

高功率半导体激光器结温与 $1/f$ 噪声的关系研究*陈海鹏¹⁾ 曹军胜²⁾ 郭树旭^{1)†}

1) (吉林大学集成光电子学国家重点联合实验室, 长春 130012)

2) (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 发光学与应用国家重点实验室, 长春 130033)

(2012年8月2日收到; 2013年1月17日收到修改稿)

高功率半导体激光器的结温上升, 不仅影响它的输出功率、斜坡效率、阈值电流和寿命, 而且还会产生光谱展宽和波长偏移. 因此, 热管理成为抽运激光器研发中的一个主要问题. 本文首先建立了噪声功率谱与结温变化的物理模型, 根据压缩感知理论, 将测量得到含有高斯白噪声和 $1/f$ 噪声的混叠复合噪声信号稀疏化后, 进行基追踪算法去噪, 通过改变算法的迭代次数及测量矩阵大小, 获得 $1/f$ 噪声电压功率谱与结温变化关系曲线, 避免了直接测量结温的复杂性. 通过数值估计结果, 可以较好地指导高功率半导体激光器的热管理工作.

关键词: $1/f$ 噪声, 结温度, 热阻, 高功率半导体激光器

PACS: 42.55.Px, 72.70.+m, 43.40.Le

DOI: 10.7498/aps.62.104209

1 引言

随着高功率半导体激光器的输出功率不断提高, 可靠性会随之降低. 如何保证在高功率输出的同时兼备高可靠性, 是激光器产业化中的一个重要问题. 影响可靠性的因素主要包括五个方面: 器件有源区温度, 又称结温; 灾难性腔面损伤 (COMD); 钎焊料的失效; 制冷器腐蚀和钎氧化. 其中结温的升高是限制激光器性能稳定的重要因素. 结温升高将使阈值电流增大、斜坡效率减小、输出功率下降和寿命缩短. 为提高器件的可靠性, 必须解决结温的影响.

国内外很多学者对半导体器件的低频噪声进行了长期的研究^[1-3], Wornell^[4]已在早期的工作中提出了对 $1/f$ 噪声参数最大似然估计的方法. 目前, 国内西安电子科技大学对半导体器件的去噪系统搭建也做了大量的工作. 我们已提出基于小波及稀疏分解的数学方法, 完成对 $1/f$ 噪声参数进行估计^[5]. 传统的噪声分离方法通常仅适用于有限频率范围内, 特别是当 $1/f$ 噪声和高斯白噪声之比小于

20 dB 时, 高斯白噪声会使 $1/f$ 噪声难以识别.

本文以 CS 封装 100 W, 808 nm 高功率半导体激光器为例, 建立了噪声功率谱与结温变化的物理模型, 根据压缩感知理论, 将测量得到含有高斯白噪声和 $1/f$ 噪声的混叠复合噪声信号稀疏化后, 进行基追踪算法去噪 (BPDN), 通过改变算法的迭代次数及测量矩阵大小, 获得 $1/f$ 噪声电压功率谱与结温变化关系曲线, 避免了直接测量结温的复杂性. 通过数值估计结果, 可以较好地指导高功率半导体激光器的热管理工作.

2 结温和 $1/f$ 噪声模型

2.1 激光器结温和寿命模型

对高功率单巴条半导体激光器, 结温由 (1) 式表示^[6]:

$$T_j = T_s + [(IV + I^2 R_s) - P_o] R_{th}, \quad (1)$$

其中, T_s 为激光器热沉温度, V 为结偏压, I 为工作电流, R_s 为串联电阻, P_o 为激光器的输出光功率, R_{th} 为热阻. 由 (1) 式可知, 高功率半导体激光器的

* 国家自然科学基金 (批准号: 60976065)、国家重大科学仪器设备开发专项 (批准号: 2011YQ040077)、国家自然科学基金青年基金 (批准号: 61006054) 和吉林省自然科学基金 (批准号: 201115125) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: guosx@jlu.edu.cn

有源区温度主要是由热沉温度和激光器的热阻决定,其中热沉温度由激光器的工作条件决定.

高功率半导体激光器的输出功率与热阻的关系和使用寿命与热阻的关系分别由(2)和(3)式表示:

$$P_o = \eta \exp[-R_{th}(IV - P_o)/T_1] \times \{I - I_{th} \exp[R_{th}(IV - P_o)/T_0]\}, \quad (2)$$

$$\tau \propto E_a/kT_j = E_a/k[T_a + (IV - P_o)R_{th}], \quad (3)$$

其中, η , I_{th} , T_1 和 T_0 分别为室温下激光器的转换效率、阈值电流、斜率特征温度和阈值特征温度, τ 为激光器寿命, E_a 为激活能, k 为玻尔兹曼常数, R_{th} 为热阻. 由(2)和(3)式可见,降低热阻可以增加高功率半导体激光器的输出功率,提高可靠性.

激光器的热阻包括芯片的热阻和封装过程带来的热阻,那么有效的热管理将是提高器件性能的关键.提高热管理主要从减小芯片热阻、减小贴片界面热阻和设计封装结构三个方面来实现.热阻的计算公式为

$$R_{th} = L/\xi A, \quad (4)$$

其中, L 为热传导距离, A 为热传导通道的截面积, ξ 为热传导系数.

由(4)式可知,要减小激光器的热阻,一是选择热传导系数大的材料,二是在材料确定的情况下,尽可能减小热传导距离或增大热传导通道截面积.

2.2 激光器 $1/f$ 噪声与结温的关系

在室温下, $1/f$ 噪声的电压功率谱可表示为^[7]

$$S_v(f)/V^2 = \alpha_H/Nf, \quad (5)$$

其中, $S_v(f)$ 为 $1/f$ 噪声的电压功率谱, V 为直流工作电压, α_H 为 Hooge 实验参数, N 为载流子总数, f 为工作频率. 另外, α_H 还可作为评价半导体器件可靠性的指标参数. 当高功率半导体激光器工作电流一定时,随着结温的波动变化,热阻也会出现波动变化. 结温与 $1/f$ 噪声电压功率谱的变化关系为

$$S_v(f) \propto I^2 \left(\frac{\partial R}{\partial T} \right)^2 \langle (\Delta T)^2 \rangle = V^2 \beta^2 \langle (\Delta T)^2 \rangle, \quad (6)$$

其中

$$\beta = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT}, \quad (7)$$

式中, β 是电阻随温度的变化系数, $\langle (\Delta T)^2 \rangle$ 是结温度的均方波动, ΔT 表示结温度的变化.

$$\langle (\Delta T)^2 \rangle = kT^2/C_v, \quad (8)$$

式中, C_v 表示半导体热容,在室温下, $C_v = 3Nk$, 这时

$$S_v(f) \propto V^2 \beta^2 T^2 / 3N. \quad (9)$$

综上所述,高功率半导体激光器的 $1/f$ 噪声电压功率谱的变化,与器件结温的变化有着密切关系. 大功率半导体激光器中的噪声通常包括白噪声, $1/f$ 噪声和 $g-r$ 噪声,其功率谱密度可表示为

$$S(f) = A + \frac{B}{f^\gamma} + \frac{c}{1 + (f/f_0)^2}, \quad (10)$$

式中 A 为白噪声幅度, B 和 γ 分别为 $1/f$ 噪声的幅度和频率因子指数, C 和 f_0 分别为 $g-r$ 噪声的幅度和特征频率. 在一般情况下,当器件禁带中引入深能级时,才会观测到明显的 $g-r$ 噪声,因此(10)式右边第三项是可以忽略的.

2.3 $1/f$ 噪声分析

图1是在不同工作温度下,采用频谱分析仪测出的高功率半导体激光器的 $1/f$ 噪声与高斯白噪声混叠后的噪声功率谱幅度与频率的关系. 我们首先需要将 $1/f$ 噪声提取出来,才能进一步研究它与结温的关系. $1/f$ 噪声是一种物理效应,它是由不同噪声能量密度的特性漂移引起的噪声. 实验表明, $1/f$ 噪声更多地存在于半导体器件中,是因为导电或者价带穿过电子隧道,使电子陷阱和其氧化层之间产生随机波动.

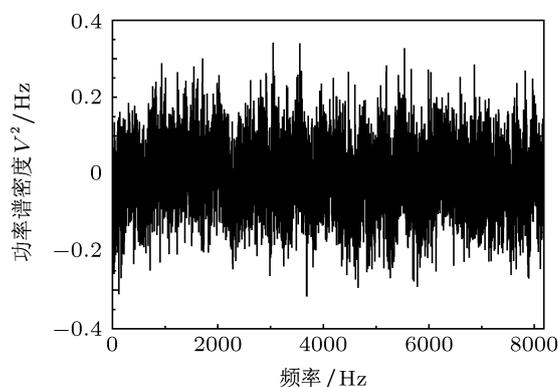


图1 高功率半导体激光器中的噪声功率谱

3 基追踪去噪算法

3.1 压缩感知

有限长度的实值离散时间信号 x 表示为 $x(n)$, $n = 1, 2, \dots, N$, 也可以看作是一个 $N \times 1$ 的列向量在 \mathcal{R}^N 空间内, 如果信号 x 可以展开为一组正交基序列 $\Psi = [\psi_1, \psi_2, \dots, \psi]$ 则信号 x 可以表示为如下公式^[8]

$$x = \sum_{i=1}^N \alpha_i \psi_i = \Psi \alpha, \quad (11)$$

其中 α 表示为信号 x 展开式的系数, $\alpha_i = \langle x, \psi_i \rangle$ 这里仅有 K 个 α_i 系数为非零项, $K \ll N$, 则信号 x 即是可压缩的信号, 并且具有稀疏表示, 成为 K 稀疏. 这里 Ψ 是有向量序列 ψ_i 的集合, 因此当我们用一个 $n \times m$ 矩阵 Φ 去观测信号 x , 可以得到一个长度 m 为观测向量 y , 依据上面的描述可知:

$$y = \Phi x. \quad (12)$$

在压缩感知信号重建问题里, (12) 式可以转化为一个 l_0 范数线性凸优化问题, 即

$$\min \|x\|_0 \text{ s.t. } y = \Phi x. \quad (13)$$

通常, l_1 范数最小化问题, 是通过 l_1 近似 l_0 范数, 这时 l_1 范数最小化的凸优化问题, 可以将求解过程化为一个线性规划问题.

常见解决 l_1 范数问题的方法 (即信号重构的算法) 有匹配追踪算法 (MP), 正交匹配追踪算法 (OMP) 和基追踪算法 (BP) 等. 本文采用 BPDN 来重建 $1/f$ 信号, 应用硬阈值控制其残差值, 以便重建估计的 $1/f$ 噪声.

3.2 BP 算法

BP 方法寻求从完备的 (过完备) 函数 (基) 集合中得到信号的最稀疏表示, 即用尽可能少的基来精确地表示原信号, 从而获得信号的内在本质特性. BP 方法采用表示系数的范数作为信号表示稀疏性的度量, 通过最小化 l_1 范数, 将信号稀疏表示问题定义为一类有约束的极值问题, 进而转化为线性规划问题进行求解. 此外, 基追踪可以在贪婪算法失效的情况下计算稀疏解, 同时也可保证信号的稀疏表达^[9].

$$\min \|\alpha\|_1 \text{ s.t. } \Phi \alpha = s. \quad (14)$$

在含噪情况下, 传统的 BP 算法无法起到很好的去噪效果. 文献 [10] 提出了基于 BP 算法的改进去噪方法 BPDN 算法, 为 BP 策略的含噪处理提供了新的思路. 考虑更改其约束条件:

$$\min_x \frac{1}{2} \|y - \Phi x\|_2^2 + \lambda \|x\|_1. \quad (15)$$

同时 (14) 式也可以表示为

$$\min_x \|x\|_1 \text{ s.t. } \|y - \Phi x\|_2^2 \leq \sigma. \quad (16)$$

采用 OMP 算法对 $1/f$ 噪声进行估计时, 我们利用了 $1/f$ 噪声在双对数情况下的线性特性, 以及 OMP 算法在重构信号时, 从主要至次要的迭代方法, 通过控制迭代次数获得理想且便于测量 γ 值的信号. 而 BPDN 算法则是通过迭代次数的增加, 逐步去除高斯白噪声, 两种方法的去噪策略完全不同.

4 实验结果与分析

分别采用 OMP 和 BPDN 算法进行 $1/f$ 噪声信号重建, 实验结果如图 2 和图 3 所示.

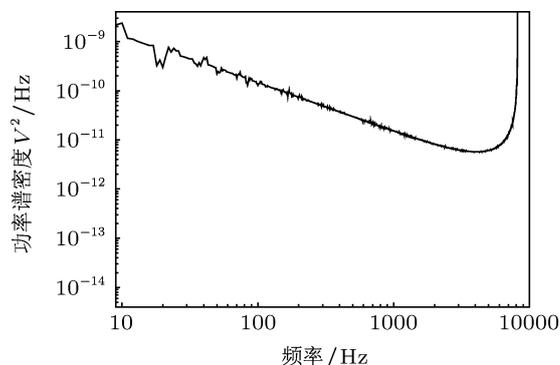


图 2 BPDN 的 $1/f$ 噪声估计

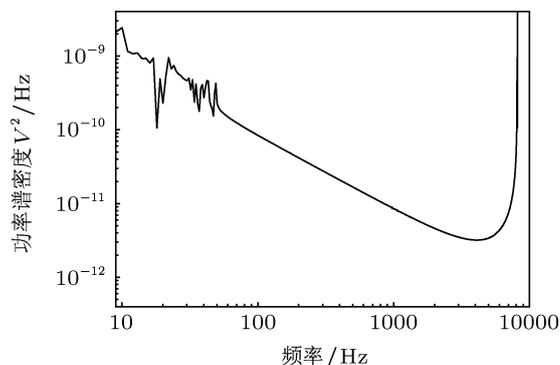


图 3 OMP 算法的 $1/f$ 噪声估计

BP 及 OMP 两种算法均可近似地重建原始信号, 但 BPDN 法效果更好, 尤其是在低频区域内 ($10\text{--}10^2\text{ Hz}$), 有效减少了高斯白噪声带来的震荡现象, 使得 γ 值的测量更加准确.

迭代次数的增加, 无疑会对计算效率产生影响. 而过少的迭代次数, 又无法有效去除能量较高的高斯白噪声. 我们固定测量矩阵的大小 $M = 0.9N$, 通过改变迭代次数, 观察去噪效果. 其中 M, N 分别表示观测矩阵的行与列数. 实验表明, 在迭代次数 $T = 20$ 时, 算法可以有效去噪, 且节省了大量的计算资源.

当迭代次数确定后, 改变观测矩阵中行与列比例时, 计算结果如图 4—6 所示.

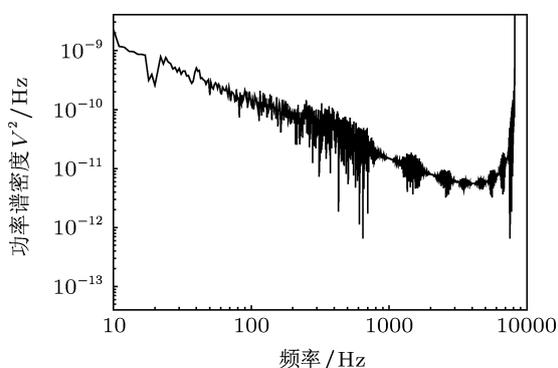


图 4 $M = 0.8N$

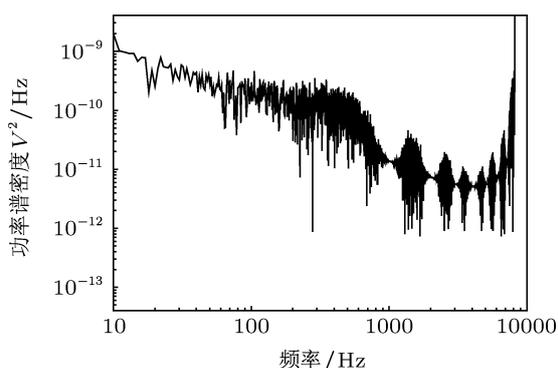


图 5 $M = 0.7N$

当 $M = 0.9N$ 时, 重建效果最佳. 随着 M 与 N 比例系数的减小, 重建效果越来越差, 当 $M = 0.6N$ 时, $1/f$ 噪声估计信号严重失真. 而降低 N 的大小, 对节省计算时间影响不大.

基于上述 $1/f$ 噪声信号重建工作, 我们得到高功率半导体激光器 $1/f$ 噪声与结温的关系曲线, 如图 7—9 所示.

图 7—9 分别给出三个不同样品高功率半导体

激光器的 $1/f$ 噪声, 在不同结温时 $1/f$ 噪声电压功率谱幅度变化情况. 在图 7—9 中, a, b 和 c 三条曲线分别对应工作温度为 300, 350 和 400 K 情况. 当工作温度逐渐升高时, $1/f$ 噪声功率谱幅度呈下降趋势. 任意两个温度下的 $1/f$ 噪声功率谱曲线纵向幅度差值越小, 表示激光器可靠性越好, 如图 7 所示. 反之, $1/f$ 噪声功率谱曲线纵向幅值的差值越大, 则表示激光器受工作温度影响越大, 其可靠性越差, 如图 9 所示.

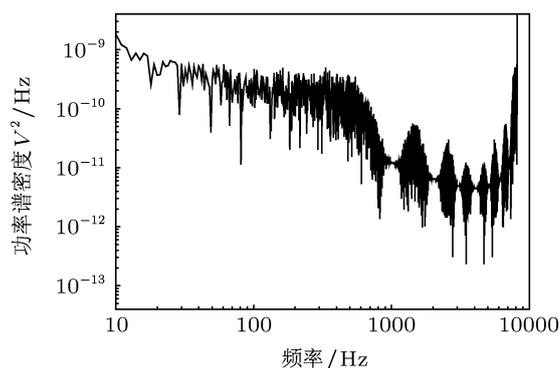


图 6 $M = 0.6N$

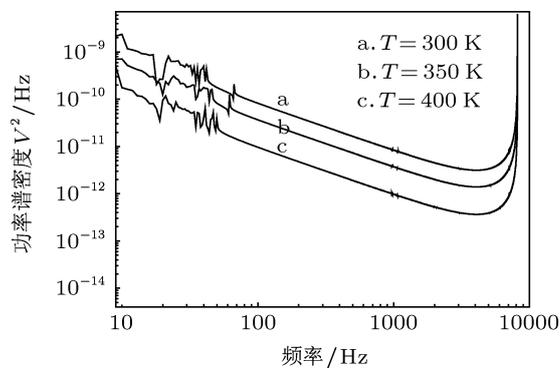


图 7 样品 1 激光器 $1/f$ 噪声与结温的关系曲线

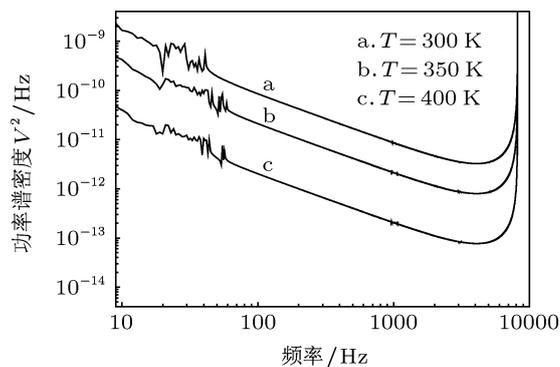


图 8 样品 2 激光器 $1/f$ 噪声与结温的关系曲线

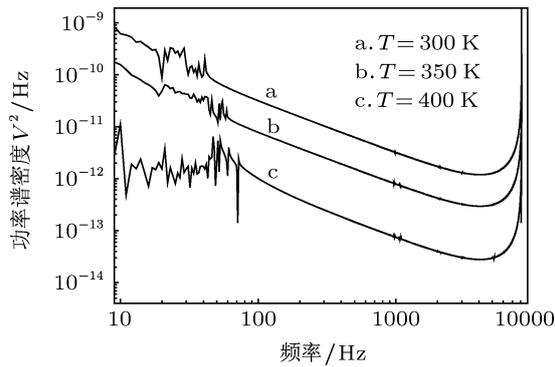


图9 样品3激光器 $1/f$ 噪声与结温的关系曲线

5 结论

本文重点分析器件结温与噪声功率谱的物理模型, 根据压缩感知理论, 将测量得到含有高斯白噪声和 $1/f$ 噪声的混叠复合噪声信号稀疏化后, 采用基追踪算法去噪, 通过改变算法的迭代次数及测量矩阵大小, 获得 $1/f$ 噪声电压功率谱与结温变化关系曲线, 避免了直接测量结温的复杂性. 通过对数值估计结果分析可知, 对应不同结温时, $1/f$ 噪声电压功率谱幅度变化不大的激光器可靠性较好.

[1] Hu J, Du L, Zhuang Y Q 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1384 (in Chinese) [胡瑾, 杜磊, 庄奕琪 2006 物理学报 **55** 1384]
 [2] Sun P, Du L, Chen W H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 067801 (in Chinese) [孙鹏, 杜磊, 陈文豪 2012 物理学报 **61** 067801]
 [3] Yu S Y, Guo S X, Gao F L 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5214 (in Chinese) [于思瑶, 郭树旭, 郜峰利 2009 物理学报 **58** 5214]
 [4] Wornell G W 1993 *Proc. IEEE* **81** 1428
 [5] Li Y, Guo S X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 034208 (in Chinese) [李扬, 郭

树旭 2012 物理学报 **61** 034208]

[6] Yong K S, Brandan F 2007 *Proc. SPIE* **6456** 645605-1
 [7] Hooge F N, Hoppenbrouwers A M H 1969 *Physica* **45** 386
 [8] Donoho D 2006 *IEEE Trans. Inform. Theory* **52** 1289
 [9] Chaitanya E, Daniel T, Eero P S 2011 *IEEE Trans. Signal Processing* **59** 4735
 [10] Chen S, Donoho D, Sauners M 1998 *SIAM J. Sci. Comput.* **20** 33

Temperature-dependent relation between junction temperature and $1/f$ noise in high power semiconductor laser*

Chen Hai-Peng¹⁾ Cao Jun-Sheng²⁾ Guo Shu-Xu^{1)†}

1) (State Key Laboratory of Integrate Optoelectronics, Jilin University, Changchun 130012, China)

2) (State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

(Received 2 August 2012; revised manuscript received 17 January 2013)

Abstract

The junction temperature rise may not only affect its output power, slope efficiency, threshold current and lifetime, but also will cause the spectral broadening and wavelength shift in a high power semiconductor laser. Therefore, thermal management becomes one of the main problems in research and development of pump laser. In this paper the physical model of the noise power spectrum and junction temperature variation is first established; according to the compression sensing theory, and after sparsing the measured aliasing composite noise signal containing Gaussian white noise and $1/f$ noise, the basic pursuit denoising algorithm is used to do denoising; through changing the iterations times of the used algorithm and the size of measurement matrix, the curves of the ration between noise voltage power spectrum and junction temperature variation are obtained, thereby avoiding the complexity of direct measurement of the junction temperature. The numerical estimation results can better guid us in doing the thermal management work in high power semiconductor lasers.

Keywords: $1/f$ noise, junction temperature, thermal resistance, high power semiconductor laser

PACS: 42.55.Px, 72.70.+m, 43.40.Le

DOI: 10.7498/aps.62.104209

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60976065), National Key Scientific Instrument and Equipment Development Project, China (Grant No. 2011YQ040077), National Natural Science Youth Foundation of China (Grant No. 61006054) and Natural Science Foundation of Jilin Province, China (Grant No. 201115125).

† Corresponding author. E-mail: guosx@jlu.edu.cn