

# 光纤激光经过模清洁器后的强度噪声分析\*

邰朝阳<sup>1)2)</sup> 侯飞雁<sup>1)</sup> 王盟盟<sup>1)2)</sup> 权润爱<sup>1)</sup> 刘涛<sup>1)</sup> 张首刚<sup>1)</sup> 董瑞芳<sup>1)†</sup>

1) (中国科学院国家授时中心, 中国科学院时间频率基准重点实验室, 西安 710600)

2) (中国科学院大学, 北京 100049)

(2014年3月22日收到; 2014年5月20日收到修改稿)

对 1560 nm 单频光纤激光光源通过一个光学模清洁器后的强度噪声进行了分析研究. 实验观察到模清洁器虽然对于激光的高频强度噪声有明显的抑制作用, 但强度噪声特性随频率呈一定周期变化, 且在低频处模清洁器对强度噪声有放大作用. 本文认为这是由于模清洁器具有类似于光纤延迟线的时延效应, 将激光源的部分相位噪声转化为强度噪声. 通过理论分析, 由相位噪声转化的相对强度噪声幅度与激光相干时间、模清洁器的平均延时参数以及分析频率相关. 分析结果与实验测量结果符合良好. 此外, 通过在光路中加入声光调制器进行反馈调制, 激光的线宽从 26 kHz 压窄至 16 kHz, 模清洁器的锁定质量明显提高, 经过模清洁器后的激光强度噪声有所减小, 与理论相符. 该结果进一步证实了由相位噪声转化而来的强度噪声与模清洁器的锁定质量无直接关系. 通过该研究, 完善了光学模清洁器对激光的噪声抑制模型.

**关键词:** 模清洁器, 相位噪声转化, 强度噪声, 线宽

**PACS:** 42.50.Lc, 42.50.Xa, 42.55.Wd

**DOI:** 10.7498/aps.63.194203

## 1 引言

模清洁器<sup>[1,2]</sup>是用来提高激光光束质量和抑制激光强度噪声的重要光学手段. 1998年, Willke等<sup>[3]</sup>用模清洁器抑制激光器强度噪声, 使得由半导体激光器抽运的 10 W 固体激光器的强度噪声在 10 MHz 达到散粒噪声极限. 近年来, 利用模清洁器抑制强度噪声而获得的近散粒噪声极限激光光源已被广泛应用于压缩光的制备<sup>[4,5]</sup>, 精密测量<sup>[6]</sup>, 量子通信<sup>[7,8]</sup>, 量子计算<sup>[9]</sup>, 量子密钥分配<sup>[10]</sup>及引力波探测<sup>[11-13]</sup>等各个研究领域.

光纤激光器作为新型光源具有输出功率高、体积小和频率稳定性好、线宽窄、易与光纤耦合进而集成化等固体激光器无法比拟的优点. 但由于高输出功率的单频光纤激光系统存在较大的噪声<sup>[14-17]</sup>, 阻碍了光纤激光器在量子信息等领域中

的应用. 因此, 如何获得高功率、低噪声的单频光纤激光器光源, 对激光技术本身的发展及其应用都具有特别重要的意义.

我们开展了利用模清洁器抑制 1560 nm 光纤激光系统强度噪声的实验研究. 实验中观察到, 经过模清洁器过滤的激光强度噪声特性随分析频率呈一定周期变化, 且在低频处模清洁器对强度噪声有放大作用. 这和已有的模清洁器抑制强度噪声的理论模型<sup>[18]</sup>不符. 为解释这一现象, 我们把模清洁器看作一个法布里-珀罗干涉仪, 由于延时干涉效应, 激光的部分相位噪声也转化成了强度噪声. 由相位噪声转化的相对强度噪声幅度与模清洁器的平均延迟时间、激光相干时间以及分析频率相关, 与模清洁器的锁定质量无直接关系. 将相位噪声转化的强度噪声和激光自身的强度噪声叠加之后, 利用模清洁器的噪声过滤理论模型很好地符合了实

\* 国家自然科学基金(批准号: Y133ZK1101, 11174282, 91336108)、中科院“西部之光”计划重点项目(批准号: 中科院人教字(2011)180号)、科技创新“交叉与合作团队”项目(批准号: 中科院人教字(2012)119号)和中组部“青年拔尖人才支持计划”项目(批准号: 组厅字[2013]33号)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: dongruifang@ntsc.ac.cn

验结果. 同时, 我们还研究了声光调制器对激光相位噪声的影响. 通过在光路中加入声光调制器进行反馈调制, 我们观察到从模清洁剂透射出的激光线宽从 26 kHz 压窄至 16 kHz, 意味着激光相位噪声略有减小, 从模清洁剂输出的激光强度噪声较无声光调制器反馈时有所减小, 与根据理论分析结果符合良好.

## 2 通常情况下的光学模清洁剂噪声过滤理论模型

通常情况下光学模清洁剂由一个三镜环形腔构成如图 1 所示: 输入镜和输出镜  $M_1$  和  $M_2$  是相同的两个平面高反镜,  $M_3$  为凹面全反镜.

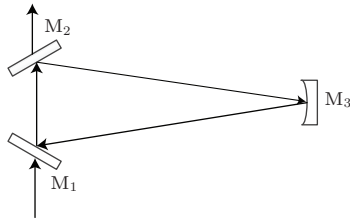


图 1 模清洁剂结构示意图

激光场强度噪声经过模清洁器的滤波特性, 可以通过一般的量子化两镜腔理论模型来描述 [18]:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{a}}(t) = & -\kappa\hat{a}(t) + \sqrt{2\kappa_1}\hat{a}_1(t) + \sqrt{2\kappa_2}\hat{a}_2(t) \\ & + \sqrt{2\kappa_l}\hat{a}_l(t), \end{aligned} \quad (1)$$

其中  $\hat{a}(t)$ ,  $\hat{a}_1(t)$ ,  $\hat{a}_2(t)$  和  $\hat{a}_l(t)$  分别表征内腔场、从  $M_1$  输入的真空场、从  $M_2$  输入的真空场以及对应内腔损耗的真空场的湮没算符.  $\kappa_1$ ,  $\kappa_2$ ,  $\kappa_l$  分别表征腔镜  $M_1$ ,  $M_2$  和腔内的损耗率. 为简化计算, 我们把  $M_3$  的损耗归入腔内损耗中, 则内腔总损耗为

$$\kappa = \kappa_1 + \kappa_2 + \kappa_l. \quad (2)$$

在不失一般性的条件下, 可对量子态的湮没算符进行线性近似, 即

$$\hat{a}(t) = \langle \hat{a}(t) \rangle + \delta\hat{a}(t), \quad (3)$$

其中  $\langle \hat{a}(t) \rangle$  为  $\hat{a}(t)$  的平均值,  $\delta\hat{a}(t)$  描述  $\hat{a}(t)$  的随机起伏. 将 (3) 式代入 (1) 式, 可以得到  $\delta\hat{a}(t)$  满足如下运动方程:

$$\begin{aligned} \delta\dot{\hat{a}}(t) = & -\kappa\delta\hat{a}(t) + \sqrt{2\kappa_1}\delta\hat{a}_1(t) \\ & + \sqrt{2\kappa_2}\delta\hat{a}_2(t) + \sqrt{2\kappa_l}\delta\hat{a}_l(t). \end{aligned} \quad (4)$$

对该式进行傅里叶变换再结合正交振幅起伏的定义  $\hat{X} = \hat{a} + \hat{a}^\dagger$ , 可以得到内腔的正交振幅起伏

$$\begin{aligned} \delta\hat{X}(\omega) = & \sqrt{2\kappa_1}\delta\hat{X}_1(\omega) + \sqrt{2\kappa_2}\delta\hat{X}_2(\omega) \\ & + \sqrt{2\kappa_l}\delta\hat{X}_l(\omega). \end{aligned} \quad (5)$$

结合输入输出关系 [18], 我们可得到输出场的正交振幅起伏:

$$\delta\hat{X}_{\text{out}}(\omega) = \sqrt{2\kappa_2}\delta\hat{X}(\omega) - \delta\hat{X}_2(\omega). \quad (6)$$

从 (5) 和 (6) 式以及强度噪声的定义

$$V_{\text{out}}(\omega) = \langle \delta\hat{X}_{\text{out}}^2(\omega) \rangle,$$

可以最终得到模清洁剂输出的强度噪声谱:

$$V_{\text{out}}(\omega) = \frac{\kappa_l^2 + \omega^2 + 4\kappa_1\kappa_2V_{\text{in}}(\omega) + 4\kappa_2\kappa_l}{\kappa^2 + \omega^2}, \quad (7)$$

其中  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  是分析频率. 实验中  $M_1$  和  $M_2$  是相同的镜片, 所以  $\kappa_1 = \kappa_2$ , 代入 (7) 化简可以得到下面关系式:

$$\frac{V_{\text{out}}(\omega) - 1}{V_{\text{in}}(\omega) - 1} = \frac{4\kappa_1^2}{\kappa^2 + \omega^2}. \quad (8)$$

由于光纤激光器输出的激光强度噪声起伏总是高于散粒噪声极限, 即  $V_{\text{out}}(\omega) > 1$ , 在所有分析频率上, 光学模清洁剂都能对噪声起到抑制作用, 并且频率越高, 效果越好.

## 3 模清洁剂所致激光相位噪声转化为强度噪声的理论模型

以上理论模型给出了激光强度噪声经过模清洁剂后的噪声抑制特性 [19,20]. 然而通常情况下, 光纤激光源不仅有额外的强度噪声, 还有额外的相位噪声 [21]. 研究表明 [22-24], 由于激光入射进 F-P 光学谐振腔后多次反射会产生具有类似于光纤延迟线的时延. 模清洁剂也是一种 F-P 光学谐振腔, 由于延时效应, 激光的相位噪声经过模清洁剂后可以转化成强度噪声. 根据理论计算 [25], 由激光相位噪声转换而来的相对强度噪声功率谱密度可表示为

$$\begin{aligned} S(\omega, \tau) = & \frac{1}{2} \frac{P_0^2 \tau_c}{1 + \omega + \Omega)^2} \left[ 1 - e^{-\frac{\tau}{\tau_c}} \left( \cos \omega \tau + \frac{\sin \omega \tau}{\omega \tau_c} \right) \right] \\ & + \frac{1}{2} P_0^2 \pi e^{-\frac{\tau}{\tau_c}} \text{Dirac}(\omega), \end{aligned} \quad (9)$$

其中  $\text{Dirac}(\omega)$  表示狄拉克函数.  $\tau_c$  为的相干时间, 对应激光源的线宽  $\Delta\nu = 1/\tau_c$ .  $\tau$  为模清洁器的平均延时, 定义为  $\tau = L/\gamma c$ , 其中  $L$  为模清洁器的腔

长,  $c$  是光速,  $\gamma = \pi/F$  是腔的平均单程损耗因子,  $F$  为腔的精细度. 从 (9) 式中可以得到, 转换的功率谱密度函数的大小与激光的线宽, 模清洁器的平均延时因子以及分析频率相关. 而激光的线宽是由激光的相位噪声决定的 [21], 相位噪声越小, 线宽越窄. 如图 2 所示为在不同  $\tau/\tau_c$  条件下, 由激光相位噪声转换的相对强度噪声功率谱. 我们可以看到, 随着  $\tau/\tau_c$  的增大, 转换的强度噪声功率谱从带有大幅低频调制的洛伦兹函数曲线 (对应  $\tau/\tau_c = 0.015$ , 如图 2(a) 所示) 变成带有小幅高频调制的洛伦兹函数曲线 (对应  $\tau/\tau_c = 0.15$ , 如图 2(b) 所示) 再到最后变成完全的洛伦兹函数曲线 (对应  $\tau/\tau_c = 1.5$ , 如图 2(c) 所示).

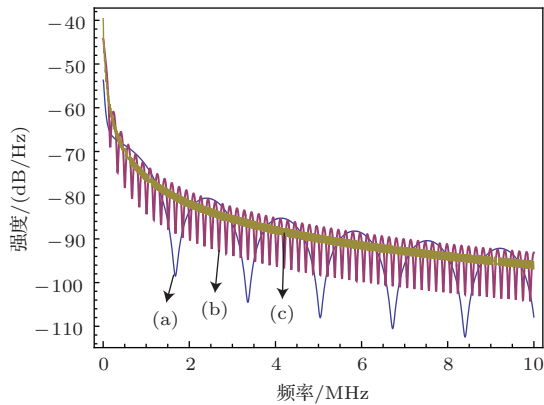


图 2  $S(\tau, \omega)$  在不同  $\tau/\tau_c$  下的计算模拟 (a)  $\tau/\tau_c = 0.015$ ; (b)  $\tau/\tau_c = 0.15$ ; (c)  $\tau/\tau_c = 1.5$

要注意的是, 图 2 中的各曲线是由模清洁器转化出的相对强度噪声 RIN, 单位为 dB/Hz. 加入到实际测得的噪声谱时, 需要乘以功率和测量时谱仪

的分辨率带宽 (RBW).

#### 4 实验装置及结果

我们开展了利用模清洁器抑制 1560 nm 单模光纤激光器强度噪声的实验研究, 实验装置如图 3 所示. 实验中使用的 1560 nm 单模光纤激光器由华南理工大学研制, 该激光器输出功率从 200 mW 到 2.5 W 可调. 激光器内置光隔离器, 以防止不必要的光反馈导致激光功率抖动. 光学模清洁器是利用不锈钢材料自制的一体化三镜环形腔体, 光学腔结构参考文献 [26] 设计, 光学腔长约为  $L = 0.5$  m. 输入镜和输出镜  $M_1$  和  $M_2$  的反射率均为 99.2%,  $M_3$  曲率半径为 0.5 m, 反射率为 99.95%.  $M_3$  附着在压电陶瓷上, 通过高压驱动压电陶瓷, 模清洁器的腔长随之改变. 模清洁器通过 PDH 稳频方法 [27] 被锁定在光纤激光源的最大透射峰上. 实验测得模清洁器的精细度约  $F = 1100$ .

我们把从锁定后的模清洁器输出的一部分光直接送入光电探测器, 利用示波器监视光电探测器的电压信号波动来观测输出激光的功率波动. 由于模清洁器的线宽较窄以及激光的频率抖动, 从锁定后模清洁器输出的激光有较大的起伏, 如图 4(a) 所示.

进一步, 我们利用光纤延迟线方法 [28] 测量了激光的线宽, 实验测得激光线宽  $\Delta\nu = 26$  kHz, 如图 5(a) 所示. 此时对应  $\tau/\tau_c = 0.015$ , 由激光相位噪声转化的相对强度噪声功率谱由图 2 中 (a) 曲线所示.

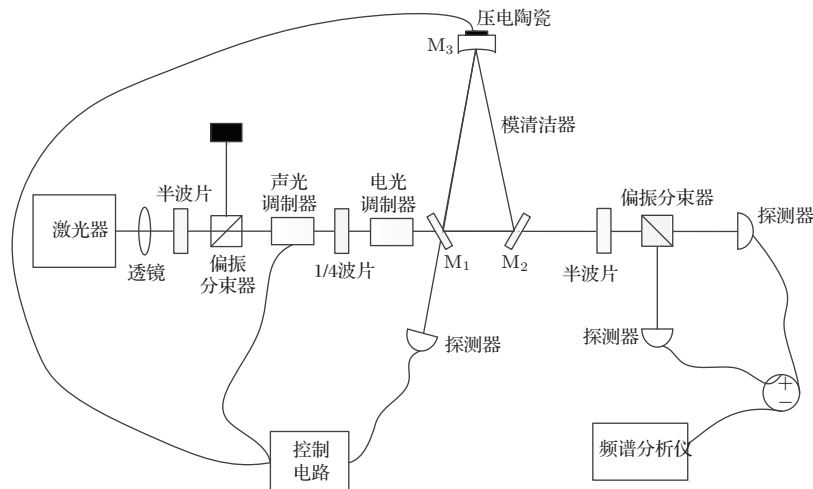


图 3 模清洁器后的噪声分析实验光路图

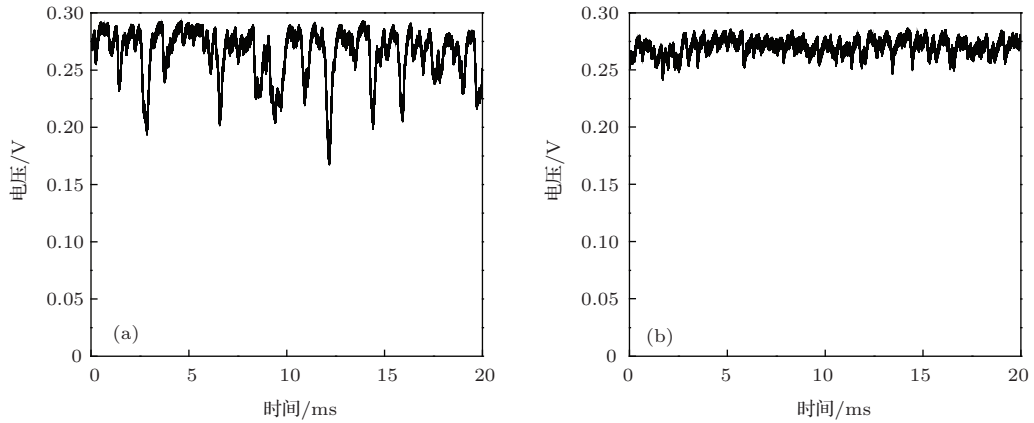


图4 利用光电探测器测量激光源的光功率随时间的变化 (a) 不加声光调制器; (b) 加声光调制器

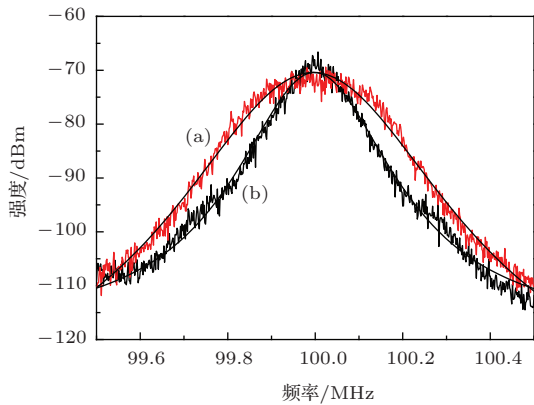


图5 (a) 没有声光调制器反馈时的激光线宽, 约为 26 kHz; (b) 加入声光调制器外调制反馈后的线宽, 约为 16 kHz

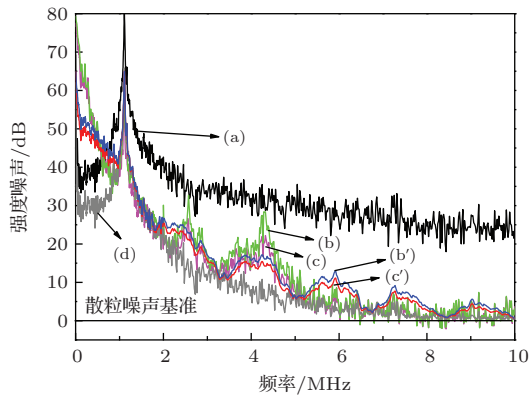


图6 利用平衡零拍探测器测量到的激光在 2 MHz 到 10 MHz 分析频率范围内的强度噪声曲线和理论拟合结果. 频谱仪 RBW=300 kHz, VBW=300 Hz. (a) 是测得的没有经过模清洁器前的噪声曲线; (b) 是测得的经过模清洁器后的噪声曲线; (c) 是测量到加入声光调制器外调制反馈后再经过模清洁器的噪声曲线; (d) 是根据 (a) 的数据和模清洁器对噪声的抑制 (7) 式理论计算得到的噪声曲线; (b') 和 (c') 分别是对应 (b) 和 (c) 用新的理论计算拟合得到的噪声曲线; 0 dB 线是散粒噪声基准

从模清洁器输出的激光进入平衡零拍探测系统进行强度噪声的探测. 经过光衰减, 进入平衡

零拍探测系统的 1560 nm 激光功率为 4 mW. 我们用频谱仪测量了 0 到 10 MHz 的分析频段范围内, 没有经过模清洁器和经过模清洁器过滤后的激光强度噪声曲线, 如图 6 中曲线 (a) 和 (b) 所示. 从图 6 可以清楚地看到, 模清洁器对于激光源的强度噪声抑制在 2 MHz 到 10 MHz 的大多数频段内大于 20 dB, 在 9 MHz 处强度噪声和散粒噪声基准重合. 但在 0—600 kHz 频段内, 曲线 (b) 明显高于 (a), 显示了模清洁器对激光强度噪声的放大作用. 并且, 曲线 (b) 随分析频率呈一定周期变化, 在频率 2.5 MHz, 4.2 MHz, 5.9 MHz, 7.6 MHz 处可明显观察到波峰. 图 6 中曲线 (d) 是根据图 4 (a) 的数据和 (7) 式进行理论拟合得到, 与实验结果在高频段有较好的符合, 但无法解释低频段激光强度噪声放大特性及 2—10 MHz 频段的激光强度噪声周期起伏特性. 我们进一步将激光相位噪声通过模清洁器所致强度噪声考虑在内, 即利用 (9) 式得到的 RIN 谱  $S(\tau, \omega)$  乘以激光功率 (约 4 mW) 的平方以及频谱仪的分辨率带宽 (RBW=300 kHz) 得到模清洁器引入的额外强度噪声, 加到图 4 的 (a) 曲线上, 再用 (7) 式进行噪声抑制, 得到了经过模清洁器总的噪声曲线, 如图 6 (b') 所示. 强度噪声谱线的周期特性由模清洁器的腔延时参数与激光相干时间决定. 由于激光相位噪声主要集中在低频段, 导致激光经过模清洁器后的低频强度噪声高于模清洁器前的激光强度噪声. 得到的拟合结果与实际测量结果在 0—10 MHz 范围内均符合良好. 在 0—600 kHz 实际强度噪声比理论结果要高, 我们认为这部分额外噪声是由于模清洁器的锁定带宽等导致的低频技术噪声, 可以通过改善反馈控制环路来降低.

为了进一步验证模清洁器由相位噪声转化引

入的强度噪声与模清洁剂锁定质量无直接关系,我们在模清洁剂前加入声光调制器外反馈调制.如图3所示,从模清洁剂反射的误差信号分出一部分经过PI电路后加到声光调制器的外调制端口,在实现声光调制器的快反馈调制下,我们观察到经过模清洁器的输出光功率波动有了较大的改善,如图4(b)所示.利用平衡零拍探测器测量得到的激光强度噪声谱如图6(c)所示,与图6(b')相比有所减小.激光线宽从26 kHz压窄到了16 kHz,如图5(b)所示,对应了激光相位噪声的降低,从而间接地降低了模清洁剂引入的强度噪声.利用本文给出的理论模型进行拟合,对应的理论拟合曲线如图6(c')所示,可以看到其与实验结果有着很好的符合.

## 5 结 论

我们通过对1560 nm单频光纤激光光源通过一个模清洁剂后的强度噪声进行分析研究,发现模清洁剂虽然对于激光的高频强度噪声有明显的抑制作用,但强度噪声谱随分析频率呈现周期变化,且从模清洁剂输出的激光强度噪声在低频处被放大.通过理论分析,我们给出这是由于模清洁剂会将激光的相位噪声转化为强度噪声输出.由激光相位噪声转化的强度噪声谱随分析频率的周期变化特性,即周期大小与变化幅度,由激光的相干时间与模清洁器的平均延时决定,与模清洁器的锁定质量无直接关系.根据本文提出的理论模型,我们获得了与实验测量结果符合良好的理论拟合.通过该研究,完善了光学模清洁剂对激光的噪声抑制模型.

## 参考文献

- [1] Rüdiger A, Schilling R, Schnupp L, Winkler W, Billing Hand Maischberger K 1981 *Opt. Acta* **28** 641
- [2] Skeldon K D, Strain K A, Grant A I, Hough J 1996 *Rev. Sci. Instrum.* **67** 2443
- [3] Willke B, Uehara N, Gustafson E K, Byer R L, King P J, Seel S U, Savage R L 1998 *Opt. Lett.* **23** 1704
- [4] Henning Vahlbruch, Moritz Mehmet, Simon Chelkowski, Boris Hage, Alexander Franzen, NicoLastzka, Stefan

- Goßler, KarstenDanzmann, Roman Schnabel 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 033602
- [5] Li Y, Luo Y, Pan Q, Peng K C 2006 *Acta. Phys. Sin.* **55** 5030 (in Chinese) [李莹, 罗玉, 潘庆, 彭堃堃 2006 物理学报 **55** 5030]
- [6] Hadjar Y, Cohadon P F, Aminoff C G, Pinard M, Heidmann A 1999 *arXiv: quant-ph/9901056v2*
- [7] Zhang T C, Goh K W, Chou C W, Lodahl P, Kimble H J 2003 *Phys. Rev. A* **67** 033802
- [8] 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]
- [9] Takao Aoki, Go Takahashi, Tadashi Kajiya, Jun-ichi Yoshikawa, Samuel L. Braunstein, Peter van Loock, Akira Furusawa 2008 *arXiv: quant-ph/0811373v1*
- [10] Lance A M, Symul T, Bowen W P, Sanders B C, Lam P K 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 177903
- [11] Harry M 2010 *Class. Quantum Grav.* **27** 084006
- [12] Acernese F 2008 *Class. Quantum Grav.* **25** 114045
- [13] Kuroda K 2010 *Class. Quantum Grav.* **27** 084004
- [14] Emmanuel Desurvire, Simpson R 1989 *J. Lightwave Technol.* **7** 835
- [15] Kang Z X, Cai X L, Wen X D, Liu C, Jian S S, Yu S Y 2014 *Chin. Phys. B* **23** 024203
- [16] Wu Y X, Ma X M, Zhao X J 2008 *Acta Optica Sinica* **28** 1057 (in Chinese) [吴粤湘, 马晓明, 赵晓吉 2008 光学学报 **28** 1057]
- [17] Xia J Z, Qu R H, Cai H W, Chen G T, Fang j z 2004 *Chinese J. Lasers* **31** 807 (in Chinese) [夏江珍, 瞿荣辉, 蔡海文, 陈高庭, 方祖杰 2004 中国激光 **31** 807]
- [18] Collett M J, Gardiner C W 1984 *Phys. Rev. A* **30** 1386
- [19] White A G, Taubman M S, Ralph T C, Lam P K, McClelland D E, Bachor H A 1996 *Phys. Rev. A* **54** 3400
- [20] Liu K, Cui S Z, Zhang H L, Zhang J X, Gao J R 2011 *Chin. Phys. Lett.* **28** 074211
- [21] Henry C H 1982 *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-18** 259
- [22] Armstrong J A 1966 *J. Opt. Soc. Am.* **56** 1024
- [23] Mohammad Reza Salehi, BéatriceCabon 2004 *J. Lightwave Technol.* **22** 1510
- [24] Shafir E, Tur M 1987 *J. Opt. Soc. Am. A* **4** 77
- [25] Richter L E, Mandelberg H I, Kruger M S, Mcgrath P A 1986 *IEEE J. Quantum. Electron.* **QE-22** 2070
- [26] Shi Z, Su X L 2010 *Acta Sinica Quantum Optica* **16** 158 (in Chinese) [石柱, 苏晓龙 2010 量子光学学报 **16** 158]
- [27] Drever R W P, Hall J L, Kowalski F V 1983 *Appl. Phys. B* **31** 97
- [28] Okoshi T, Kikuchia K, Nakayama 1980 *Electron. Lett.* **16** 830

# Intensity noise analysis of a fibre laser after passing through an optical mode cleaner\*

Tai Zhao-Yang<sup>1)2)</sup> Hou Fei-Yan<sup>1)</sup> Wang Meng-Meng<sup>1)2)</sup> Quan Run-Ai<sup>1)</sup> Liu Tao<sup>1)</sup>  
 Zhang Shou-Gang<sup>1)</sup> Dong Rui-Fang<sup>1)†</sup>

1) (*Key Laboratory of Time and Frequency Primary Standards, National Time Service Center, Chinese Academy of Science, Xian 710600, China*)

2) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

( Received 22 March 2014; revised manuscript received 20 May 2014 )

## Abstract

The intensity noise in a 1560 nm single frequency fiber laser after passing through an optical mode cleaner is analyzed both theoretically and experimentally. Experimental measurement shows that in addition to the evident suppression of intensity noise by the mode cleaner, there exist induced observable periodic fluctuations in the analyzing frequency range of 2 to 12 MHz, as well as the amplification of the intensity noise at low frequencies. The above results cannot be explained by the present mode cleaner model for noise suppression. In this paper, we propose a new theoretical model, in which the mode cleaner is considered equivalent to a delay line and through it the phase-noise of the fiber laser is partially converted to the intensity noise. The phase-induced relative intensity noise (RIN) amplitude is jointly determined by the laser linewidth, the mode cleaner linewidth, and the analyzing frequency. The theoretical analysis shows a very good agreement with the experimental results. The noise suppression effect of the acoustic optical modulator is further analyzed by inserting it into the setup and providing a frequency modulation for it. We have observed an evident improvement of the mode cleaner locking, while the bandwidth of the laser is slightly suppressed from 26 to 16kHz, and the degradation of the measured intensity noise after the mode cleaner is also moderate. The theoretical analysis according to our proposed model fits well with this result. This result further confirms that the phase-induced intensity noise has no direct connection to the mode cleaner locking quality. Through the above analysis, a complete theoretical mode for analyzing the noise suppression by a mode cleaner is built.

**Keywords:** mode cleaner, intensity noise, phase-induced intensity noise, linewidth

**PACS:** 42.50.Lc, 42.50.Xa, 42.55.Wd

**DOI:** 10.7498/aps.63.194203

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11174282, 61127901, 91336108), the Fund from the First "Youth Top-notch Talent" Program of Organization Department of the CPC Central Committee (Grant No.(2011)180), the Key Fund for the "Western Light" Talent Cultivation Plan of the CAS, China (Grant NO.(2012)119), and the "Cross and Cooperative" Science and Technology Innovation Team Project of the CAS, China (Grant No.[2013]33).

† Corresponding author. E-mail: [dongruifang@ntsc.ac.cn](mailto:dongruifang@ntsc.ac.cn)