

## 光纤 $1/f$ 热噪声的实验研究

黄军超 汪凌珂 段怡菲 黄亚峰 刘亮 李唐

### Experimental study on $1/f$ intrinsic thermal noise in optical fibers

Huang Jun-Chao Wang Ling-Ke Duan Yi-Fei Huang Ya-Feng Liu Liang Li Tang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 054205 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20181838

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181838>

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

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

基于 $1/f$ 噪声的NPN晶体管辐照感生电荷的定量分离

Quantitative separation of radiation induced charges for NPN bipolar junction transistors based on  $1/f$  noise model

物理学报. 2015, 64(13): 136104 <https://doi.org/10.7498/aps.64.136104>

基于量子增强型光纤马赫-曾德干涉仪的低频信号测量

Measurement of low-frequency signal based on quantum-enhanced fiber Mach-Zehnder interferometer

物理学报. 2018, 67(24): 244202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181335>

基于游标效应的增敏型光纤法布里-珀罗干涉仪温度传感器

Sensitivity-enhanced temperature sensor with fiber optic Fabry-Perot interferometer based on vernier effect

物理学报. 2017, 66(9): 94205 <https://doi.org/10.7498/aps.66.094205>

基于原子干涉仪的微观粒子弱等效原理检验

Test of weak equivalence principle of microscopic particles based on atom interferometers

物理学报. 2018, 67(16): 160402 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180621>

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): 24203 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171542>

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

Multi-resolution intrusion localization algorithm through cepstrum in distributed fiber optic Sagnac interferometer

物理学报. 2016, 65(4): 44210 <https://doi.org/10.7498/aps.65.044210>

# 光纤 $1/f$ 热噪声的实验研究\*

黄军超<sup>1)2)</sup> 汪凌珂<sup>1)2)</sup> 段怡菲<sup>1)2)</sup> 黄亚峰<sup>1)2)</sup> 刘亮<sup>1)</sup> 李唐<sup>1)†</sup>

1) (中国科学院上海光学精密机械研究所, 量子光学重点实验室, 上海 201800)

2) (中国科学院大学, 北京 100049)

(2018 年 10 月 11 日收到; 2018 年 11 月 11 日收到修改稿)

光纤热噪声是限制光纤传感、测量系统性能的最终因素. 但是低频区域呈  $1/f$  谱特性的光纤热噪声的形成机制迄今仍然存在争论. 实验研究了光纤  $1/f$  热噪声水平与光纤内杂质离子浓度和光纤施加张力的关系, 验证了这类热噪声来源于光纤内部的机械耗散引起的长度自发动抖, 符合热机械噪声的理论假设.

**关键词:** 光纤光学, 热噪声, 干涉仪

**PACS:** 42.81.-i, 05.40.-a, 07.60.Ly

**DOI:** 10.7498/aps.68.20181838

## 1 引言

光纤因为具有体积小、质量轻、灵敏度高、抗腐蚀、抗电磁干扰等优点, 被广泛应用于光纤传感<sup>[1-4]</sup>、光纤通信<sup>[5]</sup>、光纤延迟线稳频激光器<sup>[6]</sup>等领域. 这些基于光纤应用的系统, 其性能的提高最终受限于光纤本征热噪声, 因此研究光纤热噪声的产生机制具有重要意义.

近三十年来, 国内外研究人员对光纤热噪声进行了大量卓有成效的理论和实验研究. 1989 年, Glenn<sup>[7]</sup> 首次提出由于热力学扰动光在光学媒介中传播时会产生相位抖动, 并初步推导了由此导致的相位噪声的功率谱密度. 1992 年, Wanser<sup>[8]</sup> 根据光纤的边界条件推导了在光纤中传播的光由于光纤介质热力学扰动而导致的相位起伏. 2007 年, Foster 等<sup>[9]</sup> 通过对光纤激光器中增益光纤的热力学分析, 推导出增益光纤热噪声的公式, 得到与无源光纤一致的结果. 在实验方面, Kersey<sup>[10]</sup>, Foster 等<sup>[11]</sup>, Bartolo 等<sup>[12]</sup>, Dong 等<sup>[13]</sup> 进行了测量光纤热噪声的实验, 结果表明在傅里叶频率大于 10 kHz 的高频区域, 理论与实验数据符合得非常好, 但是

在低频区域, Wanser 公式预测噪声谱与频率无关, 这与实验结果并不符合. 在实验中, 低频区域的光纤热噪声呈  $1/f$  ( $f$  为傅里叶频率) 谱分布, 这表明光纤热噪声可能存在不止一种产生机制. 针对这种现象, Foster 等<sup>[11,14]</sup> 首先提出光纤内部掺杂离子自发辐射的熵扰动是光纤热噪声的另一种来源. 在测量增益光纤热噪声的实验中, 发现热噪声与温度的平方具有相关性, 与该理论的预测相符. 但是在无源光纤中, 这个理论还未被验证. 在此之后, Duan<sup>[15,16]</sup> 基于机械耗散涨落理论提出了热机械噪声理论, 认为机械耗散导致光纤长度的自发动抖是光纤热噪声的一种产生机制. 在 Dong 等<sup>[13]</sup> 的实验中, 测量的光纤  $1/f$  热噪声的幅值与热机械噪声理论预测较接近, 但是并无直接证据证明光纤的机械耗散是热噪声的来源.

证明光纤  $1/f$  热噪声是否来自于内部杂质离子的自发辐射或者机械耗散, 最直接的方法就是检验热噪声幅度和温度  $T$  的关系. 前者与温度  $T$  的平方成比例关系, 而后者与温度  $T$  成线性关系. 但是, 这个检验实验在目前情况下难以完成, 主要是因为光纤在低温区域其机械特性和光学特性都将发生变化<sup>[17,18]</sup>, 进而对测量结果产生影响. 本文在

\* 国家自然科学基金 (批准号: 11604353, 11704391) 和中国科学院重点部署项目 (批准号: KJZD-EW-W02) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: litang@siom.ac.cn

实验上研究了可能影响光纤  $1/f$  热噪声的几个物理因素. 通过对比不同杂质离子浓度的光纤热噪声水平, 排除了光纤内部杂质离子自发辐射引入熵扰动作为光纤  $1/f$  热噪声的产生机制的假设. 通过改变光纤加载的张力而改变光纤的机械损耗角, 发现可以改变光纤  $1/f$  热噪声, 由此判断这类热噪声是来源于由光纤内部机械耗散引起的光纤长度自发起伏. 这有助于深入理解光纤  $1/f$  热噪声的本质, 并为如何降低这种热噪声提供可能的途径, 从而可以从根本上提高基于光纤介质的测量、传感等应用系统的极限精度.

## 2 光纤 $1/f$ 热噪声的理论

目前解释光纤  $1/f$  热噪声来源的理论有两个, 第一个是 Foster 提出的光纤内部掺杂离子自发辐射的熵扰动理论, 他推导了掺铒光纤的热噪声公式:

$$S_{\text{Er}}(f) = \frac{(\alpha_l k_B T N \lambda^2 s_1)^2}{128 \pi^2 \Delta \lambda (\alpha_l + g_l)^2 \tau k_l c_v f}, \quad (1)$$

$\alpha_l$  和  $g_l$  分别是增益介质的吸收和辐射系数,  $N$  是离子掺杂浓度,  $\lambda$  是标称激光波长,  $k_B$  是玻尔兹曼常数,  $k_l$  是光纤介质的热传导系数,  $\Delta \lambda$  是辐射带宽,  $\tau$  是自发辐射寿命,  $c_v$  是光纤介质的热容,  $s_1$  是一个无量纲常数. 该理论预测这种光纤热噪声在频谱上呈  $1/f$  特性, 并且热噪声的水平与离子掺杂浓度  $N$  的平方呈正比关系.

第二个理论是 Duan 提出的热机械噪声理论, 认为机械耗散导致光纤长度的自发扰动是光纤  $1/f$  热噪声的产生机制, 其噪声功率谱密度函数可以表示为

$$S_L(f) = \frac{2k_B T L \Phi_0}{3\pi Y A f}, \quad f < \frac{v_a}{L}, \quad (2)$$

$\Phi_0$  和  $Y$  分别是光纤的机械损耗角和杨氏模量,  $L$  是光纤的长度,  $A$  是光纤的截面积,  $v_a$  是声波在光纤中的传播速度. 当  $f = \frac{nv_a}{L}$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ) 时, 噪声功率谱密度有极大值, 在频谱上表现为一个个尖峰. 该理论预测热噪声的水平与光纤的机械损耗角呈正比关系.

## 3 测量装置与基本工作原理

测量光纤热噪声的实验装置如图 1 所示. 该实验测量装置采用等臂外差式迈克耳孙干涉仪. 采用

外差探测方法是因为其可以避免激光强度噪声、探测噪声等基带噪声带来的干扰.

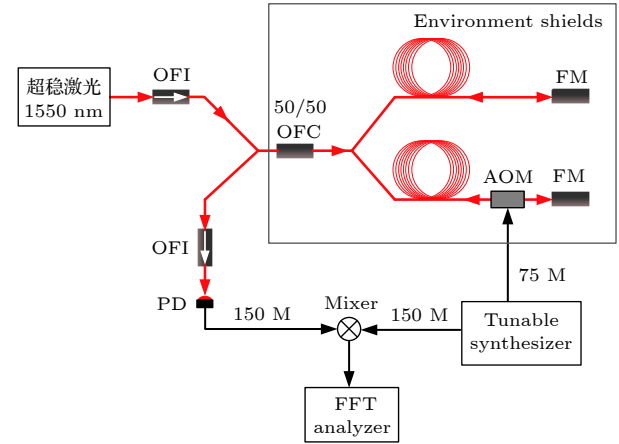


图 1 测量光纤热噪声的实验装置 (OFI, 光纤隔离器; OFC, 光纤耦合器; FM, 法拉第反射镜; PD, 光电管; FFT, 快速傅里叶变换分析仪; AOM, 声光调制器)

Fig. 1. Experimental setup for measuring intrinsic thermal noise in optical fibers (OFI, optical fiber isolator; OFC, optical fiber coupler; FM, Faraday mirror; PD, photodiode; FFT, fast Fourier transform; AOM, acousto-optical modulator).

实验中超稳激光器作为激光光源, 输出波长为 1550 nm 的窄线宽稳频激光, 通过光纤隔离器 (OFI) 进入光纤耦合器 (OFC), 分为两路光, 分别进入等臂迈克耳孙干涉仪的两臂. 其中一路激光经过声光调制器 (AOM) 进行 75 MHz 移频, 另一路光不移频. 干涉仪的输出信号经过一个光纤隔离器 (OFC) 由光电管 (PD) 探测得到频率为 150 MHz 的外差拍频信号. 干涉仪中的法拉第反射镜 (FM) 保证激光信号在往返经过干涉仪后偏振保持不变, 从而保证干涉仪的拍频信号始终在最大值. 为了更好地抑制基带噪声, 外差频率通常选在远离基带的频率, 基于这种考虑, 我们采用 75 MHz 射频信号驱动声光调制器.

激光在干涉仪两臂的光纤中传播时, 光纤的热噪声会对激光的相位产生扰动. 由于光纤热噪声是非相干的, 当干涉仪两臂的激光信号进行合束输出时, 输出光相位就叠加了干涉仪两臂光纤的热噪声. 这个叠加的相位抖动会调制外差输出的 150 MHz 射频信号, 表现为射频信号的相位噪声. 利用同源信号作为参考的频率综合器提供另一路 150 MHz 信号作为解调信号, 就可以提取出由干涉仪两臂光纤热噪声引起的相位起伏. 利用 FFT 谱分析仪对混频器输出的基带信号进行频谱分析即可得到相

位噪声功率谱密度.

之所以采用等臂迈克耳孙干涉仪作为测量工具是为了尽可能地减少光源频率噪声对结果的影响. 在实验中, 迈克耳孙干涉仪的两个干涉臂的长度差小于 1 m, 与此同时我们使用具有极低噪声的超稳激光器作为光源, 使得来自光源的噪声比测量结果要小 50 dB, 影响可以忽略不计. 除此之外, 还采取了很多环境噪声隔离措施: 例如采用真空密封光纤干涉仪可有效地隔离声波干扰和温度起伏; 利用隔振平台可以隔离振动噪声; 采取主动温控和被动隔温措施以减小温度起伏的扰动. 这些措施能大大降低环境噪声对实验的影响.

在进行光纤热噪声测量之前, 我们对测试系统的噪声来源进行了测试和评估, 测试结果如图 2 所示. 系统中的 4 项主要噪声: 射频频率综合器噪声 (红色曲线), 激光光源噪声 (粉色曲线), FFT 频谱分析仪噪声 (深黄色曲线) 和光电探测器散粒噪声 (蓝色曲线), 均远低于 (至少 20 dB) 测量的 134 m 光纤的热噪声 (黑色曲线). 因此, 在测试过程中, 这些噪声的影响都可以忽略.

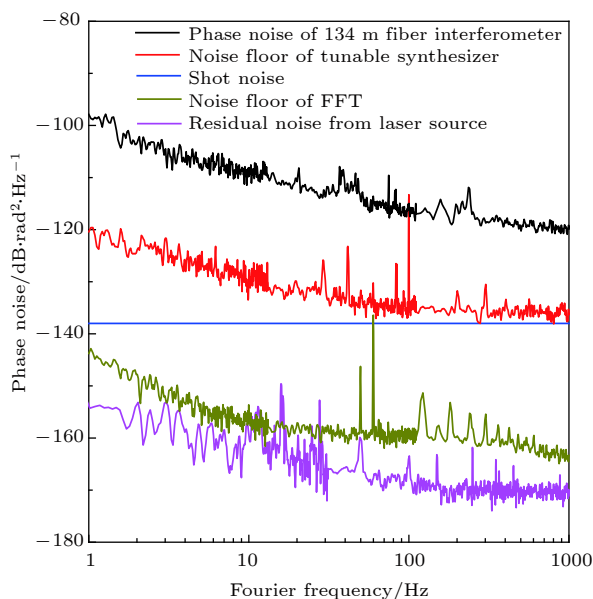


图 2 测量系统的噪声来源  
Fig. 2. Contributing noise sources of the measurement system.

## 4 实验结果与讨论

### 4.1 光纤 $1/f$ 热噪声与光纤内部杂质离子浓度的关系

普通单模光纤中主要存在的杂质离子有调节

折射率的杂质离子 (锗离子、氟离子等) 与氢氧根 ( $\text{OH}^-$ ) 离子. 相较于这两种杂质离子, 其他杂质离子的浓度可以忽略不计. 实验分为两个部分: 首先是测量光纤  $1/f$  热噪声与调节折射率杂质离子浓度的关系; 其次是测量光纤  $1/f$  热噪声与氢氧根离子浓度的关系. 在第一个实验中我们采用两种样品光纤, 分别是 SMF-28 光纤和纯硅芯光纤, 长度均为 134 m. SMF-28 光纤是常规单模光纤, 其纤芯由于掺杂  $\text{GeO}_2$  而比纯石英的包层具有较高的折射率, 从而实现全反射条件. 纯硅芯光纤的纤芯是纯石英制备, 包层掺杂氟离子降低折射率, 纤芯的折射率同样高于包层. 两种光纤对照实验的结果如图 3 所示, 两种不同纤芯的光纤热噪声水平基本一致 (在测量时, 两种光纤均被施加了 0.1 N 的张力, 所以测量的噪声水平和下面没有施加张力的载氢实验结果不同, 张力的影响会在后文叙述. 此外, 需要说明的是 30—300 Hz 范围内出现的噪声尖峰是由环境振动及交流电引起的干扰). 这表明光纤  $1/f$  热噪声水平与这类调节折射率杂质离子浓度 (锗离子、氟离子) 之间没有关系.

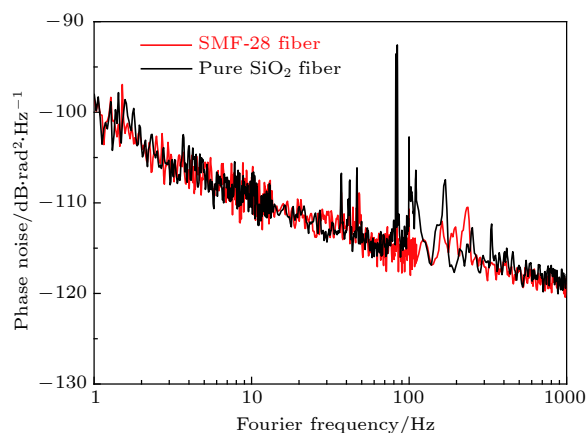


图 3 SMF-28 光纤与纯硅芯光纤热噪声测量结果  
Fig. 3. Measured intrinsic thermal noise in SMF-28 fibers and pure  $\text{SiO}_2$  fibers.

在验证光纤  $1/f$  热噪声与氢氧根离子浓度关系的实验中, 首先要制备具有不同氢氧根离子浓度的光纤. 当光纤被放置在氢气氛围中, 氢气分子会扩散进光纤内部, 并会和光纤玻璃结构的缺陷发生化学反应, 产生氢氧根离子<sup>[19–21]</sup>. 氢氧根离子的浓度  $\alpha$  由下式给出<sup>[22]</sup>:

$$\alpha = \alpha' [1 - \exp(-kP_{\text{H}_2}t)], \quad (3)$$

其中  $k = B \exp[-E_a/(RT)]$ ,  $B$  是特征因子,  $E_a$  是活

化能,  $R$  是气体常数,  $\alpha'$  为光纤玻璃结构的缺陷浓度,  $P_{H_2}$  是氢气分压,  $t$  是反应时间. 上式表明在一定温度和氢气分压条件下, 氢氧根离子浓度随反应时间成正比增加. 利用这种方法可以来制备不同氢氧根浓度的光纤.

在光纤载氢实验中, 分别将 3 卷 134 m 长的 SMF-28 样品光纤放入一个标准大气压, 温度为 80 °C 的氢气氛围里进行反应. 反应时间分别为 12, 24 和 48 h. 然后测量这 3 卷光纤的热噪声, 并与没有和氢气反应的 SMF-28 光纤进行对照. 测量结果如图 4 所示, 黑色线、红色线、蓝色线、绿色线分别代表没有载氢的光纤和载氢时间为 12, 24, 48 h 的光纤的热噪声测量结果. 可以明显看出, 这 4 种样品光纤的热噪声水平在测量误差范围内相同. 这个结果充分表明改变氢氧根离子浓度不会改变光纤的热噪声水平. 综合分析以上两个实验, 可以得到这样的结论: 在无源光纤中, 不存在由杂质离子随机宽带自发辐射引入熵扰动而导致光纤  $1/f$  热噪声这样的机制.

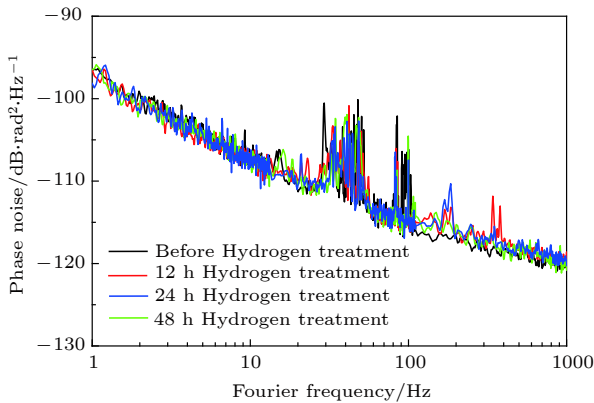


图 4 不同反应时间下的光纤本征热噪声测量结果  
Fig. 4. Measured intrinsic thermal noise in optical fibers with different Hydrogen treatment.

## 4.2 光纤 $1/f$ 热噪声与光纤张力的关系

当光纤受到外部施加拉力的情况下, 它的机械损耗角  $\Phi_F$  会发生变化, 与机械拉力  $F$  满足以下关系<sup>[23,24]</sup>:

$$\Phi_F = \frac{\Phi_0}{1 + \frac{2L\sqrt{F}}{\sqrt{YI}}}, \quad (4)$$

式中  $\Phi_F$  是在受到机械拉力  $F$  时光纤的机械损耗角,  $I$  为光纤的横截面惯性矩. 如果通过改变光纤

加载的张力可以使得光纤  $1/f$  热噪声水平发生变化, 就可以验证光纤  $1/f$  热噪声与光纤机械损耗角相关, 进而确定其产生于内部机械耗散引起的光纤长度的自发起伏.

在实验中我们将 134 m 的 SMF-28 光纤以 0.1 N 的张力绕在一个光纤支架上, 测量其热噪声并与测量的无张力状态下光纤的热噪声进行比较. 测量结果如图 5 所示, 黑色曲线为无张力状态下光纤热噪声测量结果, 红色曲线是张力为 0.1 N 状态下的测量结果. 在低频段, 无张力状态下的热噪声水平明显比张力为 0.1 N 状态下的热噪声水平高约 3 dB 左右. 而在高频段, 两条曲线基本重合, 这是由于在该频段内热力学扰动噪声起主导作用, 而光纤的张力状态变化并不会改变光纤介质的热力学性质. 实验结果表明, 张力改变了光纤的机械损耗角进而改变了光纤  $1/f$  热噪声水平.

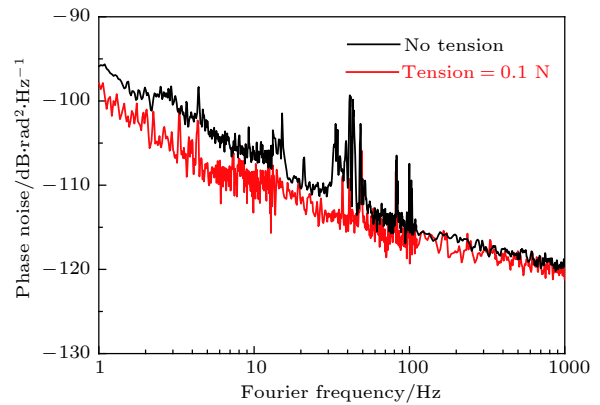


图 5 无张力与受张力 0.1 N 状态下的光纤本征热噪声测量结果  
Fig. 5. Measured thermal noise in free fibers and fibers under 0.1 N tension.

除此之外, 我们将光纤的张力增加至 0.2, 0.8, 4.0 N, 并分别测量它们的热噪声水平. 测量结果如图 6 所示, 图中黑色曲线、红色曲线、绿色曲线、蓝色曲线分别代表 0.1, 0.2, 0.8 和 4 N 张力的测量结果. 这组对照实验结果表明继续增大张力并不会明显改变光纤热噪声水平.

这是因为实验中光纤的机械损耗角不仅受到张力  $F$  的影响, 还与光纤的弯曲状态相关. (4) 式是在只有光纤拉伸的情况下推导的, 没有考虑光纤弯曲因素的影响. 而光纤弯曲会带来额外的耗散<sup>[16]</sup> 而增大机械损耗角, 在这种情况下, (4) 式可改写为

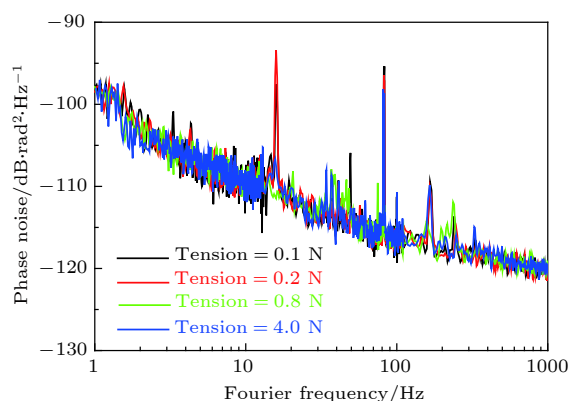


图 6 不同张力情况下 SMF-28 光纤本征热噪声测量结果

Fig. 6. Measured thermal noise in fibers under different tensions.

$$\Phi_F = \frac{\Phi_0}{1 + \frac{2L\sqrt{F}}{\sqrt{YI}}} + \Phi^*, \quad (5)$$

式中  $\Phi^*$  是由于光纤弯曲而额外带来的机械损耗角. 由 (5) 式可知, 当光纤从不受拉力状态到受到拉力  $F$  的状态时, 机械损耗角  $\Phi_F$  将会下降. 另一方面, 弯曲状态下光纤机械损耗角  $\Phi_F$  对拉力  $F$  存在饱和效应, 即增大拉力, 机械损耗角降低的幅度变小, 从而最终停留在由弯曲带来的额外耗散上. 以上分析更多的是从定性的角度, 因为由弯曲引入的附加机械损耗角  $\Phi^*$  还没有相应的理论做定量计算. 尽管如此, 本实验验证了光纤  $1/f$  热噪声与施加在光纤上的张力有直接关系, 进而表明, 改变光纤的机械损耗角可以改变光纤  $1/f$  热噪声水平, 这与 Duan 提出的热机械噪声理论是符合的. 因此, 可以确定光纤  $1/f$  热噪声来源于其内部的机械耗散导致的长度自发抖动. 但是, 本实验中并未观测到热机械噪声理论所预测的当傅里叶频率  $f = \frac{nv_a}{L}$  ( $n = 1, 2, 3 \dots$ ) 时热噪声频谱会出现尖峰的现象. 这表明光纤的热机械噪声理论仍有有待完善的地方, 需要进一步的研究.

## 5 结 论

本文通过实验研究了光纤  $1/f$  热噪声水平与

光纤内杂质离子浓度和光纤施加张力的关系, 验证了这类热噪声的形成机制, 确定其来源于光纤内部的机械耗散引起的长度自发抖动, 符合热机械噪声的理论假设. 这为进一步研究如何降低光纤  $1/f$  热噪声, 提高基于光纤介质的传感、测量系统的极限精度奠定了基础.

## 参考文献

- [1] Giallorenzi T G, Bucaro J A, Dandridge A, Sigel G H, Rashleigh S C, Priest R G 1985 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **30** 472
- [2] Murphy K A, Gunther M F, Vengsarkar A M, Claus R O 1991 *Opt. Lett.* **16** 273
- [3] Yuan L B, Zhou L M, Jin W 2000 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **49** 779
- [4] Lee B 2003 *Opt. Fiber Technol.* **9** 57
- [5] Argyris A, Syvridis D, Larger L, Amovazzi-Lodi V, Colet P, Fischer I, Garcia-Ojalvo J, Mirasso C R, Pesquera L, Shore K A 2005 *Nature* **438** 343
- [6] Dong J, Hu Y Q, Huang J C, Ye M F, Qu Q Z, Li T, Liu L 2015 *Appl. Opt.* **54** 1152
- [7] Glenn W H 1989 *IEEE J. Quantum Electron.* **25** 1218
- [8] Wanser K H 1992 *Electron. Lett.* **28** 53
- [9] Foster S, Tikhomirov A, Milnes M 2007 *IEEE J. Quantum Electron.* **43** 378
- [10] Kersey A D 1996 *Opt. Fiber Technol.* **2** 291
- [11] Foster S, Cranch G A, Tikhomirov A 2009 *Phys. Rev. A* **79** 053802
- [12] Bartolo R E, Tveten A B, Dandridge A 2012 *IEEE J. Quantum Electron.* **48** 720
- [13] Dong J, Huang J C, Li T, Liu L 2016 *Appl. Phys. Lett.* **108** 021108
- [14] Foster S 2008 *Phys. Rev. A* **78** 013820
- [15] Duan L Z 2010 *Electron. Lett.* **46** 1515
- [16] Duan L Z 2012 *Phys. Rev. A* **86** 023817
- [17] White G K 1973 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **6** 2070
- [18] Reid M B, Ozcan M 1998 *Opt. Eng.* **37** 237
- [19] Kuwazuru M, Namihira Y, Mochizuki K, Iwamoto Y 1988 *J. Lightwave Technol.* **6** 18
- [20] Tanaka S, Kyoto M, Watanabe M, Yokota H 1984 *Electron. Lett.* **20** 283
- [21] Plotnichenko V G, Ivanov G A, Kryukova E B, Aksenov V A, Sokolov V O, Isaev V A 2005 *J. Lightwave Technol.* **23** 341
- [22] Zhao Y, Meng Q Y 2007 *Opto-Electron. Eng.* **34** 9 (in Chinese) [赵勇, 孟庆尧 2007 光电工程 **34** 9]
- [23] Bell C J 2014 *Ph.D. Dissertation* (Glasgow: University of Glasgow)
- [24] Saulson P R 1990 *Phys. Rev. D* **42** 2437

# Experimental study on $1/f$ intrinsic thermal noise in optical fibers<sup>\*</sup>

Huang Jun-Chao<sup>1)2)</sup> Wang Ling-Ke<sup>1)2)</sup> Duan Yi-Fei<sup>1)2)</sup> Huang Ya-Feng<sup>1)2)</sup>  
Liu Liang<sup>1)</sup> Li Tang<sup>1)†</sup>

1) (*Key Laboratory of Quantum Optics and Center of Cold Atom Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*)

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

( Received 11 October 2018; revised manuscript received 11 November 2018 )

## Abstract

Intrinsic thermal noise in optical fibers is an ultimate factor limiting the performances of fiber-based sensors and measurement systems. Therefore, it is important to have a thorough understanding of this kind of noise. However, the mechanism of the intrinsic thermal noise which has a  $1/f$  spectral density remains unclear so far. There are two theoretical models to explain the mechanism of this kind of noise: thermoconductive noise model and thermomechanical noise model. The thermoconductive noise model states that the noise is caused by diffusion of local entropy fluctuations associated with random spontaneous emission events, while the thermomechanical noise model says that the noise is caused by spontaneous fluctuations of fiber length induced by mechanical dissipation. Which theoretical model is correct is still an open question. In this paper, we experimentally investigate the intrinsic thermal noise in optical fibers by using a balanced fiber Michelson interferometer with heterodyne detection technique. When a fiber-stabilized laser with ultralow frequency noise is used as a laser source and other noise sources are carefully controlled, the  $1/f$  spectral intrinsic thermal noise can be observed down to infrasonic frequency. According to these measurements, in order to verify which theoretical model is the mechanism of generating the intrinsic thermal noise with  $1/f$  spectral density, we study the relationship between the level of the intrinsic thermal noise and the concentration of the dopant in fibers and the applied tension of fibers. We observe that the level of the  $1/f$  spectral intrinsic thermal noise is independent of the concentration of the dopant in fibers. This means that the thermoconductive noise model is not suitable to this case. We also observe that the level of the  $1/f$  spectral intrinsic thermal noise can be reduced by increasing the tension exerted on the optical fibers. Because the mechanical loss of a fiber can be lower than the loss of the material which the fiber is made of when the fiber is subjected to a certain tension, this observation proves the fact that the  $1/f$  spectral intrinsic thermal noise in optical fibers originates from the mechanical dissipation process inside optical fibers. This is consistent with the predictions of the thermomechanical noise model. Finally, the inconsistency between the experimental data and the theoretical results for thermomechanical noise is discussed.

**Keywords:** optical fibers, thermal noise, interferometers

**PACS:** 42.81.-i, 05.40.-a, 07.60.Ly

**DOI:** 10.7498/aps.68.20181838

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11604353, 11704391) and the Key Research Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. KJZD-EW-W02).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [litang@siom.ac.cn](mailto:litang@siom.ac.cn)