

音频段  $1.34 \mu\text{m}$  压缩态光场的实验制备

冯晋霞 杜京师 靳晓丽 李渊骥 张宽收

Generation of audio-band frequency squeezed light at  $1.34 \mu\text{m}$

Feng Jin-Xia Du Jing-Shi Jin Xiao-Li Li Yuan-Ji Zhang Kuan-Shou

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 174203 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180301

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180301>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I17>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[光和原子关联与量子计量](#)

Quantum metrology with atom and light correlation

物理学报.2018, 67(16): 164200 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180895>

[铷原子D1线真空压缩光场的产生及态重构](#)

Generation and quantum state reconstruction of a squeezed vacuum light field resonant on the rubidium D1 line

物理学报.2018, 67(9): 094204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172396>

[连续变量纠缠态光场在光纤中传输特性的实验研究](#)

Experimental investigation of transmission characteristics of continuous variable entangled state over optical fibers

物理学报.2018, 67(2): 024203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20171542>

[连续变量  \$1.34 \mu\text{m}\$  量子纠缠态光场的实验制备](#)

Continuous variable quantum entanglement at  $1.34 \mu\text{m}$

物理学报.2017, 66(24): 244205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.244205>

[量子相空间分布函数与压缩相干态表示间的变换关系](#)

Transform relations between squeezed coherent state representation and quantum phase space distribution functions

物理学报.2015, 64(2): 024207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024207>

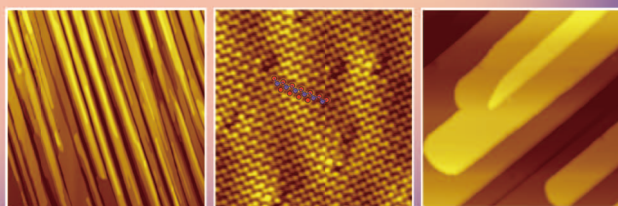
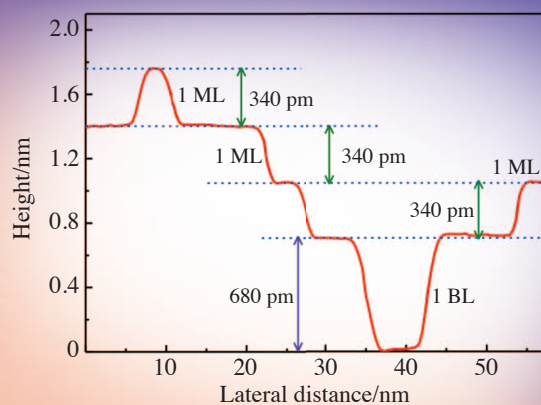
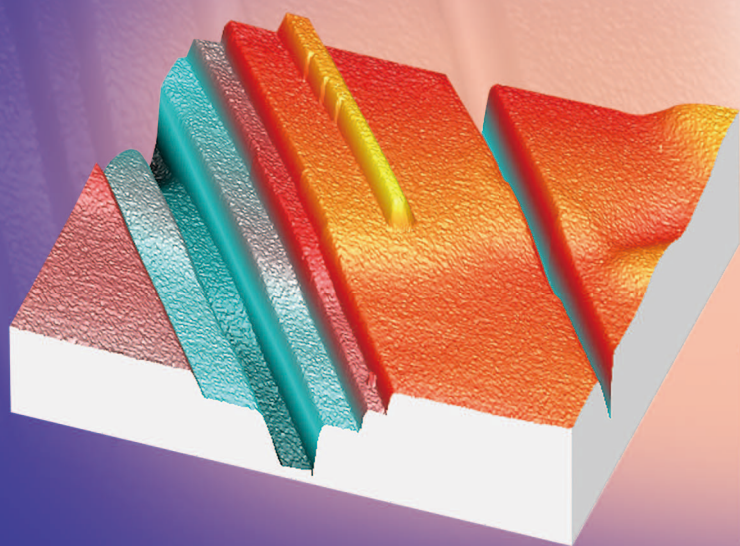
ISSN 1000-3290

# 物理学报

Acta Physica Sinica

2018年 第67卷 第17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 67 卷 第 17 期 2018 年 9 月

## 目 次

### 青年科学评述

- 177401 铁基超导 1111 体系  $\text{CaFeAsF}$  的单晶生长和物性研究 ..... 牟刚 马永辉

### 综述

- 178701 荧光寿命显微成像技术及应用的最新研究进展 .....  
..... 刘雄波 林丹樱 吴茜茜 严伟 罗腾 杨志刚 屈军乐

### 总论

- 170201 电极感应熔化雾化制粉技术中非限制式喷嘴雾化过程模拟 ..... 夏敏 汪鹏 张晓虎 葛昌纯  
170301 用不变本征算符法求晶面吸附原子的振动模 ..... 张科 范承玉 范洪义  
170302  $\Lambda$  型三能级原子与两个谐振器的量子相位门 ..... 刘超 邬云文  
170501 在兴奋-抑制混沌神经网络中有序波的自发形成 ..... 汪芄 李倩昀 黄志精 唐国宁  
170701  $\text{Bi}(110)$  薄膜在  $\text{NbSe}_2$  衬底上的扫描隧道显微镜研究 .....  
..... 刘建宇 孙昊桦 管丹丹 李耀义 王世勇 刘灿华 郑浩 贾金锋

### 核物理学

- 172801 墙壁反射中子对脉冲堆波形的影响 ..... 高辉 宋凌莉 李兵  
172802 非齐次燃耗方程数值解法 ..... 付元光 邓力 李刚

### 原子和分子物理学

- 173201 洞态 Ar 原子  $K_\alpha$  和  $K_\beta$  伴线和超伴线的理论计算 ... 马堃 焦铮 蒋峰建 叶剑锋 吕海江 陈展斌

### 电磁学、光学、声学、传热学、经典力学和流体动力学

- 174101 高温等离子体中太赫兹波的传输特性 ..... 孟令辉 任洪波 刘建晓  
174201 基于受激辐射信号的谱域光学相干层析分子成像方法 .....  
..... 胡喆皓 上官紫微 邱建榕 杨珊珊 鲍文 沈毅 李鹏 丁志华  
174202 用于大景深单分子定位显微的多功能全息相位片的设计及数值模拟 .....  
..... 李四维 吴晶晶 张赛文 李恒 陈丹妮 于斌 屈军乐  
174203 音频段  $1.34 \mu\text{m}$  压缩态光场的实验制备 ..... 冯晋霞 杜京师 靳晓丽 李渊骥 张宽收  
174204 数值模拟抽运分布对端泵激光器晶体热透镜球差的影响 .....  
..... 姚强强 王启晗 冯池 陈思 金光勇 董渊

- 174205 飞秒平顶光束经微透镜阵列在熔融石英中的成丝及其超连续辐射 ..... 周宁 张兰芝 李东伟 常峻巍 王毕艺 汤磊 林景全 郝作强  
 ..... 周宁 张兰芝 李东伟 常峻巍 王毕艺 汤磊 林景全 郝作强
- 174206 用于超快束匀滑的动态波前调控新方案 ..... 李腾飞 钟哲强 张彬
- 174301 丛聚的含气泡水对线性声传播的影响 ..... 范雨喆 陈宝伟 李海森 徐超
- 174302 基于简正波分解的不同阵列匹配场定位性能分析 ..... 贾雨晴 苏林 郭圣明 马力
- 174701 高超声速条件下7°直圆锥边界层转捩实验研究 ..... 刘小林 易仕和 牛海波 陆小革 赵鑫海
- 174702 高速飞行器磁控阻力特性 ..... 姚霄 刘伟强 谭建国

### 气体、等离子体和放电物理

- 175201 诱导空间非相干束匀滑技术的近区特性及改善技术 ..... 李福建 高妍琦 赵晓晖 季来林 王伟 黄秀光 马伟新 隋展 裴文兵  
 ..... 李福建 高妍琦 赵晓晖 季来林 王伟 黄秀光 马伟新 隋展 裴文兵

### 凝聚物质:结构、力学和热学性质

- 176101 金红石TiO<sub>2</sub>中本征缺陷扩散性质的第一性原理计算 ..... 刘汝霖 方粮 郝跃 池雅庆
- 176102 30 keV He<sup>2+</sup>在不同倾斜角度的聚碳酸酯微孔膜中的传输过程 ..... 牛书通 周旺 潘鹏 朱炳辉 宋涵宇 邵剑雄 陈熙萌  
 ..... 牛书通 周旺 潘鹏 朱炳辉 宋涵宇 邵剑雄 陈熙萌
- 176701 一种可用于极化<sup>3</sup>He实验的新型磁场系统 ..... 王文钊 胡碧涛 郑皓 屠小青 高朋林 闫松 郭文传 闫海洋  
 ..... 王文钊 胡碧涛 郑皓 屠小青 高朋林 闫松 郭文传 闫海洋
- 176801 电场对协流式微流控装置中乳液液滴生成行为的调控机理 ..... 李蕾 张程宾

### 凝聚物质:电子结构、电学、磁学和光学性质

- 177201 电触发二氧化钒纳米线发生金属-绝缘体转变的机理 ..... 王泽霖 张振华 赵喆 邵瑞文 隋曼龄
- 177202 Ni/Au/n-GaN肖特基二极管可导位错的电学模型 ..... 王翔 陈雷雷 曹艳荣 羊群思 朱培敏 杨国锋 王福学 闫大为 顾晓峰  
 ..... 王翔 陈雷雷 曹艳荣 羊群思 朱培敏 杨国锋 王福学 闫大为 顾晓峰
- 177501 空心Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>纳米微球的制备及超顺磁性 ..... 李文宇 霍格 黄岩 董丽娟 卢学刚
- 177502 具有倾斜极化层的自旋阀结构中磁翻转以及磁振荡模式的微磁模拟 ..... 吕刚 张红 侯志伟
- 177801 氢化杂质和厚度效应对高斯势量子点中二能级体系量子跃迁的影响 ..... 白旭芳 赵玉伟 尹洪武 额尔敦朝鲁  
 ..... 白旭芳 赵玉伟 尹洪武 额尔敦朝鲁
- 177802 后退火处理对铟锡氧化物表面等离激元共振特性的影响 ..... 蒋行 周玉荣 刘丰珍 周玉琴
- 177901 微米量级表面结构形貌特性对二次电子发射抑制的优化 ..... 胡晶 曹猛 李永东 林舒 夏宁
- 177902 二次电子倍增对射频平板腔建场过程的影响 ..... 董焱 刘庆想 庞健 周海京 董志伟

### 物理学交叉学科及有关科学技术领域

- 178101 La<sub>65</sub>X<sub>35</sub> (X =Ni, Al)非晶合金原子结构的第一性原理研究 ..... 刘琪 管鹏飞
- 178102 一种新的基于频域有限差分方法的小周期有机太阳能电池的光电特性 ..... 孙龙 任昊 冯大政 王石语 邢孟道  
 ..... 孙龙 任昊 冯大政 王石语 邢孟道
- 178103 基于表面磁感应强度的铁磁构件应力恒磁表征方法 ..... 邓东阁 左苏 武新军

178501 基于脉冲方法的超短栅长 GaN 基高电子迁移率晶体管陷阱效应机理 .....  
周幸叶 吕元杰 谭鑫 王元刚 宋旭波 何泽召 张志荣 刘庆彬 韩婷婷 房玉龙 冯志红

### 地球物理学、天文学和天体物理学

179501 量子纠缠与宇宙学弗里德曼方程 ..... 王灿灿

文章图片的彩色效果详见网刊



扫码阅读  
电子版

# 音频段 1.34 $\mu\text{m}$ 压缩态光场的实验制备\*

冯晋霞<sup>1)2)</sup> 杜京师<sup>1)</sup> 靳晓丽<sup>1)2)</sup> 李渊骥<sup>1)2)</sup> 张宽收<sup>1)2)†</sup>

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)

(2018年2月6日收到; 2018年4月18日收到修改稿)

音频段压缩态光场是进行连续变量量子精密测量重要的量子资源. 本文利用自制的低噪声连续单频 671 nm/1.34  $\mu\text{m}$  双波长激光器作为抽运源, 抽运基于周期极化磷酸氧钛钾晶体的简并光学参量振荡器, 进行了光通信波段 1.34  $\mu\text{m}$  连续变量音频段真空压缩态光场的实验制备. 当简并光学参量振荡器运转于阈值以下参量反放大状态时, 抽运光场功率为 95 mW, 本地振荡光功率为 60  $\mu\text{W}$  时, 在分析频率 8—100 kHz 范围内研制出 1.34  $\mu\text{m}$  真空压缩态光场. 在分析频率 36 kHz 处, 压缩态光场的最大压缩度达 5.0 dB; 在音频频率 8 kHz 处, 压缩态光场的压缩度达 3.0 dB. 音频段 1.34  $\mu\text{m}$  压缩态光场可用于实现基于光纤的量子精密测量.

**关键词:** 量子光学, 音频段压缩态光场, 简并光学参量振荡器, 1.34  $\mu\text{m}$  光通信波段

**PACS:** 42.50.-p

**DOI:** 10.7498/aps.67.20180301

## 1 引言

压缩态光场是连续变量量子信息科学研究中的重要资源, 可广泛地应用于连续变量量子信息处理、量子计算以及量子精密测量等领域<sup>[1-3]</sup>. 三十多年来, 世界各国相关研究组进行了一系列压缩态光场制备的理论和实验研究, 并取得了突破性进展<sup>[4-7]</sup>, 目前压缩态光场最高压缩度可达 15 dB<sup>[8]</sup>. 然而大部分工作集中在兆赫兹量级高频段压缩态光场的制备. 近年来, 音频段压缩态光场不仅可以用于填补基于激光干涉仪的引力波探测器的真空通道、提高其探测灵敏度<sup>[9,10]</sup>, 也可以用于低频磁场测量<sup>[11]</sup> 以及生物粒子位移测量等<sup>[12]</sup>, 人们对音频段压缩态光场日益关注. 然而, 随着压缩态光场的分析频率从高频段降低至音频段, 环境中存在的寄生干涉、散射、光学元件的机械振动等音频噪声对压缩度的限制突显出来, 获得音频段压缩态光场相对困难. 2004年, 澳大利亚国立大学 McKenize 等<sup>[13]</sup> 首次获得了音频段

(280 Hz—100 kHz) 1.06  $\mu\text{m}$  压缩态光场. 2012年, 德国汉诺威大学 Stefszky 等<sup>[14]</sup> 获得了音频段(低至 10 Hz) 1.06  $\mu\text{m}$  压缩态光场. 国内华东师范大学研究人员于 2011 年利用四波混频的方法获得了音频段 (1.5 kHz) 795 nm 强度差压缩态光场<sup>[15]</sup>. 山西大学光电研究所分别获得了音频段(分别为 15.2 和 3 kHz) 1.06  $\mu\text{m}$  和 1.08  $\mu\text{m}$  的压缩态光场<sup>[16-18]</sup>. 中心波长分别为 1.5  $\mu\text{m}$  和 1.3  $\mu\text{m}$  的光通信波段压缩态光场, 由于在光纤中的传输损耗较低, 可最大程度地保留其量子特性不受破坏. 山西大学光电研究所已实验制备出音频段 (5 kHz) 1.5  $\mu\text{m}$  压缩态光场<sup>[19]</sup>. 尽管 1.5  $\mu\text{m}$  波段光场在光纤传输中吸收损耗较 1.3  $\mu\text{m}$  波段小, 但是 1.3  $\mu\text{m}$  的光场在光纤中传输时具有更小的色散效应, 大的色散效应会增加光场的位相噪声从而降低光场的压缩度<sup>[20]</sup>. 而且由于激光晶体材料的原因, 1.3  $\mu\text{m}$  全固态激光器的研制较 1.5  $\mu\text{m}$  激光器相对容易<sup>[21,22]</sup>, 有利于制备的音频段压缩态光场的实际应用. 目前, 有关 1.3  $\mu\text{m}$  波段压缩态光场的研究都集中在高频

\* 国家重点研发计划 (批准号: 2016YFA0301401) 和山西省“1331 工程”重点学科建设计划 (批准号: 1331KSC) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: kuanshou@sxu.edu.cn

段 [23,24], 因此研制音频段 1.3 μm 压缩态光场非常必要.

本文利用自制的 671 nm/1.34 μm 双波长连续单频激光器抽运基于周期极化磷酸氧钛钾 (periodically poled KTiOPO<sub>4</sub>, PPKTP) 晶体的半整块结构简并光学参量振荡器 (degenerate optical parametric oscillator, DOPO), 进行了音频段 1.34 μm 真空压缩态光场的实验制备. 在利用模式清洁器 (mode cleaners, MC) 降低抽运激光和本底振荡 (local oscillator, LO) 光的额外噪声、优化平衡零拍探测系统的 LO 光功率的基础上, 利用低于阈值运转的 DOPO 实验产生了音频段 1.34 μm 真空压缩态光场.

## 2 理论分析

当 DOPO 低于阈值运转时输出的场为真空压缩态光场, 其压缩噪声起伏可表示为 [25]

$$V^+(\Omega) = 1 - 4\eta_{\text{esc}}\eta_{\text{det}}\eta_{\text{prop}}\eta_{\text{hom}} \times \frac{\sqrt{P/P_{\text{th}}}}{(1 - \sqrt{P/P_{\text{th}}})^2 + 4\Omega^2}, \quad (1)$$

其中  $\eta_{\text{esc}} = T/(T + L)$  为 DOPO 腔的逃逸效率;  $T$  和  $L$  分别为 DOPO 腔输出耦合镜的透射率和内腔损耗;  $\eta_{\text{det}}$ ,  $\eta_{\text{prop}}$ ,  $\eta_{\text{hom}}$  分别为光电二极管的量子效率、光路传播效率、平衡零拍探测效率;  $\eta_{\text{hom}}$  为平衡零拍系统干涉可见度的平方;  $P$ ,  $P_{\text{th}}$  分别为 DOPO 腔的抽运功率和阈值功率;  $\Omega$  与 DOPO 腔腔内光场衰减速率  $\gamma$  以及测量时的分析频率  $\omega$  有关,  $\Omega = \omega/\gamma$ ,  $\gamma = c(T + L)/l$ ,  $c$  为光速,  $l$  为 DOPO 腔的腔长.

由于在低频段本底光的额外噪声远高于散粒噪声基准 (shot noise level, SNL), 因此在低频真空压缩态光场的测量过程中不仅要考虑系统的各种损耗等对真空压缩态光场的产生和测量过程的影响, 还要考虑在平衡零拍测量过程中本底光的额外噪声以及探测器的共模抑制比 (common mode rejection ratio, CMRR) 对真空压缩态光场探测的影响. 考虑本底光的额外噪声  $V_{\text{loc}}$  和探测器的共模抑制比  $R_{\text{CMRR}}$  对低频真空压缩态光场测量的影响后, 测量的真空压缩态光场的噪声起伏可表示为 [26]

$$V_{\text{mea}}(\Omega) = \frac{(1 + G)^2 + V_{\text{loc}}(1 - G)^2}{V^+(\Omega)(1 + G)^2 + V_{\text{loc}}(1 - G)^2}, \quad (2)$$

其中  $G = \frac{2 \times 10^{R_{\text{CMRR}}/20} - 1}{2 \times 10^{R_{\text{CMRR}}/20} + 1}$  表示和共模抑制比相关的不平衡因子项.

根据具体实验系统的参数, 理论计算不同本底光的额外噪声  $V_{\text{loc}}$  和探测器的共模抑制比  $R_{\text{CMRR}}$  对低频真空压缩态光场测量的影响, 结果如图 1 所示. 其中  $\eta_{\text{esc}} = 0.972$ ,  $\eta_{\text{det}} = 0.9$ ,  $\eta_{\text{prop}} = 0.98$ ,  $\eta_{\text{hom}} = 0.992$ ; DOPO 腔的抽运功率和阈值功率  $P$ ,  $P_{\text{th}}$  分别为 95 mW 和 450 mW; DOPO 腔的腔长  $l = 33$  mm; 分析频率  $\omega$  分别选取了 5 MHz, 36 kHz 和 8 kHz. 图 1 中虚线 (i), (iii), (v) 是分析频率分别为 5 MHz, 36 kHz 和 8 kHz 时通过 (1) 式计算得到的结果, 计算时没有考虑探测过程中本底光的额外噪声  $V_{\text{loc}}$  和探测器的共模抑制比  $R_{\text{CMRR}}$  对压缩度测量的影响. 图 1 中实线 (ii), (iv), (vi) 是分析频率分别为 5 MHz, 36 kHz 和 8 kHz 时通过 (2) 式计算得到的结果, 计算时考虑了探测过程中  $V_{\text{loc}}$  和  $R_{\text{CMRR}}$  对压缩度测量的影响. 由曲线 (ii) 可以看出, 即使本底光为相干光, 当  $R_{\text{CMRR}}$  小于 20 dB 时,  $R_{\text{CMRR}}$  对测量结果仍有影响. 由曲线 (iv) 可以看出, 由于本底光的强度噪声起伏高于散粒噪声基准 23 dB, 只有当  $R_{\text{CMRR}}$  高于 40 dB 才可以避免其对测量结果的影响. 曲线 (v) 和曲线 (vi) 的分析频率为 8 kHz, 由曲线 (vi) 可以看出, 由于本底光的强度噪声起伏高于散粒噪声基准达 35 dB, 只有当  $R_{\text{CMRR}}$  高于 55 dB 时才可以避免其对测量结果的影响. 由上述理论计算和分析可以看出, 在低频真空压缩态光场的测量过程中, 通过降低本底光的额外噪声或者提高探测器的  $R_{\text{CMRR}}$  均可以提高实际测量的压缩度.

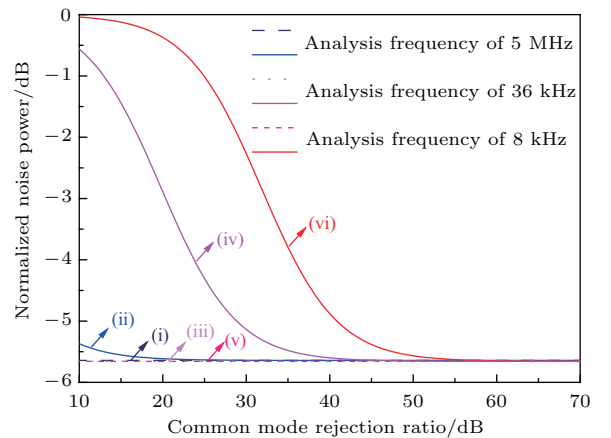


图 1 测量的真空压缩态光场噪声起伏谱随  $R_{\text{CMRR}}$  的变化  
Fig. 1. Measured noise power spectra of squeezed light dependence on the  $R_{\text{CMRR}}$ .

### 3 实验装置

音频段  $1.34 \mu\text{m}$  真空压缩态光场产生的实验装置如图 2 所示. 激光光源为自行研制的全固态高功率、低噪声连续单频  $671 \text{ nm}/1.34 \mu\text{m}$  双波长激光器 [27], 最大输出功率分别为  $1.5 \text{ W}$  ( $671 \text{ nm}$ ) 和  $1.3 \text{ W}$  ( $1.34 \mu\text{m}$ ), 功率稳定性均优于  $\pm 0.6\%$  ( $4 \text{ h}$ ). 激光器输出的双波长激光经过双色镜 (dichroic beam splitter, DBS) 后,  $1.34 \mu\text{m}$  激光全部反射,  $671 \text{ nm}$  激光全部透射.  $1.34 \mu\text{m}$  激光经过反射率为  $1\%$  的分束器 (beam splitter, BS) 分束, 反射的  $1.34 \mu\text{m}$  激光注入到扫描共焦法布里-珀罗干涉仪 (Fabry-Perot interferometer, FPI) 用于监视激光器的纵模模式.  $671 \text{ nm}$  激光和  $1.34 \mu\text{m}$  激光分别注入 MC 用于降低激光的额外噪声, MC 均为无源的三镜环形谐振腔. MC1 用于降低  $1.34 \mu\text{m}$  激光的额外噪声, MC2 用于降低  $671 \text{ nm}$  激光的额外噪声. 实验中采用 Pound-Drever-Hall (PDH) 稳频技术将 MC1 和 MC2 的腔长锁定在注入激光的共振频率处. 电光调制器 (electro-optic modulator, EOM) 为激光加载高频调制信号, 用于 MC1 和 MC2 腔长的锁定系统. 光学隔离器 (optical isolator, OI) 用于抑制光学元件表面的剩余反射激光反馈回激光器, 以保持激光器的稳定单频运转. 经过 MC1 降低额外噪声的  $1.34 \mu\text{m}$  激光分成两束, 一束作为 DOPO 腔的参考光用于辅助调节 DOPO 腔的模式匹配和经典增益, 另一束作为平衡零拍探测系统的 LO 光. 经过 MC2 降低额外噪声的  $671 \text{ nm}$  激光作为 DOPO 腔的抽运光.

DOPO 腔是由 I 类相位匹配的 PPKTP 晶体和曲率半径为  $25 \text{ mm}$  的凹面镜组成的半整块结构两镜驻波腔. PPKTP 晶体的尺寸为  $1 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ , 晶体的一个端面加工为曲率半径为  $12 \text{ mm}$  的凸面, 表面镀参考光和抽运光的高反膜 ( $R_{1.34 \mu\text{m}} > 99.9\%$ ,  $R_{671 \text{ nm}} > 99.9\%$ ), 参考光由此端面耦合进入 DOPO 腔; PPKTP 晶体的另一端面镀参考光和抽运光的减反膜 ( $R_{1.34 \mu\text{m}} < 0.1\%$ ,  $R_{671 \text{ nm}} < 0.2\%$ ). 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. 凹面镜作为 DOPO 腔的输入输出镜, 其凹面镀参考光和抽运光的部分反射膜 ( $T_{1.34 \mu\text{m}} = 13\%$ ,  $R_{671 \text{ nm}} < 20\%$ ), 其背面镀参考光和抽运光的减反膜 ( $R_{1.34 \mu\text{m}} < 0.1\%$ ,  $R_{671 \text{ nm}} < 0.2\%$ ). 根据镀膜参数可得到 DOPO 腔的内腔损耗约为  $0.37\%$ , 逃逸效率为  $97.2\%$ . DOPO 腔的输出耦合镜固定在压电陶瓷 (piezoelectric ceramic transducer, PZT) 上, 通过反馈伺服系统推动 PZT2 精确控制 DOPO 的腔长.

实验中 DOPO 处于双共振状态, 下转换光在腔内共振, 抽运光在腔内双次穿过晶体. 当注入  $1.34 \mu\text{m}$  参考光时, 通过高压放大器输出的电压推动 PZT1 来精确控制参考光与抽运光的相对相位, 相对相位为  $0$  时 DOPO 变成一个简并光学参量放大器 (degenerate optical parametric amplifier, DOPA). DOPA 的经典增益达到最佳时, DOPO 也相应地运转于最佳状态. 将参考光功率降至  $\text{nW}$  量级, 然后采用高增益探测器提取由隔离器反射端口输出、携带 DOPO 腔信号的反射光, 采用 PDH

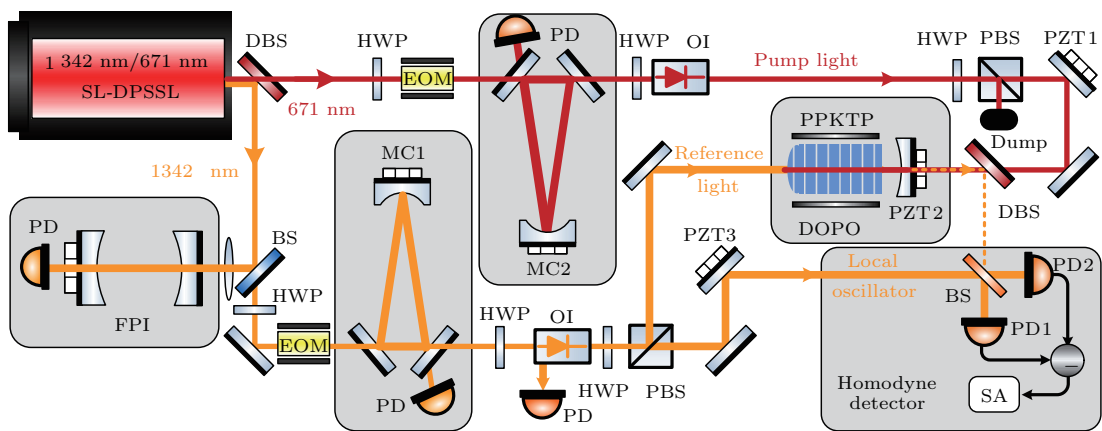


图2 研制音频段  $1.34 \mu\text{m}$  压缩态光场实验装置

Fig. 2. Experimental setup for generation of audio-band frequencies squeezed states at  $1.34 \mu\text{m}$ .



技术锁定 DOPO 腔的腔长. 当 DOPO 腔运转于阈值以下时, 输出的下转换场为真空场. 利用平衡零拍探测系统测量 DOPO 腔输出下转换场的噪声功率. 被测的下转换光场和 LO 光在 50/50 BS 上耦合, 它们的相对相位通过固定在平面镜的压电陶瓷 PZT3 来控制. 经过 50/50 BS 的两束光分别进入两个低噪声高增益光电探测器 (PD1 和 PD2), 两光电流信号经过减法器后进入频谱分析仪 (spectrum analyzer, SA). 探测器为自制的低频段低噪声高增益探测器 (共模抑制比为 67 dB@15—50 kHz, 增益为 200 kV/A). 光电二极管由 Fermionics Opto-Technology 公司生产, 型号为 FD500, 在 1342 nm 波段的量子效率为 90%.

#### 4 实验结果与分析

在音频段压缩态光场的制备过程中, 激光光源的噪声特性非常关键. 虽然真空压缩态光场理论上不会受到抽运光额外噪声的影响, 但 LO 光额外噪声在真空压缩态光场平衡零拍探测过程中不容忽视. 因此实验中首先研究了 1.34  $\mu\text{m}$  LO 光经过 MC1 过滤后的噪声特性以及对后续测量过程的影响, 结果如图 3 所示. 图 3 (a) 中的曲线 (i) 为电子学噪声 (electronic noise level, ENL), 即平衡零拍探测器没有光电流注入时的暗噪声. 曲线 (ii)—(iv) 分别是 LO 光功率为 4, 60 和 570  $\mu\text{W}$  时所对应的 SNL. SNL 由挡住真空压缩态光场输入端时平衡零拍探测系统两个探测器光电流相减得到. 从图中可以看出, 当 LO 功率为 4, 60 和 570  $\mu\text{W}$  时, 在分析频率 2—100 kHz 范围内, SNL 分别比 ENL 高 10, 20 和 30 dB. 实验中选用 LO 功率为 60  $\mu\text{W}$ , 此时电子学噪声的影响已可忽略不计. 但继续增加 LO 光功率, 其额外噪声会影响音频段真空压缩态的探测. LO 光的强度噪声在分析频率 1.0 MHz 处达到 SNL [27], 在分析频率为 kHz 量级甚至更低时, LO 光的额外噪声高于 SNL. LO 光注入平衡零拍探测器相减后能否作为 SNL 受其额外强度噪声以及平衡零拍探测器共模抑制比限制. 图 3 (b) 中的曲线 (i)—(iii) 分别是 ENL, LO 功率为 60  $\mu\text{W}$  时所对应的 SNL 和强度噪声. 可以看出, 在分析频率 1—100 kHz 范围内 LO 光的强度噪声高于 SNL 约 20—40 dB. 考虑到探测器的共模抑制比为 67 dB, LO 光经过平衡零拍探测器相减后的噪声功率可以

作为 SNL. 同时采用相同功率的白光场对探测器的 SNL 进行校准, 两条 SNL 重合.

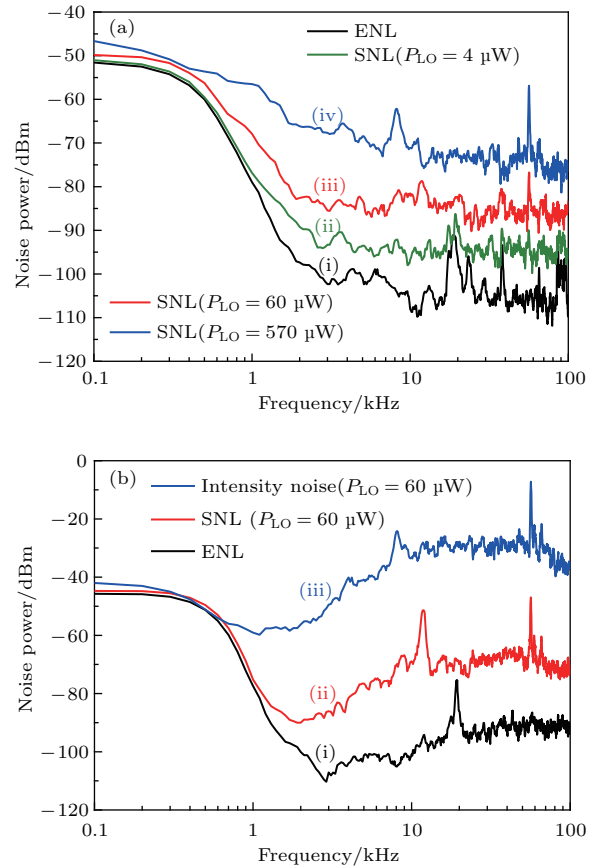


图3 1.34  $\mu\text{m}$  本底振荡光的噪声特性

Fig. 3. Noise characteristics of LO light at 1.34  $\mu\text{m}$ .

DOPO 的阈值抽运功率为 450 mW. 当控制 PPKTP 晶体工作温度为 53  $^{\circ}\text{C}$ 、抽运光功率为 95 mW、参考光功率为 5 mW 时, 实测的 DOPO 腔的经典增益为 3 倍. 当 DOPO 低于阈值运转、LO 光功率为 60  $\mu\text{W}$  时, DOPO 腔稳定输出的真空场在分析频率 8—100 kHz 的噪声功率谱如图 4 所示. 在实验测量中, 为了更清楚地观测 DOPO 输出的噪声谱, 将分析频率 8—100 kHz 范围分为 8—10 kHz, 10—30 kHz, 30—50 kHz, 50—100 kHz 四个傅里叶变换 (FFT) 窗口, 前三个 FFT 窗口对应的频谱分析仪分辨率带宽 (RBW) 和视频带宽 (VBW) 分别为 510 和 2 Hz. 第四个 FFT 窗口对应的 RBW 和 VBW 分别为 2.4 kHz 和 68 Hz. 图 4 中的曲线 (i) 为压缩态光场的噪声起伏谱, 曲线 (ii) 为 SNL, 曲线 (iii) 为反压缩噪声起伏谱. 从图中可以看出, 在分析频率 8—100 kHz 范围, 实验获得了压缩度大于 3 dB 的 1.34  $\mu\text{m}$  真空压缩态光场. 实验结果与理

论分析存在一定的差异, 可能原因是实验过程中仍存在例如光路寄生干涉、相对位相锁定的抖动等因素, 影响实测的压缩度.

图 5(a) 和图 5(b) 是分析频率分别为 8 kHz 和 36 kHz 处真空压缩态光场的噪声功率谱, 图中

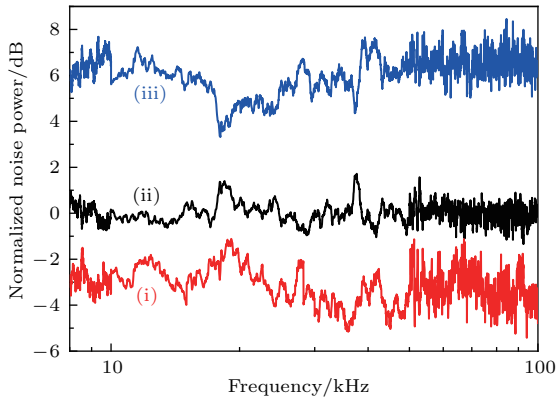


图 4 1.34  $\mu\text{m}$  真空压缩态光场噪声起伏谱. 曲线 i 为压缩态光场的噪声功率谱, 曲线 ii 为 SNL, 曲线 iii 为反压缩噪声功率谱

Fig. 4. Normalized noise power spectra of squeezed light at 1.34  $\mu\text{m}$ . Curve i is squeezed noise, curve ii is SNL, curve iii is anti-squeezed noise.

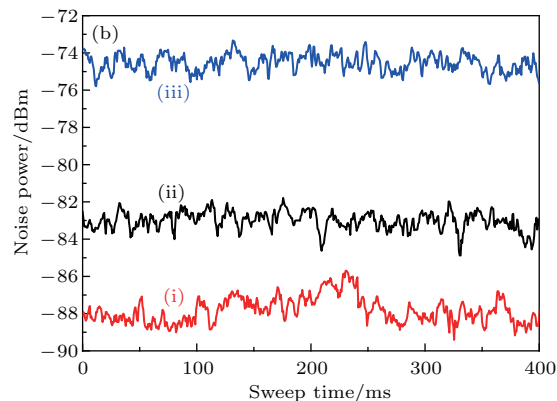
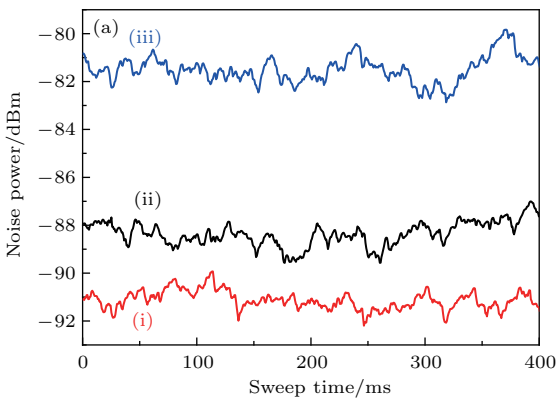


图 5 1.34  $\mu\text{m}$  真空压缩态光场噪声功率谱 (a) 分析频率为 8 kHz; (b) 分析频率为 36 kHz

Fig. 5. Noise power spectra of squeezed light at 1.34  $\mu\text{m}$ : (a) Analysis frequency of 8 kHz; (b) analysis frequency of 36 kHz.

曲线 (i) 为测量的压缩态光场的噪声功率谱, 曲线 (ii) 为 SNL, 曲线 (iii) 为反压缩噪声功率谱. 由图 5(a) 可以看出, 在音频频率 8 kHz 处, 实验制备的压缩态光场的压缩度达 3.0 dB. 由图 5(b) 可以看出, 在分析频率 36 kHz 处, 实验制备的压缩态光场的压缩度达 5.0 dB. 与图 5(b) 相比, 图 5(a) 的噪声起伏较波动较大. 这是因为分析频率越低, 压缩态光场产生系统受各种额外噪声的影响越大、对 DOPO 腔长以及相对相位的反馈控制要求也更加严苛.

## 5 结 论

本文利用自制的连续单频 671 nm/1.34  $\mu\text{m}$  双波长激光器抽运基于 PPKTP 晶体的半整块结构 DOPO, 在利用 MC 降低抽运激光和 LO 光的额外噪声、优化平衡零拍探测系统的 LO 光功率的基础上, 利用低于阈值运转的 DOPO 实验产生了音频段 1.34  $\mu\text{m}$  真空压缩态光场. 抽运激光和 LO 光经过 MC 过滤后, 强度噪声均在分析频率 1 MHz 后达到 SNL. 当 LO 光功率选取为 60  $\mu\text{W}$  时, 利用自制的低噪声高增益探测器测量的 SNL 高于 ENL 20 dB. 当抽运光场功率为 95 mW, 实验获得了分析频率范围为 8—100 kHz、压缩度大于 3 dB 的 1.34  $\mu\text{m}$  真空压缩态光场. 在分析频率 36 kHz 处, 压缩态光场的最大压缩度达 5.0 dB; 在音频频率 8 kHz 处, 压缩态光场的压缩度为 3.0 dB. 该音频段压缩态光场可为基于光纤的量子精密测量提供量子光源.

## 参考文献

- [1] Braunstein S L, van Loock P 2005 *Rev. Mod. Phys.* **77** 513
- [2] Wang X B, Hiroshima T, Tomita A, Hayashi M 2007 *Phys. Rep.* **448** 1
- [3] Weedbrook C, Pirandola S, Garcia-Patron R, Cerf N J, Ralph T C 2012 *Rev. Mod. Phys.* **84** 621
- [4] Wu L A, Xiao M, Kimble H J 1987 *J. Opt. Soc. Am. B.* **4** 1465
- [5] Takeno Y, Yukawa M, Yonezawa H, Furusawa A 2007 *Opt. Express* **15** 4321
- [6] Vahlbruch H, Mehmet M, Chelkowski S, Hage B, Franzen A, Lastzka N, Gofler S, Danzmann K, Schnabel R 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 033602
- [7] Yang W H, Shi S P, Wang Y J, Ma W G, Zheng Y H, Peng K C 2017 *Opt. Lett.* **42** 4553
- [8] Vahlbruch H, Mehmet M, Danzmann K, Schnabel R 2016 *Phys. Rev. Lett.* **117** 110801

- [9] 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
- [10] The L I G O Scientific Collaboration 2008 *Nat. Photon.* **7** 613
- [11] Travis H, Singh R, Dowling J P, Mikhailov E E 2012 *Phys. Rev. A* **86** 023803
- [12] Taylor M A, Janousek J, Daria V, Knittel J, Hage B, Bachor H A, Bowen W P 2013 *Nat. Photon.* **7** 229
- [13] McKenzie K, Grosse N, Bowen W P, Whitcomb S E, Gray M B, McClelland D E, Lam P K 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 161105
- [14] Stefszky M S, Mow-lowry C M, Chua S S Y, Shaddock D A, Buchler B C, Vahlbruch H, Khalaidovski A, Schnabel R, Lam P K, McClelland D E 2012 *Class. Quantum. Grav.* **29** 145015
- [15] Liu C J, Jing J T, Zhou Z F, Pooser R C, Hudelist F, Zhou L, Zhang W P 2011 *Opt. Lett.* **36** 2979
- [16] Liu Z J, Zhai Z H, Sun H X, Gao J R 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 060401 (in Chinese) [刘增俊, 翟泽辉, 孙恒信, 郜江瑞 2016 物理学报 **65** 060401]
- [17] Yan Z H, Sun H X, Cai C X, Ma L, Liu K, Gao J R 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 114205 (in Chinese) [闫子华, 孙恒信, 蔡春晓, 马龙, 刘奎, 郜江瑞 2017 物理学报 **66** 114205]
- [18] Yang W H, Jing X L, Yu X D, Zheng Y H, Peng K C 2017 *Opt. Express* **25** 24262
- [19] Yao L T, Feng J X, Gao Y H, Zhang K S 2017 *Acta Sin. Quan. Opt.* **23** 99 (in Chinese) [要立婷, 冯晋霞, 高英豪, 张宽收 2017 量子光学学报 **23** 99]
- [20] Bachor H A, Ralph T C A 2004 *Guide to Experiments in Quantum Optics* (Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA) pp247–250
- [21] Li Y J, Feng J X, Li P, Zhang K S, Chen Y J, Lin Y F, Huang Y D 2013 *Opt. Express* **21** 6082
- [22] Liu X, Wang Y, Chang D X, Jia X J, Peng K C 2007 *Acta Sin. Quan. Opt.* **13** 138 (in Chinese) [刘侠, 王宇, 常冬霞, 贾晓军, 彭堃堃 2007 量子光学学报 **13** 138]
- [23] Hou F Y, Yu L, Jia X J, Zheng Y H, Xie C D, Peng K C 2011 *Eur. Phys. J. D* **62** 433
- [24] Zheng Y H, Wu Z Q, Huo M R, Zhou H J 2013 *Chin. Phys. B* **22** 094206
- [25] Aoki T, Takahashi G, Furusawa A 2006 *Opt. Express* **14** 6930
- [26] Yang W H, Jin X L, Yu X D, Zheng Y H, Peng K C 2017 *Opt. Express* **25** 22262
- [27] Ma Y Y, Feng J X, Wan Z J, Gao Y H, Zhang K S 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 244205 (in Chinese) [马亚云, 冯晋霞, 万振菊, 高英豪, 张宽收 2017 物理学报 **66** 244205]

# Generation of audio-band frequency squeezed light at 1.34 $\mu\text{m}$ \*

Feng Jin-Xia<sup>1)2)</sup> Du Jing-Shi<sup>1)</sup> Jin Xiao-Li<sup>1)2)</sup> Li Yuan-Ji<sup>1)2)</sup> Zhang Kuan-Shou<sup>1)2)</sup>†

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 6 February 2018; revised manuscript received 18 April 2018 )

## Abstract

Continuous variable (CV) audio-band frequency squeezed states at the fiber telecommunication wavelength is an important quantum resource for the practical applications based on optical fiber. As is well known, the optical power attenuation and phase diffusion effect of light at 1.3  $\mu\text{m}$  in standard telecommunication fibres are low and small, respectively. The audio-band frequency squeezed light at 1.34  $\mu\text{m}$  can be utilized to realize quantum precision measurement, such as quantum-enhanced sensing in the low-frequency range, laser interferometer for gravitational wave detection. In this paper, CV audio-band frequency vacuum squeezed states at 1.3  $\mu\text{m}$  are experimentally generated by using a type-I degenerate optical parametric oscillator (DOPO) below the threshold. A home-made continuous-wave single-frequency dual-wavelength (671 nm and 1.34  $\mu\text{m}$ ) Nd:YVO<sub>4</sub>/LBO laser is used as a pump source for DOPO based on a type-I quasi-phase-matched periodically poled KTiOPO<sub>4</sub> (PPKTP) crystal. Mode cleaners with a finesse of 400 and linewidth of 0.75 MHz are used to filter the noise of lasers at 671 nm and 1.34  $\mu\text{m}$ , respectively. The intensity noises of the two lasers reach a shot noise level for analysis frequencies higher than 1.0 MHz and their phase noises reach shot noise level for analysis frequencies higher than 1.3 MHz, respectively. The low noise single-frequency 671 nm laser is utilized as a pump of the DOPO. The threshold power of the DOPO is 450 mW. In order to detect the audio-band frequency vacuum squeezed states, the power of local oscillator of a homodyne detector system is optimized to 60  $\mu\text{W}$ . Furthermore, the effect of common mode rejection ratio (CMRR) of detectors is discussed in detecting the audio-band frequency vacuum squeezed states. Improvement of CMRR of detectors is a good way to detect the audio-band frequency vacuum squeezed states effectively. When the phase matching temperature of PPKTP crystal is controlled at 53 °C by using a home-made temperature controller and the pump power is 95 mW, the vacuum squeezed states are generated at analysis frequency ranging from 8–100 kHz. A maximum measured squeeze of 5.0 dB is obtained at analysis frequency of 36 kHz. A 3.0 dB squeezed light is obtained at an audio-band frequency of 8 kHz.

**Keywords:** quantum optics, audio-band frequencies squeezed light, degenerate optical parametric oscillator, fiber telecommunication wavelength of 1.34  $\mu\text{m}$

**PACS:** 42.50.-p

**DOI:** [10.7498/aps.67.20180301](https://doi.org/10.7498/aps.67.20180301)

\* Project supported by the National Key Research and Development Plan of China (Grant No. 2016YFA0301401) and Sponsored by the Fund for Shanxi “1331Project” Key Subjects Construction (Grant No. 1331KSC).

† Corresponding author. E-mail: [kuanshou@sxu.edu.cn](mailto:kuanshou@sxu.edu.cn)

**ACTA PHYSICA SINICA**  
**Vol. 67, No. 17, September 2018**

**CONTENTS**

**Young Scientists' Forum**

- 177401 **Single crystal growth and physical property study of 1111-type Fe-based superconducting system CaFeAsF**  
*Mu Gang Ma Yong-Hui*

**REVIEW**

- 178701 **Recent progress of fluorescence lifetime imaging microscopy technology and its application**  
*Liu Xiong-Bo Lin Dan-Ying Wu Qian-Qian Yan Wei Luo Teng Yang Zhi-Gang Qu Jun-Le*

**GENERAL**

- 170201 **Computational fluid dynamic investigation of the primary and secondary atomization of the free-fall atomizer in electrode induction melting gas atomization process**  
*Xia Min Wang Peng Zhang Xiao-Hu Ge Chang-Chun*
- 170301 **Invariant eigen-operator calculated vibration mode of lattice in the case of absorbing an atom onto crystal surface**  
*Zhang Ke Fan Cheng-Yu Fan Hong-Yi*
- 170302 **Quantum phase gate on a single superconducting  $\Lambda$ -type three-level and two superconducting resonators**  
*Liu Chao Wu Yun-Wen*
- 170501 **Spontaneous formation of ordered waves in chaotic neuronal network with excitatory-inhibitory connections**  
*Wang Peng Li Qian-Yun Huang Zhi-Jing Tang Guo-Ning*
- 170701 **Scanning tunneling microscopy research of Bi(110) thin films grown on NbSe<sub>2</sub>**  
*Liu Jian-Yu Sun Hao-Hua Guan Dan-Dan Li Yao-Yi Wang Shi-Yong Liu Can-Hua Zheng Hao Jia Jin-Feng*

**NUCLEAR PHYSICS**

- 172801 **Influence of reflected neutrons of wall on waveform of burst reactors**  
*Gao Hui Song Ling-Li Li Bing*
- 172802 **Preliminary study on numerical solver of inhomogeneous burnup equations**  
*Fu Yuan-Guang Deng Li Li Gang*

**ATOMIC AND MOLECULAR PHYSICS**

- 173201 **Theoretical calculation of  $K_{\alpha}$  and  $K_{\beta}$  X-ray satellite and hypersatellite structures for hollow argon atoms**  
*Ma Kun Jiao Zheng Jiang Feng-Jian Ye Jian-Feng Lv Hai-Jiang Chen Zhan-Bin*

(Continued)

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

- 174101 **Transmission characteristics of terahertz wave in high temperature plasma**  
*Meng Ling-Hui Ren Hong-Bo Liu Jian-Xiao*
- 174201 **Stimulated-emission based spectral domain optical coherence tomography for molecular contrast imaging**  
*Hu Zhe-Hao Shangguan Zi-Wei Qiu Jian-Rong Yang Shan-Shan Bao Wen Shen Yi Li Peng Ding Zhi-Hua*
- 174202 **Design and numerical simulation demonstration of multi-functional holographic phase plate for large depth of field single molecular localization microscopy**  
*Li Si-Wei Wu Jing-Jing Zhang Sai-Wen Li Heng Chen Dan-Ni Yu Bin Qu Jun-Le*
- 174203 **Generation of audio-band frequency squeezed light at 1.34  $\mu\text{m}$**   
*Feng Jin-Xia Du Jing-Shi Jin Xiao-Li Li Yuan-Ji Zhang Kuan-Shou*
- 174204 **Numerical simulation of effect of pump distribution on spherical aberration of end-pumped laser**  
*Yao Qiang-Qiang Wang Qi-Han Feng Chi Chen Si Jin Guang-Yong Dong Yuan*
- 174205 **Filamentation and supercontinuum emission with flattened femtosecond laser beam by use of microlens array in fused silica**  
*Zhou Ning Zhang Lan-Zhi Li Dong-Wei Chang Jun-Wei Wang Bi-Yi Tang Lei Lin Jing-Quan Hao Zuo-Qiang*
- 174206 **Novel dynamic wavefront control scheme for ultra-fast beam smoothing**  
*Li Teng-Fei Zhong Zhe-Qiang Zhang Bin*
- 174301 **Linear-wave propagation in liquids containing bubbly clusters**  
*Fan Yu-Zhe Chen Bao-Wei Li Hai-Sen Xu Chao*
- 174302 **Performance analysis of matched field processing localization with various line array configurations based on normal mode decomposition**  
*Jia Yu-Qing Su Lin Guo Sheng-Ming Ma Li*
- 174701 **Experimental investigation of the hypersonic boundary layer transition on a 7° straight cone**  
*Liu Xiao-Lin Yi Shi-He Niu Hai-Bo Lu Xiao-Ge Zhao Xin-Hai*
- 174702 **Analysis of magnetohydrodynamic drag character for hypersonic vehicles**  
*Yao Xiao Liu Wei-Qiang Tan Jian-Guo*

## **PHYSICS OF GASES, PLASMAS, AND ELECTRIC DISCHARGES**

- 175201 **Near-field character and improvement technology of induced spatial incoherence**  
*Li Fu-Jian Gao Yan-Qi Zhao Xiao-Hui Ji Lai-Lin Wang Wei Huang Xiu-Guang Ma Wei-Xin Sui Zhan Pei Wen-Bing*

## **CONDENSED MATTER: STRUCTURAL, MECHANICAL, AND THERMAL PROPERTIES**

- 176101 **Density functional theory calculation of diffusion mechanism of intrinsic defects in rutile  $\text{TiO}_2$**   
*Liu Ru-Lin Fang Liang Hao Yue Chi Ya-Qing*

(Continued)

176102 **Transmission of 30-keV He<sup>2+</sup> ions through polycarbonate nanocapillaries: Dependence on the incident angle**

*Niu Shu-Tong Zhou Wang Pan Peng Zhu Bing-Hui Song Han-Yu Shao Jian-Xiong Chen Xi-Meng*

176701 **A new magnetic field system for <sup>3</sup>He polarization**

*Wang Wen-Zhao Hu Bi-Tao Zheng Hao Tu Xiao-Qing Gao Peng-Lin Yan Song Guo Wen-Chuan Yan Hai-Yang*

176801 **Mechanism for regulation and control of emulsion droplet generation in co-flow microfluidic device via electric field**

*Li Lei Zhang Cheng-Bin*

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

177201 **Mechanism of electrically driven metal-insulator phase transition in vanadium dioxide nanowires**

*Wang Ze-Lin Zhang Zhen-Hua Zhao Zhe Shao Rui-Wen Sui Man-Ling*

177202 **Physical model of conductive dislocations in GaN Schottky diodes**

*Wang Xiang Chen Lei-Lei Cao Yan-Rong Yang Qun-Si Zhu Pei-Min Yang Guo-Feng Wang Fu-Xue Yan Da-Wei Gu Xiao-Feng*

177501 **Synthesis and superparamagnetism of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> hollow nano-microspheres**

*Li Wen-Yu Huo Ge Huang Yan Dong Li-Juan Lu Xue-Gang*

177502 **Micromagnetic modeling of magnetization switching and oscillation modes in spin valve with tilted spin polarizer**

*Lv Gang Zhang Hong Hou Zhi-Wei*

177801 **Influence of Hydrogen-like impurity and thickness effect on quantum transition of a two-level system in an asymmetric Gaussian potential quantum dot**

*Bai Xu-Fang Zhao Yu-Wei Yin Hong-Wu Eerdunchaolu*

177802 **Effect of annealing treatment on characteristics of surface plasmon resonance for indium tin oxide**

*Jiang Hang Zhou Yu-Rong Liu Feng-Zhen Zhou Yu-Qin*

177901 **Optimization of surface morphology with micro meter size for suppressing secondary electron emission**

*Hu Jing Cao Meng Li Yong-Dong Lin Shu Xia Ning*

177902 **Influence of multipactor discharge on field-buildup process in radio-frequency plate cavity**

*Dong Ye Liu Qing-Xiang Pang Jian Zhou Hai-Jing Dong Zhi-Wei*

## **INTERDISCIPLINARY PHYSICS AND RELATED AREAS OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

178101 **First principle study on atomic structure of La<sub>65</sub>X<sub>35</sub> (X =Ni, Al) metallic glasses**

*Liu Qi Guan Peng-Fei*

178102 **Optical and electrical properties of short-pitch solar cells with finite-difference frequency-domain method**

*Sun Long Ren Hao Feng Da-Zheng Wang Shi-Yu Xing Meng-Dao*

*(Continued)*

178103 **A method of characterizing axial stress in ferromagnetic members using superficial magnetic flux density obtained from static magnetization by permanent magnet**  
*Deng Dong-Ge Zuo Su Wu Xin-Jun*

178501 **Mechanisms of trapping effects in short-gate GaN-based high electron mobility transistors with pulsed  $I$ - $V$  measurement**

*Zhou Xing-Ye Lv Yuan-Jie Tan Xin Wang Yuan-Gang Song Xu-Bo He Ze-Zhao  
Zhang Zhi-Rong Liu Qing-Bin Han Ting-Ting Fang Yu-Long Feng Zhi-Hong*

## **GEOPHYSICS, ASTRONOMY, AND ASTROPHYSICS**

179501 **Quantum entanglement and cosmological Friedmann equations**

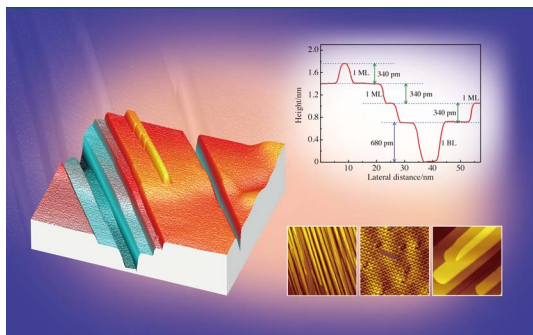
*Wang Can-Can*

Color figures can be viewed in the online issue.



Online issue





Bi(110)薄膜在NbSe<sub>2</sub>衬底上的扫描隧道显微镜研究  
 [刘建宇, 孙昊桦, 管丹丹, 李耀义, 王世勇, 刘灿华,  
 郑浩, 贾金锋 2018 物理学报 67 170701]

## 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](http://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)

2018 年 9 月 第 67 卷 第 17 期

版 权 所 有

**ACTA PHYSICA SINICA**

(Semimonthly, First Published in 1933)

Vol. 67 No. 17 September 2018

© 2018 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)

广告发布登记文号 京海工商广登字 20170113 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](mailto: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