

光学相位锁定激光在原子玻色-爱因斯坦凝聚中实现拉曼耦合

孟增明 黄良辉 彭鹏 陈良超 樊浩 王鹏军 张靖

Raman coupling in atomic Bose-Einstein condensed with phase-locked laser system

Meng Zeng-Ming Huang Liang-Hui Peng Peng Chen Liang-Chao Fan Hao Wang Peng-Jun Zhang Jing

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 243202 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.243202

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.243202>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I24>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

红外激光载波包络相位对氦原子的极紫外光 (XUV) 吸收谱的量子调控研究

Quantum control of the XUV photoabsorption spectrum of helium atoms via the carrier-envelope-phase of an infrared laser pulse

物理学报.2015, 64(13): 133203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.133203>

二能级原子玻色-爱因斯坦凝聚体与双模光 \square \angle 嗽 P 饕孟低持性 \square 蛹 す 獾难顾跣灾

Squeezing properties of atom laser from two-level atomic Bose-Einstein condensate interacting with two-mode light field

物理学报.2014, 63(4): 043201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.043201>

Ξ 型三能级原子玻色-爱因斯坦凝聚体单模光 \square \angle 低持兴 \square T \square 蛹 す 獾难顾跣灾

Squeezing properties of two-mode atom laser in a system of Ξ -type three-level atomic Bose-Einstein condensate interacting with single-mode light field

物理学报.2014, 63(4): 043202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.043202>

沟道效应作用下中性原子在激光驻波场中的沉积特性研究

Characteristics of neutral atom deposition under channel effect in a laser standing wave field

物理学报.2013, 62(24): 243201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.243201>

Ξ 型三能级原子玻色-爱因斯坦凝聚体对光 \square \odot 顾跣灾实挠跋

Influence of Ξ -type three-level atomic Bose-Einstein condensate on the squeezing properties of light field

物理学报.2013, 62(18): 183201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.183201>

ISSN 1000-3290

物理学报

Acta Physica Sinica

2015年 第64卷 第24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 64 卷 第 24 期 2015 年 12 月

目 次

综述

- 247804 慢正电子束流技术在金属/合金微观缺陷研究中的应用
..... 胡远超 曹兴忠 李玉晓 张鹏 靳硕学 卢二阳 于润升 魏龙 王宝义

总论

- 240201 炉膛三维温度场重建中 Tikhonov 正则化和截断奇异值分解算法比较
..... 谢正超 王飞 严建华 岑可法
- 240301 基于相位匹配的量子行走搜索算法及电路实现 陈汉武 李科 赵生妹
- 240302 谐振子系统的量子-经典轨道、Berry 相及 Hannay 角 辛俊丽 沈俊霞
- 240303 在有限温度下运用弱测量保护量子纠缠 王美姣 夏云杰
- 240304 多跳噪声量子纠缠信道特性及最佳中继协议 杨光 廉保旺 聂敏
- 240305 悬链曲面上的点粒子动力学及扩展空间约束系统量子化 寻大毛 欧阳涛 谈荣日 刘慧宣
- 240501 考虑谣言清除过程的网络谣言传播与抑制 万贻平 张东戈 任清辉
- 240502 二值噪声激励下欠阻尼周期势系统的随机共振 马正木 靳艳飞
- 240503 基于忆阻器的数模混合随机数发生器 袁泽世 李洪涛 朱晓华
- 240504 等离子喷涂层原生性孔隙几何结构的分形及统计特性
..... 陈书赢 王海斗 马国政 康嘉杰 徐滨士
- 240505 半导体激光器混沌法拉第效应控制方法 颜森林
- 240506 一类时变时滞混沌系统的参数辨识方法 柴琴琴
- 240601 基于相关光子多模式相关性的 InSb 模拟探测器定标方法
..... 夏茂鹏 李健军 高冬阳 胡友勃 盛文阳 庞伟伟 郑小兵
- 240701 基于声透镜的三维光声成像技术 张宇 唐志列 吴泳波 束刚

核物理学

- 242801 样品转动方式对中子全息成像结果的影响 唐彬 曹超 尹伟 孙勇 刘斌

原子和分子物理学

- 243101 $^{75}\text{As}^{32}\text{S}^+$ 和 $^{75}\text{As}^{34}\text{S}^+$ 离子的光谱常数与分子常数 王杰敏 王希娟 陶亚萍
- 243102 分子空位缺陷对环三亚甲基三硝胺含能材料几何结构、电子结构及振动特性的影响
..... 彭亚晶 蒋艳雪

- 243103 熔融 TiAl 合金纳米粒子在 TiAl(001) 基底表面凝结过程中微观结构演变的原子尺度模拟 钱泽宇 张林
- 243201 He 原子体系中偶极子响应的周期性量子相位调控的理论研究 ... 丁晶洁 王全军 刘作业 胡碧涛
- 243202 光学相位锁定激光在原子玻色-爱因斯坦凝聚中实现拉曼耦合 孟增明 黄良辉 彭鹏 陈良超 樊浩 王鹏军 张靖
- 243301 试验优化设计 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺 $\text{BaGd}_2\text{ZnO}_5$ 荧光粉及其上转换发光性质 孙佳石 李树伟 石琳琳 周天民 李香萍 张金苏 程丽红 陈宝玖

电磁学、光学、声学、传热学、经典力学和流体动力学

- 244201 非相干照明条件下的 ptychographic iterative engine 成像技术 余伟 何小亮 刘诚 朱健强
- 244202 光在 Metasurface 中的自旋-轨道相互作用 易煦农 李瑛 凌晓辉 张志友 范滇元
- 244203 无衍射特殊光束的产生与三维表征 于湘华 姚保利 雷铭 严绍辉 杨延龙 李润泽 蔡亚楠
- 244204 离轴涡旋光束弱走离条件下的倍频效应 陈顺意 丁攀峰 蒲继雄
- 244205 掺铒光纤中方波信号高次谐波的快慢光特性 王甫 王智 吴重庆 刘国栋 毛雅亚 孙振超 李强
- 244206 地基 CO_2 廓线探测差分吸收激光雷达 韩舸 龚威 马昕 相成志 梁艾琳 郑玉新
- 244301 基于支持向量机的微波链路雨强反演方法 宋堃 高太长 刘西川 印敏 薛杨
- 244401 孤立系内热传导过程焓耗散的解析解 王焕光 吴迪 饶中浩
- 244701 倾斜波动壁面上液膜表面波演化特性的影响 吴正人 刘梅 刘秋升 宋朝匣 王思思

气体、等离子体和放电物理

- 245201 五边形截面的 Ag 纳米线局域表面等离子体共振模式 徐天宁 李翔 贾文旺 隋成华 吴惠楨
- 245202 介质阻挡放电中同心圆环斑图的产生机理 刘伟波 董丽芳
- 245203 强流电子束入射角二维分布测量方法 胡杨 杨海亮 孙剑锋 孙江 张鹏飞

凝聚物质: 电子结构、电学、磁学和光学性质

- 247101 洪德耦合的调控与轨道选择 Mott 相变 孙健 刘洋 宋筠
- 247201 第一性原理研究钨掺杂对锐钛矿物性的影响 侯清玉 赵春旺
- 247202 NiFe/Pt 薄膜中角度相关的逆自旋霍尔效应 韩方彬 张文旭 彭斌 张万里
- 247301 基于纳米天线的多通道高强度定向表面等离子体波激发 熊志成 朱丽霖 刘诚 高淑梅 朱健强
- 247302 微波低温制备 $\text{Mg}_2\text{Si}_{0.4}\text{Sn}_{0.6-y}\text{Bi}_y$ 热电材料的传输机理 张华 陈少平 龙洋 樊文浩 王文先 孟庆森
- 247401 纳米微粒 $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ 掺杂对单畴超导块材 $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 性能的影响 张晓娟 张玉凤 彭里其 周文礼 徐燕 周迪帆 和泉充

- 247501 双模随机晶场对纳米管上Blume-Capel模型磁化强度和相变的影响 李晓杰 刘中强 王春阳 徐玉良 孔祥木
 李晓杰 刘中强 王春阳 徐玉良 孔祥木
- 247502 多铁材料 $\text{Bi}_{1-x}\text{Ca}_x\text{FeO}_3$ 的介电、铁磁特性和高温磁相变 宋桂林 苏健 张娜 常方高
- 247503 过渡金属与F共掺杂ZnO薄膜结构及磁、光特性 周攀钒 袁欢 徐小楠 鹿轶红 徐明
- 247504 Mo覆盖层对MgO/CoFeB/Mo结构磁各向异性的影响 于涛 刘毅 朱正勇 钟汇才 朱开贵 苟成玲
 于涛 刘毅 朱正勇 钟汇才 朱开贵 苟成玲
- 247505 电流调控磁涡旋的极性和旋性 孙明娟 刘要稳
- 247701 铋镁酸铅-钛酸铅铁电阴极电子发射特性 王秋萍 冯玉军 徐卓 成鹏飞 凤飞龙
- 247801 $\text{SrZn}_2(\text{PO}_4)_2:\text{Sn}^{2+}$, Mn^{2+} 荧光粉的发光性质及其能量传递机理 熊晓波 刘万里 袁曦明 刘金存 宋江齐 梁玉军
 熊晓波 刘万里 袁曦明 刘金存 宋江齐 梁玉军
- 247802 氮对金刚石缺陷发光的影响 张秀芝 王凯悦 李志宏 朱玉梅 田玉明 柴跃生
- 247803 利用N型半导体纳米材料抑制单量子点的荧光闪烁特性 王早 张国峰 李斌 陈瑞云 秦成兵 肖连团 贾锁堂
 王早 张国峰 李斌 陈瑞云 秦成兵 肖连团 贾锁堂

物理学交叉学科及有关科学技术领域

- 248101 不同Sb含量p-SnO₂薄膜的制备和特性 冯秋菊 刘洋 潘德柱 杨毓琪 刘佳媛 梅艺赢 梁红伟
 冯秋菊 刘洋 潘德柱 杨毓琪 刘佳媛 梅艺赢 梁红伟
- 248201 锂离子电池正极材料 $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ 的电子结构与输运特性 马昊 刘磊 路雪森 刘素平 师建英
- 248701 电离辐射致植物诱变效应的损伤-修复模型 李多芳 曹天光 耿金鹏 展永
- 248702 基于多尺度传递熵的脑肌电信号耦合分析 谢平 杨芳梅 陈晓玲 杜义浩 吴晓光
- 248801 Al纳米颗粒增强微晶硅薄膜太阳能电池光吸收的模拟研究 丁东 杨仕娥 陈永生 郜小勇 谷锦华 卢景霄
 丁东 杨仕娥 陈永生 郜小勇 谷锦华 卢景霄

地球物理学、天文学和天体物理学

- 249601 太阳高纬和低纬活动现象的混沌与分形特征 周双 冯勇 吴文渊

光学相位锁定激光在原子玻色-爱因斯坦凝聚中实现拉曼耦合*

孟增明¹⁾²⁾ 黄良辉¹⁾²⁾ 彭鹏¹⁾²⁾ 陈良超¹⁾²⁾ 樊浩¹⁾²⁾
王鹏军¹⁾²⁾ 张靖^{1)†}

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)

(2015年8月19日收到; 2015年9月25日收到修改稿)

采用光学相位锁定环路技术将外腔反馈式半导体激光器锁定到与钛宝石激光器输出激光频率上. 锁定后两束激光的差频线宽从 MHz 降低到 Hz 量级, 同时两束激光的频率差可实现几百兆赫兹到 7 GHz 的精密调节. 锁定的两束激光作用在铷原子玻色-爱因斯坦凝聚的两个基态超精细态 $F = 2, 1$, 观测到在两个超精细态之间的拉曼跃迁. 该技术可用于超冷原子两个超精细态之间自旋轨道耦合.

关键词: 光学锁相环, 拍频, 拉曼跃迁, 自旋轨道耦合

PACS: 32.80.Qk, 85.30.De, 85.90.+h

DOI: 10.7498/aps.64.243202

1 引言

自从实现了玻色爱因斯坦凝聚体^[1,2]和量子简并费米气体^[3]以来, 超冷原子系统因其高度人为可控多自由度的特性, 发展成为一个量子模拟的理想平台. 系统中的原子数目、不同自旋、温度、束缚势、原子之间的相互作用都可以人为精确控制^[4,5]. 最近, 利用超冷原子中的人造规范势来模拟凝聚态物理中电子在电磁场中的行为成为研究热点, 实验上已经通过两束拉曼光耦合原子的两个超精细态, 实现了原子自旋和动量两个自由度的耦合, 用以模拟电子的自旋轨道耦合行为^[6-13]. 利用自旋轨道耦合这种独特的操控手段, 可探索研究整数和分数量子霍尔态、磁单极子等拓扑态以及拓扑绝缘体、拓扑超导体、Majorana 费米子、Weyl 半金属拓扑体, 和其在拓扑量子计算方面的应用机理. 目前, 基于超冷原子的自旋轨道耦合, 已经

研究了自旋霍尔效应^[14]、群体偶极振荡^[15]、有限温度下的相图^[16]、强相互作用下的费米原子配对机理^[17]等现象. 这些研究成果激发了人们的研究兴趣, 不断有新的理论方案被提出和实验现象被观测^[18-20].

目前实验上已经实现的自旋轨道耦合为一维的情形, 可以认为是两种二维自旋轨道耦合的等权叠加 $k_x \sigma_x + k_y \sigma_y$ 和 Dresselhaus $k_x \sigma_x - k_y \sigma_y$, 其中 σ_x, σ_y 为泡利矩阵, k_x, k_y 为 x, y 方向的动量. 目前一维的自旋轨道耦合主要是通过两束拉曼光耦合到原子同一个超精细态下的两个塞曼子能级, 两个塞曼子能级分裂可以控制偏置磁场到兆赫兹量级, 因此两束拉曼光可以通过一台激光器输出的激光分束后, 经过声光调制器移频便可以实现, 两束激光的频率差可以通过控制驱动声光调制器的信号源频率, 实现精确调节. 如果两束拉曼光耦合到原子基态两个不同超精细态, 例如 ^{87}Rb 的两个不同超精细态 $|F = 2, m_F = 1\rangle$,

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2011CB921601)、国家自然科学基金(批准号: 11234008, 11222430)、国家自然科学基金委员会与香港研究资助局合作研究项目(批准号: 11361161002)和三晋学者计划专项经费资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jzhang74@sxu.edu.cn; jzhang74@yahoo.com

$|F = 1, m_F = 1\rangle$), 其中 F 为原子的总角动量量子数, m_F 为磁量子数, 需要将拉曼耦合光的频率差锁定在 6.8 GHz 附近, 如果此时使用声光调制器移频的方式, 拉曼光很难得到足够高的功率. 如果使用射频的方式来激发原子, 由于没有动量的传递, 所以无法模拟自旋轨道耦合^[21], 通过外部锁定激光器系统成为最佳的选择.

本文采用光学相位锁定环路技术将外腔反馈式半导体激光器锁定到与钛宝石激光器输出激光频率上, 获得了两束频率差约为 6.8 GHz 拉曼激光. 当锁定后, 两束激光的差频线宽可以从 MHz 降低到 Hz 量级. 锁定的两束拉曼激光作用在铷原子的两个不同超精细态, 观测到了铷原子在两个超精细态之间的拉曼跃迁, 该技术已广泛用于冷原子干涉仪. 本文进一步分析了光学相位锁定后两束激光的相噪对自旋轨道耦合的影响.

2 实验装置

光学锁相环 (optical phase-locked loop) 都是由鉴相鉴频器 (phase frequency detector)、环路滤波器 (LF) 和主、从激光器 (master laser, ML; slave laser, SL) 构成的. 鉴相鉴频器有两个信号输入端, 一个为参考信号输入端, 另一个为被锁定信号输入端, 相位探测器将会输出与两路信号相位成比例的误差信号, 误差信号通过低通滤波器后, 将会反馈到从激光器, 从而控制从激光器的频率, 达到锁定的目的^[22-27]. 在实验中, 参考信号要求频率噪声和相位噪声非常低, 所以使用 Tektronix 公司的 AFG3251C 信号源; 而另一路信号是由快速探测器 (EOT 公司 ET-4000) 测量主激光器和从激光器的差频信号, 如图 1 (b).

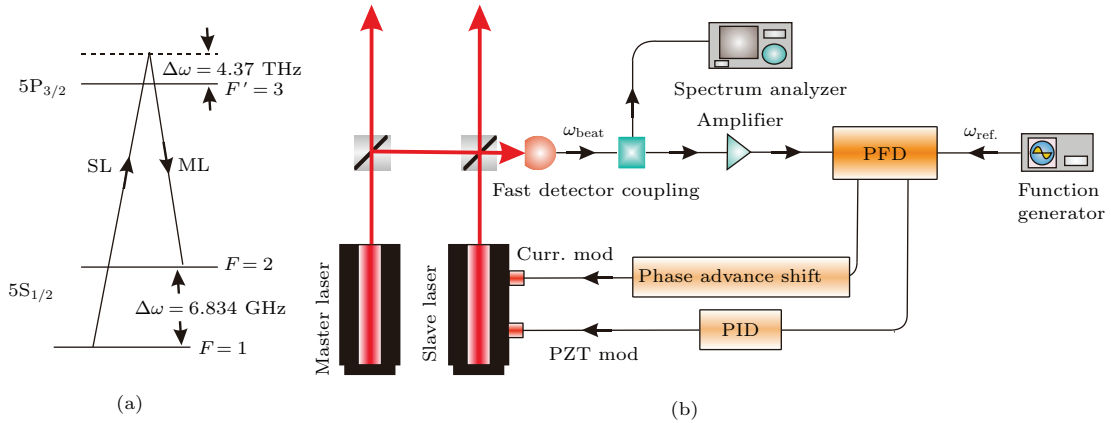


图 1 (网刊彩色) (a) ML 和 SL 的频率; (b) 光学锁相环系统原理图

Fig. 1. (color online) (a) The frequency of ML and SL; (b) schematic setup of optical phase-locked loop system.

这里使用的主激光器 (master laser) 是钛宝石激光器, 从激光器是外腔反馈式半导体激光器 (Toptica DL100). 光学锁相环输出的锁频信号分为两路, 一路通过 PI 将低频部分反馈到压电陶瓷上, 另一路通过相位超前器将高频部分反馈到电流调制上. 压电陶瓷的调制带宽大约为 kHz 量级, 电流调制带宽大约为 MHz 量级. 在未锁定之前, 首先使用波长计, 将钛宝石激光器的输出光频调节到 388.601 GHz (785 nm), 然后将频率锁定到参考腔上. 选择远红失谐 D2 跃迁线的频率, 使激光自发辐射导致加热 ⁸⁷Rb 超冷原子得到抑制. 然后将半导体激光器的输出光相对于主激光器偏置 6.8 GHz (两个基态能级频差), 这样便得到 6.8 GHz 的拍频

信号, 通过耦合器 (Mini-Circuits ZHDC-16-63+) 将信号分为两路, 一路用于观测拍频信号的锁定情况, 另一路输入到放大器 (Mini-Circuits ZX60-8008 E-S+), 最后将拍频信号输入到分频器, 进行 20 分频以后, 相位频率探测器 (phase frequency detector, PFD) 将会比较分频信号 34 MHz 的参考信号, 从而输出带宽为几十 MHz 量级的误差信号. 相位超前电路是反馈电路中的一个关键部分^[28]. 由于调制电流的误差信号带宽比较宽, 相位超前电路将会补偿反馈回路对高频部分相位滞后效应. C1, C2, R1, R2 是相位超前部分, C3 是起一定的滤波作用, 由于半导体激光器电流调制部分对误差信号非常敏感, 所以取一个阻值小的 R1, 见图 2.

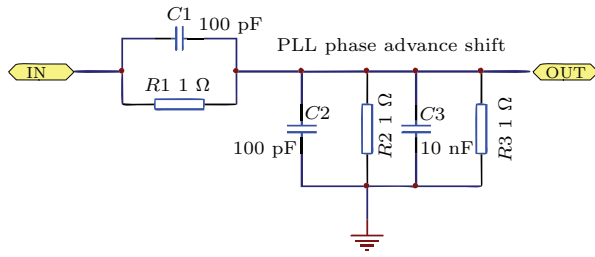


图2 相位超前电路图

Fig. 2. Phase advance shift.

在未锁定的情况下, 两台激光器是自由运转, 频率都会有一定的相对漂移. 当误差信号通过PI电路 (MHz的调制信号通过积分电路变为kHz量级), 加载到压电陶瓷上就可以将频率差初步锁定^[29], 如图3. 在低频误差信号锁定情况下, 主要是拍频的相位相对于参考信号还在抖动, 通过频谱分析仪不难发现, 拍频信号不在左右摆动, 而是呈现线宽非常宽的拍频信号, 大约为几MHz, 该频谱说明两路信号还存在相位差, 拍频信号还不是完全与参考信号同步. 为了压窄线宽, 另一路误差信号通过移相器将高频部分直接加载到电流调制上, 宽频谱中心出现很窄的峰, 说明拍频信号得到压窄,

如图4, 也就是说从激光器完全同步于主激光器. 评价光学锁相环路锁定好坏的一个重要指标就是拍频信号的相噪, 图4(a)中心频率两侧的谱对应着相噪, 特别是中心频率两侧2 MHz附近的小峰, 是由于反馈回路中相位滞后效应导致的. 这个宽频谱的相噪对超冷原子中的自旋轨道耦合有这严重的影响.

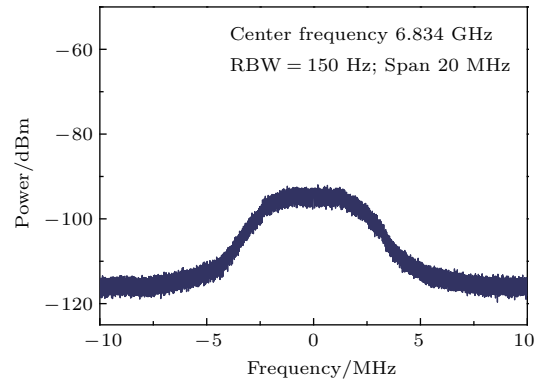


图3 低频部分反馈到压电陶瓷 (PZT) 上锁频情况下的拍频功率谱

Fig. 3. The spectrum of the beat frequency of two frequency-locked lasers only with PZT feedback.

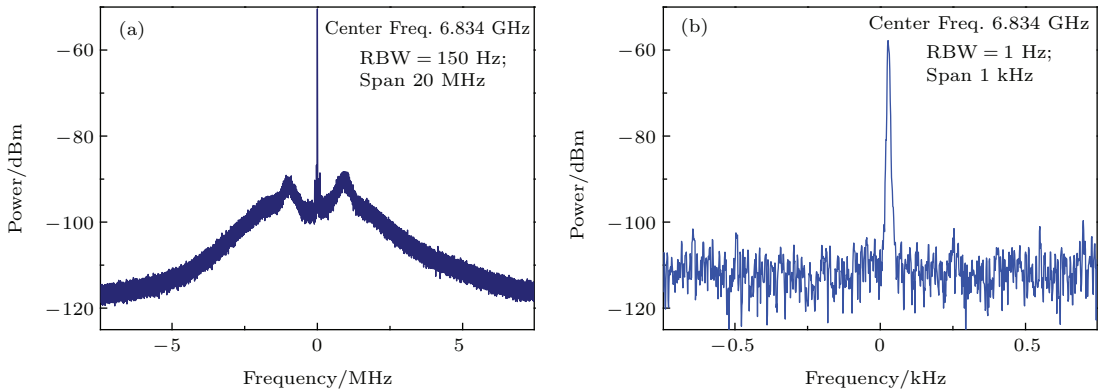


图4 通过压电陶瓷和电流反馈控制同时锁定情况下的拍频功率谱 (a) Span 20 MHz; (b) span 1 kHz

Fig. 4. The spectrum of the beat frequency of two phase-locked lasers: (a) Span 20 MHz; (b) span 1 kHz.

3 原子BEC中的拉曼跃迁

对于⁸⁷Rb冷原子两个不同超精细态, 可以通过6.8 GHz微波信号与二能级相互作用, 将原子从一个态转移到另一个态, 但是由于微波的波长太长, 微波传递给原子的动量可以忽略不计. 如果用一对Raman光代替微波场, 使原子从一个态跃迁到另一个态的同时, Raman光的动量传递给原子, 这样会产生一个自旋轨道耦合人造规范势. 使用

光学锁相环系统锁定两束激光可作为一对Raman光, 作用在⁸⁷Rb超冷原子基态两个不同超精细态上, 产生拉曼跃迁和自旋轨道耦合人造规范势.

使用光学锁相环系统锁定的一对Raman光, 将⁸⁷Rb原子从一个基态超精细态上跃迁到另一个基态超精细态上, 探测原子使用的是共振探测吸收时间飞行成像法. 首先让铷原子自由飞行30 ms, 在飞行展开的过程中, x 方向加一个非均匀磁场, 最后打开近共振的探测光, 使用吸收成像的方法来获取原子信息. 在飞行过程中, 由于史特恩-盖拉赫

效应, 不同自旋态的原子在 x 方向上的位移是不同的, 从而将不同自旋态原子区分开, 可以观察基态两个不同超精细态原子的布局数比例.

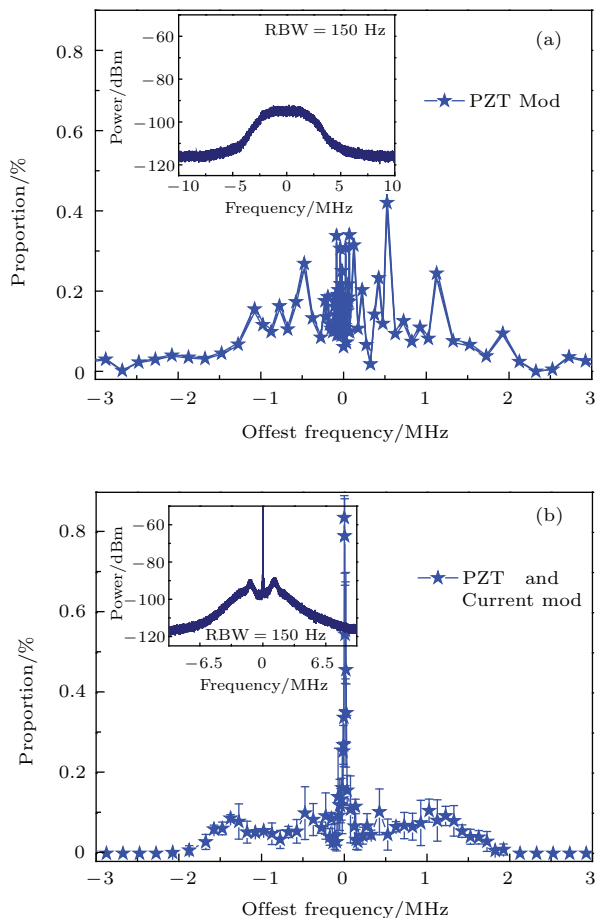


图5 Raman 跃迁导致态的布局随 Raman 双光子失谐变化 (a) 只有压电陶瓷反馈控制锁定; (b) 压电陶瓷和电流调制同时作用下实现锁定

Fig. 5. Proportion of Raman transition as a function of two-photon Raman detuning: (a) Only with PZT feedback; (b) PZT and current feedback simultaneously.

首先将光学偶极阱中 $|F = 2, m_F = 2\rangle$ 态原子 BEC^[30] 通过扫描微波频率把原子全部绝热转移到 $|F = 1, m_F = 1\rangle$ 态 (见图 7(a)). 然后打开两束相互垂直传播的 785 nm Raman 光, 传播方向分别为 $x, -y$ 方向, 腰斑大小为 200 μm , 光功率均为 70 mW, 人工调节使得二者的差频大致为 6.834 GHz, Master laser 的光频 ω_M 置于低频, 见图 1(a), 并且锁定到外部参考腔上, Slave laser 的光频 ω_S 置于高频, 通过光学锁相环将频率差锁定, 两束 Raman 光作用在基态两个超精细态 $|F = 1, m_F = 1\rangle$ 和 $|F = 2, m_F = 1\rangle$ 之间. 如果只有压电陶瓷反馈锁定情况下, Raman 光脉冲为

1 ms, 无法将原子全部转移到 $|F = 2, m_F = 1\rangle$ 态, 如图 5(a), Raman 跃迁概率随 Raman 双光子失谐的变化, 它的跃迁的概率也是杂乱的, 线宽非常宽, 这是因为主激光与从激光之间的相对相位无规则的抖动导致的.

当电流调制和压电陶瓷同时用于反馈锁定, 可以将原子全部转移到 $|F = 2, m_F = 1\rangle$ 态, 如图 5(b) 所示. 将 Raman 双光子失谐设置在 $4E_r$, 改变 Raman 光脉冲长度测量原子的 Raman 拉比振荡, 如图 6 所示, 拉比频率约为 $\Omega = 10$ kHz^[31]. 图 7 给出了 Raman 光 π 脉冲将初始态 $|F = 1, m_F = 1\rangle$ 的原子转移到 $|F = 2, m_F = 1\rangle$, 并且获得 Raman 光子动量为 $2k_R$, $k_R = k_r \sin(\theta/2)$,

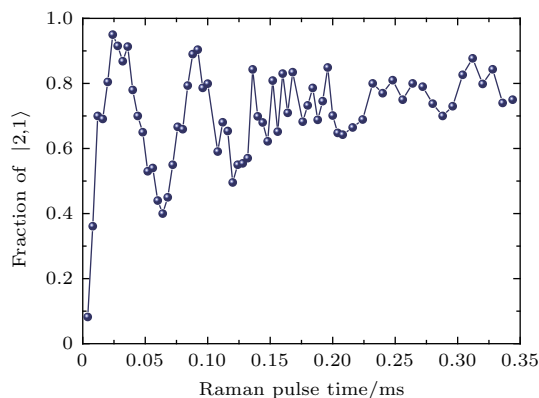


图6 $|2, 1\rangle$ 态原子比例随拉曼脉冲时间的变化
Fig. 6. The population in $|2, 1\rangle$ as a function of duration time of the Raman pulse.

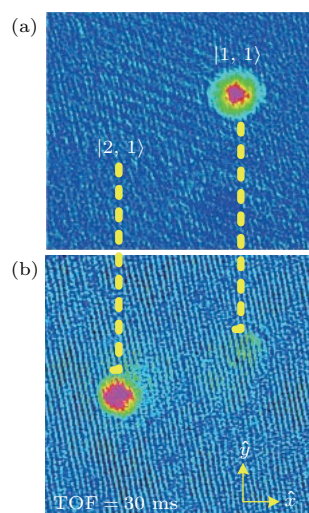


图7 (网刊彩色) 时间飞行吸收成像实验结果 (a) 初始制备在原子 $|F = 1, m_F = 1\rangle$ 态; (b) Raman 跃迁到 $|F = 2, m_F = 1\rangle$
Fig. 7. (color online) Time flight absorption image: (a) Prepared in initial state $|F = 1, m_F = 1\rangle$; (b) apply Raman pulse to transfer into $|F = 2, m_F = 1\rangle$.

$k_r = 2\pi/\lambda$ 是单个光子的反冲动量, 反冲能量 $E_r = (\hbar k_r)^2/(2m) = h \times 1.858 \text{ kHz}$, λ 为 Raman 光的波长, $\theta = 90^\circ$ 是两束 Raman 光的夹角. 从图 7 中可看出原子跃迁的同时 y 方向也获得一定的动量 [9].

4 结 论

本文使用可编程修改的数字分频器和高带宽的鉴相鉴频器锁定两台激光器到 ^{87}Rb 的 6.8 GHz, 并且将主激光器和从激光器的拍频线宽降到 Hz 量级. 该光学锁相环系统产生的一对 Raman 光, 这可以应用到四波混频、电磁诱导透明、冷原子人造规范场等实验中.

参考文献

- [1] Anderson M H, Ensher J R, Matthews M R, Wieman C E, Cornell E A 1995 *Science* **269** 198
- [2] Davis K B, Mewes M O, Andrews M R, Druten N J, Durfee D S, Kurn D M, Ketterle W 1995 *Phys. Rev. Lett.* **75** 3969
- [3] Demarco B, Jin D S 1999 *Science* **285** 1703
- [4] Bloch I, Dalibard J, Zwerger W 2008 *Rev. Mod. Phys.* **80** 885
- [5] Chin C 2010 *Rev. Mod. Phys.* **82** 1225
- [6] Spielman I B 2009 *Phys. Rev. A* **79** 063613
- [7] Lin Y J, Compton R L, Perry A R, Phillips W D, Porto J V, Spielman I B 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 130401
- [8] Lin Y J, Jiménez-García K, Spielman I B 2011 *Nature* **471** 83
- [9] Fu Z K, Wang P J, Chai S J, Huang L H, Zhang J 2011 *Phys. Rev. A* **84** 043609
- [10] Wang P J, Yu Z Q, Fu Z K, Miao J, Huang L H, Chai S J, Zhai H, Zhang J 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 095301
- [11] Fu Z K, Huang L H, Meng Z M, Wang P J, Liu X J, Pu H, Hu H, Zhang J 2013 *Phys. Rev. A* **87** 053619
- [12] Lu H, Zhu S B, Qian J, Wang Y Z 2015 *Chin. Phys. B* **24** 090308
- [13] Xie W F, He Y Z, Bao C G 2015 *Chin. Phys. B* **24** 060305
- [14] Beeler M C, Williams R A, Jimenez G K, LeBlanc L J, Perry A R, Spielman I B 2013 *Nature* **498** 201
- [15] Zhang J Y, Ji S C, Chen Z, Zhang L, Du Z D, Yan B, Pan G S, Zhao B, Deng Y J, Zhai H, Chen S, Pan J W 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 115301
- [16] 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
- [17] Fu Z K, Huang L H, Meng Z M, Wang P J, Zhang L, Zhang S Z, Zhai H, Zhang P, Zhang J 2014 *Nat. Phys.* **10** 110
- [18] Dalibard J, Gerbier F, Juzeliūnas G, Öhberg P 2011 *Rev. Mod. Phys.* **83** 1523
- [19] Wang P J, Zhang J 2014 *Front. Phys.* **9** 598
- [20] Zhang J, Hu H, Liu X J, Pu H 2014 *Annu. Rev. Cold Atoms Molecul.* **2** 81
- [21] Huang L H, Wang P J, Fu Z K, Zhang J 2014 *Chin. Phys. B* **23** 013402
- [22] Meng Z M, Zhang J 2013 *Acta Opt. Sin.* **33** 0714001 (in Chinese) [孟增明, 张靖 2013 光学学报 **33** 0714001]
- [23] Appel J, MacRae A, Lvovsky A I 2009 *Meas. Sci. Technol.* **20** 055302
- [24] Hockel D, Scholz M, Benson O 2009 *Appl. Phys. B* **94** 429
- [25] Marino A M, Stroud Jr C R 2008 *Rev. Sci. Instrum.* **79** 013104
- [26] Cacciapuoti L, Angelis M D, Prevedelli M, Stuhler J, Tino G M 2005 *Rev. Sci. Instrum.* **76** 053111
- [27] Wang X L, Tao T J, Cheng B, Wu B, Xu Y F, Wang Z Y, Lin Q 2011 *Chin. Phys. Lett.* **28** 084214
- [28] Ricci L, Weidemüller M, Esslinger T, Hemmerich A, Zimmermann C, Vuletic V, König W, Hansch T W 1995 *Opt. Commun.* **117** 541
- [29] Cheng F Y, Meng Z M, Zhang J 2012 *J. Shanxi Univ.* **35** 79 (in Chinese) [程峰钰, 孟增明, 张靖 2012 山西大学学报 **35** 79]
- [30] 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]
- [31] Huang L H, Wang P J, Fu Z K, Zhang J 2014 *Acta Opt. Sin.* **34** 0727002 (in Chinese) [黄良辉, 王鹏军, 付正坤, 张靖 2014 光学学报 **34** 0727002]

Raman coupling in atomic Bose-Einstein condensed with phase-locked laser system*

Meng Zeng-Ming¹⁾²⁾ Huang Liang-Hui¹⁾²⁾ Peng Peng¹⁾²⁾ Chen Liang-Chao¹⁾²⁾
 Fan Hao¹⁾²⁾ Wang Peng-Jun¹⁾²⁾ Zhang Jing^{1)†}

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 19 August 2015; revised manuscript received 25 September 2015)

Abstract

We present a simple, versatile and reliable phase-locked laser system. The system consists of an external cavity diode laser, Ti: Sapphire laser, fast detector, phase frequency detector (PFD) and loop filters. The beat signal of the laser is detected with a detector. From the PFD, we can obtain an error signal. The loop filter converts the output of the PFD into a control voltage and thus drives piezoelectric ceramic transducer (PZT) and current of diode laser. After locking, the bandwidth of the beat signal is reduced from MHz to Hz. So the line-width of the diode laser is almost close to that of Ti: Sapphire laser. The locking range is from sub-MHz to 10 GHz. So it is used for the ground hyperfine state transition of ⁸⁷Rb. Through the use of the phase-locked loop system, we can drive the transition of ⁸⁷Rb atoms between two ground hyperfine states $F = 2$ and 1. The system is used to demonstrate Raman transition between two states through changing the detuning of the beat signal. From this, we can obtain Rabi frequency $\Omega = 10$ kHz. So, this system can be used to induce an effective vector gauge potential for ⁸⁷Rb Bose-Einstein condensed and realize the spin-orbit coupling.

Keywords: optical phase-locked loop, beat frequency, Raman coupling, spin-orbit coupling

PACS: 32.80.Qk, 85.30.De, 85.90.+h

DOI: [10.7498/aps.64.243202](https://doi.org/10.7498/aps.64.243202)

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2011CB921601), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11234008, 11222430), the Co-foundation of the National Natural Science Foundation of China and the Research Grants Council of Hongkong, China (Grant No. 11361161002), and the Program for Sanjin Scholars of Shanxi Province, China.

† Corresponding author. E-mail: jzhang74@sxu.edu.cn; jzhang74@yahoo.com

ACTA PHYSICA SINICA

Vol. 64, No. 24, December 2015

CONTENTS

REVIEW

- 247804 **Applications and progress of slow positron beam technique in the study of metal/alloy microdefects**

*Hu Yuan-Chao Cao Xing-Zhong Li Yu-Xiao Zhang Peng Jin Shuo-Xue Lu Er-Yang
Yu Run-Sheng Wei Long Wang Bao-Yi*

GENERAL

- 240201 **Comparative studies of Tikhonov regularization and truncated singular value decomposition in the three-dimensional flame temperature field reconstruction**

Xie Zheng-Chao Wang Fei Yan Jian-Hua Cen Ke-Fa

- 240301 **Quantum walk search algorithm based on phase matching and circuit implementation**

Chen Han-Wu Li Ke Zhao Sheng-Mei

- 240302 **Correspondences between quantum and classical orbits Berry phases and Hannay angles for harmonic oscillator system**

Xin Jun-Li Shen Jun-Xia

- 240303 **Protecting quantum entanglement at finite temperature by the weak measurements**

Wang Mei-Jiao Xia Yun-Jie

- 240304 **Characteristics of multi-hop noisy quantum entanglement channel and optimal relay protocol**

Yang Guang Lian Bao-Wang Nie Min

- 240305 **Dynamics of the particle on a catenoid and the quantization of the constrained system in the extended space**

Xun Da-Mao Ouyang Tao Tan Rong-Ri Liu Hui-Xuan

- 240501 **Propagation and inhibition of online rumor with considering rumor elimination process**

Wan Yi-Ping Zhang Dong-Ge Ren Qing-Hui

- 240502 **Stochastic resonance in periodic potential driven by dichotomous noise**

Ma Zheng-Mu Jin Yan-Fei

- 240503 **A digital-analog hybrid random number generator based on memristor**

Yuan Ze-Shi Li Hong-Tao Zhu Xiao-Hua

- 240504 **Fractal and statistical properties of the geometrical structure of natural pores within plasma sprayed coatings**

Chen Shu-Ying Wang Hai-Dou Ma Guo-Zheng Kang Jia-Jie Xu Bin-Shi

(Continued)

240505 **Control of chaos in a semiconductor laser using the Faraday effect**

Yan Sen-Lin

240506 **A method of identifying parameters of a time-varying time-delay chaotic system**

Chai Qin-Qin

240601 **Absolute calibration of an analog InSb detector based on multimode spatial correlation of correlated photons**

Xia Mao-Peng Li Jian-Jun Gao Dong-Yang Hu You-Bo Sheng Wen-Yang Pang Wei-Wei Zheng Xiao-Bing

240701 **Three-dimensional photoacoustic imaging technique based on acoustic lens**

Zhang Yu Tang Zhi-Lie Wu Yong-Bo Shu Gang

NUCLEAR PHYSICS

242801 **Neutron holography simulation based on different sample rotations**

Tang Bin Cao Chao Yin Wei Sun Yong Liu Bin

ATOMIC AND MOLECULAR PHYSICS

243101 **Spectroscopic parameters and molecular constants of $^{75}\text{As}^{32}\text{S}^+$ and $^{75}\text{As}^{34}\text{S}^+$**

Wang Jie-Min Wang Xi-Juan Tao Ya-Ping

243102 **Analyses of the influences of molecular vacancy defect on the geometrical structure, electronic structure, and vibration characteristics of Hexogeon energetic material**

Peng Ya-Jing Jiang Yan-Xue

243103 **Atomical simulations of structural changes of a melted TiAl alloy particle on TiAl (001) substrate**

Qian Ze-Yu Zhang Lin

243201 **Theoretical study of the periodic quantum phase modulation of the dipole response in atomic He**

Ding Jing-Jie Wang Quan-Jun Liu Zuo-Ye Hu Bi-Tao

243202 **Raman coupling in atomic Bose-Einstein condensed with phase-locked laser system**

Meng Zeng-Ming Huang Liang-Hui Peng Peng Chen Liang-Chao Fan Hao Wang Peng-Jun Zhang Jing

243301 **Experimental optimal design of the $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ codoped $\text{BaGd}_2\text{ZnO}_5$ phosphor and its upconversion luminescence properties**

Sun Jia-Shi Li Shu-Wei Shi Lin-Lin Zhou Tian-Min Li Xiang-Ping Zhang Jin-Su Cheng Li-Hong Chen Bao-Jiu

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

244201 **Ptychographic iterative engine with the incoherent illumination**

Yu Wei He Xiao-Liang Liu-Cheng Zhu Jian-Qiang

244202 **Spin-orbit interaction of light in metasurface**

Yi Xu-Nong Li Ying Ling Xiao-Hui Zhang Zhi-You Fan Dian-Yuan

(Continued)

244203 **Generation and three-dimensional characterization of complex nondiffracting optical beams**

*Yu Xiang-Hua Yao Bao-Li Lei Ming Yan Shao-Hui Yang Yan-Long Li Run-Ze
Cai Ya-Nan*

244204 **Frequency doubling effect of off-axial vortex beam in the case of weak walk-off**

Chen Shun-Yi Ding Pan-Feng Pu Ji-Xiong

244205 **Superluminal and slow light of high-order harmonic for rectangle signal in erbium-doped fiber**

*Wang Fu Wang Zhi Wu Chong-Qing Liu Guo-Dong Mao Ya-Ya Sun Zhen-Chao
Li Qiang*

244206 **A ground-based differential absorption lidar for atmospheric vertical CO₂ profiling**

Han Ge Gong Wei Ma Xin Xiang Cheng-Zhi Liang Ai-Lin Zheng Yu-Xin

244301 **Method and experiment of rainfall intensity inversion using a microwave link based on support vector machine**

Song Kun Gao Tai-Chang Liu Xi-Chuan Yin Min Xue Yang

244401 **Analytical solution of the entransy dissipation of heat conduction process in isolated system**

Wang Huan-Guang Wu Di Rao Zhong-Hao

244701 **Influence of the inclined waving wall on the surface wave evolution of liquid film**

Wu Zheng-Ren Liu Mei Liu Qiu-Sheng Song Zhao-Xia Wang Si-Si

PHYSICS OF GASES, PLASMAS, AND ELECTRIC DISCHARGES

245201 **Localized surface plasmon resonance modes in Ag nanowires with pentagonal cross sections**

Xu Tian-Ning Li Xiang Jia Wen-Wang Sui Cheng-Hua Wu Hui-Zhen

245202 **Formation mechanism of concentric-ring pattern in dielectric barrier discharge**

Liu Wei-Bo Dong Li-Fang

245203 **A method of measuring the incidence angle of intense electron beam**

Hu Yang Yang Hai-Liang Sun Jian-Feng Sun Jiang Zhang Peng-Fei

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

247101 **Manipulation of Hund's rule coupling and orbital-selective Mott transition**

Sun Jian Liu Yang Song Yun

247201 **A first-principle study of the effect of W-doping on physical properties of anatase TiO₂**

Hou Qing-Yu Zhao Chun-Wang

247202 **Angle dependent inverse spin Hall effect in NiFe/Pt thin film**

Han Fang-Bin Zhang Wen-Xu Peng Bin Zhang Wan-Li

(Continued)

247301 **High-intensity directional surface plasmonic excitation based on the multi metallic slits with nano-antenna**

Xiong Zhi-Cheng Zhu Li-Lin Liu Cheng Gao Shu-Mei Zhu Jian-Qiang

247302 **Thermoelectric transport mechanism of $\text{Mg}_2\text{Si}_{0.4}\text{Sn}_{0.6-y}\text{Bi}_y$ prepared by low-temperature microwave reaction**

Zhang Hua Chen Shao-Ping Long Yang Fan Wen-Hao Wang Wen-Xian Meng Qing-Sen

247401 **Effect of $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ nanoparticles doped on the properties of single domain $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ high-temperature superconductors**

Zhang Xiao-Juan Zhang Yu-Feng Peng Li-Qi Zhou Wen-Li Xu Yan Zhou Di-Fan Izumi Mitsuru

247501 **Effects of bimodal random crystal field on the magnetization and phase transition of Blume-Capel model on nanotube**

Li Xiao-Jie Liu Zhong-Qiang Wang Chun-Yang Xu Yu-Liang Kong Xiang-Mu

247502 **Dielectric properties and high temperature magnetic behavior on multiferroics $\text{Bi}_{1-x}\text{Ca}_x\text{FeO}_3$ ceramics**

Song Gui-Lin Su Jian Zhang Na Chang Fang-Gao

247503 **Effects of doping F and transition metal on crystal structure and properties of ZnO thin film**

Zhou Pan-Fan Yuan Huan Xu Xiao-Nan Lu Yi-Hong Xu Ming

247504 **Influence of Mo capping layer on magnetic anisotropy of $\text{MgO}/\text{CoFeB}/\text{Mo}$**

Yu Tao Liu Yi Zhu Zheng-Yong Zhong Hui-Cai Zhu Kai-Gui Gou Cheng-Ling

247505 **Controlling of magnetic vortex chirality and polarity by spin-polarized current**

Sun Ming-Juan Liu Yao-Wen

247701 **Electron emission from $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ ferroelectric cathode**

Wang Qiu-Ping Feng Yu-Jun Xu Zhuo Cheng Peng-Fei Feng Fei-Long

247801 **Photoluminescence properties and energy transfer of $\text{SrZn}_2(\text{PO}_4)_2\text{:Sn}^{2+}$, Mn^{2+} phosphor**

Xiong Xiao-Bo Liu Wan-Li Yuan Xi-Ming Liu Jin-Cun Song Jiang-Qi Liang Yu-Jun

247802 **Effect of nitrogen on the defect luminescence in diamond**

Zhang Xiu-Zhi Wang Kai-Yue Li Zhi-Hong Zhu Yu-Mei Tian Yu-Ming Chai Yue-Sheng

247803 **Suppression of the blinking of single QDs by using an N-type semiconductor nano-material**

Wang Zao Zhang Guo-Feng Li Bin Chen Rui-Yun Qin Cheng-Bing Xiao Lian-Tuan Jia Suo-Tang

INTERDISCIPLINARY PHYSICS AND RELATED AREAS OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

248101 **Fabrications of different Sb content p- SnO_2 thin films**

Feng Qiu-Ju Liu Yang Pan De-Zhu Yang Yu-Qi Liu Jia-Yuan Mei Yi-Ying Liang Hong-Wei

(Continued)

248201 **Electronic structure and transport properties of cathode material $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ for lithium-ion battery**

Ma Hao Liu Lei Lu Xue-Sen Liu Su-Ping Shi Jian-Ying

248701 **Damage-repair model for mutagenic effects of plant induced by ionizing radiation**

Li Duo-Fang Cao Tian-Guang Geng Jin-Peng Zhan Yong

248702 **Functional coupling analyses of electroencephalogram and electromyogram based on multiscale transfer entropy**

Xie Ping Yang Fang-Mei Chen Xiao-Ling Du Yi-Hao Wu Xiao-Guang

248801 **Numerical simulation of light absorption enhancement in microcrystalline silicon solar cells with Al nanoparticle arrays**

Ding Dong Yang Shi-E Chen Yong-Sheng Gao Xiao-Yong Gu Jin-Hua Lu Jing-Xiao

GEOPHYSICS, ASTRONOMY, AND ASTROPHYSICS

249601 **Chaos and fractal properties of solar activity phenomena at the high and low latitudes**

Zhou Shuang Feng Yong Wu Wen-Yuan

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 (WULIXUEBAO)

(半月刊, 1933 年创刊)

2015 年 12 月 第 64 卷 第 24 期

版 权 所 有

ACTA PHYSICA SINICA

(Semimonthly, First Published in 1933)

Vol. 64 No. 24 December 2015

© 2015 Chinese Physical Society

编 辑 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)
出 版 中 国 物 理 学 会
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