

# 掺镱光子晶体光纤飞秒激光器噪声的测量

高 亢 郭学石 赵宁波 李小英

(天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

**摘要** 小型化、低成本和低噪声的激光器有助于实用化非经典光源的实现。掺镱光子晶体光纤锁模激光器与钛宝石激光器相比,具有系统结构简单、体积小和价格低的优点,但其噪声特性还有待深入研究。采用一套适用于测量脉冲激光器噪声的自零拍探测系统,对掺镱光子晶体光纤飞秒激光器的噪声进行了测量分析。结果表明掺镱光子晶体光纤飞秒激光器的振幅噪声显著高于其散粒噪声基准,说明该激光器的输出不是理想的相干态光场,其噪声特性有待进一步提高。

**关键词** 量子光学;噪声探测;自零拍探测;掺镱光子晶体光纤飞秒激光器

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201333.0927001

## Measurement of the Noise of Yb-Doped Femtosecond Photonic Crystal Fiber Laser

Gao Kang Guo Xueshi Zhao Ningbo Li Xiaoying

(Key Laboratory of Opto-Electronic Information Technology, Ministry of Education, College of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract** Lasers with compact size, low cost and low noise are desirable for developing practical non-classical sources. Compared with Ti:sapphire mode-locked laser, Yb-doped photonic crystal fiber (PCF) based mode-locked laser has the advantages of simple structure, compact size and low cost, but its noise characteristics need to be further investigated. The noise of an Yb-doped PCF based femtosecond laser is measured and analyzed by a home-made self-homodyne detection system which is suitable for measuring the noise of pulsed laser. The results show that the amplitude noise of the PCF based laser is much higher than that of the shot noise level, which means that the output of the laser is not in the ideal coherent state, and its noise characteristics should be further improved.

**Key words** quantum optics; noise measurement; self-homodyne detection; Yb-doped femtosecond photonic crystal fiber laser

**OCIS codes** 270.5570; 140.7090; 270.2500

## 1 引 言

非线性光学参量过程是产生压缩态光场的有效方法<sup>[1]</sup>,若采用小型化、低成本和低噪声的激光器为光学参量过程的抽运源,有助于实用化压缩态光源的实现,从而推动量子信息技术的发展<sup>[2-3]</sup>。作为抽运源的激光器,其低噪声特性有助于提高压缩态的指标<sup>[4]</sup>,因此目前大部分的脉冲压缩态都是采用

接近散粒噪声极限<sup>[5]</sup>的钛宝石激光器产生的。近年来,光纤脉冲激光器的研究取得了很大的进展,用作抽运源,其系统结构简单、尺寸较小、价格较低的特点将使它更具有实用化和工程化的优势。但对光纤脉冲激光器的噪声特性的分析,目前还仅限于关注脉冲时域抖动的测量分析上<sup>[6]</sup>,有待进一步的研究。鉴于此,本文利用一套基于自零拍法测量脉冲激光

收稿日期: 2013-03-26; 收到修改稿日期: 2013-04-28

基金项目: 国家 973 计划(2010CB923101)

作者简介: 高 亢(1986—),男,硕士研究生,主要从事量子光学、非线性光学和量子信息等方面的研究。

E-mail: panda\_gk@tju.edu.cn

导师简介: 李小英(1968—),女,博士,教授,主要从事量子光学、非线性光学和量子信息等方面的研究。

E-mail: xiaoyingli@tju.edu.cn(通信联系人)

器的振幅噪声和散粒噪声基准的装置,对掺镱光子晶体光纤飞秒激光器<sup>[7-9]</sup>进行测量。测量结果表明,该激光器的振幅噪声显著高于其散粒噪声基准,这说明这种光纤激光器的输出不是理想的相干态光场,噪声特性有待进一步提高。

## 2 噪声测量原理

本文采用自零拍法对脉冲激光器的噪声进行测量<sup>[10]</sup>。自零拍探测系统如图 1 所示,首先将激光器的输出光场  $a_m$  经过分束器(BS)注入到自零拍探测光路中, $a_v$  为从 BS 另一侧入射的真空场。分束后的光场用  $b_s$  表示, $b_s$  也就是自零拍探测系统的信号光场。为分析简便,假设自零拍探测系统效率为 100%,即系统的损耗都计入分束器的透射率  $\eta$  中(当激光器输出光强一定时, $\eta$  正比于所探测光电流强度), $\eta = \langle \hat{N}_s \rangle / \langle \hat{N}_m \rangle$ ,其中  $\hat{N}_m = a_m^\dagger a_m$  为激光器输出光场的光子数算符, $\hat{N}_s = b_s^\dagger b_s$  为自零拍探测系统的信号光场  $b_s$  的光子数算符。此时,信号光场与激光器输出光场关系为

$$\hat{b}_s = \sqrt{\eta} \hat{a}_m + \sqrt{1-\eta} \hat{a}_v. \quad (1)$$

随后,信号光场经过 50/50 分束打到探测器 D1、D2 的光敏面上,50/50 分束器的另一端注入的是真空光场  $b_v$ ,利用  $\hat{d}_1$  和  $\hat{d}_2$  分别表示 D1、D2 前的光场,有

$$\begin{aligned} \hat{d}_1 &= \sqrt{\frac{1}{2}} \hat{b}_s + \sqrt{\frac{1}{2}} \hat{b}_v, \\ \hat{d}_2 &= \sqrt{\frac{1}{2}} \hat{b}_s - \sqrt{\frac{1}{2}} \hat{b}_v. \end{aligned} \quad (2)$$

最后将探测器 D1 和 D2 的光电流做加法和减法(用  $\hat{i}_+$  和  $\hat{i}_-$  分别表示)运算,分析其电流噪声起伏( $\langle \Delta^2 \hat{i}_- \rangle$  和  $\langle \Delta^2 \hat{i}_+ \rangle$ )。

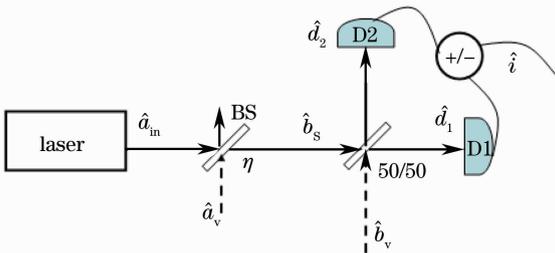


图 1 实验原理图

Fig. 1 Experimental schematic diagram

将 D1、D2 光电流做加法,得到  $\hat{i}_+ = \hat{d}_1^\dagger \hat{d}_1 + \hat{d}_2^\dagger \hat{d}_2$ ,将(2)式代入,则有  $\hat{i}_+ = \hat{b}_s^\dagger \hat{b}_s + \hat{b}_v^\dagger \hat{b}_v$ 。若讨论其噪声起伏,则有  $\langle \Delta^2 \hat{i}_+ \rangle = \langle \hat{N}_s^2 \rangle - \langle \hat{N}_s \rangle^2$ ,其中  $\langle \Delta^2 \hat{i}_+ \rangle$  表示的是 D1 和 D2 光电二极管探测电流之和

的噪声功率谱。将(1)式代入,有

$$\langle \Delta^2 \hat{i}_+ \rangle = \eta^2 \langle \Delta^2 \hat{N}_m \rangle + \eta(1-\eta) \langle \hat{N}_m \rangle, \quad (3)$$

其中  $\langle \Delta^2 \hat{N}_m \rangle = \langle a_m^\dagger a_m^\dagger a_m a_m \rangle - \langle a_m^\dagger a_m \rangle^2$  为激光器输出光场的振幅噪声起伏。由(3)式可知,光电流之和的噪声功率谱中包含两项:第一项是激光器输出光场的振幅噪声起伏,且与  $\eta$  成平方的关系;第二项是此衰减过程混入的真空噪声。

将 D1、D2 光电流做减法,可以得到  $\hat{i}_- = \hat{d}_1^\dagger \hat{d}_1 - \hat{d}_2^\dagger \hat{d}_2$ ,将(2)式代入,则有  $\hat{i}_- = \hat{b}_s^\dagger \hat{b}_v + \hat{b}_v^\dagger \hat{b}_s$ 。若讨论其噪声起伏,有  $\langle \Delta^2 \hat{i}_- \rangle = \langle \hat{i}_-^2 \rangle - \langle \hat{i}_- \rangle^2 = \langle \hat{N}_s \rangle$ ,其中  $\langle \Delta^2 \hat{i}_- \rangle$  表示的是 D1 和 D2 光电二极管探测电流之差的噪声功率谱。将(1)式代入,有

$$\langle \Delta^2 \hat{i}_- \rangle = \eta \langle \hat{N}_m \rangle. \quad (4)$$

由(4)式可知,光电流之差的噪声功率谱等于激光器输出光场的光子数平均值与  $\eta$  的乘积,与光场振幅噪声的分量无关,对应其散粒噪声基准。

将激光器输出光场的密度算符  $\hat{\rho}_m$  在 P 表象下展开: $\hat{\rho}_m = \int |\alpha\rangle \langle \alpha| P(\alpha) d^2\alpha$ ,其中  $P(\alpha)$  为其 P 表示。代入(3)式和(4)式,得到

$$\langle \Delta^2 \hat{i}_+ \rangle = \eta^2 (\langle |\alpha|^4 \rangle - \langle |\alpha|^2 \rangle^2) + \eta \langle |\alpha|^2 \rangle, \quad (5)$$

$$\langle \Delta^2 \hat{i}_- \rangle = \eta \langle |\alpha|^2 \rangle, \quad (6)$$

其中, $\langle |\alpha|^n \rangle = \int P(\alpha) |\alpha|^n d^2\alpha$ , $\langle |\alpha|^4 \rangle - \langle |\alpha|^2 \rangle^2 \geq 0$ 。如果激光器输出光场是理想的相干态光场,则有  $P_{\alpha_0}(\alpha) = \delta(\alpha - \alpha_0)$ ,此时  $\langle |\alpha|^4 \rangle - \langle |\alpha|^2 \rangle^2 = 0$ , $\langle \Delta^2 \hat{i}_+ \rangle_{\alpha_0} = \eta |\alpha_0|^2 = \langle \Delta^2 \hat{i}_- \rangle_{\alpha_0}$ 。对于具有一定输出功率  $|\alpha_0|^2$  的激光场,光电流之和与差的噪声功率谱与  $\eta$  成正比;并且光电流之和与差的噪声功率谱是相等的,即理想相干光场振幅噪声达到其散粒噪声基准。如果激光器输出光场不是理想的相干态光场,而是混入经典噪声的混态光场,则  $\langle |\alpha|^4 \rangle - \langle |\alpha|^2 \rangle^2 > 0$ ,在这种情况下,光电流之和大于光电流之差的噪声功率谱,说明非理想激光器输出场振幅噪声是大于其散粒噪声基准的。

## 3 实验测量及结果

通过实验对掺镱光子晶体光纤飞秒激光器的噪声特性进行测量,该激光器重复频率为 56 MHz,脉冲宽度为 500 fs,中心波长为 1042 nm,带宽为 8 nm,激光器的输出为良好的线偏振光。

光路装置如图 2(a)所示,在激光器输出端口之后,通过半波片 HWP1 和偏振分束器 PBS1 组成衰减器。之后通过半波片 HWP2 和偏振分束器 PBS2

对光束进行 50/50 分束(监视探测器上的电流表读数,直至两端口打入的光电流强度相等),分别通过焦距为 40 mm 的透镜 L 聚焦后,打入自零拍探测器中 D1 和 D2 两个光电探测器的光敏面。实验中使

用的是基于适用于高响应率脉冲光噪声探测的零拍探测器<sup>[11]</sup>设计改造的脉冲光噪声探测器,如图 2(b)所示,这种探测器适合于对脉冲光进行带宽 10 MHz 以下的噪声测量。

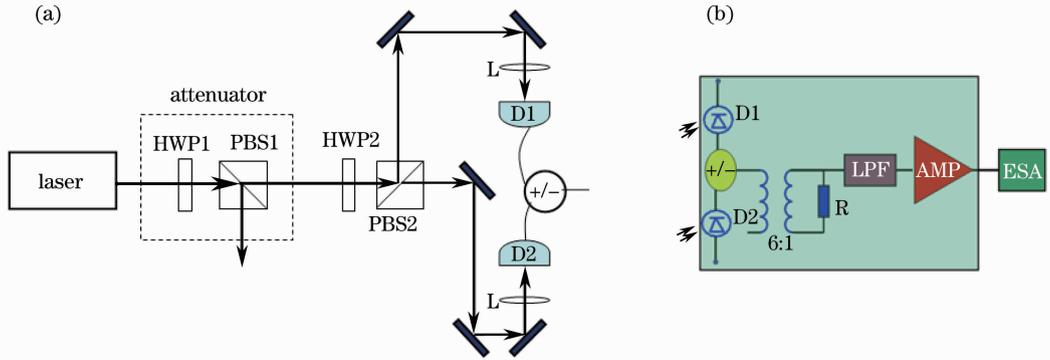


图 2 (a)实验装置图; (b)探测系统电路

Fig. 2 (a) Experimental setup; (b) circuit of the detection system

图 2 中的两个 PIN 光电二极管 D1、D2(OSI-InGaAs300)对于所测波段的光电流响应度分别是  $0.703 \pm 0.002$ 、 $0.702 \pm 0.002$  A/W,说明探测器对所测波长的脉冲激光可以达到良好的平衡特性,适用于探测。探测器用  $\pm 5$  V 直流稳压电源供电,利用一个双刀双掷开关进行 D1 探测器  $\pm 5$  V 供电的转换,从而达到两端口光电流相加和相减的转换。当调整到两光电流相减时,该探测器共模抑制比达到 55 dB。鉴于本实验是对超短脉冲光进行测量,因此在电路设计时特别注意了转换不同 D1 探测器供电情况下,电路路径长度的匹配,保证探测器在两种测量状态下,是对 D1 端口输入的同脉冲进行测量。随后电流信号经过一个绕线比为 6:1 的变压器(T36-1-X65+, Mini-Circuits)并耦合到  $50 \Omega$  电阻 R,以便抑制放大器输入电阻的热噪声,以及在与后面电路模块阻抗匹配的前提下,滤去电流的直流分量。电路输出到两个串联的 3 dB 带宽 10.7 MHz、隔离度约 50 dB 的低通滤波器模块 LPF(BLP-10.7+, Mini-Circuits)和串联的两个功率放大系数约为 24 dB 的低

噪声电子放大器模块 AMP(ZFL500-LN+, Mini-Circuits)上,而后接入电谱仪 ESA(Agilent, E4402B)进行数据分析[电谱仪的工作条件:解析带宽(RBW)为 100 kHz,视频带宽(VBW)为 1 kHz,中心频率为 3 MHz,带宽为 0]。

首先测量探测器 D1 和 D2 电流相减时 3 MHz 处的电流噪声,对激光器的散粒噪声基准进行标定。其实验结果如图 3(a)所示,图中圆点对应激光散粒噪声基准的实验数据,实线为该数据的拟合曲线,纵轴对应着电流噪声,横轴是光电二极管的工作电流的直流分量,对应着入射光场的强度。数据结果表明,散粒噪声基准与入射光强呈线性的关系,这是符合(6)式的结论的。随后测量 D1 和 D2 电流相加时 3 MHz 处的电流噪声,对激光器的振幅噪声谱进行测量。实验结果如图 3(b)所示,图中三角形点对应激光振幅噪声的实验数据,虚线为拟合曲线,纵轴对应着电流噪声,横轴是光电二极管的工作电流的直流分量。为对比直观,将图 3(a)中的散粒噪声基准数据也放到图 3(b)中。发现激光器的振幅噪声显

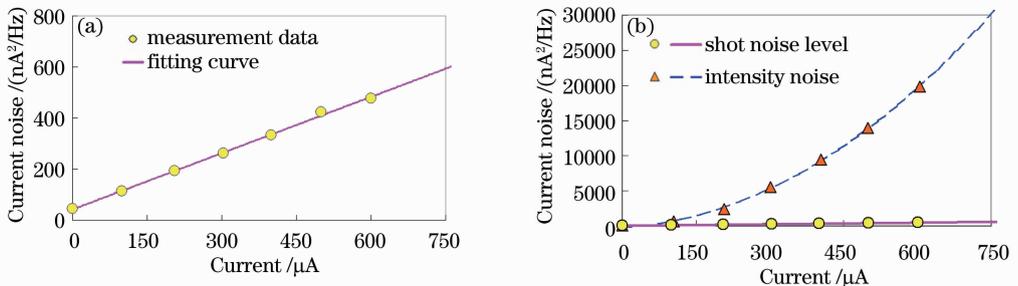


图 3 (a)散粒噪声基准的标定; (b)电流噪声与光电流强度的关系

Fig. 3 (a) Calibration of shot noise level; (b) relationship between the current noise and the photocurrent

著高于散粒噪声基准,同时随着光电流的增大,其振幅噪声与光电流呈二次关系,这一关系符合(5)式的结论。因此可以得出结论,所用掺镱光子晶体光纤飞秒锁模激光器的振幅噪声是显著高于其散粒噪声基准的,也就是说,此激光器输出的并不是理想的相干光场。

## 4 结 论

利用一套适用于超短脉冲光噪声特性测量的自零拍探测系统,对掺镱光子晶体光纤飞秒激光器进行了测量,通过测量发现掺镱光子晶体光纤飞秒激光器的振幅噪声显著高于其散粒噪声基准,表明该激光器的输出不是理想的相干态光场。这种光纤激光器的噪声特性有待进一步提高。

### 参 考 文 献

- 1 F Popescu. Polarization squeezing in perfectly overlapped quadrature squeezed ultrashort light pulses [J]. *J Optics B: Quantum and Semiclassical Optics*, 2005, 7(2): 70–81.
- 2 M D Reid, P D Drummond, W P Bowen, *et al.*. Colloquium: the Einstein Podolsky Rosen paradox: from concepts to applications [J]. *Rev Mod Phys*, 2009, 81(4): 1727–1751.
- 3 S L Braunstein, P V Loock. Quantum information with continuous variables [J]. *Rev Mod Phys*, 2005, 77(2): 513–

577.

- 4 X Guo, X Li, N N Liu, *et al.*. An all-fiber source of pulsed twin beams for quantum communication [J]. *Appl Phys Lett*, 2012, 101(26): 261111.
- 5 R Grilli, G Méjean, C Abd Alrahman, *et al.*. Cavity-enhanced multiplexed comb spectroscopy down to the photon shot noise [J]. *Phys Rev A*, 2012, 85(5): 051804.
- 6 Y J Song, C Kim, K Jung, *et al.*. Timing jitter optimization of mode-locked Yb-fiber lasers toward the attosecond regime [J]. *Opt Express*, 2011, 19(15): 14518–14525.
- 7 Y J Song, M L Hu, C L Wang, *et al.*. Environmentally stable, high pulse energy Yb-doped large-mode-area photonic crystal fiber laser operating in the soliton-like regime [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2008, 20(13): 1088–1090.
- 8 Liu Bowen, Hu Minglie, Song Youjian, *et al.*. Femtosecond crystal fiber laser amplifier with millijoules and 100 fs level output [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(9): 2415–2418.  
刘博文, 胡明列, 宋有建, 等. 微焦耳、百飞秒光子晶体光纤飞秒激光放大器[J]. *中国激光*, 2010, 37(9): 2415–2418.
- 9 Chai Lu, Hu Minglie, Fang Xiaohui, *et al.*. Advances in femtosecond laser technologies with photonic crystal fibers [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0101001.  
柴路, 胡明列, 方晓惠, 等. 光子晶体光纤飞秒激光技术研究进展[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0101001.
- 10 H A Bachor, T C Ralph. *A Guide to Experiment in Quantum Optics* [M]. Weinheim; Wiley-VCH, 2004. 205–210.
- 11 Wang Jinjing, Jia Xiaojun, Peng Kunchi. Improvement of balanced homodyne detector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0127001.  
王金晶, 贾晓军, 彭堃堦. 平衡零拍探测器的改进[J]. *光学学报*, 2012, 32(1): 0127001.

栏目编辑: 李文喆