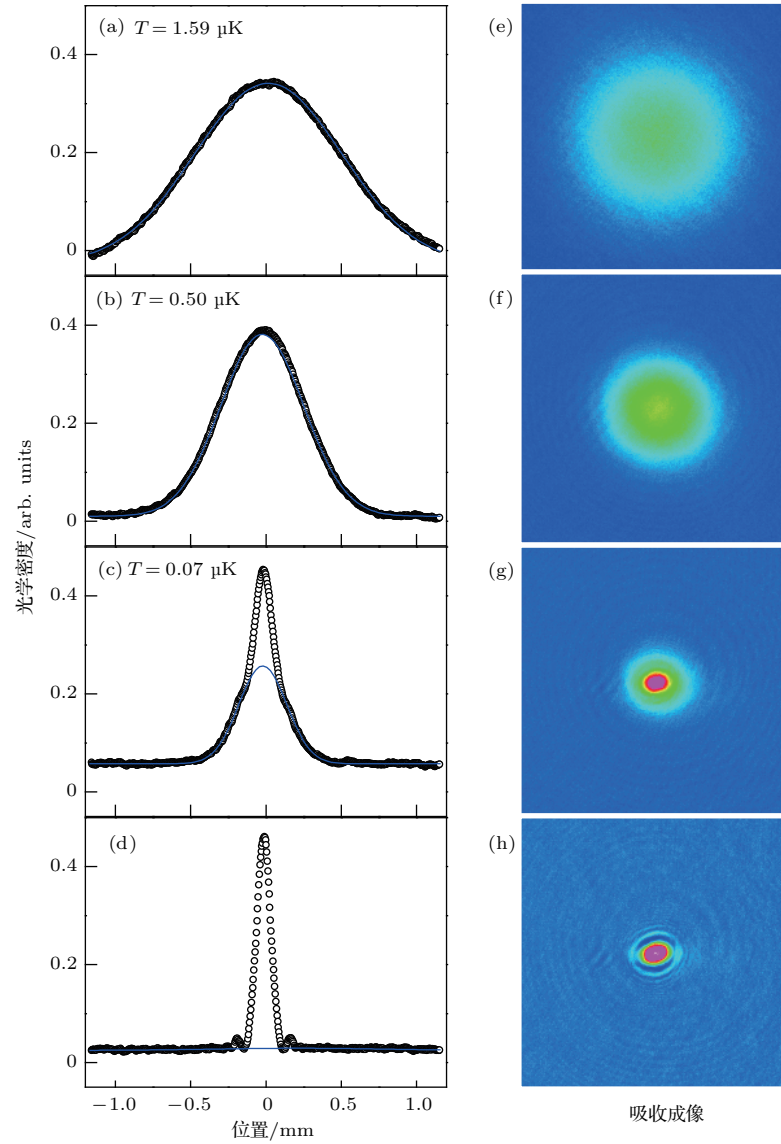


图4 (网刊彩色) 玻色-爱因斯坦凝聚体的形成过程, 左侧边栏表示原子气体的一维密度积分分布, 右侧边栏表示相应的吸收成像图(图片大小: 1.62 mm × 1.62 mm), 原子自由飞行 40 ms (a), (e) 热原子气体; (b), (f) 临界状态; (c), (g) 热原子气体与玻色-爱因斯坦凝聚体共存; (d), (h) 玻色-爱因斯坦凝聚体

Fig. 4. (color online) Formation of BEC, the left row shows the optical density distribution of the atomic cloud, the right row is the absorption images of the atomic cloud, time of flight is 40 ms: (a), (e) Thermal gas; (b), (f) critical state; (c), (g) coexisting of thermal gas and BEC; (d), (h) BEC.

为 5.0×10^5 , 整个制备过程历时 50 s. 玻色-爱因斯坦凝聚体的快速制备为下一步采用超冷原子结合电磁感应透明(electromagnetic induced transparency)实现原子在亚波长量级的光学势阱中特性的研究^[54,55]以及在光晶格中实现超冷原子的量子态操控、实现几何相位的测量与拓扑特性的模拟^[56,57]提供了实验平台.

参考文献

[1] Spielman I B 2009 *Phys. Rev. A* **79** 063613

[2] Lin Y J, Compton R L, Jiménez-García K, Phillips W D, Porto J V, Spielman I B 2011 *Nat. Phys.* **7** 531
 [3] Kennedy C J, Burton W C, Chung W C, Ketterle W 2015 *Nat. Phys.* **11** 859
 [4] Lin Y J, Compton R L, Jiménez-García K, Porto J V, Spielman I B 2009 *Nature* **462** 628
 [5] Lin Y J, Compton R L, Perry A R, Phillips W D, Porto J V, Spielman I B 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 130401
 [6] Duan L M, Demler E, Lukin M D 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 090402
 [7] Huang Z, Zeng W, Gu Y, Liu L, Zhou L, Zhang W P 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 164201 (in Chinese) [黄珍, 曾文, 古艺, 刘利, 周鲁, 张卫平 2016 物理学报 **65** 164201]

- [8] Davis K B, Mewes M O, Andrews M R, van Druten N J, Durfee D S, Kurn D M, Ketterle W 1995 *Phys. Rev. Lett.* **75** 3969
- [9] Weber T, Herbig J, Mark M, Nägerl H C, Grimm R 2003 *Science* **299** 232
- [10] Bradley C C, Sackett C A, Tollett J J, Hulet R G 1995 *Phys. Rev. Lett.* **75** 1687
- [11] Anderson M H, Ensher J R, Matthews M R, Wieman C E, Cornell E A 1995 *Science* **269** 198
- [12] Bai J H, Lu X G, Miao X X, Pei L Y, Wang M, Gao Y L, Wang R Q, Wu L A, Fu P M, Zuo Z C 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 034206 (in Chinese) [白金海, 芦小刚, 缪兴绪, 裴丽娅, 王梦, 高艳磊, 王如泉, 吴令安, 傅盘铭, 左战春 2015 物理学报 **64** 034206]
- [13] Zhao X B, Xu Z X, Zhang L J, Wu Y L, Li S J, Wang H 2010 *Acta Sin. Quantum Opt.* **16** 196 (in Chinese) [赵兴波, 徐忠孝, 张利军, 武跃龙, 李淑静, 王海 2010 量子光学学报 **16** 196]
- [14] Zhang Z Y, Wu Y L, Xu Z X, Chen L R, Li S J, Wang H 2013 *Acta Sin. Quantum Opt.* **19** 340 (in Chinese) [张志英, 武跃龙, 徐忠孝, 陈力荣, 李淑静, 王海 2013 量子光学学报 **19** 340]
- [15] Meng Z M, Huang L H, Peng P, Chen L C, Fan H, Wang P J, Zhang J 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 243202 (in Chinese) [孟增明, 黄良辉, 彭鹏, 陈良超, 樊浩, 王鹏军, 张靖 2015 物理学报 **64** 243202]
- [16] Esslinger T, Bloch I, Hänsch T W 1998 *Phys. Rev. A* **58** 2664
- [17] Greiner M, Mandel O, Esslinger T, Hänsch T W, Bloch I 2002 *Nature* **415** 39
- [18] Bakr W S, Peng A, Tai M E, Ma R, Simon J, Gillen J I, Fölling S, Pollet L, Greiner M 2010 *Science* **329** 547
- [19] Hofferberth S, Lesanovsky I, Fischer B, Schumm T, Schmiedmayer J 2007 *Nature* **449** 324
- [20] Fan H, Wang P J, Zhang J 2015 *Acta Sin. Quantum Opt.* **21** 351 (in Chinese) [樊浩, 王鹏军, 张靖 2015 量子光学学报 **21** 351]
- [21] Chai S J, Wang P J, Fu Z K, Huang L H, Zhang J 2012 *Acta Sin. Quantum Opt.* **18** 171 (in Chinese) [柴世杰, 王鹏军, 付正坤, 黄良辉, 张靖 2012 量子光学学报 **18** 171]
- [22] Wang P J, Chen H X, Xiong D Z, Yu X D, Gao F, Zhang J 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4840 (in Chinese) [王鹏军, 陈海霞, 熊德智, 于旭东, 高峰, 张靖 2008 物理学报 **57** 4840]
- [23] Inouye S, Andrews M R, Stenger J, Miesner H J, Stamper-Kurn D M, Ketterle W 1998 *Nature* **392** 151
- [24] Bauer D M, Lettner M, Vo C, Rempe G, Dürr S 2009 *Nat. Phys.* **5** 339
- [25] Olf R, Fang F, Marti G E, Macrae A, Stamper-Kurn D M 2015 *Nat. Phys.* **11** 720
- [26] Bakr W S, Gillen J I, Peng A, Fölling S, Greiner M 2009 *Nature* **462** 74
- [27] Xie D Z, Bu W H, Yan B 2016 *Chin. Phys. B* **25** 053701
- [28] Deng S J, Shi Z Y, Diao P P, Yu Q L, Zhai H, Qi R, Wu H B 2016 *Science* **353** 371
- [29] Chen Y A, Huber S D, Trotzky S, Bloch I, Altman E 2011 *Nat. Phys.* **7** 61
- [30] Huang L H, Meng Z M, Wang P J, Peng P, Zhang S L, Chen L C, Li D H, Zhou Q, Zhang J 2016 *Nat. Phys.* **12** 540
- [31] Ji S C, Zhang J Y, Zhang L, Du Z D, Zheng W, Deng Y J, Zhai H, Chen S, Pan J W 2014 *Nat. Phys.* **10** 314
- [32] Li L, Qu Q Z, Wang B, Li T, Zhao J B, Ji J W, Ren W, Zhao X, Ye M F, Yao Y Y, Lü D S, Liu L 2016 *Chin. Phys. Lett.* **33** 063201
- [33] Hung C L, Zhang X B, Gemelke N, Chin C 2008 *Phys. Rev. A* **78** 011604
- [34] Bouton Q, Chang R, Hoendervanger A L, Nogrette F, Aspect A, Westbrook C I, Clément D 2015 *Phys. Rev. A* **91** 061402
- [35] Mimoun E, Sarlo L D, Jacob D, Dalibard J, Gerbier F 2010 *Phys. Rev. A* **81** 023631
- [36] Clément J F, Brantut J P, Robert-de-Saint-Vincent M, Nyman R A, Aspect A, Bourdel T, Bouyer P 2009 *Phys. Rev. A* **79** 061406
- [37] Wohlleben W, Chevy F, Madison K, Dalibard J 2001 *Eur. Phys. J. D* **15** 237
- [38] Joffe M A, Ketterle W, Martin A, Pritchard D E 1993 *J. Opt. Soc. Am. B* **10** 2257
- [39] Lison F, Schuh P, Haubrich D, Meschede D 1999 *Phys. Rev. A* **61** 013405
- [40] Dieckmann K, Spreeuw R J C, Weidemüller M, Walraven J T M 1998 *Phys. Rev. A* **58** 3891
- [41] Schoser J, Batär A, Löw R, Schweikhard V, Grabowski A, Ovchinnikov Y B, Pfau T 2002 *Phys. Rev. A* **66** 023410
- [42] Regal C A, Greiner M, Jin D S 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 083201
- [43] Zwierlein M W, Stan C A, Schunck C H, Raupach S M F, Kerman A J, Ketterle W 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 120403
- [44] Salomon G, Fouché L, Lepoutre S, Aspect A, Bourdel T 2014 *Phys. Rev. A* **90** 033405
- [45] Lin Y J, Perry A R, Compton R L, Spielman I B, Porto J V 2009 *Phys. Rev. A* **79** 063631
- [46] Xiong D Z, Wang P J, Fu Z K, Zhang J 2010 *Opt. Express* **18** 1649
- [47] Klempt C, Henninger T, Topic O, Will J, Falke St, Ertmer W, Arlt J 2008 *Eur. Phys. J. D* **48** 121
- [48] Brink D M, Sukumar C V 2006 *Phys. Rev. A* **74** 035401
- [49] Petrich W, Anderson M H, Ensher J R, Cornell E A 1995 *Phys. Rev. Lett.* **74** 3352
- [50] Heo M S, Choi J, Shin Y 2011 *Phys. Rev. A* **83** 013622
- [51] Naik D S, Raman C 2005 *Phys. Rev. A* **71** 033617
- [52] Grimm R, Weidemüller M, Ovchinnikov Y B 1999 arXiv: physics/9902072v1 [physics. atom-ph]
- [53] Xiong D Z, Wang P J, Fu Z K, Chai S J, Zhang J 2010 *Chin. Opt. Lett.* **8** 627
- [54] Wang D W, Liu R B, Zhu S Y, Scully M O 2015 *Phys. Rev. Lett.* **114** 043602
- [55] Łaacki M, Baranov M A, Pichler H, Zoller P 2016 *Phys. Rev. Lett.* **117** 233001
- [56] Li T, Duca L, Reitter M, Grusdt F, Demler E, Endres M, Schleier-Smith M, Bloch I, Schneider U 2016 *Science* **352** 1094
- [57] Duca L, Li T, Reitter M, Bloch I, Schleier-Smith M, Schneider U 2015 *Science* **347** 288

Fast production of ^{87}Rb Bose-Einstein condensates*

Chen Liang-Chao¹⁾²⁾ Meng Zeng-Ming¹⁾²⁾ Wang Peng-Jun^{1)2)†}

1) (State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

2) (Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

(Received 26 October 2016; revised manuscript received 12 February 2017)

Abstract

A rapid atomic beam of rubidium (^{87}Rb) is produced by two-dimensional magneto-optical trap (2D MOT), and then trapped by three-dimensional magneto-optical trap (3D MOT) with high vacuum for further cooling. After a process of optical molasses cooling, atoms are reloaded into a magnetic trap, where radio frequency (RF) evaporation cooling is implemented. The precooled atoms in the magnetic trap are then transferred into a far detuning optical dipole trap, where Bose-Einstein condensate (BEC) appears by further evaporation cooling. The 3D MOT is loaded to its maximum within 25 s and then BEC is prepared in 16 s. Due to the linear intensity of magnetic trap, the frequency can be scanned fast in the RF evaporation cooling process. In our experiment, the frequency scans from 39 MHz to 15 MHz in 6 s and then scans to 2 MHz in 5 s. The number of atoms in 3D MOT is about 1×10^{10} , and there are 5×10^5 atoms in the BEC after a succession of cooling processes. To optimize the performances of 2D MOT, a special light path is constructed. And prisms with high reflectivity are used to reduce the imbalance between opposite propagating cooling beams. Furthermore, quarter-wave plates are used to keep the polarization state of the cooling beam when reflected by prisms or mirrors. The atoms are cooled to a temperature about 15 μK in the magnetic trap by RF evaporation. In such a low temperature, the loss of magnetic trap (Majorana loss) will prevent the atoms from reaching a high density, and the atoms cannot be cooled further. To reduce the loss rate of the magnetic trap, the far blue detuning light (532 nm, 18 W) is added to plug the zero point of the magnetic trap. In the optically plugged magnetic trap, atoms with high density are cooled down enough, which gives a good start for the loading of optical dipole trap.

Keywords: two-dimensional magneto-optical trap, quadruple magnetic trap, Majorana loss, Bose-Einstein condensates

PACS: 37.10.De, 37.10.Gh, 67.85.Hj, 67.85.-d

DOI: 10.7498/aps.66.083701

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2016YFA0301602), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11234008, 11361161002, 11474188), and the Natural Science Foundation of Shanxi Province, China (Grant No. 2014011008.2).

† Corresponding author. E-mail: pengjun_wang@sxu.edu.cn

ACTA PHYSICA SINICA

Vol. 66, No. 8, April 2017

CONTENTS

GENERAL

- 080201 **Symmetry reductions, exact equations and the conservation laws of the generalized (3 + 1) dimensional Zakharov-Kuznetsov equation**
Zhang Li-Xiang Liu Han-Ze Xin Xiang-Peng
- 080501 **Extracting the driving force signal from hierarchy system based on slow feature analysis**
Pan Xin-Nong Wang Ge-Li Yang Pei-Cai
- 080601 **Self-reliance and independently developed high-finesse spherical ultrastable optical reference cavity**
Liu Jun Chen Bo-Xiong Xu Guan-Jun Cui Xiao-Xu Bai Bo Zhang Lin-Bo Chen Long Jiao Dong-Dong Wang Tao Liu Tao Dong Rui-Fang Zhang Shou-Gang
- 080701 **Effect of reduction temperature on structure and hydrogen sensitivity of graphene oxides at room temperature**
Chen Hao Peng Tong-Jiang Liu Bo Sun Hong-Juan Lei De-Hui

NUCLEAR PHYSICS

- 082801 **Simulation calculation of weapon-grade plutonium production in pressurized water reactor**
Xu Xue-Feng Fu Yuan-Guang Zhu Jian-Yu Li Rui Tian Dong-Feng Wu Jun Li Kai-Bo
- 082802 **Key physics mechanism of the research reactor based slow positron source**
Wang Guan-Bo Li Run-Dong Yang Xin Cao Chao Zhang Zhi-Hua

ATOMIC AND MOLECULAR PHYSICS

- 083701 **Fast production of ^{87}Rb Bose-Einstein condensates**
Chen Liang-Chao Meng Zeng-Ming Wang Peng-Jun

ELECTROMAGNETISM, OPTICS, ACOUSTICS, HEAT TRANSFER, CLASSICAL MECHANICS, AND FLUID DYNAMICS

- 084101 **Analysis of photonic crystal transmission properties by the precise integration time domain**
Yang Hong-Wei Meng Shan-Shan Gao Ran-Ran Peng Shuo
- 084102 **Propagation characteristics of terahertz waves in temporally and spatially inhomogeneous plasma sheath**
Chen Wei Guo Li-Xin Li Jiang-Ting Dan Li
- 084201 **A method to diverge reflected beam uniformly using cube-corner retroreflector array with dihedral angle tolerances**
Zhou Xiao-Feng Qi Zu-Min Luo Xiang-Qian Liu Chang-An Zhu Jian-Hui Wang Ze-Hua Zhang Yi Zi Yan-Yong

(Continued)

- 084202 **Analysis of the influence of diattenuation on optical imaging system by using the theory of vector plane wave spectrum**
Zhang Min-Rui He Zheng-Quan Wang Tao Tian Jin-Shou
- 084203 **Moving object detection based on optical flow field analysis in dynamic scenes**
Cui Zhi-Gao Wang Hua Li Ai-Hua Wang Tao Li Hui
- 084204 **2.5 kW average power, two-channel spectral-beam-combined output based on transmitting volume Bragg grating**
Zhou Tai-Dou Liang Xiao-Bao Li Chao Huang Zhi-Hua Feng Jian-Sheng Zhao Lei Wang Jian-Jun Jing Feng
- 084205 **A low threshold single transverse mode 852 nm semiconductor laser diode**
Liu Chu Guan Bao-Lu Mi Guo-Xin Liao Yi-Ru Liu Zhen-Yang Li Jian-Jun Xu Chen
- 084206 **Special scattering in photorefractive crystal $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$**
Zhang Yan Zhao Yue-Feng Zhao Li-Na Zheng Li-Ren Gao Yuan-Mei
- 084207 **Design and analysis of composite optical receiver for indoor visible light communication**
Wang Yun Lan Tian Ni Guo-Qiang
- 084208 **Preparation of opal photonic crystal infrared stealth materials**
Zhang Lian-Chao Qiu Li-Li Lu Wei Yu Ying-Jie Meng Zi-Hui Wang Shu-Shan Xue Min Liu Wen-Fang
- 084301 **A modal domain beamforming approach for depth estimation by a horizontal array**
Li Peng Zhang Xin-Hua Fu Liu-Fang Zeng Xiang-Xu
- 084302 **Propagation properties of interface waves at fluid-coated solid interface**
Ma Qi Hu Wen-Xiang Xu Yan-Feng Wang Hao
- 084501 **Discrete optimal control for Birkhoffian systems and its application to rendezvous and docking of spacecrafts**
Kong Xin-Lei Wu Hui-Bin
- 084701 **Evolution mechanism of vortices in a supersonic mixing layer controlled by the pulsed forcing**
Guo Guang-Ming Liu Hong Zhang Bin Zhang Qing-Bing
- 084702 **Numerical solution procedure for Hall electric field of the hypersonic magnetohydrodynamic heat shield system**
Li Kai Liu Jun Liu Wei-Qiang
- 084703 **Research on diffusiophoresis of self-propulsion Janus particles based on lattice Boltzmann method**
Zhou Guang-Yu Chen Li Zhang Hong-Yan Cui Hai-Hang
- 084704 **Lorentz force filtering and fast steering mirror optical compensation in optical axis stability control for photoelectric mast**
Liu Zong-Kai Bo Yu-Ming Wang Jun Cui Ke
- 084705 **Response of the shock wave/boundary layer interaction to the plasma synthetic jet**
Wang Hong-Yu Li Jun Jin Di Dai Hui Gan Tian Wu Yun

(Continued)

PHYSICS OF GASES, PLASMAS, AND ELECTRIC DISCHARGES

- 085201 **Helium ions acceleration by ultraintense laser interactions with foil-gas target**
*Jiao Jin-Long He Shu-Kai Deng Zhi-Gang Lu Feng Zhang Yi Yang Lei Zhang Fa-Qiang
Dong Ke-Gong Wang Shao-Yi Zhang Bo Teng Jian Hong Wei Gu Yu-Qiu*

CONDENSED MATTER: STRUCTURAL, MECHANICAL, AND THERMAL PROPERTIES

- 086101 **Precise control of branch-length of light irradiated gold nanostars and associated thermal performance**
Shi Na-Na Zhao Yan Feng Chao Huang Jie Xu Jia-Yu
- 086201 **Experimental investigation on the influence of Mg content on Portevin-Le Chatelier effect in Al-based alloys by using digital image correlation**
Yang Su-Li Fu Shi-Hua Cai Yu-Long Zhang Di Zhang Qing-Chuan
- 086301 **Atomic-scale simulation study of structural changes of Fe-Cu binary system containing Cu clusters embedded in the Fe matrix during heating**
Zheng Zhi-Xiu Zhang Lin
- 086801 **First-principles study on adsorption mechanism of hydrogen on tungsten trioxide surface**
Jiang Ping-Guo Wang Zheng-Bing Yan Yong-Bo

CONDENSED MATTER: ELECTRONIC STRUCTURE, ELECTRICAL, MAGNETIC, AND OPTICAL PROPERTIES

- 087101 **Interfacial cohesive interaction and band modulation of two-dimensional MoS₂/graphene heterostructure**
Wei Yang Ma Xin-Guo Zhu Lin He Hua Huang Chu-Yun
- 087201 **Simulations of the effects of electric field and temperature on space charge traps in polymer**
Li Li-Li Zhang Xiao-Hong Wang Yu-Long Guo Jia-Hui
- 087301 **Conduction mechanisms of MIM capacitors with ZrO₂/SiO₂/ZrO₂ stacked dielectrics and Ni electrodes**
Liu Qi-Xuan Wang Yong-Ping Liu Wen-Jun Ding Shi-Jin
- 087801 **Study on ultrafast dynamics of low-temperature grown GaAs by optical pump and terahertz probe spectroscopy**
*Fan Zheng-Fu Tan Zhi-Yong Wan Wen-Jian Xing Xiao Lin Xian Jin Zuan-Ming
Cao Jun-Cheng Ma Guo-Hong*

INTERDISCIPLINARY PHYSICS AND RELATED AREAS OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

- 088101 **The twins structure and electric properties of Cl doped CdTe film by magnetron sputtering**
Zhu Zi-Yao Liu Xiang-Xin Jiang Fu-Guo Zhang Yue

(Continued)

088102 **Interface electronic structure and the Schottky barrier at Al-diamond interface: hybrid density functional theory HSE06 investigation**

Wu Kong-Ping Sun Chang-Xu Ma Wen-Fei Wang Jie Wei Wei Cai Jun Chen Chang-Zhao Ren Bin Sang Li-Wen Liao Mei-Yong

088201 **Radical anion based liquid electrode materials**

Yu Jue-Zhi Hu Yong-Sheng Li Hong Huang Xue-Jie Chen Li-Quan

088701 **Wavelet transform in the application of three-dimensional terahertz imaging for internal defect detection**

Dai Bing Wang Peng Zhou Yu You Cheng-Wu Hu Jiang-Sheng Yang Zhen-Gang Wang Ke-Jia Liu Jin-Song

GEOPHYSICS, ASTRONOMY, AND ASTROPHYSICS

089201 **High resolution numerical simulation of typhoon Mujigae (2015) and analysis of vortex Rossby waves**

Jiao Ya-Yin Ran Ling-Kun Li Na Gao Shou-Ting Zhou Guan-Bo

089202 **Investigation of the absolute detection method of atmospheric temperature based on solid cavity scanning Fabry-Perot interferometer**

Wang Jun Cui Meng Lu Hong Wang Li Yan Qing Liu Jing-Jing Hua Deng-Xin

089901 **Erratum: Line focal X-ray source imaging [Acta Phys. Sin. 2016, 65, 219501]**

Wang Yan Liu Xin Huang Wan-Xia Yi Ming-Hao Guo Jin-Chuan Zhu Pei-Ping

公 告

为实现录用稿件的提前在线全文出版, 我刊采用单篇论文给定编码的目录方案, 编码的设定规则是: 期号 + 文章第一个PACS 代码的前两位数字 + 序号(按同一类代码文章录用时间的先后排序).

《物理学报》已加入“中国知网”优先数字出版, 录用文章将先于印刷版期刊在中国知网 www.cnki.net 在线优先发布, 如果作者不愿优先出版可在版权协议里补充说明, 如无补充说明, 编辑部将视为同意授权.

《物理学报》编辑部

物 理 学 报 (WULI XUEBAO)

(半月刊, 1933 年创刊)

2017 年 4 月 第 66 卷 第 8 期

版 权 所 有

ACTA PHYSICA SINICA

(Semimonthly, First Published in 1933)

Vol. 66 No. 8 April 2017

© 2017 Chinese Physical Society

编辑出版 物理学报编辑部
(北京 603 信箱 邮政编码 100190)

主 编 欧阳钟灿

主 管 中 国 科 学 院

主 办 中 国 物 理 学 会

中国科学院物理研究所

(北京 603 信箱 邮政编码 100190)

印刷装订 北京科信印刷有限公司

总发行处 北京报刊发行局

订购处 全国各邮电局

国外总发行处 中国国际图书贸易总公司

(北京 399 信箱 邮政编码 100044)

广告经营许可证 京海工商广字第 0335 号

Edited by the Editorial Office of
ACTA PHYSICA SINICA

Editor-in-Chief: Ouyang Zhong-Can

Published by Chinese Physical Society
and Institute of Physics,

Chinese Academy of Sciences

Distributed by China International
Book Trading Corporation

P.O. Box 399, Beijing 100044, China

Editorial Office:

P.O. Box 603, Beijing 100190, China

E-mail: apsoffice@iphy.ac.cn

<http://wulixb.iphy.ac.cn>

ISSN 1000-3290

国内邮发代号: 2-425

国内统一刊号: CN11-1958/O4

国外发行代号: M52 定价: 120 元

公 开 发 行