

1.5 μm 光通信波段明亮压缩态光场的产生及其 Wigner 函数的重构

孙志妮 冯晋霞 万振菊 张宽收

Generation of bright squeezed light at 1.5 μm telecommunication band and its Wigner function reconstruction

Sun Zhi-Ni Feng Jin-Xia Wan Zhen-Ju Zhang Kuan-Shou

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 044203 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.044203

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.044203>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I4>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

Ge-Se 基硫系玻璃在通信波段的三阶非线性与光谱特性研究

Third-order optical nonlinearity at communication wavelength and spectral characteristics of Ge-Se based chalcogenide glasses

物理学报.2015, 64(15): 154216 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154216>

原子系统中远失谐脉冲光束对的群速度操控

Group velocity manipulation of far off-resonant pulse-pair in atomic system

物理学报.2015, 64(9): 094208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.094208>

KTP 倍频器件温度适应性扩展研究

Study on temperature adaptability extension of KTP frequency-doubling device

物理学报.2015, 64(9): 094205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.094205>

KDP 晶体相位匹配角理论预测模型及其验证分析

Theoretical model of phase-matching angles for KDP crystals and its verification analysis

物理学报.2015, 64(2): 024213 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024213>

循环跃迁的 Δ 型三能级系统中的无反转激光

Laser without inversion in a Δ -configuration three-level system with cyclic transition

物理学报.2012, 61(14): 144205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.144205>

ISSN 1000-3290

物理学报

Acta Physica Sinica

2016年 第65卷 第4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 65 卷 第 4 期 2016 年 2 月

目 次

综述

047201 VO₂ 金属-绝缘体相变机理的研究进展 罗明海 徐马记 黄其伟 李派 何云斌

总论

040201 广义非线性薛定谔方程描述的波坍缩及其演变 崔少燕 吕欣欣 辛杰

040401 Lifshitz 时空 s 波超导模型的关联长度和穿透深度 ... 杨卓群 吴亚波 鲁军旺 张成园 张雪

040501 基于压缩感知的动态散射成像 庄佳衍 陈钱 何伟基 冒添逸

040502 自调整平滑区间粒子滤波平滑算法 杨伟明 赵美蓉

基本粒子物理学与场

041201 Breit 夸克势的不同次正规化与 η_c -J/ ψ 等的质量劈裂 吉日木图 敖登 包特木尔巴根

原子和分子物理学

043701 多模 1064 nm 光纤激光器实现一维远失谐光晶格
..... 袁园 芦小刚 白金海 李建军 吴令安 傅盘铭 王如泉 左战春

电磁学、光学、声学、传热学、经典力学和流体动力学

044101 一种内置条状金属板的双层金属腔体屏蔽效能的理论模型 ... 郝建红 公延飞 范杰清 蒋璐行

044102 激光尾场加速电子的密度梯度注入的解析处理 王通 王晓方

044103 部分相干光对周期性局域空心光束的影响 朱清智 沈栋辉 吴逢铁 何西

044201 一种基于超材料的宽带、反射型 90° 极化旋转体设计 韩江枫 曹祥玉 高军 李思佳 张晨

044202 基于可调谐复振幅滤波器的超长焦深矢量光场 ... 王吉明 赫崇君 刘友文 杨凤 田威 吴彤

044203 1.5 μm 光通信波段明亮压缩态光场的产生及其 Wigner 函数的重构
..... 孙志妮 冯晋霞 万振菊 张宽收

044204 一种基于串联谐振腔的高性能光电振荡器 黄港滨 王菊 王文睿 贾石 于晋龙

044205 双光子过程耗散耦合腔阵列中的量子相变 熊芳 冯晓强 谭磊

044206 掺 Er³⁺ 氟化物光纤振荡器中红外超短脉冲的产生
王少奇 邓颖 张永亮 李超 王方 康民强 罗韵 薛海涛 胡东霞 粟敬钦 郑奎兴 朱启华

044207 外腔共振和频系统中阻抗匹配的理论研究 闫晓娟 马维光 谭巍

- 044208 掺Yb硅酸盐玻璃的热漂白性能研究 熊中龙 吴妍 景锐平 马冲 龙蔚辉 张超军 程永进
- 044209 退火对熔石英表面损伤修复点损伤增长的影响 蒋勇
袁晓东 王海军 廖威 刘春明 向霞 邱荣 周强 高翔 杨永佳 郑万国 祖小涛 苗心向
- 044210 分布式光纤Sagnac干涉仪中基于倒谱的多分辨率入侵定位算法... 皮少华 王冰洁 赵栋 贾波
- 044211 低频标准真空涨落的测量 薛佳 秦际良 张玉驰 李刚 张鹏飞 张天才 彭堃堃
- 044301 二维三组元声子晶体中的半狄拉克点及奇异特性 高汉峰 张欣 吴福根 姚源卫
- 044302 基于单矢量差分能量检测器的扩频水声通信 殷敬伟 杜鹏宇 张晓 朱广平
- 044303 基于温度梯度分布的宽频带声聚焦效应 刘宸 孙宏祥 袁寿其 夏建平
- 044304 超声场下刚性界面附近溃灭空化气泡的速度分析 郭策 祝锡晶 王建青 叶林征
- 044305 圆环形聚焦声场的构建与调控 郑莉 郭建中

气体、等离子体和放电物理

- 045201 不同磁路电子回旋共振离子源引出实验 金逸舟 杨涓 冯冰冰 罗立涛 汤明杰
- 045202 碳纳米管和天鹅绒阴极强流发射特性的对比研究 蔡丹 刘列 巨金川 王海涛 赵雪龙 王潇
- 045203 针对高压物质密度诊断的激光X射线照相优化设计
..... 张天奎 韩丹 吴玉迟 闫永宏 赵宗清 谷渝秋

凝聚物质:结构、力学和热学性质

- 046101 基于分数阶微分流变模型的非晶合金黏弹性行为及流变本构参数研究
..... 许福 李科锋 邓旭辉 张平 龙志林
- 046102 杂质浓度对Zr替位掺杂 γ -TiAl合金的结构延性和电子性质的影响
..... 宋庆功 秦国顺 杨宝宝 蒋清杰 胡雪兰
- 046201 磁驱动准等熵加载下Z切石英晶体的折射率
..... 张旭平 罗斌强 种涛 王桂吉 谭福利 赵剑衡 孙承纬 刘仓理
- 046801 基于飞秒瞬态反射/透射技术的纳米Au半透膜热效应研究
..... 吴文智 高来勛 孔德贵 高扬 冉玲苓 柴志军

凝聚物质:电子结构、电学、磁学和光学性质

- 047501 三维介观超导环的涡旋结构 史良马 周明健 张晴晴 张宏彬
- 047701 直流电晕充电下环氧树脂表面电位衰减特性的研究
..... 茹佳胜 闵道敏 张翀 李盛涛 邢照亮 李国倡
- 047801 基于石墨烯涂覆空心光纤电光调制特性的研究 毕卫红 王圆圆 付广伟 王晓愚 李彩丽
- 047802 黑索金的非弹性中子散射及第一性原理计算
..... 刘本琼 宋建明 张伟斌 罗伟 王燕 夏元华 宗和厚 高国防 孙光爱
- 047901 基于临界电子密度的多载波微放电全局阈值分析
..... 王新波 李永东 崔万照 李韵 张洪太 张小宁 刘纯亮

047902 2,7-二辛基[1]苯并噻吩并[3,2-b]苯并噻吩/Ni(100)的界面能级结构随薄膜厚度的演化
..... 张红 牛冬梅 吕路 谢海鹏 张宇河 刘鹏 黄寒 高永立

物理学交叉学科及有关科学技术领域

048101 Imogolite类纳米管直径单分散性密度泛函理论研究 ... 王雅静 李桂霞 王治华 宫立基 王秀芳

048102 Ga含量对 $Mn_{2-x}NiGa_{1+x}$ 结构和磁性的影响 刘红艳 柳祝红 李歌天 马星桥

048401 基于磁共振的水下非接触式电能传输系统建模与损耗分析
..... 张克涵 阎龙斌 闫争超 文海兵 宋保维

048701 光瞳半径对纯位相调制激光束整形系统的影响 何杰铃 魏凌 杨金生 李喜琪 何益 张雨东

048801 类桑拿法制备的周期性结构Mo金属催化电极及其在电解水制氢中的应用 贺瑞霞
刘伯飞 梁俊辉 高海波 王宁 张奇星 张德坤 魏长春 许盛之 王广才 赵颖 张晓丹

地球物理学、天文学和天体物理学

049701 临界转动恒星Achernar的斜压结构与引力昏暗的精细研究 邵丽婷 宋汉峰 王江涛

1.5 μm 光通信波段明亮压缩态光场的产生及其 Wigner 函数的重构*

孙志妮 冯晋霞[†] 万振菊 张宽收

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

(2015年9月15日收到; 2015年10月26日收到修改稿)

1.5 μm 光通信波段非经典光场在光纤中有着极低的传输损耗, 因而是基于光纤的实用化连续变量量子信息研究的重要资源. 本文利用周期极化磷酸氧钛晶体构成的半整块结构简并光学参量放大器, 实验获得了连续变量 1.5 μm 光通信波段的明亮压缩态光场. 光学参量放大器的阈值功率为 230 mW. 当 780 nm 抽运光场功率为 110 mW, 1.5 μm 注入信号光场功率为 3 mW 时, 连续变量 1.5 μm 明亮正交位相压缩态光场的压缩度达 4.7 dB. 进而利用时域零拍探测系统测量压缩态, 采用量子层析技术重构了该明亮正交位相压缩态光场的 Wigner 准概率分布函数.

关键词: 非线性光学, 明亮压缩态光场, 光学参量放大器, Wigner 准概率分布函数

PACS: 42.50.Ct

DOI: 10.7498/aps.65.044203

1 引言

压缩态光场作为连续变量量子信息科学研究中的重要资源之一, 不仅可用于实现突破散粒噪声极限的精密测量^[1-3]、与原子相互作用的量子存储、操控等^[4,5]研究, 还可以通过分束器耦合获得连续变量纠缠源, 用于实现量子离物传态^[6,7]、量子密集编码^[8,9]和量子保密通信^[10,11]等研究.

利用光学参量振荡器(OPO)和光学参量放大器(OPA)是目前产生连续变量压缩态光场的有效手段之一^[12-18]. 1987年, 美国加州理工学院的Kimble小组^[12,13]首次采用OPO技术获得4.6 dB的连续变量压缩态光场, 随后, 国内山西大学光电研究所^[14]、德国Constanz大学的Mlynek小组^[15]以及澳大利亚国立大学的Bachor小组^[16]采用OPO或OPA技术也相继获得连续变量压缩态光场. 2007年, 日本东京大学Furusawa小组^[17]

获得9 dB的真空压缩; 2008年, 德国汉诺威大学Schnabel小组^[18]获得了9.9 dB真空压缩. 有注入信号场的简并光学参量放大器(DOPA)可以获得输出平均场不为零的非经典光场, 并且更容易实现光学参量振荡腔腔长的锁定以及对相对位相的控制, 从而获得输出更稳定的非经典光场. 1995年, 德国Constanz大学Schiller小组首先从理论上讨论了注入平均场不为零的DOPA, 其表现出许多与OPO不同的性质^[19]; 并采用DOPA实验获得了稳定运转长达36 h的4.3 dB的1.06 μm 明亮振幅压缩光^[20]. 2005年, 山西大学利用DOPA技术光学参量缩小过程获得了2.23 dB的1.06 μm 明亮振幅压缩光^[21].

上述压缩态光场的波长均位于1 μm 左右, 为实现实用化的长距离量子保密通信, 将压缩态光场波段拓展到1.5 μm 光通信波段是必然的趋势. 1.5 μm 波段非经典光场在光纤中可以实现最低损

* 国家自然科学基金(批准号: 61227015, 11204167, 61405109)和山西省回国留学人员科研资助项目(批准号: 2012-003)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: fengjx@sxu.edu.cn

耗(0.2 dB/km)传输,最大程度地使其量子态特性不受破坏. 因而近年来光通信波段1.5 μm压缩态光场的实验产生也成为研究热点^[22-25],可为实用化长距离量子信息研究提供有效的量子资源. 2008年,山西大学利用基于周期极化铌酸锂晶体OPO技术首次获得了2.4 dB的1.5 μm连续变量压缩真空并对实验系统做了优化^[22,23]. 随后,德国汉诺威大学Schnabel小组^[24]利用半整块OPO技术将1.5 μm连续变量压缩真空的压缩度提高至12.3 dB,为目前最高压缩度. 2013年,山西大学利用DOPA技术获得连续变量1.3 μm近通信波段3 dB正交振幅压缩态光场^[25]. 迄今为止,连续变量光纤通信波段1.5 μm的明亮压缩态光场的实验产生还未见报道. 为使非经典光场能以最低损耗在光纤中传输,实现实用化的量子通信系统,我们开展了光通信波段1.5 μm的明亮压缩态光场产生的实验研究.

本文利用基于周期极化磷酸氧钛(PPKTP)晶体的半整块结构DOPA,当780 nm光场为抽运场、1.5 μm光场为注入信号场、DOPA运转在参量放大状态下,实验获得了连续变量1.5 μm的明亮正交位相压缩态光场,实测压缩度为4.7 dB. 同时为进一步研究压缩态光场在光纤中传输过程中的演化特性,利用时域平衡零拍探测系统和量子层析技术对该明亮正交位相压缩态光场进行了Wigner函数重构,重现其在相空间的全部信息.

2 1.5 μm明亮压缩态光场的产生与测量

1.5 μm光通信波段明亮压缩态光场产生的实验装置如图1所示. 激光光源为NP Photonics公司生产的中心波长为1.5 μm的连续单频光纤激光器,最大输出功率为2.2 W. 光隔离器(OI)用于抑制由光学元件反射的激光,保证激光器稳定运转. 由于光纤激光器输出的激光存在远高于散粒噪声基准(SNL)的额外噪声,首先把1.5 μm激光注入模式清洁器(MC)用于降低其额外噪声至SNL. 经过MC1透射的1.5 μm光场,在分析频率为9 MHz处达到SNL. 该光场分成两束,功率较小的一部分光经MC2再次过滤其额外噪声,使连续单频1.5 μm激光的强度噪声在分析频率为4 MHz处达到SNL. 该光场用于DOPA的注入信号光场和平衡零拍探测系统中的本底振荡光场. MC1和MC2模式清洁器均是腔长为1.1 m的无源三镜环形谐振腔,谐振腔精细度为500. 利用Pound-Drever-Hall (PDH)锁腔技术^[26]将模式清洁器的腔长锁定在1.5 μm注入光的共振频率处,透射率均为80%. 电光调制器(EOM)为激光加载高频调制信号,用于锁腔系统. 功率较大的另一部分光注入倍频腔,通过高效外腔谐振倍频获得输出功率约1 W的连续单频780 nm激光^[27]. 经过780 nm模式清洁器(MC3)过滤,780 nm激光的强度噪声在分析频率为4 MHz

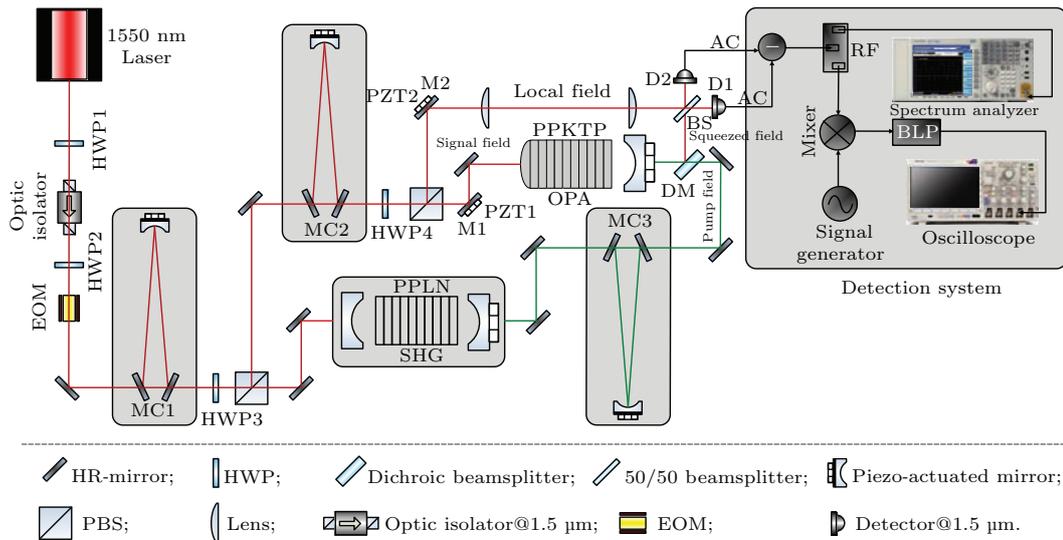


图1 1.5 μm明亮压缩态光场产生实验装置图

Fig. 1. Experimental setup schematic of generation of 1.5 μm bright squeezed light.

处达到SNL. 该780 nm光场被作为DOPA的抽运光场.

本文中, DOPA腔采用半整块两镜法布里-珀罗腔结构, 由PPKTP晶体和曲率半径为30 mm的凹镜组成. PPKTP晶体的尺寸为1 mm × 2 mm × 10 mm, 一个端面是曲率半径为12 mm的凸面, 镀抽运光和信号光高反膜 ($R_{1.5 \mu\text{m}} \& 780 \text{ nm} > 99.9\%$); 另一端面镀抽运光和信号光减反膜 ($R_{1.5 \mu\text{m}} \& 780 \text{ nm} < 0.01\%$). 凹面镜作为下转换光场的输出耦合端, 其凹面镀抽运光和信号光半反膜 ($T_{1.5 \mu\text{m}} = 13\%$, $R_{780 \text{ nm}} = 20\%$), 抽运光由此腔镜耦合进入DOPA腔, 其背面镀抽运光和信号光减反膜 ($R_{1.5 \mu\text{m}} \& 780 \text{ nm} < 0.02\%$). 因此DOPA处于双共振状态, 抽运光在DOPA腔内双次穿过晶体, 简并的信号光与闲置光在腔内共振. PPKTP晶体放置在导热性能良好的紫铜炉中, 通过半导体制冷元件和温度控制仪实现晶体温度的高精度控制, 晶体工作温度为36.8 °C. DOPA腔的光学腔长为32 mm, 当注入信号光时, 实测的1.5 μm的精细度为46.

实验测量的DOPA的阈值功率为230 mW. 当抽运光功率为200 mW (接近阈值功率)时, 信号光由PPKTP晶体的凸面注入DOPA, 实测的DOPA的经典增益约为200. 同样采用PDH锁腔技术, 将DOPA锁定在信号光的共振频率处, DOPA可连续稳定运转1 h. 实验光路中的平面镜M1固定在压电陶瓷(PZT1)上, 通过高压放大器输出的电压推动PZT1来精确控制抽运光与注入信号光的相对相位 θ_1 . 当 $\theta_1 = 0$ 时, DOPA运转于参量放大状态; 当 $\theta_1 = \pi$ 时, DOPA运转于参量反放大状态. 利用平衡零拍探测系统测量由DOPA输出的下转换光场的噪声功率谱. 下转换光场与1.5 μm本底振荡光通过50/50分束器(BS)后, 通过调节光路使其达到空间模式匹配, 实测的两束光的干涉度为98.6%. 由分束器输出的光场由一对自制的低噪声宽带高增益光电探测器(D1, D2)探测, 输出的光电流经过减法器相减后由频谱分析仪分析记录. 铟砷化镓光电探测器的量子效率为92%, 探测系统的共模抑制比达30 dB. 当挡住输出下转换光场、只有本底振荡光输入探测器时, 光电流相减测量的结果为SNL.

当抽运光功率为110 mW, 注入信号光功率为3 mW时, 我们分别测量了DOPA运转于参量放大和反放大状态的输出光场. 为避免探测器饱和, 实

验中调节本底振荡光的功率为10 mW, 同时用固定在平面镜M2上的PZT2精确控制本底振荡光与下转换光场的相对位相 θ_2 . 当 $\theta_2 = 0$ 时, 平衡零拍探测测量到的是下转换光场的正交位相分量的噪声方差; 当 $\theta_2 = \pi/2$ 时, 测量到的是下转换光场的正交振幅分量的噪声方差. 实验中, 把平衡零拍探测器提取的部分光电流分量输入锁相放大器后产生误差信号, 经过低噪声直流放大器反馈至PZT1和PZT2, 将两个相对位相(θ_1, θ_2)分别锁定在(0, 0)或者($\pi, \pi/2$)上. 此时, 测量到的下转换光场的噪声谱分别对应于正交位相分量和正交振幅分量的噪声谱.

当控制PZT1和PZT2上的反馈电压, 把相对位相 θ_1 和 θ_2 均锁定在0时, DOPA运转于参量放大状态, 下转换光场的功率约为120 μW, 利用平衡零拍探测系统测量的下转换光场的噪声功率谱如图2所示. 在实验测量中, 频谱分析仪的分析频率为4.5 MHz, 分辨率带宽为30 kHz, 视频带宽30 Hz, 扫描时间为250 ms. 图2中, 曲线a为SNL, 曲线b为压缩谱, 曲线c为反压缩谱, 曲线d为扫描相对位相 θ_2 时获得的扫描状态压缩与反压缩谱, 曲线e为电子学噪声. 从图2可以看出, 1.5 μm下转换光场的正交位相噪声低于SNL 4.7 dB. 实验中, 当把相对位相 θ_1 和 θ_2 分别锁定在 π 和 $\pi/2$ 时, DOPA运转于参量反放大状态, 实验测量了明亮正交振幅分量的噪声谱, 观察到低于SNL 2.3 dB的1.5 μm光场的正交振幅压缩. 由于DOPA运转于反放大状态时, 相对位相 θ_1 锁定波动较大, 未能获得好的测量结果, 具体原因还在进一步分析.

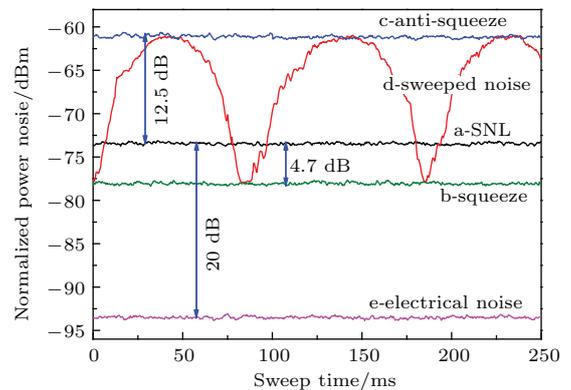


图2 1.5 μm下转换光场的噪声谱

Fig. 2. Noise spectra of 1.5 μm down-conversion field.

实验测量过程中的探测效率(η_{det})包括探测光路的传输效率、本底光与待测光干涉度引入的测量

效率、光电探测器的量子效率以及探测器电子学噪声引入的等效测量效率等, 实验中总的探测效率为 86.6%. DOPA 腔实际输出的压缩度可表示为^[20]

$$V_{\text{sq}} = \frac{V_{\text{sq,det}} - 1 + \eta_{\text{det}}}{\eta_{\text{det}}}, \quad (1)$$

其中 $V_{\text{sq,det}}$ 为实际探测到的正交位相压缩光的噪声. 由(1)式计算可知, 由 DOPA 输出的 $1.5 \mu\text{m}$ 下转换光场的明亮正交位相压缩光的压缩度达 6.3 dB.

3 $1.5 \mu\text{m}$ 明亮压缩态光场的 Wigner 准概率分布函数的重构

量子态的 Wigner 准概率分布函数是相空间的实函数, 能完备地描述一个量子态, 但作为一种准概率分布函数并不能被直接测量. Wigner 准概率分布函数是 1932 年由 Wigner 首次引入一个函数对应于相空间中的准概率分布, 反映了量子态在整个相空间演化过程中的重要信息^[28], 量子态的演化可以用其对应的 Wigner 函数来描述, 因而 Wigner 函数的重构对于研究量子体系的演化过程是非常有意义的. 国内外相关研究小组在理论和实验方面开展了一系列的工作^[29–33]. 理论研究表明, 采用基于时域平衡零拍探测的量子层析技术是对于量子态的 Wigner 函数重构的重要方法之一^[29]. 1989 年, 德国乌尔姆大学 Vogel 小组第一次利用时域的平衡零拍探测(量子层析)技术在实验上重构出第一个量子态的 Wigner 函数^[30]; 1996 年, 德国康斯坦茨大学 Schiller 小组首次实现了对于连续变量压缩态 Wigner 函数的重构^[31], 2001 年该小组又率先完成了单光子态 Wigner 函数的重构^[32]; 2008 年, 山西大学采用时域平衡零拍探测的量子层析技术实现了对于连续变量真空压缩态的 Wigner 函数的重构^[33]. 量子层析技术的具体过程是首先通过采集该量子态噪声起伏在不同位相角 θ_2 下的分布, 这对应于该量子态的不同位相角 θ_2 下的噪声边缘分布. 然后通过对边缘分布的 Fourier 变换做双重 Fourier 积分即可得到该量子态的密度矩阵和相空间的 Wigner 函数, 重现量子态的全部信息, 利用它可以很方便地求出一个可观测量的概率分布.

为进一步研究压缩态光场在光纤中传输过程中的演化特性, 需要重现其在相空间的全部信息. 我们利用时域平衡零拍探测系统和量子层析技术

对实验获得的 $1.5 \mu\text{m}$ 明亮正交位相压缩态光场进行了 Wigner 函数重构. 实验中, 通过扫描本底振荡光与待测量子态的相对位相, 并用频谱分析仪测量了不同位相角 θ_2 下的明亮压缩态的噪声幅度, 然后将平衡零拍探测系统输出的减信号在某一个频率处展开, 就可以用示波器采集到该压缩态在不同位相角 θ_2 下的噪声边缘分布. 测量系统如图 1 所示, 平衡零拍探测器输出的减信号与 1 MHz 的射频信号混频后经过低通滤波器, 将 1 MHz 处的噪声信号解调到零频, 即可以通过示波器采集高频处的噪声信号. 解调后的噪声信号比较弱, 实验中采用一个低噪声放大器放大信号, 通过选择其频宽以及放大倍数将低频干扰过滤并使得信号得到有效放大, 再由采样频率为 1 Gb/s 的数字示波器采集数据, 采集所得数据如图 3 所示.

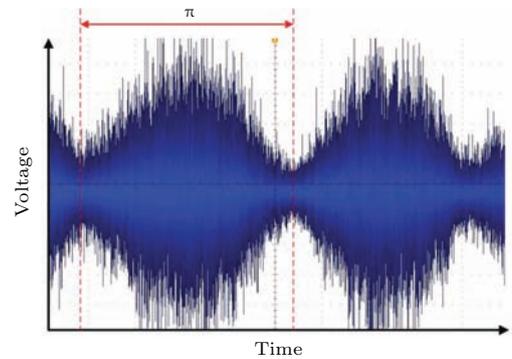


图 3 存储示波器采集到的数据点(两条虚线间的部分为 π 位相周期内的数据)

Fig. 3. Collected data of digital storage oscilloscope (the portion between the two dashed lines is datagram a period of π phase).

取一个 π 位相周期的数据并等分为 100 份, 则每一份为一个 $\pi/100$ 位相区间. 然后再将每一个区间的电压值等分为 100 个区间, 并对所有数据做统计, 统计的结果即为该位相角下的量子态噪声边缘分布. 这样就得到了量子态在不同位相角下的 100 个边缘分布. 然后对这一系列边缘分布通过 Labview 程序做逆 Randon 变换, 重构出该明亮压缩态光场的 Wigner 准概率分布函数. 计算结果如图 4 所示, 图 4(a) 为重构出的 Wigner 准概率分布函数的三维图, 图 4(b) 为该函数的俯视图. 从图中可以看出, 实验产生的明亮位相压缩光并不是一个理想的最小不确定态, 放大方向存在额外的噪声. 此外, 相对位相的随机起伏以及探测器的量子效率都是影响 Wigner 函数真实重构的因素.

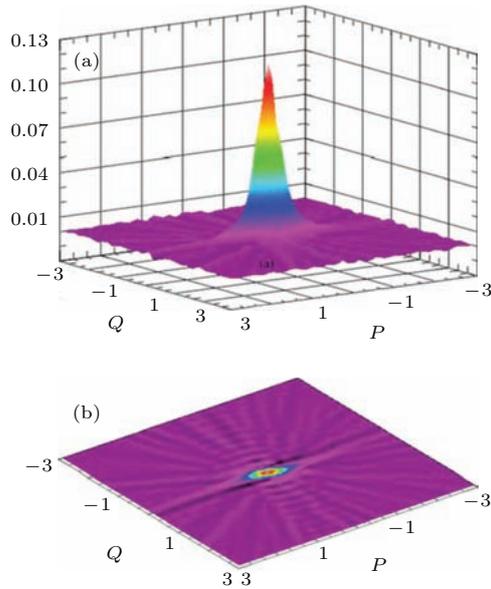


图4 (网刊彩色) 重构的Wigner准概率分布函数 (a) 三维图; (b) 俯视图

Fig. 4. (color online) Reconstructed Wigner quasi-probability distribution function: (a) Three-dimensional of the function; (b) top view of the function.

4 结 论

本文利用PPKTP晶体构成的半整块简并光学参量放大器实验产生了光通信波段 $1.5\ \mu\text{m}$ 正交位相明亮压缩态光场. 当抽运光功率为 $110\ \text{mW}$ 、注入信号光功率为 $3\ \text{mW}$ 、DOPA运转于放大状态时, $1.5\ \mu\text{m}$ 正交位相明亮压缩态光场的实测压缩度为 $4.7\ \text{dB}$. 考虑到探测效率,DOPA实际输出光场的压缩度为 $6.3\ \text{dB}$. 通过改善腔镜的镀膜质量、光电管器件量子效率以及提高相对位相锁定的信噪比等,有望得到更高的压缩度输出. 实验上采用量子层析技术重构出了该量子态的Wigner准概率分布函数,重现其在相空间演化的全部信息,为进一步研究压缩态光场在光纤中的传输演化特性提供了有力的手段. 由于明亮压缩态光场是在有注入信号光场的情况下获得的,DOPA腔腔长的锁定会更加稳定,有利于获得长时间稳定的明亮压缩态光场,可为基于光纤的实用化长距离量子信息研究提供理想的量子光源.

参考文献

[1] Goda K, Miyakawa O, Mikhailov E E, Saraf S, Adhikari R, McKenzie K, Ward R, Vass S, Weinstein A J, Mavalvala N 2008 *Nat. Phys.* **4** 472

[2] Giovannetti V, Lloyd S, Maccone L 2004 *Science* **306** 1300

[3] Xiao M, Wu L A, Kimble H J 1987 *Phys. Rev. Lett.* **59** 278

[4] Appel J, Figueroa E, Korystov D, Lobino M, Lvovsky A I 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 093602

[5] Dantan A, Pinard M 2004 *Phys. Rev. A* **69** 043810

[6] Furusawa A, Serensen J L, Braunstein S L, Fuchs C A, Kimble H J, Polzik E S 1998 *Science* **282** 706

[7] Zhai Z H, Li Y M, Wang S K, Guo J, Zhang T C, Gao J R 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2710 (in Chinese) [翟泽辉, 李永明, 王少凯, 郭娟, 张天才, 郇江瑞 2005 物理学报 **54** 2710]

[8] Jing J T, Zhang J, Yan Y, Zhao F G, Xie C D, Peng K C 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 167903

[9] Lee H, Ahn D, Hwang S W 2002 *Phys. Rev. A* **66** 024304

[10] Moskal S, Bednarek S, Adamowski J 2007 *Phys. Rev. A* **76** 032302

[11] Schmitt-Manderbach T, Weier H, Furst M, Ursin R, Tiefenbacher F, Scheidl T, Perdigues J, Sodnik Z, Kurtsiefer C, Rarity J G, Zeilinger A, Weinfurter H 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 010504

[12] Wu L A, Kimble H J, Hall J H, Wu H F 1986 *Phys. Rev. Lett.* **57** 2520

[13] Wu L A, Xiao M, Kimble H J 1987 *J. Opt. Soc. Am. B* **4** 1465

[14] Peng K C, Pan Q, Wang H, Zhang Y, Su H, Xie C D 1998 *Appl. Phys. B* **66** 755

[15] Breitenbach G, Muler T, Pereira S F, Poizat J P, Schiller S, Mlynek J 1995 *J. Opt. Soc. Am. B* **12** 2304

[16] Lam P K, Ralph T C, Buchler B C, McClelland D E, Bachor H A, Gao J 1999 *J. Opt. B: Quan. Semiclass. Opt.* **1** 469

[17] Takeno Y, Yukawa M, Yonezawa H, Furusawa A 2007 *Opt. Express* **15** 4321

[18] Eberle T, Händchen V, Duhme J, Franz T, Werner R F, Schnabel R 2011 *Phys. Rev. A* **83** 052329

[19] Schiller S, Breitenbach G, Pereira S F, Paschotta R, White A G, Mlynek J 1995 *Proc. SPIE* **2378** 91

[20] Schneider K, Bruchmeier R, Hansen H, Schiller S, Mlynek J 1996 *Opt. Lett.* **21** 1396

[21] Ma H L, Wei D, Ye C G, Zhang J, Peng K C 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3637 (in Chinese) [马红亮, 卫栋, 叶晨光, 张靖, 彭堃堃 2005 物理学报 **54** 3637]

[22] Feng J X, Tian X T, Li Y M, Zhang K S 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 221102

[23] Liu Q, Feng J X, Li H, Jiao Y C, Zhang K S 2012 *Chin. Phys. B* **21** 104204

[24] Mehmet M, Ast S, Eberle T, Steinlechner S, Vahlbruch H, Schnabel R 2011 *Opt. Express* **19** 25763

[25] Wu Z Q, Zhou H J, Wang Y J, Zheng Y H 2013 *Acta Sin. Quan. Opt.* **19** 1 (in Chinese) [邬志强, 周海军, 王雅君, 郑耀辉 2013 量子光学学报 **19** 1]

[26] Black E D 2001 *Am. J. Phys.* **69** 79

[27] Li H, Feng J X, Wan Z J, Zhang K S 2014 *Chin. J. Lasers* **41** 0502003 (in Chinese) [李宏, 冯晋霞, 万振菊, 张宽收 2014 中国激光 **41** 0502003]

[28] Wigner E 1932 *Phys. Rev.* **40** 749

- [29] Fano U 1957 *Rev. Mod. Phys.* **29** 74
 [30] Vogel K, Risken H 1989 *Phys. Rev. A* **40** 2847
 [31] Schiller S, Breitenbach G, Pereira S F, Muller T, Mlynek J 1996 *Phys. Rev. Lett.* **77** 2933
 [32] Lvovsky A I, Hansen H, Aichele T, Benson O, Mlynek J, Schiller S 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 050402
 [33] Ye C G, Zhang J 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6962 (in Chinese) [叶晨光, 张靖 2008 物理学报 **57** 6962]

Generation of bright squeezed light at 1.5 μm telecommunication band and its Wigner function reconstruction*

Sun Zhi-Ni Feng Jin-Xia[†] Wan Zhen-Ju Zhang Kuan-Shou

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

(Received 15 September 2015; revised manuscript received 26 October 2015)

Abstract

The squeezed light at 1.5 μm telecommunication band has been considered as an important resource of continuous variable (CV) practical fiber-based quantum information research because it is the lowest loss in fiber. A bright phase quadrature squeezed light for continuous variable at 1.5 μm is demonstrated from a semi-monolithic degenerate optical parametric amplifier (DOPA) based on a periodically poled KTiOPO_4 (PPKTP) crystal. The laser source is a continuous wave (CW) single-frequency fiber laser at 1.5 μm , which is sent through a ring mode cleaner (MC) as a preliminary spatial and noise filter. And then the main portion of the output from the MC is used for external-enhanced second harmonic generation to obtain a CW single-frequency low noise laser at 780 nm that acts as the pump of the DOPA. The residual light of the output from the MC at 1.5 μm is used as the injected signal light of the DOPA and the local oscillator (LO) of a balanced homodyne detector (BHD) system. The DOPA is built by using a type-I PPKTP crystal and a piezo-actuated output coupler and works in double-resonance case with a threshold power of 230 mW. When the DOPA is operating in the state of amplification, the output down-conversion field should be a bright phase quadrature squeezed light, where the relative phase between the pump and the injected signal is locked to 0. A 4.7 dB bright phase quadrature squeezed light is measured by the BHD system with the pump light of 110 mW and the injected signal of 3 mW, where the relative phase between the down-conversion field and the LO is locked to 0. Our measurement is limited by the optical losses and the detection efficiency. We have taken into account the detection efficiency of 86.6%, and the actual squeezing of the squeezed light being 6.3 dB. Moreover, because it is so crucial a process for CV quantum information system that the transmission and evolution of the CV squeezed states in the fiber may reappear in all information of the quantum states in the phase space, then the bright squeezed light is detected by a BHD system in the time domain, and its Wigner quasi-probability distribution function can be reconstructed by using a quantum tomographic technique. Furthermore, the bright squeezed state at 1.5 μm is an ideal source for fiber-based long-distance quantum information because of its stability and bright mean field.

Keywords: nonlinear optics, bright squeezed light, optical parametric amplifier, Wigner quasi-probability distribution function

PACS: 42.50.Ct

DOI: 10.7498/aps.65.044203

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61227015, 11204167, 61405109) and the Shanxi Scholarship Council, China (Grant No. 2012-003).

[†] Corresponding author. E-mail: fengjx@sxu.edu.cn

ACTA PHYSICA SINICA
Vol. 65, No. 4, February 2016

CONTENTS

REVIEW

- 047201 **Research progress of metal-insulator phase transition mechanism in VO₂**
Luo Ming-Hai Xu Ma-Ji Huang Qi-Wei Li Pai He Yun-Bin

GENERAL

- 040201 **Collapse and evolution of wave field based on a generalized nonlinear Schrödinger equation**
Cui Shao-Yan Lü Xin-Xin Xin Jie
- 040401 **Coherence length and magnetic penetration depth of the s-wave holographic superconductor model in Lifshitz spacetime**
Yang Zhuo-Qun Wu Ya-Bo Lu Jun-Wang Zhang Cheng-Yuan Zhang Xue
- 040501 **Imaging through dynamic scattering media with compressed sensing**
Zhuang Jia-Yan Chen Qian He Wei-Ji Mao Tian-Yi
- 040502 **Auto-adjust lag particle filter smoothing algorithm for non-linear state estimation**
Yang Wei-Ming Zhao Mei-Rong

THE PHYSICS OF ELEMENTARY PARTICLES AND FIELDS

- 041201 **Different time regularization of the Breit quark potential and the mass splittings of η_c -J/ ψ and other mesons**
Jirimutu Aodeng Bao tmurbagan

ATOMIC AND MOLECULAR PHYSICS

- 043701 **One-dimensional far-detuned optical lattice realized with a multimode 1064 nm laser**
Yuan Yuan Lu Xiao-Gang Bai Jin-Hai Li Jian-Jun Wu Ling-An Fu Pan-Ming Wang Ru-Quan Zuo Zhan-Chun

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

- 044101 **An analytical model for shielding effectiveness of double layer rectangular enclosure with inner strip-shaped metallic plate**
Hao Jian-Hong Gong Yan-Fei Fan Jie-Qing Jiang Lu-Hang
- 044102 **An analytic approach for density gradient injection in laser wake field acceleration**
Wang Tong Wang Xiao-Fang
- 044103 **Effects of a partially coherent beam on periodic bottle beam**
Zhu Qing-Zhi Shen Dong-Hui Wu Feng-Tie He Xi
- 044201 **Design of broadband reflective 90° polarization rotator based on metamaterial**
Han Jiang-Feng Cao Xiang-Yu Gao Jun Li Si-Jia Zhang Chen

(Continued)

- 044202 **The focused vectorial fields with ultra-long depth of focus generated by the tunable complex filter**
Wang Ji-Ming He Chong-Jun Liu You-Wen Yang Feng Tian Wei Wu Tong
- 044203 **Generation of bright squeezed light at 1.5 μm telecommunication band and its Wigner function reconstruction**
Sun Zhi-Ni Feng Jin-Xia Wan Zhen-Ju Zhang Kuan-Shou
- 044204 **An optoelectronic oscillator based on series resonance cavity**
Huang Gang-Bin Wang Ju Wang Wen-Rui Jia Shi Yu Jin-Long
- 044205 **Quantum phase transition in arrays of dissipative cavities with two-photon process**
Xiong Fang Feng Xiao-Qiang Tan Lei
- 044206 **Theoretical study on generating mid-infrared ultrashort pulse in mode-locked Er^{3+} :ZBLAN fiber laser**
Wang Shao-Qi Deng Ying Zhang Yong-Liang Li Chao Wang Fang Kang Min-Qiang Luo Yun Xue Hai-Tao Hu Dong-Xia Su Jing-Qin Zheng Kui-Xing Zhu Qi-Hua
- 044207 **Theoretical investigation of impedance matching in the process of sum-frequency generation in an external resonator**
Yan Xiao-Juan Ma Wei-Guang Tan Wei
- 044208 **Performance of Yb-doped silicate glass with thermal bleaching**
Xiong Zhong-Long Wu Yan Jing Rui-Ping Ma Chong Long Wei-Hui Zhang Chao-Jun Cheng Yong-Jin
- 044209 **Effect of thermal annealing on damage growth of mitigated site on fused silica**
Jiang Yong Yuan Xiao-Dong Wang Hai-Jun Liao Wei Liu Chun-Ming Xiang Xia Qiu Rong Zhou Qiang Gao Xiang Yang Yong-Jia Zheng Wan-Guo Zu Xiao-Tao Miao Xin-Xiang
- 044210 **Multi-resolution intrusion localization algorithm through cepstrum in distributed fiber optic Sagnac interferometer**
Pi Shao-Hua Wang Bing-Jie Zhao Dong Jia Bo
- 044211 **Measurement of standard vacuum noise at low frequencies**
Xue Jia Qin Ji-Liang Zhang Yu-Chi Li Gang Zhang Peng-Fei Zhang Tian-Cai Peng Kun-Chi
- 044301 **Semi-Dirac cone and singular features of two-dimensional three-component phononic crystals**
Gao Han-Feng Zhang Xin Wu Fu-Gen Yao Yuan-Wei
- 044302 **Direct-sequence spread-spectrum underwater acoustic communication based on single vector differential energy detector**
Yin Jing-Wei Du Peng-Yu Zhang Xiao Zhu Guang-Ping
- 044303 **Broadband acoustic focusing effect based on temperature gradient distribution**
Liu Chen Sun Hong-Xiang Yuan Shou-Qi Xia Jian-Ping
- 044304 **Velocity analysis for collapsing cavitation bubble near a rigid wall under an ultrasound field**
Guo Ce Zhu Xi-Jing Wang Jian-Qing Ye Lin-Zheng

(Continued)

044305 **A controllable circular ring acoustic focused field**

Zheng Li Guo Jian-Zhong

PHYSICS OF GASES, PLASMAS, AND ELECTRIC DISCHARGES

045201 **Ion extraction experiment for electron cyclotron resonance ion source with different magnetic topology**

Jin Yi-Zhou Yang Juan Feng Bing-Bing Luo Li-Tao Tang Ming-Jie

045202 **Comparative study on intense emission of velvet and carbon nanotube cathode**

Cai Dan Liu Lie Ju Jin-Chuan Wang Hai-Tao Zhao Xue-Long Wang Xiao

045203 **Optimization design of laser X-ray radiography for density diagnosis in compressed matter**

Zhang Tian-Kui Han Dan Wu Yu-Chi Yan Yong-Hong Zhao Zong-Qing Gu Yu-Qiu

CONDENSED MATTER: STRUCTURAL, MECHANICAL, AND THERMAL PROPERTIES

046101 **Research on viscoelastic behavior and rheological constitutive parameters of metallic glasses based on fractional-differential rheological model**

Xu Fu Li Ke-Feng Deng Xu-Hui Zhang Ping Long Zhi-Lin

046102 **Impurity concentration effects on the structures, ductile and electronic properties of Zr-doped gamma-TiAl alloys**

Song Qing-Gong Qin Guo-Shun Yang Bao-Bao Jiang Qing-Jie Hu Xue-Lan

046201 **Refractive index of Z-cut quartz under magnetically driven quasi-isentropic compression**

Zhang Xu-Ping Luo Bin-Qiang Chong Tao Wang Gui-Ji Tan Fu-Li Zhao Jian-Heng Sun Cheng-Wei Liu Cang-Li

046801 **Thermal effect of translucent gold nanofilm based on transient reflection/transmission technique**

Wu Wen-Zhi Gao Lai-Xu Kong De-Gui Gao Yang Ran Ling-Ling Chai Zhi-Jun

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

047501 **Vortex pattern in three-dimensional mesoscopic superconducting rings**

Shi Liang-Ma Zhou Ming-Jian Zhang Qing-Qing Zhang Hong-Bin

047701 **Research on surface potential decay characteristics of epoxy resin charged by direct current corona**

Ru Jia-Sheng Min Dao-Min Zhang Chong Li Sheng-Tao Xing Zhao-Liang Li Guo-Chang

047801 **Study on the electro-optic modulation properties of graphene-coated hollow optical fiber**

Bi Wei-Hong Wang Yuan-Yuan Fu Guang-Wei Wang Xiao-Yu Li Cai-Li

047802 **Inelastic neutron scattering and *ab initio* studies of cyclotrimethylenetrinitramine**

Liu Ben-Qiong Song Jian-Ming Zhang Wei-Bin Luo Wei Wang Yan Xia Yuan-Hua Zong He-Hou Gao Guo-Fang Sun Guang-Ai

(Continued)

047901 **Global threshold analysis of multicarrier multipactor based on the critical density of electrons**

*Wang Xin-Bo Li Yong-Dong Cui Wan-Zhao Li Yun Zhang Hong-Tai Zhang Xiao-Ning
Liu Chun-Liang*

047902 **Thickness-dependent electronic structure of the interface of 2,7-dioctyl[1] benzothieno [3,2-b][1] benzothiophene/Ni(100)**

*Zhang Hong Niu Dong-Mei Lü Lu Xie Hai-Peng Zhang Yu-He Liu Peng Huang Han
Gao Yong-Li*

INTERDISCIPLINARY PHYSICS AND RELATED AREAS OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

048101 **Diameter monodispersity of imogolite-like nanotube: a density functional theory study**

Wang Ya-Jing Li Gui-Xia Wang Zhi-Hua Gong Li-Ji Wang Xiu-Fang

048102 **Influences of Ga content on the structure and magnetic properties of $Mn_{2-x}NiGa_{1+x}$ alloys**

Liu Hong-Yan Liu Zhu-Hong Li Ge-Tian Ma Xing-Qiao

048401 **Modeling and analysis of eddy-current loss of underwater contact-less power transmission system based on magnetic coupled resonance**

Zhang Ke-Han Yan Long-Bin Yan Zheng-Chao Wen Hai-Bing Song Bao-Wei

048701 **Influence of pupil on the laser beam shaping system by pure phase modulation**

He Jie-Ling Wei Ling Yang Jin-Sheng Li Xi-Qi He Yi Zhang Yu-Dong

048801 **Sauna-like process prepared periodic molybdenum metal catalytic electrodes and their applications in water reduction**

*He Rui-Xia Liu Bo-Fei Liang Jun-Hui Gao Hai-Bo Wang Ning Zhang Qi-Xing
Zhang De-Kun Wei Chang-Chun Xu Sheng-Zhi Wang Guang-Cai Zhao Ying
Zhang Xiao-Dan*

GEOFYSICS, ASTRONOMY, AND ASTROPHYSICS

049701 **Detail investigation of the inclined pressure structure and gravity darkening in critical rotating star Achernar**

Tai Li-Ting Song Han-Feng Wang Jiang-Tao

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)

2016 年 2 月 第 65 卷 第 4 期

版 权 所 有

ACTA PHYSICA SINICA

(Semimonthly, First Published in 1933)

Vol. 65 No. 4 February 2016

© 2016 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