

放大自发辐射光噪声的加速老化研究

王海艳^{1,2} 张雅婷^{1,2*} 金露凡^{1,2} 宋效先^{1,2} 姚建铨^{1,2}

¹天津大学精密仪器与光电子工程学院激光与光电子研究所, 天津 300072

²光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072

摘要 掺铒光纤放大自发辐射(ASE)光源广泛应用于光纤传感、通信、精密测量等领域。光噪声在长期连续工作时对后续检测或测量系统的精度和灵敏度影响很大,但至今少见报道。在此,利用加速老化系统对 ASE 光源的光路部分进行 343 K 加速老化实验,并在过程中原位监视了其光噪声的演化情况。根据阿伦尼斯模型,换算得到 ASE 光源在室温环境下连续工作期间,前 3200 h 内其光信号噪声下降了约 $0.0743 \mu\text{V}^2\text{Hz}^{-1}$, 而后的 44416 h 中缓慢增加了 $0.0338 \mu\text{V}^2\text{Hz}^{-1}$ 。在老化前后,光噪声均为光功率的二次函数,通过拟合可得到,其二次项系数 α (或称为光相对强度噪声系数)和一次项系数 β (或称为光散粒噪声系数)。经过老化实验,两系数 α 和 β 都相应的增加,其中 α 增加了 $0.010 \mu\text{V}^2\mu\text{W}^{-2}\text{Hz}^{-1}$, β 增加了 $0.054 \mu\text{V}^2\mu\text{W}^{-1}\text{Hz}^{-1}$ 。同时经过老化实验,ASE 光源光谱发生形变且不可恢复。

关键词 光纤光学;放大自发辐射宽谱光源;掺铒光纤放大器;加速老化;噪声;光谱

中图分类号 TN212

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.040503

Acceleration Aging Study of Amplified Spontaneous Emission Broadband Source

Wang Haiyan^{1,2} Zhang Yating^{1,2} Jin Lufan^{1,2} Song Xiaoxian^{1,2} Yao Jianquan^{1,2}

¹*Institute of Laser and Optoelectronics, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*

²*Key Laboratory of Optoelectronic Information Science and Technology, Ministry of Education, Tianjin 300072, China*

Abstract Amplified spontaneous emission (ASE) sources based on erbium-doped fibers are widely applied in many fields, such as fiber sensing, communication and precision measurement. It plays a negative role of light noise after a process of long-term continuous operation to precision and sensitivity of the following detection and measurement systems. However, it has been reported rarely. Here, via accelerated aging experiment at 343 K, the light noise of optical section of ASE is studied. During the process, optical noise is detected in-situ. According to Arrhenius model, in the early stage of 3200 h at room temperature, the optical noise decreases about $0.0743 \mu\text{V}^2\text{Hz}^{-1}$ then slowly increases about $0.0338 \mu\text{V}^2\text{Hz}^{-1}$ in latter stage of 44416 h. Before and after acceleration aging, optical noise is a quadratic function of optical power. By fitting, it is obtained the second order item coefficient α , or termed as to coefficient of relative intensity noise, and the first order item coefficient β , or termed as to coefficient of shot noise. Through the aging, both of them increase, where α and β increase $0.010 \mu\text{V}^2\mu\text{W}^{-2}\text{Hz}^{-1}$ and $0.054 \mu\text{V}^2\mu\text{W}^{-1}\text{Hz}^{-1}$, inceptively. Moreover, the spectral shape of ASE is irrecoverably shifted after accelerated aging.

收稿日期: 2014-09-30; 收到修改稿日期: 2014-12-02

基金项目: 天津大学自主创新基金(60302070)

作者简介: 王海艳(1989—),女,硕士研究生,主要从事光电子器件方面的研究。E-mail: haiyanwang_1989@163.com

导师简介: 姚建铨(1939—),男,教授,博士生导师,主要从事非线性光学频率变换及全固态激光技术等方面的研究。

E-mail: jqyao@tju.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: yating@tju.edu.cn

Key word fiber optics; amplified spontaneous emission broadband source; erbium-doped fiber amplifier; acceleration aging; noise; spectrum

OCIS codes 230.2285; 230.4480; 040.1880; 060.2380

1 引言

利用掺铒光纤(EDF)产生的放大自发辐射(ASE)效应制成宽谱光源——自发辐射光源。这种光源具有时间相干性低,输出功率高(最高可达 100 mW),工作带宽大(可覆盖 C 波段和 L 波段)和极好的光谱平坦度等特点^[1]。因此在光纤传感、光纤通信、光学精密测量等领域有着广泛的应用前景^[2-4]。

然而 ASE 光源在提供光源的同时,其光噪声往往成为限制后续精密检测系统性能的关键因素,在很大程度上影响了它的实际应用,如在干涉型光纤传感器中光源强度噪声会对信号解调产生负面影响,导致传感器的灵敏度下降^[5-6]。在一些特殊应用领域需要光源连续稳定运行数年、甚至数十年。在类似极端苛刻条件下,光功率会持续下降,同时光噪声持续上升,而后续检测系统的测量精度与传感灵敏度等会受到光噪声的干扰而失真或灵敏度下降,因而光噪声的影响不能被忽略,故研究光源长时间工作过程中光噪声的变化情况十分重要。ASE 光源由光路和电路两个部分组成,对其电路部分的老化研究已经早有报道^[7],而单独对其光路部分的老化研究尚未见报道。本文主要针对光电分离的 ASE 光源,利用加速老化系统对光源光路部分施加热应力,并在老化过程中监视光噪声的演化情况,分析了光噪声中各个分量噪声的演化规律,为抑制光噪声、提高长期工作中测量精度与减小误差提供参考。

2 理论模型

2.1 阿伦尼斯模型

加速老化实验,就是利用与物理失效规律相关的统计模型对在超出正常应力水平的加速环境下获得的可靠性信息进行转换,得到在额定应力水平下可靠性特征的可复现的数值估计的一种实验方法^[8-10]。在加速老化实验中通过施加一定的应力来模拟器件及材料在自然环境条件下的老化规律。其中,温度是最常见的加速应力之一。而阿伦尼斯模型一般被用来描述热应力对器件可靠性寿命的影响。设寿命 L_i ^[11]为

$$L_i = \gamma \cdot \exp(E_a/k_B T_i), \quad (1)$$

式中 γ 为调整系数(大于 0 的常数), E_a 为活化能(eV), k_B 为玻尔兹曼常数(8.617×10^{-5} eV/K), T_i 为加速温度(K)。通过对比正常工作温度下器件寿命,可以估算出其加速系数 τ ,表达式如下:

$$\tau = L_0/L_i = \exp[E_a(1/T_0 - 1/T_i)/k_B], \quad (2)$$

式中 T_0 为正常工作温度(K), L_0 和 L_i 分别为室温下寿命和加速温度下寿命。当温度 T_i 大于正常工作温度 T_0 时,热应力开始影响器件的可靠性。根据经验公式,活化能 E_a 约为 0.54 eV,则当室温为 298 K 时,加速温度为 308 K,由(2)式可以估算出加速系数 τ 约为 1.9793。也就是说温度每升高 10 K,加速实验就能缩短约一半的时间。因此通过提高加速实验温度,可以将几十万小时的实验时间缩短到几个月,大大节约了实验时间,提高了工作效率。

2.2 光噪声模型

在半经典理论中,借助经典理论来描述噪声,同时在描述噪声振幅时则引用量子分析的结论,设宽谱光源的输出光噪声电场具有确定的振幅和随机的相位^[12]。

假定探测器的量子效率为 1,对于偏振度为零情况下,落入探测器电子带宽范围的总噪声为

$$\sigma_{\text{total}}^2 = \sigma_{\text{light}}^2 + \sigma_{\text{det}}^2. \quad (3)$$

总噪声 σ_{total}^2 中包括了光噪声 σ_{light}^2 和探测器本底噪声 σ_{det}^2 ,而光噪声中包含光相对强度噪声(RIN) σ_{RIN}^2 和光散粒噪声 σ_{sh}^2 ,探测器本底噪声中包含了热噪声和暗电流噪声等。其中,光相对强度噪声是指光源输出能量的振荡,即宽带光源光谱的各种傅里叶分量之间的随机拍频引起光源的功率涨落^[13]。光散粒噪声源自探测器电荷载流子的离散性,即光子转换为电子时,光电子产生的随机性和产生暗电流的电子的随机性^[14]。因此探

测器端总噪声可以写成

$$\sigma_{\text{total}}^2 = \sigma_{\text{RIN}}^2 + \sigma_{\text{sh}}^2 + \sigma_{\text{det}}^2, \quad (4)$$

其中光相对强度噪声可以表示为^[7]

$$\sigma_{\text{RIN}}^2 = \bar{u}^2 \Delta f (\Delta v - \Delta f/2) / (\Delta v)^2, \quad (5)$$

式中 \bar{u}^2 为平均光电压, Δf 为探测器检测带宽, Δv 为光源频率带宽。一般 Δf 在 $10^6 \sim 10^8$ Hz 量级, 而波长在 1550 nm 附近的 ASE 光源的频率带宽 Δv 在 $10^{10} \sim 10^{12}$ Hz 量级, 因此 $\Delta v \gg \Delta f$, 因而(5)式可以简化为

$$\sigma_{\text{RIN}}^2 = [R^2 (R_d)^2 \Delta f / \Delta v] P^2, \quad (6)$$

$$P = Nh\nu \cdot \Delta v, \quad (7)$$

式中 R 为探测器跨阻, R_d 为探测器的响应度, P 为平均光功率, N 为 ASE 光子数, ν 为光子频率。而光散粒噪声为

$$\sigma_{\text{sh}}^2 = 2e\Delta f R^2 (R_d P), \quad (8)$$

式中 e 为电子电量。探测器本底噪声与光源无关, 在此可以简化为常量。故此, 由(6)、(8)式可以得出, ASE 的光噪声中光相对强度噪声 σ_{RIN}^2 与 P^2 成正比, 光散粒噪声 σ_{sh}^2 与 P 成正比, 而探测器本底噪声与 P 无关为常量, 故光噪声与光功率 P 成抛物线关系。在此引入两个参数: α 和 β ; α 表示 σ_{RIN}^2 与 P^2 的比例系数, 称为光相对强度噪声系数, β 表示 σ_{sh}^2 与 P 的比例系数, 称为光散粒噪声系数。则:

$$\sigma_{\text{RIN}}^2 = \alpha P^2, \quad \sigma_{\text{sh}}^2 = \beta P. \quad (9)$$

令 $\gamma = \sigma_{\text{det}}^2$, 因此探测到的总噪声可以简化写成:

$$\sigma_{\text{total}}^2 = \alpha P^2 + \beta P + \gamma. \quad (10)$$

2.3 温度对 ASE 光源光路部分影响

由(7)式和(9)式可知光源谱宽 Δv 及光子频率 ν 都会影响光功率 P , 而两者都与温度有密切关系^[15]。温度升高将引起铟离子能级展宽, 根据斯塔克效应, 由这些非连续的子能级构成的每个能带也会发生均匀和非均匀展宽。另一方面, 铟离子能级中处于亚稳态和抽运高能态的粒子数分布随温度发生改变, 导致掺铟光纤吸收截面与发射截面发生相应变化。在抽运功率不变的情况下, 处于同一能带不同能级上的粒子数会重新排布, 导致不同波长对应的光子数量也发生改变^[16]。由于温度对能带展宽和粒子数分布两个方面的作用, 导致光谱形变和光功率 P 的改变, 因而温度的升高对光噪声造成很大影响。

3 实验方案

3.1 光噪声的检测

由光噪声模型可知, 光噪声是附加到光功率输出的光功率涨落, 可由探测器输出端的交流电信号表现出来。显然, 探测器接收的光信号中包括光源的全部信息。为了分离出光噪声部分, 在设计光电探测器的外电路时, 可将探测器的输出信号分解为电信号的直流分量和交流分量。其中直流分量反应光功率的大小, 交流分量反应光噪声水平的高低。实验中所使用的探测器跨阻为 500 k Ω , 交流信号频率响应范围为 3 Hz~10 MHz。使用数据采集卡采集输出信号的直流分量, Agilent N9030A PXA 信号分析仪测量交流分量。为确保测量准确, 每次采集 10 组数据, 并对所采集数据进行统计分析, 最终得到探测器的输出噪声 σ^2 。

3.2 高温加速老化实验系统

ASE 光源光路部分包括波分复用器(WDM), 掺铟光纤放大器, 隔离器(ISO)等, 这些器件的工作极限温度一般为 70 $^{\circ}\text{C}$, 即 343 K。超过此温度, 各器件处于非正常工作状态, 老化实验无法得到准确的结果, 因此只将光源光路部分(不包括抽运部分)放置在 343 K 恒温老化箱中。根据温度每升高 10 K, 实验所用时间缩短到原来的一半的结论, 推算得到在 343 K 温度条件下总的老化实验时间相当于室温(293 K)条件下工作时间的 1/32。因此, 控制恒温老化箱温度恒定在 343 K, 得到其连续正常工作 1488 h(62 天)光噪声的演化规律, 即可推算出 ASE 光源光路部分连续工作 47616 h 的光噪声的演化规律。图 1 为光源原理框图和实验结构图, 所用掺铟光纤为 Nufern 公司的 EDFC-980-HA 型光纤。

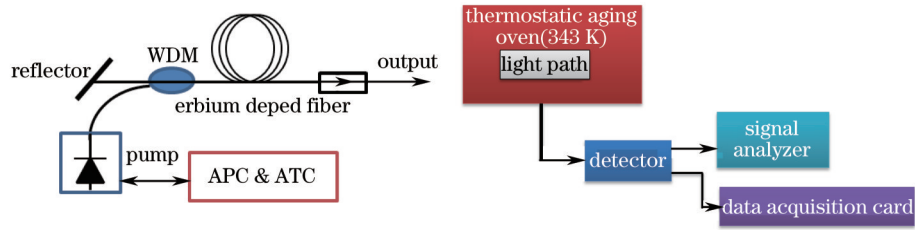


图1 (a)光源原理框图; (b) 实验结构图

Fig.1 (a) Schematic diagram of the light source; (b) experimental structure diagram

3.3 光噪声的温度特性

上面提到了温度会改变 ASE 的光谱和光功率输出进而能够影响光噪声的水平。光噪声随温度的演化情况称为光噪声的温度特性。为了研究老化对 ASE 光噪声的温度特性的作用,应在老化实验开始前和老化结束后分别对 ASE 光噪声的温度特性做了对比检测。实验时,考虑到 ASE 光路部分正常工作的极限温度为 343 K,因而在从 293 K~343 K 的温度区间中每隔 10 K 对光噪声、光谱和光功率进行测量。ASE 光源的光路部分的温度控制由恒温老化箱完成,为保证实验的准确性,每次升高到指定温度后等待 0.5 h 再测量。

4 结果与讨论

4.1 光噪声信号处理

光电探测器输出交流分量如图 2 所示,其中 $\sigma_{\text{background}}^2$ 为本底噪声,其中包括了探测器自身的噪声和信号分析仪的噪声,其数值水平处于 $10^1 \mu\text{V}$ 量级;而总噪声 σ_{total}^2 则包括了本底噪声和光噪声,其数值水平处于 $10^2 \mu\text{V}$ 量级。通过比较可以看出,在有光信号输入时,总噪声 σ_{total}^2 大于本底噪声 $\sigma_{\text{background}}^2$ 1 个数量级。因此光电探测输出的电信号噪声中,光噪声 σ_{light}^2 占主要地位(90%),而本底噪声只占很小的比例(10%),因此在后续数据处理时可以忽略本底噪声的影响。

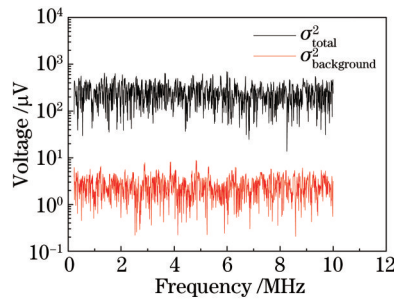


图2 有无光输入时探测器交流信号噪声频谱的变化情况

Fig.2 Variation of noise spectrum of an alternating current signal with light and dark

4.2 老化过程中光噪声的演化情况

高温加速老化实验结果如图 3 所示,其中图 3(a)为光噪声功率谱密度随老化时间的演化情况,图 3(b)为光功率随老化时间的演化情况。随机数据的功率谱密度函数 $S_x(f)$ 是通过均方值的谱密度来描述其数据的频率结构,从 $S_x(f)$ 可以得到有关系系统动态特性的信息。功率谱密度函数的一个重要性质表现在它与自相关函数的关系上,用 $S_x(f)$ 曲线下总面积表示均方值的大小, $X(t)$ 的均方值为 $\sigma^2 = \int_0^{\infty} S_x(f) df$ [17]。这里的光功率谱密度表示 ASE 光源在单位时间光噪声的方差,因此其单位为 $\mu\text{V}^2 \cdot \text{Hz}^{-1}$ 。如图 3(a)所示,随着老化时间的增加,输出的总噪声在起初的 100 h 内快速下降,而后缓慢增长。从 0~100 h,噪声电压下降了 $0.0743 \mu\text{V}^2 \cdot \text{Hz}^{-1}$,而从 100~1488 h 这段时间内,噪声电压又缓慢增加了 $0.0338 \mu\text{V}^2 \cdot \text{Hz}^{-1}$ 。根据光噪声模型理论,总噪声中本底噪声为定值,而光噪声与光功率 P 成抛物线关系。因此,光噪声的变化可以通过光源功率变化来反应。图 3(b)是光电探测器输出信号的直流分量,以输出电压的形式表示。在光探测器线性区范围内,光源功率与直流分量近似为线性关系。通过对图 3(a)和(b)比较得到两者变化趋势基本相同,从而证明了光功率 P 大小与光

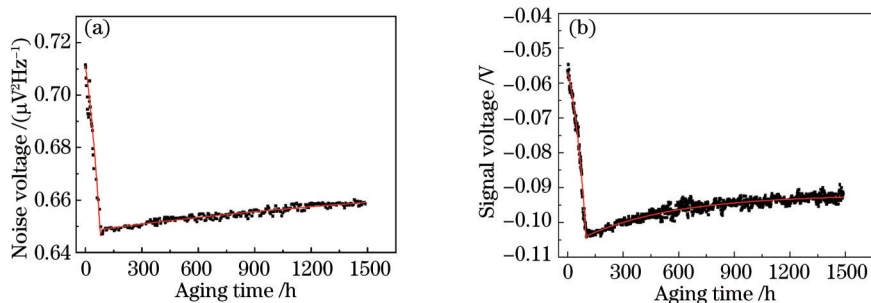


图3 高温加速老化实验结果。(a) 光噪声功率谱密度随老化时间的演化曲线; (b) 光信号电压随老化时间的演化曲线

Fig.3 Experimental result of high temperature accelerated aging. (a) Evolution curve of light noise spectral density with aging time; (b) evolution curve of the optical signal voltage with aging time

噪声有直接关系。

分析光源功率变化,从开始到100 h,光源功率迅速减小是由于高温使掺铒光纤中 Er^{3+} 离子发生极强的温度猝灭效益^[18],同时,高温也会减小亚稳态和激发态粒子数浓度及信号光产生和吸收截面等^[19],这些因数都会导致光源内EDF的增益大幅度降低,其结果是光源输出功率在不断减小。之后,由于在100 h附近温度猝灭效益等原因达到极限,光源输出功率开始缓慢增大,由于温度使得 Er^{3+} 离子能级发生斯托克斯分裂,并且使不同能级粒子跃迁几率发生变化,造成光源光谱发生形变^[20],其结果导致光源输出功率在缓慢增加,相应光噪声也增大。

4.3 光噪声的温度特性试验中光功率和温度对光噪声的影响

根据光噪声模型理论可知,探测到的总噪声 $\sigma_{\text{total}}^2 = \alpha P^2 + \beta P + \gamma$, α 称为光相对强度噪声系数; β 称为光散粒噪声系数; γ 表示探测器本底噪声,为常数。分别分析公式中的功率 P 及 α 、 β 对探测器输出总功率 σ_{total}^2 的影响。

图4(a)给出老化前后光噪声功率谱密度随功率 P 的变化情况,其中实点表示实验数据,实线表示用 $\alpha P^2 + \beta P + \gamma$ 对实验数据的拟合曲线。由图可见光源光噪声功率谱密度随着光功率 P 的增加而增大,满足二次函数关系,用 $\sigma^2 = \alpha P^2 + \beta P + \gamma$ 方程拟合能够得到很好的拟合结果,这与光噪声理论相吻合。由拟合得到的二次项系数 α 由老化前的 $0.08153 \mu\text{V}^2\mu\text{W}^{-2}\text{Hz}^{-1}$ 增大到老化后的 $0.08505 \mu\text{V}^2\mu\text{W}^{-2}\text{Hz}^{-1}$,一次项系数 β 由老化前的 $-0.14579 \mu\text{V}^2\mu\text{W}^{-1}\text{Hz}^{-1}$ 增大到老化后的 $-0.08745 \mu\text{V}^2\mu\text{W}^{-1}\text{Hz}^{-1}$ 。经过老化,光相对强度噪声系数 α 和光散粒噪声系数 β 均有所增加。

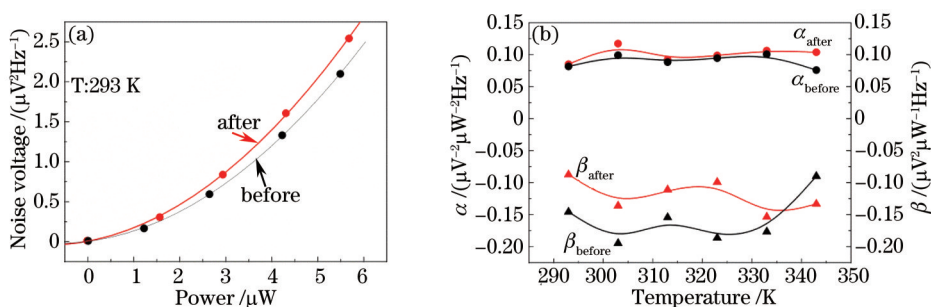


图4 (a) 老化前后光噪声功率谱密度随功率 P 的变化情况; (b) 老化实验前后温度对 α 和 β 的影响情况

Fig.4 (a) Change of the temperature characteristic of light noise power spectral density before and after the process of aging experiment; (b) influence of temperature on α and β before and after the process of aging experiment

在不同温度下重复上述拟合过程,可以得到 α 和 β 随温度 T 的演化情况,由图4(b)给出。 α 和 β 随温度变化均不明显, α 在 $0.0414 \mu\text{V}^2\mu\text{W}^{-2}\text{Hz}^{-1}$ 的范围内波动, β 在 $0.1074 \mu\text{V}^2\mu\text{W}^{-1}\text{Hz}^{-1}$ 的范围内波动。老化后, α 和 β 随温度的波动范围没有改变,但是其幅值都在原有基础上有所增加。其中 α 平均增加了约 $0.010 \mu\text{V}^2\mu\text{W}^{-2}\text{Hz}^{-1}$, β 平均增加了约 $0.054 \mu\text{V}^2\mu\text{W}^{-1}\text{Hz}^{-1}$ 。这表明 α 和 β 的增加均对总的光噪声的增加有贡献,其中光散粒噪声的贡献更大。因此在ASE光源的实际应用中,需要重视对散粒噪声的抑制。

4.4 老化实验过程中和老化前后的光谱变化情况

为了研究 ASE 光源在长时间工作过程中光谱的演化过程以及经过长时间工作后光谱的变化情况,做了以下两个工作:第一,在老化过程中多次测量了 ASE 光源的光谱曲线,取其中有代表性的光谱曲线绘制图 5(a)所示 343 K 时老化过程中光源光谱演化图;第二,老化实验开始前,在 293 K 条件下测量光源光谱曲线,在经过 1488 h 的老化实验后,使 ASE 光源由 343 K 恢复到 293 K,再经过 72 h 的恢复期之后,再次测得光源的光谱曲线,绘制图 5(b)所示 293 K 温度时老化前后光源光谱变化。

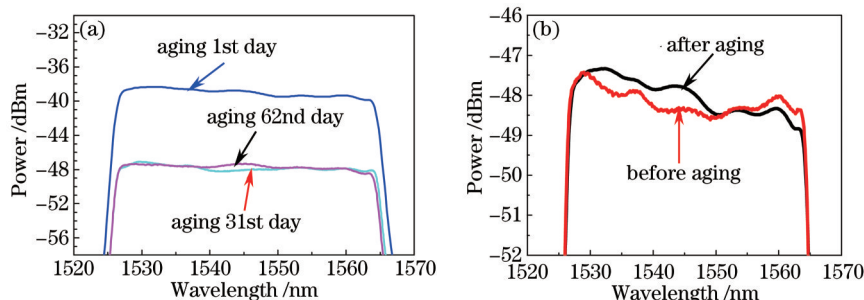


图 5 (a) 343 K 时老化过程中光源光谱演化图; (b) 293 K 温度时老化前后光源光谱变化

Fig.5 (a) Evolution of light source spectrum in the process of aging experiment when the temperature is 343 K; (b) changes of light source spectral before and after the process of aging experiment when the temperature is 293 K

从图 5(a)中可以看出,与老化第 1 天相比,老化第 31 天光谱整体下降了约 5 dB。而老化第 62 天光谱与第 31 天相比,在 1525~1535 nm 及 1560~1566 nm 两个范围内有所下降,但是在 1535~1555 nm 范围内增大。总的趋势是老化 62 天的光源功率略大于第 31 天的功率值。整个老化过程中,光源光谱下降了约 5 dB。这与长期老化过程中光源功率或者噪声变化趋势相同。由阿伦尼斯模型推断,在温度为 343 K 时,老化所用时间为室温的 1/32,也就是说在 343 K 温度下工作 1488 h 对应室温工作时间为 47616 h(约为 5.4 年)。因此,可以推断在室温工作 5.4 年中,光源噪声总体是先下降,一段时间后缓慢增加。

图 5(b)为 293 K 温度下老化前后光源光谱谱形。经过 72 h 的恢复期,光源光谱较高温老化过程中第 62 天的光谱曲线有所恢复,但经过高温加速老化实验,光谱谱形与之前相比发生变形。老化后光谱谱线在 1529~1551 nm 范围内增大,而在 1551~1564.5 nm 范围内下降,短波长较长波的变化程度明显。同时整个光源谱线宽度经过老化后有所压窄。结果表明经过老化实验,ASE 光源光谱发生形变且不可恢复,即可得出长期工作使 ASE 光源光谱发生不可恢复的变化。

5 结 论

利用 343 K 高温加速老化实验系统研究了 ASE 宽谱光源光路部分在室温条件长期工作时其输出光信号噪声的演化规律。根据阿伦尼斯模型和实验数据得出,ASE 光源在室温连续工作 47616 h(约 5.4 年)过程中,输出光信号噪声先快速下降约 $0.0743 \mu\text{V}^2\text{Hz}^{-1}$,而后缓慢增加约 $0.0338 \mu\text{V}^2\text{Hz}^{-1}$ 。相同温度下,光噪声与光功率呈二次函数关系,二次项系数 α 即为光相对强度噪声系数,一次项系数 β 即为光散粒噪声系数。通过对光功率的拟合得到老化后 α 、 β 的值都有所增大,其中 α 平均增加了约 $0.010 \mu\text{V}^2\mu\text{W}^{-2}\text{Hz}^{-1}$, β 平均增加了约 $0.054 \mu\text{V}^2\mu\text{W}^{-1}\text{Hz}^{-1}$ 。因此在 ASE 光源的实际应用中,需要对光散粒噪声予以特别关注。另一方面实验使得光源谱线发生不可恢复的形变,短波长较长波长变化程度显著。实验结果对 ASE 宽谱光源研制开发及应用有一定参考意义。

参 考 文 献

- 1 Liu Yanyang, Yang Lingzhen, Wang Peipei, *et al.*. Link fault detection in passive optical networks based on correlation method combined with an amplified spontaneous emission source[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0805004.
刘艳阳, 杨玲珍, 王斐斐, 等. 放大自发辐射光源结合相关法实现无源光网络故障检测[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0805004.
- 2 Bakar A A A, Mahdi M A, Al-Mansoori M H, *et al.*. Single-stage gain-clamped L-band EDFA with C-band ASE saturating tone[J]. Laser Physics, 2009, 19(5): 1026-1029.

- 3 Wang Xiulin, Huang Wencai, Huang Xiaojing, *et al.*. A novel mean wavelength stability and high efficiency L-band superfluorescent fiber source[J]. Chinese J Laser, 2009, 36(3): 647-652.
王秀琳, 黄文财, 黄晓菁, 等. 新型中心波长稳定的高效率L波段掺铒光纤超荧光光源[J]. 中国激光, 2009, 36(3): 647-652.
- 4 Tian Jiajun, Yao Yong, Sun Yunxu, *et al.*. Flat broadband erbium-doped fiber ASE source based on symmetric nonlinear optical loop mirror[J]. Laser Physics, 2010, 20(8): 1760-1766.
- 5 Liu Yinggang, Jia Zhenan, Qiao Xueguang, *et al.*. Superfluorescent fiber source achieving multisignal power equalization in distributed fiber Bragg grating sensing[J]. Optical Engineering, 2011, 50(12): 125004.
- 6 Suo Xinxin, Yang Hongyuan, Yang Mingwei, *et al.*. Relative intensity noise characteristic of broadband sources and its effect on performance of closed-loop fiber optic gyroscope[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0605009.
索鑫鑫, 杨远洪, 杨明伟, 等. 宽谱光源相对强度噪声及对闭环光纤陀螺影响研究[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0605009.
- 7 Crump P, Patterson S, Wang J, *et al.*. Diode laser bars deliver >400 W peak CW power from 800 nm to 980 nm enabling wide range of applications[C]. SPIE, 2006, 6397: 639706.
- 8 Fukuda M. Reliability and Degradation of Semiconductor Lasers and LEDs[M]. Boston, Artech House, 1991.
- 9 Jin Lufan, Zhang Yating, Wang Haiyan, *et al.*. Acceleration aging of InGaAs PIN photoelectric detectors[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(10): 1008002.
金露凡, 张雅婷, 王海艳, 等. InGaAs PIN 光电探测器的加速老化研究[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1008002.
- 10 Yu Fei, Jin Lei. Mathematical model of aging and the life test method for GaN LED[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(8): 0806001.
余 菲, 金 雷. GaN 发光二极管的老化数学模型及寿命测试方法[J]. 中国激光, 2011, 38(8): 0806001.
- 11 Bayle F, Mettas A. Temperature acceleration models in reliability predictions: justification & improvements[C]. Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), 2010 Proceedings-Annual IEEE, 2010, 144, 1-6.
- 12 Desurvire E. Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Principles and Applications[M]. New York: Wiley, 1994.
- 13 Rabelo R C, De Carvalho R T, Blake J. SNR enhancement of intensity noise-limited FOGs[J]. Journal of Lightwave Technology, 2000, 18(12): 2146-2150.
- 14 Burns W K, Moeller R P, Dandridge A, *et al.*. Excess noise in fiber gyroscope sources[J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 1990, 2(8): 606-608.
- 15 Dominique D M, Goldberg L, Moeller R P, *et al.*. Wavelength stability characteristics of a high-power, amplified superfluorescent source[J]. Journal of Lightwave Technology, 1999, 17(8): 1415-1422.
- 16 Mi Jian, Zhang Chunxi, Li Zheng. Experimentally research on temperature stability of the mean wavelength of erbium-doped fiber super fluorescent source.[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(5): 825-829.
米 剑, 张春熹, 李 铮. 掺铒光纤超荧光光源平均波长温度稳定性实验研究[J]. 光子学报, 2007, 36(5): 825-829.
- 17 Wang Wei. Interferometric Fiber Optic Gyroscope[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2010. 61-62.
王 巍. 干涉型光纤陀螺仪技术[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2010. 61-62.
- 18 Zhang Xiaoxia, Cheah Kokwai, Shi Jianxin, *et al.*. Enhanced 1.54 μm luminescence from erbium and yttrium co-doped porous silicon[J]. Acta Chimica Sinica, 2003, 61(9): 1430-1433.
张晓霞, 谢国伟, 石建新, 等. 钇对掺铒多孔硅体系 1.54 μm 发光的增强作用[J]. 化学学报, 2003, 61(9): 1430-1433.
- 19 Berkdemir C, Özsoy S. On the temperature-dependent gain and noise figure analysis of C-band high-concentration EDFAs with the effect of cooperative upconversion[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(9): 1122-1127.
- 20 Im Y E, Aan S R, Park C S, *et al.*. Temperature-dependent gain variation reduction in C-band erbium-doped fiber amplifier using phosphorus-erbium-doped silica fiber[J]. Photonic Technology Letters IEEE, 2006, 18(20): 2087-2089.

栏目编辑: 韩 峰