

doi:10.3788/gzxb20164506.0614002

低偏置电流下半导体激光器 $1/f$ 噪声的相关性

吴璇子¹, 郭树旭¹, 羊超¹, 关健¹, 田超¹, 曹军胜², 郜峰利¹

(1 吉林大学 电子科学与工程学院, 长春 130012)

(2 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要:测量了高功率 976nm InGaAs 量子阱半导体激光器在低于 $1/30$ 阈值电流下的低频电噪声, 提出了以 $1/f$ 噪声时域信号小波系数相关性与电流的关系来分析噪声来源的方法. 结合 $1/f$ 噪声源理论模型及小波变换系数的特性, 完成了不同偏置电流下纯 $1/f$ 噪声、加白噪声后的 $1/f$ 噪声两种情况下的对比实验. 实验结果表明: 所测的低频噪声表现为明显的 $1/f$ 噪声, 对于纯 $1/f$ 噪声, 噪声幅度和小波系数相关性在判断噪声来源时具有相同的结果; 对于加白噪声后的 $1/f$ 噪声, 噪声幅度变化很大且不能正确表征 $1/f$ 噪声来源, 而部分尺度下的小波系数相关性仍能作为判断噪声来源的可靠参量.

关键词: 半导体激光器; 可靠性; 相关性; $1/f$ 噪声; 稳定性; 小波变换; 偏置电流

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)06-0614002-6

The $1/f$ Noise Correlation of Semiconductor Lasers under Low Bias Current

WU Xuan-zi¹, GUO Shu-xu¹, YANG Chao¹, GUAN Jian¹, TIAN Chao¹,
CAO Jun-sheng², GAO Feng-li¹

(1 College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

(2 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China)

Abstract: The electrical low-frequency noise of 976nm InGaAs quantum well high-power semiconductor lasers was measured under a current less than $1/30$ of the threshold current. An approach was proposed to analyze the noise origins by using the relation between the $1/f$ noise correlation of time-domain signal wavelet coefficients and the bias current. Combining the $1/f$ noise origin model with the characteristics of the wavelet coefficients, a series of contrast experiments were conducted to compare the results before and after adding white noise under different bias currents. The results indicate that, the low-frequency noise we measured shows typical $1/f$ noise characteristics. For a pure $1/f$ noise, the same results are obtained when to determine the noise origin by using the noise amplitude method and wavelet coefficients correlation method. However, for the $1/f$ noise signal containing white noise, there is a significant fluctuation on the noise amplitude and it cannot show the origin $1/f$ noise correctly, whereas the wavelet coefficients correlation under some scales is still a reliable criterion.

Key words: Semiconductor lasers; Reliability; Correlation; $1/f$ noise; Stability; Wavelet transforms; Bias currents

OCIS Codes: 140.5960; 140.2020; 140.3460; 100.7410

0 引言

半导体激光器(Laser Diode, LD)在工业、农业、军

事、医疗等领域的广泛应用^[1-2],使得如何更方便精确地检测其性能、质量以及如何评价其可靠性和稳定性具有重要的研究意义和价值^[3].目前,在评价半导体激

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(No. 61204055)、国家重大科学仪器设备开发专项(No. 2011YQ040077)、吉林省科技发展计划青年科研基金(No. 20130522188JH)和吉林省科技发展计划自然科学基金(No. 20140101175JC)资助

第一作者:吴璇子(1994-),女,硕士研究生,主要研究方向为半导体激光器低频噪声特性. Email:wuxz14@mails.jlu.edu.cn

导师(通讯作者):郜峰利(1977-),男,副教授,博士,主要研究方向为弱信号检测、半导体激光器可靠性. Email:gaofl@jlu.edu.cn

收稿日期:2015-12-24; **录用日期:**2016-03-08

<http://www.photon.ac.cn>

光器质量和可靠性的方法中,主要有加速电老化法和无损检测法两种^[4-5],加速电老化技术本质上属于破坏性试验,会对器件本身造成损伤,因此无损检测法在器件可靠性评价方面具有明显的优势.半导体激光器低频电噪声的强度与材料或器件的缺陷有关,通过低频电噪声特性来评价激光器可靠性具有较好的应用前景^[6-7].研究表明,1/f 噪声主要来源于半导体器件中凝聚态物质性能的缓慢波动^[8],其产生机理与器件可靠性及质量有密切的联系^[9].有源区是决定半导体激光器可靠性的关键区域之一,来自该区域的 1/f 噪声更能反映器件的可靠性和稳定性^[10-11].在以往的低频电噪声测量中,多以某一频率点上的噪声强度或通过噪声功率谱的拟合获得噪声幅度与偏置电流之间的关系来分析噪声特性^[12].单一频率点上的噪声强度具有很大随机性,且未考虑 1/f 噪声的整体特性,所以具有很大局限性^[13];噪声功率谱拟合获得的噪声幅度虽考虑了噪声频段内的整体特性,但该频段内的某个范围可能受到其他噪声的干扰,降低了 1/f 噪声幅度提取的准确性,从而会影响噪声来源的判断,因此在该频段内选取具有最明显 1/f 噪声特性的频率范围内的噪声信号,结合其整体特性来分析噪声来源必然更可靠更准确.

本文主要测量高功率半导体激光器在较低偏置电流范围内的 1/f 噪声特性,一方面省去了激光器在高偏置电流下的散热装置,降低了白噪声对 1/f 噪声特性的干扰,从而降低了实验难度和成本.另一方面,希望能在低偏置电流范围内探测到来自有源区甚至器件其他部位的最具有明显 1/f 噪声特性的信号.以最接近 1/f 噪声的方差和尺度的理论关系为原则,选取相应尺度对应频率范围内的噪声为最纯 1/f 噪声,计算该尺度对应小波系数的相关性并提取噪声幅度,分别获得二者与偏置电流的关系来判断噪声来源.本文提出的小波系数相关性由具有最明显 1/f 噪声特性的频率范围内的整体特性获得,故受白噪声干扰较小.通常半导体激光器噪声的实际测量中不可避免地伴随有高频白噪声,因此与噪声幅度法相比,小波系数相关性法具有更好的抗白噪声干扰能力,且在判断 1/f 噪声源时更准确可靠.

1 原理

1/f 噪声,是广泛存在于电子元器件乃至整个自然界的一种随机噪声信号.从频域上看,广义上凡是其功率谱密度符合 $S_x(\omega) = \delta_x^2 / |\omega|^\gamma$ ($0 < \gamma < 2$, γ 一般接近于 1) 的噪声,均可定义为 1/f 噪声,其中 $\omega = 2\pi f$ 为角频率, δ_x^2 为谱常量, γ 为频率指数.在以 PN 结结构为主的半导体激光器产生的低频电噪声中,1/f 噪声占主导地位,所以对于半导体激光器而言,1/f 噪声特性

比其它低频电噪声更具有研究价值.在阈值电流以下,激光器的伏安特性近似等效为二极管,简化的等效电路如图 1,主要由有源区、接触电阻 R_s 构成,因本文在较低偏置电流范围内进行噪声测量,所以不存在由激发态下光子数涨落和阈值附近增益系数涨落引起的 1/f 噪声,激光器的噪声主要来源于有源区动态电阻、接触电阻,根据胡格公式^[14-15],低偏置电流下激光器的电流 1/f 噪声功率谱密度(Power Spectrum Density, PSD)可描述为

$$S_I(f) = \frac{\alpha q I^\beta}{f^\gamma \tau} = \frac{\alpha q I}{f\tau} + \frac{\alpha I^\beta}{f N_s} \quad (1)$$

功率谱密度由频谱分析仪采集 1/f 噪声时域波形经快速傅氏变换(Fast Fourier Transformation, FFT)后获得,则噪声幅度可表示为 $A = \alpha q I^\beta / \tau$,其中 α 为胡格系数, q 为电子电量, I 为通过 PN 结和接触电阻的电流, β 为与偏置电流有关的常量, τ 为少子寿命, N_s 为载流子个数.重写式(1),则 $S_I(f) = A / f^\gamma$,则在双对数坐标系下对电流 1/f 噪声功率谱密度进行线性拟合即可获得对应的噪声参量,拟合曲线的截距和斜率分别对应 1/f 噪声幅度 A 和频率指数 γ .式(1)中两部分尤其有源区是决定半导体激光器可靠性的关键性因素,也是 1/f 噪声的主要来源,根据半导体激光器的老化实验,老化后器件的有源区 1/f 噪声幅度增大得更加明显^[16].

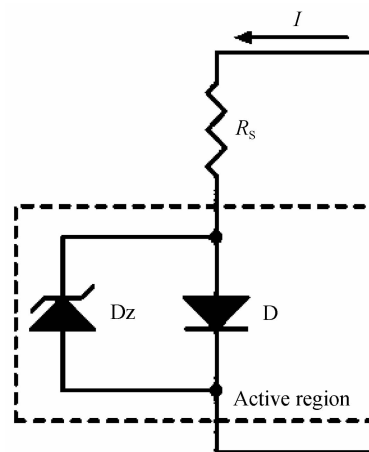


图1 半导体激光器简化等效电路
Fig. 1 The simplified equivalent circuit of semiconductor LDs

为深入观察 1/f 噪声特性并判断其具体产生位置,通过计算 1/f 噪声小波系数方差与尺度的关系来获得具有最优 1/f 噪声特性的频段.设 $x(t)$ 为 1/f 噪声的时域信号,则其小波变换系数 x_k^j 为

$$x_k^j = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \varphi_{j,k}(t) dt \quad (j, k \in Z) \quad (2)$$

式中, $\varphi_{j,k}(t)$ 是由母小波 $\varphi(t)$ 经过尺度变换和平移变换得到的小波基函数, j 为尺度因子, k 为平移因子.根据帕萨瓦尔定理并结合傅里叶变换性质,则在同一尺度 j 下小波系数的相关性可表示为^[17]

$$E = \frac{2^{\gamma}}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\delta_x^2}{|\omega|^{\gamma}} |\psi(\omega)|^2 e^{-i(k-k')\omega} d\omega \quad (3)$$

式中, $\psi(\omega)$ 为所选小波基函数的 Fourier 变换, k, k' 为平移因子. 结合 $1/f$ 噪声功率谱密度表达式可观察到 $\delta_x^2 \propto A \propto E$. 当 $k = k'$ 时, 式(3)表示 $1/f$ 噪声小波系数的方差 $\text{Var}(x_k^j)$, 且其对数可表示为

$$\log_2(\text{Var}(x_k^j)) = \log_2(\sigma^2) + \gamma j \quad (4)$$

式中, $\sigma^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\delta_x^2}{|\omega|^{\gamma}} |\psi(\omega)|^2 d\omega$. 由式(4)可知, 理论上纯 $1/f$ 噪声小波系数方差的对数与尺度呈线性关系, 且其随尺度的变化率等于频率指数. 结合式(1)、式(3), 则理论上可以用噪声幅度 A 或小波系数相关性 E 随偏置电流的变化关系来分析噪声来源, 电流 $1/f$ 噪声的噪声幅度、小波系数相关性分别表示为 A_1, E_1 .

2 实验测试系统

本文通过自行搭建的半导体激光器低频电噪声测量系统来测量激光器的 $1/f$ 噪声, 系统示意图如图 2. 其中 Shielding box 为定制的超低频电磁屏蔽盒, 其内部放置的偏置电路如图中虚线框, 高精度数字万用表(model3458A, Agilent)用于测量偏置电流. 被测激光器的电压低频噪声经超低本底噪声前置放大器(model5184, AMETEK, 电压增益为 30 dB)放大后, 输入到低频 FFT 分析仪(modelCF-9200, onosokki)进行采集, 将测量的噪声数据输入计算机进行参量提取与处理. 对于获得的电压功率谱密度, 由 IVMeter(model4156C, Agilent)测量的激光器 IV 特性计算其动态电阻, 根据欧姆定律最终获得低频噪声的电流功率谱密度. 实验样品采用的是中国电子科技集团公司第十三研究所制作的 976 nm InGaAs 量子阱高功率半导体激光器, 功率为 3 W, 阈值电流约为 300 mA. 整个噪声测量过程在室温下进行, 测量的偏置电流范围为 0.064 mA~7 mA(低于 1/30 阈值电流), 频谱分析仪的采样频率为 2.56 kHz, 频率范围设定为 10 Hz~1 kHz, 提取的 $1/f$ 噪声时域数据点个数为 16384 个, 时域信号长度为 6.4 s.

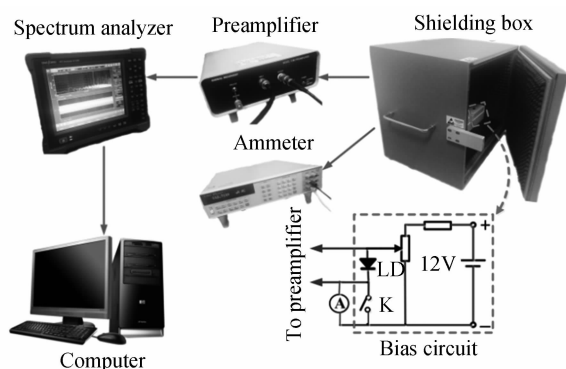


图 2 激光器噪声测试系统

Fig. 2 The noise measurement system sketch of LD

3 实验及结果

实测激光器的 $1/f$ 噪声如图 3, 其中图 3(a)为时域波形, 图 3(b)为电流功率谱密度, 图 3(b)中直线为拟合曲线, 双对数坐标系下该拟合曲线斜率约为 -1, 即 $\gamma \approx 1$, 表明该功率谱具有明显的 $1/f$ 噪声特性. 在所测的低偏置电流范围内, 所有的电流功率谱密度均表现出典型的 $1/f$ 噪声特性, 我们选取偏置电流分别为 0.064 mA、0.128 mA、0.256 mA、7 mA 对应的噪声功率谱, 如图 4, 对比图中斜率为 -1 的基准线, 可看出

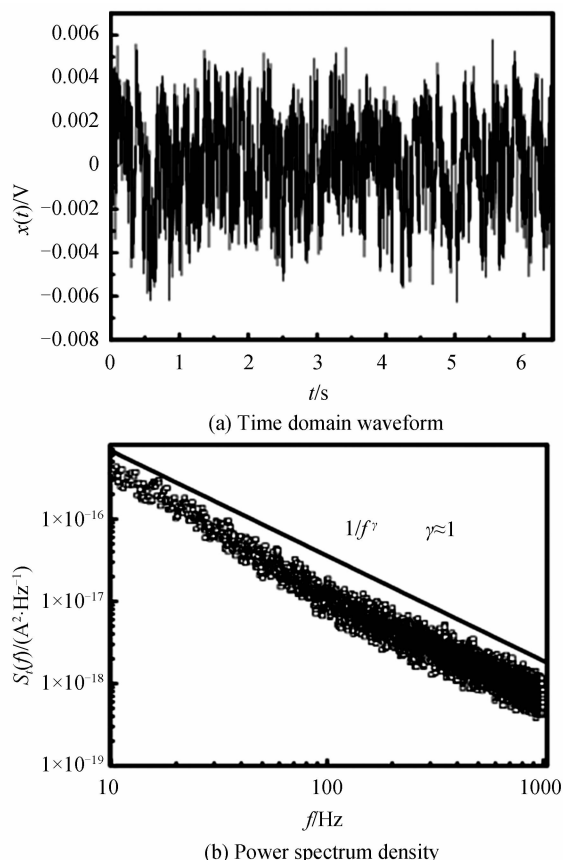


图 3 激光器实测 $1/f$ 噪声的时域波形和功率谱密度
Fig. 3 The measured $1/f$ noise time domain waveform and PSD of LD

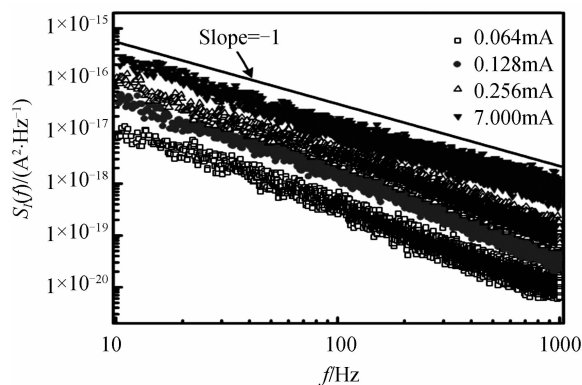


图 4 不同偏置电流下的 $1/f$ 噪声功率谱密度
Fig. 4 The $1/f$ noise PSD curves under different bias currents

在 10 Hz~1 KHz 频段内,功率谱的频率指数基本一致.

根据式(3)、式(4),计算得到的方差随尺度变化曲线、噪声幅度 A 和相关性 E 随偏置电流 I 的变化曲线如图 5. 图 5(a)中偏置电流分别为 0.064 mA、1 mA、4 mA,选取阶数为 3 的 Daubechies 小波作为小波基,由小波变换得到 $j=1\sim 14$ 共 14 个小波尺度,可明显看出,在尺度为 2~9 范围内, $\text{Var}(x'_k)$ 的对数随着尺度 j 的增大而线性增大,且随尺度的变化率(斜率)基本等于频率指数,表明尺度为 2~9 所对应频率范围内的噪声最具有 $1/f$ 噪声特性;而在尺度为 10~14 范围内,对应的方差尺度曲线已明显不满足式(4),表明尺度为 10~14 对应的频率范围(低频区)内的噪声不是纯的 $1/f$ 噪声,它的存在必然会对 $1/f$ 噪声参数的提取带来一定的误差,因此在计算相关性时选取具有最好线性度的尺度 6. 由式(3)可知, $1/f$ 噪声的小波系数的相关性随偏置电流的变化应与噪声幅度随偏置电流的变

化一致. 比较图 5(b)、(c),在 64~512 μA 电流范围内,拟合曲线斜率都很接近于 1,说明二者随偏置电流的变化具有较好的一致性,由于噪声幅度与噪声小波系数相关性近似满足 $A\propto I, E\propto I$,结合式(1)、式(3),则该电流范围内的 $1/f$ 噪声来自于有源区;在 1~7 mA 电流范围内,两曲线的变化均趋于平缓,一方面是由于有源区载流子与陷阱复合过程的增加,另一方面是由于有源区载流子浓度逐渐减小使得电流扩散逐渐减弱^[18],二者的共同作用使得噪声强度基本不随偏置电流而改变. 进一步细致对比,可发现在整个偏置电流范围内, E 随 I 的波动比 A 随 I 的波动平稳,且在 64~512 μA 电流范围内 E 与 I 的拟合曲线斜率更接近于频率指数,表明噪声幅度 A 并不是从纯的 $1/f$ 噪声中提取而来的,这与对图 5(a)中尺度 10~14 的分析相吻合. 因此相关性 E 随偏置电流的变化更能反映 $1/f$ 噪声整体特性与偏置电流的关系.

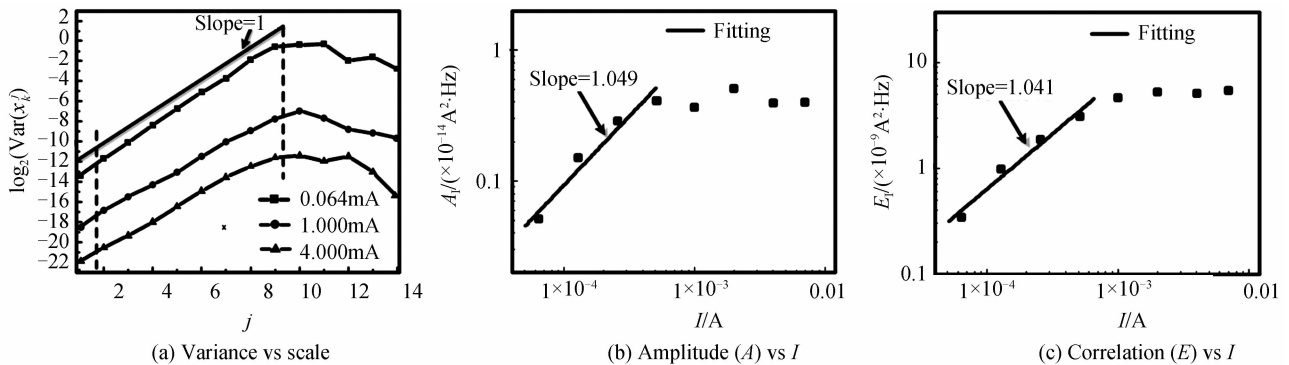


图 5 $1/f$ 噪声的幅度 A 、相关性 E 与 I 的关系

Fig. 5 The $1/f$ noise amplitude (A), correlation(E) vs I

为验证用小波系数相关性与偏置电流的关系来判断 $1/f$ 噪声来源的准确性和适应性,人为地向实测 $1/f$ 噪声时域波形中加入高斯白噪声,信噪比为 24 dB,加噪后 $1/f$ 噪声的方差随尺度变化曲线、噪声幅度 A 和相关性 E 随偏置电流 I 的变化曲线如图 6. 比较图 6(a)、图 5(a)可见,在尺度为 7~9 范围内,方差 $\text{Var}(x'_k)$ 的对数与尺度 j 仍保持良好的线性关系,在尺度为 1~6 范围内,方差随尺度的变化不再保持线性关系,已不满足式(4),而对应着 $1/f$ 噪声低频段的 10~14 尺度范围,该段几乎未受到高频白噪声影响,但因不符合 $1/f$ 噪声特性同样不予考虑. 因此对于加噪后的 $1/f$ 噪声,取尺度 8 作为最佳尺度来计算相关性. 比较图 6(b)和图 5(b),发现在整个低偏置电流范围内,噪声幅度 A 随偏置电流的变化规律在加入白噪声后发生了很大的变化(实线、虚线分别对应加噪前、后),且变化无规律可循,则当 $1/f$ 噪声受到其它噪声干扰时,用噪声幅度随偏置电流的趋势来分析 $1/f$ 噪声来源必然存在较大误差;比较图 6(c)和图 5(c),发现相

关性 E 在加噪前后随偏置电流的变化趋势基本一致(实线、虚线分别对应加噪前、后),且在 64 μA ~512 μA 电流范围内拟合曲线的斜率变化非常细微,根据式(1)、式(3)仍可正确判断出该偏置电流范围内的 $1/f$ 噪声来源于有源区,这与加噪前的分析结果是一致的. 这可由噪声幅度及小波系数的相关性二者的获得途径来解释,噪声幅度是由 $1/f$ 噪声频域数据经拟合并提取得到的,当 $1/f$ 噪声受白噪声干扰时,其时域及频域数据会随之发生相应的变化,则此时提取的噪声幅度已不再准确,因此会影响 $1/f$ 噪声来源的判断;而对于小波系数的相关性,它是由 $1/f$ 噪声的时域数据获得,也即对于受白噪声干扰的 $1/f$ 噪声,仍先根据 $1/f$ 噪声方差的与尺度关系的线性度最佳原则来选取出具有最好线性度的尺度,再利用该尺度对应频段内的 $1/f$ 噪声来计算其相关性,因此小波系数相关性是由具有最明显 $1/f$ 噪声特性的频率范围内的整体特性获得的,所以小波系数的相关性受白噪声干扰较小,且在分析 $1/f$ 噪声源时具有更高的准确性和更好

的适应性.白噪声亦称热噪声,其产生是温度变化的结果且不可避免,它是由导体中电子的随机热运动引起并存在于所有电子器件中,是一种功率频谱密度为常量的随机信号或随机过程,故半导体激光器噪声的实

际测量中也不可避免地伴随着高频白噪声.因此在白噪声背景下,电流 $1/f$ 噪声幅度更容易受到白噪声的干扰, $1/f$ 噪声相关性则基本不受白噪声的影响,故用相关性与偏置电流的关系来判断噪声源更准确可靠.

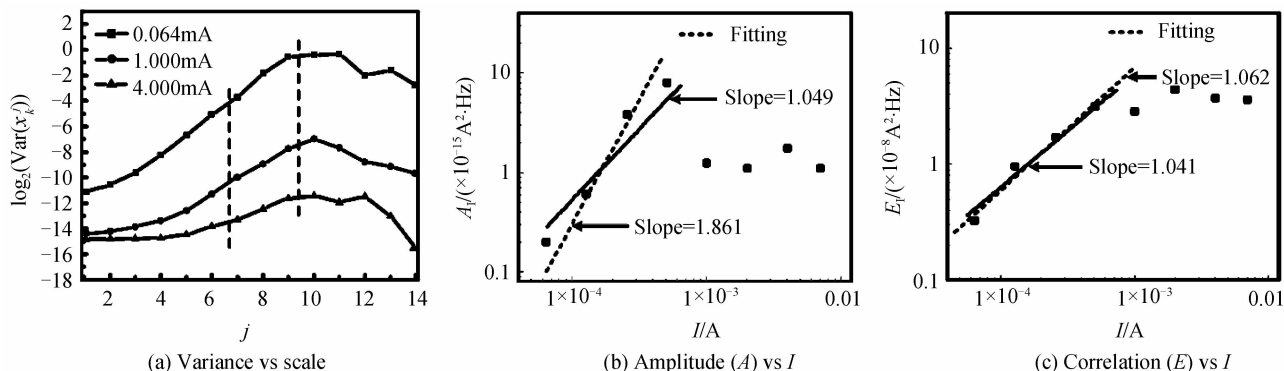


图6 白噪声背景下 $1/f$ 噪声的幅度 A 、相关性 E 与 I 的关系

Fig. 6 The $1/f$ noise amplitude (A), correlation (E) vs I in the white noise background

为进一步验证相关性方法的优势,在 $64 \sim 512 \mu\text{A}$ 电流范围内,引入一偏差量 σ 和加噪前后拟合曲线的斜率变化量 Δk 来定量描述加噪后的 A_I 、 E_I 随偏置电流的变化情况,不同信噪比 SNR 下的两种方法的偏差 σ 和斜率变化量 Δk 的计算结果如表 1.

表 1 不同信噪比下两种方法的偏差和斜率变化量

Table 1 The deviation and the variation of slope of the two methods under different signal-to-noise ratio

SNR/dB	σ_A	σ_E	Δk_A	Δk_E
14	0.3098	0.0380	1.2372	0.0234
16	0.3105	0.0358	1.0361	0.0225
18	0.3138	0.0393	0.8791	0.0244
20	0.1977	0.0365	0.8088	0.0220
22	0.1937	0.0366	0.9351	0.0221
24	0.2265	0.0357	0.8120	0.0210
26	0.2262	0.0365	0.7507	0.0222
28	0.2239	0.0369	0.8367	0.0227
30	0.2570	0.0367	0.7479	0.0225
32	0.2095	0.0364	0.8145	0.0221
34	0.2281	0.0365	0.8358	0.0221

$$\text{由 } \sigma_A = \sqrt{\frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 (A_m - A_i)^2}, \sigma_E = \sqrt{\frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 (E_m - E_i)^2}$$

计算相应偏差, A_i 、 E_i 分别取加噪前电流 $1/f$ 噪声的噪声幅度、小波系数相关性在前四个电流值下的归一化值, A_m 、 E_m 分别取加噪后电流 $1/f$ 噪声的噪声幅度、小波系数相关性在前四个电流值下的归一化值. Δk_A 为加噪前后 $A-I$ 拟合曲线的斜率变化量, Δk_E 为加噪前后 $E-I$ 拟合曲线的斜率变化量. 由表 1 中数据可明显看出, σ_A 及 Δk_A 的数值整体很大, 这表明加噪后噪声幅度随偏置电流的变化趋势很大程度上偏离了原规律而导致基本无规律可循, 也即噪声幅度受白噪声干扰的程度很大, 则在判断 $1/f$ 噪声来源时会产生较大偏差且不再准确, 且在不同信噪比下 σ_A 、 Δk_A 整体变化

很显著且波动较大, 表明在不同白噪声背景下用噪声幅度的方法判断 $1/f$ 噪声源时适应性较差; 而 σ_E 及 Δk_E 的数值整体很微小且很接近于 0, 表明加噪后小波系数相关性随偏置电流的变化规律基本与加噪前的规律保持一致, 也即小波系数相关性受白噪声干扰的程度很小, 则在不同白噪声背景下用小波系数相关性的方法判断 $1/f$ 噪声源更具有适应性. 上述结果进一步验证了用小波系数相关性随偏置电流的趋势来分析 $1/f$ 噪声源的优势. 故用噪声相关性替代传统方法中的噪声幅度作为分析参量更准确更实用.

4 结论

本文在较低偏置电流范围内, 测量了高功率 976nm InGaAs 量子阱半导体激光器的低频电噪声的时域波形和功率谱密度, 提出用小波变换系数的相关性取代噪声幅度来判断 $1/f$ 噪声源的方法, 计算了 $1/f$ 噪声小波变换系数的相关性和方差, 对加入白噪声前后 $1/f$ 噪声小波系数的相关性和幅度随偏置电流的变化进行了详细的对比实验. 对于较纯的 $1/f$ 噪声, 用噪声幅度和用小波变换系数相关性来分析 $1/f$ 噪声来源具有较好的一致性, 且后者略显优势; 对于白噪化后的 $1/f$ 噪声, 小波变换系数相关性因受白噪声影响很小而更具优势. 且在不同白噪声背景下, 本文提出的小波系数相关性方法在判断 $1/f$ 噪声源时具有更高准确性和更强适应性, 并可对半导体激光器质量和可靠性进行更有效地评价.

参考文献

- [1] WANG Li-jun, NING Yong-qiang, QIN Li, et al. Development of high power diode laser[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, 36(1): 1-19.
王立军, 宁永强, 秦莉, 等. 大功率半导体激光器研究进展[J]. *发光学报*, 2015, 36(1): 1-19.
- [2] WELCH D F. A brief history of high-power semiconductor

- lasers[J]. *Selected Topics in Quantum Electronics IEEE Journal of*, 2000, **6**(6): 1470-1477.
- [3] LI Ming-liang, WANG Zu-chao, WANG Guang-xiang, *et al.* Research on improving the reliability of semiconductor laser [J]. *Science Technology and Engineering*, 2006, **6**(16): 2545-2547.
李明亮, 王祖朝, 王广祥, 等. 提高半导体激光器可靠性的研究[J]. *科学技术与工程*, 2006, **6**(16):2545-2547.
- [4] LIU Bin, LIU Yuan-yuan, CUI Bi-feng. Long-term aging and failure analysis for 980nm laser diodes [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(09): 123-127.
刘斌, 刘媛媛, 崔碧峰. 980nm 半导体激光器长期老化结果及失效分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(09):123-127.
- [5] BOGOMOL'NYI V M. Theory of nondestructive testing in the electrical degradation of semiconductor devices [J]. *Measurement Techniques*, 2001, **44**(5): 513-517.
- [6] JONES B K. Electrical noise as a reliability indicator in electronic devices and components [J]. *IEE Proceedings-Circuits, Devices and Systems*, 2002, **149**(1): 13-22.
- [7] TAN Cheng-zhi, HU Gui-jun, SHI Xin-liang. Wavelet transform for analysis of semiconductor laser noise[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(4): 577-580.
檀承志, 胡贵军, 史新亮. 小波变换用于半导体激光器噪音信号分析[J]. *光子学报*, 2007, **36**(4):577-580.
- [8] HOOGE F N. The relation between $1/f$ noise and number of electrons[J]. *Physica B Condensed Matter*, 1990, **162**(3): 344-352.
- [9] BAO Jun-lin, ZHUANG Yi-qi, DU Lei, *et al.* A model for $1/f$ noise in optoelectronic coupled devices[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(9): 1359-1362.
包军林, 庄奕琪, 杜磊, 等. 光电耦合器件闪烁噪声模型[J]. *光子学报*, 2005, **34**(9):1359-1362.
- [10] ZHANG Shuang, GUO Shu-xu, GAO Feng-li, *et al.* Investigation on $1/f$ noise peak and its mechanism of laser diodes[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2008, **19**(9): 1170-1172.
张爽, 郭树旭, 郜峰利, 等. 激光二极管 $1/f$ 噪声峰及其产生机理的研究[J]. *光电子 • 激光*, 2008, **19**(9):1170-1172.
- [11] CHEN X Y, PEDERSEN A, HELLESØ O G, *et al.* Electrical noise of laser diodes measured over a wide range of bias currents [J]. *Microelectronics Reliability*, 2000, **40**(11): 1925-1928.
- [12] PARK S J, JEON D Y, AHN S E, *et al.* Static electrical characterization and low frequency noise of a-InHfZnO thin film transistors[J]. *Thin Solid Films*, 2013, **548**(12): 560-565.
- [13] GAO Feng-li, GUO Shu-xu, CAO Jun-sheng, *et al.* The characteristic of low-frequency electrical noise in high-power semiconductor laser diodes at low bias currents[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2008, **19**(4):449-452.
郜峰利, 郭树旭, 曹军胜, 等. 低偏置电流下大功率半导体激光器低频电噪声特性[J]. *光电子 • 激光*, 2008, **19**(4):449-452.
- [14] HOOGE F N. $1/f$ noise sources[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2004, **41**(11):1926-1935.
- [15] KLEINPENNING T G M. $1/f$ noise in p-n junction diodes [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A Vacuum Surfaces & Films*, 1985, **3**(1): 176-182.
- [16] CHEN X Y, PEDERSEN A, RHEENEN A D V. Effect of electrical and thermal stress on low-frequency noise characteristics of laser diodes [J]. *Microelectronics Reliability*, 2001, **41**(1): 105-110.
- [17] WORNELL G, OOOENHEIM A V. Signal processing with fractals: a wavelet-based approach [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1999, **105**(1): 18-18.
- [18] WU C M, YANG E S. Current suppression induced by conduction-band discontinuity in $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As-GaAs}$ N-p heterojunction diodes [J]. *Journal of Applied Physics*, 1980, **51**(4): 2261-2263.

Foundation item: The Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (No. 61204055), the National key scientific instrument and equipment development(No. 2011YQ040077), the Young Science and research Fund of Science and Technology Development Program of Jilin Province, China (No. 20130522188JH), the Natural Science Foundation of Science and Technology Development Program of Jilin Province(No. 20140101175JC)